

教育部高等院校材料科学与工程教学指导委员会推荐教材

钢铁冶金实验

GANGTIE YEJIN SHIYAN

周国凡 薛正良 主编

1
KD00648865



中南大学出版社
WWW.CSUPRESS.COM.CN

高等学校材料科学与工程教学指导委员会推荐教材

钢铁冶金实验

GANGTIE YEJIN SHIYAN

周国凡 薛正良 主编



中南大学出版社
WWW.CSUPRESS.COM.CN

图书在版编目(CIP)数据

钢铁冶金实验/周国凡,薛正良主编. —长沙:中南大学出版社,2008

ISBN 978-7-81105-732-4

I. 钢... II. 薛... III. ①炼钢-实验-高等学校-教材 ②炼铁-实验-高等学校-教材 IV. TF4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 100657 号

钢铁冶金实验

周国凡 薛正良 主编

☐责任编辑 刘 辉

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 长沙瑞和印务有限公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 7 ☐字数 170 千字

☐版 次 2008 年 7 月第 1 版 ☐2008 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-81105-732-4

☐定 价 18.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

为了提高实践教学在本科生培养中的地位,在冶金工程专业的钢铁冶金模块中开设了“钢铁冶金实验”课程,本教材正是为该实验课程而编写。

对冶金工程专业本科生开设钢铁冶金及相关实验技术的课程,旨在使学生能更好地熟悉和掌握钢铁冶金的相关试验方法和实验技能。通过专业实验操作,培养学生的实验动手能力,锻炼学生的科学思维方法,同时增强对所学理论知识的理解,提高学生将来在本专业领域的适应能力。

全书由武汉科技大学冶金工程系周国凡、薛正良主编。参加本教材编写的人员有:杨先觉(第1章)、周国凡(第2章2.2、2.3、2.4节,第3章3.1、3.2、3.3、3.4、3.5节,第4章)、陈崇峰(第2章2.1,第3章3.8、3.10、3.11、3.12节)、邱玲慧(第3章3.13、3.14节)、杨福(第4章3.6、3.7节)、薛正良(第3章3.9节)。全书完稿后,由薛正良教授对本书进行了统编和审查。

本书既可作为高等学校冶金工程专业本科生实验教学教材,也可从事钢铁生产及科研的相关工程技术人员提供参考。由于编者的水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008年6月

目 录

第1章 传输原理实验	(1)
1.1 流体流速和流量的测量方法及毕托管的校正	(1)
1.2 流体能量的转换——柏努利方程的应用	(8)
1.3 气体燃料发热量的测定	(11)
1.4 固体燃料发热量的测定	(15)
1.5 对流传热实验	(18)
1.6 法向辐射率测量实验	(23)
第2章 冶金原理实验	(26)
2.1 热电偶检定实验	(26)
2.2 冶金熔体熔化温度测定	(28)
2.3 熔体粘度的测定实验	(31)
2.4 熔体表面张力测定	(36)
第3章 钢铁冶金实验	(40)
3.1 冶金粉末性能测定	(40)
3.2 铁矿石烧结实验	(49)
3.3 铁矿石低温还原粉化指数测定	(55)
3.4 铁矿石还原性的测定实验	(57)
3.5 铁矿石软熔—滴落性能测定	(60)
3.6 煤的可磨性指数测定	(64)
3.7 煤粉的爆炸性测定	(66)
3.8 中频感应炉冶炼和浇铸实验	(67)
3.9 真空感应炉熔炼实验	(69)
3.10 钢水连铸电磁搅拌模拟实验	(74)
3.11 钢的硫印、酸洗实验	(79)
3.12 钢中的氧和氮含量的测定	(85)
3.13 钢中夹杂物的金相鉴定法	(87)
3.14 转炉水力学模型实验	(91)

第4章 实验数据处理	(95)
4.1 有效数字及其运算规则	(95)
4.2 可疑值判别与粗差剔除	(96)
4.3 实验数据的列表与图示	(100)
参考文献	(103)

