

全国勘察设计

注册公用设备工程师
动力专业执业资格考试教材

第4版

全国勘察设计注册工程师公用设备专业管理委员会秘书处 编



全国勘察设计注册公用设备 工程师动力专业执业资格考试教材

第4版

全国勘察设计注册工程师公用设备专业管理委员会秘书处 编



机械工业出版社

本教材以《全国勘察设计注册公用设备工程师动力专业考试大纲》为依据,以注册工程师应掌握的专业基本知识为重点,紧密联系工程实践,运用设计规范、标准,融理论性、技术性、实用性为一体,不仅对本专业技术人员有指导意义,对高等院校师生也有帮助。

本教材可供参加全国勘察设计注册设备工程师动力专业执业资格考试考生参考和使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

全国勘察设计注册公用设备工程师动力专业执业资格考试教材/全国勘察设计注册工程师公用设备专业管理委员会秘书处编. —4版. —北京:机械工业出版社, 2019.1 (2019.5重印)

ISBN 978-7-111-62264-2

I. ①全… II. ①全… III. ①动力工程-资格考试-教材 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 049641 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张晶 责任编辑:张晶

封面设计:张静 责任印制:张博

责任校对:刘时光

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年5月第4版第2次印刷

184mm×260mm·54.75印张·1531千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62264-2

定价:188.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

《全国勘察设计注册公用设备工程师动力专业执业资格考试教材》是根据人事部、建设部2001年发布的《勘察设计注册工程师制度总体框架及实施规划》(人发[2001]5号)、2003年发布的《注册公用设备工程师执业资格制度暂行规定》(人发[2003]24号)等文件的统一部署和安排,由全国勘察设计注册工程师公用设备专业管理委员会秘书处组织动力专业部分资深专家、教授编写的复习辅导教材,供动力专业技术人员参加执业资格专业考试复习使用。自2004年5月发行第1版、2007年2月发行第2版、2013年10月发行第3版以来,基本满足了广大考生的需要。

近几年来,国家颁布、修订了一系列有关节能、安全等方面的标准规范,有关工程技术也有了新的发展。为适应今后专业考试的需要,特组织专家修编了原教材。第4版对原教材的部分内容进行了修编,对教材中的相关内容按新公布的规范标准作了诠释。《注册公用设备工程师动力专业考试复习教材》第4版仍分为三篇十五章,收编了前三版大部分资料。第4版各篇章名称、编者姓名及编者所在单位名称分别是:

第一篇 热力

第一章 燃料与燃烧 王英刚、姜燮琦(中国中元国际工程有限公司) 史华光(中国联合工程公司)

第二章 锅炉原理 罗荣华(中国中元国际工程有限公司) 李江波、汪本尧(河北省电力勘测设计研究院) 王大伟(东方永捷暖通设备有限公司)

第三章 汽轮机原理 汪本尧、李江波(河北省电力勘测设计研究院)

第四章 锅炉房工艺设计 李春林、邢云峰、熊维镛(中国中元国际工程有限公司)

第五章 汽轮机房工艺设计 彭方(北京国电华北电力工程公司) 熊维镛

第六章 热力网及热力站 冯继蓓(北京市煤气热力工程设计院)

第二篇 燃气

第七章 制气原料的特性和评价 张秋民、赵树昌、何德民(大连理工大学) 董卫红、郭国杰(中冶焦耐(大连)工程技术有限公司) 王萍(中国市政工程华北设计研究院有限公司)

第八章 制气原理及工艺 文相浩、徐英姬、董卫红、郭国杰(中冶焦耐(大连)工程技术有限公司) 江绍辉、盛传红(中国中元国际工程有限公司) 沈余生、王萍(中国市政工程华北设计研究院有限公司) 李大尚、王曦(赛鼎工程有限公司)

第九章 煤气净化(调质)、副产品回收与加工 郝鹏、孙虹(中冶焦耐工程技术有限公司) 李大尚、王曦(赛鼎工程有限公司) 王萍

第十章 城镇燃气输配 李颜强、邓文平、李丽、黄葵(中国市政工程华北设计研究院有限公司)

第十一章 燃气燃烧与应用 徐鹏(北京建筑大学) 李颜强

第十二章 工程设计 文相浩、徐英姬、郝鹏、孙虹(中冶焦耐(大连)工程技术有限公司) 江绍辉、盛传红(中国中元国际工程有限公司) 李大尚、王曦(赛鼎工程有限公司) 董卫红、郭国杰(中冶焦耐(大连)工程技术有限公司) 李颜强、黄葵、李丽、邓文平、王萍、

李金环(中国市政工程华北设计研究院有限公司) 柴凤飞、王世芹(中冶京诚工程技术有限公司)

第三篇 气体

第十三章 气体压缩机 陈霖新(中国电子工程设计院) 张洪雁(中国航天建筑设计研究院)

第十四章 制冷与低温 陈霖新(中国电子工程设计院) 邓文(中冶南方工程技术有限公司)

