

排气放空消声器的研究与应用

王文奇 何友静 张玉敏

(北京市劳动保护科学研究所)

排气噪声在工业生产中普遍存在。火电厂的锅炉排汽,钢铁厂的高炉放风,化工厂的气体放散,机械厂的空压机、鼓风机和各种风动工具的排气,以及喷气式飞机等都辐射很强的排气噪声。这种噪声不仅损害职工的身心健康,而且污染周围环境,影响范围可达数公里,成为一种突出的公害。因此,控制排气噪声是环境保护领域中一个重要课题。

本文在综合分析节流降压和小孔喷注两种消声机理的基础上,对降压层与小孔喷注相复合的消声性能做了试验研究。同时,对节流降压级数、小孔的孔径以及如何减少消声器背压问题进行了探讨。通过消声元件试验和理论分析,研制成功一种控制排气噪声的新型降压与小孔复合的排气放空消声器。这种消声器在一些现场的高压排气放空上应用,获得35~42分贝(A)的消声效果,并具有体积小、重量轻、易加工、安装方便等特点。

一、消声器的设计原理

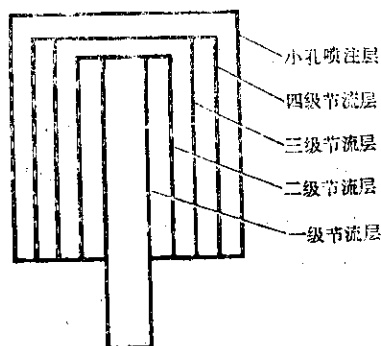


图1 降压与小孔复合消声器示意图

研制的消声器典型结构如图1所示。从形式上看,它是个多层串联的孔板。但按消声机理分析,它是由节流降压装置(前几级孔板)和小孔喷注(最后一级)组成。

1、节流降压装置

工业生产中的高压排气多属于阻塞情况。在阻塞时,排口流速达到声速,虽然不再增加,但辐射的噪声功率仍随着喷注的压力增高而增大。排气喷流噪声功率可用下式估算〔1〕:

$$W = K \frac{(P_s - P_B)^3}{P_s \cdot P_B^2} \cdot D^2 \quad (1)$$

式中 K —常数;

P_s —喷注压力(公斤/厘米²);

P_B —环境压力(公斤/厘米²);

D —排口直径(米)。

由公式(1)可以看出,排气喷流辐射的噪声功率约与压力降的2.3次方成正比。

节流降压装置就是利用节流降压原理,根据排气流量的大小,适当设计通流截面,使高压气体通过节流孔板时,压力得到降低。这样通过多级节流孔板串联,就可把原来高压气体直接排空的一次大的压降,分散成若干小的压降。根据公式(1),这样把压力突变排空改为压力渐变排空,便可取得消声效果。

节流降压消声器的各级压强是按几何级数下降的,即:

$$P_n = P_s \cdot q^n \quad (2)$$

式中 P_s —节流孔板前的压力
(公斤/厘米²);

P_n —第 n 级节流孔板后的压力
(公斤/厘米²);

n —节流孔板级数;

q —压强比, 即某级节流孔板后的
压力 P_2 与该级节流孔板前的
压力 P_1 之比。

各级压强比 q 通常取相等的数值, 即

$$q = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} \dots = \frac{P_n}{P_{n-1}}$$

对于高压排气的节流降压装置, 通常按
临界状态设计, 即对空气 (包括 O_2 、 N_2 等
分子为双原子气体), $q = 0.528$; 对过热水
蒸汽 $q = 0.546$; 对饱和蒸汽 $q = 0.577$ 。

节流装置的通流截面, 根据气态方程、
连续性方程和临界流速公式, 通过简化并换
算成工程上常用单位, 即为〔2〕:

$$S_1 = A G \sqrt{\frac{V_1}{P_1}} \quad (3)$$

式中 A —系数〔对空气 (或 O_2 、 N_2 等),
 $A = 13$; 对过热蒸汽, $A = 13.4$;
对饱和蒸汽, $A = 14$];

S_1 —节流面积 (厘米²);

G —排放气体的重量流量 (吨/时);

V_1 —节流前的气体比容 (米³/公斤);

