



普通高等教育“十三五”规划教材

# 工程燃烧学

主 编 王春华 岳 悦  
副主编 贾冯睿 刘 飞 陈东雨 张福群



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材

# 工程燃烧学

主 编 王春华 岳 悦

副主编 贾冯睿 刘 飞 陈东雨 张福群

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书共十一章。第一、二章简单介绍了燃料的种类、燃料的物理化学性质、燃料成分表示方法等。第三、四、五章介绍了读者必须掌握的基本技能：燃烧计算、燃烧检测。介绍了燃烧用空气量、燃烧产物量、燃烧产物成分、燃烧温度、燃烧效率、燃烧设备实际过量空气系数、烟气分析结果的正确性评定的计算方法。燃料的燃烧计算除了常规空气燃烧计算，还引入了混合燃料燃烧计算和富氧燃烧计算。第六、七章介绍了燃烧基础，重点讲解了化学动力学和空气动力学的基础理论。为了更好地理解最基本的内容，尽可能采用简化的分析方法，避开严谨的数学推导。第八、九、十章着重介绍燃烧的基本原理，分别对着火理论、气体燃料、液体燃料和固体燃料的燃烧特点、燃烧技术和装置进行详细的介绍。第十一章针对燃烧过程中产生的污染问题讨论了污染物产生的机理及其控制方法，同时引入了节能减排燃烧技术。此外，上述章节均结合生产实际附有丰富的例题与思考题，便于读者将枯燥的理论运用于实际生产解决问题。

本书可作为能源与动力工程专业本科生教材，也可供从事能源动力系统设计及教学的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程燃烧学 / 王春华, 岳悦主编. —北京: 中国石化出版社, 2018. 9  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5114-5030-2

I. ①工… II. ①王…②岳… III. ①燃烧理论-高等学校-教材 IV. ①TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 208050 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

#### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号  
邮编:100020 电话:(010)59964500  
发行部电话:(010)59964526  
<http://www.sinopec-press.com>  
E-mail:press@sinopec.com  
北京柏力行彩印有限公司印刷  
全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 403 千字  
2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷  
定价:48.00 元

# 前 言

本书以石油工业节能减排为主线，突出科学性、先进性、实用性，计算实例丰富，通俗易懂。系统介绍了燃烧的基本理论及技术，形成了鲜明的石油石化特色。在教材内容方面，摒弃繁琐的公式推导，紧密结合能源动力、石油、化工行业加热炉使用的燃烧装置，对燃烧理论进行针对性介绍，同时含有丰富的例题、思考题和习题，以帮助读者理解和掌握书中的核心内容，促进读者的工程实践应用能力的培养。同时，本书在选题特点方面，注重了工程燃烧在工程中的应用，不仅包括传统的常规空气燃烧技术，还增添了近年来节能燃烧技术富氧燃烧和蓄热燃烧理论和应用的最新进展，以帮助读者了解最新的燃烧理论，激发读者的学习兴趣，为读者从事与燃烧相关专业的研究工作奠定扎实的理论基础。编写过程中考虑不同程度读者群的需要，在内容的表述上，尽量做到通俗易懂，语言简练，结合生产实际，图文并茂，可操作性强。

本书共十一章。第一、二章简单介绍了燃料的种类、燃料的物理化学性质、燃料成分表示方法等。第三、四、五章介绍了读者必须掌握的基本技能：燃烧计算、燃烧检测。介绍了燃烧用空气量、燃烧产物量、燃烧产物成分、燃烧温度、燃烧效率、燃烧设备实际过量空气系数、烟气分析结果的正确性评定的计算方法。燃料的燃烧计算除了常规空气燃烧计算，还引入了混合燃料燃烧计算和富氧燃烧计算。第六、七章介绍了燃烧基础理论，重点讲解了化学动力学和空气动力学的基础理论。为了更好地理解最基本的内容，尽可能采用简化的分析方法，避开严谨的数学推导。第八、九、十章，着重介绍燃烧的基本原理，分别对着火理论、气体燃料、液体燃料和固体燃料的燃烧特点、燃烧技术和装置进行详细的介绍。第十一章针对燃烧过程中产生的污染问题讨论了污染物产生的机理及其控制方法，同时引入了节能减排燃烧技术。此外上述章节均结合生产实际附有丰富的例题与思考题，便于读者将枯燥的理论运用于实际生产解决问题。