第十五章 供气制冷工程设计 陈霖新(中国电子工程设计院) 杨涌泉(中冶南方工程技术有限公司) 王宇虹(中国建筑上海设计研究院有限公司)

参加编写的人员还有:吴玉环、李定凯、陶益新、马宪国、王瑞君、吴正宽、张洪鹏、冯长海、裴忠勋、陈光明、刘宗仁、邵玉祥、潘善明、黎光华、付鑫泉、孙振安、付忠诚、高勇、叶全乐、舒宗汉、高克董、王昌道、钱理业。

教材审核:毛文中(机械工业勘察设计协会)

副主编:姜燮琦、李颜强、陈霖新

主编:朱大钧、熊维镛(中国中元国际工程有限公司)

本复习教材以《全国勘察设计注册公用设备工程师动力专业考试大纲》为依据,以注册工程师应掌握的专业基本知识为重点,紧密联系工程实践运用设计规范、标准(如有变动,以现行规范、标准为准),融理论性、技术性、实用性为一体,力求准确体现考试大纲中“了解、熟悉、掌握”三个不同层次的要求,使考生能系统掌握专业知识,提高正确运用设计规范、标准处理工程实际问题的综合分析、应用能力。本复习教材可以作为本专业技术人员从事工程咨询设计、工程建设项目管理、专业技术管理的辅导读本和高等学校师生教学、学习的参考用书。

本复习教材编写的主要参考书是我国现行的高等学校推荐教材、国家有关的工程建设标准以及动力专业的设计手册、参考资料等。参加本复习教材编写的专家,以其强烈的责任感、深厚的理论造诣、丰富的工程实践经验以及对规范、标准的准确理解,对复习教材字斟句酌、精心编撰,付出了辛勤劳动。我们对各位编者付出的辛勤劳动表示深切的谢意,编者所在单位对编写工作也给予了热忱的关心和帮助,我们对他们的全力支持表示衷心的感谢。

本复习教材的编写变动,难免存在不足和错误之处,诚望广大读者提出宝贵意见。

全国勘察设计注册工程师
公用设备专业管理委员会秘书处

2018年11月

目 录

前言	
第一篇 热 力	
第一章 燃料与燃烧	1
第一节 燃料	1
一、燃料分类及性质	1
二、燃料的成分和成分分析	6
三、发热量	8
四、我国常用燃料的特性	9
第二节 燃烧基本概念	17
一、燃烧的基本原理	17
二、气体燃料的燃烧	18
三、液体燃料(燃油)的燃烧	22
四、固体燃料(煤)的燃烧	23
五、燃烧污染物的生成机理	25
第三节 燃烧计算	27
一、燃烧空气量计算	28
二、燃烧产物烟气量的计算	30
三、烟气焓的计算	32
第二章 锅炉原理	35
第一节 概述	35
一、锅炉的类型和分类	35
二、锅炉的工作原理	37
第二节 锅炉的热平衡	50
一、锅炉的热平衡组成及热效率	50
二、带入锅炉的热量 Q_1	50
三、锅炉的有效利用热 Q_1	52
四、锅炉的热损失	52
五、锅炉热平衡测试	58
第三节 锅炉受热面的结构布置	63
一、辐射受热面的结构及布置	63
二、对流受热面的结构及布置	65
第四节 锅炉水动力学	68
一、水动力学的基本概念	68
二、自然循环回路的设计原则	70
三、热水锅炉的工作特性	72
第五节 锅炉的强度计算	73
一、元件强度的常规计算	73
二、系统的强度	76
第三章 汽轮机原理	78
第一节 汽轮机级的工作原理	78
一、概述	78
二、蒸汽在喷嘴和动叶通道中的流动过程	79
三、冲动式与反动式汽轮机	80
第二节 多级汽轮机	84
一、多级汽轮机的技术特点	84
二、汽轮机及其装置的评价指标	88
三、汽轮机的分类及选用	91
第三节 汽轮机的变工况特性	94
一、汽轮机的负荷特性	94
二、关于滑压运行	97
三、供热汽轮机的工况图	97
第四节 汽轮机的凝汽设备	99
一、凝汽设备的工作原理	99
二、管束布置及真空除氧	102
三、抽气设备	103
第五节 汽轮机辅助系统	104
一、轴封系统	104
二、油系统	105
三、冷却供水系统	107
第六节 燃气轮机	111
一、燃气轮机基本原理	111
二、燃气轮机分类、应用	111
三、燃气轮机主要结构	112

