

顶吹转炉 氧枪设计

吴凤林 蔡扶时 编著 冶金工业出版社

顶吹转炉氧枪设计

吴凤林 蔡扶时 编著

冶金工业出版社

顶吹转炉氧枪设计

吴凤林 蔡扶时 编著

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 7 5/8 字数 199 千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷

印数 00,001~1,750 册

统一书号: 15062·3858 定价 0.98元

前 言

氧气转炉炼钢是现代炼钢生产的重要方法。氧枪是氧气转炉中的重要设备。氧枪产生的氧射流的特点及氧射流对铁水熔池的冲击作用状况,直接影响着氧气转炉冶炼的各项技术经济指标。

1972年以来,我们北京大学力学系氧枪科研组先后与包头钢铁公司、北京钢铁研究院、本溪钢铁公司等单位协作,研究氧气转炉氧枪喷头的设计和氧射流衰变规律以及氧射流与铁水熔池相互作用等问题,对我国生产现场使用的几种典型氧枪喷头的射流流动状态进行了冷态测定。在此基础上,结合冶炼实际分析,总结出一种氧枪喷头的设计方法。用此方法设计的氧枪喷头,在实际冶炼中获得了良好的效果。1976年包头钢铁公司、本溪钢铁公司、太原钢铁公司、攀枝花钢铁公司、武汉钢铁公司和北京钢铁研究院的同志在我校进行了50吨转炉多种氧枪喷头的氧射流流态冷态实测,后又在太钢50吨转炉上做了生产试验,并进行了经验交流,开了技术课。在讲课内容的基础上,我们编写了氧枪设计讲义初稿。1977年全国大型转炉生产技术座谈会与会代表建议将此讲义整理出版。会后,我们又系统地查阅了国外有关文献,对初稿作了补充、修改,完成了本书稿的编写工作。

本书系统阐述了氧气转炉氧枪工作所依据的气体力学、湍流射流、射流与熔池相互作用等基础理论以及氧枪喷头的设计方法和试验方法。为便于了解氧枪喷头的特性,还给出了一些实际测定的数据。

本书是为了满足从事氧气转炉炼钢的生产、设计、教学和科研方面工作的生产技术人员、研究人员、教师提高氧枪操作、设计和研究的理论水平的要求而编写的。部分章节可以作为提高工人操作水平的学习资料。

我们在进行氧枪喷头的射流流态测定,喷头研制,转炉生产

试验、总结和分析过程中，曾得到包钢、本钢、北京钢铁研究院、攀钢、太钢、武钢等单位的帮助以及我校有关系、教研室的支持。在整理本书稿的过程中，得到我校力学系主任周光炯教授的具体指导，并审阅了全稿。在这里，我们一并向他们致以衷心的感谢。

由于我们水平所限，书中可能会有错误和不妥之处，诚恳地希望读者给与批评指正。

作 者

目 录

第一章 气体力学基础	1
第一节 气体力学的一些基本概念	1
一、连续介质假设	1
二、气体的主要力学性质	2
三、运动及分类	7
四、气体中的作用力	8
五、完全气体状态方程	11
六、气体力学遵从的基本物理规律	12
七、气体力学的一些假定	16
八、气体力学的一些基本概念	17
第二节 气体运动方程组与普遍积分	22
一、气体运动方程组	22
二、气体运动方程组的普遍积分	28
三、几种具体情况下的伯努利积分	31
第三节 激波	34
一、激波形成的物理过程	34
二、激波关系式	36
三、有关激波的一些重要结论	41
四、正激波后驻点上的压力	45
第四节 完全气体一维定常等熵管流	47
一、完全气体一维定常等熵管流的基本方程组	47
二、管道截面 $F(x)$ 与速度 $v(x)$ 之间的关系	48
三、管道截面 $F(x)$ 与气流马赫数 $M(x)$ 的关系	49
四、流量计算	50
五、拉伐尔管内流动状态分析	51
第二章 射流	57
第一节 射流概述	57
一、射流的形成	57
二、湍流射流结构	57
三、射流分类	59

