

气体搅拌用透气砖阻力系数的测试

周建安^{1,2} 朱苗勇¹ 潘时松¹

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 中冶华天工程技术有限公司, 马鞍山 243005)

摘要 在实验室测定了工业用的狭缝型透气砖进出口压力差及气体出口速度, 得出透气砖的阻力系数近似为 $44/Re$, 流动状态可近似认为呈层流, 阻力系数与相对粗糙度无关, 仅是雷诺数的函数, 阻力损失与出口速度成正比。从而可计算出透气砖阻力损失, 进而确定透气砖气体进口压力。在工业应用中, 正常吹氩的压力差不大时, 透气砖阻力系数 ≈ 0.07 。

关键词 透气砖 阻力系数 相对粗糙度 雷诺数

Measurement of Drag Coefficient in Slot Plug for Gas Stirring

Zhou Jian'an^{1,2}, Zhu Miaoyong¹ and Pan Shisong¹

(1 Materials and Metallurgy School, Northeastern University, Shenyang 110004;
2 Huatian Engineering & Technology Co, MCC, Maanshan 243005)

Abstract The pressure difference between inlet and outlet of commercial size slot plug and velocity of gas at outlet have been measured in laboratory. It is obtained that the drag coefficient of plug is approximately equal to $44/Re$, the flow condition is laminar flow, the drag coefficient is function of Reynolds number which is unconcerned to roughness factor, and the resistance loss on the way is in proportion to velocity of gas at outlet. Therefore the resistance loss could be calculated to determine the pressure of gas at inlet of plug. With application in industry as pressure difference of blowing argon is moderate, the drag coefficient of slot plug is approximately equal to 0.07.

Material Index Slot Plug, Drag Coefficient, Relative Roughness Factor, Reynolds Number

利用透气砖进行气体搅拌, 其装置简单, 搅拌程度可控, 已成为钢包精炼中重要工序。透气砖的使用性能主要取决于气体压力、吹气时间、工艺条件等因素。供气压力是一个重要的参数, 压力过大, 会形成连续的喷射气柱, 对钢水搅拌过于强烈, 使得钢液在翻动过程中与大气接触, 致使钢液二次氧化加剧, 温降较大; 压力过小, 氩气泡难以形成或搅拌能力减弱, 甚至吹不开。供气最小压力主要应克服钢液静压力和透气砖阻力。可见, 透气砖阻力的大小, 将直接影响冶金效果。但目前尚未直接计算出透气砖阻力的公式。

透气砖的结构型式主要有弥散型、直通型、狭缝型和迷宫型 4 种。其中, 狭缝型透气砖因其可调范围大、抗侵蚀性能好、透气性能优良而得到广泛应用^[1]。因此, 对狭缝型透气砖阻力系数的进一步探讨, 具有实用的意义。

由于狭缝型透气砖结构的特殊性, 阻力系数很难直接测试获得。实验通过测试透气砖两端的压差及出口速度, 获得透气砖的阻力系数。

1 测试系统

实验用透气砖为狭缝型, 其结构尺寸 (mm) 为

$\Phi 87(\Phi 57) \times 250$, 狭缝尺寸 (mm): $0.15 \times 14 \times 250$; 狭缝呈圆周对称布置, 大小、间距相同, 狭缝数量共 18 条。设狭缝长度即透气砖长度为 L , 宽度为 B , 狭缝厚度为 δ , 透气砖示意图见图 1, 透气砖理化指标见表 1。

测试用气采用氩气, 其气体压力可调; 测试仪器采用美国 TSI 公司生产的 IFA-100 热线风速仪, 测

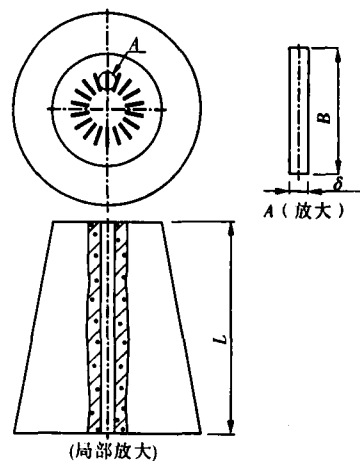


图 1 透气砖示意图
Fig. 1 Schematic of slot plug

表1 透气砖理化指标
Table 1 Physical and chemical indexes of slot plug

项目	Al ₂ O ₃ 含量/%	体积密度/(g·cm ⁻³)		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		110 °C 24 h	110 °C 24 h	1 500 °C 3 h	110 °C 24 h	1 500 °C 3 h	
指标	≥92	≥3.2	≥60	≥95	≥12	≥15	

