

图 3.29 钢-混凝土组合板构件的前三阶位移模态振型

### 3.4.3 钢管混凝土的麦克风声模态测试

在钢管混凝土构件的 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 损伤区域划分 $5 \times 7$ 的均匀网格，并将每个网格交界点编号，将两个个麦克风传感器固定于点23和点29，做35点输入2点输出的脉冲锤击法声模态测试，布点和麦克风摆放如图3.30所示。

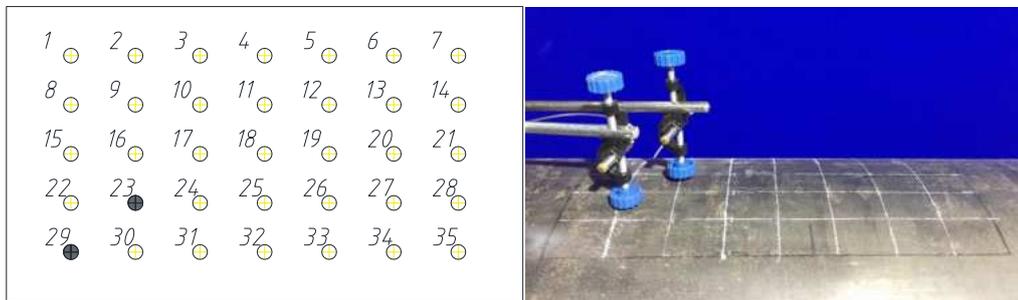


图 3.30 钢管混凝土构件的声模态测试测点布置图

麦克风以水平的角度置于23点和29点的正上空50mm处，力锤依次敲击1~35点，采样频率设置为51.2kHz，带宽25.6kHz。采样时间为0.1s，谱线数为16384，频率分辨率为1.5625Hz。每个测点取重复敲击三次的频域平均，测试的CMIF峰值图如图3.31所示。

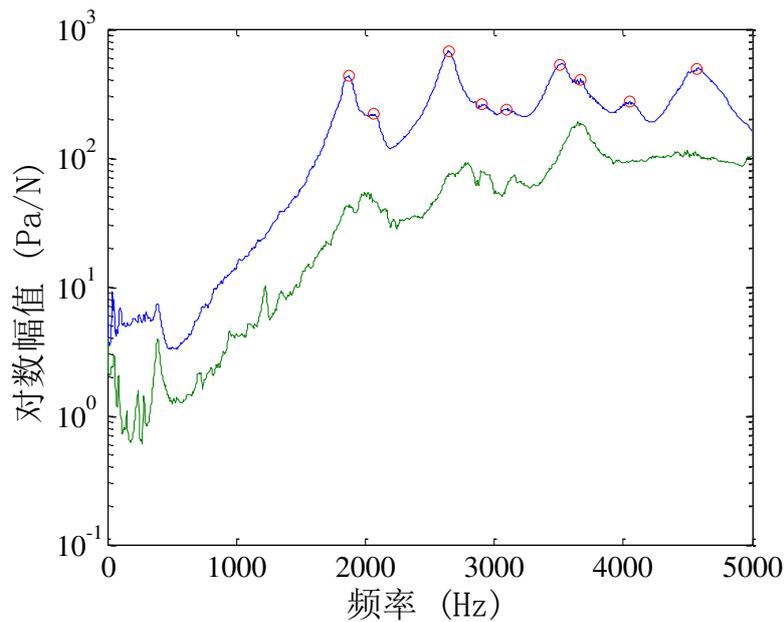


图 3.31 钢管混凝土构件的声模态测试 CMIF 峰值图

图3.31中, 50Hz以内的峰值频率不在局部脱空损伤板壳模态的考虑范围之内, 提取前九阶模态进行多项式拟合, 得各阶模态的频率和阻尼比如表3.6所示。

前三阶振型图如图3.32所示。

由图3.22可见, 该局部损伤的一阶模态的振型对应于平板的2-1阶模态, 三阶模态的振型对应于平板的2-2阶模态振型。

表 3.6 钢管混凝土构件的各阶声模态频率及阻尼比

模态	频率 (Hz)	阻尼比 (%)
1	1871.88	2.66
2	2065.62	3.05
3	2643.75	2.38
4	2906.25	4.42
5	3090.62	5.01
6	3506.25	2.26
7	3668.75	1.70
8	4046.87	2.96
9	4565.62	1.74

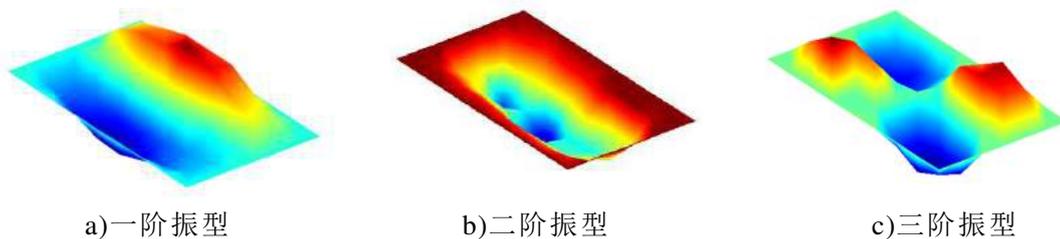


图 3.32 钢管混凝土构件的前三阶声模态振型

值得注意的是, 开口柱壳的一阶振型在短边方向上出现了一个波峰与一个波谷, 振型的节线为柱壳模型的轴向中线, 为当麦克风冲击共振法的激励点位于轴向中线上时, 麦克风将无法识别出一阶模态频率, 而测得的最低频率峰值对应壳体的第二阶模态, 对比前述不同损伤工况的麦克风冲击共振测试频响函数图中的频率峰值, 可以发现, 试验测得的频响函数的最低频率峰值位于2090Hz左右, 这与模态测试的二阶模态频率大致符合。

### 3.5 麦克风阵列损伤成像测试

以上试验证明了麦克风冲击共振测试识别板壳振动的可行性。实际应用中, 损伤的区域无法预知, 通过单点的力锤敲击无法从声压信号的频响函数判断该点是否存在脱空损伤。当在一块区域内均匀敲击多个网格点, 将各个网格点的声压

频响函数进行对比，位于脱空区域内的各点频响函数将呈现相同的频率峰值，但各峰值频率的幅值各不相同。位于非脱空区域的频响函数将呈现出幅值低。频率峰值无规律的特点。以此可以粗略判断脱空区域的位置。引入声压模态柔度的概念，通过麦克风阵列测试得到网格各点模态柔度的声压表示形式，由于脱空区域的振动类似板壳振动，故位于脱空区域的声压模态柔度预计将远远大于非脱空区域的柔度。

分别对钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件的 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，15mm厚的矩形局部脱空损伤工况进行基于麦克风阵列的冲击共振损伤成像测试。

### 3.5.1 麦克风阵列损伤成像测试原理

模态柔度的概念最早在1975年，由Clough RW等<sup>[113]</sup>提出，通过多参考点的脉冲锤击法测试等手段可以测出结构的模态柔度。1992年，Raghavendrchar M等<sup>[114]</sup>将其作为反映现役桥梁的结构状况的可靠指标。传统的位移模态分析中，通常有两种方法计算模态柔度：

一种为基于圆频率的柔度计算方法，通过自然频率与模态振型的矩阵相乘求结构的模态柔度矩阵：

$$[f_{i,j}] = [U][\Omega][U]^T \quad (3.1)$$

$$f_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{\phi^k(i)\phi^k(j)}{\omega_k^2} \quad (3.2)$$

其中 $[f]_{n \times n}$ 为模态柔度矩阵， $[U]$ 为质量归一的振型矩阵， $[\Omega]$ 为模态圆频率平方的倒数按降序排列的对角矩阵。 $\phi^k(i)$ 和 $\phi^k(j)$ 为 $k$ 阶模态中的第 $i$ 点和第 $j$ 点的振型模态分量， $\omega_k$ 为第 $k$ 阶圆频率。由于实际中难以获得精确的模态质量矩阵，因此难以获得质量归一的振型矩阵，限制了该方法的应用。

另一种方法为基于频响函数 $\omega=0$ 的模态柔度计算方法，由

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left[ \frac{\psi_{pr}\psi_{pr}}{M_{Ar}(j\omega - \lambda_r)} + \frac{\psi_{pr}^*\psi_{pr}^*}{M_{Ar}^*(j\omega - \lambda_r^*)} \right] \quad (3.3)$$

得，当 $\omega=0$ 时有

$$H_{pq}(\omega=0) = \sum_{r=1}^m \left[ \frac{\psi_{pr}\psi_{pr}}{M_{Ar}(-\lambda_r)} + \frac{\psi_{pr}^*\psi_{pr}^*}{M_{Ar}^*(-\lambda_r^*)} \right] \quad (3.4)$$

由于位移频响函数的计算过程中，将加速度频响函数除以 $1/j\omega^2$ ，因此当 $\omega \rightarrow 0$ 时，频响函数的截距趋于无穷大，因此模态柔度常由各阶模态的柔度之和求得。

由前述理论章节可知，当用声压传感器进行声模态测试时，其声压频响函数的表达式为：

$$\left[ H_{ij}^p(\omega) \right]_r = \frac{\psi'_{ir} \psi_{jr}}{m_r [(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r \omega_r \omega]} \quad (3.5)$$

其中

$$\int_s \frac{-\omega^2 \rho_0 e^{-jkR}}{2\pi R} \psi_{mr} dS = \psi'_{ir} \quad (3.6)$$

当  $\omega \rightarrow 0$  时,

$$H_{ij}^p(\omega=0) = \sum_{r=1}^m \left[ \frac{\psi'_{ir} \psi_{jr}}{m_r \omega_r^2} \right] \quad (3.7)$$

定义声压模态柔度的概念如式 (3.7)，该式的形式与加速度传感器所测得的模态类似，只有  $\psi'_{ir}$  的值发生了改变，声压模态柔度的物理意义为单位力在  $j$  点激励下，在  $i$  点处产生的声压大小。

由于声压传感器测得的结果无须像加速度传感器所测得的结果一样须除以  $1/j\omega^2$  才能转化为位移模态，故可以直接求得单点输入单点输出情况下各激励信号与响应信号之间的频响函数，并求得  $\omega \rightarrow 0$  时的结果，此数值即为结构振动的声压模态柔度。

由前述麦克风冲击共振测试可知，脱空区域的钢板与钢壳在点激励下振动与声压响应十分明显，而非脱空区域的钢板与钢壳在点激励下声压响应远远小于脱空点的响应，故作出假设：当响应点与激励点位于同一位置时，得到的声压模态柔度作为该点的损伤判断依据。

但试验中敲击各点得到的频响函数结果并不代表理论上准确的声压模态柔度值，这是因为：

(1) 上述模态分析的所有结论都是基于结构振动所产生的声压响应。而实际应用中，力锤敲击结构所造成的声场并不仅仅由振动产生的声波组成，还包括锤头与表面冲击碰撞所产生的直接声波，以及冲击带来的泄露瑞雷波。激励点上空拾取到的声波包括振动辐射的声波与直接声波，由前述试验可知，虽然直接声波的声压振幅较小，不足以对振动响应结果产生质变的影响，但测得的频响函数信号中不可避免地携带这些噪声信号。

(2) 上述分析中任意一点的声压响应均是无限接近于该点的结构表面处的理想结果。麦克风冲击共振试验中，麦克风不可避免地将置于激励点上空某一位置，为了不影响敲击的操作，传感器通常距离被测表面 30mm~50mm。由振声互易性原理章节可知，随着测点与振动表面的距离越大，其声功率的转换系数  $\beta$  约小，振动信号转化为声压信号的比例也就越小，因此试验测得的频响函数信号无法准确反映该点的声压模态柔度。

故实际试验中按照此方法求得的数据只能称为声压模态柔度的近似值。虽然试验无法求得准确的声压模态柔度值，但在各测点的力锤敲击力度接近，且声压

传感器垂直距离保持不变的情况下，可以使得激励产生的直接声波对声压信号的影响大致保持不变，且声功率转化系数 $\beta$ 同样保持不变。排除了上述两个因素对结果的影响后，可以在测试区域划分网格，敲击各网格点，将得到的声压模态柔度近似值按照网格划分方法排列成矩阵，作出此矩阵的云图，据此判断该测量区域是否存在局部脱空损伤。脱空区域一点敲击的典型声压函数频响曲线如图3.33所示。

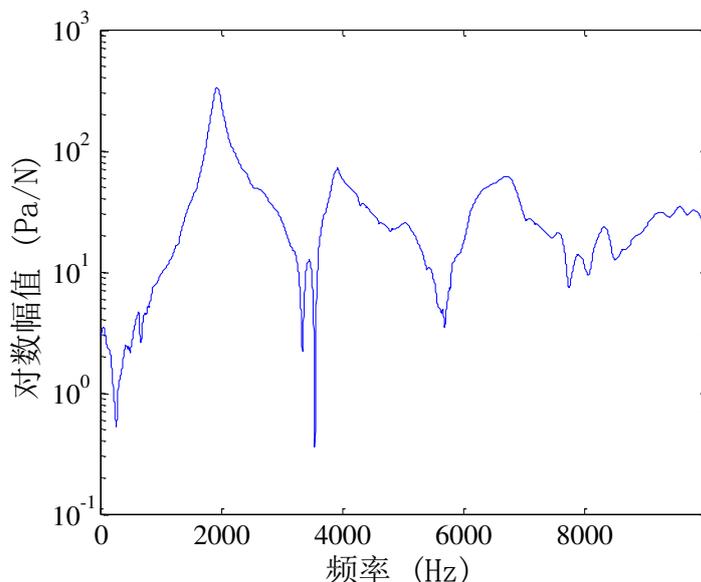


图 3.33 脱空区域的单点声压频响函数图典型信号

由板壳振动理论可知，结构的自振频率为全局变量，即当多个激励点均位于同一片损伤区域时，能识别出相同的自振频率。这与前述麦克风冲击共振测试的结论相符，由于存在直接声波与造成的不可预知的噪声干扰，试验中存在某些损伤工况的高频段自振频率无法准确识别，但所有损伤工况均能识别出最低一阶的自振频率。因此，除了上述声压模态柔度近似值的损伤判断原则外，同一损伤区域的测点频响函数应均能识别处相近的一阶频率值，可作为损伤判断的辅助验证指标。

### 3.5.2 钢-混凝土组合板构件的损伤成像测试

将钢-混凝土组合板构件的 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，15mm厚矩形局部脱空损伤在钢板表面划分成 $10 \times 10$ ，间距为25mm的网格，将5个麦克风紧密地排成一列，依次置于各列网格交点的上空50mm处，如图3.34所示。

依次敲击各行各列的每个网格交点，每敲击一点，拾取该点正上空的麦克风声压信号，与力信号作频响函数，提取其频响函数的声压模态柔度近似值，对于上述 $10 \times 10$ 网格，求得各点的声压模态柔度近似值如表3.7所示。

表3.7中第3~8行，3~8列的网格数据点为损伤区域内的测点，从数据中可以看出，在局部脱空损伤区域外的声压模态柔度近似值绝大部分介于 $0 \sim 0.3 \text{Pa/N}$ 之间，

脱空损伤区域内边缘的测点声压模态柔度近似值绝大部分介于1~10Pa/N之间，损伤的中央区域声压模态柔度近似值达到10~30Pa/N。将表3.7中的数据矩阵绘制成损伤云图如3.35所示。同时，损伤中央区域的测点频响函数在1950Hz附近均能识别出明显的频率峰值，与理论预期相符。

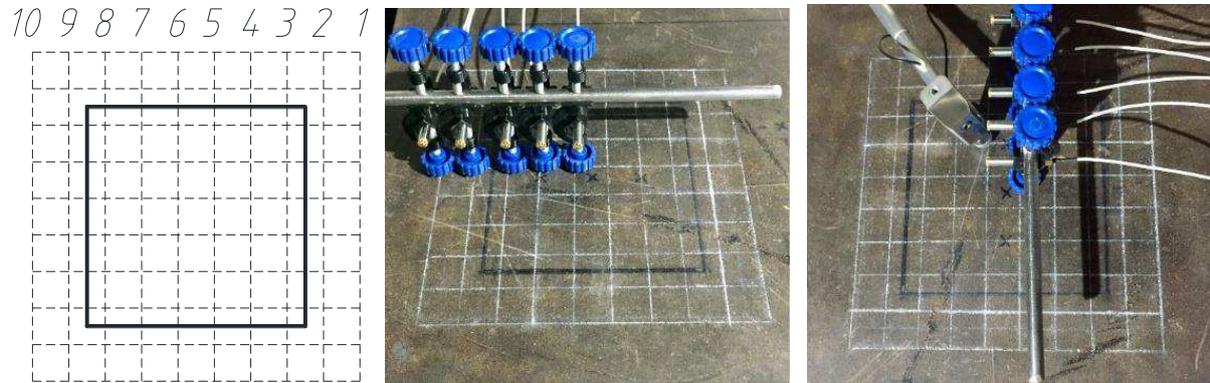


图 3.34 钢-混凝土组合板构件麦克风冲击共振法损伤成像测试

表 3.7 钢-混凝土组合板构件各网格点的声压模态柔度近似值（单位：Pa/N）

声压 柔度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.258	0.298	0.284	0.249	0.227	0.195	0.131	0.268	0.272	0.230
2	0.254	0.326	0.266	0.264	0.203	0.239	0.151	0.287	0.241	0.183
3	0.187	0.264	0.321	1.078	3.289	5.129	2.553	0.248	0.221	0.115
4	0.229	0.265	0.321	5.206	12.523	15.664	9.994	1.010	0.212	0.246
5	0.192	0.248	0.315	10.056	22.716	26.142	16.257	2.855	0.241	0.263
6	0.198	0.224	0.284	10.276	21.305	25.221	15.853	3.631	0.190	0.188
7	0.157	0.080	0.235	6.475	13.684	17.617	12.189	2.449	0.208	0.251
8	0.145	0.439	0.304	1.224	3.964	5.908	3.858	0.519	0.247	0.255
9	0.188	0.201	0.334	0.285	0.241	0.245	0.272	0.218	0.226	0.244
10	0.170	0.257	0.272	0.356	0.298	0.224	0.250	0.190	0.278	0.343

图 3.35 中，白色虚线框以内区域为脱空损伤区域，由此可以看出，通过麦克风冲击共振测试测量一定面积大小的脱空损伤区域时，可以识别出损伤的具体位置与大致形状。测点布置得越密，则损伤区域判断的精度越高。但损伤边缘的声压模态柔度近似值识别值偏小，与非损伤区域的声压模态柔度近似值接近，反映当激励点位于损伤区域与非损伤区域的交界处时，损伤识别的精确性将受到影响。

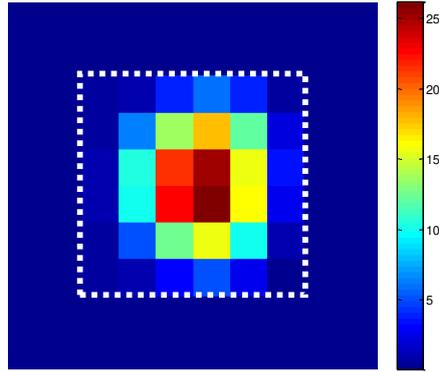


图 3.35 钢-混凝土组合板构件脱空识别成像云图

### 3.5.3 钢管混凝土构件的损伤成像测试

将钢管混凝土构件的 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，15mm厚矩形局部脱空损伤在钢壳表面同样划分成 $10 \times 10$ ，间距为25mm的网格，将5个麦克风紧密地排成一列，依次置于各列网格交点的上空50mm处，如图3.36所示。

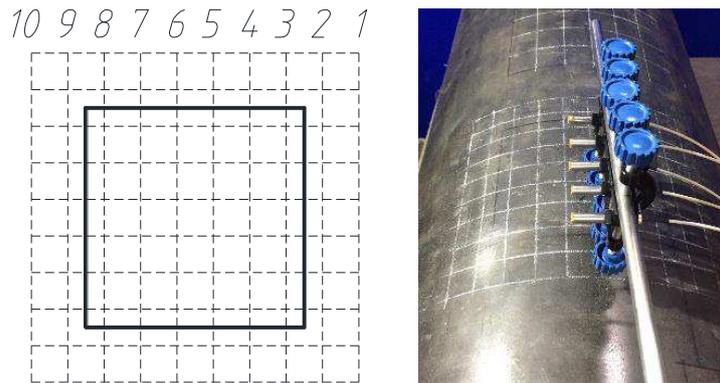


图 3.36 钢管混凝土构件麦克风冲击共振法损伤成像测试

依次敲击各行各列的每个网格交点，每敲击一点，拾取该点正上空的麦克风声压信号，与力信号作频响函数，提取其频响函数的声压模态柔度近似值，对于上述 $10 \times 10$ 网格，求得各点的声压模态柔度近似值如表3.8所示。

表中第3~8行，3~8列的网格数据点为损伤区域内的测点，从数据中可以看出，在局部脱空损伤区域外的声压模态柔度近似值绝大部分介于 $0 \sim 0.3 \text{ Pa/N}$ 之间，脱空损伤区域内的测点声压模态柔度近似值绝大部分介于 $1 \sim 5 \text{ Pa/N}$ 之间，将表3.8中的数据矩阵绘制成损伤云图如3.37所示。同时，损伤中央区域的测点频响函数在3300Hz附近均能识别出明显的频率峰值，与理论预期相符。

图3.37中，白色虚线框以内区域为脱空损伤区域，由此可以看出，通过麦克风冲击共振测试测量一定面积大小的脱空损伤区域时，可以识别出损伤的具体位置与大致形状，与钢-混凝土组合板构件相同，测点布置得越密，则损伤区域判断的精度越高。