P_1 —节流前的气体压力
(公斤/厘米²)。

在算出第一级节流孔板通流面积 S_1
后, 可按与比容成正比的关系近似确定其
他各级通流面积 (包括小孔喷注的通流面
积)。

2、小孔喷注

小孔喷注消声理论是马大猷教授等人提
出的。它的降噪原理, 主要是利用小孔移频
作用, 把噪声能量在频率分布上推移到人耳
不敏感的特高频区域去。在保持通流面积一

定的条件下, 用许多小孔代替一个大孔, 其
干扰噪声功率就会大大下降。

对单个小孔喷注, 在垂直喷注方向 1 米
处的 A 声级为〔1〕〔3〕:

$$L_A = 80 + 20 \log \frac{D}{D_0} + 20 \log \frac{M_0}{M} \\ + 10 \log \frac{(P_s - P_B)^4}{P_s^2 (P_s - 0.5 P_B)^2} \\ + 10 \log \left[\frac{2}{\pi} \left(\tan^{-1} X_A - \frac{X_A}{1 + X_A} \right) \right] \quad (4)$$

式中 D —小孔喷注直径 (毫米);

D_0 —基准孔径, $D_0 = 1$ 毫米;

P_s 和 P_B 分别为小孔喷注前气压和环
境大气压 (公斤/厘米²);

M —排放气体的分子量;

M_0 —空气的平均分子量;

$$X_A = 0.165 \frac{D}{D_0} \quad (\text{阻塞的情况下})$$

公式 (4) 是对单孔气流喷注噪声的估
算公式。在实际应用中, 小孔喷注往往不可
能是一个小孔, 而是由许多小孔组成。由于
噪声的叠加作用, 干扰噪声级要相应提高。
小孔数越多, 干扰声级提高就越大; 而开小
孔数的多少, 是由所需通流截面 S 和所开小
孔直径 D 决定的, 即:

$$N = \frac{4 S}{\pi D^2} \quad (5)$$

式中 N —所需开的小孔总数。

在实际问题中, 通流截面 S 是由排气量
大小决定的。由于工业上所需排气量往往
是给定的, 所以, S 是个确定的数值。由
(5) 式知, 在 S 值确定时, 选定的小孔直
径越小, 需开的小孔数就越多。

