

深圳市药品检验研究院 (深圳市医疗器械检测中心)

研发用半消声室

声学设计、制造施工安装及现场实测验收详细介绍

一、项目简介

深圳市药品检验研究院(深圳市医疗器械检测中心)成立于1982年7月,是法定的药品、医疗器械专业性检验、科研机构,检验领域覆盖药品、特殊食品、化妆品、医疗器械、药包材、洁净区(室)环境、实验用水等8大类产品,检验数据国际互认。目前,业务范围包括:WHO等国际组织委托检验,进口药品检验,新产品注册检验,国家、省、市政府监督性、评价性抽查检验及应急检验。同时,围绕检验新技术新方法,国际药品标准、国家标准,补充检验方法,快筛、快检技术,仿制药一致性评价等开展科学研究工作。

为致力于极致客户体验,为降低噪声寻求科学解决方案提供精准的数据。深圳市药品检验研究院向我公司(广州丹品人工环境技术有限公司)购买了半消声室。

二、项目要求

由广州丹品人工环境技术有限公司设计及承担建设该半消声室,并在规定的时间内竣工且通过验收。产品竣工验收合格后,我司将继续承担质量保证、保修、维修和技术支持的责任。安装地点为需方工厂内。

产品项目内容:

1) 半消声室安装项目建设方案及使用材料全部由供方负责,供方将其专利技术“涡轮增压微循环变频消声通风系统”(专利号200520108948.5:)的全部或部分应用于需方半消声室安装项目建设之中;

2) 半消声室安装项目内部的有效净尺寸:4000mm×5000mm×3500mm,精度±10cm;

3) 半消声室安装项目安装专业无回声无噪声的照明灯具4盏,2个二三插插座相应地延长至丹品吸音消声尖劈的凹形内部适合使用处;

半消声室产品验收主要条款:

1) 在无外界异常干扰的情况下,环境噪声 $Len(A) \leq 65dB(A)$, 本底噪音 $Lgn(A) \leq 16dB(A)$;

2) 满足室内反射面上方近似半自由场环境的截止频率 $F_c \leq 125Hz$;

三、现场勘查

我公司专业的声学技术工程师在需方工厂正常工作情况下,采集了建造现场的相关数据如下:

声学实验室现场噪声测量记录表

单位名称：深圳市药品检验研究院（深圳市医疗器械检测中心）

地址：深圳

待建实验室名称：半消声室

现场温度：24℃ 湿度：72% 测量时间：2019年10月20日 星期：三

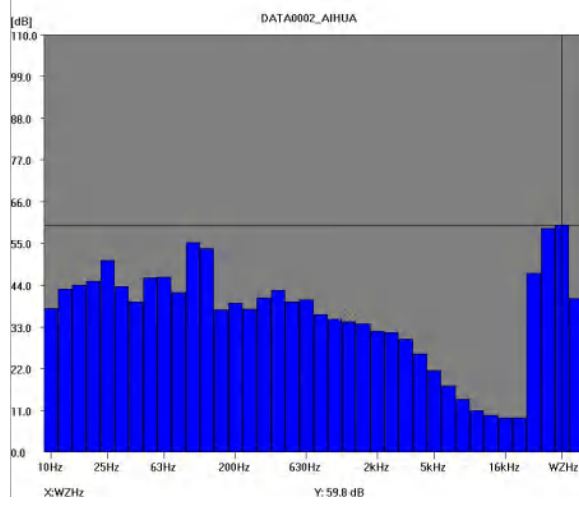
测量人：李大能

测量仪器	名称		型号		校准方法			有效期				
	实时信号分析仪		AWA6291		JJG 188-2002 JJG 778-2005 JJG 449-2001			2019-09-18~20 20-09-20				
测点示意图												
数据记录 计权模式：Z 量程：20~110 采样时间：5S	测点	声压级 /dB	1/3OCT 倍频程声压级/dB									
		Z	31.5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
	1	59.8	43.7	46.1	53.7	37.7	39.6	35	31.9	26	14	9
	2	61.1	42.2	45.7	40.7	43.1	44.7	44.3	37.4	31	17.3	8.7
	3	61.4	41.7	40.3	38.3	40.8	41.8	39.8	36.6	30.2	17.9	10.5
平均	60.8	42.5	44	44.2	40.5	42	39.7	35.3	29.1	16.4	9.4	

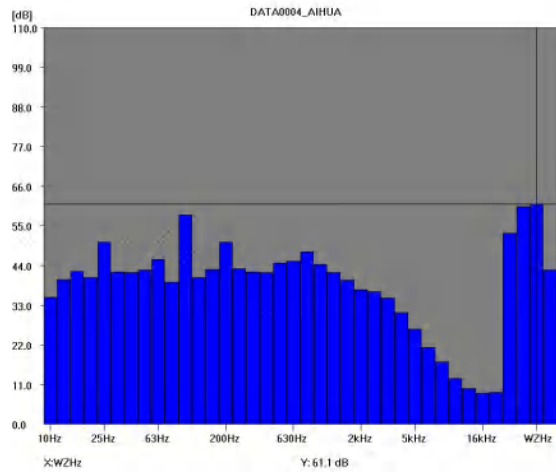
备注：每次现场测量后，需要将仪器中的测试内容和本文件的内容归档保存（一份电子档、一份纸质档）。