表 3.8 钢管混凝土构件各网格点的声压模态柔度近似值（单位：Pa/N）

声压 柔度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.335	0.318	0.317	0.156	0.167	0.323	0.364	0.321	0.248	0.255
2	0.311	0.252	0.237	0.152	0.145	0.259	0.353	0.369	0.257	0.280
3	0.498	0.299	0.300	0.530	0.432	0.407	0.609	0.326	0.224	0.174
4	0.363	0.235	0.598	1.031	0.729	0.695	0.933	0.734	0.224	0.146
5	0.343	0.259	0.626	0.832	0.791	0.698	1.159	0.715	0.250	0.214
6	0.344	0.252	0.677	0.725	0.813	0.735	0.760	0.751	0.172	0.184
7	0.450	0.183	0.452	0.484	0.520	0.475	0.508	0.501	0.156	0.267
8	0.349	0.341	0.332	0.435	0.423	0.496	0.387	0.398	0.176	0.255
9	0.286	0.265	0.293	0.211	0.200	0.209	0.232	0.247	0.298	0.281
10	0.287	0.332	0.391	0.320	0.375	0.289	0.269	0.209	0.372	0.372

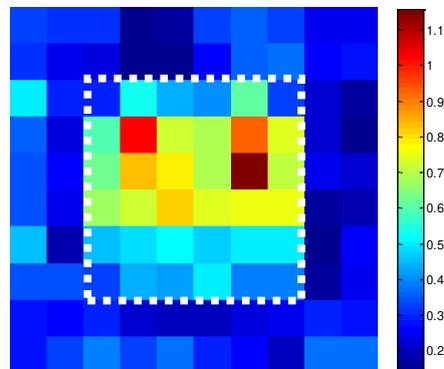


图 3.37 钢管混凝土构件脱空识别成像云图

### 3.6 本章小结

麦克风冲击共振试验的基本思路是：采用力锤冲击激励损伤区域的局部钢板和钢壳，采用麦克风声压传感器拾取激励点上空的声压响应信号，并对响应信号进行频谱分析，对比损伤区域与非损伤区域的信号频谱特性，以识别激励部位是否存在大面积的截面脱空损伤。

(1) 对钢-混凝土组合板试件进行试探性试验分别探究麦克风声压测点与激

励点相对的垂直位置、水平位置、放置角度对响应信号频谱的影响。结果与理论预期一致，即当麦克风测点与激励点的水平距离与垂直越远，板壳振动对麦克风测点的声辐射功率越小，测得响应信号的幅值也越小，但信号的基本频谱特征保持不变。

(2) 对钢-混凝土组合板试件与钢管混凝土试件中各损伤工况的不同测点进行麦克风冲击共振试验。探究不同面积、形状和深度的脱空损伤对信号频响函数的影响。结果表明，结果表明，麦克风冲击共振法适用于边长尺寸不小于150mm以上的局部脱空损伤的检测与识别，且损伤尺寸越大，其响应的一阶频率越低。

(3) 分别利用麦克风传感器与加速度传感器进行钢-混凝土板的局部脱空损伤的模态测试。结果表明，麦克风测得的声压信号能够准确地反映局部脱空损伤板壳的振动特性。利用麦克风传感器进行钢管混凝土构件的局部脱空板壳的声学模态试验，测得钢管混凝土局部脱空损伤的模态信息，对比前述不同损伤工况的麦克风冲击共振测试频响函数图。可以发现，钢管混凝土局部脱空损伤的二阶频率与麦克风冲击共振单点测试得到的频响函数的最低频率峰值大致符合。

(4) 针对钢-混凝土组合板试件与钢管混凝土试件特定的损伤工况进行基于麦克风阵列的冲击共振法损伤成像测试绘出损伤云图。结果表明，该方法可以有效识别局部脱空损伤，声压模态柔度近似值较大的区域可判断为存在局部脱空损伤的区域，为麦克风冲击共振测试在实际工程中的应用奠定基础。

## 第4章 显式动力学有限元模拟与试验模态分析

### 4.1 引言

为了进一步验证上述理论与试验的可靠性,本文利用ABAQUS有限元模拟软件,对点脉冲激励下钢-混凝土组合构件表面的声场分布进行了显式动力学声学分析,模拟出空气中各点的声压分布场;并对典型损伤工况的局部脱空损伤进行了模态分析及其在点脉冲激励下的振动响应信号模拟,将上述模拟结果与麦克风及加速度传感器测试的结果进行对比,证明了麦克风冲击共振法识别钢-混凝土界面脱空损伤的可靠性。

### 4.2 钢-混凝土组合板构件麦克风冲击共振测试

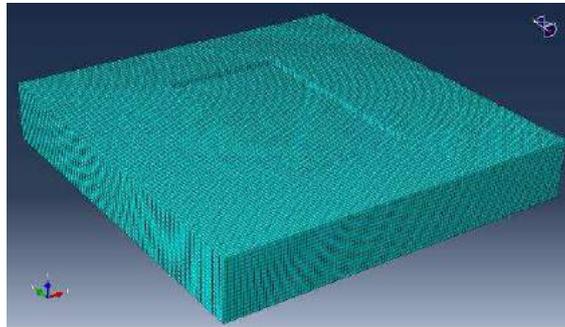
由声波的基础理论可知,流-固半空间中的固体表面在点激励下将在固体内部产生纵波与横波,在流体中产生直接声波与泄露瑞雷波<sup>[52]</sup>。本文利用ABAQUS/Explicit 3-D进行显示动力学分析,分别模拟完好无损与存在一定面积脱空损伤的钢-混凝土组合板构件和钢管混凝土构件在点脉冲激励下,空气中的声波传播情况。

#### 4.2.1 流-固耦合有限元模型的建立

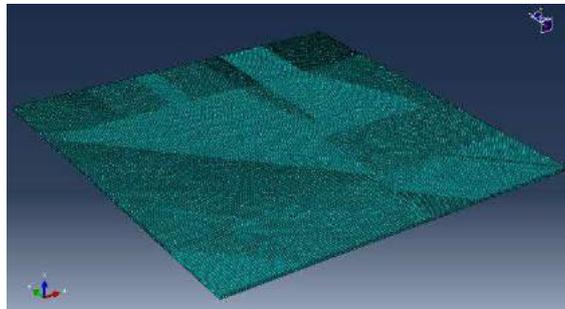
在钢-混凝土组合板构件的分析中,混凝土板部件采用实体单元C3D8,混凝土板的平面尺寸设为 $600 \times 600 \text{mm}^2$ ,厚度设为120mm,钢板部件采用实体单元C3D8,平面尺寸与混凝土板保持一致,钢板厚度设为6mm,空气部件的平面尺寸与钢板及混凝土板部件保持一致,其厚度设定为300mm,采用实体单元AC3D8,其声介质的体积模量设为 $142000 \text{N/m}^2$ 。密度为 $1.2 \text{kg/m}^3$ 。以 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤为例,制作损伤时,在混凝土的外表面局部做凹陷处理,使得凹陷部分的混凝土上表面与钢板下表面之间不存在接触和相互作用。在没有损伤的部分,混凝土上表面与钢板下表面的接触设置为绑定约束,钢板上表面与空气下表面的接触设置为绑定约束,钢板与空气的交界表面处,声导纳设为 $1.28 \times 10^{-8} + 2 \times 10^{-5}i$ <sup>[115]</sup>。对空气部件的另外5个外表面,将其声反射设为0,并将板构件的底面设置成固支的边界条件。网格划分方面,混凝土部件的网格大小为5mm,钢板划分的网格大小为2mm,空气部件在平面尺寸上的网格尺度为2mm,为了节约计算空间,在表面的法向上的网格高度从2mm渐变至5mm。网格划分情况如图4.1所示。

在钢管混凝土构件的分析中,混凝土柱的部件采用实体单元C3D8,混凝土部

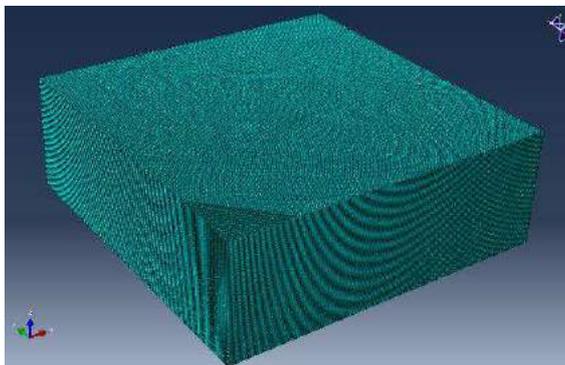
件的外径382mm，轴向高度为600mm，钢管部件采用实体单元C3D8，外径400mm，轴向高度为600mm，钢管壁厚度设为6mm。空气部件的轴向高度与钢管混凝土尺寸一致，其径向厚度设定为300mm，采用实体单元AC3D8，其声介质的体积模量设为 $142000\text{N/m}^2$ 。密度为 $1.2\text{kg/m}^3$ 。以 $200\times 350\text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤为例，制作损伤时，在混凝土圆柱体的外表面局部做凹陷处理，使得凹陷部分的混凝土柱外表面与钢管内表面之间不存在接触和相互作用。在没有损伤的部分，混凝土柱外表面与钢管内表面的接触设置为绑定约束，钢管外表面与空气部件内表面的接触设置为绑定（Tie）约束。对空气部件的其他外表面，将其声反射设为0，并将钢管圆底面与圆顶面进行固支的边界条件设置。网格划分方面，混凝土部件的网格大小为5mm，钢管部件划分的网格大小为2mm，空气部件在钢管外壁上的网格尺度为2mm，为了节约计算空间，在表面的法向上的网格高度从2mm渐变至5mm。网格划分情况如图4.2所示。



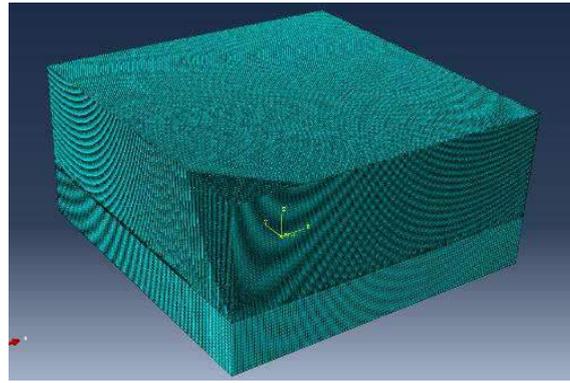
a)混凝土部件网格划分



b)钢板部件网格划分

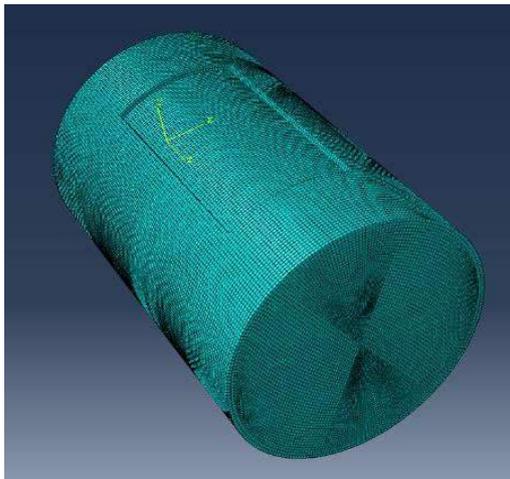


c)空气部件网格划分

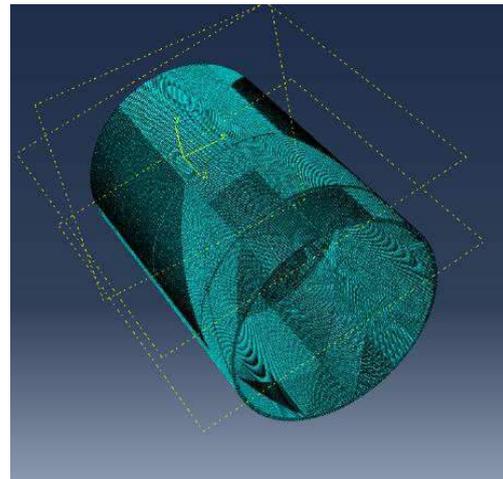


d)整体网格划分

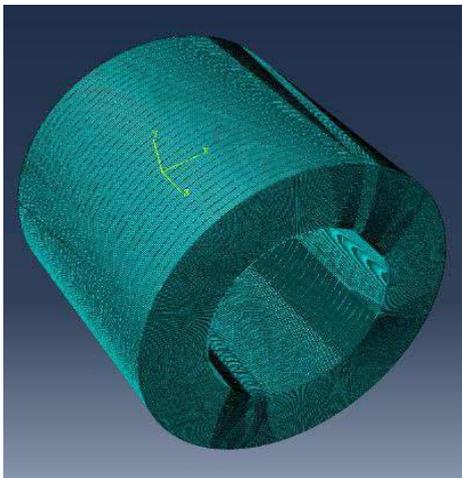
图 4.1 钢-混凝土组合板声学模型网格划分



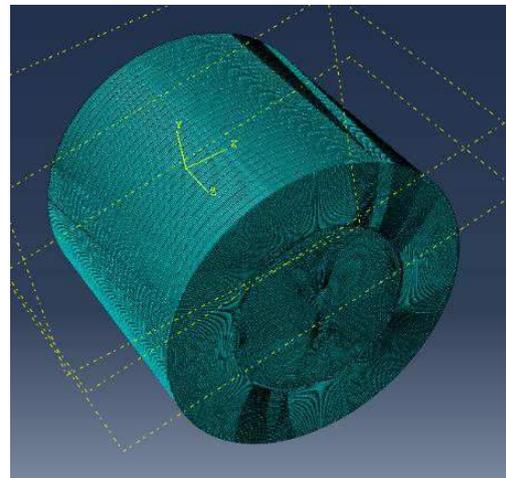
a)混凝土部件网格划分



b)钢壳部件网格划分



c)空气部件网格划分



b)整体网格划分

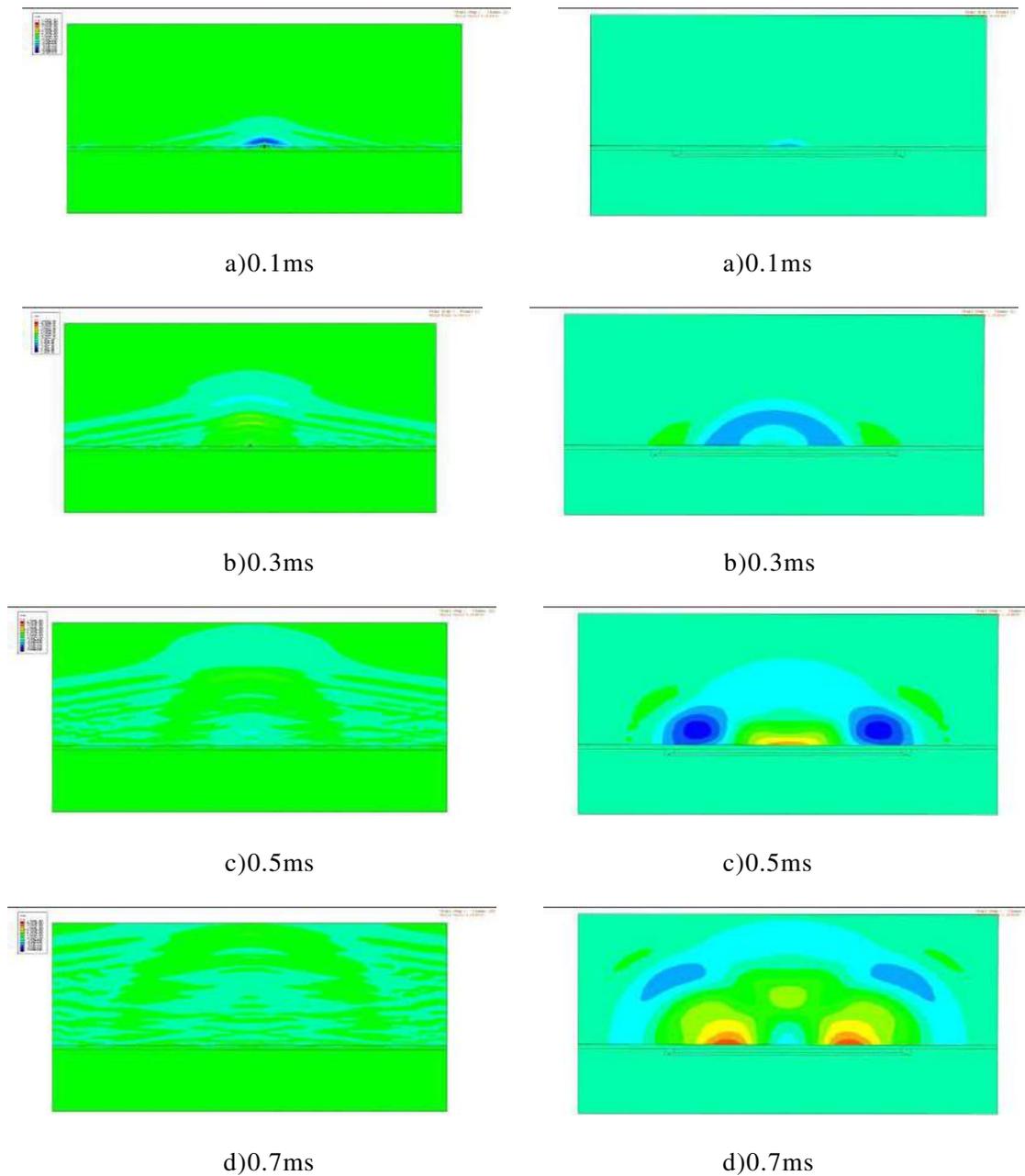
图 4.2 钢管混凝土构件声学模型网格划分

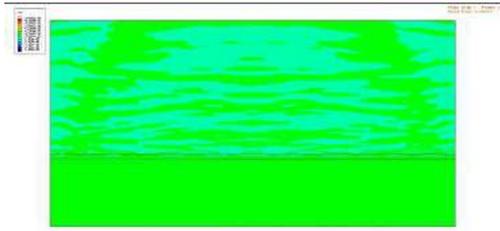
钢-混凝土组合板与钢管混凝土模型的几何、约束与网格建立好后，将构件设置显式动力分析步，分析时间为1ms。在构件钢表面的中心处施加正弦荷载， $f(t) = A\sin^2(\pi t/T)$ ，其中 $T=0.3\text{ms}$ ， $0 \leq t \leq T$ ，令 $A=1000$ ，与力锤的敲击力度大致相符。将各部件组装后，进行计算分析。在如此精细的网格划分条件下，每个构件工况的计算机运行时间长达10小时。

上述模型的建立为存在脱空损伤的钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件，除此之外，另建立两个不存在脱空损伤的模型，其参数与上述模型保持一致。分别对无损构件与存在脱空的钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件进行点激励下的响应声压场计算。

#### 4.2.2 非脱空构件与脱空构件在点激励下的声场分布

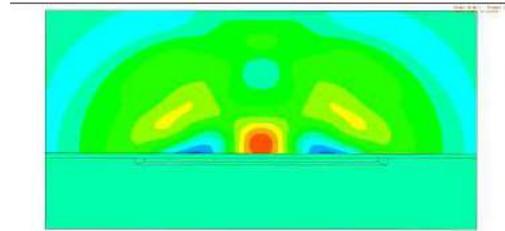
对于钢-混凝土组合板构件，分别对无损构件与存在 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 矩形脱空损伤的构件进行激励后1ms内的声场分布计算，随着时间推移的声场分布如图4.3与图4.4所示。





e)0.9ms

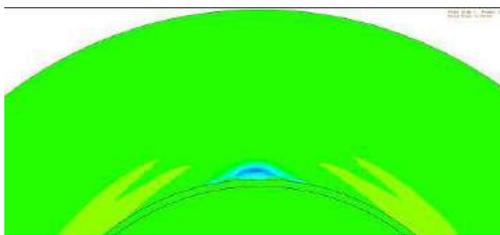
图 4.3 无损构件的截面声压分布



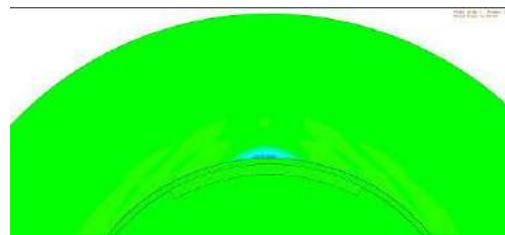
e)0.9ms

图 4.4 损伤构件的截面声压分布

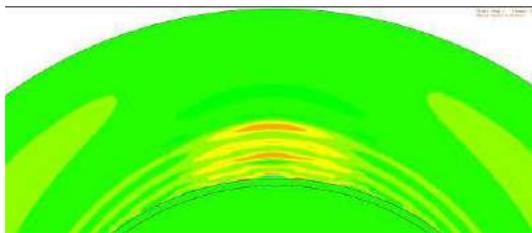
对于钢管混凝土构件，分别对无损构件与存在 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 矩形脱空损伤的构件进行激励后1ms内的声场分布计算，随着时间推移的声场分布如图4.5与图4.6所示。