第一章 传输原理实验

1.1 流体流速和流量的测量方法及毕托管的校正

1.1.1 实验目的

(1) 熟悉大气压力计、多管式压力计、毕托管、热球式风速计的工作原理、结构和使用方法。

(2) 学会使用毕托管和热球风速计来测量矩形断面上的流速并计算流量。

(3) 掌握毕托管的校正方法，测定毕托管的校正系数。

1.1.2 实验原理

(1) 流体流动时的能量，包括静压能、动压能和位压能

对于不可压缩的理想流体，这三种能量之和为常数；当水平流动时，流体的位压能保持不变，则其静压能与动压能之和为常数，称为全压能，即：

$$P_{\text{静}} + \frac{v^2}{2} \rho = P_{\text{全}} \quad (1.1.1)$$

(静压能) (动压能) (全压能)

(2) 毕托管测量流速

据式(1.1.1)，通过测得流体的 $P_{\text{全}}$ 和 $P_{\text{静}}$ 来算出速度 $v(m/s)$ 的大小，式(1.1.1)亦可写为：

$$\frac{v^2}{2} \rho = P_{\text{全}} - P_{\text{静}} \quad (1.1.2)$$

或：

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})}{\rho}} \quad (1.1.3)$$

式中： $P_{\text{全}}$ ——全压能，即全压，Pa；

$P_{\text{静}}$ ——静压能，即静压力，Pa；

ρ ——流体的密度， kg/m^3 。

本实验采用毕托管测量 $P_{\text{全}}$ 和 $P_{\text{静}}$ ，其装置由分别测全压力和测静压力的两个同心管所构成，中心管头部贯通，接受全压力；外层套管头部封闭，而侧面开有多个小孔，接受流体静压力，使用时毕托管管头必须迎向气流正方向，接受气流的全压力和静压力。全压管和静压管分别接到压力计上，测得全压力和静压力。其测量装置如图 1.1.1 所示。

毕托管测得的为某点的速度，为了确定某截面上的平均速度，必须将该截面按面积均分若干份，测定各份的速度然后再求其平均值：

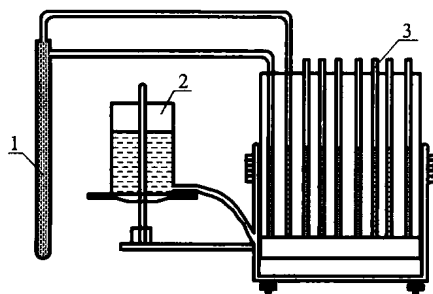


图 1.1.1 毕托管测流速示意图

1—毕托管； 2—水位调节缸； 3—多管压力计

$$v_{\text{均}} = \frac{\sum_{i=1}^{16} A_i v_i}{a \times b} = \frac{1}{n} (v_1 + v_2 + \cdots + v_{16}) \quad (1.1.4)$$

本实验试验段为矩形截面，其测点位置如图 1.1.2 所示。

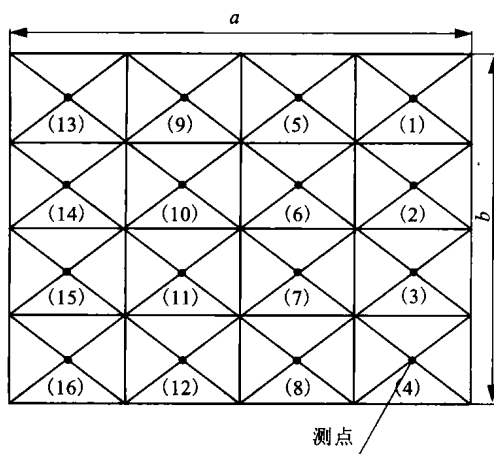


图 1.1.2 平面均分测点示意图

先测定 16 个测点的速度，再求平均流速，最后根据截面积（本实验 $a = 77\text{mm}$, $b = 50\text{mm}$ ） A 的大小求得流量 Q ：

$$Q = v_{\text{均}} \times A \quad (1.1.5)$$

式中： Q ——气体流量， m^3/s ；

A ——气体流过的截面积， m^2 。

考虑流体的压缩性时，可按下列式计算：

$$P_{\text{全}} - P_{\text{静}} = \frac{v^2}{2\rho} \left[1 + \frac{M_a^2}{4} + \frac{2-k}{24} M_a^4 + \frac{(2-k)(3-2k)}{192} M_a^6 + \cdots \right] \quad (1.1.6)$$

