

110724

鉴定会材料之一

管道包扎降噪的试验研究

北京经济学院 安全工程系

1987.6

北京经济学院图书馆
P25

一、前言:

工矿企业中常常使用各种金属管道输送各种气体、液体、蒸汽，或借助于流体输送固体散装物料，在高速传输过程中，不仅会在弯头、阀门、或其他变径处产生湍流噪声，同时高速流体激发管壁振动亦能辐射出强烈的噪声、污染车间作业环境；另外金属管道还能传输声源噪声如风机、压缩机的噪声，使远离声源处仍然成为一个有效的声能辐射体，对周围环境引起显著不良影响。

为减低管道系统的声辐射，一种比较简便和有效的办法是在管道外面包扎以吸声、隔声材料，和在其外表面敷沾以阻尼材料，做成复合隔声结构。但是，由于包扎所使用的材料不同，包扎方法不同，取得的隔声效果亦不相同。特别是目前对管道包扎的各种隔声结构同其减噪量的理论计算还不够十分了解，为了探索比较经济合理和求得一个比较好的控制管壁声辐射的包扎降噪方案，我们在劳动人事部保护局、北京市经委、市劳动局的关怀和支持下，根据理论分析，参考国内外有关实践经验，进行了大量的科学实验，结合工厂实际取得了一定的科研成果。

二、管道包扎材料隔绝空气声的隔声原理

1. 单纯使用多孔材料包扎的隔声性能

多孔材料由于其本身孔隙多漏声严重，一般隔声性能很差。假如，我们仅从其隔声能力来考虑，根据理论一般可以从三个频率区域来估算。

在低频区域，多孔材料厚度小于材料中声波波长 $1/10$ ，其传声损失可按(1)式计算。

$$R = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{\frac{R_f}{\rho_c} \left(\frac{\omega M_s}{\rho_c} \right)^2 \left(4 + \frac{R_f}{\rho_c} \right)}{4 \left[\left(\frac{R_f}{\rho_c} \right)^2 + \left(\frac{\omega M_s}{\rho_c} \right)^2 \right]} \right\} \text{ dB} \quad (1)$$

式中 R_f — 材料流阻

ω — $2\pi f$

M_s — 材料面密度

ρ_c — 空气特性阻抗

在高频区域, 多孔材料的声衰减常数 α 和材料厚度 d 的乘积大于 9 dB , 其隔声性能 R 由三部分组成

$$R_1 = 8.69 \alpha d \quad \text{dB} \quad (2)$$

式中 α — 声衰减常数

d — 材料厚度

R_2 和 R_3 是声波通过材料的两个界面上的反射损失, 一般 $R_2 = R_3$

在中频范围的隔声量没有详细的计算方法, 一般根据低频和高频范围绘制的曲线平滑的连接而获得其结果。

由上可知, 单纯多孔材料的隔声性能取决于材料的流阻、面密度、材料内部声衰减常数和界面的反射损失。

如果把多孔材料包扎在有声辐射的管道上, 由于材料与振动的管壁紧密结合, 在低频范围其特性好像管道本身特性一样, 传声损失几乎为零; 在高频区域, 声波在材料中会有一定的衰减, 但由于材料的一侧与管壁紧贴, 反射损失只有一次, 总的传声损失是:

$$R = 8.69 \alpha d + R_2 \quad \text{dB} \quad (3)$$

在中频范围是联接低高频曲线而得。

2. 多孔材料外面包扎一层密实不透声的隔声层, 组合成吸声、隔声复合结构, 其隔声效果有很大的改善。这层密实材料复盖引起的高频范围传声损失 R_4 由质量定律来计算。理论上一般用(4)式计算。

$$R_4 = 20 \lg M + 20 \lg f - 47.5 \text{ dB} \quad (4)$$

式中 M ——面密度

f ——频率

3. 在比较薄的金属管道外表面涂刷阻尼层, 可以增加管壁的阻尼, 抑制管壁在共振区和吻合效应区的振动, 减少声能辐射。

三、管道包扎隔声性能的实验室测定

1. 测试条件和仪器设备

本测试试验是在混响室内进行的。该混响室的几何尺寸是 $6.9 \text{ 米} \times 5 \text{ 米} \times 4.5 \text{ 米}$, 体积 $V = 152.6 \text{ 米}^3$, 水泥地面, 上面保留原有宽 140 mm 、高 450 mm 的5条水泥抹面的地梗, 以增加室内的声扩散。

