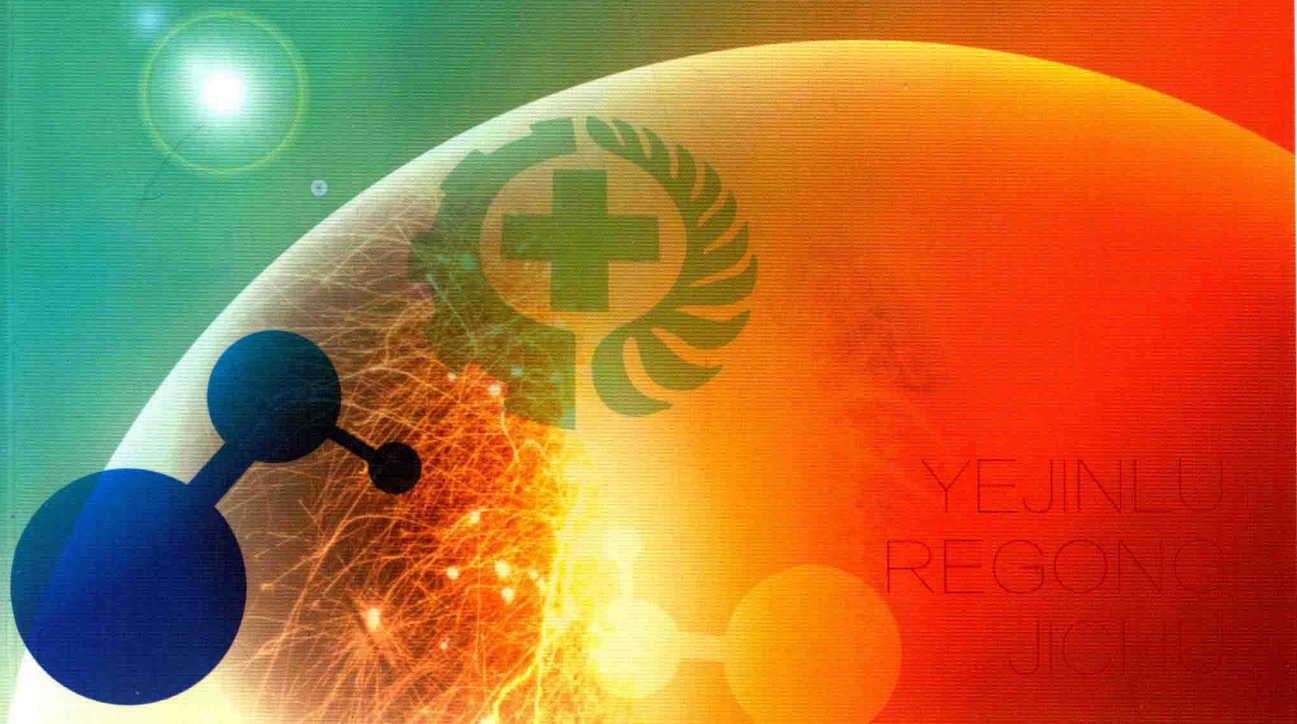




“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

(高职高专)



冶金炉热工基础



第二版

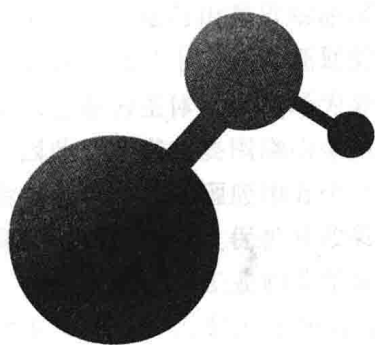
○ 王鸿雁 主编 ○ 张 花 副主编 ○ 杨 娜 主审



化学工业出版社



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
(高职高专)



YEJINLU
REGONG
JICHU

冶金炉热工基础

第二版

○ 王鸿雁 主编 ○ 张 花 副主编 ○ 杨 娜 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要包括气体力学、燃料及燃烧、传热过程、耐火材料、冶金炉热能的合理利用等知识。主要围绕冶金生产中的气体流动、燃料及燃烧、热量传递、耐火材料及冶金炉热能的合理利用五个项目进行编写,注重理论联系实际,突出节约能源、提高能源利用效率,可持续发展等节能理念,并在内容中列举了大量的实例,在结构上设置了“情景描述”,明确了项目的知识、能力及素质目标,并具体划分了不同任务,给出了任务的描述、分析、基本知识与技能要求,并设置了知识拓展和自测题,便于学生更好地学习,掌握核心内容。

图书在版编目(CIP)数据

冶金炉热工基础/王鸿雁主编. —2版. —北京:
化学工业出版社, 2014. 6

“十二五”职业教育国家规划教材
ISBN 978-7-122-20225-3

I. ①冶… II. ①王… III. ①冶金炉-热工学-高等
职业教育-教材 IV. ①TF061. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 064392 号

责任编辑: 高 钰

文字编辑: 张绪瑞

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 550 千字 2015 年 8 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 40.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是根据高职高专人才培养方案的要求，依据技术领域和职业岗位的任职要求，参照相关的职业资格标准，改革课程体系和教学内容，建立突出职业能力培养的课程标准，积极与冶金行业合作编写而成的，是一本适合于高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学用书，是与山东省精品课程《冶金炉热工基础》配套而编写的一本教材。