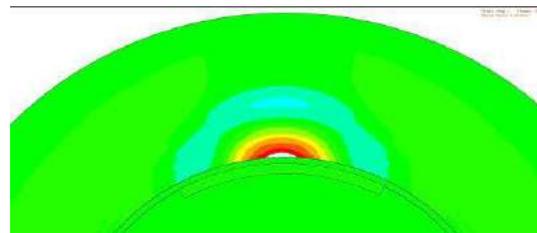
a)0.1ms



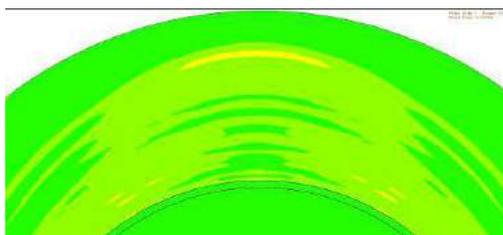
a)0.1ms



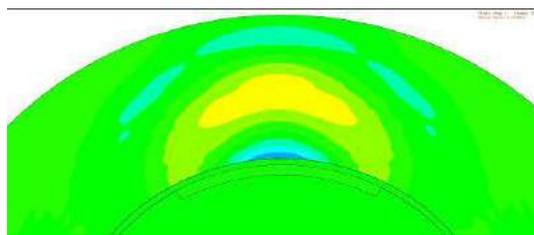
b)0.3ms



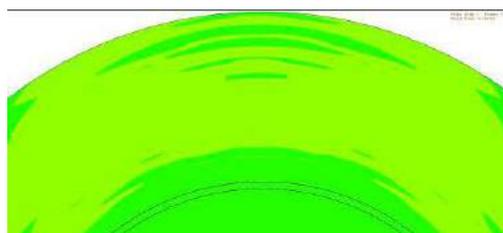
b)0.3ms



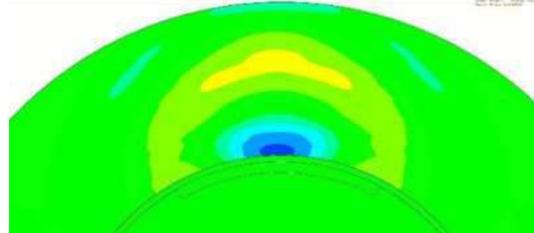
c)0.5ms



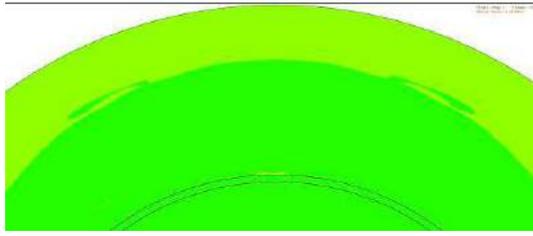
c)0.5ms



d)0.7ms

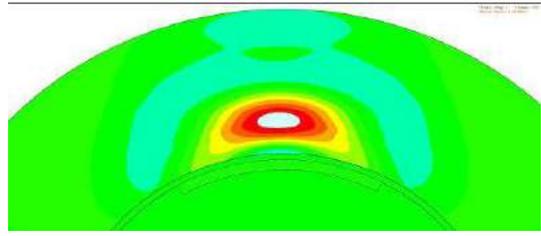


d)0.7ms



e)0.9ms

图 4.5 无损构件的截面声压分布



e)0.9ms

图 4.6 损伤构件的截面声压分布

从图4.3~图4.6可以看出，在不存在损伤的构件表面施加点脉冲激励，将在附近的空气中激起半球形扩散的直接声波和四周表面辐射出的泄露波。从声波理论可知，由于表面波在流体-固体交界面的传播速度比直接声波在空气中的传播速度更快，因此半球形外侧先于直接声波的辐射波为泄露瑞雷波，对于钢-混凝土组合板构件，点脉冲激励下的构件上空声场分布如图4.7所示，提取钢-混凝土组合板构件激励点上空约45mm处的声压变化曲线如图4.8所示。

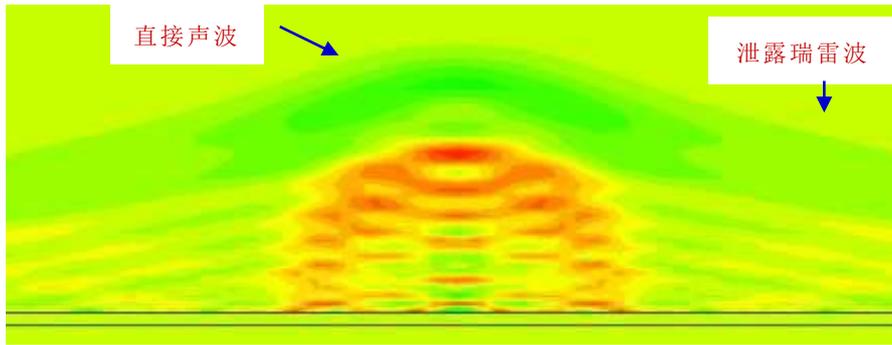


图 4.7 点激励下无损钢-混凝土组合板构件上空产生的声波

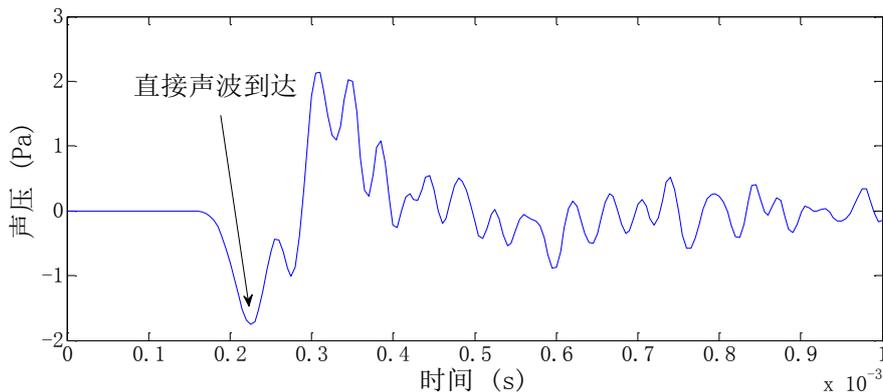


图 4.8 点激励下无损钢-混凝土组合板构件上空 45mm 处的声压变化曲线

由前述理论章节可知，泄露瑞雷波不存在于激励点正上空附近，它存在与泄露瑞雷角的范围之外，当声压响应的拾取点位于激励点正上方时，测得的声压信号仅为直接声波。从图4.7与图4.8中可以看出，约0.21ms时刻，直接声波在测点达

到第一个峰谷。由于钢-混凝土组合板的内部介质接触的复杂性，直接声波的时域信号难以进行进一步分析。

对于钢管混凝土构件，点脉冲激励下的构件上空声场分布如图4.9所示，提取钢-混凝土组合板构件激励点上空约45mm处的声压变化曲线如图4.10所示。

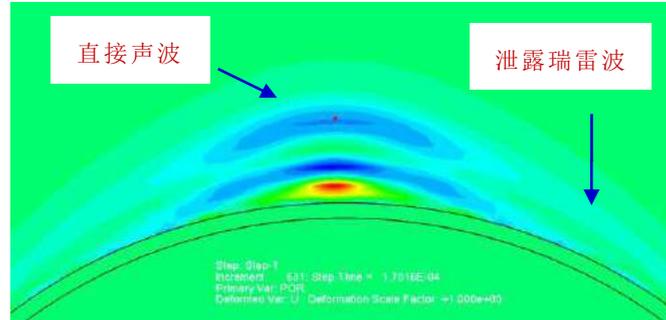


图 4.9 点激励下无损钢管混凝土构件上空产生的声场

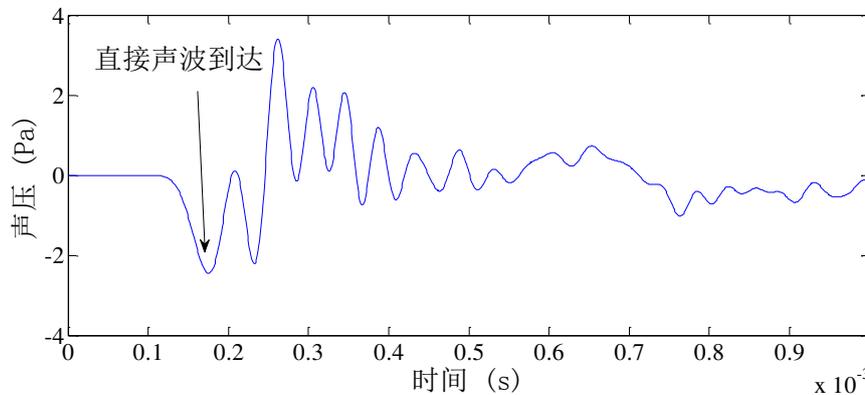


图 4.10 点激励下无损钢管混凝土构件上空 45mm 处的声压变化曲线

与钢-混凝土组合板构件的情况类似，激励点正上方测得的信号为直接声波信号。从图4.9与图4.10中可以看出，约0.19ms时刻，直接声波在测点达到第一个峰谷。由于内部介质接触的复杂性，直接声波的时域信号难以进行进一步分析。

在存在局部脱空损伤的构件表面施加点脉冲激励时，将在表面上空激起较大幅度，较长周期的波，此波主要有局部脱空板壳的振动引起，其幅度远远大于上述无损构件的直接声波与泄露瑞雷波，以至于直接声波和泄露瑞雷波可以忽略不计。对于钢-混凝土组合板构件，点脉冲激励下的构件上空声场分布如图4.11所示，钢-混凝土组合板构件激励点上空45mm处的声压变化曲线图如图4.12所示。

由图4.11与图4.12可见，当点脉冲激励位于钢-混凝土组合板构件的脱空损伤区域时，该区域的局部钢板发生持续的振动，其振幅之大使得声场快照图中无法识别出直接声波与泄露瑞雷波的存在，且激励点上空拾取的声压响应呈现处大幅度、长周期的时域响应特征。

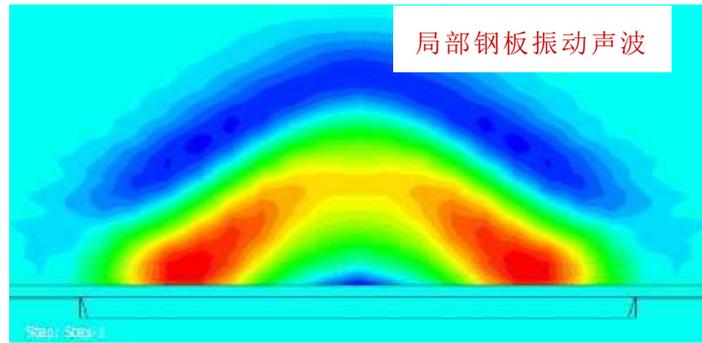


图 4.11 点激励下损伤钢-混凝土组合板构件上空产生的声波

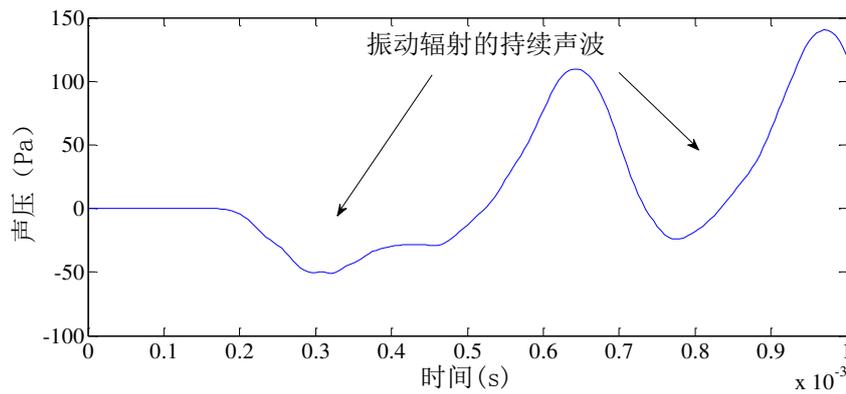


图 4.12 点激励下损伤钢-混凝土组合板构件上空 45mm 处的声压变化曲线

对于钢管混凝土构件，点脉冲激励下的构件上空声场分布如图4.13所示，提取钢管混凝土构件激励点上空约45mm处的声压变化曲线如图4.14所示。

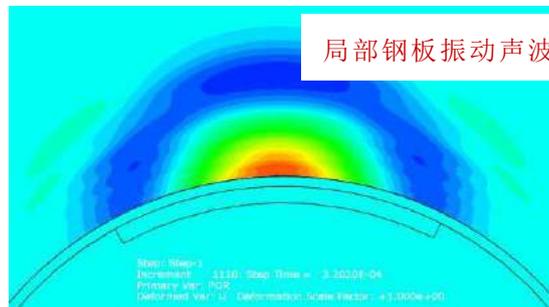


图 4.13 点激励下损伤钢管混凝土构件上空产生的声波

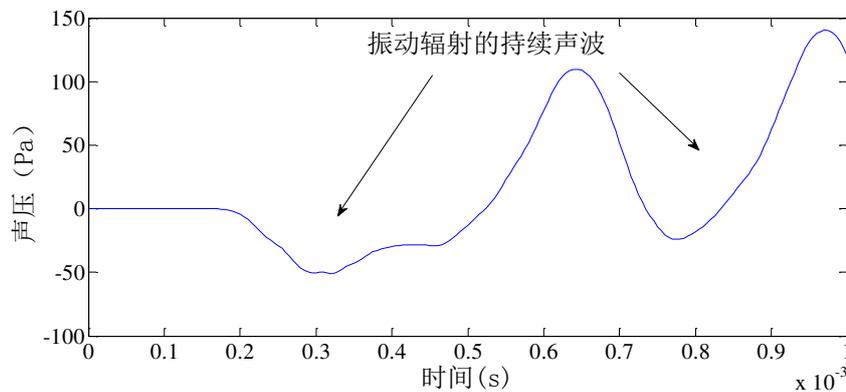


图 4.14 点激励下损伤钢管混凝土构件上空 45mm 处的声压变化曲线

由图4.13与图4.14可见，与钢-混凝土组合板构件的响应特征类似，当点脉冲激励位于钢管混凝土构件的脱空损伤区域时，该区域的局部钢壳体发生持续的振动，其振幅之大使得声场快照图中无法识别出直接声波与泄露瑞雷波的存在，且激励点上空拾取的声压响应呈现处大幅度、长周期的时域响应特征。

由上述模拟分析可知，在钢-混凝土组合结构表面施加点脉冲激励时，激励点位于局部脱空损伤处与位于无损处的上空声压响应具有截然不同的特征，无损工况的激励的响应将产生直接声波与泄露瑞雷波，在常用的力锤激励幅度下，其声压响应幅值小于10Pa。而当激励点位局部脱空区域的表面时，将由板壳振动产生持续的声波，在同样的激励下，其声压响应幅值约100Pa，远远大于直接声波与泄露瑞雷波，以至于无法从响应曲线中识别。由此可见，显式动力学有限元模拟的结果与理论预期及试验结果均相符，可以得出结论：利用麦克风冲击共振法进行脱空损伤的识别是可行的。

### 4.3 典型局部脱空损伤的模态

前述试验研究中，分别用加速度传感器与麦克风进行了矩形脱空损伤的模态试验，本文通过ABAQUS/Standard模拟钢-混凝土界面的局部脱空损伤，对其进行模态分析，进一步验证试验的准确性。

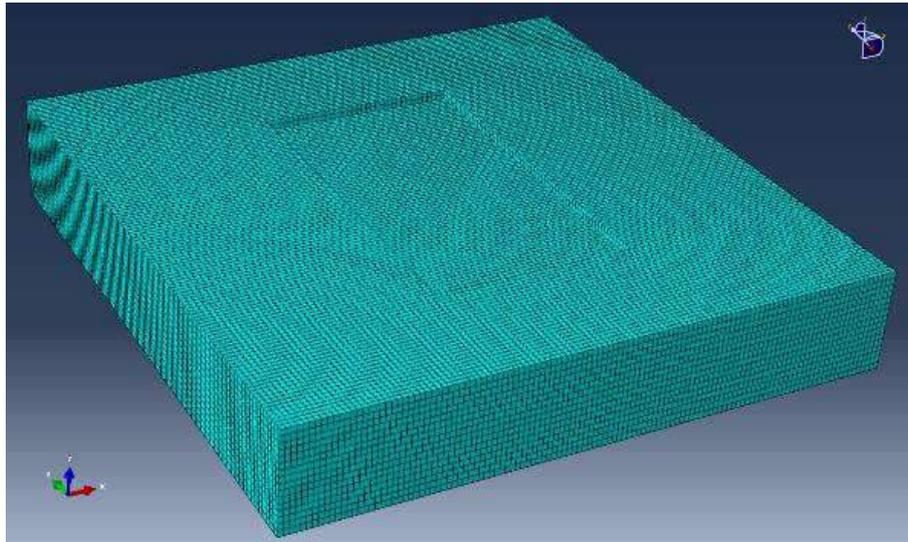
#### 4.3.1 钢-混凝土组合板构件局部损伤模态

在钢-混凝土组合板构件的模态分析中，混凝土板部件采用实体单元C3D8，混凝土板的平面尺寸设为 $600 \times 600 \text{mm}^2$ ，厚度设为120mm，钢板部件由于分析忽略其切应力与切应变的影响，采用壳体单元S4R，平面尺寸与混凝土板保持一致，钢板厚度设为6mm。制作损伤时，在混凝土的外表面局部做凹陷处理，使得凹陷部分的混凝土上表面与钢板下表面之间不存在接触和相互作用。在没有损伤的部分，混凝土上表面与钢板下表面的接触设置为表面对表面的小滑移接触，接触的切向摩擦系数为0.1，法向的接触性质为硬接触，并将板构件的底面设置成固支的边界条件。网格划分方面，混凝土部件的网格大小为5mm，钢板划分的网格大小为2mm，以 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤为例，网格划分情况如图4.15所示。

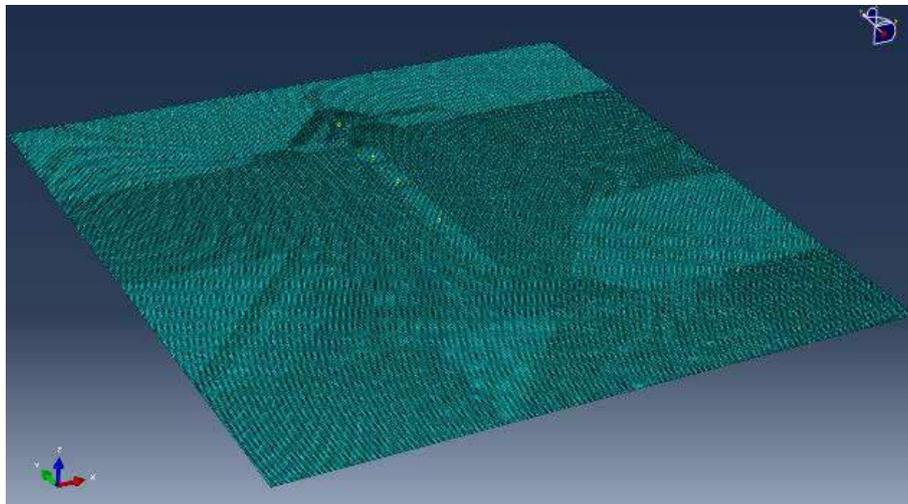
模型建立好后，设置频率提取分析步，提取前30阶模态，每次迭代使用38个矢量，最大允许50次迭代，感兴趣的目标频带为1~5000Hz。将各部件组装好后，进行模态频率的计算分析。

(1) 对钢-混凝土组合板构件中 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤的模态分析，结果如表4.1所示。

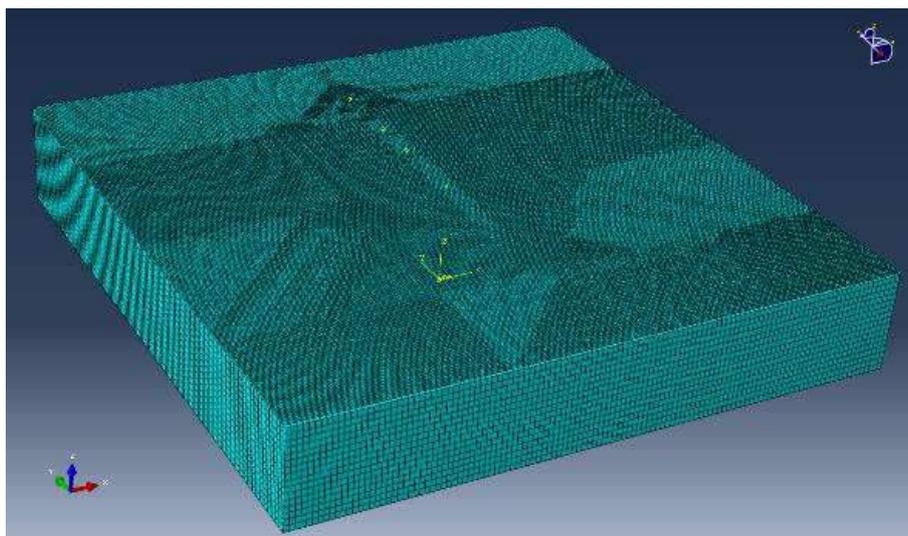
对于表4.1所示模态，其前六阶模态的振型分别如图4.16所示。



a)混凝土部件网格划分



b)钢板部件网格划分



c)整体网格划分

图 4.15 钢-混凝土组合板振动模型网格划分

表 4.1  $200 \times 350 \text{ mm}^2$  矩形脱空损伤的局部模态提取

局部模态	频率 (Hz)
1	905.65
2	1280.6
3	1998.5
4	2280.2
5	2660.5
6	2962.2
7	3246.6

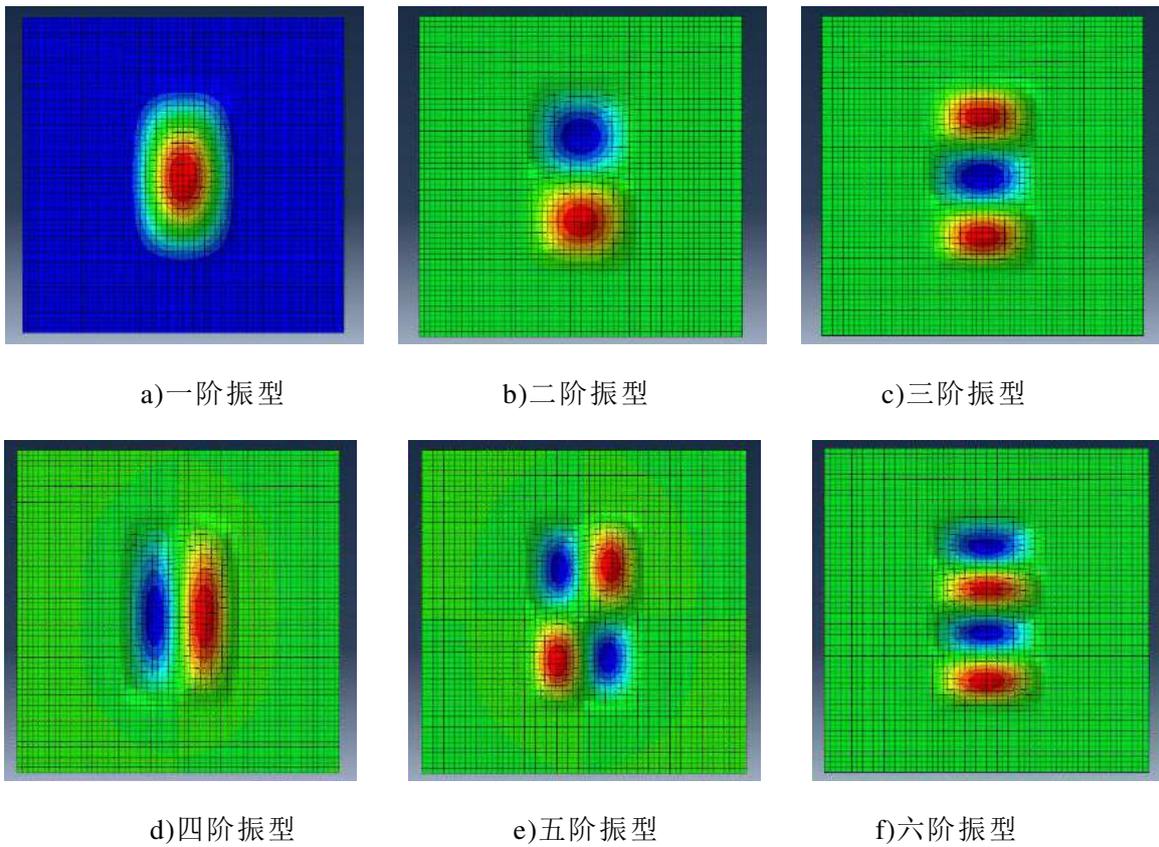


图 4.16 钢-混凝土组合板构件  $200 \times 350 \text{ mm}^2$  局部脱空损伤的模式振型

(2) 对钢-混凝土组合板构件中  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  的矩形脱空损伤的模式分析, 前四阶模态的分析结果如表4.2所示。