试验管道长 2 米 , 直径 25 cm , 管壁取 1 mm 、 2 mm 、 3 mm 三种不同的厚度。管道一端与混响室内原有 1.7 米 长, 直径 37 cm , 厚 7 mm 的钢管相接, 另一端用两层 8 mm 厚的钢板封严。试验管道固定在有减振的支架上。为确保 1.7 米 长的大管道隔声, 在其内部镶衬以 1.5 米 长、管径 25 cm 、厚度为 1 mm 的小管道, 内外管道之间充填以 5 cm 厚岩棉; 大管道外面又砌筑以 24 cm 厚的砖砌结构。

如图1所示。(见下页)

本试验做的是静态隔声测试, 声学仪器是丹麦 B & K 公司 4417 型建筑声学分析仪及其配套设备; 声源是 B & K 4211 型恒定声压源, B & K 4165 型电容传声器安装在混响室内 B & K 3923 型旋转支架



图 1 混响室内测试装备

1 cm 厚麻刀灰泥；③阻尼材料是选用两种厚度的浸沥青麻袋阻尼层涂包缠在 1 mm 厚试验管道外面；阻尼层外再分别复盖以不同厚度的吸声层和隔声层。

以上组合包扎降噪方案达近百种，进行了反复隔声测试。

3. 包扎测试数据计算和处理

由于本测试试验是在混响室内进行的。每种包扎方案由试验管道辐射到混响室内的每一个 $1/3$ 倍频程声功率级由下式计算出：

$$L_w = L_p - 10 \lg \frac{T}{T_0} + 10 \lg \frac{V}{V_0} + 10 \lg \left(1 + \frac{S \lambda}{8 V} \right) + 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad \text{dB} \quad (5)$$

式中 L_w —试验声源的声功率级 dB (基准声功率 1 微微瓦)

上，与试验管道最近距离为 1 米，在室内取时空平均值。

2. 包扎测试方案的确定

在不同厚度的试验管道外面，①分别包扎以聚氨脂泡沫塑料，聚苯乙烯，超细玻璃棉，岩棉，珍珠岩吸声砖，草绳和石棉绳等七种吸声材料，分别取不同的厚度；②在不同厚度吸声材料外面再分别包以三种密实不透声的材料，组成隔声结构。隔声材料分别是 0.5 mm 厚镀锌铁板，1 mm 厚铝板和

L_p ——平均频带声压级 d B (基准声压 20 微帕)

T ——房间的混响时间 秒

T_0 ——1 秒

V ——房间的容积 米³

V_0 ——1 米³

λ ——1/3 倍频程的中心频率的波长 米

S ——房间的总表面积 米²

B ——大气压 毫巴

本试验的各种包扎方案的噪声降低量用包扎前后的差值即插入损失值 (I L) 来评价, 其计算方法如下:

设包扎前室内平均频带声功率级 L_w 为

$$L_{w0} = L_{p0} - 10 \lg \frac{T_1}{T_0} + 10 \lg \frac{V}{V_0} + 10 \lg \left(1 + \frac{S \lambda}{8 V} \right) + 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad \text{d B} \quad (6)$$

包扎后室内平均频带声功率级 L_{w1} 为

$$L_{w1} = L_{p1} - 10 \lg \frac{T_2}{T_0} + 10 \lg \frac{V}{V_0} + 10 \lg \left(1 + \frac{S \lambda}{8 V} \right) + 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad \text{d B} \quad (7)$$

式中 L_{p0} , T_1 分别是包扎前室内平均频带声压级和混响时间;