随着国家“十二五”规划的实施，用高新技术改造传统的冶金产业进入一个提速阶段，建立以企业为主体、以市场为导向、产学研相结合的技术创新体系，已是经济发展的必然趋势。因此，本书主要围绕冶金生产中炉内气体流体流动、燃料燃烧、热量传递、耐火材料以及冶金炉热能的合理应用五个方面进行编写，并注重理论联系实际，倡导全社会节约能源，提高能源利用效率，保护和改善环境，促进经济社会全面协调可持续发展等理念。

本教材由山东工业职业学院王鸿雁担任主编，杨娜担任主审，张花担任副主编。参加本教材编写的有：山东工业职业学院王厚山（项目一）、王禄（项目二）、王鸿雁（项目三）、张花（项目四）、山东钢铁集团淄博张钢有限公司李明福（项目五）、杨娜（附录），全书由王鸿雁统稿。

本教材可作为高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学用书，也可供中等职业学校相关专业作教学参考书，还可作为企业职工培训用书。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中不妥与疏漏之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编者

2015 年 2 月

第二版前言

《冶金炉热工基础》是根据 2013 年高职高专人才培养方案的要求、根据技术领域和职业岗位的任职要求，参照相关的职业资格标准，改革课程体系和教学内容，建立突出职业能力培养的课程标准，积极与冶金行业合作编写本教程。它是一本适合于高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学用书。此教材是与山东省精品课程《冶金炉热工基础》配套而编写的一本教材。

随着中国“十一五”规划的实施，用高新技术改造传统的冶金产业进入一个提速阶段，建立以企业为主体、以市场为导向、产学研相结合的技术创新体系，已是经济发展的必然趋势。因此，本书编写时，主要围绕冶金生产中炉内气体流体流动、燃料燃烧、热量传递、耐火材料以及冶金炉热能的合理应用五个项目进行编写，注重理论联系实际、能源节约、清洁及可持续发展等时代特征。

本教材由山东工业职业学院王鸿雁担任主编、王庆春同志担任责任主审，山东工业职业学院张花担任副主编。

参加本书编写的有：山东工业职业学院王厚山（第 1 章）、王禄（第 2 章）、王鸿雁（第 3 章）、张花（第 4 章）、张店钢铁总厂李明福（第 5 章）、山东铝业职业学院王玉玲（附录），全书由王鸿雁同志统稿。

本书除作为高职高专教材外，也可供中等职业学校相关专业作教学参考书，同时，也可供企业职工培训用书。

由于我们水平有限，加之时间仓促，书中不妥与疏漏之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编者

2014 年 1 月

目 录

绪论	1	任务二 燃烧计算	105
项目一 气体流动	2	1. 概述	106
任务一 气体的主要物理性质	3	2. 燃料燃烧的分析计算法	108
1. 气体的温度	4	3. 燃烧温度	116
2. 气体的压力	4	4. 空气消耗系数的计算	121
3. 理想气体状态方程式	5	任务三 燃料燃烧过程及技术	124
4. 气体的体积	6	1. 燃料燃烧过程的基本理论	125
5. 气体的密度	6	2. 气体燃料的燃烧技术	128
任务二 静力学基本定律	9	3. 液体燃料的燃烧技术	133
1. 阿基米德原理	10	4. 固体燃料的燃烧技术	143
2. 气体平衡方程式	10	5. 燃烧的污染及防治	155
任务三 气体流动的动力学	13	6. 燃料燃烧的节能	158
1. 流体流动的状态	14	*项目任务实施	159
2. 运动气体的连续方程	18	项目三 热量传递	164
3. 气体的能量	21	任务一 概述	165
4. 伯努利方程式	23	1. 传热过程的分类	166
5. 伯努利方程式和连续方程式应用		2. 传热过程的性质	167
实例	26	3. 传热的表示形式	167
任务四 压头损失与气体输送	30	4. 传热学的任务	167
1. 压头损失	31	5. 传热系数	167
2. 烟囱排烟	40	6. 与传热有关的几个名词	168
3. 炉子的供气系统	45	任务二 传导传热	169
4. 喷射器	54	1. 稳定态下的传导传热	170
任务五 压缩性气体的流出	59	2. 稳定态下的传导传热量的计算	173
1. 压缩性气体流出的基本规律	60	任务三 对流换热	181
2. 管嘴的设计和计算	67	1. 对流换热的基本概念	182
任务六 炉内气体的流动	72	2. 对流换热的基本定律(牛顿冷却定律)	184
1. 火焰炉内的气体流动	72	3. 相似理论在对流换热中的应用以及对流给热系数的确定	184
2. 转炉内的气体流动	82	4. 对流给热系数的确定	187
3. 竖炉内的气体流动	84	任务四 辐射传热	197
*项目任务实施	89	1. 辐射传热的基本概念	198
项目二 燃料及燃烧	92	2. 辐射传热的基本定律	199
任务一 认识燃料	92	3. 两个固体间的辐射热交换	204
1. 燃料的化学组成及其成分换算	94	4. 气体与固体间的辐射热交换	209
2. 燃料的发热量	100		
3. 冶金工业常用燃料	101		