本书可作为能源与动力工程专业本科生教材，也可供从事能源动力系统设计及教学的人员参考。

辽宁石油化工大学王春华、岳悦担任本书主编，领导全书编写工作，辽宁

石油化工大学贾冯睿、刘飞，沈阳农业大学陈东雨，沈阳化工大学张福群担任副主编，参加编写的还有辽宁石油化工大学潘颢丹和马丹竹。其中，第一、二、三、五章由岳悦编写，第四、八章由王春华编写，第七、十章由贾冯睿编写，绪论、第六章由刘飞编写，第九章由陈东雨和张福群编写，第十一章由潘颢丹和马丹竹编写。

限于编者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| 绪论                    | ( 1 )   |
| 第一章 燃料的种类及其性质         | ( 3 )   |
| 第一节 燃料的种类             | ( 3 )   |
| 第二节 固体燃料的一般性质         | ( 4 )   |
| 第三节 液体燃料的一般性质         | ( 6 )   |
| 第四节 气体燃料的一般性质         | ( 12 )  |
| 练习与思考题                | ( 15 )  |
| 第二章 燃料的化学组成与特性        | ( 16 )  |
| 第一节 固、液体燃料的化学组成及其表示方法 | ( 16 )  |
| 第二节 气体燃料的化学组成及其表示方法   | ( 24 )  |
| 第三节 燃料的发热量            | ( 26 )  |
| 练习与思考题                | ( 30 )  |
| 第三章 空气量及燃烧产物量计算       | ( 31 )  |
| 第一节 空气需要量计算           | ( 31 )  |
| 第二节 完全燃烧的燃烧产物量及其成分计算  | ( 35 )  |
| 第三节 不完全燃烧的燃烧产物量及其成分计算 | ( 41 )  |
| 第四节 富氧燃烧的助燃剂量及其燃烧产物计算 | ( 47 )  |
| 练习与思考题                | ( 55 )  |
| 第四章 油田热力系统的热平衡及燃烧温度计算 | ( 57 )  |
| 第一节 油田热力系统热平衡计算       | ( 57 )  |
| 第二节 燃烧温度计算            | ( 66 )  |
| 练习与思考题                | ( 82 )  |
| 第五章 燃烧检测              | ( 83 )  |
| 第一节 烟气成分的测定和验证        | ( 83 )  |
| 第二节 空气消耗系数的检测计算       | ( 86 )  |
| 第三节 污染物的检测计算          | ( 91 )  |
| 练习与思考题                | ( 92 )  |
| 第六章 燃烧化学反应动力学基础       | ( 93 )  |
| 第一节 化学反应速率            | ( 93 )  |
| 第二节 化学反应类型            | ( 94 )  |
| 第三节 化学反应基本定律          | ( 96 )  |
| 第四节 化学反应速率影响因素        | ( 98 )  |
| 第五节 链锁反应              | ( 103 ) |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 第六节 燃烧化学反应中的化学平衡 .....         | (106)        |
| 第七节 重要的化学机理 .....              | (108)        |
| 练习与思考题 .....                   | (115)        |
| <b>第七章 燃烧空气动力学基础——射流 .....</b> | <b>(116)</b> |
| 第一节 静止气体中的自由射流 .....           | (116)        |
| 第二节 同向平行流中的自由射流 .....          | (119)        |
| 第三节 交叉射流的射流 .....              | (119)        |
| 第四节 环状射流和同心射流 .....            | (121)        |
| 第五节 旋转射流 .....                 | (122)        |
| 练习与思考题 .....                   | (123)        |
| <b>第八章 气体燃料燃烧 .....</b>        | <b>(124)</b> |
| 第一节 气体燃料燃烧特点 .....             | (124)        |
| 第二节 气体燃料着火理论 .....             | (125)        |
| 第三节 气体燃料预混火焰 .....             | (139)        |
| 第四节 气体燃料扩散火焰 .....             | (153)        |
| 第五节 火焰稳定原理与方法 .....            | (157)        |
| 第六节 气体燃料燃烧器 .....              | (164)        |
| 练习与思考题 .....                   | (177)        |
| <b>第九章 液体燃料燃烧 .....</b>        | <b>(178)</b> |
| 第一节 液体燃料的燃烧特性及燃烧方式 .....       | (178)        |
| 第二节 液体燃料的雾化机理及其方法 .....        | (180)        |
| 第三节 液滴的蒸发与燃烧 .....             | (189)        |
| 第四节 液体燃料燃烧组织 .....             | (200)        |
| 练习与思考题 .....                   | (203)        |
| <b>第十章 固体燃料燃烧 .....</b>        | <b>(204)</b> |
| 第一节 煤的燃烧过程及燃烧方式 .....          | (204)        |
| 第二节 碳燃烧的异相反应机理 .....           | (205)        |
| 第三节 碳燃烧的化学反应 .....             | (209)        |
| 第四节 煤的燃烧方式 .....               | (215)        |
| 第五节 固体燃料燃烧器 .....              | (224)        |
| 练习与思考题 .....                   | (230)        |
| <b>第十一章 燃烧节能环保技术 .....</b>     | <b>(231)</b> |
| 第一节 燃烧过程中硫氧化物生成机理及控制技术 .....   | (231)        |
| 第二节 燃烧过程中氮氧化物生成机理及控制技术 .....   | (236)        |
| 第三节 燃烧过程中炭黑生成机理及控制技术 .....     | (240)        |
| 第四节 蓄热燃烧技术 .....               | (242)        |
| 第五节 催化燃烧技术 .....               | (244)        |
| 练习与思考题 .....                   | (246)        |

