

冶金科学丛书

加热炉节能技术

中国金属学会

加热炉节能技术

张永安 杨宗山 主编

中国金属学会

前 言

本书是为了适应节能工作的需要，根据冶金工业部提出的“对全体职工开展节能工作基础知识教育，组织节能技术培训”的要求，在中国金属学会的大力支持下，针对从事加热炉、均热炉热工操作工人和热工管理人员所需要的节能基本知识为主要内容而编写的。

全书分六篇。在绪论中简介了能源资源的基本情况；在一、二、三篇讲述了均热炉、加热炉的热工基础知识；第四篇为钢的加热工艺；第五、六篇叙述了均热炉和加热炉的结构特点，合理热工制度及节能操作技术。

参加本书编写工作的有：绪言，张永安；第一篇，盛中权，张永安，高太荫，马恩甲；第二篇，杨宗山；第三篇，高太荫；第四、五篇，边华；第六篇，张济廷；（以上张济廷同志为天津轧钢三厂工程师，其余均为东北工学院热能工程系教师）全书由张永安付教授和杨宗山付教授主编。

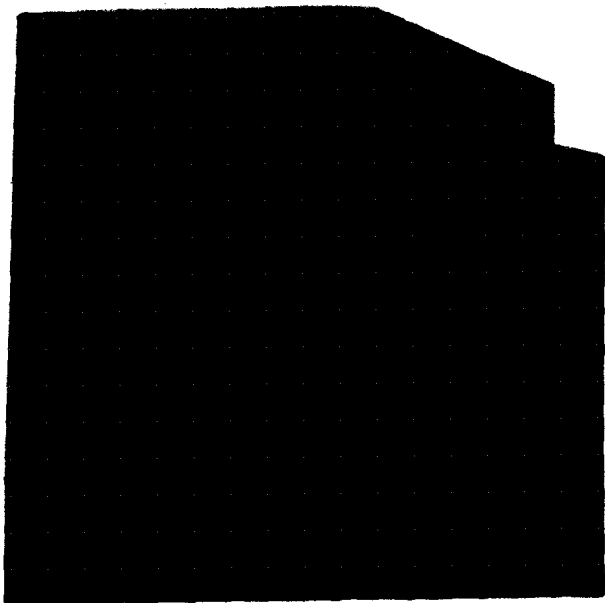
本书可作为均热炉、加热炉操作工人和热工管理人员的培训教材。全书可讲授60学时。亦可作为热工技术人员的参考。

本书在编写过程中，特别是本书初稿在作为教材试用两次后的修改过程中，吸收了学员的意见，并经东北工学院热能系的池桂兴付教授、郭伯伟教授、陈世海付教授、马德普老师、还有冶金部能源办公室赵振国工程师等在审稿时，提供了许多宝贵意见，在此表示衷心地致谢。

首钢设计院的刘恩思、苗为人二同志参加了本书的编辑工作。由于编者水平有限，时间仓促，在选材上和内容的深度广度上难免有不妥之处，敬希读者提出意见。

一九八六年十月

编者



11/16/02

目 录

前言

绪论

- §1 能源概述及能源与四化建设的关系····· (1)
- §2 冶金能源、能耗指标、节能任务····· (2)

第一篇 热工基础知识

第一章 气体及气体流动

- §1 气体流动与节能的关系····· (5)
- §2 关于气体的物理量····· (6)
- §3 加热炉的冒火与吸风····· (9)
- §4 气体流动的两个常用方程式····· (13)
- §5 阻力损失的概念和计算····· (16)
- §6 烟囱····· (18)

复习题

第二章 燃料及其燃烧

- §1 燃料概述····· (21)
- §2 燃烧静力学计算····· (27)
- §3 燃料的燃烧····· (31)

复习题

第三章 传热原理

- §1 概述····· (39)
- §2 传导传热····· (40)
- §3 对流传热····· (43)
- §4 辐射传热····· (44)
- §5 综合传热····· (50)

复习题

第四章 耐火材料

- §1 概述····· (53)
- §2 耐火材料性质····· (53)
- §3 块状耐火材料····· (55)
- §4 不定形耐火材料····· (57)
- §5 轻质耐火材料····· (58)