试系统由压缩氩气源、减压表、阀门、压力表、缓冲罐、流量计、透气砖、探针、坐标仪、热线风速仪、计算机等部件组成。

热线风速仪具有惯性小、频率响应宽、灵敏度高、对流场干扰小等优点^[2]。在测量速度时,将热线探针通电后置于流场中,由于强制对流的作用,探针被流体冷却。流体流速不同,热丝的散热状况不同,其温度、电阻的大小也相应地发生变化。根据热丝的电阻与流速的对应关系,可通过测量热丝电阻来测量流速。

2 实验方法和测试结果

由于热线探针的性能与流体的温度、密度、黏度等参数及流体的污染情况、速度范围、外部条件等因素有关,因此在实验之前应首先对热线风速仪进行校正。其次,用直角尺标定坐标仪与透气砖轴线的垂直度,通过肉眼选取两条有代表性的规则狭缝,并沿狭缝长度方向标定狭缝前、中、后3点位置。测试时将探针尽可能靠近透气砖端面,探针对狭缝标定3点进行扫描,在每一个采样点测试两个速度取平均值,再求速度总平均值。

由于距离较近,缓冲罐内气体压力可认为是透气砖进口压力。测试及计算结果见表2。

表2 不同参数的测试及计算结果

Table 2 Measured and predicted results of different parameters

实测压差/ MPa	实测总流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	计算平均速度/ (m·s ⁻¹)	实测出口速度/ (m·s ⁻¹)
0.10	4.2	30.8	29.5
0.15	5.7	41.8	39.1
0.20	6.7	49.2	48.5
0.25	7.6	55.7	55.6
0.30	8.3	60.9	62.1
0.35	8.9	65.3	69.2

3 透气砖阻力系数的确定

气体的密度是随压强和温度而改变的,但当气体的速度≤70 m/s时,其密度变化很小。为了简化起见,工程上也可将其视为不可压缩流体^[3]。从表2可以看出,流体最大速度为69.2 m/s。在生产实践中,一般正常吹氩的压力差(氩气压力减去钢液

静压力)≤0.3 MPa。因此,气体在透气砖狭缝内流动可近似按不可压缩流体处理。

气体通过透气砖狭缝时,可以认为是狭缝流动,即气体在压差流作用下所产生的流动。因狭缝厚度(如0.15 mm)远远小于狭缝的横向尺寸(如狭缝宽度14 mm,狭缝长度250 mm),故可忽略端部效应即流体进出口的影响,将流体视为充分发展^[2]。

在透气砖进出口取两个断面,由于透气砖狭缝大小一般相同,流向相同,因此可选取其中一条狭缝作为代表。如图2所示,由于透气砖的气室断面远

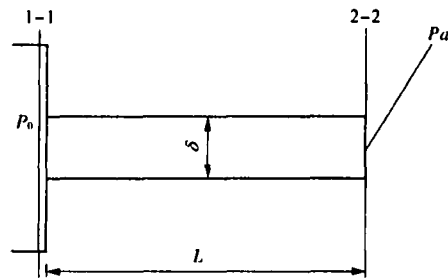


图2 透气砖进出口示意图

Fig. 2 Schematic of inlet and outlet of slot plug

远大于狭缝断面,可以认为气室内气体流速为0。透气砖经历由气室突然变小(变成狭缝)断面变化,其局部阻力系数近似为0.5,压损为0.5 v_a²ρ/2(可近似认为透气砖气体实测出口速度为透气砖狭缝入口速度)。

根据伯努利方程(Bernoulli equation)可得:

$$\frac{P_0}{\rho} = \frac{P_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{v_a^2}{2} + \lambda \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2}$$

$$P_0 - P_a = \frac{3v_a^2}{4}\rho + \lambda \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2}\rho$$

$$\Delta P = \frac{3v_a^2}{4}\rho + \lambda \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2}\rho \quad (1)$$

式中:P₀-气体在透气砖进口压力;P_a-气体在透气砖出口压力;λ-沿程阻力系数;v_a-气体在透气砖出口速度; \bar{v} -气体在透气砖内平均速度;D-狭缝水力直径;ρ-氩气在一定压力下的密度。

$$\text{雷诺数 } Re = \frac{\bar{v}D}{\nu} \quad (2)$$

式中 D -水力直径,其值为

$$D = \frac{4B\delta}{2(B+\delta)} = 2\delta \quad (B \gg \delta) \quad (3)$$

$$\text{因而得 } Re = \frac{2v\delta}{\nu} \quad (4)$$

式中: ν -气体运动黏度; δ -透气砖狭缝厚度; v -气体在透气砖内平均速度,由测得的气体流量、狭缝尺寸、狭缝数便可求出。氩气在一个大气压下的密度约为 1.62 kg/m^3 ,便可求出在不同绝对压力下的密度。将相关参数 $\delta = 0.00015 \text{ m}$, $L = 0.250 \text{ m}$, $\nu = 1.40 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 代入(1)、(2)、(3)和(4)式,得出气体通过透气砖时阻力系数与雷诺数的关系,见表 3 和图 3。

