

②
42-47

等截面套管喷枪的气体 力学参数试验研究

THE RESEARCH OF AERODYNAMIC PARAMETER ABOUT
THE PIPE-CASING GUN OF THE EQUAL ACROSS-SECTION

刘成全 宋启年 李 云 温良英 TF061.2
Liu Chengquan Song Qinan Li Yun Wen Liangying

(重庆大学冶金及材料工程系)

摘 要 本文从可压缩流的基本理论出发,讨论了等截面套管喷枪的计算原则和方法,并对它的气体力学参数进行了测试。测定了不同管径的不锈钢管和铜管的摩擦阻力系数。在此基础上,对套管喷枪出口断面上的速度分布和沿套管喷枪轴线上的速度变化规律和压力变化规律进行了测定。通过试验证明了测定的摩擦阻力系数是可信的,拟定的计算方法是实用的。

关键词 套管喷枪; 气体力学参数; 摩擦阻力系数; 速度; 压力 等截面

中国图书资料分类法分类号 TF061.2

ABSTRACT The computation principle for the pipe-casing gun of the equal across-section area is studied by applying the basic theory of compressible. The aerodynamic parameter of the pipe-casing gun and the friction factor of rustless sted-pipes and copper-pipes of different diameters are measured. On the basis of this measurement, the outler-velocity profile and the change of the rate and pressure on the axis are measured. The results show that the friction factor measured is reliable and the computation method is practical.

KEY WORDS pipe-casing gun; aerodynamic parameter; friction factor; velocity; pressure

0 引 言

近年来,为了强化生产过程,改进生产工艺,提高经济效益,在钢铁生产中广泛地使用了等截面套管喷枪。等截面套管喷枪的使用实践证明,喷枪的气体力学参数对生产工艺以及技术经济指标都有很大的影响。为了能正确地设计、合理地使用喷枪,我们对它的气体力学参数进行了试验研究。

等截面管流的理论,前人从可压缩流的动力学和热力学的基本理论出发,进行了比较充

分的讨论^[1~3]。但如何具体运用这些理论来设计等截面套管喷枪,设计出的喷枪气体力学参数实际值与理论计算值的吻合情况如何,其气体力学参数特性又怎样,都未曾见过报导。为此,本文拟对等截面套管喷枪的设计计算方法进行一些探索,并按拟定的设计方法计算和制作了一支模拟试验用的喷枪,对它的气体力学参数进行试验研究。

1 可压缩流流经等截面管的摩擦阻力系数的测定

众所周知,可压缩流在等截面管中进行绝热摩擦的流动时,它的气体力学参数变化,完全由摩擦效应所引起,其关系式为

$$\frac{dM^2}{M^2} = \frac{KM^2 \left(1 + \frac{K-1}{2}M^2\right)}{1-M^2} \cdot \lambda \frac{dx}{D} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{KM^2[1+(K-1)M^2]}{2(1-M^2)} \cdot \lambda \frac{dx}{D} \quad (2)$$

$$\frac{dV^2}{V^2} = \frac{KM^2}{1-M^2} \cdot \lambda \frac{dx}{D} \quad (3)$$

$$\frac{dT}{T} = -\frac{K(K-1)M^4}{2(1-M^2)} \cdot \lambda \frac{dx}{D} \quad (4)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{KM^2}{2(1-M^2)} \cdot \lambda \frac{dx}{D} \quad (5)$$

从(1)~(5)式看出,各等式的右边都表示为马赫数 M 和摩擦阻力系数 λ 组成的综合无量因次量的函数。要了解各参数受摩擦影响的变化特征,正确的设计计算喷枪,摩擦阻力系数 λ 的准确确定是很重要的。若果所选取的 λ 与实际情况不符,设计计算的喷枪就难以在设计工况下工作,也难以得到理想的冶金效果和技术经济指标,从而失去先进技术的优越性。文献[3~6]推荐了摩擦阻力系数值,但相互差别甚大,难以选用。因此在进行试验研究之前,先对拟选用作喷枪的铜管、不锈钢管的摩擦阻力系数进行实际测定,以免影响试验结果。