表 4.2  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  矩形脱空损伤的局部模态提取

局部模态	频率 (Hz)
1	2176.2
2	4432.6
3	4439.9
4	6501.9

对于上述模态，其前六阶模态的振型分别如图4.17所示。

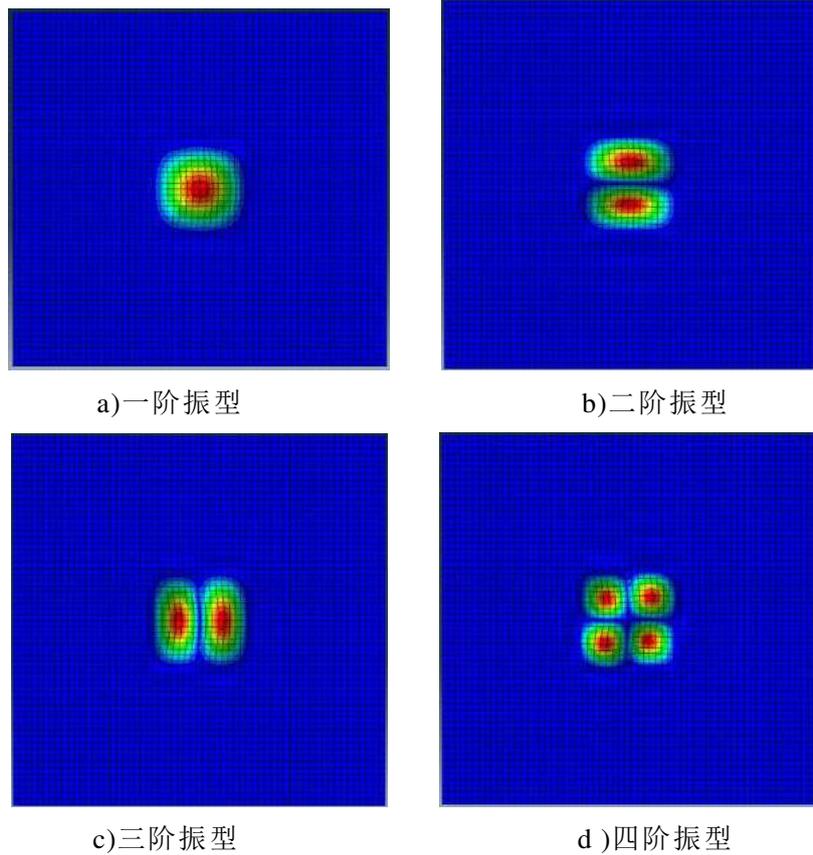


图 4.17 钢-混凝土组合板构件  $150 \times 150 \text{mm}^2$  局部脱空损伤的模态振型

(3) 对钢-混凝土组合板构件中  $d=150 \text{mm}$  的圆形脱空损伤的模态分析，前三阶模态的分析结果如表4.3所示。

表 4.3  $d=150 \text{mm}$  圆形脱空损伤的局部模态提取

局部模态	频率 (Hz)
1	2389.9
2	5354.9
3	5386.9

对于上述模态，其前六阶模态的振型分别如图4.18所示。

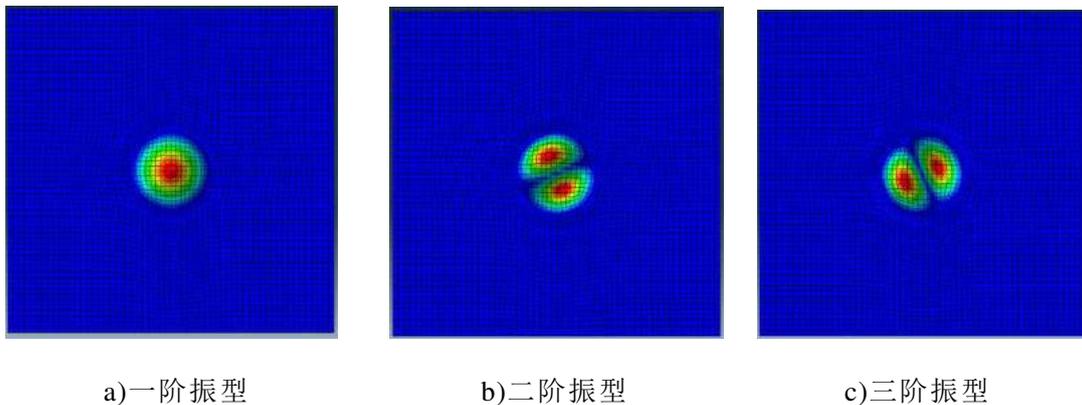


图 4.18 钢-混凝土组合板构件  $150 \times 150 \text{mm}^2$  局部脱空损伤的模态振型

由以上振型图可知局部脱空损伤钢板的振型与四周约束的板振型十分类似。

#### 4.3.2 钢管混凝土构件局部损伤模态

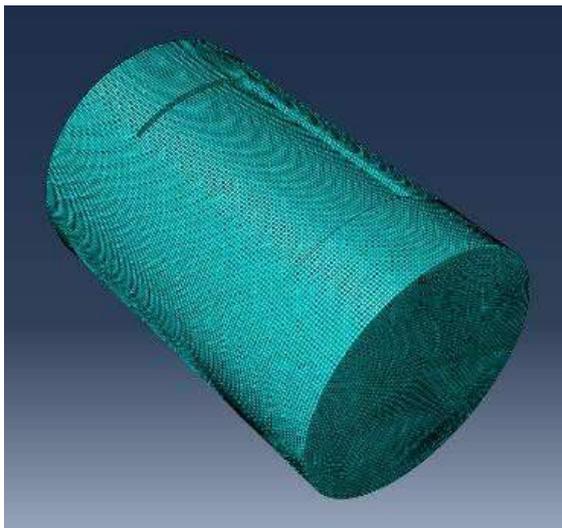
在钢管混凝土构件的模态分析中，混凝土柱部件采用实体单元C3D8，混凝土部件的外径382mm，轴向高度为600mm，钢管部件由于忽略切应力与切应变的影响，采用壳体单元S4R，外径400mm，轴向高度为600mm，钢管壁厚度设为6mm。制作损伤时，在混凝土圆柱体的外表面局部做凹陷处理，使得凹陷部分的混凝土柱外表面与钢管内表面之间不存在接触和相互作用。在没有损伤的部分，混凝土柱外表面与钢管内表面的接触设置为表面对表面的小滑动接触，接触的切向摩擦系数为0.1，法向的接触性质为硬接触，并将钢管圆底面与圆顶面进行固支的边界条件设置。网格划分方面，混凝土部件的网格大小为5mm，钢管部件划分的网格大小为2mm。以 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤为例，网格划分情况如图4.19所示。

模型建立好后，设置频率提取分析步，提取前30阶模态，每次迭代使用38个矢量，最大允许50次迭代，感兴趣的目标频带为1~5000Hz。将各部件组装好后，进行模态频率的计算分析。

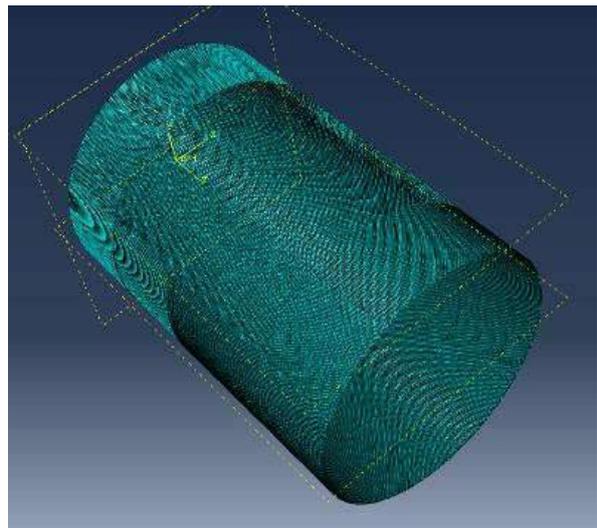
(1) 对钢管混凝土构件中 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤的模态分析，其局部脱空损伤的前六阶模态提取结果如表4.4所示。

对于上述模态，其前六阶模态的振型分别如图4.20所示。

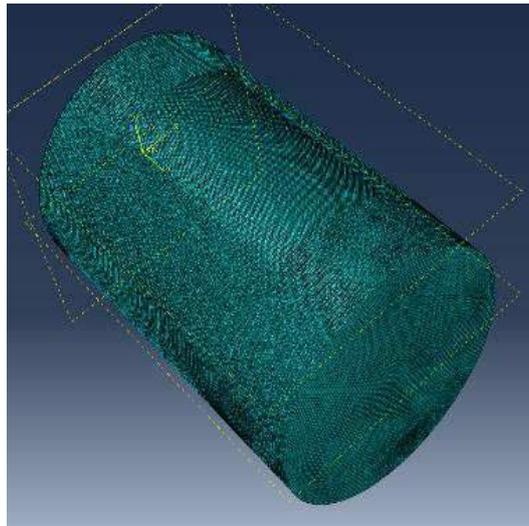
由振型图可知，钢管 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤的模态振型与麦克风声模态测试的结果形态一致，一阶振型出现了一个波峰与一个波谷，对应于平板的2-1阶模态振型，三阶模态对应于平板模态的2-2阶模态振型，五阶模态对应于平板模态的2-3阶模态振型。



a)混凝土部件网格划分



b)钢壳部件网格划分

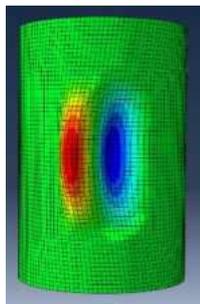


c)整体网格划分

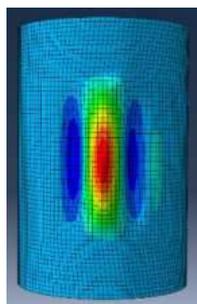
图 4.19 钢管混凝土构件振动模型网格划分

表 4.4 钢管混凝土构件的局部损伤模态提取

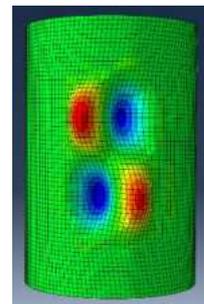
构件模态	频率 (Hz)
1	1768.0
2	2203.5
3	2627.2
4	2779.8
5	3393.2
6	3484.4



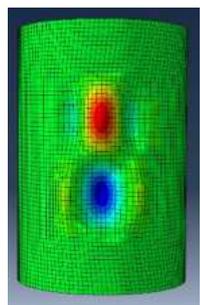
a)一阶振型



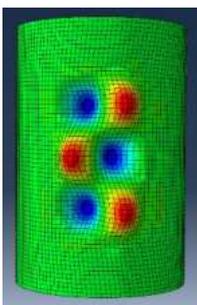
b)二阶振型



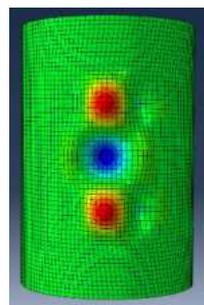
c)三阶振型



d)四阶振型



e)五阶振型



f)六阶振型

图 4.20 钢管混凝土构件局部脱空损伤的模态振型

(2) 对钢管混凝土构件中 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤的模式分析，其局部脱空损伤的前四阶模式提取结果如表4.5所示。

表 4.5 钢管混凝土构件的  $150 \times 150 \text{mm}^2$  局部损伤模式提取

构件模式	频率 (Hz)
1	3489.9
2	3765.0
3	5111.3
4	5856.1

对于上述模式，其前四阶模式的振型分别如图4.21所示。

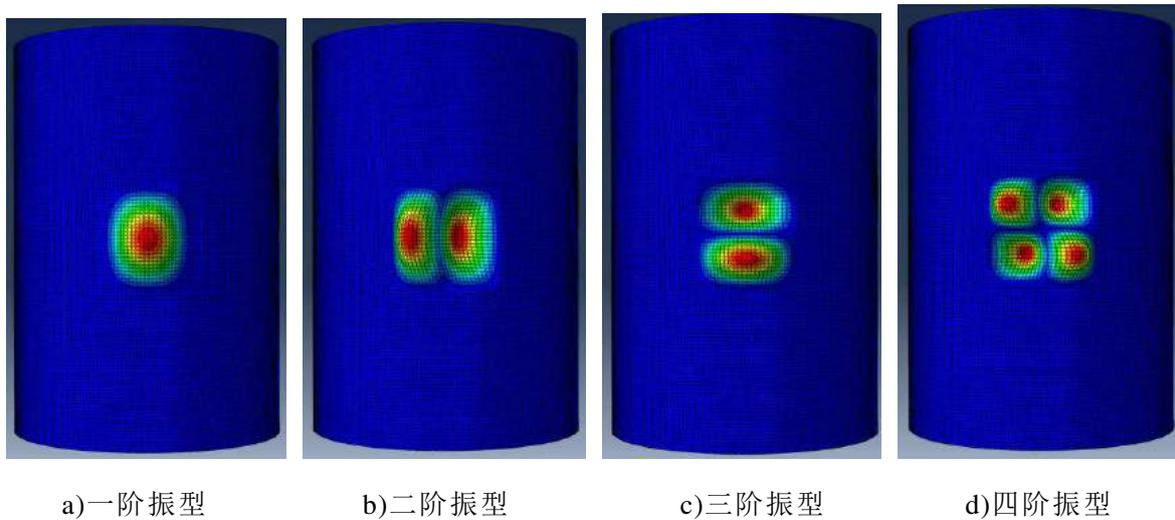


图 4.21 钢管混凝土构件局部脱空损伤的模式振型

## 4.4 模式频率的试验及模拟值与理论解析解的比较

### 4.4.1 钢-混凝土组合板构件各工况的模式频率对比

通过有限元模拟的频率提取步骤的分析得出了钢-混凝土组合板构件中 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 矩形脱空损伤、 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 矩形脱空损伤和 $d=150 \text{mm}$ 圆形脱空损伤的局部模式。在前述试验章节中，对这些损伤进行了脉冲锤击法模式测试。将数值模拟结果、试验结果与四周约束的板振动理论的频率解析解进行比较，对比验证麦克风冲击共振测试方法的可靠性。

(1) 对于面积为 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形局部脱空损伤，由前述四周约束矩形板的振动理论中式(2.48)可知，局部脱空板的各阶自振频率公式可由下式预估：

$$\omega_{mn} = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h} \left[ \left( \frac{m + \Delta_m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n + \Delta_n}{b} \right)^2 \right]} \quad (4.1)$$

其中，边缘效应系数是四周约束薄板无量纲模式参数 ( $na/mb$ 和 $mb/na$ ) 的函

数：

$$\Delta_m = \frac{1}{\left(\frac{na}{mb}\right)^2 + c}, \quad \Delta_n = \frac{1}{\left(\frac{mb}{na}\right)^2 + c}, \quad c = 2 \quad (4.2)$$

其中， $a=0.35\text{m}$ ， $b=0.2\text{m}$ 。其钢板厚度为 $6\text{mm}$ ，钢材密度取 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ ，弹性模量取 $E=2.0 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。对于一阶模态， $m=n=1$ ，因此求得边缘效应系数 $\Delta_m=0.1975$ ， $\Delta_n=0.4298$ 。代入解得一阶模态频率 $\omega_{11}=907.2\text{Hz}$ 。

对于二阶、三阶等高阶模态，有公式依次可解得其理论频率，如表4.6所示。

对于局部脱空损伤的前五阶模态，局部损伤的自振频率理论解析解、数值模拟解、麦克风模态试验及加速度传感器模态试验的结果对比估计结果的对比如图4.22所示。

表 4.6  $200 \times 350\text{mm}^2$  损伤的四周约束板模型自振频率计算

模态	$m-n$	$\Delta_m$	$\Delta_n$	模态圆频率 (Hz)
1	1-1	0.1975	0.4298	905.65
2	2-1	0.3616	0.3025	1280.60
3	3-1	0.4273	0.2025	1998.50
4	1-2	0.0702	0.4804	2280.20
5	2-2	0.1975	0.4298	2660.50

由图4.22可见，麦克风试验能够准确地册数钢-混凝土组合板构件 的前五阶模态，其试验值、理论值与模拟值十分接近。

(2) 对于 $150 \times 150\text{mm}^2$ 的矩形局部脱空损伤，由四周约束矩形板的振动理论，同理可将 $a=b=0.15\text{m}$ 及相关的几何材料参数代入式(4.1)及式(4.2)，求得该损伤工况的前三阶模态频率，如表4.7所示。

将频率的理论解析解、数值模拟值与麦克风冲击共振测试结果进行比较，如表4.8所示。

(3) 对于 $d=150\text{mm}$ 的圆形局部脱空损伤，用前述理论章节中的周界完全约束的圆板振动频率公式(2.64)可知，四周约束圆板振动的一阶频率为：

$$\omega_1 = \frac{\mu_1^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} = 0.467 \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (4.3)$$

式(4.3)中， $a=0.075\text{m}$ ，钢板厚度为 $6\text{mm}$ ，钢材密度取 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ ，弹性模量取 $E=2.0 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。代入式(4.3)解得一阶频率 $\omega_1=2203.5\text{Hz}$ 。数值模拟的一阶频率值为 $2389.9\text{Hz}$ ，麦克风冲击共振测试的频率峰值识别结果约 $2160\text{Hz}$ ，由此可知，圆形局部脱空损伤一阶自振频率的理论、模拟与试验结果相近。

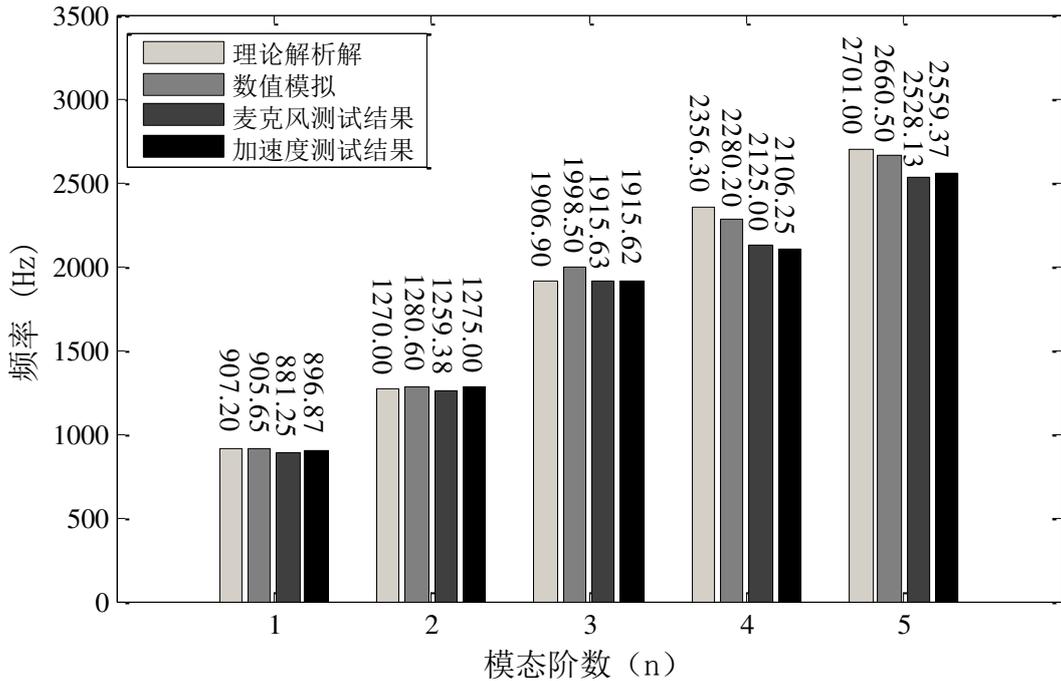


图 4.22 模态频率的试验及模拟与解析解的对比图

表 4.7 150×150mm<sup>2</sup> 的四周约束平板模型自振频率理论解析解计算

模态	<i>m-n</i>	$\Delta_m$	$\Delta_n$	模态圆频率 (Hz)
1	1-1	0.3333	0.3333	2282.19
2	2-1	0.4444	0.1667	4709.00
3	1-2	0.1667	0.4444	4709.00
4	2-2	0.3333	0.3333	6989.22

表 4.8 钢-混凝土组合板 150×150mm<sup>2</sup> 损伤工况的自振频率理论、模拟与试验对比

模态	<i>m-n</i>	理论解析解 (Hz)	数值模拟解 (Hz)	差异率 (%)	麦克风试验值 (Hz)
1	1-1	2282.19	2176.2	4.64	1950
2	2-1	4709.00	4432.6	5.87	—
3	1-2	4709.00	4439.9	5.71	—
4	2-2	6989.22	6501.9	6.97	—