L_{p1} , T_2 分别是包扎后室内平均频带声压级和混响时间。

由于包扎前后在同一试验室内进行, 测试条件完全相同, 包扎前后的降噪量 ΔL , 即插入损失值 I L 为(6)式和(7)式的差值得:

$$I L = \Delta L = L w_0 - L w_1 = (L p_0 - 10 \lg \frac{T_1}{T_0}) -$$

$$(L p_1 - 10 \lg \frac{T_2}{T_0}) = \Delta L w = \Delta L p + 10 \lg \frac{T_2}{T_1}$$

设 $10 \lg \frac{T_2}{T_1} = 8$ 为混响时间修正

$$\text{插入损失 } I L = \Delta L p + 8 \quad d B \quad (8)$$

以上近百种包扎降噪方案经过筛选, 表1列出了其实测计算结果。由于500 Hz以下低频段测量精度较低, 并且隔声效果差, 表中所列数值是500—8000 Hz 13个1/3倍频程插入损失的平均值。

表1中所列符号说明

A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示1 mm、2 mm、3 mm厚度的试验管道;

J_2 、 J_5 、 J_8 、 J_{10} 表示不同厚度的聚苯乙烯。面密度分别是

0.45、0.75、1.2、1.5 (Kg/m^2);

P_2 、 P_4 、 P_6 、 P_{10} 表示不同厚度的聚氨脂泡沫塑料, 面密度分

别是0.7、1.4、2.1、3.5 (Kg/m^2);

$B_{2.5}$ 、 B_5 、 $B_{7.5}$ 、 B_{10} 表示不同厚度的超细玻璃棉, 面密度分别是

0、0.75、1.5、2.25、3.0 (Kg/m^2);

Y_5 、 Y_{10} 表示两种厚度的岩棉, 面密度分别是4、8 (Kg/m^2);

I_8 表示珍珠岩吸声砖, 面密度为2.8 Kg/m^2 ;

上述五种包扎材料右下脚注表示材料的厚度, 单位是厘米, 如 Y_5 指5 cm厚岩棉。

C_2 、 C_4 、 S_2 、 S_4 表示草绳和石棉绳, 其右下脚注为缠绕的层数, 如 C_2 指绕2层厚度的草绳。

(下接表1后)

表1 各种包扎方案的隔声测量计算结果

序号	包扎方案	插入损失 IL (dB)	备 注
1	A_1 (不包扎1mm厚)	8.1	(LP-10lg) 500-8000 Hz $1/3$ 倍频带平均
2	$A_1 + J_3$	0.62	包不同厚度的聚苯 乙稀
3	$A_1 + J_5$	1.2	
4	$A_1 + J_8$	1.2	
5	$A_1 + J_{10}$	3.3	
6	$A_1 + P_3$	3.4	包不同厚度的聚氨脂 泡沫塑料
7	$A_1 + P_4$	5	
8	$A_1 + P_6$	7	
9	$A_1 + P_{10}$	10.4	
10	$A_1 + B_{2.5}$	1.1	包扎超细玻璃棉
11	$A_1 + B_5$	1.3	
12	$A_1 + B_{7.5}$	1.1	
13	$A_1 + B_{10}$	1.4	
14	$A_1 + Y_5$	1.6	两种厚度的岩棉
15	$A_1 + Y_{10}$	16.5	
16	$A_1 + C_3$	8	两种层数的草绳
17	$A_1 + C_4$	10.4	
18	$A_1 + I_3$	1.4	珍珠岩吸声砖