# 绪 论

工程燃烧学是能源与动力工程专业的一门专业基础课，是从事能源动力类行业工作者必须掌握的基本知识。

燃烧是可燃物与氧化剂在一定条件下发生的发光放热的剧烈氧化反应。这种发光发热的过程，就是“火”。此化学反应中含有的活泼氧原子称为氧化剂(如氧气，也可能是氟、氯等其他物质)，被氧化剂氧化的物质称为燃料，反应所生成的物质称为燃烧产物。

燃烧是一门人类最古老的技术，火是人类最早发现和应用的現象之一。大约 80% 的世界能量供应都是由燃烧生成的，其地位非常重要，无处不在，各行各业(动力、冶金、建材、化工、交通……)乃至日常生活均离不开能量，任何生产过程不投入必要的能量，都无法进行，所以它是国民经济的基础、龙头。Engles 说：“是火和燃烧的应用促进了人类和世界走向文明”。在今后一个相当长的时间里，燃料燃烧仍然是动力生产的主要来源。

在历史上，人们曾把燃料的燃烧看作是一种化学现象。但是，燃烧化学反应需具有一定的反应条件，例如反应物质的浓度和温度，这便与气体运动、分子扩散、热量传递等物理因素有关。因此，现代燃烧学认为从整个燃烧过程来看，燃料的燃烧是物理化学现象的综合过程，这些物理化学现象之间互相联系和制约，并以其综合关系决定着燃料燃烧的最终结果。特别是在工程燃烧设备的燃烧条件下，由于燃烧空间中燃料与空气的混合过程以及反应物质的浓度与温度的分布都与流体介质的速度分布密切相关，因此，燃烧空间的气体动力场的结构及其热力条件往往是影响整个燃烧过程的主要的甚至是决定性的因素。基于这一情况，所以在工程燃烧设备燃烧技术的研究和发展中，常把侧重点放在燃烧的物理过程方面。

工程燃烧学就是研究燃烧过程基本规律及其应用技术的科学。工程燃烧学的内容概况来说包括两部分，即燃烧理论和燃烧技术。燃烧理论着重研究燃烧过程所包括的各个基本现象。例如燃烧反应机理、预混可燃气体的着火和熄灭、火焰的传播机理、火焰的结构、单一油滴和碳粒的燃烧等。它主要是运用化学、传热传质学及流体力学的有关理论，由简及繁地说明各种燃烧基本现象的物理化学本质。燃烧技术主要是把燃烧理论中所阐明的物理概念和基本规律与实际工程中的燃烧问题联系起来，对现有的燃烧方法进行分析和改进，对新的燃烧方法进行探讨和实验，以不断提高燃料利用率和燃烧设备的技术水平。