任务五 综合传热	216	项目五 冶金炉热能的合理利用	267
1. 传热的统一计算公式	217	任务一 炉子能源的合理选择	268
2. 对流和辐射同时存在的综合传热	217	1. 高炉燃料的选用	269
3. 一种流体通过平壁传热给另一种 流体	218	2. 熔炼冰铜的反射炉燃料的选用	269
4. 一种流体通过圆筒壁传热给另一种 流体	220	任务二 节约燃料的途径	270
5. 火焰炉内传热	220	1. 热平衡和燃料消耗	270
6. 竖炉内热交换	222	2. 燃料的节约	272
※项目任务实施	225	任务三 余热利用	275
项目四 耐火材料	229	1. 余热利用的原则	275
任务一 耐火材料的分类和性能	230	2. 余热利用的方法	275
1. 耐火材料的定义和分类	230	3. 气体余压能的回收	276
2. 耐火材料的主要性能	231	4. 余热回收系统	276
任务二 常见耐火材料的应用	236	任务四 余热回收设备	277
1. 硅质耐火材料	237	1. 余热回收换热设备概述	277
2. 硅酸铝质耐火材料	239	2. 高温余热回收装置	277
3. 镁质耐火材料	244	3. 余热锅炉	279
4. 白云石质耐火材料	247	4. 蓄热室	282
5. 碳质耐火材料	248	5. 汽化冷却	284
6. 不定形耐火材料	250	※项目任务实施	285
7. 隔热耐火材料	254	复习思考题参考答案	287
8. 耐火材料的选用	256	附录一 1350m ³ 高炉热风炉标准操作 规程	316
任务三 常用耐火材料的砌筑技术	257	附录二 常用数据	328
※项目任务实施	265	参考文献	344

绪 论

众所周知，冶金生产需要在冶金炉内完成各种冶炼过程，而冶炼过程的完成需要高温，要达到一定的高温，必须有热能的供给；炉内热能的供给是燃料燃烧提供的，燃料要完全燃烧，就必须有氧气的存在；而氧气来源于空气，所以必须源源不断地向冶金炉内供风；燃料燃烧后产生高温气体燃烧产物，气体燃烧产物将携带的热能在向炉外排放的过程中与进入炉内的低温物料进行热量的传递；而燃料燃烧过程中火焰的产生，是热量交换的主要方式；由此可知，冶金炉是在高温条件下工作的，所以炉内衬是由耐火材料构成的；冶金炉是能耗大户，其余热的回收利用是绿色冶金生产必不可少的一个环节。据此将本课程划分为气体流动、燃料燃烧、热量传递和冶金炉用耐火材料选用、冶金炉热能的合理利用五个学习项目（见图 0-1）。

《冶金炉热工基础》主要针对钢铁冶金以及为冶金企业服务的耐火材料企业中使用的各类冶金炉，以冶金炉热工问题为研究对象，通过五大学习项目系统地学习冶金炉生产过程中的热工基础知识和基本理论。本课程面向高职学生的特点和整体水平进行教学目标设计，以促进课程总体目标的实现。改变传统教学方式，在教学过程中体现学生主体地位，以学生的学习为中心进行课程教学系统的设计，体现出

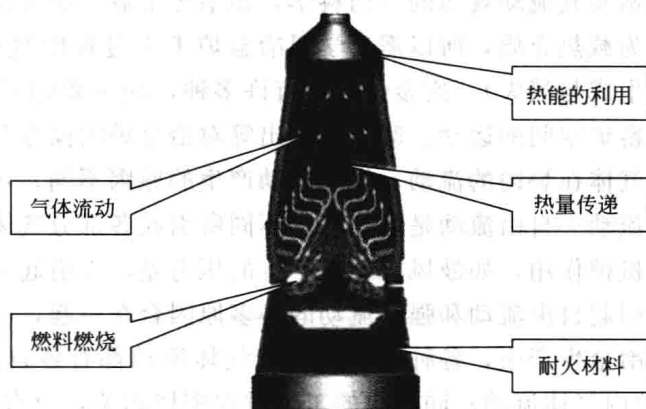


图 0-1 炼铁高炉内部工作示意图

教、学、做一体的教学要求。教学过程中充分利用现代化教育教学手段，如音像、多媒体、实例和图片等技术，从多角度、多层面为学生提供真实的专业技术环境，增加学生对知识的感性认识和理性认识，培养学生分析问题、解决问题的能力。

本课程的教学目标分为知识、能力和素质三个方面。

知识目标主要是培养学生具备热工理论的基本概念、基本定律和基本计算方法知识；能够理解强化冶金炉生产过程和改进生产工艺的理论基础。

能力目标主要是培养学生能通过结合冶金生产工艺，更好地理解冶金生产过程并具备初步分析和解决冶金炉热工实际问题的能力。当然，能力目标更多的是在结合后续课程的学习中和毕业后的实际工作中才能更好地得到体现。