现场勘查数据

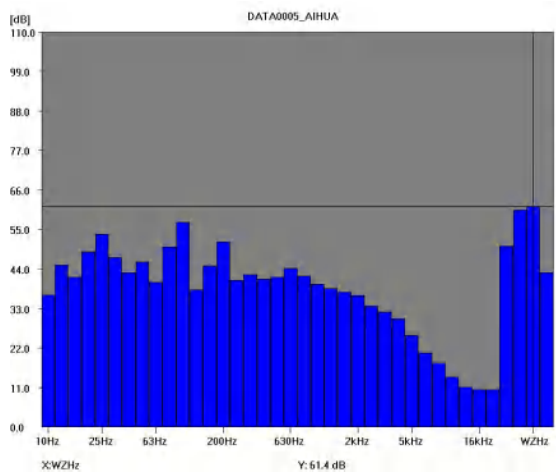
第一点



第二点



第三点



四、声学设计

1、隔声设计实现本底噪声指标

1.1 DP 牌专用隔声复合轻质墙体隔声设计

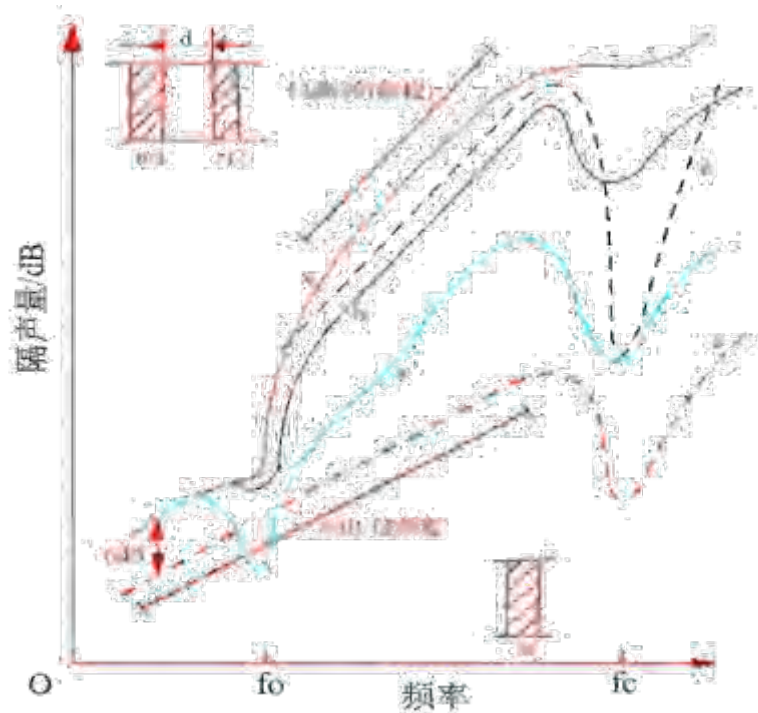
在工程实际中,如果把单层结构分成两层或多层,并在各层之间留有一定厚度的空气层,或在空气层中填充一些吸声材料,隔声效果就比单层实心结构要好。并且在实际施工中,我也会根据现场的实际噪声情况选择不同的墙体,这里以双层墙为例。

双层结构之所以比重量相等的单层结构隔声量要高,主要原因是由于双层之间空气层(吸声材料),对受声波激发振动的结构有缓冲作用或附加吸声作用,使声能得到很大的衰减之后再传到第二层结构的表面上,总的隔声量就提高了。

1.2 双层结构的隔声特性

一般情况下,双层墙比单层匀质墙隔声量大 5-10dB;如果隔声量相同,双层墙的总重比单层墙减少 2/3-3/4。这是由于空气层的作用提高了隔声效果。其机理是当声波透过第一层墙时,由于墙外及夹层中空气与墙板特性阻抗的差异,造成声波的两次反射,形成衰减,并且由于空气层的弹性和附加吸收作用,使振动的能量衰减较大,然后再传给第二层墙,又发生声波的两次反射,使透射声能再次减少,因而总的透射损失更多。

双层墙相当于一个由双层墙与空气层组成的振动系统。当入射声波频率比双层墙共振频率低时,双层墙板将作整体振动,隔声能力与同样重量的单层墙没有区别,即此时空气层无用。当入射声波频率达到共振频率 f_0 时,隔声量出现低谷;超过 $\sqrt{2} f_0$ 以后,隔声曲线以每倍频程 18dB 的斜率急剧上升,充分显示出双层墙结构的优越性。随着频率的升高,两墙板之间产生一系列驻波共振,又使隔声特性曲线上升趋势转为平缓,斜率为每倍频程 12dB 进入吻合效应区后,在临界吻合频率 f_c 处出现又一隔声量低谷,其 f_c 与吻合效应状况取决于两层墙的临界吻合频率。若两墙板由相同材料构成且面密度相等,两吻合谷的位置相同,使低谷的凹陷加深;若两墙材质不同或面密度不等,则隔声曲线上有两个低谷,但凹陷程度较浅;若两墙间填有吸声材料,隔声低谷变得平坦,隔声性能最好。吻合区以后情况较复杂,隔声量与墙的面密度、弯曲刚度、阻尼及频率与 f_c 之比等因素有关,双层墙隔声性能较单层墙优越的区域主要在共振频率 f_0 以后,因此在设计中尽量将 f_0 移往人们不敏感的低频区域。



a 双层墙无吸声材料；b 双层墙有少量吸声材料；c 双层墙满铺吸声材料；d 双层墙隔声量；e 单层墙隔声量图 1 相同单板双层墙隔声特性简图

1.3 双层墙共振频率的确定

双层墙的共振频率指入射声波法向入射时的墙板共振频率 f_0 ，近似为，

$$f_0 \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{h} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}$$

式中， m_1 、 m_2 分别表示双层墙的面密度，单位为 kg/m^2 ； h 为空气层厚度，单位为 m ； ρ_0 为空气密度，单位为 kg/m^3 。

由上式可知，空气层越薄，双层墙的共振频率 f_0 越高。通常较重的砖墙，如混凝土墙等双层结构的 f_0 不超过 15-20Hz，在人耳声频范围以下，对实际影响很小；但对于一些尺寸小的轻质双层墙或顶棚（面密度小于 $30\text{kg}/\text{m}^2$ ），当空气层厚度小于 2-3cm 时，隔声效果很差。所以，一些由胶合板或薄钢板做成的双层结构对低频声隔绝不良，在设计薄而轻的双层结构时，应注意在其表面增涂阻尼层，以减弱共振作用的影响。并且宜采用不同厚度或不同材质的墙板组成双层墙，避开临界吻合频率，保证总的隔声量。此外，双层墙间适当填充吸声材料可使隔声量增加 5-8dB。

1.4 双层墙隔声量的实际估算

严格地按理论计算双层墙的隔声量比较困难，而且往往与实际存在一定差距，因此多采用经验公式估算，

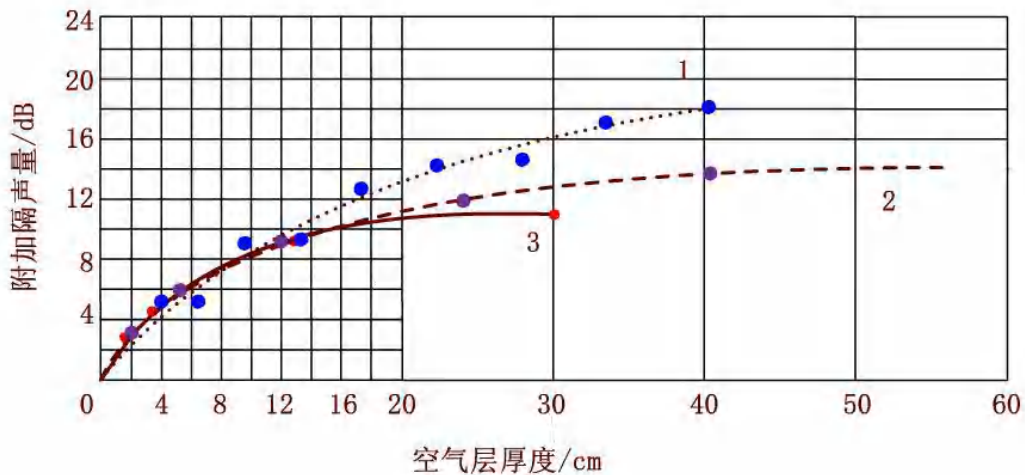
$$TL = 16\lg(m_1 + m_2) + 16\lg f - 30 + \Delta R \quad (\text{dB})$$

平均隔声量的计算公式则为,

$$\bar{TL} = \begin{cases} 16\lg(m_1 + m_2) + 8 + \Delta R & m_1 + m_2 > 200\text{kg/m}^2 \\ 13.5\lg(m_1 + m_2) + 14 + \Delta R & m_1 + m_2 \leq 200\text{kg/m}^2 \end{cases}$$