复习题

第二篇 炉子生产率和燃料消耗

第一章 炉子热平衡和燃料消耗

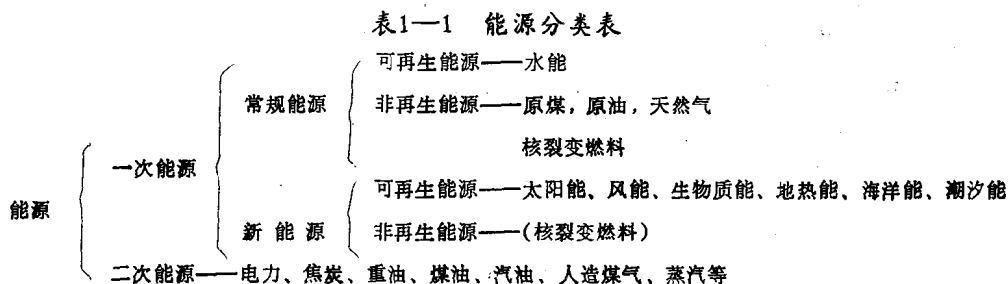
§1 基本概念	(62)
§2 区域热平衡和全炉热平衡	(62)
§3 热平衡的编制	(64)
§4 炉子燃料用量和燃耗指标	(65)
第二章 炉子生产率及影响因素	
§1 基本概念	(67)
§2 影响炉子生产率的热工因素	(67)
第三章 火焰炉热工特性及燃料节约	
§1 火焰炉热工特性	(71)
§2 节约燃料的途径	(73)
复习题	
第三篇 余热利用	
第一章 概述	
第二章 换热器	
§1 换热器工作原理	(81)
§2 金属换热器的材质	(82)
§3 各种金属换热器	(83)
§4 金属换热器的保护措施	(85)
§5 陶土换热器	(85)
§6 换热器计算原理	(86)
§7 换热器内传热过程的强化	(87)
第四篇 钢加热工艺	
第一章 钢的物理性质和机械性能	
§1 钢的分类简介	(89)
§2 钢的物理性质	(91)
§3 钢的机械性能	(92)
第二章 钢加热时的氧化、脱炭、过热与过烧	
§1 钢的氧化	(93)
§2 钢的脱炭	(95)
§3 钢的过热与过烧	(97)
第三章 钢的加热温度、加热速度和加热制度	
§1 钢的加热温度	(98)
§2 钢的加热速度	(99)
§3 钢的加热制度	(100)
第五篇 均热炉	
第一章 均热炉的构造及炉型	
§1 均热炉的主要组成部分	(102)
§2 均热炉的主要特点及基本要求	(103)
§3 均热炉的炉型	(103)

第二章 均热炉的热工制度	
§1 均热炉的温热制度	(108)
§2 均热炉的压力制度	(111)
§3 均热炉的出渣方式	(111)
第三章 均热炉的主要技术经济指标	
§1 均热炉日历作业率和有效作业率	(112)
§2 均热炉生产率	(112)
§3 均热炉单位热耗	(113)
§4 均热炉耐火材料消耗	(115)
第四章 均热炉节能方向及措施	
§1 改进工艺操作制度	(117)
§2 提高燃料利用率、减少热损失	(118)
第六篇 加热炉	
第一章 加热炉构造与节能	
§1 加热炉的类型	(121)
§2 推钢式连续加热炉的构造与节能	(126)
复习题	
第二章 加热炉操作与节能	
§1 炉子的干燥与烘烤	(136)
§2 装出炉操作	(140)
§3 加热操作	(142)
复习题	
第三章 维护、检修、管理与节能	
§1 加热炉的维护	(156)
§2 加热炉的检修	(157)
§3 组织管理与节能	(158)
复习题	

绪 论

§1 能源概述及能源与四化建设的关系

1. 能源是指能够提供能量的各种资源。其种类很多,形态各异,转换方式也各不相同。如各种固体燃料、液体燃料、气体燃料以及风能、水能、太阳能和地热能等。它们都能够通过不同方式提供能量,故均属能源。其分类见表1—1。



据资料介绍,现在世界的煤炭探明的经济可采储量约9000亿吨,如按1979年的世界开采量(37亿吨)计算,只能供再开采240多年。世界石油探明的总储量为1431亿吨,除已开采521亿吨外,按1979年世界年耗石油量30亿吨计算,只能再开采30多年。

这些数字表明,今后人类应一方面加紧研究再生能源的开发和利用;另一方面必须大力提高非再生能源的利用率,大力开发节能技术,尽量延长它的使用年限。否则人类社会的发展遇到严重问题。

2. 我国能源现状与四化建设的关系

1)、我国能源现状

我国是能源资源比较丰富的国家。煤的探明储量约为6000亿吨,居世界第三位,而且煤种全、分布广。石油可采储量为24亿吨,居世界第八位,目前年产量为1亿吨左右。天然气储量居世界第十六位。

我国水力资源尤为丰富,理论蕴藏量为6.8亿千瓦,约占世界水力资源蕴藏量的三分之一,居世界第一位。铀、钍和其他能源资源也比较丰富。

目前,我国能源年消费总量仅次于美国和苏联,居世界第三位。但由于我国人口众多,平均到每个人的消费量仅为0.7吨标准煤,相当于世界平均水平(2.3吨)的三分之一。比起一些工业发达国家(如美国为11.4,苏联为5.5吨)来就更低了。这种情况,在一定程度上表明,我国的国民经济发展水平与某些国家存在着较大的差距。当然,在比较能源消费量高低的同时,还要注意到能源的利用率。比如消耗单位能源能创造多少工农业产值,或每元工农业产值消耗多少标准煤。按1980年数据每吨标准煤的创造产值,美国为1100美元,日本为2500美元,印度也将近1000美元,我国仅为474美元。