为了探索降压与小孔相复合的消声性
能, 以及确定合理的节流降压级数和合适
的小孔喷注孔径, 我们进行了几种消声元件及

其组合的试验。

二、消声元件的试验结果及分析

试验是以某厂高压锅炉引出的排气管作为噪声源。试验中，锅炉的压力稳定在100公斤/厘米²；温度为540℃。因此，试气源可以视为无限源。试验装置如图2所示。

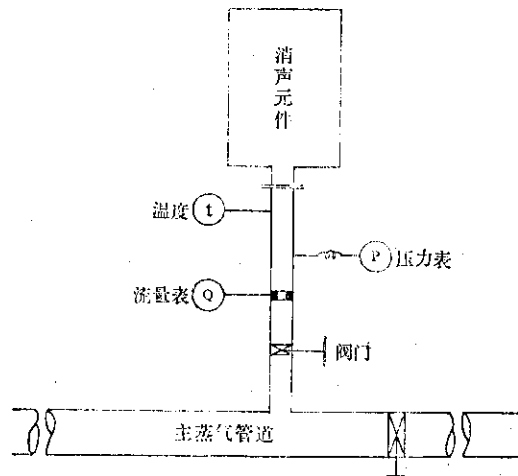


图2 消声元件试验装置系统

1、节流降压、小孔喷注及其复合消声性能试验

试验中声学测量采用插入损失法。所有实测数据均折算到垂直喷注1米远处。对于试验中的压力、流量等变化因素，都做了修正。其试验结果如表1和图3所示。

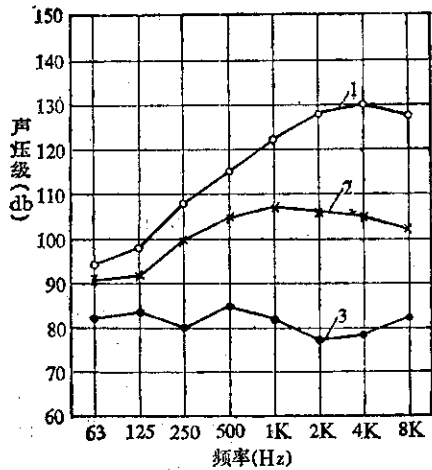


图3 消声元件消声性能

1—空管排气；2—单层φ2小孔群；3—降压小孔复合

各消声元件的试验结果（排量Q=4吨/时，压力=40公斤/厘米²）

表1

序号	消 声 元 件 种 类	A 声 级	C 声 级	消 声 值
		分 贝 (A)	分 贝 (C)	分 贝 (A)
1	空气排气	137	137	0
2	单层φ小孔群	111	109	26
3	单层φ2小孔群	116	115	21
4	单层φ4小孔群	131	131	16
5	二级节流降压	122	123	15
6	四级节流降压	114	115	23
7	二级节流+一层φ1小孔喷注	102	100	35
8	二级节流+一层φ2小孔喷注	106	104	31
9	四层节流+一层φ2小孔喷注	95	93	42
10	三层φ2小孔喷注	102	101	35

高压大流量排气所辐射的噪声属于高声强噪声，其声功率高达150~160分贝(A)。控制这种噪声的消声器必须具有35分贝(A)以上的消声效果，才能满足环境保护的要求。由试验结果可以看出：(1)单层φ4小孔喷注可消声16分贝(A)，单层φ2小孔喷注可消声21分贝(A)，单层φ1小孔喷注可消声26分贝。可见孔径越小，消声效

果越好。但孔径过小在实际加工上存在着困难，同时，在使用中也容易被堵塞。因此，单靠一层小孔喷注不能满足降噪要求；(2)二层节流降压可消声15分贝(A)，四层节流降压可消声23分贝(A)，节流层数再增加，结构复杂，同时提高的消声效果也很有限。因此，单靠节流降压也不能满足降噪要求；(3)采取节流降压与小孔喷注相复合，则

容易达到35分贝(A)以上的消声效果(见表1)。并且能做到结构简单,体积小,重量轻,容易加工;(4)节流降压装置上的节流孔也可打成小孔,其消声效果会更好。比如三层 $\phi 2$ 小孔层〔消声37分贝(A)〕,两层节流(大孔)加一层 2ϕ 小孔〔消声31分贝(A)〕,其效果要好些。但提高的消声值并不多,这是由于里面几层尽管打了小孔,实质上也是起降压扩散作用。从加工方面考虑,前几层因压力高、管壁厚,在厚管壁上开小孔比开大孔难得多。

2、进入小孔喷注前的驻压与小孔喷注辐射噪声的关系

在降压与小孔复合消声器中,降压层数的确定,是个重要问题。从设计上考虑,降压级数的多少,取决于消声器入口压力及进入小孔喷注前的驻压大小。消声器入口压力由气源压力决定,一般现场可以提供。而小孔喷注前驻压多大合适,则需要试验。为此,我们专门做了这方面的试验。试验装置如图1。通过调整主阀门开度,改变小孔层前的驻压。测得驻压大小与经过小孔消声后的噪声级的关系。其中,对流量变化因素做了修正。试验结果如表2所示。

小孔喷注前的驻压与小孔辐射噪声级的关系

表 2

驻 压 P_s (公斤/厘米 ²)	40	32	26.2	23.5	17	11.5	8	4	2
A声级分贝A	116	114	112	111	109	105	102	96	90

由试验结果可以看出,进入小孔喷注前的驻压大小决定着小孔喷注后的噪声级高低。若将进入小孔级的驻压控制在 $P_s = 8$ 公斤/厘米²左右,再考虑声传播的距离衰减和空气吸收,在距排口100米之外,噪声可降到60分贝(A)以下,已低于或接近现场的本底噪声。因此,从保护环境安静来说,是合乎要求的。确定了进入小孔喷注前

的驻压值,根据气源压力的大小,按公式(2)可确定所需的节流降压层数。

3、消声器背压大小及通流截面的修正系数

实际上,排气放空管安装消声器后,会带来背压。由于背压的存在,当一定流量的气体排出时,会出现两种情况:使消声器前的驻压增高;或者使排气量减少。这两种情况都是不利的,尤其对某些种类的排气,如锅炉安全门排汽,甚至是不允许的。