式中 ΔR 表示空气层附加隔声量,可以从图2上查到。图2中的曲线是在实验室中通过大量试验获得的。可以看出,当双层墙面密度不同时, ΔR 值不完全相同,使用重双层墙时,参考曲线1,轻双层墙参考曲线3。

双层墙两墙之间若有刚性连接,称为存在声桥。部分声能可经过声桥自一墙板传至另一墙板,使空气层的附加隔声量大为降低,降低的程度取决于双层墙刚性连接的方式和程度。因此在设计与施工过程中都必须加以注意,尽量避免声桥的出现或减弱其影响。



1 双层加气混凝土墙, 2 双层无纸石膏板墙, 3 双层纸面石膏板墙

图2 双层墙附加隔声量与空气层厚度的关系

对于本公司设计的双层轻质专用声学设计的隔声复合墙板, m_1+m_2 约为 30kg/m^2 ,用公式平均隔声量的计算公式计算得出。

$$TL = 13.5\lg(30) + 14 + 10 = 43.9\text{dB(A)}$$

结合实地勘察测量得到的数据记录计算得出,无设备工作时环境噪声:

$$L_{en}(A) = (59.8 + 61.1 + 61.4) / 3 = 60.8\text{dB(A)}$$

在本案中,甲方技术要求中无自由声场需求,故安装上吸声系数达到99%的 $400*400*700\text{mm}$ 本公司的专利丹品DP牌吸音消声尖劈(专利号:200720155131.2),该丹品DP牌吸音消声尖劈具有非常好的吸音消声的降噪效果,这会进一步降低室内的本底噪声值 $3\sim 5\text{dB(A)}$ 。得出本次声学设计的理论上室内本底噪声值为

$$L_{gn}(A) = 60.8 - 43.9 - 5 = 11.9\text{dB(A)}$$

从要求的室内本底噪声值 $\leq 16\text{dB(A)}$ 计算得出本次隔声效果的设计裕量为

$$R_w(A) = 2 \sim 4\text{dB(A)}$$

在现实工程中,构件的隔声效果往往低于由质量定律计算的数值,这是因为在实际声场中,大多数声波是无规则入射的,这就很容易引起构件的振动导致产生吻合效应,如果吻合角 $\theta = 90^\circ$,入射波长 $\lambda =$ 该构件被激发产生弯曲的自由波长 λ_b ,则声能几乎全部透过该构件,使隔声量显著下降,隔声性能不再符合质量定律。并且低频噪声源距离半消声室很近,周围环境恶劣。

但考虑到已经有 $2\sim 4\text{dB(A)}$ 的设计裕量,只要切实要求施工工人严格地按照施工工艺操作就一定是可行的,最后的现场测试结果室内本底噪声 $L_{gn}(A) = 12.4\text{dB(A)}$ 也证明了本隔声设计是非常成功的。

2、吸声设计实现半自由声场的性能

安装在半消声室内各面的吸音消声尖劈的吸声性能,对于室内半自由声场范围的大小具有决定性作用,也是决定半消声室质量的最重要的部分。在同一误差要求下,吸音消声尖劈的吸声系数 α 越大,半自由声场范围就很快扩大,所以吸音消声尖劈的选择和吸音消声结构的结构设计是极为重要的环节。下面具体介绍。

2.1 吸音消声尖劈长度的理论计算

尖劈的长度由截止频率暨 1/4 波长理论决定,具体的计算方法为

$$L=1/4 \times (340/F_c)$$

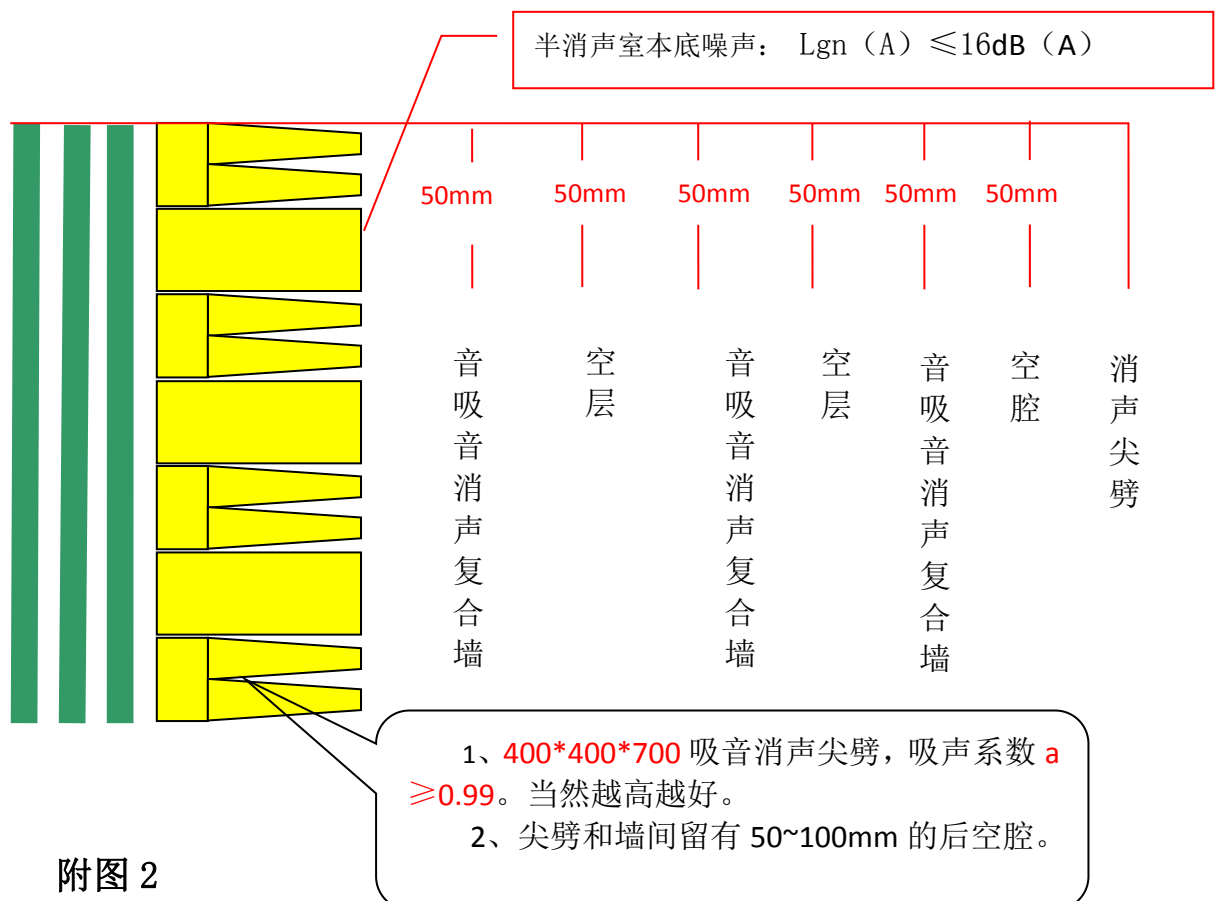
其中 F_c 为截止频率,本案中 $F_c=125\text{ Hz}$; 340 为声波在空气中的传播速度,单位为 m/s ; L 则为要达到截止频率 $F_c=100\text{ Hz}$ 的吸音消声尖劈理论上的长度。

$$\text{则长度 } L=1/4 \times (340/125) = 0.68\text{ m} = 680\text{ mm}$$

2.2、吸音消声尖劈的选择

实际施工中,尖劈的后面我们往往会留有 50~100mm 的后空腔。因此本项目中,实际的尖劈长度 $L=700\text{ mm}$ 即可,尖劈底部尺寸为 $400 \times 400\text{ mm}$ 的尖劈。采用此种类型的尖劈,半消声室完成后实际的截止频率可以达到 $F_c \leq 125\text{ Hz}$ 的效果。