再如，按每万元工农业产值计算，美国1975年为消耗5吨标准煤，日本为3吨，而我国1981年平均为消耗8吨标准煤，比日本高出1倍还多。以上说明，我国的能源现状是储量多、人均消费少，利用效率低，浪费严重。

此外，从能源结构看，也有我们的特点，我国是以煤为主，而工业发达国家是以石油为主。而煤在开采、运输、燃烧效率等方面都比石油差，而且污染严重，这当然也是能耗高的一个重要原因，需要设法解决。

2)、能源与四化建设

为了在本世纪末以前，实现工农业总产值翻两番的宏伟目标，关键之一是能源。各种预测表明，到本世纪末，我国能源的年供应量只能在1980年的基础上翻一番，即从6亿吨增加到12亿吨标准煤。就是说，要用翻一番的能源量创造出翻两番的产值来。也可以说，所需的能源需要一半靠增加开发，另一半要靠降低消耗提高利用效率来解决。

党中央提出，我国的能源方针是：开发与节约并重，近期把节约放在优先地位。这是从我国实际情况出发提出的完全正确的方针。在“工业卅条”中也明确指出：能源问题是一个带有战略性的问题。工业生产发展的快慢，在很大程度上看我们能源问题解决的怎么样。如果解决的好，就能加速国民经济的发展；反之，就会影响国民经济的发展，严重时将会干扰和破坏经济的发展。可见解决我国的能源问题对四化建设是极为重要的。

§2 冶金能源、能耗指标、节能任务

1. 冶金能源

我国冶金工业消耗的能源量，约占全国能耗总量的14%（日本为15%，西德9.4%，美国为4.5%）。可见提高冶金工业的能源利用率对于全国的能源平衡具有重大意义。

我国冶金能源的构成，见表2—1。表中还列出了美国、西德和日本的数据，以便对照。

表2—1 钢铁工业能源构成(%)

能源 \ 国别	中 国	美 国	西 德	日 本
煤 炭	50.7	60.0	55.8	56.4
重 油	9.1	7.0	20.7	19.9
天 然 气	2.1	17.0	8.2	—
电 力	18.1	16.0	15.3	23.7
合 计	100.0	100.0	100.0	100.0

由此可见，煤炭是我国钢铁工业的主要能源。此外重油和电力也占有一定比例，天然气比例很少。符合以煤为主的方针。

外国的情况是以各国资源和国际贸易状况决定的。

2. 能耗指标与节能任务

这里只介绍吨钢综合能耗、可比能耗、工序能耗及轧钢加热炉能耗等概念。

全国平均吨钢综合能耗是指全国钢铁企业统计期内所耗能源总量除以钢产量。同理，企

业吨钢综合能耗指某企业在统计期内耗能总量除以该企业的钢产量。即，

$$\text{吨钢综合能耗} = \frac{\text{总耗能量}}{\text{钢产量}} \left[\frac{\text{公斤标煤}^*}{\text{吨钢}} \right]$$

耗能总量中包括统计期内全部能源消耗量，包括煤、油、电、天然气、水、风、汽等。外销的应予扣除。计算时各种能源均需折算成标准煤重量。例如电力的折算，按平均水平，我国目前发一度电需要消耗0.407公斤标准煤，或

$$0.407 \times 7000 = 2849 \text{大卡} = 11914.24 \text{千焦耳}$$

式中的7000是标准煤的发热量。把算得的2849大卡称为“等价热量”。意思是生产1度电所需消耗的热能量。

其他动力能源的等价热量见表2—2。当然也可按实际消耗的能量进行折算。

表2—2 几种动力能源的等价热量

名 称	等价热量		等价标煤	
电 力	2849	千卡/度	0.407	公斤
新 鲜 水	1800	千卡/吨	0.257	公斤
循 环 水	1000	千卡/吨	0.143	公斤
软 化 水	3400	千卡/吨	0.486	公斤
除 氧 水	6800	千卡/吨	0.971	公斤
氧	1750	千卡/标米 ³	0.25	公斤
压 缩 空 气	280	千卡/标米 ³	0.04	公斤
鼓 风	210	千卡/标米 ³	0.03	公斤
蒸 汽	视压力、温度而定			

注：国家法定计量单位为焦耳，1kg标煤=7000×4.1819=29273千焦耳

钢产量是指统计期内生产的良锭量，良连铸坯量和钢水量之和，即

$$\text{钢产量} = \text{良锭量} + \text{良连铸坯量} + \text{良铸钢水量}$$

吨钢综合能耗可反映一个国家的钢铁生产能耗水平，但各国各企业之间由于具体情况不同，往往无法比较。为此，我国规定了“可比能耗”这一指标。

可比能耗的计算，钢产量仍以一吨合格钢为基准。耗能量中只计入某些规定工序的能耗和与一吨钢配套的所必须消耗的能量量。

我国规定，计算可比能耗只计入焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、铸锭、初轧、轧钢、燃气加工、厂内运输及能源亏损。其他如采矿、选矿、铁合金、耐火、石灰、铸管、轧辊、机修、洗煤等均不计入内。