第二节 亚音速流湍流自由射流	61
一、自由射流速度剖面特性	61
二、自由射流外边界线形状	64
三、自由射流的等速线	65
四、自由射流轴线上速度衰减规律	67
第三节 伴随流中不可压缩流湍流射流	70
一、伴随流中不可压缩流湍流射流的速度剖面	70
二、伴随流或反向流中射流边界层的增长规律	73
三、轴对称射流初始段	76
四、轴对称射流主段	78
第四节 超音速流湍流射流	87
一、超音速流湍流射流的一般属性	87
二、超音速湍流射流边界层厚度增长规律	93
三、具有伴随流的超音速射流初始段	95
四、具有伴随流的超音速射流主段	102
五、非工况条件下轴对称超音速射流的一些试验结果	111
第三章 射流与熔池的相互作用	114
第一节 射流与熔池相互作用的基本概念	114
一、概述	114
二、氧枪射流特性	116
三、射流冲击液面的基本模式	117
四、三种模式的区划条件	119
五、熔池运动	121
第二节 冷试验研究	125
一、概述	125
二、射流冲击液面的相似模拟	125
三、冲击深度	128
第三节 转炉热试验	134
一、概述	134
二、穿入深度(冲击深度)	135
三、熔池环流	142
四、冲击深度的选定	142
第四章 氧枪喷头设计	144
第一节 氧枪喷头设计参数的选取	144
一、设计要求	144

二、设计的初始数据	147
三、氧枪喷头参数的选取原则	150
第二节 喷管(孔)设计	152
一、喷管概述	152
二、轴对称喷管设计	154
第三节 喷头设计	163
一、喷头设计步骤	163
二、设计例子	165
第五章 氧枪试验	173
第一节 气流压力与速度测量	173
一、概述	173
二、压力测量	173
三、流速测量	183
第二节 氧枪射流流态测定	187
一、测定项目	187
二、射流出口截面上流动参数测定	188
三、单股射流轴线上流动参数测定	195
四、氧枪轴线上流动参数测定	198
五、氧枪射流下游速度剖面测定	199
六、流谱摄取	200
第三节 氧枪喷头流态测定的一些结果	201
一、被测定喷头结构及其参数	201
二、测定结果	203
第四节 炉内压力和输氧管道压力损失测定及结果	214
一、炉内压力测定	214
二、输氧管道压力损失测定	215
第五节 氧枪生产试验简介	220
附录 I 等熵流函数表	222
附录 II 正激波函数表	229
参考文献	234

第一章 气体力学基础

第一节 气体力学的一些基本概念

气体力学是研究气体的静止、运动，以及气体与物体发生相对运动时其间的相互作用力的学科。它研究的是气体的宏观运动。气体力学在实际工业生产中，有着广泛的应用。例如航空、动力机械、运输、冶金等部门都要用到气体力学的知识。气体力学作为一门成熟的学科，它的内容是很广泛的。限于篇幅，我们不能全面地介绍，这里针对氧气顶吹转炉氧枪设计的需要，介绍气体力学的基础内容。

一、连续介质假设

我们知道，任何气体都是由大量的，无规则运动着的，彼此间有一定间隙的气体分子构成的。气体的宏观运动是组成气体的所有分子运动的总和。如果把组成气体的每个分子的运动规律都找出来，那么整个气体的运动规律也就清楚了。但是，这在实际上是也不可能也是不必要的。一方面由于气体中分子个数多得惊人，且相互碰撞频繁。譬如，在 0°C 和一个大气压下，一个立方厘米体积中所含气体分子数为 2.7×10^{19} ，每秒钟要碰撞 10^{29} 次，数学上求解这样多的质点的复杂运动实际上是办不到的。另一方面工程上感兴趣的不是单个气体分子的运动情况，例如，当考虑一个贮气罐中气体对罐壁的压力时，不是去研究单个气体分子对罐壁的作用力，而是研究所有气体分子对罐壁作用的总效应。因此，在气体力学里，为了有效地描述气体的宏观运动，假设气体运动的空间是由气体质点连续地充满着。所谓气体质点，从宏观角度来看，是指几何上的一个点。从微观角度来看，气体质点中包含着足够多的气体分子，其运动平均使得每个气体质点都具有相同的统计特性。这个假设就是连续介质假设。它是气体力学对