素质目标主要是培养学生具有良好的职业道德和敬业精神；具有团结协作和开拓创新的精神；具有环保和节能的意识。

通过知识、能力和素质目标的结合来实现本课程的人才培养目标。

项目一 气体流动

【项目描述】

将你自己化身为一名刚进入某冶金企业的员工，已经进行了一段时间的实习，对整个生产过程有了一定的了解，你会发现，无论哪种冶金生产过程，都需要相应的冶金炉完成冶金任务。冶金炉的正常生产，需要水和空气来进行炉内热量的流通。冶金生产过程中很多都是在流体中进行的，如散装物料的干燥、焙烧、熔炼、燃料的燃烧、浸出、萃取与蒸馏等过程中，无一不与流体流动有着密切的关系。流体包括液体和气体，因而流体力学也就包括水力学和气体力学。由于在我们的工作中，所遇到的流体既有液体也有气体，但考虑到热工设备中气体居多，因此在本项目中我们重点学习气体的流动规律。气体力学是从宏观角度研究气体平衡及其流动规律的一门科学，在冶金工业中所涉及的冶金炉大多数以燃料燃烧产生的气体作为载热介质，所以需要学习冶金炉工作过程中气体的宏观物理与化学行为（运动与静止，生成与消失）。冶金炉气体有许多种，而主要的是烟气和空气。为此，气体的输送、气体在窑炉空间的运动、废气的排出等对冶金炉的操作都很重要。

气体在炉内的流动，根据流动产生的原因不同，可分为两种：一种叫自由流动；一种叫强制流动。自由流动是由于温度不同所引起各部分气体密度差而产生的；强制流动是由于外界的机械作用，如鼓风机鼓风产生的压力差，而引起的气体流动。

引起自由流动和强制流动的许多原因合在一起，就决定了炉内气体流动的性质。

冶金生产中，各种炉子对组织气体流动都有各自的特殊要求，并且有些气体流动现象（让炉内气体流动）同炉内的工艺过程密切相关，只有结合工艺过程才能深入分析这些气体流动问题。

【知识目标】

- (1) 掌握流体的特点，掌握气体与液体的共同点和各自的特点。
- (2) 掌握气体的主要物理性质以及它们之间的相互关系和计算。
- (3) 掌握阿基米德原理在气体流动中的应用；掌握气体静止时绝对压力与表压力的变化规律。
- (4) 掌握气体流动时的黏性以及流动状态的分类、气体本身具备的各种压头；运动气体的连续方程和伯努利方程；会用连续方程和伯努利方程解决生活和生产实际中的常见问题。
- (5) 掌握气体在运动过程中的各种情况下压头损失、掌握烟囱排烟的原理以及会进行烟囱的基本设计；掌握炉子的供气系统中供气管道的布置原则和供气设备的工作原理；掌握喷射器的工作原理以及相关计算。
- (6) 掌握压缩性气体流出的基本规律以及喷射器管嘴的设计和计算。
- (7) 掌握火焰炉、转炉、竖炉内气体流动的规律。

【能力目标】

- (1) 能用气体的各种性质解释日常生活和生产中常见的现象。
- (2) 能够根据给出的热工数据，设计和选用烟囱、炉子的供气系统以及喷射器管嘴的设计。
- (3) 能合理组织气体在冶金炉内的流动过程，提出强化冶金过程的措施。

【素质目标】

具有良好的职业道德和敬业精神；具有团结协作和开拓创新的精神；具有环保和节能的意识。

任务一 气体的主要物理性质

【任务描述】

针对周围的气体，在一年四季和不同的天气中，仔细观察空气流动的变化规律，在此基础上学习气体的主要物理性质以及会进行相关的计算。

【任务分析】

在生产中，要对进入到炉内的气体和燃料燃烧后产生的烟气进行有效的控制，为冶金生产服务，需要先学会气体的主要物理性质，以及掌握各个物理性质之间的相互制约和影响，从而为冶金的安全生产保驾护航。

任务一 气体的主要物理性质	基 本 知 识	技能训练要求
学习内容	1. 流体的定义及特点 2. 气体与液体的共同点和不同点 3. 气体的温度：(1)温标的定义；(2)摄氏温标与绝对温标的定义以及二者之间的关系 4. 气体的压力：(1)压力的定义与单位；(2)气体的压力与温度的关系；(3)绝对压力和表压力的定义及二者之间的关系 5. 气体的体积的计算公式以及体积与温度之间的关系 6. 气体的密度：(1)密度的定义及计算公式；(2)混合气体的密度计算公式；(3)气体密度随温度的变化	1. 掌握流体的定义及特点，区分固体与流体 2. 掌握气体与液体的共同点和不同点。尤其是二者的共同点，研究气体的流动的规律可以借助流体的特点学习 3. 对于气体的温度：要求掌握摄氏温标与绝对温标的定义以及二者之间的关系 4. 对于气体的压力：(1)要求正确理解压力的定义，理解压力是气体的一种内力；掌握压力的各种单位的表示方法以及各种表示方法之间的换算关系；(2)要求会自己推导气体压力与温度的关系；(3)要求掌握绝对压力和表压力的定义及二者之间的关系；并且正确理解表压力与生产上压力表测定的压力之间的关系 5. 气体的体积：要求掌握气体的体积的计算公式以及会推导体积与温度之间的关系 6. 气体的密度：(1)要求掌握密度的定义及计算公式；(2)要求掌握混合气体密度的计算；(3)会推导气体密度随温度的变化关系；(4)正确理解低压气体与高压气体、压缩性气体与不可压缩气体的定义

【知识链接】

气体与液体统称流体，它们的共同特性是流体质点间的引力很小，以致对拉力，对形状的缓慢改变都不显示阻力，因而很容易流动。气体与液体相比，气体容易膨胀或者被压缩，它没有自由表面，总是完全地充满所占容器的空间。由于气体分子之间的距离很大，引力很弱，因此，它既不能保持一定的形状，也不能保持一定的体积。由于气体分子之间的斥力很弱，因而很容易被压缩。而液体则有一定的自由表面和比较固定的体积，不易膨胀和压缩。在实际情况下研究气体运动时常遇到气体的温度、压力、体积、密度等一些物理参数的影响，通过这些物理参数的变化反映了气体物理性质随气体的存在的变化。因此，要了解气体的性质，必须了解这些参数的物理意义及其影响因素。