根据可压缩流的理论分析,摩擦阻力系数 λ 应与马赫数 M 、雷诺数 Re_0 和相对粗糙度 Δ 有关。可是通过实验,当可压缩流在管道中流动时, $Re_0 = 3.0 \times 10^5 M = 1.7$ 时的摩擦阻力系数只比 $M=0$ 时小 5.0%^[4],即在马赫数等于 1 左右时,马赫数对摩擦阻力系数无影响,仅与雷诺数和相对粗糙度有关。根据文献^[7],流经光滑管 1, 2 两截面的可压缩管流(见图 1),其参数间有如下关系

$$\frac{K}{K+1} p_1 \rho_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right] = \frac{G^2}{A^2} \left[\frac{1}{K} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) + \frac{\bar{\lambda} L}{2D} \right] \quad (6)$$

式中 $\bar{\lambda}$ ——平均摩擦阻力系数,定义为

$$\bar{\lambda} = 1/L_{\text{最大}} \int_0^{L_{\text{最大}}} \lambda dx$$

从(6)式看出,在一定条件下,当测定出流经管道的流量和相应 1, 2 两截面的压力和温度后,即可计算出相应工况下的平均摩擦阻力系数值。

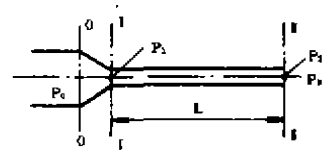


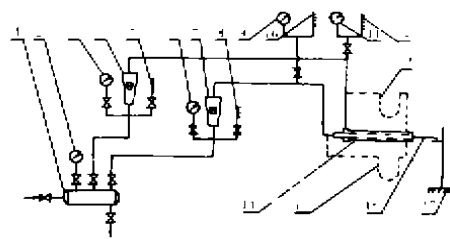
图 1 等截面喷枪示意图

为此,在重庆大学冶金热工研究室,设计安装了一套专用的试验装置(见图2)。用以测定可压缩流流经等截面管的摩擦阻力系数 $\bar{\lambda}$ 值,和考察喷枪的气体力学参数特性。

根据试验室的条件,我们对 $\varnothing 2.1\text{mm}$ 的冷拔不锈钢管和 $\varnothing 4.2\text{mm}$, $\varnothing 14.1\text{mm}$ 的冷拔紫铜管的平均摩擦阻力系数 $\bar{\lambda}$ 进行了测定。将结果整理,得与雷诺数的关系。

$$\bar{\lambda} = 0.21\text{Re}_D^{-0.23}$$

此式适用于 $10^4 < \text{Re}_D \leq 2 \times 10^5$ 范围。



- 1 储气罐
- 2,3,6,9,11 弹簧压力表
- 5,8,10,12 精密温度计
- 4,7 浮子流量计
- 14 试验用喷枪
- 13,15 U型压力计
- 16 速度或静压测针
- 17 三维坐标架

图 2 试验装置示意图

2 套管喷枪的气体力学参数特性试验

2.1 套管喷枪的设计计算

根据(1)~(5)式可进一步获得以滞止参数(或临界参数),表示的无因次参数与马赫数的关系式

$$\frac{K+1}{2K} \left(\frac{1}{M_1^{*2}} - \frac{1}{M_2^{*2}} - \ln \frac{M_2^{*2}}{M_1^{*2}} \right) = \frac{\bar{\lambda}L}{D} \quad (7)$$

$$\frac{p_0}{p_2} = \frac{\left(1 - \frac{K-1}{K+1} M_1^{*2} \right)^{-\frac{1}{K-1}} M_2^*}{\left(1 - \frac{K-1}{K+1} M_2^{*2} \right) M_1^*} \quad (8)$$

$$\frac{T_0}{T_2} = \left(1 - \frac{K-1}{K+1} M_2^{*2} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$\rho_0 = \rho_{*0} \frac{p_0 M_1^*}{0.10325 M_2^*} \left(1 - \frac{K-1}{K+1} M_1^{*2} \right)^{\frac{1}{K-1}} \quad (10)$$

$$V_2 = M_2^* \sqrt{\frac{2K}{K+1} RT_0} \quad (11)$$

$$G_{*0} = \frac{Ap_0 M_1^*}{0.101325} \left(1 - \frac{K-1}{K+1} M_1^{*2} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2K}{K+1} RT_0} \quad (12)$$