气体结构所作的一个根本性假定。有了这个假定，就可以利用连续函数这一强有力的数学分析工具去研究气体的运动规律。在通常情况下，由连续介质假定出发，得出的气体运动规律，与实际是符合得很好的。只在某些特殊问题中，譬如在稀薄气体里以及在后面将要讲到的激波里，气体的运动不能用连续介质假定去处理。

二、气体的主要力学性质

1. 流动性

在日常生活里，我们经常看到从烟囱里或火炉里出来的烟流，随风飘落；我们把任何气体装在容器内，它都能充满容器。这些例子说明气体极易流动。气体的这种特性，叫做流动性。从力学角度来看，这种特性表征着很小的外力就能使气体变形。

2. 压缩性

在讨论压缩性前，让我们首先来讨论质量密度（以下简称密度）的概念。假定从气体中取出任一体积 ΔV （如图 1-1 所示），

以 Δm 表示该体积中的质量。

这时 $\frac{\Delta m}{\Delta V}$ 就是 ΔV 体积中气

体的平均密度。现在我们把体积 ΔV 缩小到 M 点，于是

$\frac{\Delta m}{\Delta V}$ 将趋于某个极限，此极

限就称为 M 点的密度。表示

为 $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$ (1-1)

在工程单位制中，密度的单

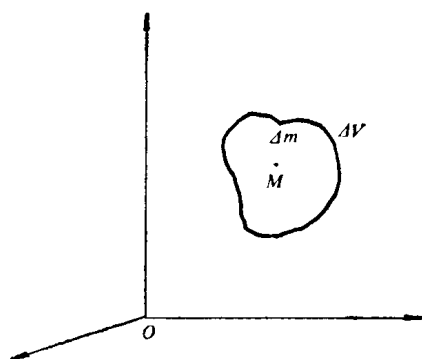


图 1-1 说明给定点密度用图

位是

$$[\rho] = [\text{质量/体积}] = [\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4]$$

在标准压力(760毫米汞柱)和 $t = 15^\circ\text{C}$ 的温度下，空气的密度 $\rho = 0.125 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ 。

这里我们顺便提一下重量密度（以下简称重度）的概念。假

定体积 ΔV 内的重量为 ΔG ，比值 $\frac{\Delta G}{\Delta V}$ 称为平均重度，当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时，这个比值的极限称为该点的重度。表示如下：

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-2)$$

密度与重度之间有下列关系式

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

重度的单位是

$$[\gamma] = [\text{重量/体积}] = [\text{公斤/米}^3]$$

对于气体质点来说，当它受到一定压力和温度差的影响时，其体积或密度发生变化的性质称为压缩性。真实气体都具有压缩性。为了便于处理问题，当气流速度很低，气体质点上的压力和温度变化很小，因而气体的体积变化也不大时，可近似地将气体看作不可压缩的。因而可将气体的运动分为两大类：不可压缩流动和可压缩流动。实际上，不存在不可压缩气体流动，它只是一种理论模型。不可压缩的数学表示是

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (1-4)$$

气体动力学主要研究压缩性起重要影响的气体运动规律。

3. 粘性

粘性是指气体抵抗切向变形的性质。我们来看，气体沿一平板 AB 流动的情形，如图1-2所示。实验给出平板表面上气体流动的速度分布如图上所示。紧贴在平板上的气体，由于分子附着力的影响，被“粘”在平板上了。因此，其速度等于零。由于粘性切应力的作用，使得气体的速度一层一层地按接近平板的程度减少。在距平板表面较远的地方，气体以与来流相同的速度运动。

假设在平板 AB 的法线 on 上任取一点 M ，用 v 表示该点的速度， v 的大小取决于平板法线矢量的坐标 n ，即 $v = v(n)$ 。在法线上另取一点 M' ，使其无限接近于 M 点，其间距离为 dn 。若用 v' 表示 M' 的速度，在一阶小量的精度范围内，有