统一采用 700mm 长吸声尖劈专利结构(专利号: 200720155131.2)进行声学设计,确保室内符合 ISO3745 及 GB6882 的半自由声场的精度,符合半自由声场的反平方律。尖劈中的主体吸音消声材料经过阻燃测试达到防火要求。



2.3、吸声尖劈的工艺如下

1、骨架：采用 $\Phi 4.0\text{mm}$ 冷拔钢丝做骨架，钢丝按照尺寸要求一次性裁剪确保规格统一，所有接点点焊，去渣打光修平，表面电泳处理防锈。

2、吸声材料：环保型无甲醛吸音消声材料，容重约 $32\text{kg}/\text{m}^3$ ，采用定制模具切割，切割后整体填充，确保每一个尖劈的外型一致而美观；无碎棉和棉渣，确保玻璃棉不外漏。

3、内面层：采用新型高织数白色玻璃布整体套裁，接缝处用魔术贴粘接。

4、外面层：采用防火的灰白阻燃洞布，整体套裁确保规格统一，最后接缝处都处于尖劈底部，手工封口。

2.4、尖劈的安装方案

半消声室内顶部、四个墙面交错排列丹品 DP 牌吸声尖劈；墙面安装方法如附图 8 所示，顶面安装方法如附图 9 所示。

尖劈的尺寸为 $400\times 400\times 700\text{mm}$ （或者 $600\times 600\times 700\text{mm}$ ），后空腔 50mm 安装。

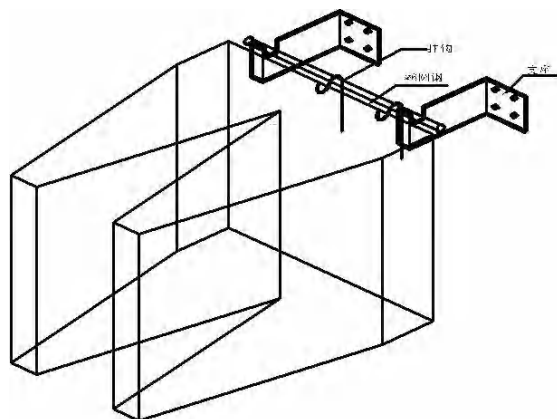


图 8

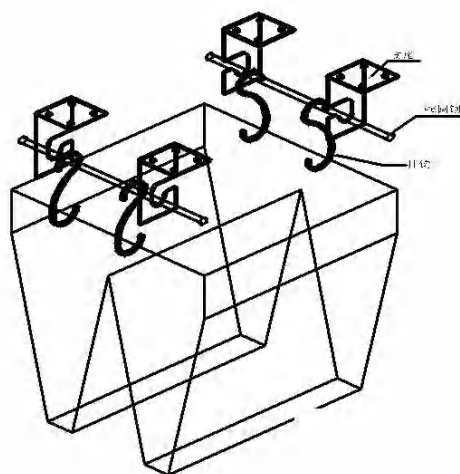


图 9

2.5、丹品 DP 牌吸声尖劈技术优势

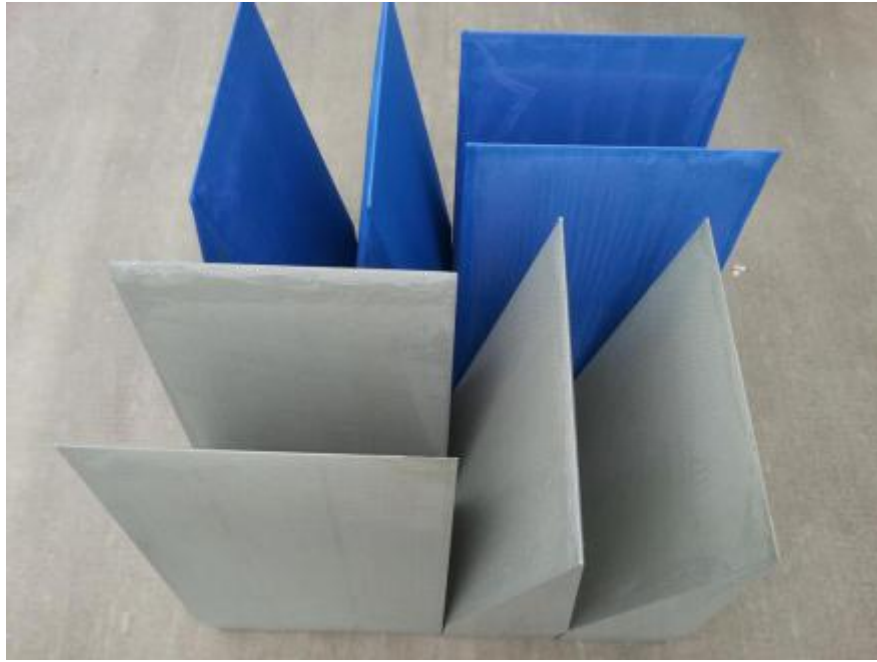
1、采用冷拔钢丝结构填充玻璃纤维棉、外部套以阻燃处理的布料，减少了声音反射，吸音系数 $\alpha \geq 0.99$ （国际标准），声学效果显著。

2、采用冷拔钢丝骨架，使得尖劈安装牢固，能满足项目需求。

3、冷拔钢丝骨架的吸声尖劈的整体外观平整，美观大方，骨架坚固耐用，长时间悬挂也不易变形。

4、尖劈的玻璃纤维棉、布料均为环保材料。环保等级： $E_1 \leq 1.5\text{mg}/\text{L}$ 即达到 E_1 级

5、尖劈的制作工艺成熟，性能稳定，外观如下。



2.6、吸音消声尖劈的性能监测

为了达到设计的半自由声场的性能，要求吸音消声尖劈的吸声系数 $\alpha_0 \geq 0.99$ ，这个指标是至关重要的，所以生产厂家每一批次的产品必须自己用驻波管测定其吸声系数或送有测试设备的第三方机构进行测试。

2.6.1、吸声机理和吸声系数

当声波进入到吸声材料孔隙后，立即引起孔隙中的空气和材料的细小纤维振动。由于摩擦和黏滞阻力，声能转化为热能，而被吸收和消耗掉，因此，吸声材料大多是松软多孔，表面孔与孔之间互相贯通，并深入到材料的内层，这些贯通孔与外界连通。