根据这些关系,可用计算机求解喷枪出口速度为亚音速和音速情况下,它的结构参数和气体力学参数。

这里仅将出口速度为音速时的试验用枪计算结果列出。喷枪内管和环缝内流动介质为压缩空气,环境介质为大气。根据试验室的条件,取喷枪内管长为880mm,内径 $\varnothing 14\text{mm}$,外径 $\varnothing 16\text{mm}$,外管长810mm,内径 $\varnothing 18\text{mm}$,外径 $\varnothing 21\text{mm}$ 。喷枪内外管的材质均为冷拔紫铜管。根

据前述试验结果,管的平均摩擦阻力系数 $\bar{\lambda}=0.017$ 。在室温 $T=298\text{K}$,大气压力 $=0.986 \times 10^5\text{Pa}$ 时,计算出喷枪内管的气体力学参数为:

$$\text{出口压力 } p_{\text{出}} = p^* = 0.986 \times 10^5\text{Pa};$$

$$\text{滞止压力 } p_0 = 2.51 \times 10^5\text{Pa};$$

$$\text{进口马赫数 } M_1 = 0.51;$$

$$\text{出口临界温度 } T_2^* = 248\text{K}.$$

喷枪环缝的气体力学参数为:

$$\text{出口压力 } p_{\text{出}} = p^* = 0.986 \times 10^5\text{Pa};$$

$$\text{滞止压力 } p_0 = 4.57 \times 10^5\text{Pa};$$

$$\text{进口马赫数 } M_1 = 0.28;$$

$$\text{出口临界温度 } T_2^* = 249\text{K}.$$

2.2 喷枪的气体力学参数试验

2.2.1 试验装置

试验装置如图2所示。为了考察喷枪断面上的速度分布,以及沿喷枪出口轴线上的速度和压力的变化规律,用了两支 $\varnothing 1.8\text{mm}$ 的速度探针,一支 $\varnothing 0.8\text{mm}$ 的锥形静压探针,两支水银U型压力计。探针是牢固的固定在三维坐标架上,它可以使探针在喷口径向和轴向流动方向上精确的定位($\pm 0.5\text{mm}$)。探针在径向上由对称轴线向左右延伸(间隔 3.0mm),即可测得喷口处内管的径向速度分布规律。由于套管喷枪结构和试验室条件的限制,只测量环缝中心的速度值。探针由喷枪出口平面的轴线向下游方向延伸到某一特定的点,即可测得射流沿轴线上的速度和压力变化规律。

2.2.2 测试结果及分析

1) 喷枪出口断面上的速度变化规律

对所设计的模拟喷枪在不同工况下的出口速度进行了测定,图3所示是在临界状况(即 $M_2=1$)下的喷枪出口断面上的速度分布。从图上看,在喷枪出口断面上的速度分布,较之不可压缩流的湍流射流的速度分布还要均匀。这对转炉炼钢生产工艺是有利的。由所测结果表明,只要实际供气参数满足了理论计算的要求,出口速度就基本能达到当地音速(在试验的条件时,当地音速为 316M/s)。统计试验结果,测得的出口速度总是小于理论计算值。其原因是由于喷枪加工难达理想状况,使之实际流量(即试验实测得的流量 $G_{\text{实}}$)较之理论计算流量(即按(12)式计算的流量 $G_{\text{理}}$)总小,定义这两个流量之比为流量系数 α ,则