四、燃气轮机与蒸汽轮机基本比较	114	第九节 锅炉烟气净化	209
五、燃气轮机热力循环	115	一、有关锅炉烟气排放的标准和规定	209
六、燃气-蒸汽联合循环	115	二、锅炉大气污染物排放量和排放浓度的计算	209
第四章 锅炉房工艺设计	117	三、锅炉大气污染物防治原理、技术特点与设计要点	210
第一节 锅炉房布置	117	第五章 汽轮机房工艺设计	215
一、锅炉房位置的选择	117	第一节 发电厂热力系统	215
二、多层或高层建筑内锅炉房布置	117	一、发电厂原则性热力系统	215
三、锅炉房布置的一般原则	118	二、发电厂全面性热力系统	220
四、锅炉间的设备布置	118	三、凝汽式发电机组的总效率	232
第二节 锅炉选择	120	第二节 热力系统主要设备选择	233
一、供热介质和参数的选择	120	一、除氧器	233
二、锅炉设备选择原则	121	二、给水泵	234
三、锅炉台数的确定	122	三、减压减温器	235
第三节 锅炉烟风系统	122	四、疏水扩容器	235
一、风机选择原则	122	五、热网加热器	236
二、风机选择计算	122	第三节 供热机组的热经济性指标	236
三、风烟管道设计及计算	125	一、概述	236
四、烟囱的计算	127	二、热电联产的总热效率	236
第四节 锅炉给水处理	129	三、热电联产热电比	237
一、锅炉水质标准	129	四、热电成本分摊比	237
二、锅外水处理	136	五、热化发电率	237
三、锅内水处理	157	第四节 发电厂汽水管道设计	238
四、给水除氧系统	159	一、概述	238
五、锅炉排污	164	二、管子的选择	241
第五节 锅炉给水设备	168	三、管道附件的选择	244
一、锅炉给水泵和给水箱	168	四、管道及附件的布置	247
二、凝结水泵和凝结水箱	170	五、水力计算	250
第六节 锅炉房燃料贮运系统	171	六、支(吊)架设计	253
一、燃煤锅炉房的贮运煤系统	171	第五节 发电厂主厂房布置	260
二、煤粉制备	178	一、主厂房布置的原则和形式	260
三、燃油燃气锅炉房的燃油贮运和燃烧设施	187	二、主厂房的设备布置	262
第七节 灰渣贮运系统	197	第六节 燃气轮机发电装置工艺设计和分布式能源系统	266
一、除灰渣系统的选择	197	一、燃气轮机发电装置工艺设计	266
二、灰渣贮运	198	二、分布式能源系统	273
三、除灰渣系统设计与主要计算	199	第六章 热力网及热力站	276
第八节 热水供热系统	202	第一节 热力管道的布置及敷设	276
一、热水锅炉供热系统形式	202		
二、热水系统的定压及补水	203		

一、热力管道的布置原则	276	二、管子	314
二、热力管网的布置形式	277	三、常用阀门	315
三、架空敷设	277	第六节 管道保温及防腐	318
四、管沟敷设	278	一、概述	318
五、直埋敷设	279	二、保温材料	319
第二节 热力管道系统	281	三、管道保温结构	320
一、热力管道种类及参数	281	四、保温计算	320
二、蒸汽管道系统	282	五、金属腐蚀、涂料及防腐	322
三、凝结水管道系统	282	第七节 热力站	323
四、热水管道系统	283	一、热力站的规模	323
第三节 热力管道水力计算	284	二、热力站的连接方式的选择	323
一、概述	284	三、热交换器的选择	324
二、热负荷	284	四、水泵选择	328
三、常用数据	289	五、间接连接供暖系统的定压和补水	329
四、管径和压力损失计算	291	六、直接连接采暖系统采用的混水 装置	329
五、蒸汽管网水力计算	291	七、凝结水回收	330
六、热水管网水力计算	292	八、阀门及仪表	330
七、水压图	293	九、热力站的系统及布置	331
第四节 管道热补偿及管道支架	299	第八节 热力网的供热调节	332
一、管道热伸长	299	一、运行调节的基本方程式	333
二、管道热补偿	301	二、质调节	333
三、支架荷载	305	三、量调节	334
四、固定支架推力	310	四、分阶段改变流量的质调节	334
第五节 管子和管道附件	313	五、间歇调节	335
一、管子和管道附件的标准化	313		

第二篇 燃 气

第七章 制气原料的特性和评价	336	一、煤的成焦过程及气体析出途径	361
第一节 煤炭	336	二、炼焦用煤的基本要求、配煤和 焦炭质量	362
一、中国煤炭的分类	336	三、现代焦炉的结构和主要设备	367
二、衡量、评价煤质的特性指标和 方法	339	四、焦炉的物料平衡和热平衡计算	377
三、炼焦制气用煤的工艺特性	350	五、焦炉流体力学基础	380
四、气化用煤的工艺特性	355	六、干法熄焦	384
第二节 轻油制气及改质制气原料	359	第二节 煤炭常压气化原理及工艺	384
一、轻油制气原料	359	一、连续与间歇煤制气气化原理及 基本过程	384
二、改质制气原料	360	二、气化用煤的选择原则和基本要求	386
第八章 制气原理及工艺	361	三、普通煤气发生炉、水煤气发生炉、	386
第一节 炼焦制气原理及工艺	361		