吸声性能常用吸声系数来表示，其定义为：声波入射材料表面时，材料的吸收声能和透射声能之和与入射到材料表面的声能之比，即

$$\alpha = \frac{E_1 - E_1'}{E_1} = \frac{E_2 + E_3}{E_1}$$

式中 E_1 为入射声的总能量；

E_1' 为反射声的声能；

E_2 为被材料吸收的声能；

E_3 为透过材料的声能。

吸声材料对于不同的频率，具有不同的吸声系数。在工程上，一般采用 125Hz、250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz 的 6 个频率的吸声系数之算术平均值，来表示某种吸声材料的吸声频率特性。

吸声系数还与声波入射角度有关。当声波垂直入射到材料的表面测得的吸声系数，叫垂直入射吸声系数，用 α_0 表示。 α_0 是透过驻波管法测定的。当声波从各个方向同时入射到

材料（结构）表面，这种无规则入射测得的材料吸声系数，称为无规则入射吸声系数，用 α_T 来表示。 α_T 是用混响室法测定的。

一般 α_T 值比 α_0 要大，精密级声学半消声室所用吸声尖劈要求用驻波管法测量 α_0 值，如果 $\alpha_0 \geq 0.99$ 了，则 α_T 就几乎接近 1 了。故此下文只介绍 α_0 的测试方法。

2.6.2、驻波管法测试吸声系数

驻波管法用于测量吸声材料或吸声结构垂直入射吸声系数。图 11 所示为驻波管法测量吸声材料吸声系数装置。

移动传声器的探管，测得管中的驻波声压的极大值 P_{max} 和极小值 P_{min} ，则有驻波比为：

$$m = \frac{P_{max}}{P_{min}}$$

吸声材料或吸声结构垂直入射吸声系数可表示为：

$$\alpha_0 = \frac{4}{\left(m + \frac{1}{m} + 2\right)} = \frac{4m}{(m+1)^2}$$

驻波管法测量频率的上限 F_u 为：

$$F_u = 0.6 \frac{c}{D}$$

式中： c 为空气中的声速， m/s ；

D 为刚性管直径， m 。

驻波管法测量频率的下限 F_l 为：

$$F_l = \frac{c}{2L}$$

式中： L 为驻波管的长度， m 。

2.7、鉴定半消声室的一般方法

依据 *ISO3745-2012* 及 *GB/T 6882-2008* 声学_声压法测定噪声源声功率级_消声室和半消声室精密法 中鉴定半消声室的一般方法中的规定。半消声室的性能是通过将测试声源发射的声压的空间衰减，与理想的半自由声场中声压随离声源距离的平方反比定律的衰减相比较进行评价的。

确定好声源，进行声压级的测量，然后从反平方定律确定偏差。

每个位置测得的声压级，在其测量方向上基于平方反比定律对声压级的估计，由下式确定：

$$L_p(r) = 20 \lg\left(\frac{a}{r-r_0}\right)$$

式中：

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^N r_i)^2 - N \sum_{i=1}^N r_i^2}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}$$

r_0 是沿传声器移动轴线的声中心的补偿。这是声源声中心与测量球面或半球面中心之间的距离差测量值。 r_0 由下式得出：

$$r_0 = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N r_i q_i - \sum_{i=1}^N r_i^2 \sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}$$

式中：

$$Q_i = 10^{-0.05 L_{pi}}$$

p_i 为第 i 个测量点的声压级，单位为分贝 (dB)；

r_i 为从测量球面或半球面中心到测量点的距离；

为沿每个传声器路径的测量点的数目。最后再计算与平方反比定律的偏差，基于平方反比定律估计的声压级，在所有测量位置上声压级与平方反比定律的偏差由下式确定：

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i)$$

式中：

ΔL_{pi} 为与平方反比定律的偏差，单位为分贝 (dB)； L_{pi} 为第 i 个测量位置的声压级，单位为分贝 (dB)；

$L_p(r_i)$ 由平方反比定律估计的距离 r_i 处的声压级，单位为分贝 (dB)。

按 (4-16) 得到的用平方反比定律估计出测得声压级的偏差应不超过下表二给出的值：

表二 与平方反比定律理论值相比测得声压级的最大允许偏差

测试室类型	1/3 倍频带中心频率/Hz	允许差值/dB
消声室	≤ 630	± 1.5
	800~5000	± 1.0
	≥ 6300	± 1.5
半消声室	≤ 630	± 2.5
	800~5000	± 2.0
	≥ 6300	± 3.0

最终测试结果分析

最后经国家具有声学计量资质的第三方权威机构到现场检测，测试的结果完全符合设计的要求，即半自由声场的性能在 125Hz~20KHz 频率范围内进行 1/3 倍频带分析，通过将测试声源发射的声压的空间衰减，与理想的半自由声场中声压随离声源距离的平方反比定律的衰减相比较，其偏差值均在最大允许偏差内。下面具体说明。

现场测试路径

测点及测试路径：以半消声室地面几何中心位置为测试声源位置 (O 点)，沿半消声室对角线为测试 路径 (OA、OB、OC)，见图 11。

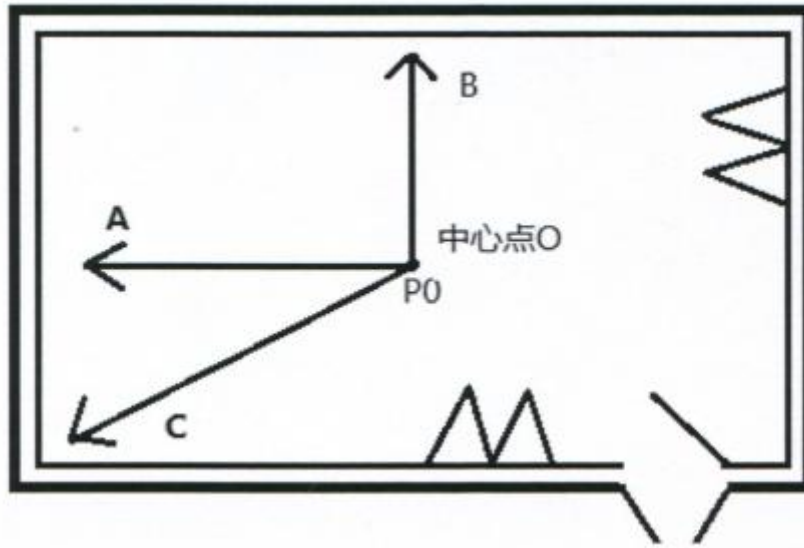


图 11

现场测试原始数据

OA 方向

PATH	FREQ./Hz		S.CENTRE/cm	MPE
OA	125.0	@	60.0	ATT.
(c.m.)	SPL(dB)	ATT(dB)	Deviation/dB	(dB)
(50+)0	72.4	0.0(REF)	0.0	0.0
10	71.4	1.1	0.3	±2.5
20	70.0	2.4	0.1	±2.5
30	68.8	3.6	-0.1	±2.5
40	68.6	3.8	0.6	±2.5
50	68.1	4.3	1.0	±2.5
60	66.5	6.0	0.1	±2.5
70	66.1	6.3	0.4	±2.5
80	65.5	6.9	0.4	±2.5
90	63.9	8.5	-0.6	±2.5
100	63.5	8.9	-0.4	±2.5
110	61.6	10.9	-1.8	±2.5
120	61.5	10.9	-1.4	±2.5
130	62.5	9.9	0.1	±2.5
140	62.0	10.5	0.0	±2.5
150	61.4	11.0	-0.1	±2.5
160	61.9	10.5	0.8	±2.5