#### 4.4.2 钢管混凝土构件各工况的模态频率对比

通过有限元模拟的频率提取步的分析得出了钢管混凝土构件中200×350mm<sup>2</sup>矩形脱空损伤与150×150mm<sup>2</sup>矩形脱空损伤的局部模态。在前述试验章节中，对这些损伤进行了脉冲锤击法模态测试。将数值模拟结果、试验结果进行比较，对比验证麦克风冲击共振测试方法的可靠性。

(1) 对于钢管混凝土构件的200×350mm<sup>2</sup>矩形脱空损伤来说，对比其麦克风

模态试验结果与有限元模拟的模态频率提取结果如表4.9所示。

表 4.9 钢管混凝土  $200 \times 350 \text{mm}^2$  损伤工况的自振频率模拟值与试验值对比

模态	$m-n$	麦克风试验模态频率 (Hz)	模拟模态频率 (Hz)	差异率 (%)
1	2-1	1871.9	1768	5.55
2	3-1	2065.6	2203.5	6.26
3	2-2	2643.7	2627.2	0.62
4	3-2	2906.3	2779.8	4.35
5	2-3	3090.6	3393.2	8.84

试验结果与模拟结果存在一定的差异，推测可能由于钢管混凝土构件的损伤设置过于密集，导致浇筑混凝土时，损伤泡沫与损伤泡沫之间空隙未能完全填充密实，导致最终的脱空损伤边界不完全等同于设置的泡沫边界。试验结果的误差维持在可以接受的范围内。

由于开口圆柱壳体的几何特征的特殊性，其各阶模态频率相对平板结构而言更为密集。值得注意的是，前述针对该损伤工况不同测点的麦克风冲击共振法试验测得的频响函数前两个峰值分别在2090Hz，2860Hz处出现，分别对应于钢管混凝土局部脱空损伤的二阶模态与四阶模态，这两种模态的振型在轴向中线处均为峰值点，而其他模态的振型在轴向中线处为节线，此时不论激励点在轴向中线的任何位置，麦克风冲击共振测试的频响函数均不会出现一阶、三阶与五阶的频率峰值。

(2) 对于钢管混凝土构件的 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 矩形脱空损伤来说，麦克风冲击共振测试结果中识别其一阶频率的峰值约3300Hz，有限元模拟的模态频率为3489.9Hz，实验结果与数值模拟结果大致接近。

综上所述，比较试验、理论与模拟的模态频率可知，麦克风声学测试可以准确地测出局部脱空损伤区域的模态信息。因此，推测其单点输入单点输出的麦克风冲击共振试验也将得到较准确的局部脱空损伤的振动信息。

## 4.5 本章小结

本章基于ABAQUS有限元软件的基础，分别建立了Explicit模块下钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件的脱空与非脱空模型，并将钢板壳表面上空的空气进行流体建模，分别模拟了点脉冲激励下，存在脱空损伤的构件表面上空的声压分布场与无损构件表面上空的声压分布场。通过流固耦合的有限元模拟分析直观的描述麦克风冲击共振测试在损伤构件与无损构件中的测试声压响应特征。

从结果可以看出，当激励点位于脱空区域内时，由于钢板壳的持续振动，空

气中相应产生的持续大幅度的声波。而当激励点位于非损伤区域时，构件表面上空产生由于点激励碰撞产生的直接声波，由一点向空气中各方向匀速传播，形成半球形的波阵面，随着时间推移直接声波向外扩散并消逝。同时，由于激励点的质点振动，构件产生从激励点沿表面各方向匀速传播的表面波，其波速大于空气中的声速，并将有一部分能量从构件表面泄露至空气中。因此声场分布中伴随着球状直接声波外的泄露瑞雷波。而直接声波与泄露瑞雷波的波幅相近，且远远小于有板壳脱空振动产生的声波，故当构件存在脱空损伤时，从声压响应中无法分辨出直接声波与泄露瑞雷波的存在。因此初步验证麦克风冲击共振法进行脱空损伤存在与否的识别是可行的。

接着，建立钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件的不同脱空损伤工况的模型，以 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 的矩形脱空损伤模型为例，提取其模态频率与振型，并将模拟的模态分析结果与麦克风模态测试、加速度传感器模态测试以及理论自振频率计算公式进行对比比较。结果呈现出较高的一致性，表明麦克风声学模态测试能够可靠地测试出结构的模态频率与振型。

## 第5章 多种无损检测方法对比测试

### 5.1 引言

麦克风冲击共振测试方法能够有效地识别钢-混凝土界面局部脱空损伤,并且测试过程中无需界面接触耦合,方便快捷,为进一步探究该测试方法的测试效果及使用性能优劣,分别用红外热成像探伤法、混凝土超声波探伤法、钢结构超声波探伤法及雷法法对麦克风冲击共振损伤成像测试所用的钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件进行损伤成像测试,从而对比各方法的探伤效果以及测试优劣性。

### 5.2 红外热成像探伤法

红外热成像探伤法在土木工程领域中的应用多处于定性分析的程度,在建筑领域,该方法可用于检测外墙的空鼓与剥落损伤、墙体的裂缝、饰面的粘贴质量不良于墙体受潮和渗漏等缺陷。在混凝土工程领域,该方法可用于沥青混凝土路面的离析检测和混凝土路面的脱空检测,以及建筑结构在火灾和冻融灾害下的结构损伤检测。

#### 5.2.1 红外热成像法探伤原理

红外热像仪的检测方法分为主动检测与被动检测两大类<sup>[41]</sup>。主动检测是由人工热源加热或太阳辐射加热,使构件产生温度的变化,在加热的同时或加热一段时间后,测量构件表面的温度分布。被动检测则是通过仪器测量构件自身的温度场分布,从而识别损伤的方法。其中,主动式检测又分为单面检测与双面检测,单面检测即被加热的表面与红外热像仪测试的表面位于同一侧的测试方法,热流如图5.1所示,当构件内部的损伤为隔热性缺陷时,缺陷位置表面所反射回的热量较其他部位更多,测得表面温度分布中,热量集中的部位即为存在损伤的部位,反之,当构件内部存在导热性缺陷时,表面温度分布中热量较低的区域为存在损伤的部位;双面检测即在构件的一侧表面进行人工外部加热,在另一侧用红外热像仪进行温度场分布检测的方法,其热流如图5.2所示,当构件内部存在隔热性损伤时,热流从加热表面传播至另一侧表面,经过隔热损伤的部位将流失部分热量,表面温度分布中热量较低的区域为存在损伤的部位;反之,当构件内部存在导热性缺陷时,表面温度分布中热量较高的区域为存在损伤的部位。

当热能作用于被测构件的表面后,构件表面吸收热能并将其向构件内传导,

当构件内存在损伤时, 损伤部位的热传导性能与完好的部位热传导性能存在差异, 因此通过红外热像仪记录构件的温度场分布, 可以检测和识别构件的损伤部位。

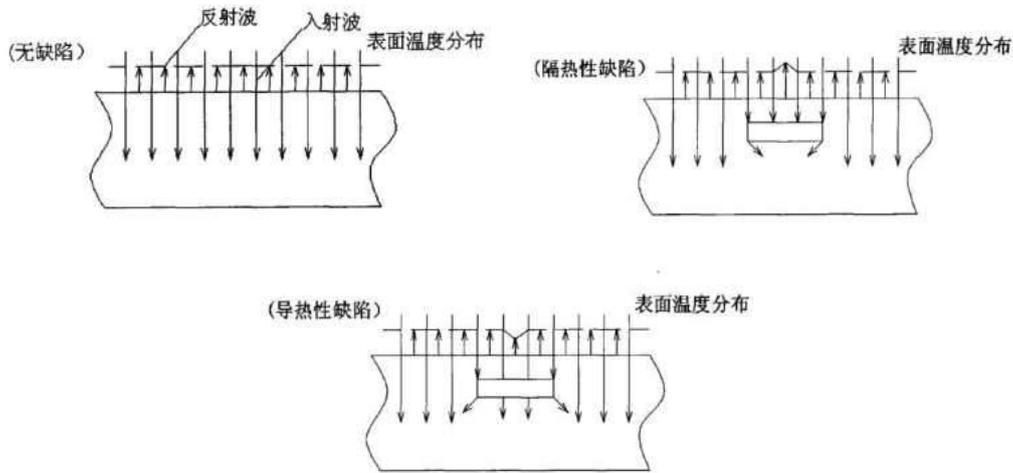


图 5.1 单面主动检测方法的热流示意图<sup>[116]</sup>

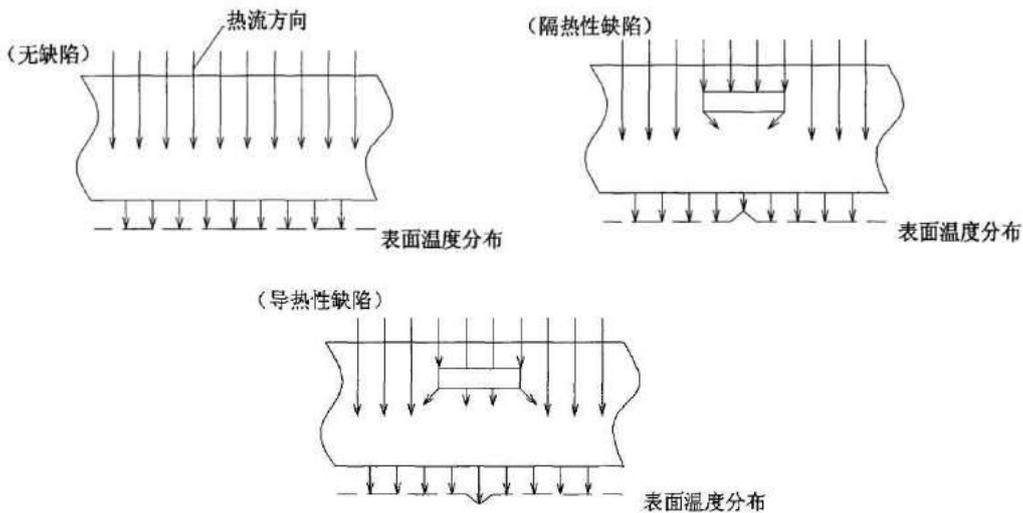


图 5.2 双面主动检测方法的热流示意图<sup>[116]</sup>

对于存在钢-混凝土局部界面脱空的钢-混凝土组合构件的损伤检测, 理论上也可以用红外热成像法进行测试。

对于本研究中的包含局部脱空损伤的钢-混凝土组合板构件, 采用单面主动检测的方法进行测试, 分别采取人工热源加热与人工制冷的方式在钢-混凝土组合板构件的钢板表面制造温度变化。

空气、泡沫、混凝土以及钢板的导热系数如表5.1所示。

表 5.1 各材料的导热系数 (W/m·K)

材料	空气	珍珠棉泡沫	混凝土	钢材
导热系数	0.031	0.02	1.28	48

由于制作损伤时用泡沫模拟空气层损伤, 而空气与泡沫的导热系数远远小于混凝土与钢材的导热系数, 因此当外加热源作用于一侧表面时, 反射回来的热量

在存在脱空损伤的区域更加集中，因此预期对构件单侧升温时，损伤处检测到的热量更集中，而对构件进行单侧降温冷却时，损伤区域检测到的温度比无损区域更低。

### 5.2.2 钢-混凝土组合板构件红外探伤测试

试验所用的仪器为NEC G100EXD红外热像仪，如图5.3所示，仪器的探测器为非制冷焦平面传感器，测试波长范围为8~14 $\mu\text{m}$ ，测量精度为 $\pm 2\%$ 或 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，测量场视角为 $32^\circ \times 24^\circ$ ， $30^\circ\text{C}$ 时的温度分辨率为 $0.04^\circ\text{C}$ ，有效像素为320 (H)  $\times$  240 (V)，每帧频率为8.5Hz，空间分辨率为1.78mrad，数据深度为14bits，数字变焦为 $\times 1\sim 4$ 倍。

对构件的钢表面进行加热处理时，采用两个“小太阳”暖烤炉进行均匀加热处理，如图5.4所示。



图 5.3 NEC G100EXD 红外热像仪



图 5.4 钢-混凝土组合板构件均匀加热

用电烤炉将钢板表面均匀加热二十分钟后，通过红外热像仪拍摄记录构件钢表面的温度分布场，损伤区域的描述和相应位置的温度分布如图5.5和图5.6所示。填充珍珠棉泡沫设置的局部脱空损伤包括图中下部的 $200 \times 350\text{mm}^2$ 矩形损伤、图片中部的 $150 \times 150\text{mm}^2$ 矩形损伤、直径及边长为30mm及30mm的矩形与圆形小损伤，以及图中上部的 $150 \times 150\text{mm}^2$ 矩形损伤与直径150mm的圆形损伤。

从图5.6可知，在人工热源的加热下，构件表面的温度整体达到了 $30^\circ\text{C}$ 以上，在 $200 \times 350\text{mm}^2$ 的矩形损伤区域温度最高达 $40^\circ\text{C}$ 左右，在直径或边长为150mm的矩形与圆形脱空损伤区域也出现了局部高温，上述区域的温度要高于没有设置损伤部位的温度，因此可以从图中大致分辨出这些损伤的位置。而面积较小的损伤区域则无法直接通过温度场分布的图片识别出来，符合试验预期。

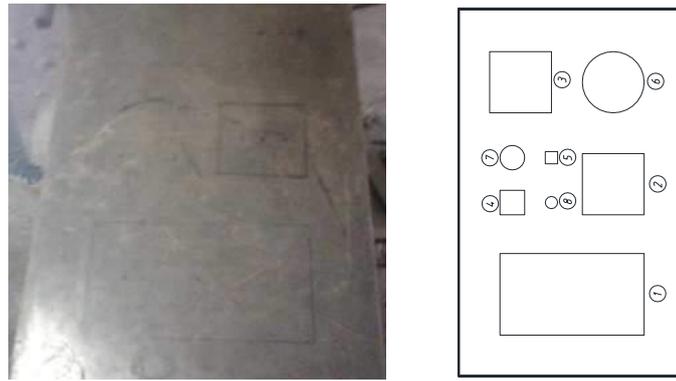


图 5.5 钢-混凝土组合板构件的脱空位置分布

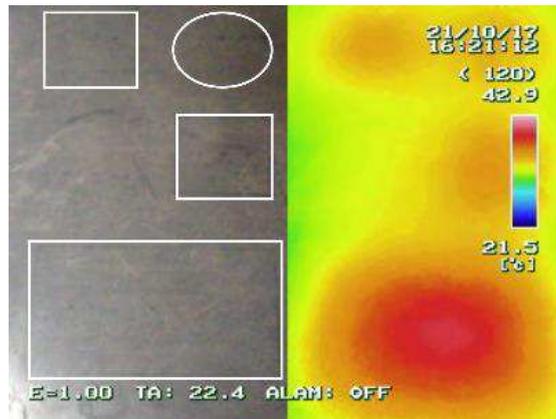


图 5.6 钢-混凝土组合板构件均匀加热后的温度场分布

为了探究构件在冷却条件下形成的温度场分布能否进行局部脱空损伤的识别，对构件的钢表面进行冷却处理，用塑料薄膜装载冰水混合物覆盖在钢板上表面，如图5.7所示。静置15分钟后，用红外热像仪对构件钢板表面进行摄像，捕捉其温度场分布如图5.8所示。



图 5.7 钢-混凝土组合板构件均匀冷却

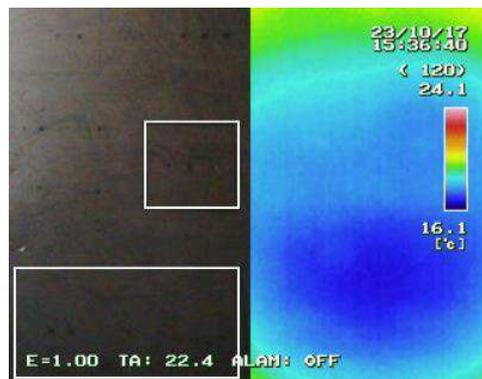


图 5.8 钢-混凝土组合板构件均匀冷却后的温度分布

由图5.8可知，在人工冷却的作用下，构件表面温度低至 $16^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，其中可以看出图中下部的 $200\times 350\text{mm}^2$ 矩形损伤和图片中部的 $150\times 150\text{mm}^2$ 矩形损伤的温度低于周围没有设置损伤的区域温度，可以模糊地辨认出损伤的位置。而面积较小的损伤区域无法通过温度场分布的图片直接识别出来，符合试验预期。

### 5.2.3 钢管混凝土构件红外探伤测试

与钢-混凝土组合板构件的红外探伤测试类似，通过人工热源加热，单面测试的方法对钢管混凝土构件的一个侧面进行局部脱空损伤检测。加热工具为两个“小太阳”电烤炉，如图5.9所示。



图 5.9 钢管混凝土构件均匀加热

经过电烤炉均匀加热二十分钟后，通过红外热像仪拍摄记录构件钢表面的温度分布场，损伤区域的描述和相应位置的温度分布如图5.10和图5.11所示。

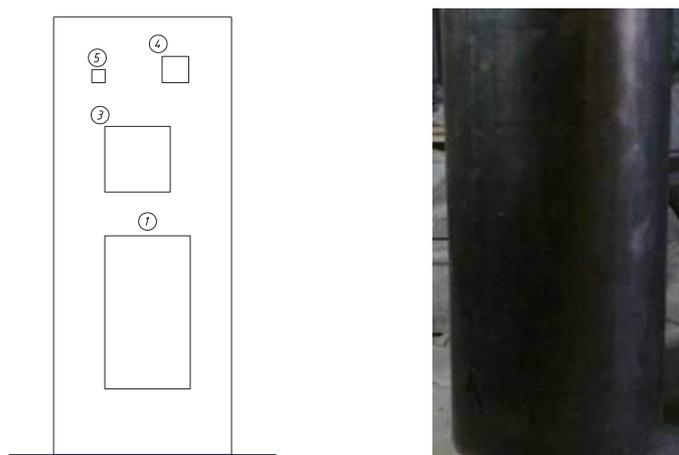


图 5.10 钢管混凝土构件的脱空位置分布

从图5.11可以知，构件在加热后表面达到 $22\sim 34^{\circ}\text{C}$ ， $200\times 350\text{mm}^2$ 矩形损伤和 $150\times 150\text{mm}^2$ 矩形损伤部位的温度达 $30^{\circ}\text{C}$ ，明显高于其他无损部位的温度，因此可以通过红外热像图明显地判断出脱空区域的位置，符合试验预期。

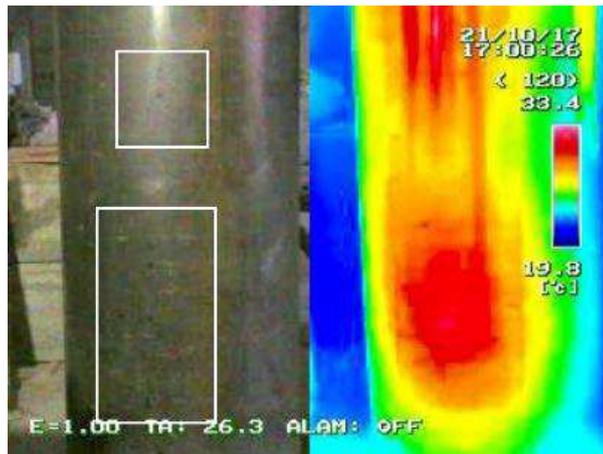


图 5.11 钢管混凝土构件均匀加热后的温度场分布

### 5.3 混凝土超声波探伤法

超声波探伤法是常用的检测混凝土构件缺陷的方法<sup>[17]</sup>。由于超声脉冲波的穿透力较强，超声法常用于检测混凝土的不密实区域，裂缝、孔洞等缺陷，其主要测量的物理量包括声速、波幅、接收信号的波形和主频等参数，根据这些参数的变化判断构件内部是否存在损伤。

#### 5.3.1 混凝土超声波探伤原理

超声波探伤法测混凝土缺陷的原理是利用超声脉冲波在相同测试条件（如测距、混凝土原材料、配合比等）下，在混凝土中传播的波速、波幅和频率等参数变化来识别构件内部的缺陷损伤。由于超声波的波速与混凝土的密实程度有关，材料越密实，则波速越大，相反当构件内部存在孔洞和不密实等缺陷时，超声波的传播将绕过缺陷部分传到接收器中，因此测量到的波速将小于没有缺陷的部分。另外，由于空气的声阻抗率远远小于混凝土的声阻抗率，故当超声脉冲波遇到缺陷部位将发生反射与散射现象，能量发生衰减，其中高频部分的能量衰减更快，因此当测量路径中存在缺陷时，接收到的信号往往波幅偏小，高频信号减少。由于超声波遇到缺陷发生散射与反射，与直达信号之间存在声程与相位差，叠加之后形成相互干扰，导致最终接收到的波形发生畸变。

对于构件内部不密实与孔洞的缺陷检测，检测方法根据不同的测量条件和需求，有平面对测、平面斜侧与钻孔测法三种方式，如图5.12~5.14所示，其中T为超声波发射换能器，R为超声波接收换能器。

由于测试所得的声速、声时、波幅等参数收到具体测试条件如混凝土材料、环境湿度及测距的影响，无法明确给出确定的临界指标作为缺陷的判别标准，因此常用统计指标作为判断缺陷的标准，即从测区内所有测点的参数结果中识别出异常值作为缺陷的识别点。