两段煤气发生炉、两段水煤气发生炉等的特点和结构	387	二、煤气终冷	446
四、气化过程计算	394	三、洗苯	446
五、气化工艺流程	397	四、粗苯蒸馏简介	447
六、气化煤气站主要附属设备	402	第五节 苯精制和焦油加工的 基本概念	448
第三节 碎煤移动床加压气化原理 及工艺	409	一、苯精制	448
一、碎煤移动床固态排渣加压气化过程	409	二、焦油加工	449
二、碎煤移动床固态排渣加压气化对煤质的要求	413	三、沥青冷却	450
三、各种条件对气化过程的影响	415	第六节 碎煤移动床加压气化 煤气的净化及副产品回收	451
四、气化过程主要指标及计算	417	一、加压气化煤气的净化流程	451
五、碎煤移动床固态排渣加压气化工艺流程	420	二、煤气冷凝水处理及副产品回收	451
六、碎煤移动床液态排渣加压气化与固态排渣加压气化的比较	420	第七节 碎煤移动床加压气化 煤气的调质	454
第四节 轻油制气和天然气改质 制气原理及工艺	422	一、加压气化粗煤气的变换冷却	454
一、轻油间歇循环催化裂解制气原理及工艺	422	二、加压气化煤气中酸性气体的 脱除	456
二、天然气间歇循环催化改质原理及工艺	426	三、加压气化煤气的甲烷化	458
第九章 煤气净化(调质)、副产品回收 与加工	428	四、代用天然气的干燥	459
第一节 焦炉煤气净化、冷却与 排送	428	第十章 城镇燃气输配	461
一、焦炉煤气概述	428	第一节 城镇燃气的质量要求	461
二、焦炉煤气净化	429	一、城镇燃气的分类	461
三、焦炉煤气的冷却与排送	431	二、城镇燃气的质量要求	462
第二节 焦炉煤气的脱硫、脱氰	433	三、天然气、液化石油气、人工煤气 国家标准	463
一、干法脱硫	433	第二节 燃气的基本性质	465
二、湿法脱硫、脱氰	434	一、混合物组分的表示方法和组分换算	467
第三节 焦炉煤气的脱氨、剩余氨水 蒸氨	441	二、混合物物理、热力和燃烧 性质的计算	468
一、硫酸吸收法生产硫铵	441	第三节 城镇燃气用气量、用气指标 和用气工况	485
二、剩余氨水蒸氨	442	一、城镇燃气用气量	485
三、磷铵吸收法生产无水氨	443	二、燃气用户用气指标	485
四、水洗氨、氨分解	444	三、年用气量	485
第四节 煤气的脱苯及苯回收	445	四、用气工况	486
一、粗苯的组成和性质	445	第四节 燃气管道水力计算	488
		一、燃气管道水力计算公式	488
		二、燃气管道起点和终点压力的确定	490
		三、燃气管道计算	491

第五节 燃气压力调节和计量原理	491	三、城镇燃气输配管网系统设计	588
一、燃气压力调节及调压器的构造	491	四、燃气管道设计	592
二、流量计作用原理	494	五、调压站设计	600
第六节 燃气储配站	497	第三节 液化石油气供应	605
一、概述	497	一、液化石油气运输	606
二、低压储气罐	498	二、液化石油气供应基地	609
三、高压储气罐	503	三、液化石油气气化站	617
四、燃气压缩机	505	四、液化石油气混气站	622
第十一章 燃气燃烧与应用	507	五、液化石油气瓶组气化站	626
第一节 燃气燃烧	507	六、液化石油气加气站	626
一、燃气的燃烧计算	508	七、相关专业的安全防火设计要点	628
二、燃气燃烧反应动力学	512	第四节 液化天然气、压缩天然气 供应	628
三、燃气燃烧的火焰传播	514	一、液化天然气储存	628
四、燃气燃烧的方法	516	二、液化天然气终端站和气化站	634
五、燃气燃烧节能环保新技术	518	三、压缩天然气储存	651
第二节 燃气燃烧器	524	四、压缩天然气加气站、储配站、汽车 加气站	653
一、燃烧器的分类与技术要求	524	五、CNG、LNG 工程公用专业安全设计 要点	665
二、扩散式燃烧器	524	第五节 室内燃气设施及安全设计	667
三、大气式燃烧器	526	一、室内燃气管道	667
四、完全预混式燃烧器	530	二、室内燃气设备布置	669
第三节 燃气互换性	531	三、燃烧烟气的排除	671
一、燃气互换性和燃具适应性	531	四、燃气的安全监控设施	675
二、华白数和燃烧势	531	第六节 钢铁企业副产煤气的回收和 利用	675
三、燃气互换性原理	533	一、概述	675
四、城镇燃气的分类	534	二、煤气平衡的编制	680
第十二章 工程设计	536	三、高炉煤气净化及余压汽轮机发电 设施	681
第一节 气源工程设计	536	四、转炉煤气净化回收储配设施	687
一、炼焦制气厂	536	五、煤气储气柜和煤气燃烧放散塔	694
二、常压煤气化厂及煤气站	553	六、煤气混合站和加压站	703
三、碎煤加压气化厂	559	七、煤气管道	707
四、轻油(液化石油气)制气、天然气 改质厂	563		
第二节 城镇燃气输配	569		
一、天然气门站设计	569		
二、储配站工艺设计	585		