OB 方向

PATH	FREQ./Hz		S.CENTRE/cm	MPE
OB	125.0	@	48.0	ATT.
(cm)	SPL(dB)	ATT(dB)	Deviation/dB	(dB)
(50+)0	71.9	0.0(REF)	0.0	0.0
10	69.5	2.3	-0.7	±2.5
20	68.4	3.5	-0.5	±2.5
30	67.4	4.5	-0.3	±2.5
40	66.7	5.2	0.1	±2.5
50	65.8	6.1	0.1	±2.5
60	64.0	7.9	-0.8	±2.5
70	63.5	8.4	-0.6	±2.5
80	63.3	8.6	-0.1	±2.5
90	62.6	9.3	-0.1	±2.5
100	63.0	8.8	0.9	±2.5
110	61.9	10.0	0.4	±2.5
120	61.5	10.4	0.5	±2.5
130	61.3	10.5	0.9	±2.5
140	61.6	10.2	1.6	±2.5

OC 方向

PATH	FREQ./Hz		S,CENTRE/cm	MPE
OC	125.0	@	60.0	ATT.
(r m)	SPL(dB)	ATT(dB)	Deviation/dB	(dB)
(50+)0	72.6	0.0(REF)	0.0	0.0
10	70.9	1.8	-0.5	±2.5
20	69.9	2.7	-0.2	±2.5
30	68.4	4.2	-0.7	±2.5
40	68.4	4.3	0.2	±2.5
50	67.4	5.3	0.0	±2.5
60	65.5	7.1	-1.1	±2.5
70	65.4	7.2	-0.5	±2.5
80	64.6	8.0	-0.7	±2.5
90	63.5	9.1	-1.2	±2.5
100	63.9	8.7	-0.2	±2.5
110	62.2	10.5	-1.4	±2.5
120	61.7	11.0	-1.4	±2.5
130	62.5	10.2	-0.2	±2.5
140	62.2	10.5	0.0	±2.5
150	61.9	10.8	0.1	±2.5
160	62.4	10.3	1.0	±2.5
170	61.9	10.7	0.9	±2.5
180	62.3	10.4	1.6	±2.5
190	61.4	11.2	1.2	±2.5

160	59.5	9.8	0.1	±2.5
170	59.5	9.8	0.4	±2.5
180	59.2	10.1	0.5	±2.5
190	58.4	10.9	0.0	±2.5
200	57.5	11.8	-0.5	±2.5

现场照片



3、消声设计实现空气动力学性能

3.1、消声器分类

不同消声器的消声原理是不同的，消声效果也不同。

阻性消声器是一种能量吸收性消声器，通过在气流通过的途径上固定多孔性吸声材料，利用多孔吸声材料对声波的摩擦和阻尼作用将声能量转化为热能，达到消声的目的。阻性消声器适合于消除中、高频的噪声，消声频带范围较宽，对低频噪声的消声效果较差，因此，常使用阻性消声器控制风机类进排气噪声等。

抗性消声器则利用声波的反射和干涉效应等，通过改变声波的传播特性，阻碍声波能量向外传播，主要适合于消除低、中频率的窄带噪声，对宽带高频噪声则效果较差，因此，常用来消除如内燃机排气噪声等。

鉴于阻性消声器和抗性消声器各自的特点，因此常将它们组合成阻抗复合型消声器，以同时得到高、中、低频率范围内的消声效果，如微穿孔板消声器就是典型的阻抗复合型消声器，其优点是耐高温、耐腐蚀、阻力小等，缺点是加工复杂，造价高。

3.2、消声器性能评价

消声器的性能评价主要采用三项指标，即：声学性能、空气动力性能、结构性能。下面分别介绍。

3.2.1、消声器声学性能

消声器的声学性能包括消声量的大小、消声频带范围的宽窄两个方面。设计消声器的目的就是要根据噪声源的特点和频率范围，使消声器的消声频率范围满足需要，并尽可能地在要求的频带范围内获得较大的消声量。

消声器的声学性能可以用各频带内的消声量来表征。通常有四种度量方法：传声损失 L_{TL} 、末端降噪量 L_{NR} 、插入损失 L_{IL} 、和声衰减 ΔL_A 。

传声损失 L_{TL} 定义为消声器进口的噪声声功率级与消声器出口的噪声声功率级的差值。它是从构件的隔声性能的角度，用透射损失来反映构件的消声量，传递损失的数学表达式为：

$$L_{TL} = 10 \lg \frac{w_1}{w_2} = L_{w1} - L_{w2}$$

式中 L_{TL} 为消声器的传声损失， w_1 为消声器进口的声功率， w_2 为消声器出口的声功率， L_{w1} 为消声器进口的声功率级， L_{w2} 为消声器出口的声功率级。

消声器的传声损失 L_{TL} 是消声器本身所具有的特性，它受声源与环境的影响较小。实际工程测试中，由于声功率级难以直接测得，因此通常通过测量消声器前后截面的平均声压级，再按下式计算获得，

$$L_{w1} = \overline{L_{p1}} + 10 \lg S_1$$

$$L_{w2} = \overline{L_{p2}} + 10 \lg S_2$$

式中 $\overline{L_{p1}}$ 为消声器进口处平均声压级， $\overline{L_{p2}}$ 为消声器出口处的平均声压级； S_1 为消声器进口处的截面积， S_2 为消声器出口处截面积，单位为平方米。

末端减噪量 L_{NR} 也称末端声压级差，它是指消声器输入端与输出端的声压级之差。当严格地按传声损失测量有困难时，可采用这种简便测量方法，即：测量消声器进口端面的声压级 L_{p1} 与出口端面的声压级 L_{p2} ，以两者之差代表消声器的消声量，消声量计算公式如下，

$$L_{NR} = L_{p1} - L_{p2}$$

利用末端声压级之差来表示消声值的方法，不可避免地包含了反射声的影响，这种测量方法易受环境的影响而产生较大的误差，因此适合在试验台上对消声器性能进行测量分析，而现场测量则很少使用。

插入损失 L_{IL} 是根据系统之外测点的测试结果经计算获得的，实际操作中，在系统之外分别测量系统接入消声器前后的声压级，二者之差即为插入损失。插入损失的测量示意图如图 12 所示。

$$L_{IL} = L_{p1} - L_{p2}$$

式中声压级为系统外测试的声压级。图 12 所示是工矿企业现场常用的方法。此外，“管口法”也是现场常用的测试方法，如图 13 所示，安装消声器之前，在距离管口某一位置测量声压级 L_{p1} ；安装消声器以后，与消声器管口保持同样的距离测量声压级 L_{p2} ，两者之差作为插入损失。实践表明，采用“管口法”测量数据可靠，符合现场测试的要求。