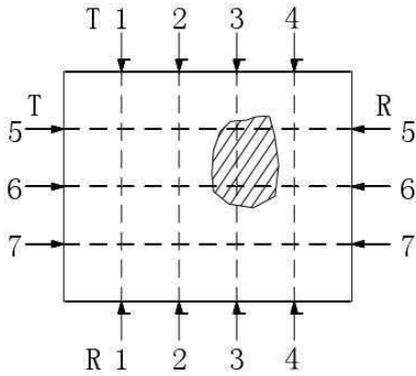


图 5.12 对测法的换能器布置<sup>[117]</sup>

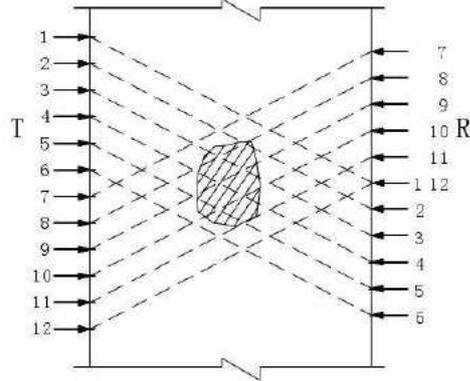


图 5.13 斜测法的换能器布置<sup>[117]</sup>

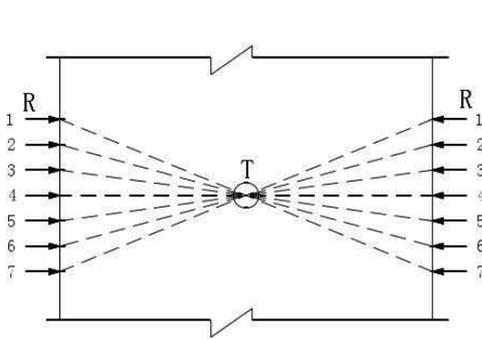
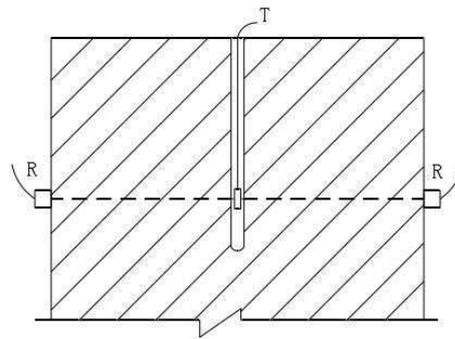


图 5.14 钻孔法的换能器布置<sup>[117]</sup>



空气和钢材、混凝土、及泡沫的声阻抗如表5.2所示。

表 5.2 各材料的声阻抗 ( $N \cdot s/m^3$ )

材料	空气	珍珠棉泡沫	混凝土	钢材
声阻抗	415	$1.7 \times 10^6$	$12.4 \times 10^6$	$4.54 \times 10^6$

与混凝土内部孔洞探伤的原理相似，由于脱空损伤的空气声阻抗与钢材及混凝土差异巨大，超声脉冲波在遇到缺陷时将发生明显的绕射及反射，接收换能器所得到的信号将发生明显的异常，因此，钢-混凝土组合构件的局部界面脱空损伤从原理来判断也是可行的。

### 5.3.2 钢-混凝土组合板构件超声波探伤测试

为了探究混凝土超声波探伤法对于钢-混凝土组合结构脱空损伤检测的有效性及其与冲击共振法成像试验与其的优劣性比较，用此方法对本文中的钢-混凝土组合结构构件进行测试，由于本研究的钢管混凝土构件损伤设立在对立的两侧，影响了测试效果的呈现，故仅对钢-混凝土组合板构件的局部脱空损伤进行测试。

测试所用的仪器设备为ZBL-U520非金属超声波检测仪和ZBL-CP50探头，如图5.15所示，其采样周期为 $0.05 \sim 400 \mu s$ ，声时精度为 $0.05 \mu s$ ，声时范围为 $-204800 \sim 409600 \mu s$ ，动态范围为130dB，频带宽度为 $10 \sim 250 kHz$ ，接收灵敏度

$\leq 30\mu\text{V}$ ，增益精度为0.5dB。



图 5.15 BL-U520 非金属超声波检测仪和 ZBL-CP50 探头

试验采取对测的方式,对钢-混凝土组合板构件中麦克风冲击共振法成像测试所测的损伤工况,即 $150\times 150\text{mm}^2$ 的矩形局部脱空损伤区域的两侧进行测区划分,以距损伤的中心为中心点,画 $7\times 7$ ,间距为50mm的网格,将每个网格焦点分别编号1-1~7-7,如图5.16所示。测区范围覆盖 $300\times 300\text{mm}^2$ ,损伤区域面积为 $150\times 150\text{mm}^2$ ,一共布置49个测点,其中损伤区域以外的测点一共40个,损伤区域以内的测点9个,得以保证所测结果在统计意义上无损区域的测点占大多数,以此识别出异常点。

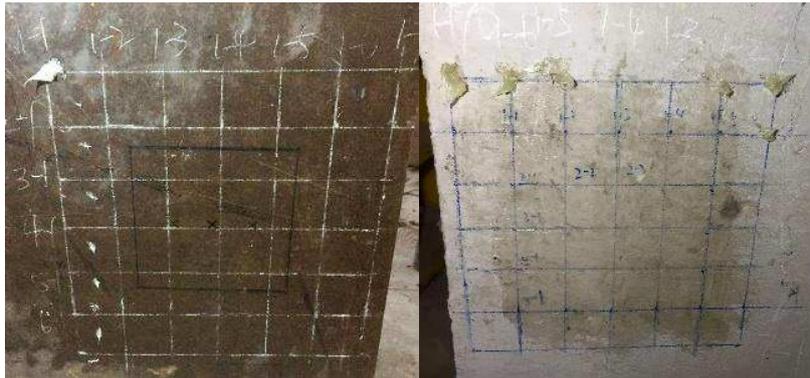


图 5.16 BL-U520 非金属超声波检测仪和 ZBL-CP50 探头

用凡士林作耦合剂涂抹在各个测点,将发射探头与接收探头分别固定在正反两面相同的测点上,如图5.17所示。



图 5.17 测试时发射探头与接收探头的放置

设置好构件的测距以及测点后,超声脉冲波由发射探头发发出,经过板内的混凝土介质传播至接收探头,待非金属超声波检测仪内的波形稳定后采集此处的超声波信息并记录下来,49个测点均测试完成后,将各测点的首波声时、首波波幅

及频谱峰值信息统计比较，整理出异常点。当测点位于损伤区域内时，典型的超声波信号如图5.18所示。当测点位于非损伤区域时，典型的超声波信号如图5.19所示。

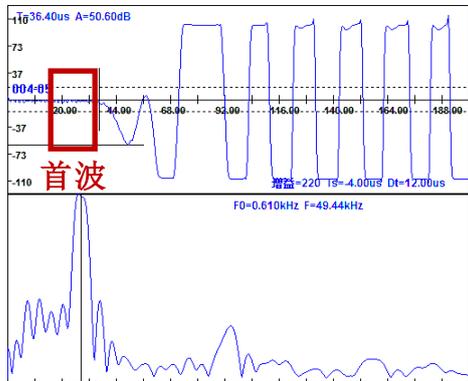


图 5.18 脱空测点的波形及频谱图

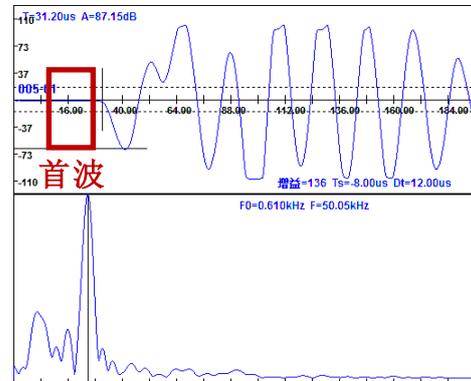


图 5.19 无损测点的波形及频谱图

从图5.18可以看出，当测点位于脱空区域，其超声波信号呈现首波声时长、首波波幅小的特征，而没有损伤的测点，其超声波信号呈现首波声时相对短，首波波幅偏小的特征。各测点的首波声时、波速、首波波幅数据分别如表5.3、表5.4、表5.5所示。

表 5.3 各测点的首波声时（单位： $\mu\text{s}$ ）

测点	1	2	3	4	5	6	7
1	37.2	29.2	30.4	41.2	31.6	30.4	30.0
2	30.0	30.4	31.2	31.2	30.4	29.6	31.2
3	30.0	29.6	43.2	35.6	50.0	30.8	31.2
4	31.6	31.8	36.8	46.0	36.4	31.2	44.8
5	31.2	29.6	40.4	41.2	40.4	31.2	31.2
6	28.0	29.6	31.2	34.4	31.6	30.0	31.2
7	29.6	29.6	29.6	30.0	31.6	31.2	31.2

从表5.2~5.5可知，本次测试中，没有设置损伤处测点的超声波首波声时介于28~32 $\mu\text{s}$ 之间，波速介于4.1~4.4km/s之间，首波波幅介于60~95dB之间。若测试数据偏出此范围，可以判断该点可能为存在缺陷的区域。该方法测得数据异常区域如图5.20所示。

从图5.20中可以看出，第3~5行、第3~5列的测点数据普遍出现了声时异常与波幅异常，该区域对应的位置为设置了局部脱空损伤的区域，而其他区域的数据

大致正常，因此可以看出，混凝土超声波探伤法可以大致判断出损伤区域的范围。但此方法要求测区的覆盖范围内，无损区域的测点远多于损伤区域的测点，且网格间距为50mm，损伤识别的精度偏低。

表 5.4 各测点的波速（单位：km/s）

测点	1	2	3	4	5	6	7
1	3.495	4.452	4.276	3.155	4.114	4.276	4.333
2	4.333	4.276	4.167	4.167	4.276	4.392	4.167
3	4.333	4.392	3.009	3.652	2.600	4.221	4.167
4	4.114	4.114	3.533	2.826	3.571	4.167	2.902
5	4.167	4.392	3.218	3.155	3.218	4.167	4.167
6	4.643	4.392	4.167	3.779	4.114	4.333	4.167
7	4.392	4.392	4.392	4.333	4.114	4.167	4.167

表 5.5 各测点的首波波幅（单位：dB）

测点	1	2	3	4	5	6	7
1	74.74	90.74	58.38	72.42	62.66	59.37	86.13
2	68.56	78.38	78.17	86.81	80.59	60.18	89.85
3	69.58	68.89	75.42	55.85	76.68	68.69	88.32
4	65.32	74.64	59.95	27.60	50.60	71.46	80.94
5	87.15	79.27	52.25	71.67	57.07	71.44	82.05
6	78.25	88.30	80.30	74.84	68.87	81.88	90.43
7	93.85	91.28	88.15	76.39	61.09	70.03	87.10

## 5.4 钢结构超声波探伤法

超声波探伤的无损检测方法具有灵敏度高、穿透力强、检验速度快、成本低和设备简单轻便等优点，因此为最常用的无损检测手段之一<sup>[31]</sup>。常用的超声检测方法涉及的方法包括穿透法、脉冲反射法、串列法等等，其中脉冲反射法的应用最为普遍。数字式超声波探伤仪被广泛地应用于钢板、焊缝的损伤检测。本文通过钢结构的超声波探伤法尝试检测钢-混凝土组合板构件的局部脱空损伤。

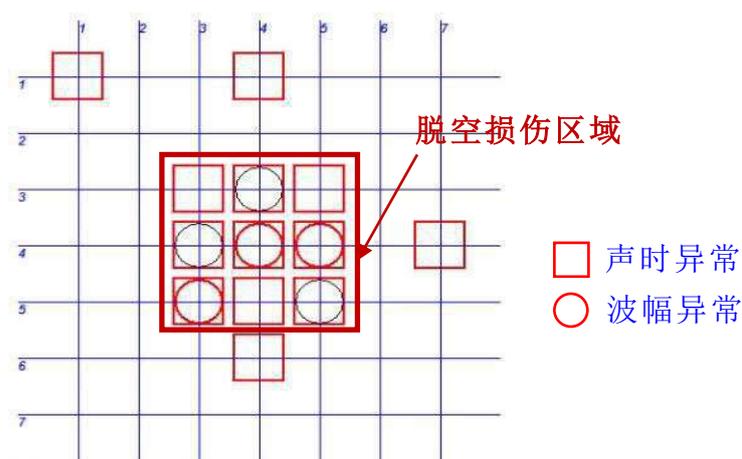


图 5.20 混凝土超声探伤法的损伤成像结果

#### 5.4.1 钢结构超声探伤测试原理

钢结构在焊接和制作的过程中受工艺、环境等因素的影响难免会产生气孔、夹渣、裂纹等缺陷损伤，可能造成材料性能的降低。钢结构超声波探伤的检测方法主要是利用超声波在不同介质中传播将发生发射的特性进行损伤识别。超声波探伤检测根据波的类型可分为基于纵波、横波、表面波和板波的检测方式，其中纵波可用于检测金属铸锭、中厚板、大型锻件及形状简单的制件中存在的裂缝、分层和夹杂物等缺陷；横波可用于探测管材中的径向与轴向裂缝，焊缝中的气孔、夹渣等缺陷；表面波可用于检测简单制件表面的缺陷；板波可用于检测薄板中的缺陷。超声波通过构件表面的耦合剂进入构件并传播，当其遇到缺陷部位或构件底部时将反射回探头，根据反射信号的波形及频谱可以测出缺陷的深度及大小。

#### 5.4.2 钢-混凝土组合板构件超声探伤测试

为了探究此方法是否可用于钢-混凝土局部脱空缺陷的识别，对钢-混凝土组合板构件的钢板表面进行超声波探伤测试。试验仪器设备为汉威HS610e钢结构超声波探伤仪，配合发射频率2.5MHz，9×9的斜探头进行纵波发射测量，仪器设备如图5.21所示。对麦克风冲击共振法成像试验所测的同一损伤工况，即150×150mm<sup>2</sup>的矩形局部脱空损伤区域进行扫描测试。测试时，将耦合剂涂抹至被测损伤工况区域，将探头紧贴钢表面发射并接受超声波，测试方法及参数设置如图5.22所示，与麦克风冲击共振法成像测试的测点网格相同，以损伤中心为中心点，在10×10，间距为25mm的网格测点分别进行测试。

各测点的典型信号波形图如图5.23所示。其中向下箭头所示数据为测得的回波深度，也即测点的构件深度或损伤深度。

将10×10网格的各测点的回波深度整理如表5.6所示。将这些数据绘成云图，探究局部脱空损伤区域的测点数据与非脱空区域的测点数据是否存在明显的差异以识别脱空损伤，成像图如图5.24所示。



图 5.21 汉威 HS610e 钢结构超声波探伤仪及斜探头



图 5.22 钢结构超声探伤法参数设置及测试方法

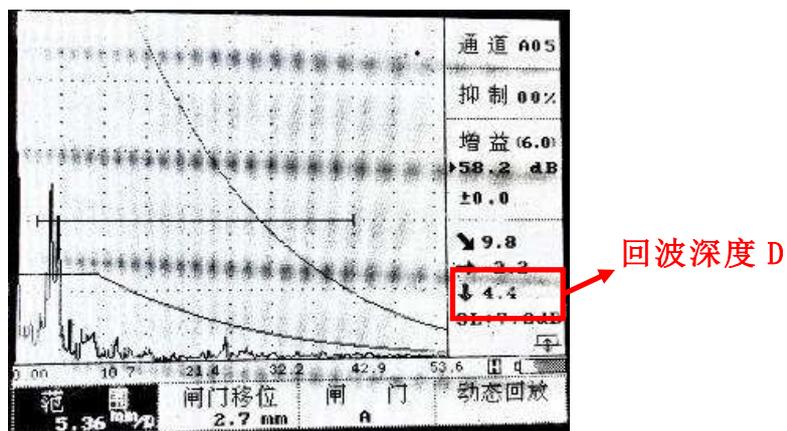


图 5.23 钢结构超声探伤法典型波形图

图5.24中红色虚线所包围的区域为 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 的矩形局部脱空损伤区域，从数据与图像可以看出，钢结构超声仪在被测区域的所有测点所测得的回波深度介于 $4.3 \sim 4.6 \text{mm}$ 之间，由于斜探头的测试存在 $1 \sim 2 \text{mm}$ 的盲区，故所有测点的测试损伤深度结果为 $6 \text{mm}$ 左右，这与钢板的厚度接近，可以得出结论，无论存不存在脱空损伤，超声纵波的反射深度不超过钢板的边界厚度，即使用该方法完全无法识别出钢-混凝土组合结构的局部界面脱空损伤。

表 5.6 各网格点的钢结构探伤回波深度（单位：mm）

模态	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4.3	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.6
2	4.5	4.4	4.6	4.3	4.3	4.6	4.4	4.4	4.4	4.3
3	4.4	4.6	4.3	4.5	4.5	4.4	4.5	4.3	4.3	4.4
4	4.6	4.5	4.3	4.4	4.3	4.3	4.6	4.5	4.5	4.5
5	4.3	4.3	4.4	4.3	4.4	4.6	4.3	4.3	4.6	4.5
6	4.5	4.4	4.5	4.5	4.4	4.5	4.5	4.3	4.3	4.5
7	4.3	4.4	4.6	4.4	4.6	4.4	4.3	4.3	4.4	4.6
8	4.5	4.6	4.3	4.4	4.4	4.6	4.4	4.6	4.5	4.4
9	4.6	4.5	4.6	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.5	4.3
10	4.3	4.4	4.5	4.4	4.3	4.4	4.4	4.5	4.5	4.4

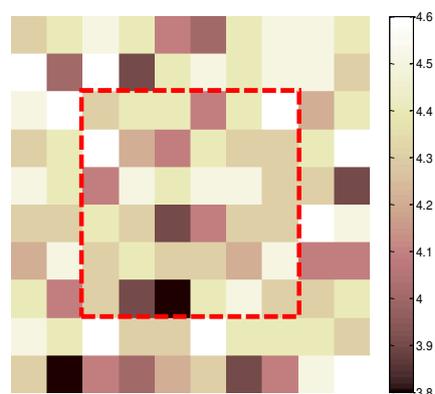


图 5.24 钢结构超声探伤法数据成像图

## 5.5 雷达法

雷达法是基于广谱电磁技术原理的一种无损检测方法<sup>[118]</sup>。由于其快速、直观且具有一定穿透深度等优点，被广泛应用于工程中。传统的探地雷达法多用于地质勘查领域，近年来，高频的探地雷达开始应用于老旧建筑物的房屋质量鉴定中，对于年代久远未留存结构图的建筑，雷达法可探测出结构内的钢筋分布。

### 5.5.1 雷达法探伤原理

雷达法由发射天线、接收天线及主机配合工作，其基本原理是由控制单元分别发出控制信号，使发射天线发射出宽频带的高频电磁脉冲波，由于不同材料的

介质其介电常数与电阻率也不相同，电磁脉冲波在传播过程中若遇到不同介质的交界面将发生反射，由接收天线接收被测结构的介质面的反射波，并在计算机中存储各测点的波形、双程走时及波幅，求出反射面的深度。测试时，持探头沿这被测表面的一条测线匀速移动采集数据，即可得到该测线剖面内的厚度及介质分布情况，以此进行结构内部的探测，如图5.25所示。

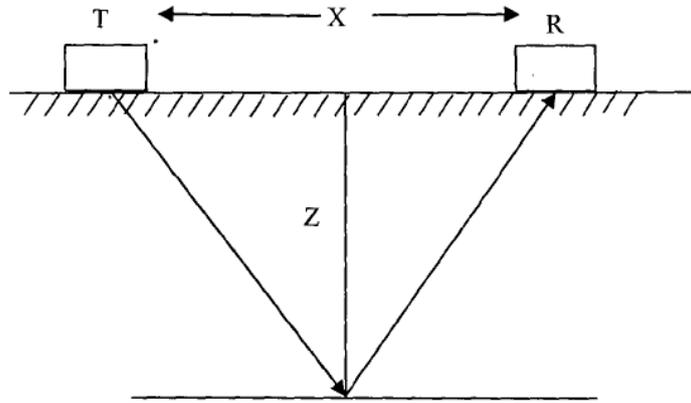


图 5.25 钢结构超声探伤法数据成像图

图中的T表示发射天线，R表示接收天线。雷达法常以波形图来表示，波的正负峰以不同的颜色表示，使得反射面的等色线可以反映介质内部的情况。

常用的地质雷达的观测方法主要剖面法，宽角法和共中心点法，电磁波在发射端与接收端之间的传播路径如图5.26所示。

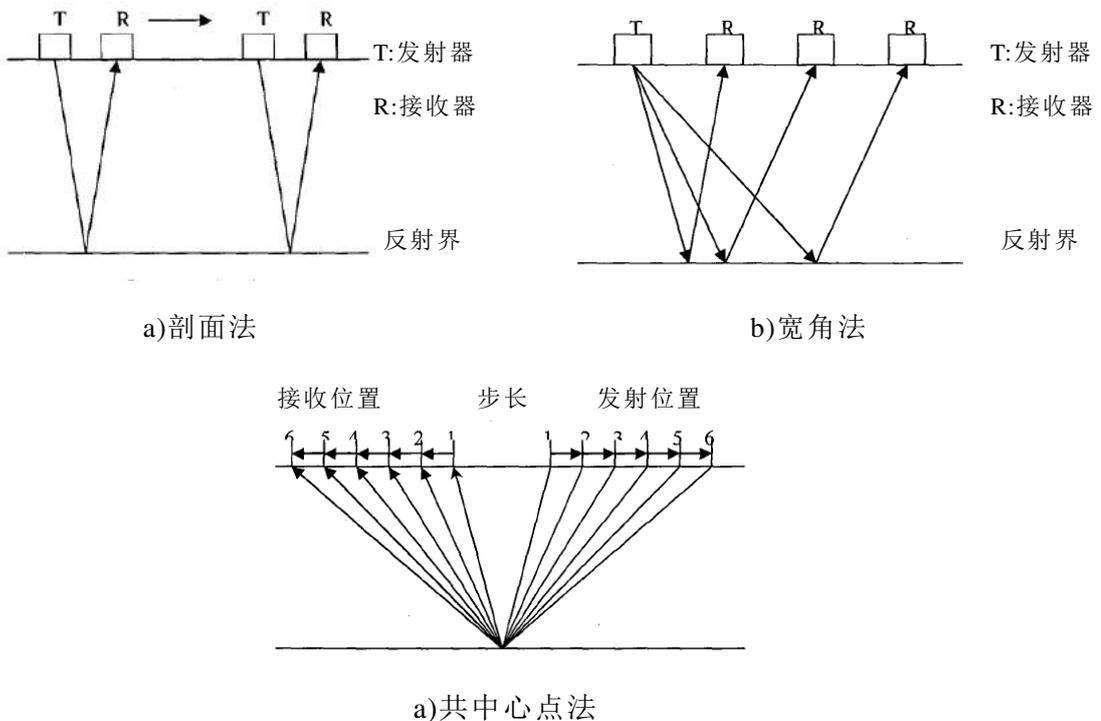


图 5.26 雷达法测试方式<sup>[118]</sup>

### 5.5.2 雷法法损伤成像测试

采用LTD-2100探地雷达和GC900M天线进行实验室钢-混凝土组合板试件与钢管混凝土试件的局部界面脱空损伤的测试，测试仪器如图5.27所示。



a) LTD-2100 探地雷达主机

b) LTD-2100 配套屏蔽天线（900M）

图 5.27 LTD-2100 探地雷达系统的组成

空气和钢材、混凝土、及泡沫的电性特征如表5.7所示。

表 5.7 各材料的电性特征

材料	空气	珍珠棉泡沫	混凝土	钢材
电导率 (S/m)	0	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-9</sup> ~10 <sup>-8</sup>	∞
介电常数 (相对值)	1	1.05~1.5	6.0~6.4	∞