19	$A_1 + S_2$	1 1	两种层数的石棉绳
20	$A_1 + S_4$	1 5	
21	$A_1 + J_2 + 0.5 t$	9	不同厚度聚苯乙烯 外包以镀锌铁板和 铝板
22	$A_1 + J_2 + 1 l$	8	
23	$A_1 + J_5 + 0.5 t$	1 0	
24	$A_1 + J_2 + 0.5 t$	1 1	
25	$A_1 + J_2 + 1 l$	1 0	
26	$A_1 + J_{10} + 0.5 t$	1 1	
27	$A_1 + J_{10} + 1 l$	1 0	
28	$A_1 + P_2 + 0.5 t$	1 2	不同厚度的泡沫塑 料外包以镀锌铁板 和铝板
29	$A_1 + P_2 + 1 l$	1 1	
30	$A_1 + P_4 + 0.5 t$	1 3	
31	$A_1 + P_4 + 1 l$	1 3	
32	$A_1 + P_6 + 0.5 t$	1 3	
33	$A_1 + P_6 + 1 l$	1 4	
34	$A_1 + P_{10} + 0.5 t$	1 5	
35	$A_1 + P_{10} + 1 l$	1 4	
36	$A_1 + B_{2.5} + 0.5 t$	1 4	不同厚度的超细棉 外包以镀锌铁板和 铝板
37	$A_1 + B_{2.5} + 1 l$	1 4	
38	$A_1 + B_5 + 0.5 t$	1 4	
39	$A_1 + B_5 + 1 l$	1 4	
40	$A_1 + B_{7.5} + 0.5 t$	1 4	
41	$A_1 + B_{10} + 1 l$	1 5	

42	$A_1 + Y_5 + 0.5 t$	1 6	岩棉外复以镀锌铁板 和铝板
43	$A_1 + Y_5 + 1 l$	1 6	
44	$A_1 + Y_{10} + 0.5 t$	1 5	
45	$A_1 + Y_{10} + 1 l$	1 6	
46	$A_1 + I_8 + 0.5 t$	1 4	珍珠岩外复铁板和麻 刀灰
47	$A_1 + I_8 + 1 h$	1 6	
48	$A_1 + C_3 + 1 h$	1 6	草绳外复以麻刀灰
49	$A_1 + C_4 + 1 h$	1 7	
50	$A_1 + S_2 + 1 h$	1 5	石棉绳外复以麻刀灰
51	$A_1 + S_4 + 1 h$	1 7	
52	$A_1 + L_3$	9	三层麻袋阻尼层
53	$A_1 + L_3 + I_8$	1 6	阻尼层外复珍珠岩、和 麻刀灰、镀锌铁板
54	$A_1 + L_3 + I_8 + 1 h$	1 6	
55	$A_1 + L_3 + I_8 + 0.5 t$	1 6	
56	$A_1 + L_3 + P_5$	1 3	阻尼层外复泡沫塑料 和镀锌铁板
57	$A_1 + L_3 + P_5 + 0.5 t$	1 7	
58	$A_1 + L_3 + P_{10}$	1 5	
59	$A_1 + L_3 + P_{10} + 0.5 t$	1 7	
60	$A_1 + L_3 + Y_5$	1 7	阻尼层外复以岩棉
61	$A_1 + L_3 + Y_{10}$	1 8	
62	$A_1 + L_3 + B_5$	1 6	阻尼层外复超细棉再 复铁板
63	$A_1 + L_3 + B_5 + 0.5 t$	1 7	
64	$A_1 + L_3 + B_{10}$	1 7	

65	$A_1 + L_3 + B_{10} + 0.5 t$	1 7	
66	$A_1 + L_6$	8.9	六层麻袋阻尼层
67	$A_1 + L_6 + P_6$	1 4	阻尼层与泡沫塑料
68	$A_1 + L_6 + P_6 + 0.5 t$	1 9	镀锌铁板组合
69	$A_1 + L_6 + P_{10}$	1 6	
70	$A_1 + L_6 + P_{10} + 0.5 t$	1 9	
71	A_2 (2mm厚管道不包扎)	7 8	(LP-10lgT)500 -8000Hz 1/3 倍频 带平均
72	$A_2 + P_2$	2	外包扎泡沫塑料, 和 与镀锌铁板组成隔声 结构
73	$A_2 + P_2 + 0.5 t$	3	
74	$A_2 + P_4$	3	
75	$A_2 + P_4 + 0.5 t$	4	
76	$A_2 + P_6$	3	
77	$A_2 + P_6 + 0.5 t$	4	
78	$A_2 + P_{10}$	5	
79	$A_2 + P_{10} + 0.5 t$	4	
80	$A_2 + Y_5$	4	包扎岩棉
81	$A_2 + Y_{10}$	6	
82	A_2 (3 mm厚管道不包扎)	7 6	(LP-10lgT) 500 -8000Hz 1/3 倍 频带平均
83	$A_2 + P_2$	1	