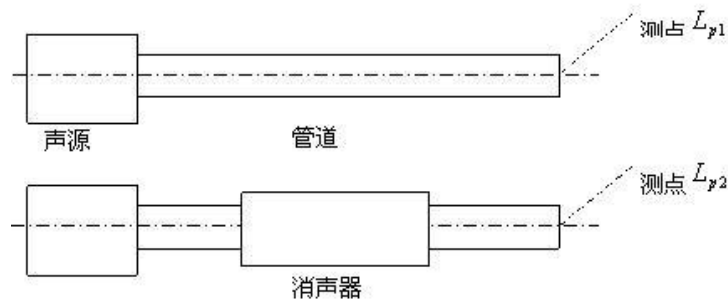


图 12 消声器插入损失测量示意图

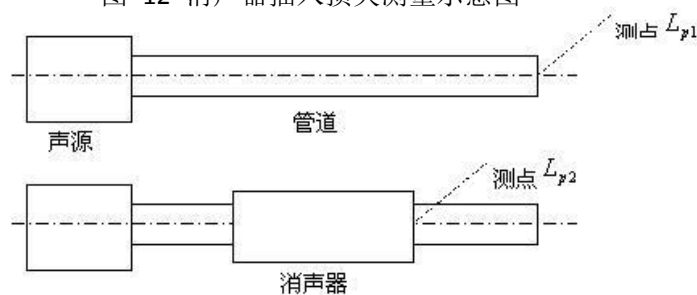


图 13 管口法测量消声器插入损失示意图

对于阻性消声器“插入损失”与“传声损失”相近，而对于抗性消声器来说，“插入损失”一般要比“传声损失”稍低。采用“插入损失”评价消声器效果，对现场环境要求低，适应各种现场测量，如高温、高流速或有浸蚀作用的环境中。但是“插入损失”值并不单纯

反映消声器本身的效果，而是声源、消声器及消声器末端三者的声学特性的综合效果。在现场做“插入损失”测量时，要注意保持声源特性的恒定。

声衰减 ΔL_A 也是比较常用的一种评价参数，它是声学系统中任意两点间声功率级之差，反映了声音沿消声器通道内的衰减特性，以每米衰减的分贝数 (dB) 表示。实际测量中，可采用“轴向贯穿法”测量，即：将探管插入消声器内部，沿消声器通道轴向每隔一定的距离逐点测量声压级，从而得到消声器内声压级与距离的函数关系，以求得该消声器的总消声量。声衰减量能够反映出消声器内的消声特性及衰减过程，能避免环境对测量结果的干扰。测量时要注意，测点不能靠近管端。图 14 是“轴向贯穿法”的示意图。

“轴向贯穿法”特别适用于测量大型的、效果好的消声器。由于这种方法费时、且需要专门的测量传声器，因此一般在现场测量中很少使用。

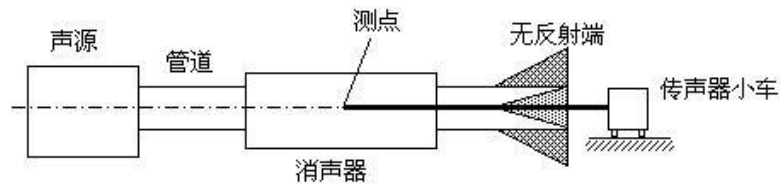


图 14 轴向贯穿法测量消声器声衰减示意图

对一个消声器来说，用不同的方法或在不同的声学环境下测量，其结果往往会有一定的差异。因此，在表示消声器的效果时，应注明所用的测量方法和所在的测试环境，以便对消声器的性能进行比较和客观评价。

3.2.2、空气动力性能

消声器的空气动力性能是评价消声性能好坏的另一项重要指标，它反映了消声器对气流阻力的大小，也就是：安装消声器后输气是否通畅，对风量有无影响，风压有无变化。消声器的空气动力性能用阻力系数或阻力损失来表示。

阻力系数是指消声器安装前后的全压差与全压之比，对于确定的消声器，其阻力系数为定值。阻力系数的测量比较麻烦，一般只在专用设备上才能测得。

阻力损失，简称阻损，是指气流通过消声器时，在消声器出口端的流体静压比进口端降低的数值。很显然，一个消声器的阻损大小是与使用条件下的气流速度大小有密切关系的。消声器的阻损能够通过实地测量求得，也可以根据公式进行估算。阻损分两大类，一类是摩擦阻力，另一类是局部阻力。

摩擦阻损 ΔH_β 是由于气流与消声器各壁面之间的摩擦而产生的阻力损失，可用下式计算，

$$\Delta H_\beta = \beta \frac{l}{d_e} \frac{\rho v^2}{2g}$$

式中 β 为摩擦阻力系数 (见表三)； l 为消声器的长度； d_e 为消声器的通道截面等效直径； ρ 表示管道内气体密度； v 为管道内气流速度； g 为重力加速度。以上均采用国际标准单位。

流体力学中将 $\frac{\rho v^2}{2g}$ 称为速度头，单位：毫米水柱，显然 ΔH_β 的单位与速度头一致。

摩擦阻力系数与管道内气流速度有关，流体力学中用雷诺数表示流速，雷诺数 R_e 定义如下：

$$R_e = \frac{v}{r} d_e$$

一般情况下，消声器通道内的雷诺数 R_e 均在 10^5 以上。上式中 r 为流体运动的粘滞系数，对于 200°C 的空气， $r=1.53 \times 10^{-5}$ 米/秒²，此时摩擦阻力系数 β 仅取决于管壁的相对粗糙度，见表五。

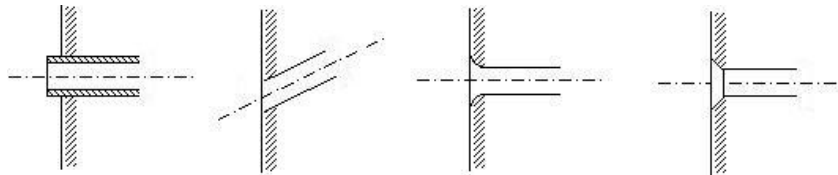
表五 摩擦阻力系数与相对粗糙度的关系

相对粗糙度 (%)	0.2	0.4	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
相对粗糙度 = $\frac{\text{管壁绝对粗糙度}}{\text{等效直径}}$										
摩擦阻力系数 β	0.024	0.028	0.032	0.036	0.039	0.044	0.049	0.057	0.065	0.072

局部阻损 ΔH_ξ 表示气流在消声器的结构突然变化处（如折弯、扩张或收缩及遇到障碍物）所产生的阻力损失，局部阻损可用下式估算，

$$\Delta H_\xi = \xi \frac{\rho v^2}{2g}$$

式中 ξ 为局部阻力系数，局部阻力系数的确定比较复杂，与结构形式关系密切。下面简单介绍几种典型结构的局部阻力系数。



垂直入口 倾斜入口 带光滑圆弧入口 带括口的入口

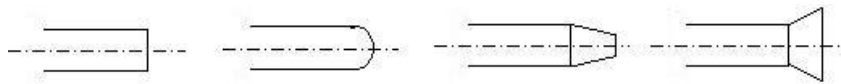
图 15 几种常见入口形式

管道入口：对于垂直入口，如果管壁厚度与等效直径之比大于 0.05，并且管口伸出部分长度与等效直径之比小于 0.5，则取 $\xi=0.5$ ；否则取 $\xi=1$ 。对于斜入口，情况比较复杂，一般来讲，倾斜角度越大，则局部阻力系数也越大。为了减少入口处的局部阻力系数，工程中常采用