式中： M_a ——马赫数；

k ——气体的绝热指数， $k = c_p/c_v$ ；

c_p ——定压比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

c_v ——定容比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

由于毕托管的几何形状及制造上工艺水平不同,使测得的动压力($P_{\text{全}} - P_{\text{静}}$)并非真正的动压力。严格来说,测得的全压力只是驻点附近的平均全压力,而不是驻点的全压力。同时静压力测孔附近的流体压力要受到毕托管头部形状的影响,因此很难测得真实的静压力,故必须乘上校正系数 ζ ,其关系式如下:

$$(P_{\text{全}} - P_{\text{静}}) = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (1.1.7)$$

式中: ζ ——毕托管校正系数,一般大于1。

对每个毕托管,一般都必须校正后确定其校正系数值才能较准确地使用。在实验中利用已经校正过,即校正系数 ζ 已知的标准毕托管,通过比较法来校正未知 $\zeta_{\text{未}}$ 的实验用毕托管。校正时,分别将两个毕托管置于稳定流场中流速相同的同一点,通过对测量值的比较,计算出被校正毕托管的 ζ 值。根据:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})_{\text{未}} \zeta_{\text{未}}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})_{\text{已}} \zeta_{\text{已}}}{\rho}} \quad (1.1.8)$$

$$\text{则:} \quad \zeta_{\text{未}} = \frac{(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})_{\text{已}} \zeta_{\text{已}}}{(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})_{\text{未}}} \quad (1.1.9)$$

式中: $(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})_{\text{未}}$ ——用未知毕托管测得的动压力;

$(P_{\text{全}} - P_{\text{静}})_{\text{已}}$ ——用已知毕托管测得的动压力。

在不同的流速情况下,可有不同的 $\zeta_{\text{未}}$ 值,以速度 v 与 $\zeta_{\text{未}}$ 之间的关系可以画出校正曲线,为了使用方便,亦可求其平均值来应用于各流速测量。

(3) 热球式风速仪测量原理、构造及使用

热球式风速仪由热球式测量杆和测量仪器两部分构成,测量杆头部有一个直径约0.6mm的玻璃球,球内绕有加热用的镍铬丝和两个串联的热电偶,热电偶的冷端连接在磷铜质的支柱上,直接暴露在空气中,其温度与空气温度一致。当一定大小的电流通过镍铬丝加热后,玻璃球温度升高。由于受到温度较低的被测气流流过而产生热量传输,其温度发生改变,流速小时升温高,流速大时升温低。热球式风速仪就是根据这个原理来测量流体的速度。其数值大小可直接由电表(转换为速度值)上读得。其测量系统如图1.1.3所示。

在使用时先调出电表的机械零点,然后将“校正开关”由断位置①拔至满刻度位置②,调整“满刻度调节”旋钮,使电表指针处于满刻度的位置,这时通过热球的电流是一定的。再将“校正开关”拨至“零位置”③,调整“粗调”和“细调”旋钮,使电表指针处于零位置,这时没有气流经过热球为最高温度点,也就是气流速度为零的情况。最后轻轻拉动螺塞,使测杆探头露出,放在被测气流中进行流速测定,测定时必须使测头上的红点面对气流方向,电表提示的读数即为平衡的温度,即可显示气流的速度,然后查阅所给的校正曲线,得到修正后的气流速度。

1.1.3 实验设备及步骤(以下实验不再一一列举)