这一指标基本上可用于各联合企业间的能耗对比，也可与国外同类的钢铁工业做大致的对比。

我国的吨钢能耗自1977年以来逐年有所下降，但就目前情况来看，与世界主要工业国家相比，仍是很落后的。对比情况见表2—3。

工序能耗是指各工序每吨产品所消耗的能量。单位：公斤标煤/吨产品。

虽然我国钢铁工业与外国的资源、设备条件有所不同，但仍有一定可比性。由表可见，我国的吨钢能耗与外国相比，一般高出一倍左右。再看一下我国部分用能设备的能量（热）

* 耗电量的单位也可用焦耳或千焦耳。

效率与工业发达国家的比较情况，见表2—4。

表2—3 我国与西方主要国家吨钢能耗比较 (吨标煤/吨钢)

年份 国别	1973	1976	1978	1981
日本	0.963	0.718	0.681	0.678
美国	0.912	0.945	0.894	1.076
西德	0.769	0.799	0.748	0.748 ^①
法国	0.834	0.851	0.819	—
英国	0.891	0.902	0.874	0.797 ^②
意大利	0.592	0.630	0.594	—
加拿大	0.723	0.728	0.738	—
中国 ^③	1.400	1.720	1.400	1.184

①为1980年的能耗值。

②为1981年4—12月的平均值。

③为我国重点企业的可比能耗值。

表2—4 部分用能设备能量(热)效率比较

项目 国别 设备	中国	工业发达国家
火力发电	29%	35~40%
工业炉窑	20~30%	50~60%
工业锅炉	50~60%	~80%

这些数字，一方面说明了我们的差距，另一方面也说明我们的节能潜力是很大的。

第一篇 热工基础知识

第一章 气体及气体流动

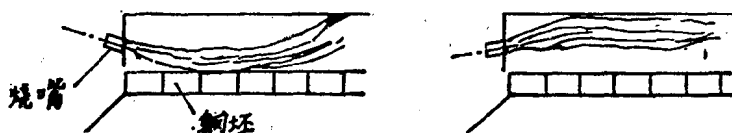
凡是用煤、煤气、重油等燃料作为热源的加热炉，都离不开气体。例如高炉煤气，天然气，助燃用的冷风或热风，燃料燃烧在炉内生成的气体等，都是气体。

气体的一个最大特点，是能够流动。例如煤气和空气在管道内流动，炉气在炉内流动，烟气在烟囱内流动，通过炉门的冒气和吸气，这些都是常见的气体流动现象。当然，在一些情况下气体也可以是不动的，例如没有刮风时的大气，关闭煤气阀后管道内的煤气，装在储气罐内的煤气等。像这种不流动的气体，我们把它叫做静止气体。

§1 气体流动与节能的关系

我们为什么要研究气体流动呢？因为它不但可以帮助我们理论上解释许多实际现象，而且还与炉子的节能有密切关系。这可用一些例子来说明。

1. 在端部加热(即烧嘴装在端墙上)的加热炉，我们经常看到有的烧嘴需要往下倾斜一个角度(如图1—1—1, a)，为什么不是向上倾斜呢(如图1—1—1, b)？这是因为当烧嘴往下倾斜时，可以使火焰贴近钢坯表面流动。这样，便能够将高温气体所含的热量更快更多地直接传给钢坯，使钢坯得到更快的加热，从而缩短了加热时间，这不但提高了炉子的产量，也降低了燃料消耗。反之，当烧嘴向上倾斜时，火焰就会远离钢坯表面而靠近炉顶流动，容易在钢坯表面附近出现一个冷气层，减少了高温气体向钢坯的传热，就会延长加热时间，降低炉子产量，增加燃料消耗，所以对节约燃料是不利的。



a. 高温气体贴近钢坯表面

b. 高温气体远离钢坯表面

图1—1—1 高温气体与钢坯表面距离对节能的影响

2. 炉子冒火或者吸风，对节能都是不利的，因为冒火就是高温的炉气从炉内流出，意味着热量的损失；吸风，就是把车间的冷空气吸入炉内，它会使炉温降低，加热时间延长，能耗增加，产量下降。为使炉子不吸风和尽量少冒火，关键是要合理控制炉膛压力。

研究有关炉子的气体流动问题，不仅是节能的需要，也是我们分析和解决炉子操作中许多问题的基础，又是分析炉子构造是否合理的依据。

§2 关于气体的物理量

1. 气体的物理量

“气体”，只是一切气态物质的总称。为了说明气体在静止状态或流动过程中的一些实际情况或特点，经常用气体的物理参数来描述，这些物理参数称为气体的物理量。

常用的气体物理量，主要是体积、流量、速度、重度、压力和温度。大家首先应该搞清楚它们的含义及表示方法。

1) 气体的体积 (V)：是指被气体充满的空间 (或容积) 的大小，单位是立方米 (米^3)。例如煤气站储气罐的空间是 100米^3 ，充满的煤气体积就是 100米^3 。