84	$A_3 + P_3 + 0.5 t$	2	包扎泡沫塑料, 和与镀锌铁板组成隔声结构
85	$A_3 + P_6$	3	
86	$A_3 + P_6 + 0.5 t$	3	
87	$A_3 + P_{10}$	4	
88	$A_3 + P_{10} + 0.5 t$	3	
89	$A_3 + Y_5$	4	包扎岩棉
90	$A_3 + Y_{10}$	2.5	
91	$A_1 + P_4 + 0.5 t$ (管道长1米)	50.59	(LP-10lg T)
92	$A_1 + P_4 + 0.5 t$ (管道长2米)	50.93	500-8000 Hz 1/3
93	$A_1 + P_4 + 0.5 t$ (管道长4米)	57.46	倍频带平均

续前说明:

0.5 t、1 l、1 h, 表示 0.5 mm 厚镀锌铁板, 1 mm 厚铝板和 1 cm 厚麻刀灰泥。

L_3 , L_6 , 表示浸沥青麻袋阻尼层, 其右下脚注为缠绕的层数, 如 L_6 是缠绕 6 层沥青麻袋布。

3. 测试结果分析

从以上各种包扎方案的隔声曲线得出: 500 Hz 以下频段一般隔声效果较差, 从 500、600 Hz 起到 1000 Hz 频段, 隔声曲线急骤上升, 在 1600 Hz 处有 1-2 dB 的凹陷, 总的趋向是 1000 Hz 以上每上升一个 1/3 倍频程, 隔声值提高 1-2 dB, 4000 Hz 以上效果最为明显, 如图 2 所示(见下页)。这是 5 cm 厚岩棉 (Y_5), 8 cm 厚珍珠岩吸声砖 (I_8) 和 10 cm 厚聚氨脂泡沫塑料 (P_{10}) 包扎在 1 根 10 cm 厚试验管道上的隔声曲线。

1. 单纯使用轻质、多孔材料包扎

单纯使用轻质、多孔材料包扎，其隔声效果与包扎材料的性质、面密度、厚度和材料的流阻等条件有关。

a、不同性质的包扎材料隔声效果不同。图3，表2是厚度大体相同的四种包扎材料的隔声曲线和隔声数值的比较。由图3表2看出，材料的质量（面密度）和流阻起着重要的作用。面密度大的岩棉隔声效果好，聚氨脂泡沫塑料面密度虽然大于超细玻璃棉，但孔隙率较高，相比之下隔声效果较差，聚苯乙烯表面无孔不属吸声材料而且面密度小，故隔声能力极差。

图2 典型隔声曲线

图3 四种包扎材料厚度大体
相同的隔声比较

表 2

材料名称	面密度 Kg/m^2	厚度 cm	I L d B
岩棉	4	5	16
超细棉	1.5	5	13
泡沫塑料	2.1	6	7
聚苯乙烯	0.75	5	1

表 3

聚氨脂 泡沫塑料 (cm)	面密度 (Kg/m^2)	插入损失 IL (dB)
2	0.7	2
4	1.4	5
6	2.1	7
10	3.5	10

同时,从图 4 所示的四种不同厚度的聚氨脂泡沫塑料的高频隔声曲线看,材料随厚度不断提高,隔声效果亦明显提高,这同多孔材料在高频范围隔声效果取决于式(2) $R_1 = 8.69 \alpha d$ 关系式中厚度 d 的参数有关。

b、容重相同的同类材料,厚度不同,隔声效果不同。表 3 列出几种不同厚度的聚氨脂泡沫塑料包扎后的隔声比较。可以看出,材料厚度不断加大,相应面密度不断提高,隔声值也不断上升,显然,这里是质量起着重要作用。