表 3 气体通过透气砖时的雷诺数与阻力系数的关系
Table 3 Relation between Re number and drag coefficient as gas passing slot plug

实测压差 $\Delta P / \text{MPa}$	Re	$\lg Re$	λ	$\lg(100\lambda)$
0.10	660	2.82	0.076 4	0.883
0.15	895	2.95	0.049 3	0.693
0.20	1 054	3.02	0.039 1	0.592
0.25	1 194	3.08	0.032 3	0.509
0.30	1 304	3.12	0.028 1	0.449
0.35	1 398	3.15	0.025 0	0.398

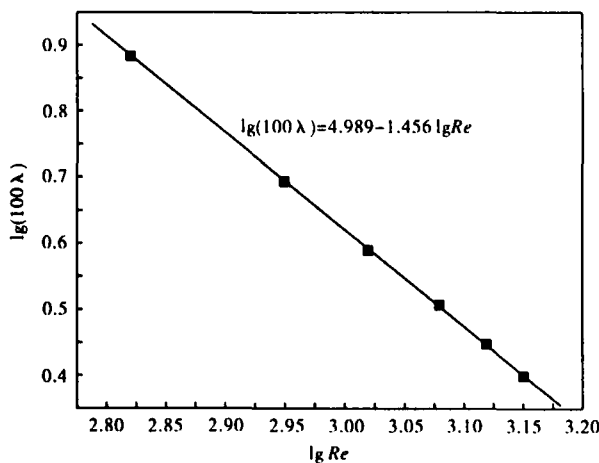


图 3 透气砖阻力系数与雷诺数关系

Fig. 3 Relation between Re number and drag coefficient

从表 3、图 3 可以看出,透气砖进出口压差越大,雷诺数越大,阻力系数就越小,回归曲线为 $\lg(100\lambda) = 4.989 - 1.456 \lg Re$,近似为 $\lambda = 44/Re$ 。这与尼古拉兹人工均匀粗糙管实验曲线层流区的 $\lambda = 64/Re$ 基本吻合^[4]。表明在层流时,阻力系数(λ)与相对粗糙度(ϵ/d)及透气砖的材质无关,只是雷诺数的函数,沿程阻力损失与出口速度的平方成正比。

这也与平面狭缝流动 $\lambda = 24/Re$ 基本吻合^[2]。

通过实验发现,气体流量测量误差较大。这是因为透气砖狭缝断面不均匀性所致。通过热线风速仪测出的透气砖出口速度与透气砖出口实际速度,尚有一定的差距。主要原因为:(1)热线探针与透气砖出口尚有一定的距离,有可能超过射流起始段(流动发展区)长度,进入过渡段,射流速度已经降低^[5];(2)传感器对流场的干扰产生的测量误差;(3)透气砖进出口断面形状影响;(4)气体在透气砖内密度发生一定的变化;(5)没有考虑狭缝出口处断面突然变大引起的压损和压强对气体黏度的影响。因此,得出的阻力系数较之实际有一定偏差,但与用 $\lambda = 64/Re$ 或 $\lambda = 24/Re$ 公式计算的阻力系数相比,更接近实际,因后者偏差将更大。

从表 2 可以看出,透气砖平均速度与实测的出口速度相差不大,故从式(1)则可近似计算出透气砖阻力损失,从而可近似确定透气砖气体进口压力。

在实际应用中,透气砖进出口压差一般 $\leq 0.3 \text{ MPa}$ 。从表 3 也可以看出,透气砖阻力系数可近似取 0.07(以水力直径作为特征长度)。通过马钢、沙钢等厂应用实践证明,这对生产具有一定的指导意义。

4 结论

(1)在进出口压力差不大时,气体在透气砖内的流动状态可近似认为层流,说明透气砖的阻力系数与相对粗糙度及透气砖的材质无关,仅是雷诺数的函数。

(2)通过实验研究,得出透气砖的阻力系数 $\lambda \approx 44/Re$,从而为计算透气砖阻力损失创造了条件,进而可确定透气砖气体进口压力。在工程应用中,正常吹氩的压力差不大时,透气砖阻力系数可近似取为 0.07。

参考文献

- 1 赵沛. 炉外精炼及铁水预处理使用技术手册. 北京:冶金工业出版社,2004
- 2 黄卫星,陈文梅. 工程流体力学. 北京:化学工业出版社,2001
- 3 唐谟堂. 冶金设备基础. 长沙:中南大学出版社,2003
- 4 李诗久. 工程流体力学. 北京:机械工业出版社,1990
- 5 戴干策,陈敏恒. 化工流体力学. 北京:化学工业出版社,1988

周建安(1965-),男,教授级高级工程师,博士研究生,1987年东北大学毕业,从事炼钢新技术的研究和工程设计。

收稿日期:2006-11-24