工程燃烧学的研究方法包括数学分析和模型实验研究两方面。尽管大型电子计算机的出现为通过数值仿真分析实际问题预示了广泛的前景，但是，在世界范围内，对于生产中提出的燃烧技术问题主要还只能是通过实验来研究解决。目前燃烧理论的作用主要为各种燃烧过程的基本现象建立和提供一般性的物理概念，从物理本质上对各种影响因素做出定性的分析，从而对实验研究和数据处理指出合理的方向。因此，运用正确的物理概念，通过实验取得定量关系和结论，仍然是当前解决燃烧技术问题的主要手段。

在不同的领域对燃烧有着不同的要求。在工程燃烧设备应用领域中有关各类燃料的燃烧速度、燃烧稳定性、火焰的流场和结构、火焰辐射、燃烧声响、燃烧污染物生成机理以及燃烧过程数学模型的建立等都是燃烧理论要研究的重要课题。对各种燃烧设备来说，燃料的燃

烧主要为取得热能，并以火焰为媒介将热能传给被加热的物体。随着生产技术的发展，以及工艺过程的要求，各种大型、快速、连续和自动化燃烧设备相继出现。这些现代化的大型燃烧设备不仅要求配备大功率的燃烧装置以满足燃烧设备热负荷的需要，而且还往往根据生产工艺的特点对燃烧技术提出一些特殊的要求。尤其是在降低能源消耗，节约燃料资源这一重大课题方面，根据生产工艺的特点，合理组织燃烧设备中的燃烧过程更是一项重要的措施。因此，当前燃烧设备燃烧技术研究的主要问题有：针对不同燃料的燃烧特性提出合理的燃烧方法；根据生产工艺的具体要求研究并设计特殊性能的新型燃烧装置；研究高效率节能型燃烧装置；研究低噪音、低污染的燃烧技术以及为实现燃烧设备的计算机控制提供燃烧过程的数学模型。

合理组织炉内的燃烧过程，历来就是提高燃料利用效率和改进燃烧设备工作的一项重要措施。随着科学技术的发展，特别是在广泛开展节能环保活动的推动下，我国科技工作者在开展燃烧新技术和研制各种新型燃烧装置方面做了大量工作，取得了可喜成果。燃烧技术对提高燃烧设备的热效率和改进燃烧设备热工所起的重要作用也日益引起各工业部门的重视。因此，本课程的学习，掌握有关燃料燃烧的基本原理和基本知识，不仅是进一步学习本专业各门专业课的基础，而且也是今后从事能源动力行业技术工作、不断发展和提高能源动力设备科学技术水平所不可缺少的一环。

# 第一章 燃料的种类及其性质

燃料广泛应用于工农业生产和人民生活，最常见的如煤炭、石油、天然气等等，这些物质能通过燃烧释放出能量。但是并不是能够燃烧并释放能量就可以称之为燃料。例如煤、石油等燃烧后能够获得大量的热量，而塑料制品、衣物、木制家具等也能燃烧，但所获得的热量少，我们一般不把这些作为燃料使用。因此，我们可以把燃料定义为通过燃烧能获得大量热能，且这些热能能为人们以各种方式所利用的可燃物质。通过该定义，作为燃料的物质必须满足的条件包括：

- (1) 能在燃烧时释放出大量的热量(单位数量物质)。根据经验，低位发热量高于3350kJ/kg的物质可以单独作为燃料使用。
- (2) 能方便很好地燃烧。
- (3) 在自然界中蕴藏丰富，可大量开采且价格低廉。
- (4) 燃烧产物对人体、动植物和环境无害等。

## 第一节 燃料的种类

生产生活中应用的燃料多种多样，按照不同的分类原则也可以把燃料分成多种类型。

按照其生成的过程可分为天然燃料和人工燃料。天然燃料是指存在于自然界，未经过加工或转换的燃料，有煤炭、石油、天然气、木材以及页岩等；而人工燃料是指由天然燃料经过人工加工转换而成的燃料，例如木炭、焦炭、煤矸石、汽油、煤油、柴油、重油、高炉煤气、焦炉煤气、发生炉煤气、气化煤气以及沼气等。