入口处带光滑过渡圆弧的做法，圆弧相对直径（圆弧直径 / 管道直径）越大，局部阻力系数越小，经过这种处理的管道入口，局部阻力系数一般在 0.1 左右。减少局部阻力系数的另一个方法就是在入口处括口，括口的角度越大，阻力系数越小，但如果括口角度大于 90° ，则减阻性能略差。

管道出口：对于平端面或圆端面的出口，湍流时的局部阻力系数为 1，层流时的局部阻力系数为 2；对于锥形出口，局部阻力系数与出口处直径 d_1 和管道的直径 d_0 有关，可用下式计算：

$$\xi = 1.05 \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^4$$



平端面出口 圆端面出口 锥形出口 扩张出口

图 16 几种常见出口形式

如果管道出口为扩张管形式，则局部阻力系数与管口长度、管道直径、扩张角等都有关系。锥形出口增加局部阻力系数，而扩张管出口可有效降低局部阻力系数。

管道在改变方向、突变截面等情况下也存在局部阻力，其系数的计算比较复杂，这里不作专门介绍。

消声器总的阻力损失，等于摩擦阻损与局部阻损之和，即

$$\Delta H_t = \Delta H_\beta + \Delta H_\xi$$

一般而言，在阻性消声器中以摩擦阻损 ΔH_β 为主；在抗性消声器中以局部阻损 ΔH_ξ 为主。气流的阻力损失（无论是摩擦阻损还是局部阻损）都与速度头成正比，即与气流速度的平方成正比。当气流速度增高时，阻损的增加要比气流速度的增加快得多。因此，如果采用较

高的气流速度，会使阻损增大，使消声器的空气动力性能变坏。在设计消声器时，从消声器的声学性能和空气动力性能两方面来考虑，都以采用较低的流速为有利。

3.2.3、结构性能

消声器结构性能是指它的外形尺寸、坚固程度、维护要求、使用寿命等，它也是评价消声器性能的一项指标。

好的消声器除应有好的声学性能和空气动力性能之外；还应该具有体积小、重量轻、结构简单、造型美观、加工方便、同时要坚固耐用、使用寿命长、维护简单和造价便宜等特点。

评价消声器的上述三个方面的性能，既互相联系又互相制约。从消声器的消声性能考虑，当然在所需频率范围内的消声量越大越好；但是同时必须考虑空气动力性能的要求。例如，汽车上的排气消声器如果阻损过大，会使功率损失增加，甚至影响车辆行驶。在兼顾消声器声学性能和空气动力性能的同时，还必须考虑结构性能的要求，不但要耐用，还应避免体积过大、安装困难等情况。在实际运用中，对这三方面的性能要求，应根据具体情况做具体分析，并有所侧重。

4、隔振设计

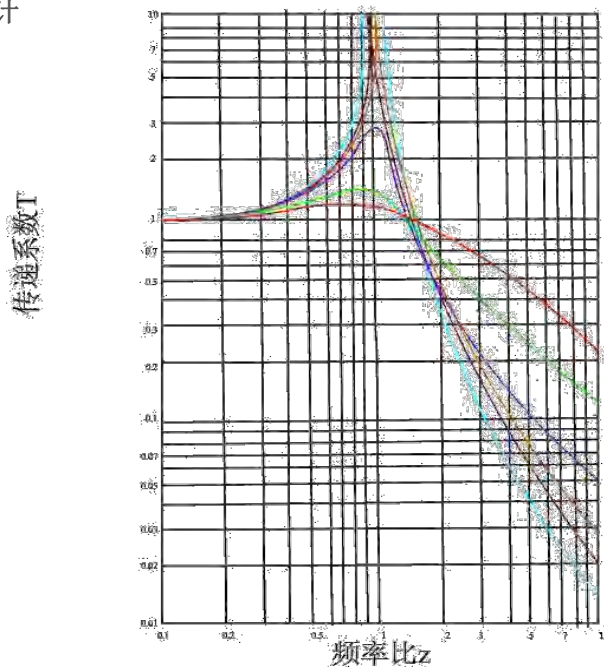


图 17 振动传递系数与频率比的关系曲线

在隔振系统效果评价中，我们常用前面定义的振动隔离系数 T 来表征隔振系统的隔振效果。传递系数 T 值越小，则相同激励条件下通过隔振系统传递过去的力就越小，隔振效果也就越好。振动传递系数 T 与 f/f_0 的关系主要表现在：(1) 当 $f/f_0 < 1$ 时，即干扰力的频率小于隔振系统的固有频率时， $T \approx 1$ ，说明干扰力通过隔振装置全部传给了基础，即隔振系统不起隔振作用。(2) 当 $f/f_0 = 1$ 时，即干扰力的频率等于隔振系统的固有频率时， $T > 1$ ，说明隔振系统不但起不到隔振作用，反而对系统的振动有放大作用，甚至会产生共振现象。(3) 当 $f/f_0 > \sqrt{2}$ 时，即干扰力的频率大于隔振系统的固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍时， $T < 1$ ； f/f_0 越大， T 越小，隔振效果越好。

振动传递系数 T 与 c/c_c 的关系主要表现在：(1) 当 $f/f_0 < \sqrt{2}$ 时，即隔振系统不起隔振作用甚至发生共振的区域， c/c_c 值越大， T 值越小，这表明在这段区域增大阻尼对控制振动是有利的。(2) 在 $f/f_0 > \sqrt{2}$ 时，即隔振系统起隔振作用的区域， c/c_c 值越小，则 T 值越小，表明在这段区域阻尼越小对控制振动越有利，也就是说此时阻尼对隔振是不利的。

在工程实际中， f/f_0 宜取 2.5-5，若要提高 f/f_0 的比值，就要减少 f_0 ， f_0 过低，不仅工艺上有困难，而且经济成本高。且取 f/f_0 为 2.5-5 时，隔振效果已达 81%-96%，因此实际中取 $f/f_0 = 2.5-5$ 足以满足工程要求。

五、测试结果：

1、当半消声室周围正常工作时，室内本底噪声值 $L_{gn}(A) = 12.4\text{dB}(A)$ ；

表1 半消声室内本底噪声

测试点位置	A计权声级 / dB
P0(中心点)	12.4

2、半自由声场的性能：在 125Hz~20KHz 频率范围内进行 1/3 倍频带分析，通过将测试声源发射的声压的空间衰减，与理想的半自由声场中声压随距离的平方反比定律的衰减相比较，其偏差值均在最大允许偏差内。

上述半消声室制造施工安装的详细制作工艺和施工流程及验收技术规范等资料请到本公司的官方网站中的下载中心免费下载，或请扫描本公司微信公众服务号二维码得到免费推送。