2) 气体的流量：是指单位时间内在某一截面积上流过的气体体积，一般也是用 V 来表示，单位是 $\text{米}^3/\text{秒}$ 或 $\text{米}^3/\text{时}$ 。用这种方法表示的气体流量叫做体积流量。至于用 V 表示的究竟是指体积还是流量，这要看它后面的单位是 米^3 还是 $\text{米}^3/\text{秒}$ 。

注意：对水和重油等液体，其流量通常是用每秒钟或每小时内流过的液体重量来表示的，这时就叫重量流量，单位是公斤 (力) / 秒或公斤 (力) / 时 (公斤 (力) 是重量的单位)。

3) 气流的速度 (W)：是指每秒钟内气体流过的距离，单位是米/秒。

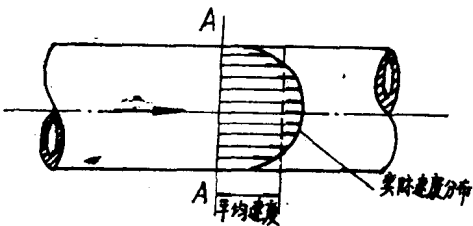


图1-2-1 气流的实际速度与平均速度

还应指出，根据实验证明，沿管道截面上各个地方的实际速度是不一样的，在管道中心线上的速度最大，愈靠近管壁速度愈小，如图1-2-1中A-A截面上的实际速度分布如曲线所示，而前面讲的气流速度是指气体沿管道截面上的平均速度，如图1-2-1中的虚线所示。本文中以后所说的气流速度，在一般情况下指的都是平均速度。

如果气体的体积流量是 V ($\text{米}^3/\text{秒}$)，管道的截面积是 F (米^2)，气流速度是 W ($\text{米}/\text{秒}$)，那么气体的体积流量应该等于管道的截面积与气流速度的乘积，即

$$V = F \cdot W \quad (1-2-1)$$

【例题】有一煤气管道，已知管子的直径 $d = 200$ 毫米，煤气的流速是 8 米/秒，问流过该管子的煤气流量有多少？

解 先计算管道截面积 F ，

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times 0.2^2}{4} = 0.0314 \text{米}^2.$$

据 (1-2-1) 式，煤气流量应为：

$$V = F \cdot W = 0.0314 \times 8 = 0.25 \text{米}^3/\text{秒}; \text{ 又因 } 1 \text{ 小时等于 } 3600 \text{ 秒,}$$

$$\text{所以 } \mathbf{V} = 0.25 \times 3600 = 900 \text{米}^3/\text{时},$$

即煤气的小时流量为 900米^3 。

4) 气体的重度 (Γ)：人们把单位体积物质的重量定义为重度，并通常用 Γ 来表示，单位是公斤 (力) / 米^3 。

空气在压力为1标准大气压 (即760毫米汞柱)，温度为 0°C 时 (处在这两个条件下时的

状态叫做标准状态) 的重量是1.293公斤(力)/标米³(标准状态下的体积常用“标米³”来表示)。当然,不同气体的重量是不一样的。例如温度和压力相同时,氢气的重量较小,空气的重量较大。

以后对凡是处于标准状态下之气体的各种物理量,都用脚标“0”来表示。例如,标准状态下的气体体积或流量用V₀来表示,速度用W₀来表示,重量用γ₀来表示。

5)气体的压力(P):一切气体都具有压力。炉内的气体有压力,炉外的大气也有压力(通常所说的大气压)。炉子冒火,就是因为炉气具有较大的压力,当它大于外面压力时就被“压”出来了;煤气和空气能由烧嘴喷出来,也是由于它们在喷嘴里面的压力比外面大。

我们所说的气体压力,也叫“静压力”,指的是气体作用在单位面积上的力。许多书上也把它叫做压强,用P来表示。

压力常用的单位,有物理大气压,工程大气压,毫米水柱,公斤(力)/米²,毫米汞柱,公斤(力)/厘米²,牛顿/米²(帕),它们之间的换算关系是:

$$\begin{aligned} 1 \text{物理大气压} &= 10336 \text{毫米水柱} = 10336 \text{公斤(力)/米}^2 \\ &= 101396 \text{牛顿/米}^2 = 1.0336 \text{工程大气压} \\ &= 760 \text{毫米汞柱}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{工程大气压} &= 10000 \text{毫米水柱} = 10000 \text{公斤(力)/米}^2 \\ &= 0.967 \text{物理大气压} = 735.29 \text{毫米汞柱} \\ &= 1 \text{公斤(力)/厘米}^2. \end{aligned}$$

此外,压力还有“绝对压力”和“相对压力”两种表示方式。

所谓绝对压力,是气体本身具有的实际压力,是以没有气体存在的完全真空做为零点算起的压力。比如说一个大气压力是10336毫米水柱(101325帕),指的就是大气的绝对压力。