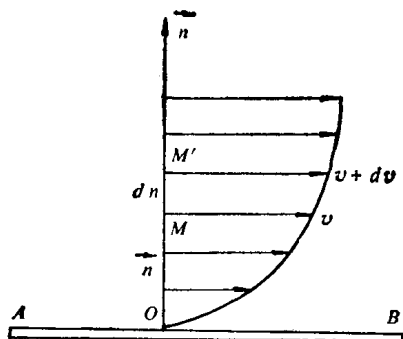


图 1-2 粘性气体沿平板的流动

$$v' = v(n + dn) = v(n) + \frac{\partial v}{\partial n} dn$$

由该式看到， M 点与 M' 点的速度之差为 $\frac{\partial v}{\partial n} dn$ ，这是气体层间的相对速度、微商 $\frac{\partial v}{\partial n}$ 称为法向速度梯度。以 τ 表示单位面积上的摩擦力，牛顿实验所确定的粘性应力分析表达式为

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial n} \quad (1-5)$$

比例系数 μ 称为动力粘性系数，简称粘性系数。 μ 值是由实验测定出来的，它的大小与气体的性质及温度有关，压强对它的影响很小，可以略而不计。

从公式1-5中不难确定 μ 的单位。在工程单位制中

$$\mu = \left[\frac{\tau}{\frac{\partial u}{\partial n}} \right] = \left[\frac{\text{公斤/米}^2}{1/\text{秒}} \right] = \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \right]$$

在C.G.S. 制中， τ 的单位是达因/厘米²， $\frac{\partial v}{\partial n}$ 的单位是1/

秒，故 μ 的单位是达因·秒/厘米²。此单位称为“泊”。

$$1\text{泊}=1\text{达因}\cdot\text{秒}/\text{厘米}^2 \quad (1-6)$$

因为1公斤(力)=1000克(力)=1000×98达因,故工程单位制与C.G.S.制的 μ 值可用下列公式换算:

$$1\text{泊}=\frac{1}{98.1}\text{公斤}\cdot\text{秒}/\text{米}^2=0.1019\text{公斤}\cdot\text{秒}/\text{米}^2 \quad (1-7)$$

$$1\text{公斤}\cdot\text{秒}/\text{米}^2=98.1\text{泊}$$

因为泊的单位有时太大,应用不便,故取 $\frac{1}{100}$ 泊叫“厘泊”。

$$1\text{泊}=100\text{厘泊} \quad (1-8)$$

粘性系数 μ 与气体密度 ρ 之比叫做运动粘性系数 ν ,即

$$\nu=\frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

在工程单位制中 ν 的单位为米²/秒,在C.G.S.制中, ν 的单位为厘米²/秒,我们称此单位为“斯”。

工程单位制与C.G.S.制中的 ν 值可用下面公式换算:

$$1\text{米}^2/\text{秒}=10000\text{厘米}^2/\text{秒}=10000\text{斯} \quad (1-10)$$

因为“斯”的单位有时也太大,应用不方便,故取 $\frac{1}{100}$ 斯叫做“厘斯”。

$$1\text{斯}=100\text{厘斯} \quad (1-11)$$

运动粘性系数,没有特殊的意义。只是因为气体力学中,粘性系数 μ 与密度之比经常出现,因而采用 ν 这一符号来代替 $\frac{\mu}{\rho}$ 。之所以称它为运动粘性系数,是因为在其单位中,只有运动学的量而无动力学的量的缘故。

当温度 $t=15^\circ\text{C}$ 时,空气粘性系数的数值为

$$\mu=1.82\times 10^{-6}\text{公斤}\cdot\text{秒}/\text{米}^2$$

$$\nu=1.45\times 10^{-6}\text{米}^2/\text{秒}$$

图1-3中给出了几种常见的气体的粘性系数随温度变化的曲线。从图中可以看出,气体的粘性系数是随着温度的增加而增加的。

空气的粘性系数随着温度的变化规律可以近似地用下面公式来表示

$$\mu = 1.745 \times 10^{-6} + 5.03 \times 10^{-9} t^{\circ}\text{C} \quad \text{公斤} \cdot \text{米} / \text{秒}^2 \quad (1-12)$$