第三篇 气 体

第十三章 气体压缩机	710	一、压缩机的种类	710
第一节 压缩机的分类及用途	710	二、压缩机的应用	712

第二节 活塞式压缩机	713	二、气体分离原理	780
一、压缩机级的理论循环	713	三、空气分离系统	785
二、压缩机级的实际循环	714	四、气体分离的其他方法	789
三、多级压缩	717	第六节 制冷与低温循环的热力学	
四、压缩机的热力性能	718	第二定律分析	790
五、高压气体加压装置	722	一、熵分析法	790
六、压缩机的润滑	726	二、焓分析法	791
七、压缩机的附属设备	728	第十五章 供气制冷工程设计	794
第三节 螺杆式压缩机	728	第一节 常用气体用途及气体品质	794
一、基本结构和工作原理	728	一、气体用途	794
二、螺杆式压缩机的特点、分类和应用	730	二、用气品质	797
三、热力性能计算	732	第二节 用量平衡与供气站、制冷站	
四、螺杆式压缩机机组系统设计	736	的规模确定	799
第四节 离心式压缩机	738	一、氧气平衡与空分装置能力确定	799
一、离心式压缩机的工作原理	738	二、氢气平衡与制氢装置的能力确定	801
二、离心式压缩机级内性能参数和		三、气体供应站能力的确定	802
轴功率	741	四、空气站供气能力的确定	803
三、性能曲线与调节	743	五、制冷站供冷能力的确定	804
第十四章 制冷与低温	747	第三节 供气系统	804
第一节 制冷与低温的热力学基础	747	一、氧、氮、氩供气系统	804
一、相变制冷	747	二、氢气供气系统	806
二、气体绝热膨胀制冷	748	三、保护气体供气系统	806
三、制冷循环热力学特性分析	749	四、加氢站的氢气系统	806
第二节 制冷与低温工质性质	753	五、压缩空气供气系统	807
一、概述	753	第四节 供气站、制冷站的平面	
二、流体物性计算的热力学基础	755	布置	807
三、制冷与低温工质的物理化学性质	758	一、氧气站的平面布置	807
四、工质与润滑油	760	二、氢气站的平面布置	809
第三节 蒸气制冷循环	761	三、加氢站的平面布置	810
一、单级蒸气压缩制冷循环	761	四、压缩空气站的布置	811
二、两级蒸气压缩制冷循环	766	五、制冷站的布置	812
三、蒸气吸收制冷循环	770	第五节 供气设备	813
第四节 气体的制冷和液化循环	774	一、空气分离设备	813
一、一次节流循环	774	二、制氢设备	816
二、二次节流循环	775	三、空压站设备	819
三、等熵膨胀循环	776	第六节 气体贮存、灌装及运输	
四、等焓膨胀和等熵膨胀的组合循环	776	设备	820
第五节 气体分离的原理与方法	778	一、气体贮罐	820
一、气体的理想分离	778	二、灌装设备	823

三、运输设备 824

第七节 供气站的管网设计 825

一、气体管网的布置与敷设 825

二、管道的水力计算 827

三、管道的热补偿 828

四、管道支架的跨距及荷载 830

五、管道强度计算 832

六、管材及主要附件的选择 833

七、特殊管道系统 836

第八节 供气站的防火防爆和噪声控制 840

一、防火防爆 840

二、噪声控制 841

附 录

附录 A 有关执业资格动力专业考试文件 847

附录 B 全国注册公用设备工程师(动力)专业考试参考样题 856

化石燃料(煤、石油和天然气)作为一次能源,在能源利用经济能源供应中占有重要的地位。了解其基本特性和燃烧的基本理论,对于每个动力工程技术人员都是必要的。

一、燃料分类及性质

化石燃料按其存在形态可以分为固体、液体和气体燃料三类。在我国广泛应用的燃料是煤。液体燃料有重油、渣油和柴油。气体燃料按其获取的方式分为天然气和人工煤气。

三类燃料所具有的物理、化学、工艺性质内容很广,本节仅对各类燃料对于炉设计影响较大的性质作简要介绍。

(一) 固体燃料(煤)的性质

1. 密度 煤的密度有真(相对)密度、假(相对)密度和堆密度之分。堆密度是指单位容积散装煤的质量,即

$$\text{堆密度} = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

式中 G ——取煤质量(t);

V ——容积(m^3)。

各种煤和煤灰的堆密度和安息角见表1-1。

表1-1 煤和煤灰的堆密度和安息角

名 称	堆密度 (t/m^3)	安息角($^\circ$)		名 称	堆密度 (t/m^3)	安息角($^\circ$)	
		最小值	最大值			最小值	最大值
无烟煤(干)	0.7~1.0	22~30	27~45	水煤	0.2~0.3		
烟煤	0.8	30	35~45	无烟煤粉	0.64~0.69	25~45	
褐煤	0.6~0.8	30	35~50	烟煤粉	0.4~0.7	15~45	
泥煤	0.29~0.3	40	45	煤屑(干)	0.64~0.70	25~45	
泥炭(假)	0.55~0.65	40	45	煤灰	0.7	15~30	
焦炭	0.76~0.85	35	50				