1. 气体的温度

气体的温度常用各种测温仪来测量。要测出气体的温度，首先必须确定温标。所谓温标是指衡量温度高低的标尺，它规定了温度的起点（零点）和测量温度的单位。

目前国际上常用的温标有摄氏温标和绝对温标两种。

① 摄氏温标 又名百度温标，是我国使用最广泛的一种温标。这种温标规定：在标准大气压下（760mmHg）把纯水的冰点定为零度，沸点定为 100 度，在冰点与沸点之间等分为 100 个分格，每一格的刻度就是摄氏温度 1 度，用符号 t 表示，其单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。此外，还可以用同样的间隔继续表示 0°C 以下和 100°C 以上的刻度。

② 绝对温标 即热力学温标，又称开尔文温标，用符号 T 表示，其单位符号为 K 。这种温标是以气体分子热运动平均动能趋于零的温度为起点，定为 0K ，并以水的三相点温度为基本定点，定为 273.16K ，于是 1K 就是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

绝对温标 1K 与摄氏温标 1°C 的间隔是完全相同的。在一个标准大气压下，纯水冰点的热力学温度为 273.15K ，它比水的三相点热力学温度低 0.01K ，水的沸点为 373.15K 。绝对温标与摄氏温标的关系

$$T = 273.15 + t \text{ (K)}$$

在不需要精确计算的情况下，可以近似地认为，同一气体的绝对温度比摄氏温度大 273 度，即

$$T = 273 + t \text{ (K)} \tag{1-1}$$

气体在运动过程中有温度变化时，气体的平均温度常取为气体的始端温度 t_1 和终端温度 t_2 的算术平均值，即

$$t_{\text{均}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ (}^{\circ}\text{C)} \tag{1-2}$$

2. 气体的压力

由于气体自身的重力作用和气体内部的分子运动作用，气体内部都具有一定的对外作用力，这个力称为气体的压力。显然，气体压力是气体的一种内力，它是表示气体对外作用力大小的一个物理参数。物理学上常把单位面积上气体的对外作用力称为压强，工程上却常把压强简称为压力。冶金炉上所说的压力也是指单位面积上气体的对外作用力，亦即在物理意义上相当于物理学上的压强。

(1) 压力的单位

在国际单位制中,压力的单位是帕斯卡,简称帕,其代号 Pa。

1 帕斯卡是指 1 平方米表面上作用 1 牛顿 (N) 的力,即 1 标准大气压 (atm) = 101325Pa = 760mmHg = 1.0332kgf/cm² (工程大气压, at) = 10332mmH₂O。

(2) 气体的压力与温度的关系

气体的压力与温度密切相关,实验研究指出,当一定质量的气体其体积保持不变(即等容过程)时,气体的压力随温度呈直线变化,即

$$P_t = P_0(1 + \beta t) \quad (1-3)$$

式中 P_t , P_0 ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时气体的压力;

β ——体积不变时气体的压力温度系数。根据实验测定,一切气体的压力温度系数近似地等于 $1/273$ 。

(3) 绝对压力和表压力

气体的压力有绝对压力和表压力两种方法。以真空为起点所计算的气体压力称为绝对压力,通常以符号 $P_{\text{绝}}$ 表示。通常所说的标准大气压(大气压力为 101325Pa)和实际大气压(该地该时的实际大气压)都是指大气压的绝对压力。

设备内气体的绝对压力与设备外相同高度的实际大气压的差称为气体的表压力,常以符号 $P_{\text{表}}$ 表示。

显然表压力和绝对压力的关系为

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝}} - P_{\text{大气}} \quad (1-4)$$

式中 $P_{\text{绝}}$ ——设备内气体的绝对压力;

$P_{\text{大气}}$ ——设备外同高度的实际大气压;

$P_{\text{表}}$ ——设备内气体的表压力。

当气体的表压力为正值时,称此气体的表压为正压。当气体的表压为负值时,称此气体的表压为负压,负压那部分的数值,称为真空度。当气体的表压为零值时,称此气体的表压为零压。具有零压的面常称为零压面。

实际生产中常用 U 型液压计测量气体的表压力, U 型压力计的一端和大气相通,另一端和被测的气体相接,实际所测的为相对压力。压力计上所指示的液体柱高度差 h 即为气体的表压力。

表压为正值时,通常称为正压;为负值时,则称为负压。通常把其负值改为正值,称为真空度,常用符号 $P_{\text{真}}$ 表示。真空度与绝对压力的关系

$$P_{\text{真}} = P_{\text{大气}} - P_{\text{绝}}$$

3. 理想气体状态方程式

冶金炉系统中的气体主要是空气和烟气,其特点是低压、常温或高温,可近似看成理想气体,理想气体状态方程式表明了温度、压强和体积的关系,方程式为

$$PV = nRT$$

式中 P ——气体的绝对压强, Pa (N/m²);

V ——气体的体积, m³;

n ——气体物质的量, mol;

T ——气体的绝对温度, K;