图 4 不同厚度聚氨脂泡沫在高频范围隔声效果的比较

另外，每种材料的厚度，从隔声和经济效果出发均有一个理想值，例如使用 5 cm 厚和 10 cm 厚的岩棉包扎，表 1 中所列的 500 - 8000 Hz 范围的隔声值，二者的差值不足 1 个 dB，显然 5 cm 厚的岩棉即可满足要求。

c. 使用绳类包扎，其隔声效果同样取决于材料的面密度和厚度（即缠绕的层数）。表 1 中列出石棉绳和草绳包扎的隔声效果，从厚度看，显然 4 层比 2 层的效果好。石棉绳的面密度较草绳的大，故隔声效果比草绳好。但草绳的价格便宜，可就地取材，而石棉绳更适用于保温隔热条件之中。另外，使用绳类扎绑，缠绕的松紧程度也影响其隔声性能。绳子缠的紧些，实际会起到抑制管壁振动的阻尼作用。

2. 由芯层和密实隔声层组合成复合隔声结构

a. 由实测得出：使用轻型、多孔材料为芯层，其隔声结构的隔声值取决于面密度大的隔声层。表 4 列出 3 cm 厚聚苯乙烯做芯层，外面分别包以两种不同面密度的隔声层，显然两种结构的隔声值有一定差异，其中隔声层面密度大的效果好。

表 4

隔 声 层 种 类	面 密 度 (Kg/m^2)	插入损失 IL (dB)
0.5 mm 厚镀锌铁板	3.9	9
1 mm 厚铝板	2.6	8

b. 隔声层与芯层材料组合，当二者的面密度相差较大，隔声层对隔声结构的性能影响明显，当二者的面密度接近时，隔声层对隔声结构的性能影响，相对有所减低。图 5 是不同厚度聚氨脂泡沫塑料同其外面分别包以 0.5 mm 厚镀锌铁板组成的隔声结构的隔声比较。聚

氨基泡沫塑料属于轻质、多孔材料，本身容重小，以他为芯层取 2 cm 厚度时，外包以 0.5 mm 厚镀锌铁板其面密度为芯层的 5.5 倍，二者差值较大，在 500—8000 Hz 范围，隔声曲线急剧上升，这个范围的平均隔声值较单纯芯层材料包扎，隔声效果明显提高达 9 个 dB；同时也可看出：随芯层厚度加大，面密度相对提高，隔声曲线相对趋于缓慢。

图 5

当芯层材料面密度的提高与所加隔声层的面密度相差不大时，所加隔声层对隔声结构性能影响不明显。图 6 是 5 cm 厚，面密度 4 kg/m^2 的岩棉和以他为芯层，外包以 0.5 mm 厚面密度为 3.9 kg/m^2 的镀锌铁板组合的隔声结构的隔声比较，从其隔声曲线看，两条曲线几乎重合，说明这时隔声层对隔声结构的性能影响很小，可以不必再加设了。

图 6

3. 阻尼材料的隔声效果

阻尼材料对于抑制薄钢板振动,减小共振区和吻合区的声辐射有明显的隔声效果。由图7看出:不加阻尼时,低频凹陷范围较宽,从

160 Hz 扩大到800 Hz
有8个1/3倍频程的宽度,
其平均隔声值只有0.9个dB;
加阻尼层后这个凹陷范围缩小
为500-630 Hz 两个
1/3倍频程,平均隔声值提
高为3.5 dB;在高频范围,
其隔声曲线有明显提高,由图
中看出:在1600 Hz和
4000 Hz 两处有两个谷,加
阻尼比不加阻尼分别有4和9
个dB的隔声效果。

图7 加阻尼与不加阻尼的
隔声比较

4. 不同厚度的管壁,包
扎的隔声效果不同。

本试验取三种不同厚度(1 mm, 2 mm, 3 mm)的管壁,实测结果是:

a、在恒定声压源辐射一定声功率的条件下,不同厚度的试验管道,隔声效果不同,表5是实测结果的比较。