(1) 实验设备

实验台台架;	1 台
含 SG 鼓风机(功率 1.1kW)	1 台
多管压力计	1 台

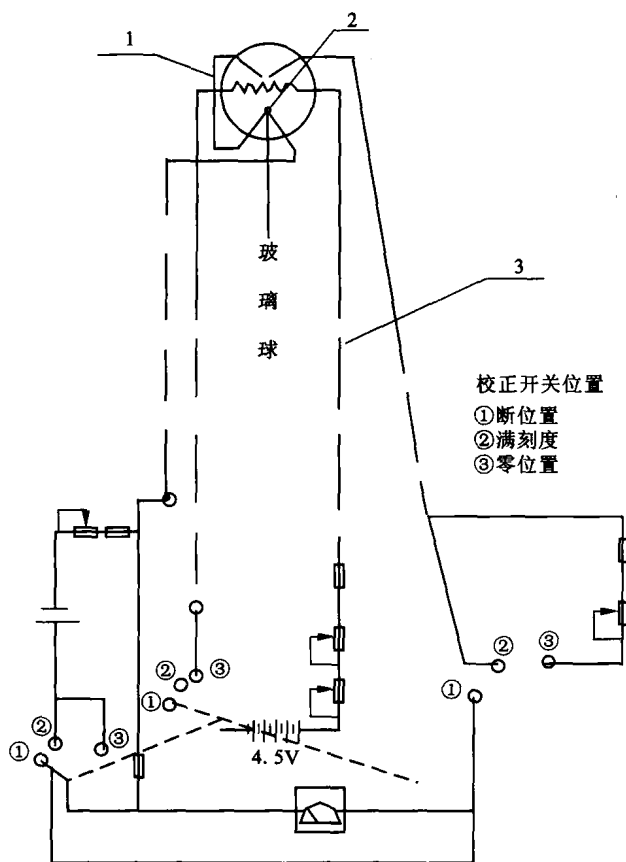


图 1.1.3 热球式风速仪示意图

1—热电偶； 2—玻璃球； 3—镍铬丝

有机玻璃试验段(包括压板一块)

其中:

- | | |
|--------------|-----|
| 1) 伯努利方程试验装置 | 1 件 |
| 2) 动量平衡试验装置 | 1 件 |
| 3) 弯管试验装置 | 1 件 |
| 4) 附面层试验装置 | 1 件 |
| 5) 三维精密坐标架 | 1 件 |
| 6) 不锈钢毕托管 | 1 组 |
| 7) 双连鼓风机 | 1 个 |

(2) 实验步骤

- 1) 安装好选用的试验段, 安装在试验台上, 出口横截面如图 1.1.4 所示;
- 2) 开启风机, 将风机闸板定在合适位置;
- 3) 用多管压力计分别测量全压力和静压力。

在使用时首先调整其为水平位置, 即利用底盘上的调整螺丝, 观察水准泡的位置, 使其处于正中位置。接上引压管, 即可测量压力的大小, 待其稳定读数后, 调整水缸的高度, 使

通风流的液柱中的水位处于某个合适的位置，这时即可读数。如果因测得的读数较小，不易精确读数时，可将多管压力计转动倾斜一定角度，则可读得较大读数。但实际压力读数应乘以正弦倾斜角。