例：两平行平板相距 0.3 厘米，中间充满某种气体，下板静止，上板以 1.5 米/秒的速度匀速运动。为保持上板运动，需剪切应力为 0.003 公斤/米²，求两平板之间气体的粘性系数

解：由公式 1-5 得到

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\tau}{\frac{\partial u}{\partial n}} = \frac{0.003 \text{ 公斤} / \text{米}^2}{\frac{1.5 \text{ 米} / \text{秒}}{0.3 \text{ 厘米}}} = 0.00006 \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \\ &= 0.00006 \times 9.81 \times 100 = 0.05886 \text{ 厘泊} \end{aligned}$$

由于气体的粘性较小，当流动速度不大时，所产生的粘性应力比起其他类型的力，如惯性力来，是很小的，可以忽略不计。

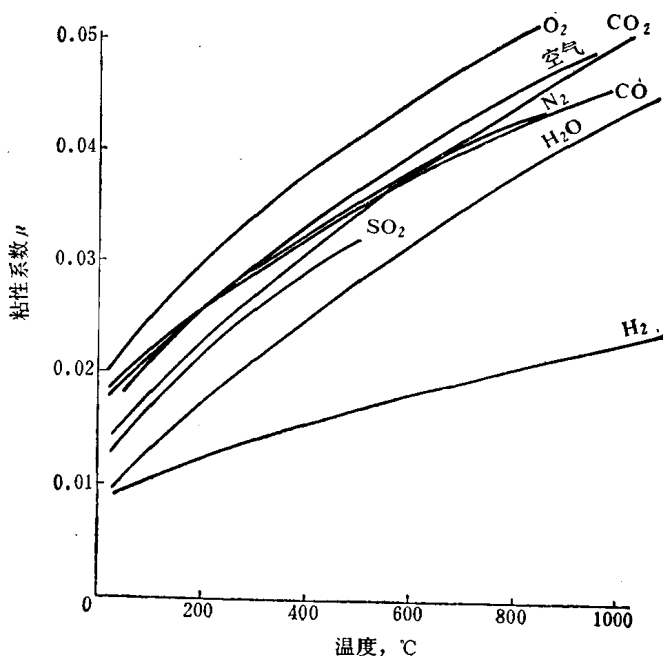


图 1-3 在大气压下，几种气体的粘性系数随温度的变化关系

此时，我们可以近似地把气流看作是无粘性的。称无粘性的气体为理想气体。相应地把具有粘性的气体称为粘性气体。这只是人为地划分。理想气体是一个抽象的、实际不存在的模型。

从微观上看，粘性是由于分子不规律运动引起的动量运输的宏观表现。

三、运动及分类

1. 轨迹和流线

轨迹是气体质点在空间运动时所描绘出来的曲线，即质点走过的路程。它是同一气体质点运动规律的几何表示。流线是一条这样的曲线，对于某一固定时刻而言，处于曲线上任何一点的气体质点的运动速度方向和曲线在该点的切线方向重合。所以流线是同一时刻，不同气体质点所组成的曲线。

2. 定常运动与不定常运动

凡流动诸物理特征量如速度、密度、压力、温度等，随着时间的变化而改变的运动称为不定常运动。反之，这些物理量若不随时间而变化，则称为定常运动。定常运动时，任何物理量对时间的偏微商为零，即 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ 。

3. 一维、二维和三维运动

气体运动的空间以直角坐标描述时，由长、宽、高三个方向构成，几何上称为三维空间。因此，空间中任何一个点都是由三个坐标分量 x 、 y 、 z 来表示。如果气体运动时，其物理特征量都是 x 、 y 、 z 的函数，则称此运动为三维运动。依此类推，气体运动时，所有物理量只依赖一个或两个空间坐标的运动，分别称为一维运动和二维运动。二维运动又叫作平面运动。