所谓相对压力,是以气体的实际压力与大气压力的差值来表示的,也可以说它是以太气压力为零点算起的压力。相对压力就是通常所说的表压力或表压。

可见,绝对压力就等于大气压力加表压,或者说表压等于绝对压力减去大气压。

如果我们说“现在的炉膛压力是2毫米水柱”,这里指的就是炉膛的表压,即指炉膛的绝对压力与炉外的大气压力之差。如果大气压力是10336毫米水柱,那么炉膛的绝对压力应该是(2+10336),即10338毫米水柱。

6)气体的温度(t°C或T):气体温度的高低,是衡量气体所含热量多少的重要标志之一,温度愈高,说明其所含的热量也就愈多。这里介绍两种常用的温度表示方法:

一种是摄氏温度t°C表示法,在数字后面加一个“°C”的符号,例如300°C,则表示摄氏温度是300度;

另一种表示方法叫做绝对温度,通常用“T”来表示,单位是K(或“开”),它是将摄氏温度t再加上273,即T=(t+273)K。例如300°C的空气,其绝对温度可表示为T=300+273=573K。

2. 气体的物理量与温度的关系

炉子在工作过程中,气体的温度是经常变化的。例如由冷风预热到热风,火焰本身的温度很高,但到达炉尾时炉气温度就低了。随着气体温度的变化,其体积、流量、速度、重量以致压力也都要跟着变化。它们的变化关系是怎样呢?以下分别来说明。

1) 气体体积与温度的关系

我们从日常生活中知道，液体（如水，重油）的体积随温度的变化是很小的。例如将3℃的水加热到93℃，虽然温度上升了90℃，其体积却几乎没有改变。气体则不同，随温度上升其体积也会由于气体膨胀而增大，要比液体明显得多。这是所有气体的一个重要特点。例如冷风经过换热器后其体积就要增大；反之，烟气在烟道内的流动过程中，随着温度的逐渐降低体积就会减小。

那么气体的体积究竟是怎样随温度变化的呢？例如有标准状态下的10标米³空气，问将它加热到400℃后体积变为多少？

如果我们用 V_0 表示气体在标准状态下的体积，用 V_t 表示温度为 t ℃时的体积，那么 V_t 就可按下式进行计算：

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad \text{米}^3 \quad (1-2-2)$$

式中 $\beta = \frac{1}{273}$ ，是一个不变的常数。

所以只要知道 V_0 ，便可计算出任何温度 t 时的体积。于是对上面的问题便可作如下计算：

$$V_t = V_0(1 + \beta t) = 10 \left(1 + \frac{400}{273} \right) = 24.7 \text{米}^3。$$

可见，空气由0℃加热到400℃（其压力仍然是1标准大气压）时，其体积会增加一倍多。

2) 气体流量与温度的关系

气体的体积流量随温度的上升而增加，它们之间的关系仍然是

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad \text{米}^3/\text{秒} \quad (1-2-3)$$

注意，这个式子形式上与(1-2-2)式相同，但其含义是不同的。此处的 V_t ， V_0 都是指单位时间内流过管道截面的气体体积（米³/秒或米³/时），而不是体积值（米³）。

〔例题〕。标准状态下流量为2000标米³/时的冷风经换热器后被加热到350℃，求其在热风管道内的实际流量是多少？

解：根据题意， $V_0 = 2000$ 标米³/时， $t = 350$ ℃，则

$$V_t = V_0(1 + \beta t) = 2000 \left(1 + \frac{350}{273} \right) = 4564 \text{米}^3/\text{时}$$

此时已不是标准状态。算得实际流量是4564米³/时。

3) 气体流速与温度的关系

气体的流速也是随温度的升高而增大、随温度降低而减小的（都是由于体积流量变化引起的），变化的数值可按下式计算：

$$W_t = W_0(1 + \beta t) \quad \text{米/秒} \quad (1-2-4)$$

式中： W_0 —标准状态下的气流速度，标米/秒；

W_t —温度为 t ℃时的气流速度，米/秒。

〔例题〕。烟气在烟道内流动。已知标准状态下的烟气流速为 $W_0 = 3$ 标米/秒，问400℃时烟气的实际流速是多少？

解 根据(1-2-4)式：

$$W_t = W_0(1 + \beta t) = 3 \left(1 + \frac{400}{273} \right) = 7.395 \text{米/秒}。$$

所以烟气的实际流速是7.395米/秒。

4) 气体重度与温度的关系

在压力一定时（一般空、煤气管道内的气体压力变化都不是很大，实际炉内和烟道内的气体压力与外界大气压相差也很少，都可以近似地认为是压力不变条件下的流动），随温度升高，气体的重度将会降低。这是由于在压力一定的条件下，对一定重量的气体来说，其体积要随温度上升而增大，因此单位体积内的气体重量就必然减少，即气体的重度就减小了。反之，随气体温度的降低，其重度将会增大。