R ——气体常数, $R = 8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

4. 气体的体积

气体的体积是表示气体所占据的空间大小的物理参数。冶金炉内常以每千克质量气体所具有的体积表示气体体积的大小。每千克气体具有的体积称为气体的比容, 用符号 v 表示, 单位是 m^3/kg 。

气体体积随温度和压力的不同有较大的变化, 此为气体区别于液体的特点之一。用公式表示

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (\text{m}^3) \quad (1-5)$$

式中符号 $\beta = 1/273$, 称为气体的温度膨胀系数。应当指出, 当压力变化不大时, 也可用上式计算不同温度下的气体体积。

【知识点训练一】 某封闭容器内储有压缩空气, 用压力表测得: 当大气压为 745mmHg 时, 压力表上读数为 2 工程大气压 (at)。若大气压改变为 770mmHg 时, 压力表上读数为多少? ($1\text{at} = 735.6\text{mmHg} = 98066\text{Pa}$)

解: 由公式(1-4) 得 $P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气}}$

由于大气压力改变时容器内压缩空气的状态没有发生变化, 即容器内空气的绝对压力 $P_{\text{绝}}$ 是个常数, 仅仅是由于 $P_{\text{大气}}$ 不同而使压力表上的读数发生变化。现用 $P_{\text{表1}}$ 和 $P_{\text{表2}}$ 表示压力表示值在变化前后的读数, 则

$$P_{\text{表1}} + P_{\text{大气1}} = P_{\text{表2}} + P_{\text{大气2}}$$

$$\text{即} \quad P_{\text{表2}} = P_{\text{表1}} + P_{\text{大气1}} - P_{\text{大气2}} = 2 + \frac{745}{735.6} - \frac{770}{735.6} = 1.97 \quad (\text{at})$$

【知识点训练二】 在一煤气表上读得煤气的消耗量是 683.7 m^3 。在使用期间煤气表的平均表压力是 44mmH₂O, 其温度平均为 17℃。大气压力平均为 100249Pa。求:

(1) 相当于消耗了多少标准立方米的煤气?

(2) 如煤气压力降低至 30mmH₂O, 问此时同一煤气耗用量的读数相当于多少标准立方米?

(3) 煤气温度变化时, 对煤气流量的测量有何影响? 试以温度变化 30℃ 为例加以说明。

解: 已知 $V_1 = 683.7\text{m}^3$, $P_{\text{表1}} = 44\text{mmH}_2\text{O}$, $T_1 = 17 + 273 = 290\text{K}$, $P_{\text{大气}} = 100249\text{Pa}$

$$(1) \quad V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 44 \times 9.81)}{101325} \times \frac{273}{290} = 612.09 \quad (\text{m}^3)$$

$$(2) \quad \text{已知 } P_{\text{表1}} = 30\text{mmH}_2\text{O}, T_1 = 290\text{K}$$

$$V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 30 \times 9.81)}{101325} \times \frac{273}{290} = 638.66 \quad (\text{m}^3)$$

$$(3) \quad \text{已知 } P_{\text{表1}} = 44\text{mmH}_2\text{O}, t_1 = 30^\circ\text{C} \quad (\text{即 } T_1 = 303\text{K})$$

$$V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{T_0}{T_1} = 683.7 \times \frac{(100249 + 44 \times 9.81)}{101325} \times \frac{273}{303} = 612.09 \quad (\text{m}^3)$$

5. 气体的密度

单位体积气体具有的质量称为气体的密度, 用符号 ρ 表示, 单位是 kg/m^3 。气体密度是表示气体轻重程度的物理参数。

当气体的质量为 m , 其体积为 V , 则气体在标准状态下的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

m ——气体的质量, kg ;

V ——气体的体积, m^3 。

冶金生产中常见的气体(如煤气、炉气等)都是由几种简单气体组成的混合气体。混合气体在标准状态下的密度可用下式计算

$$\rho_{\text{混}} = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \cdots + \rho_n \varphi_n \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-7)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——各组成物在标准状态下的密度, kg/m^3 ;

$\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_n$ ——各组成物在混合气体中的百分数, %。

【知识点训练三】 某煤气的成分为: $\varphi(\text{CO}) = 27.4\%$; $\varphi(\text{CO}_2) = 10\%$; $\varphi(\text{H}_2) = 3.2\%$; $\varphi(\text{N}_2) = 59.4\%$ 。试求此煤气在标准状态下的密度。已知 $\rho_{\text{CO}} = 1.251 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{CO}_2} = 1.997 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{H}_2} = 0.0899 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.251 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

解: 将已知条件数值及各组成物成分代入式(1-7), 则得此煤气在标准状态下的密度为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{煤气}} &= \rho_{\text{CO}} \varphi(\text{CO}) + \rho_{\text{CO}_2} \varphi(\text{CO}_2) + \rho_{\text{H}_2} \varphi(\text{H}_2) + \rho_{\text{N}_2} \varphi(\text{N}_2) \\ &= 1.251 \times 0.274 + 1.997 \times 0.10 + 0.0899 \times 0.032 + 1.251 \times 0.594 \\ &= 1.286 \text{ kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