2. 煤的热稳定性 煤的热稳定性是指煤在加热时保持原有密度的性能。热稳定性好的煤在燃烧或气化过程中不致碎成碎块或少,锅炉或煤气发生炉如使用热稳定性差的煤,将导致

第一篇 热 力

第一章 燃料与燃烧

第一节 燃 料

化石燃料(煤、石油和天然气)作为一次能源,在整个国民经济的能源供应中占有重要的地位。了解其基本特性和燃烧的基本理论,对于每个动力工程师都是必要的。

一、燃料分类及性质

化石燃料按其存在形态可以分为固体、液体和气体燃料三类。在我国常用的固体燃料是煤,液体燃料有重油、渣油和柴油,气体燃料按其获取的方式分为天然气和人工煤气。

三类燃料所具有的物理、化学、工艺性质内容很广,本节仅对各类燃料对工程设计影响较大的性质作简要介绍。

(一) 固体燃料(煤)的性质

1. 密度 煤的密度有真(相对)密度、视(相对)密度和堆密度之分。堆密度是指单位容积所装载的散装煤炭的质量,即

$$\text{堆密度} = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

式中 G ——散煤质量(t);

V ——容积(m^3)。

各种煤和煤灰的堆密度和安息角见表 1-1。

表 1-1 煤和煤灰的堆密度和安息角

名 称	堆密度 /(t/m^3)	安息角($^\circ$)		名 称	堆密度 /(t/m^3)	安息角($^\circ$)	
		运 动	静 止			运 动	静 止
无烟煤(干)	0.7~1.0	27~30	27~45	木炭	0.2~0.4		
烟煤	0.8	30	35~45	无烟煤粉	0.84~0.89		37~45
褐煤	0.6~0.8	30	35~50	烟煤粉	0.4~0.7		37~45
泥煤	0.29~0.5	40	45	煤灰(干)	0.64~0.72		35~45
泥煤(湿)	0.55~0.65	40	45	煤灰	0.7		15~20
焦炭	0.36~0.53	35	50				

2. 煤的热稳定性 煤的热稳定性是指煤块在加热时保持原有粒度的性能。热稳定性好的煤在燃烧或气化过程中不破碎或破碎较少。锅炉或煤气发生炉如使用热稳定性差的煤,将导致

煤层气流阻力增加,气流带出物(飞灰量)增加,甚至形成风沟和结渣,使燃烧或气化不能正常进行。

3. 煤的可磨性 煤的可磨性是指煤研磨成粉的难易程度。煤的可磨性主要与煤的煤化程度有关。一般来说,焦煤和肥煤可磨性指数较高,容易磨细;无烟煤、褐煤可磨性指数较低,不易磨细。当水分和灰分增加时,其可磨性指数就越低。

4. 煤的粘结性和结焦性 煤的粘结性是指煤在隔绝空气受热后能否粘结其本身或惰性物质(即无粘结能力的物质)或焦块的性质;煤的结焦性是指煤粒在隔绝空气受热后能否生成优质焦炭(即焦炭的强度和块度符合冶金焦的要求)的性质。

粘结性强是结焦性好的必要条件,即结焦性好的煤其粘结性也好,但粘结性好的煤,结焦性不一定好。例如气肥煤,其粘结性很好,但生成的焦炭裂隙多、强度差,故结焦性不好。

5. 煤的结渣性 煤的结渣性是反映煤灰在燃烧或气化过程中的成渣特性。对于煤的燃烧与气化(尤其是固定床),结渣率高都是不利的,会造成气流分布不匀,给操作造成困难,增加灰渣中的含炭量等。

影响结渣性的主要因素是煤灰分和灰熔点。煤的灰分高、灰熔点低,结渣率就高。此外,煤灰周围的气氛对结渣性也有影响,还原气氛下结渣率高,氧化气氛下结渣率低。

6. 煤灰的熔融性 煤的灰分是煤在完全燃烧后形成的残渣,主要成分是煤中矿物质燃烧后生成的金属和非金属的氧化物与盐类,是多种成分的复合化合物和混合物,因此它没有明显的由固相转化为液相的熔点,从开始熔融到完全熔融,要经过一个较大的温度区域,一般测定它的三个熔融特征温度:变形温度(DT)、软化温度(ST)和流动温度(FT)。

影响灰熔点的因素很多,主要与煤灰的组成成分和煤灰周围燃烧介质气氛有关。煤灰中熔点高的物质越多,灰熔点越高;煤灰周围介质还原性气体存在时,灰熔点会降低。

(二) 液体燃料的性质

1. 粘度 流体本身阻滞其质点相对滑动的性质称为流体的粘性。油的粘度表示油对它本身的流动所产生的阻力大小,是用来表征油的流动性的指标,对油的输送、雾化和燃烧有直接影响。