4)将出口截面分成 16 个等分小格。在风机为同一流量情况下，分别用毕托管和热球式风速计测定每一小格中心处的风速。

5)在出口截面的中心处，在不同的流量情况下，分别用标准毕托管和被校正毕托管测得气流同一点的全压力和静压力。

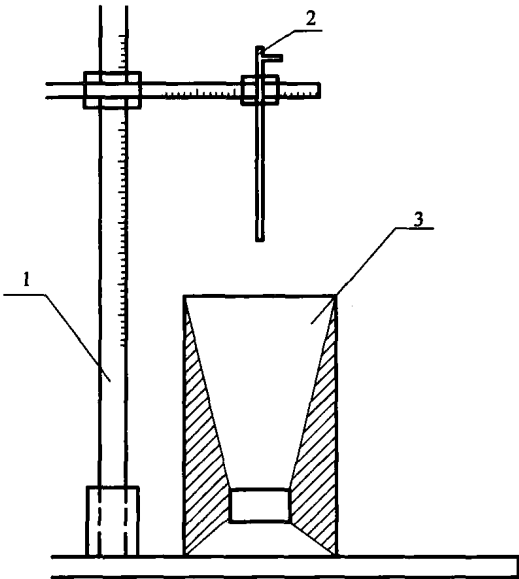


图 1.1.4 测速实验段

1—坐标架； 2—毕托管； 3—有机玻璃实验段

1.1.4 实验数据及整理

表 1.1.1 三个不同流量下 16 个分格中心处测得气流数据

测量点	I			II			III		
	用热球风速计测得 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得全压力 /(mm H ₂ O)	用毕托管测得静压力 /(mm H ₂ O)	用热球风速计测得 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得全压力 /(mm H ₂ O)	用毕托管测得静压力 /(mm H ₂ O)	用热球风速计测得 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得全压力 /(mm H ₂ O)	用毕托管测得静压力 /(mm H ₂ O)
1									
2									
3									
4									
5									
6									

续上表

测量点	I			II			III		
	用热球风速计测得 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得全压力 /(mm H ₂ O)	用毕托管测得静压力 /(mm H ₂ O)	用热球风速计测得 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得全压力 /(mm H ₂ O)	用毕托管测得静压力 /(mm H ₂ O)	用热球风速计测得 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得全压力 /(mm H ₂ O)	用毕托管测得静压力 /(mm H ₂ O)
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									

注：1mm H₂O = 9.81Pa。

(1)实验数据

大气温度 $t =$ 大气压力 $P_{\text{大气}} =$

- 1) 3 个不同流量的情况下，16 个分格中心处测得气流数据填入表 1. 1. 1；
- 2) 10 个不同流量情况下，在中心处测得气流数据见表 1. 1. 2。

表 1. 1. 2 10 个不同流量情况下，在中心处测得气流数据

流量		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标准毕托管测得 (mm H ₂ O)	全压力										
	静压力										
被校正毕托管测得 (mm H ₂ O)	全压力										
	静压力										

(2)数据整理

1)流体性质计算

已知： $P_{\text{全}}$ (Pa)
 $P_{\text{静}}$ (Pa)

$$\rho = \frac{P_{\text{绝}}}{RT} = \frac{P_{\text{大气}} + P_{\text{静}}}{287.2(t + 273)}$$

(1. 1. 10)

2)利用下式求得各点速度：

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{全} - P_{静})\zeta}{\rho}}$$

(1.1.11)

式中： ζ ——毕托管校正系数；
 $(P_{全} - P_{静})$ ——测得的动压力。

同时根据测得的热球式风速计读数，查校正曲线，求得真正的风速。
将数据整理结果列入表 1.1.3。

表 1.1.3 用热球风速计和毕托管测得的风速/(M·S⁻¹)

测量点	I		II		III	
	用热球风速计测得风速 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得风速 /(M·s ⁻¹)	用热球风速计测得风速 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得风速 /(M·s ⁻¹)	用热球风速计测得风速 /(M·s ⁻¹)	用毕托管测得风速 /(M·s ⁻¹)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
平均						

3)根据已知毕托管的 ζ 值和测得的压力 $(P_{全} - P_{静})_{已}$ ， $(P_{全} - P_{静})_{未}$ ，用下式求得被校正毕托管的 $\zeta_{未}$ 值，并且求其平均值。

$$\zeta_{未} = \frac{(P_{全} - P_{静})_{已} \zeta_{已}}{(P_{全} - P_{静})_{未}}$$

(1.1.12)

将计算结果列入表 1.1.4。

表 1.1.4 流量测量结果

次数 测量值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
标准毕托管测量值 /(mm H ₂ O)											
被校正毕托管测量值 /(mm H ₂ O)											
$\zeta_{未}$											