为了解决这个问题,我们进行了试验。发现通过扩大消声器穿孔的通流截面,可以减少消声器的背压。因此,在计算降压小孔复合消声器时,前述的通流截面计算公式(3)可做如下修正:

$$\text{对过热蒸汽: } S_m = 13.4 \mu G \sqrt{V_m P / m} \quad (6)$$

式中 μ —排气量的修正系数。

试验中还发现,在通流截面相同的情况下小孔喷注的孔径越小,对流量影响越大,所需的流量修正系数 μ 值也越大。根据我们的经验,对直径2毫米小孔的喷注消声器,若用于一般工业生产中的排汽放空,可选 $\mu = 1.2 \sim 1.8$;而对于锅炉安全门等特殊要求的排汽,可取 $\mu = 1.8 \sim 2$ 。

三、降压小孔复合消声器的应用

我们研制的降压与小孔复合消声器,目前已在一些电厂锅炉排气和化工行业的气体放散中推广应用,一般消声值都能达到36~42分贝(A)。下面举例说明:

1、四级节流降压与一层 $\phi 2$ 小孔复合消声器

该消声器用在某电厂高压锅炉的排气上,其结构见图4。消声器工作参数:入口压力=100公斤/厘米²;温度=540°C;排气量=45吨/时,由现场测量知,该消声器消声值达42分贝(A),其消声效率性能见图5。

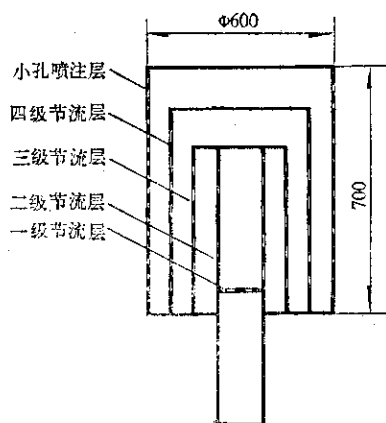


图4 四级降压与 $\phi 2$ 小孔复合消声器

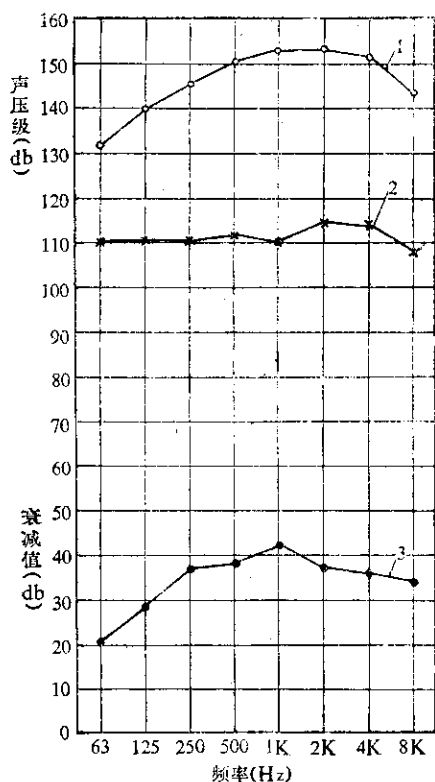


图5 四级节流降压与 $\phi 2$ 小孔复合消声器消声性能

1—空管排气噪声；2—安消声器后噪声；
3—消声值

2、两级节流降压与一层 $\phi 2$ 小孔和吸声结构相复合的消声器

该消声器用在某电厂三台高压锅炉合用的排气管上,设计排气量为60吨/时,其结构见图6。这个消声器之所以在小孔喷注外面

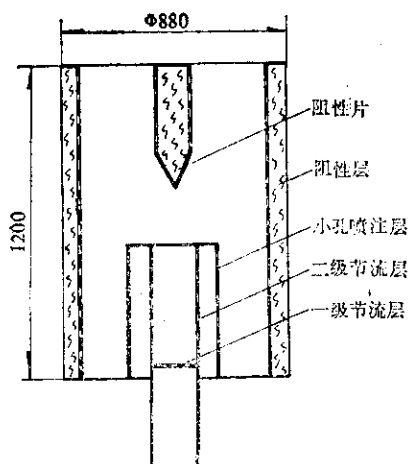


图6 两级降压与 $\phi 2$ 小孔及吸声结构复合消声器

还加装耐高温防水的吸声结构,是根据现场安全要求设计的。为了防止锅炉突然排汽时会发生烫人或其他事故,需要加外筒,即把由小孔喷注扩散出的气流用外筒收集起来朝天空排放。从消声角度考虑,加这样的外筒是不利的。但若在外筒周壁加衬阻性消声结构。而阻