粘度的大小可用[动力]粘度(绝对粘度)、运动粘度和恩氏粘度(条件粘度)来表示。

动力粘度 η 与运动粘度 ν 间的换算关系

$$\eta = \nu\rho \quad (1-2)$$

式中 η ——动力粘度(Pa·s);

ν ——运动粘度(m²/s);

ρ ——密度(kg/m³)。

运动粘度与恩氏粘度间的换算关系

$$\nu = \left(7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad (1-3)$$

式中 ν ——运动粘度(m²/s);

$^{\circ}\text{E}$ ——恩氏粘度($^{\circ}\text{E}$)。

影响燃油粘度的因素很多,主要是燃油成分和温度。燃油中胶状物含量愈多,粘度就愈大;油温越高,则粘度越低。

2. 凝点 油品丧失流动时的温度,亦即油品在试管里倾斜45°经过5~10s尚不流动时的温度叫凝点。凝点是与燃油的输送密切相关的一个重要技术指标。燃油的凝点与燃油产品中的

石蜡含量有关,含蜡量越高,凝点越高。

3. 闪点、燃点和自燃点 闪点、燃点和自燃点是有关燃油着火燃烧的特性指标,是衡量燃油贮运安全密切相关的指标。

(1) 闪点。燃油加热到某一温度时,表面蒸发的油气增多,当油气和空气的混合物与明火接触时,发生短暂的闪光(一闪即灭),此时的温度即为闪点。闪点是表示燃油的着火性能和爆炸危险的一项重要指标。闪点按测定方法不同有开口杯法和闭口杯法两种,一般开口杯法测定的闪点要比闭口杯法的高 15~25℃。

闪点是用于油品分类和 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》中对油品火灾危险性分类的一个重要指标,见表 1-2。

表 1-2 油品闪点分类

油品等级	闪点/℃	油品名称	油品储存火灾危险性分类	
一级	<28	汽油、苯等	甲类 闪点<28℃	易燃液体
二级	28~45	原油、煤油等	乙类 28℃≤闪点<60℃	可燃液体
三级	45~120	轻柴油、重柴油、重油等	丙类 闪点≥60℃	
四级	>120	重柴油、重油、渣油等		

(2) 燃点。在燃油温度超过闪点继续加热时,当燃油蒸气和空气混合物遇到明火能着火并继续燃烧(时间不少于 5s)时的最低温度称为燃点。油的燃点一般要比闪点高 20~30℃。

(3) 自燃点。自燃点是指油品缓慢氧化而开始自行着火燃烧的温度。油品自燃点和它们的燃点没有直接关系,而只取决于油品的化学组成,并随压力而变化。在常压下,油质越重,自燃点越低;压力越高,自燃点越低。常用燃油的自燃点见表 1-3。

表 1-3 常用油品的自燃点

燃油名称	自燃点/℃	燃油名称	自燃点/℃
汽油	415~430	原油	380~530
煤油	380	重油	300~350
机油	350~380	渣油	230~270
轻柴油	350~380	沥青	270~280
重柴油	300~350		

4. 相对密度 将 20℃时油品与 4℃时的同体积水的质量比,作为油品的标准相对密度,用 d_4^{20} 表示。油品的相对密度随温度升高而减小,其关系可按下式换算

$$d_t^t = d_4^{20} - \alpha(t-20)$$

$$\text{或} \quad d_4^t = \frac{d_4^{20}}{1 + \beta(t-20)} \quad (1-4)$$

式中 d_4^t ——温度为 t 时的油品相对密度;

d_4^{20} ——标准油品相对密度;

α ——温度修正系数(1/℃);

β ——体胀系数(1/℃)。

对 d_4^{20} 为 0.85~1.07 的油品, α 值为 0.000699~0.000424, β 值为 0.000818~0.000398,

也可查有关图表。

5. 硫分 燃油中的硫分在燃烧后生成的产物除对设备有腐蚀作用外, 对环境和人类健康也会造成伤害。

按燃油中含硫的质量分数, 将燃油分为三种, 含硫质量分数 $w_s \leq 0.5\%$ 的称为低硫油; $0.5\% < w_s \leq 1\%$ 的称为中硫油; $1.0\% < w_s \leq 3.5\%$ 的称为高硫油。

6. 爆炸性 当燃油蒸气在与空气的混合物中的含量(体积分数)达到某个范围时, 遇到明火就会爆炸, 这个含量范围就是该燃油的爆炸范围, 其最小含量值和最大含量值分别称为爆炸下限和爆炸上限。燃油的爆炸范围越大, 引发爆炸的危险性就越大。常用燃油的爆炸范围(体积分数)为: 汽油为 $1.0\% \sim 6.0\%$; 煤油为 $1.4\% \sim 7.5\%$; 重油为 $1.2\% \sim 6.0\%$; 原油为 $1.7\% \sim 11.3\%$ 。

7. 静电特性 油品是电的不良导体, 它与空气和钢铁摩擦时很容易产生静电, 并在其表面积聚产生很高的静电压, 一旦放电就会产生火花, 造成燃油的燃烧甚至爆炸。因此, 在燃油的输送贮存系统中的管线、容器和设备都必须有良好的接地设施。

