

实用小孔消声器的计算及其应用

左鸿恕 孙国良

(水利电力部华东电力设计院)

喷注噪声,是现代工业中常见的一种气流噪声。从火力发电厂的锅炉、除氧器和蒸汽管道等的排气,到其它各类工厂工艺气体的放空,直至火箭和喷气飞机的噪声,都属于这一类。由于它具有相当大的普遍性和相当高的声级,因而污染范围大,从而引起了社会各界的关注。国内外研究者相继设计出诸如喷射式、环流式、滤波式、阻抗复合减压式和多级减压加微孔掺冷式等消声装置。这类装置大都是以莱特希尔在1952年导出的湍流喷注噪声功率公式^[1]为依据的。这一公式确立了喷注噪声与喷注速度的八次方成正比,故因此往往认为降低喷注噪声,必须降低喷注速度。由于依据这一理论设计的消声器,消声量不大,常常需要采取包括吸声、消能、掺冷风在内的各种后续消声措施,从而使得整体结构笨重、支撑结构庞大。小孔消声器,则是根据我国著名声学专家马大猷等在1977年建立的“小孔喷注噪声理论”^[2]研制的。本文根据这几年研究工作所获得的结果,提出了实用小孔消声器的设计计算方法,并经受了实际使用的检验。

考虑到现代工业设备和容器的排气,具有压力高、流量大的特点,少数小孔满足不了生产流程的需要,因此我们研究的重点,放在数千个到数万个的小孔的集体喷注上,求得了计算流量和计算噪声的半经验公式。按照这些公式设计的中压、高压和超高压小孔消声器,经运行使用,基本上解决了大型排气放空系统噪声对环境的污染。

一、原 理

喷注噪声具有明显的峰值频率。峰值出现在

$$Sh = \frac{Df_p}{u} = 0.2 \quad (1)$$

式中: Sh 为斯特劳哈尔数; f_p 是峰值频率(赫); D 是喷口直径(毫米); u 是喷注速度(毫米/秒)。当喷注速度为声速,即 $u = 340 \times 10^3$ 毫米/秒时,由式(1)得到:

喷注噪声峰值频率 表 1

D (毫米)	0.7	1	2	3.4	10	20	40
f_p (赫)	97142	63000	34000	20000	6800	3400	1700

可听声的范围是 20~20000 赫。由表 1 可见,对于喷口直径 $D < 3.4$ 毫米的喷口,噪声的主要声功率已在可听声之外。这一现象提供了用减小孔径来降低干扰噪声的较大可能性。

排气放空噪声,是管口喷射出来的高速气流产生的,是一种喷注噪声。统计工业排放的大量频谱资料发现,峰值出现在人耳最敏感的 1000~2000 赫附近,因而对语言的干扰极大。如按照式(1)的关系,把通过管口排放的气体,改用通过小孔排放,这一噪声峰值将移至不影响听觉的高频,所以干扰减小。并且,由于声音在空气中传播的衰减,与频率的平方成比例,因此高频声随距离的衰减,比中频声和低频声大得多,这样对环

境的污染也就小了。

二、流量控制

小孔消声器的设计，必须满足生产流程所需的排放量，而小孔消声器所能通过的流量，是小孔面积和小孔数目的函数。小孔直径决定了小孔面积的大小，它是根据噪声控制的需要和加工制造水平来选择的。小孔直径一经选定，单孔流量就由小孔前的气体参数决定了。如单孔流量用 q 表示，则小孔数目为：

$$n = \frac{Q}{q} \quad (2)$$

分析小孔出流实验的数据得到：

$$q = \psi \frac{P}{\sqrt{T}} d^2 \quad (3)$$

上两式中， Q 为小孔消声器的设计流量（公斤/小时）； q 为单个小孔的流量（公斤/小时）； n 为小孔数目（个）； P 为喷注气体压力（公斤/厘米²）； T 为喷注气体温度（°K）； d 为小孔直径（毫米）； ψ 为与小孔直径有关的系数（ $10^2 \sqrt{^\circ\text{K}}/\text{小时}$ ），按表 2 取用。

系数 ψ 数值表 表 2

d (毫米)	0.7	0.8	0.9	1	2	3
ψ ($10^2 \sqrt{^\circ\text{K}}$ / 小时)	5.75	6.0	6.21	6.46	7.96	8.90

式 (3) 说明，对一定直径的小孔， q 与 $\frac{P}{\sqrt{T}}$ 呈线性关系。孔大，斜率大；孔小，斜率小。因此，在气体参数相同的情况下，大孔通过的流量大，小孔通过的流量小。这是因为孔小，流动阻力大，“封锁”气流的本领大。所以一个大的排气管口，用数量很多的小孔来代替时，为了保证通过同样的流量，必须使小孔的总面积大于原有管口的面积，这就是决定小孔消声器通流面积的原