一般气体随温度变化的重度值均可按下式计算：

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} \quad \text{公斤(力)/米}^3 \quad (1-2-5)$$

式中： γ_0 ——标准状态下的气体重度，公斤(力)/标米³；

γ_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的气体重度，公斤(力)/米³。

【例题】. 已知标准状态下的空气重度是1.293公斤(力)/标米³，求它被加热到 500°C 后的重度是多少？

解：根据题意， $\gamma_0 = 1.293$ 公斤(力)/标米³， $t = 500^\circ\text{C}$ ，由(1-2-5)式：

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} = \frac{1.293}{1 + \frac{500}{273}} = 0.457 \quad \text{公斤(力)/米}^3.$$

所以空气在 500°C 时的重度是0.457公斤(力)/米³。

3. 气体的体积、温度和压力之间的关系

上面讲到的内容都是指气体在压力不变的情况下而言的。实际工作中有时也会遇到气体的体积不但随温度而变，而且还需要考虑随压力而变的情况。比如有标准状态下为100标米³的煤气，问当其温度变为 100°C 、压力变为780毫米汞柱（指绝对压力）时的体积将是多少？对这一类问题可按下面的公式来计算：

$$V = V_0 \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P} \quad \text{米}^3 \quad (1-2-6)$$

式中： V_0 ， T_0 ， P_0 ——分别为标准状态下气体的体积、绝对温度和绝对压力，

其中 $T_0 = 273\text{K}$ ； $P_0 = 760$ 毫米汞柱；

V ， T ， P ——处于某一状态下的气体体积、绝对温度和绝对压力。

于是对前面的问题可作如下计算：

已知 $V_0 = 100$ 标米³， $T = 100 + 273 = 373\text{K}$ ， $P = 780$ 毫米汞柱，将它们代入(1-2-6)式后可得欲求的体积为：

$$V = V_0 \times \frac{T}{T_0} \times \frac{P_0}{P} = 100 \times \frac{373}{273} \times \frac{760}{780} = 133.13 \text{米}^3.$$

§3 加热炉的冒火与吸风

加热炉的冒火与吸风是常见的现象。为说明这种现象，还得从静止气体沿高度上的压力分布问题说起。

1. 静止气体沿高度上的压力分布

大家知道，在静止不动的大气中，高空中的压力总是比较小，越靠近地面大气压力越

大，这是为什么呢？我们可以把大气中的某一部分想像成是直径为 d 、总高度为 Z 的一个大气柱（如图1-3-1, a）。假定作用在大气柱顶面上的压力是 $P_{顶}$ （因为它的上面还有大气存在），作用在底面上的压力是 $P_{底}$ ，再在此大气柱中任意取一个 a 面， a 面距底面的距离是 Z_1 ，距顶面的距离是 Z_2 。显然，作用在 a 面上的总压力是作用在顶面上的总压力与高度为 Z_2 的气柱重量之和，而作用在底面上的总压力是作用在顶面上的总压力与高度为 Z 的整个大气柱重量之和，比 a 面所受的总压力要加大高度为 Z_1 的气柱重量。上部的压力小，下部的压力大： $P_{底} > P_a > P_{顶}$ 。

对加热炉来说，如果在待轧时关闭所有的烧嘴、炉门和烟闸，那么也可以把炉内的气体看成是静止的热气体（如图1-3-1, b），此时沿炉子高度上的炉气压力也一定是越靠近炉底压力越大（即 $P_{底} > P_a > P_{顶}$ ）。

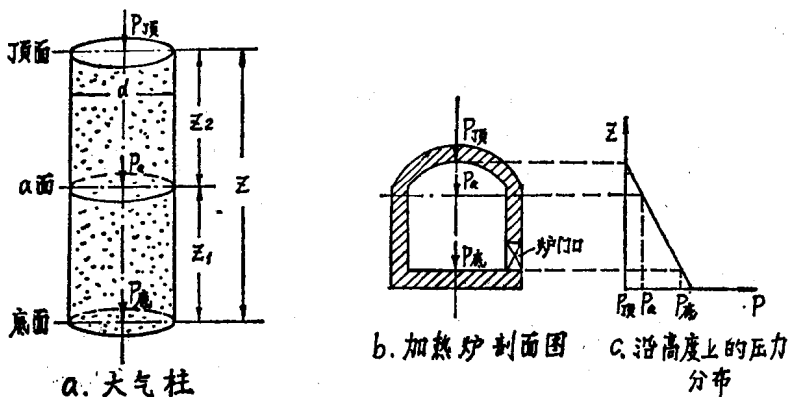


图1-3-1 静止气体沿高度上压力分布的分析

实际上，静止气层中不同高度上的压力值是可以进行计算的，如果仍用 $P_{底}$ 表示气层底部的压力，在任意高度 Z 上的压力为 P ，气体的重度为 γ ，则它们之间的关系是：