按其来源的类型可以分为3种：化石燃料、生物燃料及核燃料。①化石燃料，亦称矿石燃料、石化燃料，是一种碳氢化合物或其衍生物，包括煤炭、石油和天然气等天然资源。化石燃料中的差异很大，可以从低碳氢比的挥发性物质到液态的石油到没有挥发性的无烟煤，如石油、煤、油页岩、甲烷、油砂、天然气等。②生物燃料，泛指由生物质组成或萃取的固体、液体或气体燃料，可以替代由石油制取的汽油和柴油，是可再生能源开发利用的重要方向。所谓的生物质是指利用大气、水、土地等通过光合作用而产生的各种有机体，即一切有生命的可以生长的有机物质，包括植物、动物和微生物，如乙醇(酒精)、生物柴油等。③核燃料，可在核反应堆中通过核裂变或核聚变产生实用核能的材料。重核的裂变和轻核的聚变是获得实用铀棒核能的两种主要方式。铀233、铀238和钚239是能发生核裂变的核燃料，又称裂变核燃料，还有铀235和钍232等。核燃料在核反应堆中“燃烧”时产生的能量远大于化石燃料，1kg铀235完全裂变时产生的能量约相当于2500t煤。

目前最常使用的分类方法是按照其形态分成的固体燃料、液体燃料和气体燃料。固体燃料是通过燃烧能产生热能或动力的固态可燃物质，大都含有碳或碳氢化合物。天然的有木材、泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤、油页岩等。经过加工而成的有木炭、焦炭、煤砖、煤球等。固体燃料还有一些特殊品种，如固体酒精、固体火箭燃料。液体燃料是能产生热能或动

力的液态可燃物质，主要含有碳氢化合物或其混合物。天然的有天然石油或原油。加工而成的有由石油加工而得的汽油、煤油、柴油、燃料油等，由油页岩干馏而得的页岩油，以及由一氧化碳和氢合成的人造石油等。气体燃料是能产生热能或动力的气态可燃物质，一般含有低分子量的碳氢化合物、氢气和一氧化碳等可燃气，并常含有氮气和二氧化碳等不可燃气体。天然的有天然气。经过加工而成的有由固体燃料经干馏或气化而成的焦炉煤气、发生炉煤气等；石油加工而得的石油气，以及由炼铁过程中所产生的高炉煤气等。燃料分类见表 1-1。

表 1-1 燃料分类

| 类别    | 天然燃料         |                      | 人工燃料                           |
|-------|--------------|----------------------|--------------------------------|
|       | 固体燃料         | 木质燃料                 |                                |
| 矿物质燃料 |              | 泥炭、烟煤、无烟煤、褐煤、石煤、油页岩等 | 焦炭、半焦炭、泥炭砖、煤矸石等                |
| 液体燃料  | 石油           |                      | 汽油、柴油、煤油、重油、渣油、沥青、焦油、甲醇、乙醇等    |
| 气体燃料  | 天然气(气田气、油田气) |                      | 液化石油气、焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气、发生炉煤气、沼气等 |

## 第二节 固体燃料的一般性质

固体燃料可分为两大类，即木质燃料和矿物质燃料，前者在工业生产中很少使用，故不予介绍。

矿物质燃料主要是煤，它不仅是现代工业热能的主要来源，随着科学技术的发展，煤也更多地用于化学工业进行综合利用。

### 一、比热容、导热系数

煤在室温条件下的比热容约为  $0.84 \sim 1.67 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，并随碳化程度的提高而变小。如图 1-1 所示。碳化程度越高的煤种，其结构越接近于石墨，较易导热，故其比热容较小。一般来说，在常温下，泥煤比热容为  $1.38 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，褐煤为  $1.21 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，烟煤为  $1.00 \sim 1.09 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，石墨为  $0.652 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。实验发现常温条件下，煤的比热容与水分和灰分含量成线性关系，并可用下式计算：

$$c_p = 4.187(0.24C_{\text{daf}} + M + 0.165A)/100 \quad (1-1)$$

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

$C_{\text{daf}}$ ——煤中碳的干燥无灰基成分，%；

$M$ ——煤中水分含量，%；

$A$ ——煤中灰分含量，%。

煤的比热容还与温度具有一定的关系，如图 1-2 所示。对不同挥发分含量的煤在  $0 \sim 350^\circ\text{C}$  范围内，比热容随着温度的提高而增大，在  $270 \sim 350^\circ\text{C}$  达到最大值；超过  $350^\circ\text{C}$ ，随着温度的升高而减小。此外，煤的比热容随煤中水分的增加而提高。这是因为，水的比热容 [ $5^\circ\text{C}$  时为  $4.184 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ] 比煤的比热容大得多，大约为其 4 倍。