则。

三、噪声计算

阻塞情况下，喷注噪声功率^[2]：

$$W = K_1 D^2 \frac{(P - P_0)^3}{P P_0^2} \quad (4)$$

式中， W 为噪声功率（瓦）； K_1 为常数； P_0 为环境压力（公斤/厘米²）。

工业设备和容器的排气放空，一般都是排向大气的， $P_0 = 1$ 公斤/厘米²，且由于 $P \gg P_0$ ，因此可将式 (4) 近似写作：

$$W = K_1 D^2 P^2$$

或改写为：

$$W = K_1 \frac{(D^2 P)^2}{D^2}$$

由于阻塞情况下， Q 与 $D^2 P$ 成正比，故

$$W = K \frac{Q^2}{D^2} \quad (5)$$

这里 K 为实验常数。

由此，可将未装消声器的空管排放噪声 A 声级写成：

$$L_A = 94 + 20 \lg Q - 20 \lg D \quad (6)$$

式中 L_A 为与喷口成 45° 方向、距喷口 6 米处的 A 声级。“94”为用实验手段求得的常数。

应用式 (6) 验算了许多发电厂的空管排放噪声，均与实测值符合较好，准确度在 98% 以上。

在排气管上安装小孔消声器后，气流是通过小孔排向大气的。考虑到小孔的降噪作用和节径比的影响，此时，与喷注成 45° 、距喷口 6 米处的 A 声级写成：

$$L_A = 105 + 20 \lg Q - 20 \lg D_T + 30 \lg \frac{d}{9 + 4d} - 20 \lg \xi \quad (7)$$

式中， D_T 为小孔总面积的有效直径（毫米）；

$$D_T = \sqrt{n} d \quad (8)$$

ξ 为节径比。若小孔间中心距离用 b （毫米）表示，则

$$\xi = \frac{b}{d} \quad (9)$$

“105”为用实验手段求得的常数。

式(3)、(6)、(7)都是以工业实验台的数据为依据求得的,为了鉴别其在更高压力和更大流量下的可用程度,我们应用上述三公式先后设计了实用性的中压、高压和超高压小孔消声器,供发电厂锅炉使用。经多次在现场实测,与计算值基本符合。下表是其中的几个例子。

噪声的计算值和实测值比较表 表 3

流量 Q (公斤/小时)		中压小孔 消声器	高压小孔 消声器	超高压小孔 消声器
		350	95000	73800
噪声 L _A (分贝(A))	计算值	103.0	107.0	105.0
	实测值	102.5	106.0	105.0

由此我们得出结论:上面的三个“半经验公式”,用于高压力和大流量的排放,不会引起太大的误差。

四、技术经济效果

小孔消声器的技术经济效果,可在表4的比较中看到:

已知外国消声器的技术经济数据是:

日本,排汽量为30吨/小时的环流式消声器,消声量为25~30分贝(A),耗钢率为1.1111~1.3333公斤钢材/吨蒸汽·分贝(A);美国,排汽量为90.7吨/小时的SP78消声器,消声量25~30分贝(A),耗钢率为1.7852~2.1422公斤钢材/吨蒸汽·分贝(A);苏联BK3-120-100锅炉多级减压式消声器,消声量20分贝(A)^[4]。

五、结 论

1.求得了未装消声器直接向空排气时,用流量表示的干扰噪声计算公式,使设计者在锅炉投用之前就能预计噪声的大小。

2.求得了通过小孔消声器排放时,用流量和结构参数表示的干扰噪声计算公式,使设计者能用设计手段较为准确地控制噪声。

技术经济比较表 表 4

消声器类别	小孔消声器	多级减压加微孔 掺冷消声器 ⁽³⁾
技 术 效 果	1.结构简单 中压: 1级小孔 高压和超高压: 控流加1级小孔	1.结构复杂 中压:6级减压加微孔掺冷风 高压: 7级减压加微孔掺冷风 超高压: 8级减压加微孔掺冷风
	2.体小身轻 (1)流量为30吨/小时的中压消声器 外径: φ273毫米 高度: 1400毫米 重量: 70公斤 (2)流量为85吨/小时的高压消声器 外径: φ529毫米 高度: 2685毫米 重量: 336.5公斤 (3)流量为100吨/小时的超高压消声器 外径: φ529毫米 高度: 2715毫米 重量: 449.7公斤	2.体大笨重 (1)流量为30吨/小时的中压消声器 外径: φ920毫米 高度: 2690毫米 重量: 940公斤 (2)流量为85吨/小时的高压消声器 外径: φ1500毫米 高度: 3606毫米 重量: 2115公斤 (3)流量为80吨/小时的超高压消声器 外径: φ1400毫米 高度: 3360毫米 重量: 2053公斤
	3.不需要笨重的支撑结构,屋面荷重小	3.屋面荷重大,支撑结构沉重
经 济 效 果	4.消声量47分贝(A)	4.消声量37~45分贝(A)
	5.能用半经验公式预测噪声,与实测值基本符合	5.没有公式预计噪声,只能在投用后实测得到
	6.耗钢率低 以正在使用的中压、高压和超高压消声器的实测值为例,耗钢率为0.0426~0.1565公斤钢材/吨蒸汽·分贝(A)	6.耗钢率大 以我国某厂220吨/小时锅炉消声器的实测为例 ⁽³⁾ ,耗钢率为0.9291~1.0453公斤钢材/吨蒸汽·分贝(A)

3.建立了流量和气体参数的关系,解决了小孔消声器设计中的流量控制问题。