(三) 气体燃料的性质

工程中使用的气体燃料都不是单一化学成分的气体燃料, 而是多种单一气体燃料的混合气体, 所以其物理化学工艺性质均与单一成分的气体燃料有很大的区别。

1. 密度与相对密度 干态混合燃气的密度可由式(1-5)计算

$$\rho = \sum \frac{\phi_i}{100} \rho_i \quad (1-5)$$

式中 ρ ——标准状态下混合燃气平均密度(kg/m^3);

ϕ_i ——各单一气体的体积分数(%);

ρ_i ——标准状态下各单一气体密度(kg/m^3)。

相对密度是指标准状态下混合气体密度与标准状态下空气密度之比, 见式(1-6)

$$d = \frac{\rho}{1.293} \quad (1-6)$$

式中 d ——混合气体相对密度;

ρ ——标准状态下混合燃气平均密度(kg/m^3);

1.293——标准状态下空气密度(kg/m^3)。

如果考虑实际混合燃气中的水蒸气, 则湿燃气密度可按式(1-7)计算

$$\rho^w = (\rho + d) \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-7)$$

式中 ρ^w ——标准状态下湿燃气密度(kg/m^3);

ρ ——标准状态下干燃气密度(kg/m^3);

d ——标准状态下湿燃气中水蒸气含量 [kg/m^3 (干燃气)];

0.833——标准状态下水蒸气的密度(kg/m^3)。

几种燃气的密度和相对密度见表 1-4。由表 1-4 中可看出, 气态的液化石油气比空气重, 容易积聚在地面附近和地势低洼处, 在使用时必须加以注意。

2. 着火温度 可燃气体与空气的混合物发生着火燃烧的最低温度称为着火温度。着火温度并不是可燃气体固有的物化常数, 它与燃气的种类、在混合燃气中含量、混合气的均匀程度和压力有关, 也与燃烧设备的构造、周围介质的热容量、有无催化作用及燃烧体系的散热条件

有关。部分单一燃气和混合燃气在标准状态下的着火温度见表 1-5。

表 1-4 几种燃气的密度和相对密度

燃气种类	标准状态下密度/(kg/m ³)	相对密度
天然气	0.75~0.8	0.58~0.62
焦炉煤气	0.4~0.5	0.30~0.40
气态液化石油气	1.9~2.5	1.5~2.0

表 1-5 部分单一燃气和混合燃气在标准状态下的着火温度

气体名称	着火温度/℃	气体名称	着火温度/℃	气体名称	着火温度/℃
氢 H ₂	500	正丁烷 n-C ₄ H ₁₀	287	硫化氢 H ₂ S	260
一氧化碳 CO	605	戊烷 C ₅ H ₁₂	260	天然气	482~632
甲烷 CH ₄	537	乙烯 C ₂ H ₄	425	高炉煤气	600
乙烷 C ₂ H ₆	472	乙炔 C ₂ H ₂	305	焦炉煤气	560
丙烷 C ₃ H ₈	450	苯 C ₆ H ₆	560	发生炉煤气	600

3. 着火极限(爆炸极限) 可燃气体和空气的混合物遇明火而引起爆炸时的可燃气体含量(体积分数)范围称为爆炸极限。在这种混合物中,当可燃气体的含量减少到不能形成爆炸混合物时的含量(体积分数)时,称为可燃气体的爆炸下限;当可燃气体含量增加到不能形成爆炸混合物时的含量(体积分数)时,称为爆炸上限。

在《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)中,生产和储存物品火灾危险性分类时,区分甲乙类易爆气体的爆炸下限值是 10%。

工程上使用的燃气,多为数种可燃气体的混合物,其着火极限可用计算得到。

(1) 对于不含惰性气体的可燃气体的混合物,着火极限可用式(1-8)计算

$$L = \frac{100}{\sum \frac{\phi_i}{L_i}} \quad (1-8)$$

式中 L ——可燃气体混合物着火极限(上限或下限)(体积分数)(%) ;

ϕ_i ——单一可燃气体在不含惰性气体的燃气中的体积分数(%) ;

L_i ——单一可燃气体的着火极限(上限或下限)(%)。

(2) 对于含有惰性气体的可燃气体的混合物,着火极限可用式(1-9)计算

$$L_D = \frac{L \left(1 + \frac{\phi_D}{100 - \phi_D} \right) \times 100}{100 + L \left(\frac{\phi_D}{100 - \phi_D} \right)} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 L_D ——含有惰性气体的混合燃气着火极限(上限或下限)(体积分数)(%) ;

L ——按不含惰性气体的混合燃气根据式(1-8)计算的着火极限(上限或下限)(体积分数)(%) ;

ϕ_D ——惰性气体在混合燃气中所占的体积分数(%)。

影响可燃气体着火极限的因素很多,主要有:

容积尺寸的影响:内径小的容器,着火极限范围变窄。