$$\alpha = G_{\text{实}} / G_{\text{理}}$$

归纳试验结果,对试验喷枪言,喷枪内管的 α 为 0.96 ,喷枪环缝的 α 为 0.94 。

2) 沿喷枪轴线上的速度变化规律

沿喷枪轴线上向下游延伸的速度测定结果,有如图4所示的变化规律。从图上看,射流出口后仍保持一段速度不变的距离,随后就逐渐下降。但其速度不变的距离较之一般自由射

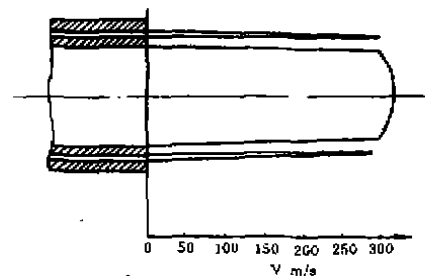


图3 喷枪出口断面上的速度分布

流为长,其速度下降的速度较之一般自由射流为慢。这里要特别指出,试验是属于自由射流情况下进行的,与实际情况(浸没射流)肯定有差异,这将有待今后进一步试验研究。

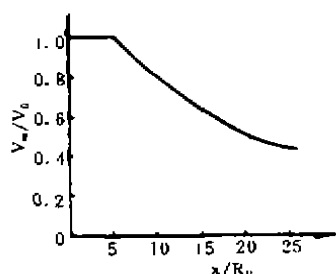


图4 无因次速度沿射程的变化

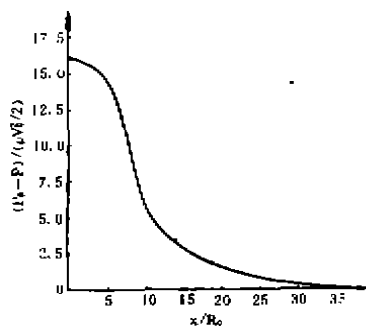


图5 无因次压力沿射程的变化

3) 沿喷枪轴线上的静压变化规律

将在临界工况下测得的出口静压沿轴线下游延伸的变化,用无因次压力的形式绘制在图5上。从图上看,轴线上的静压是一负值,随离喷口向下游延伸,静压逐渐回升。

以上是我们初步试验的结果,由于空压机能力的限制,未能在喷枪出口有剩余压力的条件下进行试验。

3 结 论

1) 可压缩流流经绝热的等截面管的气体力学参数变化是完全由摩擦效应所引起。试验测定结果表明,平均摩擦阻力系数值随雷诺数增大而降低。

2) 试验测定结果证实,所测的平均摩擦阻力系数值是可信的,提出的喷枪设计计算方法是实用的。

3) 在自由射流的条件下,喷枪出口断面上速度的分布较均匀,轴线上速度的衰减规律与一般射流类似。

4) 在自由射流的条件下,轴线上无因次静压的变化是逐渐下降而趋近于零。

主要符号说明

Q ——热量, J/h;	τ ——时间, h 或 s;
h_{*} ——阻力损失, Pa;	T ——绝对温度, K;
G ——质量流量, kg/s;	L ——管长, M;
D ——水力学直径, M;	M ——马赫数;
W ——功, J/h;	h ——焓, J/kg;
p ——压强, Pa;	V ——速度, M/s;
M^* ——无因次速度;	A ——面积, M ² ;
λ ——摩擦阻力系数;	K ——绝热指数;
R ——气体常数, J/kg·K;	R_0 ——半径, M.

参 考 文 献

- 1 徐文派,张泊汀,赫宝升等. 转炉复合吹炼技术(1981~1985). 北京:钢铁,1986,13~21,70~73,96~102
- 2 岩本顺二郎著;何单烈译. 可压缩流体力学. 西安:西安交通大学出版社,1985,72~79
- 3 A. H. 夏皮罗著;陈立子等译. 可压缩流的动力学与热力学(上册). 北京:科学出版社,1966,161~185
- 4 A. H. 夏皮罗著;陆志芳等译. 可压缩流的动力学与热力学(下册). 北京:科学出版社,1977,505~506
- 5 M. J. 左克罗等著;王汝涌等译. 气体动力学(上册). 北京:国防工业出版社,1984,203~204
- 6 江宏俊主编. 流体力学. 北京:高等教育出版社,1985,47~49
- 7 周漠仁主编. 流体力学泵与风机. 北京:中国建筑工业出版社,1979,167~168
- 8 刘成全,温良英合编. 热工综合试验技术. 重庆大学印刷厂,1989,1-6~1-9
- 9 李云. 顶底吹氧转炉用天然气保护的底吹氧枪寿命与结瘤保护研究. 硕士论文集,重庆大学,1990,14~19