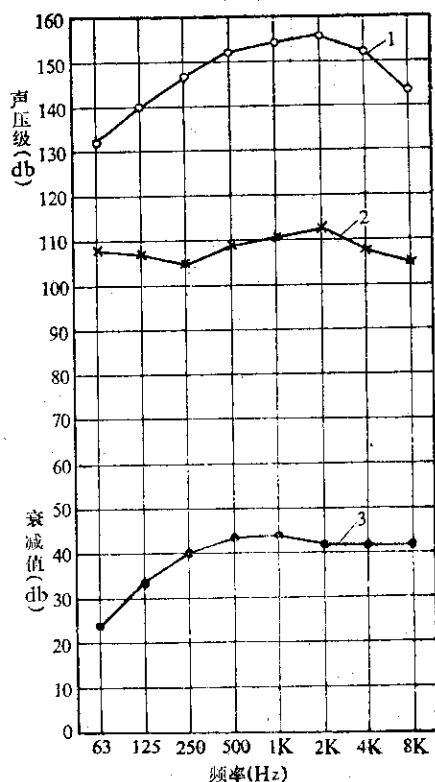


图7 降压小孔与吸声结构复合消声器的消声性能

1—空管排气噪声；2—安消声器后噪声；
3—消声器的消声值

性消声结构对降低小孔喷注后的高频噪声很为有效,这样就变不利因为有利因素。该消声器的消声值为39分贝(A),其消声性能如图7。

3、三级节流降压与一层 $\phi 3$ 小孔复合消声器

该消声器的结构如图8所示,用在某化工厂的高压排氮上。压力为100公斤/厘米²,排气量为8000米³/时,排放介质为氮气。这个消声器的消声值为35分贝(A)。

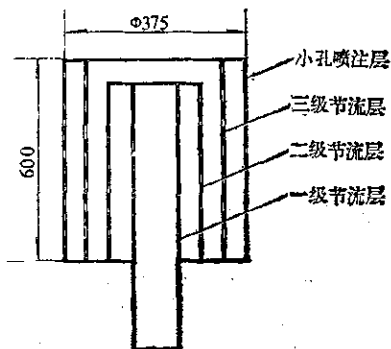


图8 三级节流降压与一层 $\phi 3$ 小孔复合消声结构

四、结 论

根据上述试验和应用实例,我们认为:

1、降压与小孔喷注复合消声器,可以弥补节流降压或小孔喷注单独使用时的消声量不足的缺点,进一步提高消声效果,同时具有体积小、重量轻、易加工、安装方便等优点。因此,它是一种适用于控制高压排汽噪声的良好的消声器。

2、降压与小孔复合消声中的小孔,其孔径选择 $D = 2$ 毫米为最小限度。孔径过小,将使得加工困难,并且造成背压阻力大,也易被堵塞(如某电厂曾用 $\phi 1$ 毫米小孔消声器,使用不到半年,就因堵塞而使排放流量减少80%)。而选取 $\phi = 2$ 毫米,则未发现堵塞现象。

3、降压与小孔复合消声器的节流降压级数,可由排气压力和进入小孔前的驻压来决定。从环境保护的需要来考虑,小孔前的驻压取8公斤/厘米²左右为宜,排气压力越高,所需降压层数就越多。若排气压力在8公斤/厘米²以下时,可以不要节流降压层,而直接用单层小孔喷注消声即可。

4、为了减少消声器的背压,使排气量不受影响,在设计节流孔和小孔喷注的通流截面时,应考虑修正系数。

5、降压与小孔复合消声器是否需要加外筒,应根据实际需要而定。若需要加外筒,其外筒最好加衬吸声层,以克服加筒后的不利影响,同时可以进一步提高消声器的消声效果。

参 考 文 献

- [1] 马大猷等, 小孔喷注噪声与小孔消声器, 中国科学, 第五期(1977)。
- [2] 王文奇、何友静, 节流降压与引射掺冷消声装置的试验研究, 环境科学, 第一期(1980)。
- [3] 马大猷等, 高压阻塞喷注的湍流噪声, 声学学报, 第三期, (1979)。