由于天线频率900MHz 对应的垂直方向分辨率为0.03m，水平方向分辨率为0.06m而钢板和钢管壁的厚度仅有0.006m，故而钢管混凝土构件的测量预期无法得到有效的结果，选择钢-混凝土组合板构件进行测试，从混凝土一侧分别沿着矩形板构件的两个边长方向进行匀速扫描，测线经过各处损伤，如图5.28所示。



图 5.28 雷达法测钢-混凝土组合板构件

测试时的关键参数设置如下：

- (1) 检测速度控制在5km/h左右；
- (2) 每道（即每一个探测面采样点）包括512个时间采样点；
- (3) 900M天线的时间窗为15ns；

(4) 采用9点分段增益，由浅至深线性增益；  
测试的结果如图5.29所示。

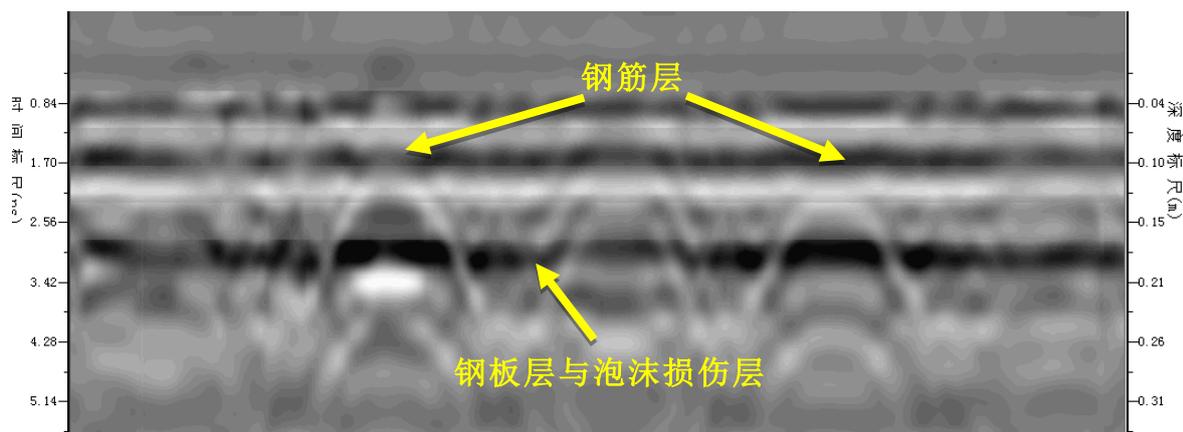


图 5.29 钢-混凝土组合板构件雷达法结果

从图5.29可见，图中拱状的波形为电磁波传播过程中遇到钢筋而引起的，拱顶的深度刻度即为钢筋层所在深度，而距离表面约0.13m深度处出现颜色较深的横向波形。由电磁波的传播理论可知，混凝土、钢材、损伤泡沫及空气介质的电性特征各不相同，当电磁波传播至混凝土与钢板的分界面、混凝土与损伤泡沫的分界面、损伤泡沫与钢板的分界面以及钢板与空气的分界面时，均会发生明显的反射现象，而钢板仅6mm厚，损伤泡沫不大于15mm，上述材料的分界面在垂直方向上十分接近，故此深度的测试结果波形由混凝土与钢板的分界面、钢板与空气的分界面或混凝土与泡沫的分界面共同作用下产生的，由于垂直方向分辨率为0.03m，而脱空损伤泡沫厚度小于0.015m，故无法分辨出钢-混凝土界面脱空损伤对波形造成的影响。

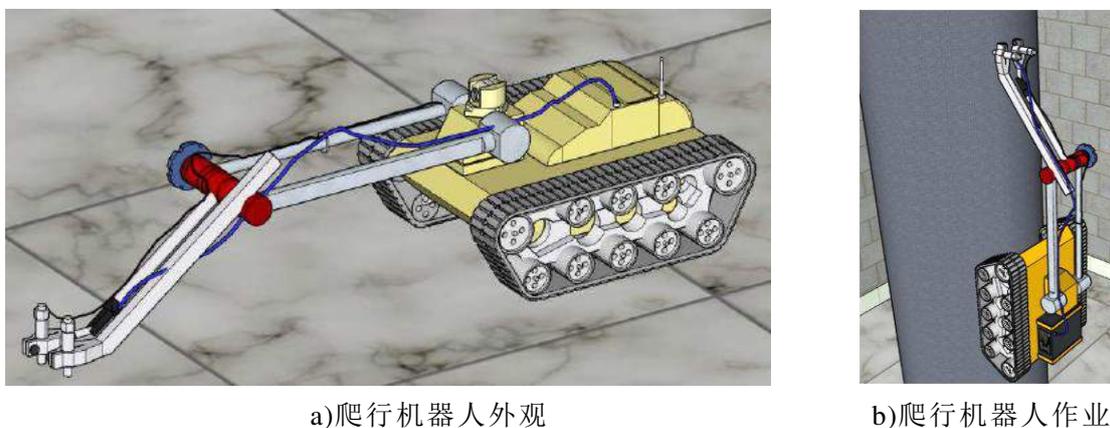
综上所述，针对钢-混凝土组合板构件的雷达法探伤试验，一方面受到仪器设备的限制，在板厚的方向上测试精度达不到要求，使得探伤结果在钢板的深度附近无法区分脱空损伤与材料介质边界对图形结果的影响；另一方面，实际应用中的雷达法探伤往往在长达几十米的范围内进行匀速移动测量，在所得测量结果图中，根据大部分测区内部不存在缺陷的假设，判断图形异常处是否存在脱空损伤，本次试验的构件尺寸不足一米，测量范围过于狭窄，测试结果没有对比与参考的价值。故雷达法探伤不适用与本次局部脱空损伤的探测。

## 5.6 基于爬行机器人的麦克风冲击共振成像法

### 5.6.1 麦克风冲击共振法原理

实际工程中的钢-混凝土组合结构脱空损伤检测，其检测的环境与损伤的位置、形状都将比本文的试件设计更复杂，本项目的最终目标是设计一个爬行机器人进行麦克风冲击共振法成像测试的实际应用，装载麦克风、力锤激励装置及信

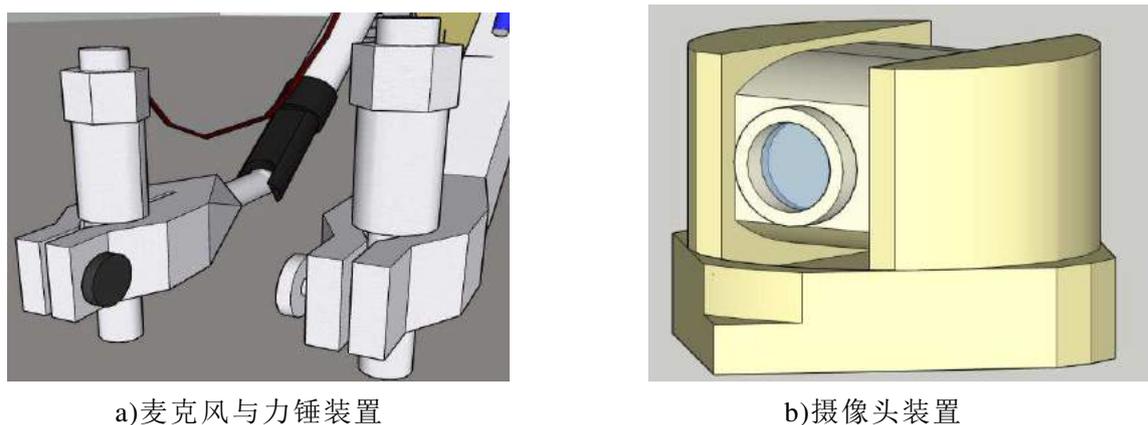
号采集装置，使用无线遥控及无线信号传输的方式指挥机器人进行爬壁作业，使得麦克风冲击共振法成像测试可以在不方便上人的区域和高空危险区域进行自动化作业，对钢-混凝土组合构件和钢管混凝土构件中疑似存在局部脱空损伤的部位进行精细化的多点测试敲击，并将结果最早处理成损伤云图结果。爬行机器人的外观如图5.30所示。机器人的部分部件细节如图5.31所示。



a)爬行机器人外观

b)爬行机器人作业

图 5.30 麦克风冲击共振成像测试爬行机器人



a)麦克风与力锤装置

b)摄像头装置

图 5.31 爬行机器人部分部件细节图

麦克风冲击共振法损伤成像的基本原理是：钢-混凝土组合结构中，局部界面脱空损伤区域的钢板或钢壳在点脉冲激励下将发生自由振动，其振动特性可由激励点上空的麦克风传感器拾取的声压信号作频响函数而得，且当激励点位于脱空损伤区域时，其声压频响函数幅值远远大于激励点位于非损伤区域时所测得的声压频响函数幅值。对测量区域根据测试精度要求进行测点网格划分，并通过爬行机器人装置对各测点进行逐点敲击与拾振，通过信号处理提取各测点声压信号的声压模态柔度近似值，将其整理绘成二维图像，当数据中出现某一区域的声压模态柔度近似值超出正常范围，且该区域测点识别到的一阶频率非常接近时，可以判断该区域存在界面脱空损伤。进一步可以通过损伤成像云图中的损伤形状与范围，建立四周约束的板壳振动的模型，计算其自振频率并对损伤面积大小进行验算校核。

### 5.6.2 麦克风冲击共振法损伤成像测试

根据前述章节中基于麦克风阵列的冲击共振法损伤成像测试结果，可以描述当损伤区域为 $150\times 150\text{mm}^2$ ，测量间距为 $25\text{mm}$ 的 $10\times 10$ 网格时基于爬行机器人的麦克风冲击共振成像测试的结果。

对于钢-混凝土组合板构件的 $150\times 150\text{mm}^2$ 损伤，测试的过程与结果如图5.32与图5.33所示。

对于钢管混凝土构件的 $150\times 150\text{mm}^2$ 损伤，测试的过程与结果如图5.34与图5.35所示。

由上述结果可知，基于爬行机器人的麦克风冲击共振法损伤成像测试对于钢-混凝土组合结构的局部界面脱空损伤可以进行有效的识别。

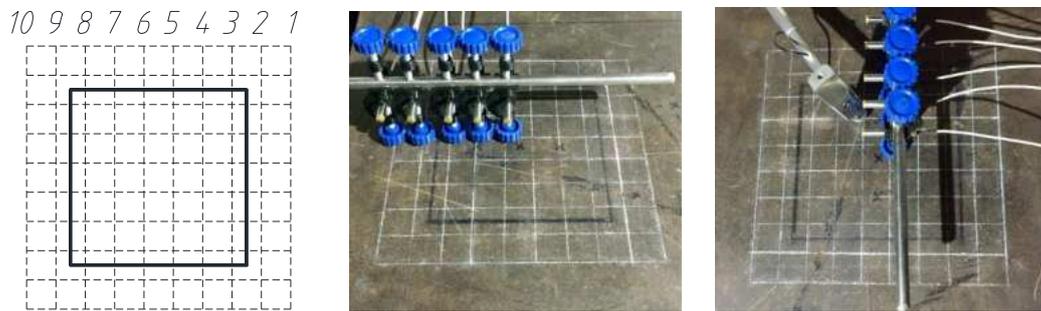


图 5.32 钢-混凝土组合板构件麦克风冲击共振法损伤成像测试

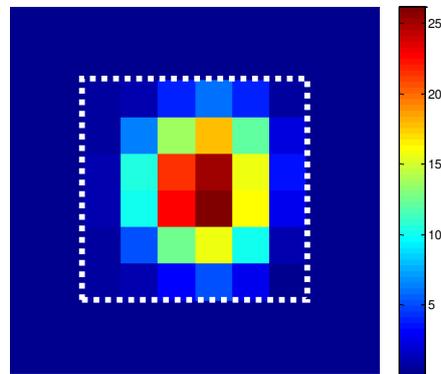


图 5.33 钢-混凝土组合板构件脱空识别成像云图

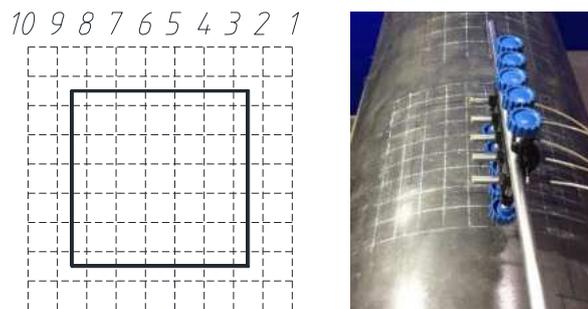


图 5.34 钢管混凝土构件麦克风冲击共振法损伤成像测试

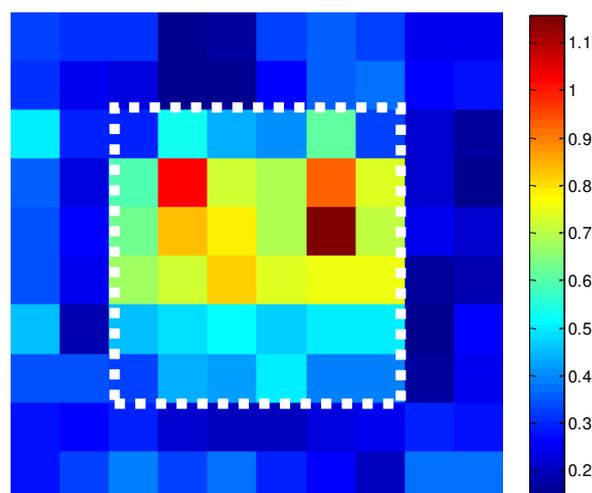


图 5.35 钢管混凝土构件脱空识别成像云图

## 5.7 各无损检测方法的优劣对比

本章分别探究了红外热成像探伤法、混凝土超声波法、钢结构超声探伤法、雷达法和基于爬行机器人的麦克风冲击共振法对钢-混凝土组合结构局部界面脱空损伤识别的测试效果。

从前述试验结果可知，对于红外热像法，在人工加热或制冷的情况下，可以由温度场的集中分布大致识别出一定面积以上的脱空损伤，对于面积较小的局部脱空损伤难以识别。其中，人工均匀加热的测试效果比均匀制冷的测试效果更优。对于混凝土超声探伤法，网格测距50mm的条件下可以由首波的声时与波幅异常大致测得损伤区域的位置。对于钢结构的超声探伤法，无法通过超声波的反射原理识别出钢板与混凝土之间的局部界面脱空损伤，只能在钢板厚度范围内探测材质内的晶粒损伤。对于雷达法，无法识别薄钢板或钢壳以内的局部脱空损伤。对于基于爬行机器人的麦克风冲击共振法，可以大致识别处钢-混凝土组合板构件的局部界面脱空损伤。

虽然麦克风冲击共振法成像测试、红外热像法和混凝土超声探伤法在钢-混凝土局部界面脱空的损伤识别上均能做出一定的效果，其测试的条件要求、测试效率、适用范围及测试精度等特点却各不相同。各方法的特点及优缺点整理如表5.8所示。

由表5.8可见，三种方法各具优缺点，其中麦克风冲击共振成像测试相比其他无损检测方法而言，具有无需界面接触耦合，测试方便快捷，安全高效，精准定位等优点，具有非常大的应用潜力。

表 5.8 麦克风冲击共振成像、红外热像法及混凝土超声波法的对比

项目	麦克风冲击共振法 (爬行机器人)	红外热成像法	混凝土超声法
测试准备	力锤敲击，即爬即测	大面积均匀加热或制冷	涂抹耦合剂
操控范围	无线遥控机器人，方便测量高处等不方便上人的区域	手持仪器，对准加热或制冷部位拍摄	结构两侧同时划分网格，手持探头
探伤面积	识别局部脱空损伤	识别大面积脱空损伤	识别局部脱空损伤
探伤精度	最小25mm网格，高精度探伤	图片颜色识别，界限模糊	最小50mm的网格，大致识别损伤区域
优点	1.力锤敲击麦克风拾振，无需界面接触耦合，快速方便； 2.爬行机器人为载体无线控制，测量安全性高； 3.精确定位局部损伤的范围，以频率预测模型辅助验证。	1.适合大面积脱空损伤识别； 2.直接输出图片结果，直观判断损伤大致范围。	1.以首波的声时、波幅综合识别损伤，发展成熟，行业规程齐全。
缺点	1.暂时无法识别脱空损伤深度； 2.不适合噪声特别大的环境测量。	1.需准备均匀加热设备，使用条件限制较大； 2.无法识别损伤深度； 3.图片结果为模糊的定性结果，受人为因素影响大，缺乏其他手段辅助证明。	1.接触面处理麻烦； 2.要求双面均布置探头，使用限制大； 3.网格间距较大，无法精确定位损伤范围。

## 5.8 本章小结

本章为了探究在钢-混凝土局部界面脱空损伤识别的领域中，麦克风冲击共振法损伤成像测试与其他常用的无损检测方法相比的优缺点及检测效果对比，分别采用红外热成像方法、混凝土超声探伤法、钢结构超声探伤法及雷达法对麦克风冲击共振测试中所测的钢-混凝土组合板构件的相应损伤工况进行损伤测试。其中，红外热成像探伤法和混凝土超声波探伤法能够识别出钢-混凝土组合结构的局部界面脱空损伤，钢结构超声探伤法及雷达法无法识别脱空损伤。

红外热成像法探伤适合大面积脱空损伤识别，直观判断损伤大致范围，但需准备均匀加热设备，使用条件限制较大，且无法识别损伤深度，图片结果为模糊

的定性结果，受人为因素影响大，缺乏其他手段辅助证明。

混凝土超声法以首波的声时、波幅综合识别损伤，行业规程齐全，但接触面处理麻烦，要求双面均布置探头，使用限制大，且测试网格间距较大，无法精确定位损伤范围。

相比而言三种方法中，以麦克风冲击共振法原理为基础的爬行机器人损伤成像测试虽然伴随着无法识别脱空损伤深度与不适合噪声大的环境测量的局限性，但其具有无需界面接触耦合，快速方便；无线控制，测量安全性高；精确定位损伤范围，以频率预测模型辅助验证等优点，在实际工程中，该方法具有非常可观的应用前景。

## 总结与展望

钢-混凝土组合结构由于其承载力高、延性好、抗震性能优越等优点，在高层及超高层建筑、桥梁结构及工业建筑中被广泛地应用。我国存在大量钢管混凝土拱桥现役结构，随着服役时间越来越长，其结构损伤积累越来越多，关键部位的结构损伤的检测识别成为急需解决的问题。本文提出利用麦克风冲击共振法作为解决钢-混凝土界面局部脱空损伤的无损识别问题的新手段。基于板壳振动理论，提出了局部脱空损伤在点激励下的响应频率峰值与损伤的平面几何尺寸的模型，分别设计了具有8种损伤工况的一块钢-混凝土组合板试件与一块钢管混凝土试件，对其局部脱空损伤进行了麦克风冲击共振法测试识别，利用有限元软件进行模拟与分析，并利用其他常用的无损检测方法对同一损伤构件进行损伤成像测试，对比各种方法的优点与缺点，详细的研究内容与成果如下：

(1) 理论方面：首先，介绍了声模态分析的基本理论。接着，介绍了振动与声的互易性原理和声学模态分析的基本理论，分析了基于声压信号的模态分析的可行性。最后，提出了矩形局部脱空损伤与圆形局部脱空损伤的自振频率估计模型。由频率公式可知，板的自振频率与其材料特性、平面尺寸及板的厚度相关，当局部脱空损伤的尺寸已知时，可以计算得出该损伤工况的自振频率估计值。

(2) 试验方面：首先，对钢-混凝土组合板试件进行试探性试验，分别探究麦克风声压测点与激励点相对位置对响应频谱信号的影响，结果与理论预期一致，即当麦克风测点与激励点的距离越远，板壳振动对麦克风测点的声辐射功率越小，测得响应信号的幅值也越小，但信号的基本频谱特征保持不变。

然后，对试件中各损伤工况的不同测点进行麦克风冲击共振试验，探究不同面积、形状和深度的脱空损伤对信号频响函数的影响。结果表明，麦克风冲击共振法适用于一定面积以上的局部脱空损伤的检测与识别，且损伤尺寸越大，其响应的一阶频率越低。

接着，进行钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件的局部脱空损伤板壳的声模态测试，结果表明，麦克风测得的声压信号能够准确地反映局部脱空损伤板壳的振动特性。

最后，针对试件特定的损伤工况进行基于麦克风阵列的冲击共振法损伤成像测试，提取其声压模态柔度近似值绘出损伤云图，结果表明，位于损伤区域内的激励点响应信号的声压模态柔度近似值较大，以此作为损伤点的判断依据，为麦克风冲击共振测试在实际工程中的应用奠定基础。

(3) 模拟方面：首先，过有限元流固耦合分析直观的模拟麦克风冲击共振测

试在损伤构件与无损构件中的测试声压响应特征。结果表明，当激励点位于脱空区域内时，上空产生的持续大振幅的声波。而当激励点位于非损伤区域时，声场分布中存在小振幅的球状直接声波与泄露瑞雷波。