前面已经指出, 气体的密度随其温度和压力的不同而有较大的变化, 此为气体区别于液体的特性之一, 下面分析这种变化。

(1) 气体密度随温度的变化

在标准大气压时, 气体在温度 t 下的质量和体积分别为 m 和 V_t 时, 则在温度 t 下气体的密度为

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-8)$$

将式(1-5) 和式(1-7) 代入式(1-8) 可得

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-9)$$

应当指出, 此式也可用于低压气体。

显然, 对一定 ρ_0 的气体而言, 其密度 ρ_t 随着本身温度 t 的升高而降低。各种热气体的密度都小于常温下大气的密度, 亦即设备内的热气体都轻于设备外的大气, 此为设备内热气体的一个重要特点。此特点对研究气体基本方程有重要作用。

(2) 气体密度随压力的变化

在恒温条件下气体密度与气体绝对压力的关系式为

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} = \cdots = \frac{P_n}{\rho_n} \quad (1-10)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——在各相应压力下的气体密度, kg/m^3 。

显然, 气体密度随气体绝对压力的增加而增大, 随绝对压力的降低而减小。

(3) 气体密度随气体温度和压力的变化

气体密度随温度和压力的变化关系式为

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} = \dots = \frac{P_n}{\rho_n T_n} = R \quad (1-11)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——在各相应温度和相应压力下的气体密度, kg/m^3 ;

R ——常用的 R 值见附表 9

上述分析表明, 气体密度随气体温度和气体压力的不同都发生变化。气体密度随气体压力而变化的特殊性称为气体的可压缩性。气体都具有可压缩性, 此为气体的特性之一。

应当指出, 冶金炉上的低压气体在流动过程中的压力变化多不超过 9810Pa, 在此压力变化下的密度变化不超过 10%。工程上常忽略这个变化, 认为冶金炉上的低压气体属于不可压缩性气体。对被认为是不可压缩性气体的低压气体而言, 气体密度不随压力而变化, 气体密度只随温度按式(1-9) 的关系变化。

但是也应当指出, 冶金炉上的高压气体在流动过程中的压力变化常超过 9810Pa, 在此压力变化下的密度变化较大, 因此, 这些气体仍属于可压缩性气体。对于可压缩性气体而言, 气体密度同时随气体温度和气体压力按式(1-11) 的关系变化。

【知识点训练四】 某气罐内压缩空气的表压为 7 工程大气压 (at), 实际温度为 30°C 。当实际大气压为 1 工程大气压 (at) 时, 此压缩空气的实际密度为多少?

解: 压缩空气的绝对压力和绝对温度可分别按式(1-4) 和式(1-1) 计算如下

$$P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气}} = 7 + 1 = 8 \text{ 工程大气压} = 8 \times 98066 = 784800 \text{ Pa}$$

按式(1-11) 可得压缩空气在实际温度和实际压力下的密度为

$$\rho = \frac{P}{TR} = \frac{784800}{303 \times 287} = 9.03 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

【知识拓展】

1. 压力表和测压计上测得的压力是绝对压力还是表压力?
2. 工程上可压缩气体和不可压缩气体是如何定义的?

【自测题】

1. 某低压煤气的温度为 $t = 527^\circ\text{C}$; 表压力为 $P_{\text{表}} = 10 \text{ mmHg}$; 煤气成分为 $\varphi(\text{CO}) = 70\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 13\%$, $\varphi(\text{N}_2) = 17\%$ 。试求:

- (1) 煤气的绝对温度为多少?
- (2) 当外界为标准大气压时, 煤气的绝对压力为多少帕?
- (3) 标准状态下煤气的密度和比容为多少?
- (4) 实际状态下煤气的密度和比容为多少?

2. 重油喷枪以空气做雾化剂时, 将空气压缩至绝对压力为 7 个工程大气压, 并预热至 300°C 。求这时空气的密度。

3. 今有一台离心式通风机, 在工业标准状态下即压力为 760mmHg、温度为 20°C 时, 其风量为 $30000 \text{ m}^3/\text{h}$, 如果这台风机在空气温度为 27°C 和大气压力为 745mmHg 下工作, 试求此时风机输送空气的质量比它在工业标准状态下改变了多少?

4. 一容积为 4 m^3 的容器充有绝对压力 1 个工程大气压、温度为 20°C 的空气, 抽气后容器的真空度为 700mmHg, 当时当地大气压为 1 个工程大气压, 求:

- (1) 抽气后容器内气体的绝对压力为多少帕?

(2) 抽气后容器内空气的质量为多少千克?

(3) 必须抽走多少千克的空气,才能保证容器中真空度为 700mmHg?

5. 水银压力计中混进了一个空气泡,因此,它的读数比实际的气压小,当精确的气压计的读数为 768mmHg 时,它的读数只有 748mmHg,此时管内水银面到管顶的距离为 80mm,若气压的读数为 734mmHg 时,求实际气压。设空气的温度保持不变。

6. 质量为 1.2kg 的空气,在 30 个工程大气压下其体积为 0.08m^3 ,求该状态下的温度、千摩尔质量、比容及千摩尔体积各为多少?

7. 有一台鼓风机,当外界处于标准状态时,每小时能输送 300m^3 的空气,如果外界空气温度上升至 $t_2=27^\circ\text{C}$,大气压力仍为 760mmHg,此时鼓风机送风量仍为 $300\text{m}^3/\text{h}$,试求此鼓风机输送空气的质量变化了多少千克?

8. 某工厂有一条新安装的煤气管道,为了检查其是否漏气,需要进行密封试验。其方法是,将 $P_1=15\text{at}$, $t_1=50^\circ\text{C}$ 的空气送入系统,然后将管道封死,过一天后,测得温度 $t_2=27^\circ\text{C}$,如无漏气现象,试问系统压力降低到多大?