1.2 流体能量的转换——柏努利方程的应用

1.2.1 实验目的

- (1) 加深对“无粘性”、不可压缩流体沿管道做稳定流动时，其总能量(即动压能、静压能和位压能之和)保持不变——柏努利方程的理解；
- (2) 了解实际流体由于粘性的存在和附面层的产生，在运用柏努利方程式进行计算时所造成的偏差。

1.2.2 实验原理

理想流体在管道内做稳定流动时，遵守能量守恒定律——柏努利方程：

$$\rho g Z_1 + P_1 + \frac{v_1^2}{2} \rho = \rho g Z_2 + P_2 + \frac{v_2^2}{2} \rho = \text{常数}$$

(1.2.1)

或者：

$$\rho g Z + P_{静} + \frac{v^2}{2} \rho = P_{全}$$

(1.2.2)

考虑到气体的密度很小，在高度变化不大的情况下，略去位压能的影响：

$$P_{静} + \frac{v^2}{2} \rho = P_{全}$$

(1.2.3)

即：

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{全} - P_{静})}{\rho}}$$

(1.2.4)

实际流体都具有粘性，在流动过程中有能量损失，其能量平衡关系应为：

$$\rho g Z_1 + P_{静1} + \frac{v_1^2}{2} \rho = \rho g Z_2 + P_{静2} + \frac{v_2^2}{2} \rho + h_{失}$$

(1.2.5)

或：

$$P_{全1} = P_{全2} + h_{失}$$

(1.2.6)

即沿途有能量损失。截面 2 处与截面 1 处的总压能不再相等。

本实验通过测量一个截面逐渐收缩的锥体、截面不变的喉管、截面逐渐扩大的锥体的试验段，其动压力和静压力因截面不同而变化及相互转换的关系，深入理解能量转换规律。

为了方便清楚地表明其转换关系，选取在喉管处，即最小截面处的流速 v_i 为标准。这时

$$v_i = \sqrt{\frac{2(P_{\text{全}i} - P_{\text{静}i})}{\rho}} \quad (1.2.7)$$

式中： $P_{\text{静}i}$ ——喉管处的静压。

得到：

$$\frac{v}{v_i} = \sqrt{\frac{P_{\text{全}} - P_{\text{静}}}{P_{\text{全}i} - P_{\text{静}i}}} \quad (1.2.8)$$

式中： $P_{\text{静}}$ ——某一截面上的静压。

如果将流体看成是一维管流，即认为在管道内任一横截面上的流速都是均匀的，同时管道的横截面是变化的，根据连续性方程：

$$Q = v \cdot A = v_i \cdot A_i \quad (1.2.9)$$

由于实验段的深度是一定的，仅是其宽度变化，所以横截面之比即为宽度之比：

$$\frac{A_i}{A} = \frac{B_i}{B} \quad (1.2.10)$$

$$\text{即：} \quad \frac{v}{v_i} = \frac{B_i}{B} \quad (1.2.11)$$

式中： B_i ——喉管处的截面宽度，mm。

实验时将测得结果代入(1.2.8)式与(1.2.11)式，对计算结果相比较，即可验证柏努利方程能量转换的关系。

1.2.3 实验设备

试验装置如图 1.2.1 所示，安装在实验台上。

高度 x 与宽度 B 之关系为：

下锥体：

$$B = B_3 - (B_3 - B_2) \frac{x}{H_3} \quad (1.2.12)$$

试验段尺寸如下：

上口宽度	$B_1 = 76\text{mm}$	上锥体高度	$H_1 = 194\text{mm}$
------	---------------------	-------	----------------------

喉管宽度	$B_2 = 44\text{mm}$	喉管高度	$H_2 = 44\text{mm}$
------	---------------------	------	---------------------

下口宽度	$B_3 = 76\text{mm}$	下锥体高度	$H_3 = 70\text{mm}$
------	---------------------	-------	---------------------