接着，建立钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件的不同脱空损伤工况的模型，提取各损伤工况的模态频率与振型，并将模拟的模态分析结果与麦克风模态测试、加速度传感器模态测试以及理论自振频率解析解进行对比比较。结果呈现出较高的一致性，表明麦克声学模态测试能够可靠地测试出结构的模态频率与振型。

(4) 分别采用多种无损检测方法对麦克风冲击共振测试中所测的钢-混凝土组合板构件的相应损伤工况进行损伤测试。其中，红外热成像探伤法和混凝土超声波探伤法能够识别出钢-混凝土组合结构的局部界面脱空损伤，钢结构超声探伤法与雷达法无法识别脱空损伤。以麦克风冲击共振法原理为基础的爬行机器人损伤成像测试，具有无需界面接触耦合，快速方便；无线控制，测量安全性高；精确定位损伤范围，以频率预测模型辅助验证等优点，与红外热成像法及混凝土超声波法相比具有突出的优势，在实际工程中，该方法具有非常可观的应用前景。

本文对麦克风冲击共振法识别钢-混凝土组合结构的界面脱空损伤进行了理论、试验及模拟方面的研究，但笔者在研究过程中发现，仍然存在如下不足与有待进一步的研究的问题：

(1) 试验表明，麦克风冲击共振法可以高效快速地识别钢-混凝土组合结构中是否存在损伤及损伤的位置与大小，但无法准确地判断脱空损伤的深度，对于损伤程度的判别方法仍需进一步探索与研究。

(2) 本文提出了平板构件中矩形与圆形局部脱空损伤的理论频率-损伤尺寸模型，并得到试验验证，但对于钢管混凝土构件的脱空损伤，即开口柱壳中矩形与圆形的理论频率-损伤尺寸模型尚未找到可靠的理论模型，无法根据损伤尺寸准确预测出麦克风冲击共振法的试验频率峰值，有待进一步深入研究。

(3) 钢管混凝土的麦克风冲击共振试验设计中，所有的测点都设置在了轴向的中线上，未考虑到其一阶振型的形状特殊性，导致测得的频响函数峰值无法反映一阶模态频率，完善的试验设计应在轴向与环向的中线、以及偏离中线的位置均设置敲击测点，从而保证测得的频响函数信息能覆盖壳体振动的一般特征。

(4) 麦克风冲击共振法识别局部脱空损伤的面积临界值尚无系统的研究，该方法的适用范围尚待深入研究。

## 参考文献

- [1] 徐洪涛,郭国忠,蒲焕玲等.我国近年来桥梁事故发生的原因与教训. 中国安全科学学报, 2007 17(11): 90-95
- [2] 苏俊臣. 钢管混凝土拱桥调查及其脱空问题研究[西南交通大学硕士学位论文]. 成都:西南交通大学,2012
- [3] 傅斌,许晓锋,黄福伟.对钢管混凝土拱桥病害的调研及分类. 交通标准化,2008,(04):220-223
- [4] 张凯峰,刘永道,吴雄等.钢管混凝土界面脱空机理及检测技术研究进展. 混凝土,2013,(06):154-156+160
- [5] Rytter A.Vibration based inspection of civil engineering structure. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1991, 29(1):37-62
- [6] 刘沐宇,袁卫国.桥梁无损检测技术的研究现状与发展.中外路,2002,(06):34-37
- [7] 李国强,李杰.工程结构动力检测理论与应用. 科学出版社, 2002
- [8] 袁万城,崔飞.桥梁健康监测与状态评估的研究现状与发展.同济大学学报(自然科学版), 1999(2):184-188
- [9] 姜绍飞.基于神经网络的结构优化与损伤检测.科学出版社, 2002
- [10] 玄光男,程润伟,汪定伟.遗传算法与工程设计. 科学出版社, 1900
- [11] 沈建中,李宗津.土木工程中的无损检测技术及其应用.无损检测,2000,22(11):497-500
- [12] 袁仁续,赵鸣.红外热像技术在无损检测中的应用研究进展.福州大学学报, 2005, 33(s1):203-207
- [13] 韩林海,陶忠,刘威.钢管混凝土结构——理论与实践.福州大学学报,2001,29(6):24-34
- [14] 李俊峰.浅谈钢管混凝土结构的应用与优缺点.包钢科技, 2001, 27(3):92-95
- [15] 檀永杰.钢管混凝土超声测试方法研究[大连理工大学硕士学位论文].大连:大连理工大学, 2012
- [16] 张永宁.管内混凝土脱空检测新方法及脱空对钢管砼拱桥力学性能影响的研究[重庆交通大学硕士学位论文]. 重庆:重庆交通大学, 2013
- [17] 丁睿,刘浩吾,罗凤林等.钢管混凝土拱桥界面脱空光纤传感研究. 实验力学, 2004, 19(4):493-499
- [18] 张敏,虢曙安.钢管拱混凝土脱空距离检测计算新方法的研究.湖南交通科技,2008,(02):83-85

- [19] 傅斌,许晓锋,黄福伟.对钢管混凝土拱桥病害的调研及分类.交通运输研究, 2008(4):220-223
- [20] 刘益华,黄福伟.钢管混凝土拱肋脱空分类及原因分析.交通运输研究, 2010(14):134-136
- [21] 姜绍飞,许丕元,陈维.钢管混凝土结构的损伤检测方法.哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(s1):204-207
- [22] 涂光亚.脱空对钢管混凝土拱桥受力性能影响研究[湖南大学硕士学位论文]. 湖南:湖南大学,2007
- [23] 孙庆新,杨冬波.基于 ANSYS 的脱空钢管混凝土拱桥极限承载力分析.土木工程与管理学报, 2009, 26(2):47-51
- [24] 刘夏平,唐述,唐春会等.脱空钢管混凝土偏心受压力学性能试验研究.铁道建筑,2011(2):117-121
- [25] Liao F Y, Han L H, He S H. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12):1922-1935
- [26] 张宏,余钱华,吕毅刚.超声透射法检测钢管拱桥拱肋混凝土质量应用研究.土木工程学报, 2004, 37(8):50-53
- [27] 童寿兴.钢管混凝土脱粘的超声波检测与验证.无损检测, 2007, 29(12):731-732
- [28] 梁鸣,刘沐宇,冯仲仁.钢管混凝土超声波检测与评价试验研究.武汉理工大学学报, 2001, 23(12):44-46
- [29] 刘永前,张彦兵,邹振祝.超声波检测钢管混凝土拱桥密实度的试验研究.北京交通大学学报,2004, 28(4):54-57
- [30] 潘卫育,赵玮,李传勇等.超声波检测钢管混凝土密实性.中国铁道科学,2005, 26(3):64-67
- [31] 李天降,任敏,郭鹏飞.超声波在钢管砼主拱密实度及均匀性检测中的应用.西部探矿工程,2006, 18(4):66-68
- [32] 周先雁,肖云凤.用超声波法和冲击回波法检测钢管混凝土质量的研究.中南林业科技大学学报, 2006, 26(6):44-48
- [33] 史新伟,魏建东.超声波法测定钢管混凝土脱空量.人民黄河, 2010, 32(3):88-89
- [34] 杨建江,董守华.方形截面钢管混凝土柱超声检测.施工技术,2012, 41(22):101-103
- [35] 胡志辉.基于光纤光栅的复合材料结构健康监测研究.南京航空航天大学, 2014
- [36] 刘伟升.光纤光栅传感与光纤光栅激光器的应用研究.浙江大学, 2011

- [37] 丁睿,刘浩吾,罗凤林等.光纤检测钢管混凝土界面脱空模型的试验研究.压电与声光, 2004, 26(4):268-271
- [38] 丁睿,刘浩吾,罗凤林等.钢管混凝土拱桥界面脱空光纤传感研究.实验力学, 2004,19(4):493-499
- [39] 丁睿.钢管混凝土拱桥健康监测的光纤传感研究.土木工程学报,2005,38(11):69-74
- [40] 田长彬,王静,张峰等.用于桥梁钢管混凝土裂缝监测的 FBG 传感器研究.仪表技术与传感器,2017(9)
- [41] 黄沛,谢慧才,袁昕.混凝土构件粘钢补强质量的红外热像检测方法.激光与红外,2004,34(5):350-353
- [42] 胡爽.基于红外热像技术的钢管混凝土密实度缺陷检测探究.重庆大学,2016
- [43] Lin J M, Sansalone M. Impact-echo studies of interfacial bond quality in concrete: Part I - Effects of unbonded fraction of area. *Aci Materials Journal*, 1996, 93(3):223-232
- [44] Carino N J. The impact-echo method: an overview. *Structures. Structural Engineering Odyssey*. ASCE, 2001:1-18
- [45] 张东方,王运生.冲击回波法在钢管混凝土拱桥检测中的研究.工程地球物理学报,2009, 06(3):364-367
- [46] 杨金.基于 HHT 的钢管混凝土缺陷特征提取研究与 FPGA 实现[湖南科技大学硕士学位论文].湘潭:湖南科技大学, 2016
- [47] 王靖涛,黄新国,丁美英等.钢管混凝土表面波检测的小波分析方法.岩石力学与工程学报,2003,22(11):1878-1878
- [48] 陈振宇.基于功率谱的全隐框玻璃幕墙结构胶损伤检测方法[江苏大学硕士学位论文].南京:江苏大学,2008
- [49] 王骑,韩西,易志坚.混凝土路面板下脱空识别的瞬态冲击响应法研究.公路交通科技,2010,27(11):26-32
- [50] 陈良田.基于局部定量自激励的钢管混凝土结构脱空研究[大连理工大学硕士学位论文].大连:大连理工大学, 2013
- [51] 赵海亮.基于局部瞬态激励钢砼界面脱空实验研究[大连理工大学硕士学位论文].大连:大连理工大学,2014
- [52] Zhu J. Non-contact NDT of concrete structures using air coupled sensors. 2008
- [53] Brodeur P H, Hall M S, Esworthy C. Sound dispersion and attenuation in the thickness direction of paper materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, 94(4):2215-2225
- [54] Stor-Pellinen J, Luukkala M. Paper roughness measurement using airborne

- ultrasound. *Sensors & Actuators A Physical*, 1995, 49(1–2):37–40
- [55] Zhu J, Popovics J. Non–contact detection of surface waves in concrete using an air–coupled sensor. 2002, 615(1):1261–1268
- [56] K. Imielińska, M. Castaings, R. Wojtyra, et al. Air–coupled ultrasonic C–scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: glass, carbon and Kevlar/epoxy composites. *Journal of Materials Processing Tech*, 2004, s 157–158(4):513–522
- [57] Purnell P, Gan T H, Hutchins D A, et al. Noncontact ultrasonic diagnostics in concrete: A preliminary investigation. *Cement & Concrete Research*, 2004, 34(7):1185–1188
- [58] Berriman J, Purnell P, Hutchins D A, et al. Humidity and aggregate content correction factors for air–coupled ultrasonic evaluation of concrete. *Ultrasonics*, 2005, 43(4):211
- [59] Siddiolo A M, D'Acquisto L, Maeva A R, et al. Wooden panel paintings investigation: An air–coupled ultrasonic imaging approach. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2007, 54(4):836–46
- [60] Sanabria S J, Furrer R, Neuenschwander J, et al. Analytical modeling, finite–difference simulation and experimental validation of air–coupled ultrasound beam refraction and damping through timber laminates, with application to non–destructive testing. *Ultrasonics*, 2015, 63–65
- [61] Thiele S, Kim J Y, Qu J, et al. Air–coupled detection of nonlinear Rayleigh surface waves to assess material nonlinearity. *Ultrasonics*, 2014, 54(6):1470–1475
- [62] Kim G, Kim J Y, Kurtis K E, et al. Quantitative evaluation of carbonation in concrete using nonlinear ultrasound. *Materials & Structures*, 2016, 49(1–2):399–409
- [63] Gan T H, Hutchins D A, Billson D R, et al. The use of broadband acoustic transducers and pulse–compression techniques for air–coupled ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 2001, 39(3):181–94
- [64] Lee R, Ongpeng J, Oreta A, et al. Air–coupled ultrasonic test in singly–reinforced concrete beam. *Asep Convention on Concrete Engineering Practice and Technology*. 2016
- [65] 韩西,杨科,杨劲等.基于声振法的钢管混凝土脱空检测技术试验研究. *公路工程*, 2012, 37(5):108–110
- [66] Yan F, Hauck E, Pera T M, et al. Ultrasonic guided wave imaging of a composite

- plate with air - coupled transducers. AIP Conference Proceedings, 2007, 894(1):1007–1012
- [67] Zhu J, Schubert F, Popovics J S. Analytical solution of leaky rayleigh waves at the interface between elastic solids and ideal fluids. American Institute of Physics, 2004:198–205
- [68] Zhu J, Popovics J S, Schubert F. Leaky rayleigh and scholte waves at the fluid–solid interface subjected to transient point loading. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(4):2101–2110
- [69] Zhu J, Popovics J S. Non–contact imaging for surface–opening cracks in concrete with air–coupled sensors. Materials & Structures, 2005, 38(9):801–806
- [70] Zhu J, Popovics J S. Application of air - coupled sensors to surface wave ndt in concrete. American Institute of Physics, 2006:1500–1506
- [71] Ryden N, Lowe M J S, Cawley P, et al. Non–contact surface wave measurements using a microphone. symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Environment and Engineering Geophysical Society, 2006:1110–1115
- [72] Ryden N, Lowe M J S, Cawley P. Noncontact surface wave testing of pavements using microphones. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(4):2576
- [73] Lu Y F, Zhang Y, Cao Y, et al. A mobile acoustic subsurface sensing (MASS) system for rapid roadway assessment. Sensors, 2013, 13(5):5881–96
- [74] Gibson A, Popovics J S. Lamb wave basis for impact–echo method analysis. Journal of Engineering mechanics, 2005, 131(4): 438–443
- [75] Zhu J, Popovics J S. Air - coupled impact - echo method for ndt of concrete. American Institute of Physics, 2006:1351–1357
- [76] Zhu J, Popovics J S. Imaging concrete structures using air–coupled impact–echo. Journal of engineering mechanics, 2007, 133(6): 628–640
- [77] Popovics J S, Gibson A, Hall K, et al. Developments in air–coupled contactless sensing for concrete. NDTCE09, 2009, 7
- [78] Dai X W, Zhu J, Tsai Y T, et al. Use of parabolic reflector to amplify in–air signals generated during impact–echo testing. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(4): 167–172
- [79] Shin S W, Popovics J S, Oh T. Cost effective air–coupled impact–echo sensing for rapid detection of delamination damage in concrete structures. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(6): 887–895

- [80] Zhang Y, Wei X, Tsai Y T, et al. Multisensor data fusion for impact–echo testing of concrete structures. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(7):75021–75027
- [81] Tsai Y T, Zhu J. Simulation and experiments of airborne zero–group–velocity lamb waves in concrete plate. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, 31(4):373–382
- [82] Algernon D, Ernst H, Dressler K. Signal processing for air–coupled impact–echo using microphone arrays
- [83] Groschup R, Grosse C U. MEMS microphone array sensor for air–coupled impact–echo. *Sensors*, 2015, 15(7):14932–14945
- [84] Bjurström H, Ryden N. Detecting the thickness mode frequency in a concrete plate using backward wave propagation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(2):649
- [85] Kee S H, Zhu J. Using air–coupled sensors to determine the depth of a surface–breaking crack in concrete. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 127(3):1279
- [86] Kee S, Zhu J. Air–coupled surface wave transmission measurement across a partially closed surface–breaking crack in concrete. *American Institute of Physics Conference Series*. American Institute of Physics, 2011:169–174
- [87] Kee S H, Zhu J. Effects of sensor locations on air–coupled surface wave transmission measurements across a surface–breaking crack. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2011, 58(2):427–436
- [88] Kee S H, Zhu J. Surface wave transmission measurements across distributed surface–breaking cracks using air–coupled sensors. *Journal of Sound & Vibration*, 2011, 330(22):5333–5344
- [89] Lee K M, Kim D S, Kim J S. Determination of dynamic Young's modulus of concrete at early ages by impact resonance test. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 1997, 1(1):11–18
- [90] Kweon G, Kim Y. Determination of asphalt concrete complex modulus with impact resonance test. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1970(1):151–160
- [91] Heyliger P, Ugander P, Ledbetter H. Anisotropic elastic constants: measurement by impact resonance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001, 13(5):356–363
- [92] 潘秀娟, 屠康. 用冲击共振法无损检测梨采后质地的变化. *南京农业大学学报*, 2004, 27(2):94–98

- [93] Leśnicki K J, Kim J Y, Kurtis K E, et al. Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique. *Ndt & E International*, 2011, 44(8):721–727
- [94] 陈军,尹婷苑,徐征等.非线性冲击共振声谱法检测混凝土损伤.工业建筑, 2016, 46(1):95–99
- [95] Oh T, Popovics J S, Sim S H. Analysis of vibration for regions above rectangular delamination defects in solids. *Journal of Sound & Vibration*, 2013, 332(7):1766–1776
- [96] Zhang G, Harichandran R S, Ramuhalli P. Automatic delamination detection of concrete bridge decks using impact signals. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(6):951–954
- [97] Oh T, Popovics J S, Ham S, et al. Improved interpretation of vibration responses from concrete delamination defects using air-coupled impact resonance tests. *Journal of Engineering Mechanics Asce*, 2013, 139(3):315–324
- [98] Oh T, Popovics J S. Application of impact resonance c-scan stack images to evaluate bridge deck conditions. *Journal of Infrastructure Systems*, 2015, 21(1): 29
- [99] Oh T, Popovics J S. Practical visualization of local vibration data collected over large concrete elements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, 30(1):68–81
- [100] Sun H, Zhu J, Ham S. Acoustic evaluation of concrete delaminations using ball-chain impact excitation. *Acoustical Society of America Journal*, 2017, 141(5): 477
- [101] 何琳,邱小军,朱海潮.声学理论与工程应用.科学出版社,2006
- [102] Rayleigh J W S B, Lindsay R B. *The theory of sound*. Dover Publications, 1945
- [103] Wyckaert K, Augusztinovicz F, Sas P. *Vibro-acoustical modal analysis: some reflections on reciprocity and model validity*.1995
- [104] 刘进明,应怀樵,谭祥军等.振动和声的互易性原理在结构模态试验中的应用.现代振动与噪声技术. 2011
- [105] 李乐,刘文峰.声音识别结构模态方法的研究.科学技术与工程,2010, 10(22):5441–5444
- [106] Li J B, Yang Q F, Xiong S B. Structural acoustic radiation modal analysis. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 1995
- [107] 黎胜,赵德有.用有限元/边界元方法进行结构声辐射的模态分析.声学学报, 2001(2):174–179

- [108] Kirchhoff G. Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe. *Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik*, 2009, 1850(40):51–88
- [109] Mitchell A K, Hazell C R. A simple frequency formula for clamped rectangular plates. *Journal of Sound & Vibration*, 1987, 118(2):271–281
- [110] Hazell C R, Mitchell A K. Experimental eigenvalues and mode shapes for flat clamped plates. *Experimental Mechanics*, 1986, 26(3):209–216
- [111] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础-第2版.南京大学出版社, 2001
- [112] Arfken G, Mathews J. *Mathematical methods for physicists*. Elsevier, 2006
- [113] Clough R W, Penzien J, Griffin D S. *Dynamics of structures*. McGraw–Hill, 1975
- [114] Raghavendrachar M, Aktan A E. Flexibility by multireference impact testing for bridge diagnostics. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(8):2186–2203
- [115] 廖公云,黄晓明. *Abaqus 有限元软件在道路工程中的应用*. 东南大学出版社, 2014
- [116] 谢春霞. *红外热像检测技术在土木工程中的应用*[西南交通大学硕士学位论文]. 成都:西南交通大学, 2009
- [117] 梁惕平. *超声波检测混凝土构件内部缺陷数据处理研究*[江西理工大学硕士学位论文]. 南昌:江西理工大学, 2009
- [118] 朱洪潇. *混凝土探伤中的探地雷达及超声 CT 的综合应用*[中南大学硕士学位论文]. 长沙:中南大学, 2007

## 致 谢

转眼间两年半的研究生生活即将步入尾声，回首两年半间在学校里学习和生活的点点滴滴，感慨时光短暂，记忆漫长，期间学校的平台和资源带给我许多的收获和成长，感恩这几年陪伴我一路走来的老师、同学和朋友，有你们的引导和帮助，让我克服了诸多困难，顺利完成学业。

本人的硕士学位论文是在恩师周云的殷切关怀和悉心指导下完成的，这几年来导师对我学习和生活上给予了无微不至的关怀。从课题的选择，到理论上的准备，直到最后的试验室试验和论文的撰写，在整个论文的进度和质量上周老师都进行了把控，期间给予了我耐心的指导以及多方面的支持，论文中的每一处都凝聚着他对我的付出和关心，周老师对学术严谨的态度和精益求精的工作风格，带给我深刻的影响，让我受益匪浅，终身难忘。在学习之外，也要感谢恩师在这几年里给予了我一个团结活泼、开放包容、张弛有度的团队氛围和环境，让我以及团队的每一位成员都能够充分发挥自己的特点，完成学业的同时合理规划自己的生活 and 未来，在此谨向老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在进行试验室试验和论文撰写期间，我的室友邓茜、董玲、苏丽静给了我很多的帮助和鼓励，他们的付出保证了试验的顺利进展，感谢课题组裴熠麟、周赛、程依婷对我试验的支持和付出，感谢同门胡翔、陈太平、奚树杭、曾雅丽思、李紫玮、张琴、彭涵钰、王振生以及研一兄弟姐妹们一路的陪伴，向每一位关心和帮助过我的你们道一声衷心的感谢。

最后要感谢一直在背后支持和鼓励我的父母，感谢他们为我提供的一切，谢谢他们的理解，让我能够全身心地投入学业。

感谢各位专家、教授在百忙之中对本论文的审阅！

刘蒙

2017年1月14日于湖南大学