9. 引风机入口处流过的烟气流为 $4\times 10^5\text{m}^3/\text{h}$,此处负压为 300mmH₂O,烟气的温度为 130°C ,试求此烟气流在标准状态下的体积(当地大气压力为 755mmHg)。

10. 进入锅炉空气预热器的风量为 $2000\text{m}^3/\text{h}$,温度 $t_1=20^\circ\text{C}$,设在定压条件下将空气加热至 $t_2=300^\circ\text{C}$,试求每小时由空气预热器流出的风量是多少立方米?

任务二 静力学基本定律

【任务描述】

热气体在冷空气中上浮的这一常识生活中经常遇到,例如乘坐热气球在空中游览;冬季空调的热风栅栏向下吹,夏季的冷风栅栏向上吹等,都是利用这一原理。可以通过阿基米德原理在气体流动过程中的应用推导出热气体在冷空气中的上浮力的大小。在本次任务的学习过程中,要求拓展阿基米德原理的内容及相关知识,学会阿基米德原理在气体流动过程中的应用;掌握气体静止时绝对压力与表压力的变化规律以及进行相关的计算。

【任务分析】

在生产中,要对进入到炉内的预热气体和燃料燃烧后产生的高温烟气进行有效的控制,尤其是高温烟气在炉内的有效流动,是冶金炉热量高效利用的主要途径,即利用热气体在炉内自然上浮的原理预热冷物料,达到炉内热量合理利用的最佳化。

项目一 气体流动

任务二 静力学基本定律	基本知识	技能训练要求
学习内容	1. 阿基米德原理的内容以及其在气体流动中的应用 2. 气体在静止时绝对压力的变化规律 3. 气体在静止时表压力的变化规律	1. 会运用阿基米德原理推导热气体在冷空气中的上浮力;解释生活中热气球的原理以及冬天使用空调时出风栅栏向下的原因 2. 掌握气体在静止时绝对压力的变化规律,会解释随着海拔的升高绝对压力的变化,从而解释高原地区的空气稀薄的原因 3. 掌握气体在静止时表压力的变化规律,会利用此规律变化解释生产中由于密封不严实而出现的热炉气向大气中的溢气现象以及冷气体的吸气现象

【知识链接】

1. 阿基米德原理

对固体和液体而言，阿基米德原理的内容可表达如下：固体在液体中所受的浮力，等于所排开同体积该液体的重量。此原理同样适用于气体。

设有一倒置的容器，如图 1-1 所示，高为 H ，截面积为 f ，容器内盛满热气体（密度为 ρ ），四周皆为冷空气（密度为 ρ' ），热气的重量为

$$G_{\text{气}} = Hfg\rho$$

同体积空气的重量为

$$G_{\text{空}} = Hfg\rho'$$

热气在空气中的重力应为 $G_{\text{气}} - G_{\text{空}}$

$$G = G_{\text{气}} - G_{\text{空}} = Hfg(\rho - \rho')$$

因为 ρ 小于 ρ' ，所以热气在空气中的重力必是负值，也就是说热气在冷气中实际上具有一种上升力。

若上式的两边各除以 f ，则单位面积上的气柱所具有的上升力可写成下面的形式

$$h = Hg(\rho' - \rho) \tag{1-12}$$

上式说明，单位面积上气柱所具有的上升力决定于气柱的高度和冷、热气体的密度差。

2. 气体平衡方程式

气体平衡方程式是研究静止气体压力变化规律的方程式。

自然界内不存在绝对静止的气体。但是可以认为某些气体（如大气、煤气罐内的煤气、炉内非流动方向上的气体等）是处于相对静止的状态。下面分析相对静止气体的压力变化规律。

(1) 气体绝对压力的变化规律

如图 1-2 所示，在静止的大气中取一个底面积为 f 、高度为 H 的长方体气柱。如果气体处于静止状态，则此气柱的水平方向和垂直方向的力都应该分别处于平衡状态。

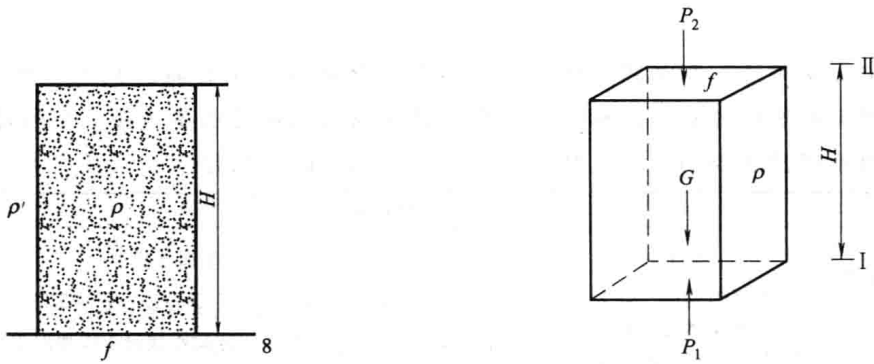


图 1-1 阿基米德原理

图 1-2 气体绝对压力的分布

在水平方向上，气柱只受到其外部大气的压力作用，气柱在同一水平面上受到的是大小相等方向相反的压力。这些互相抵消的压力使气柱在水平方向上保持力的平衡而处于静止