假如气体的空间运动是相对于某一轴对称，例如 x 轴，则这种运动称为轴对称运动。圆型喷管和扩压器中的流动都是轴对称流动。

4. 无旋运动与有旋运动

如果气体运动是均匀平顺的，没有旋涡存在，即对于气流速

度的三个分量 u, v, w 对坐标 x, y, z 的偏微商存在如下关系：

$$\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

也就是在整个流场中旋度为零，即 $\text{rot} \vec{V} = 0$ 。这种运动称为无旋运动，反之称有旋运动。

5. 层流与湍流

气体流动时有两种不同的状态，一种是流动平顺、规则，相邻两层间的流体质点互不混杂。这种流动称层流，如图 1-4 所示。另一种是流动杂乱无章，称湍流流动。如图 1-5 所示。

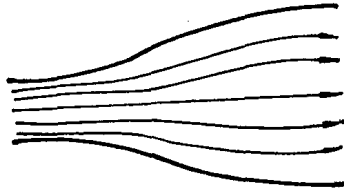


图 1-4 层流流动

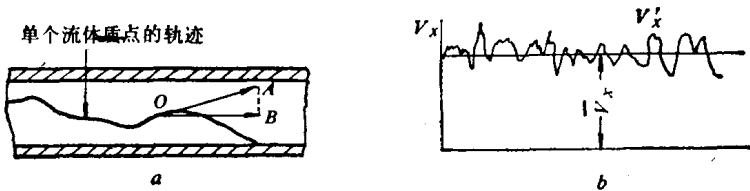


图 1-5 湍流流动

四、气体中的作用力

处在静止或运动中的气体所受到的作用力，通常可分为表面力和质量力两类。

1. 表面力

我们设想从气体中任意取出以封闭表面 S 所包围的某一体积 V ，如图1-6所示。由于外围气体或固体对体积 V 作用的结果，沿其表面 S 上，将以某一定方式分布着切向应力（假如是粘性气

体)和法向应力。这些沿表面 S 分布的力统称为表面力(简称面力)。压力、固体作用于气体上的摩擦力等都是表面力。

气体中表面力的分布密度是这样确定的,在 S 上取一点 M ,过 M 点作面积元素 ΔS ,设 ΔS 的法线方向为 $\vec{n}$, $\vec{n}$ 方向的

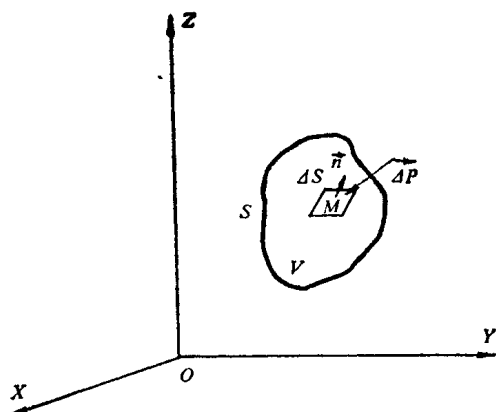


图 1-6 说明气体中表面力用图

气体或固体作用在 ΔS 上的面力为 ΔP ,作 $\frac{\Delta P}{\Delta S}$,令 ΔS 向 M 点收缩,得极限

$$P_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1-13)$$

若此极限存在,则它代表 M 点上,以 $\vec{n}$ 为法线方向的单位面积上所受到的面力。以 P_n 表示,下标 n 表示作用面的法线方向。 P_n 称为面力在 S 面上的分布密度,或称应力。有了 P_n 后, dS 面上的面力是

$$P_n dS$$

作用在有限面积 S 上的面力则是

$$\int_S P_n dS$$

显然面力是和面积成正比的。若作用面是面积元素 dS ,而面力 P_n 有限,则作用在 dS 面上的面力是二阶小量。

由于过一点 M 可以作无数个不同方向的表面,作用在这些不同表面上的面力一般来说是互不相等的。因此要描述一点的应力需要知道所有通过 M 点的面上所受的面力。换言之, P_n 是矢径