喉管：	$B = B_2$
-----	-----------

上锥体：

$$B = B_2 + (B_1 - B_2) \frac{x - (H_2 + H_3)}{H_1} \quad (1.2.13)$$

毕托管全压力测点与静压力测定点的距离为 40mm。

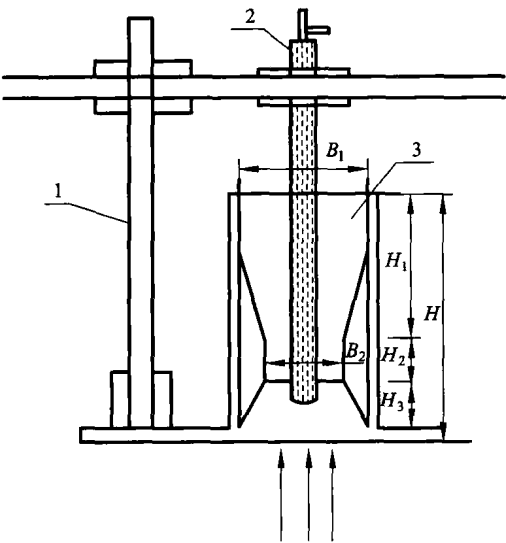


图 1.2.1 能量转换实验示意图

1—坐标架； 2—毕托管； 3—有机玻璃实验段

1.2.4 实验数据

大气温度 = 大气压力 $P_{\text{大气}}$ =
毕托管校正系数 ζ =
多管压力计水柱起点位置 P_0 =

表 1.2.1 不同截面的动压、静压和全压

X /mm	$P_{\text{全}}$ /mmH ₂ O	$P_{\text{静}}$ /mmH ₂ O	$P_{\text{动}} = P_{\text{全}} - P_{\text{静}}$ /mmH ₂ O	X /mm	$P_{\text{全}}$ /mmH ₂ O	$P_{\text{静}}$ /mmH ₂ O	$P_{\text{动}} = P_{\text{全}} - P_{\text{静}}$ /mmH ₂ O
0				160			
20				180			
40				200			
60				220			
80				240			
100				260			
120				280			
140				300			

注：1mm H₂O = 9.81Pa。

1.2.5 数据处理

$$\rho = \frac{P_{\text{绝}}}{RT} = \frac{P_{\text{静}} + P_{\text{大气}}}{287.2(t + 273)}$$

(1.2.14)

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{全} - P_{静})\zeta}{\rho}}$$

(1.2.15)

式中： ζ ——毕托管校正系数(一般 $\zeta \geq 1$)。将上列数据整理成表 1.2.2，并以实验段(画出形状) $P_{全}$ 、 $P_{静}$ 、 $(\frac{v}{v_{喉}})_{计}$ 为横坐标，以 $(\frac{v}{v_{喉}})_{测}$ 为纵坐标画出压力及速度比分布曲线图。

表 1.2.2 作图的各种变量

X /mm	$P_{静}$ /mmH ₂ O	$P_{全}$ /mmH ₂ O	$P_{动}$ /mmH ₂ O	$B_{喉}/B$	v /(M·s ⁻¹)	$(\frac{v}{v_{喉}})_{喉}$	$(\frac{v}{v_{测}})_{计}$
0							
20							
40							
60							
80							
100							
120							
140							
160							
180							
200							
220							
240							
260							
280							
300							

注：1mm H₂O = 9.81Pa。

1.3 气体燃料发热量的测定

1.3.1 实验目的

- (1)掌握气体燃料(或沸点低于 250℃ 的轻质挥发性液体燃料)发热量的测定方法。
- (2)了解容克式热量计的构造、工作原理和操作。

1.3.2 实验原理

每一标准立方米的气体燃料(或挥发性液体燃料)完全燃烧放出的热量称为该燃料的标准发热量。其测定方法很多。本实验采用最常用的容克式热量计，此法测定的基本原理是：