$$P + Z\gamma = P_{底} \quad (1-3-1)$$

这个公式叫做气体的平衡方程式，如图1-3-1, c所示。它表明：静止气体的压力沿高度上是呈直线关系变化的：越往底部压力越大，越往上部压力越小。

2. 炉子的冒火与吸风

如果我们在加热炉侧墙的不同高度上开两个直径相等的小孔（如图1-3-2），有时会发现上孔冒气多一些，下孔冒气少一些。但据前面分析，炉内上部的压力小，下部的压力大，似乎下孔冒气应该比上孔更多些才对，这不是互相矛盾吗？实际上两者并不矛盾。问题在于前面讲的只是针对炉内的一种气体来分析的，而后者不仅与炉内的气体压力有关，还与炉外的大气压力有关。首先，判断是冒气还是吸风，并不单单决定于炉气压力的大小，而是决定于炉气压力与炉外大气压力之间的压力差。例如，即使炉气压力很大，但如果炉外的大气压力比炉气压力还要大，那么炉气也还是冒不出来的；其次，冒出热气的多少，要看这个压力差的数值大小，压力差愈大，冒气就愈多。

那么怎样来确定炉子内外的压力差呢？

假定在炉内距炉门坎水平面 Z 米高处的炉气压力用 $P_{内}$ 来表示，与其同一高度上的炉外大气压用 $P_{外}$ 来表示（如图1-3-3所示），炉气重度是 γ_t ，大气重度是 $\gamma_{空}$ ，还假定在炉门坎水平

面上的炉气压力等于该处的大气压（像这种炉子内外气体压力相等的平面叫做零压面），则在任意高度 Z 上的炉子内外气体压力差“ ΔP ”，等于 Z 与 $(\gamma_{空}-\gamma_t)$ 的乘积，即

$$\Delta P = P_{内} - P_{外} = Z(\gamma_{空} - \gamma_t) \quad (1-3-2)$$

由于炉外冷空气的重度较大，炉内热气体的重度较小，所以它们的差值 $(\gamma_{空}-\gamma_t)$ 永远是正值；另外，由于上式是在假定炉门坎水平面上的炉子内外气体压力相等（即该处的 $\Delta P=0$ ）的条件下得出的，因此凡是在炉门坎以上（ Z 取正值）的地方， ΔP 都是正值，一定是炉内压力大于炉外压力，炉气就会从炉门或小孔中冒出，而且距炉门坎越高（ Z 越大）的地方冒气也越严重，这正是对图1-3-2中所述现象的科学解释。

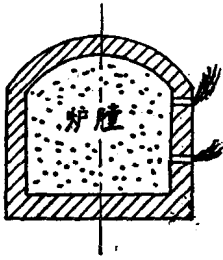


图1-3-2 不同高度上的冒气

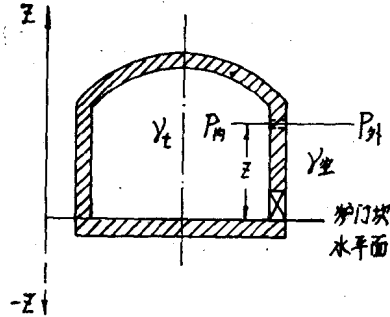


图1-3-3 炉子冒火分析图

在零压面处于炉门坎水平面的条件下，对于炉门坎以下的地方（例如在一些端出料炉子的斜坡上），(1-3-2)式中的 Z 应该取负值，即 $\Delta P = -Z(\gamma_{空}-\gamma_t)$ ，它意味着炉外的大气压力大于炉气压力（即 $P_{内} < P_{外}$ ），这时炉子就必然是吸风了。

〔例题〕某加热炉的炉气温度为 1300°C ，标准状态下的炉气重度是 $\gamma_{0气} = 1.3$ 公斤(力)/标米³，车间温度为 15°C ，零压面在炉门坎水平面上。求距炉门坎以上1米高处的炉膛表压力 ΔP 是多少？

解 15°C 时的实际空气重度是

$$\gamma_{空} = \frac{\gamma_{0空}}{1 + \beta t} = \frac{1.293}{1 + \frac{15}{273}} = 1.225 \text{ 公斤(力)/米}^3$$

1300°C 时的实际炉气重度是

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{0气}}{1 + \beta t} = \frac{1.3}{1 + \frac{1300}{273}} = 0.225 \text{ 公斤(力)/米}^3$$

则根据(1-3-2)式，1米高处的炉膛表压（即炉压）为

$\Delta P = Z(\gamma_{空} - \gamma_t) = 1 \times (1.225 - 0.225) = 1.0$ 毫米水柱。这一数值与炉子的实际操作基本相符。

炉子冒火和吸风都对炉子的节能不利，但要完全做到既不冒火又不吸风仍很困难。一般认为最好的操作方法，就是通过调节烟闸将炉子的零压面控制在炉门坎水平面上。这个问题在本书的炉子操作部分中还要详细介绍。

加热炉的炉压一般都是通过插入炉顶的测压管来测量的，如图1-3-4所示。由于每座加