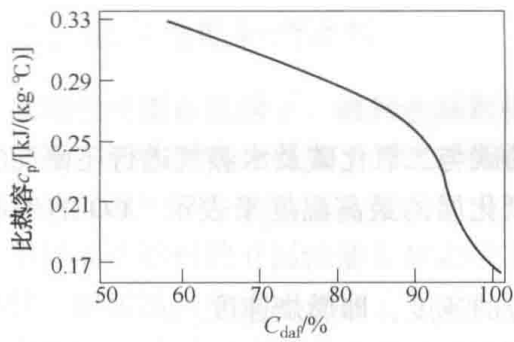


图 1-1 煤的比热容与碳含量的关系

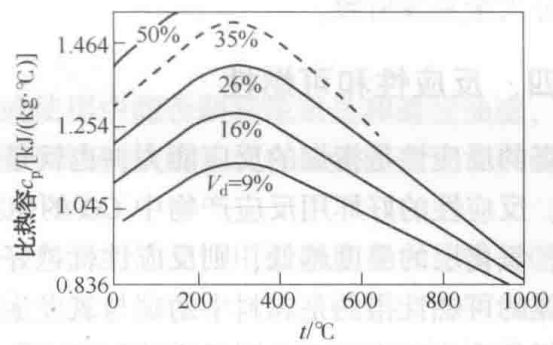


图 1-2 煤的比热容与温度的关系

煤的导热系数一般为  $0.232 \sim 0.348 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，并随碳化程度和温度的升高而增大。同一煤种，随着煤中水分的增大，煤的导热系数增加。因为水的导热系数比煤的导热系数大 [水在  $4^\circ\text{C}$  时的导热系数为  $0.58 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]。

## 二、黏结性、结焦性

所谓煤的黏结性指的是粉碎后的煤在隔绝空气的情况下加热到一定温度时，煤的颗粒相互黏结形成焦块的性质。

煤的结焦性是指煤在工业炼焦条件下，一种煤或几种煤混合后的黏结性，也就是煤能炼出冶金焦的性质。

因此，煤的黏结性和结焦性是两个不同的概念，但两者在本质上又有相同之处，一般来说，黏结性好的煤结焦性就比较强。

了解煤的黏结性和结焦性是很重要的，可以知道某种煤是否适于炼焦。煤的黏结性和结焦性对于煤的气化和燃烧性能也有很大的影响，例如具有强黏结性的煤在气化和燃烧时，由于煤的黏结，容易结成大块，严重影响气流的均匀分布。

煤的黏结性的测定方法以坩埚法最为普遍，它是在实验室条件下用坩埚法测定挥发分产率之后，对所形成的焦块进行观察，根据焦块的外形分为 7 个等级，称为黏结序数，以此来评定黏结性的强弱。各黏结序数的代表特征是：

- (1) 焦炭残留物均为粉状；
- (2) 焦炭残留物黏着，以手轻压即成粉状；
- (3) 焦炭残留物黏结，以手轻压即碎成小块；
- (4) 不熔化黏结，用手指用力压裂成小块；
- (5) 不膨胀熔化黏结，成浅平饼状，表面有银白色金属光泽；
- (6) 膨胀熔化黏结，表面有银白色金属光泽，且高度超过 15mm；
- (7) 强膨胀熔化黏结，表面有银白色金属光泽，且高度大于 15mm。

## 三、煤的耐热性

煤的耐热性是指煤在加热时是否易于破碎而言。耐热性的强弱能直接影响到煤的燃烧和气化效果。耐热性差的煤(主要是无烟煤和褐煤)，气化和燃烧时容易破碎成碎片，妨碍气体在炉内的正常流通，并容易发生烧穿现象，使气化过程变坏。

无烟煤耐热性低的原因主要是由于其结构致密，加热时因内外温差而引起膨胀不均，造成了煤的破裂。但经过热处理后，可以改善其耐热性。至于褐煤的耐热性差，主要是由于内

部水分大量蒸发所致。

#### 四、反应性和可燃性

煤的反应性是指煤的反应能力，也就是燃料中的碳与二氧化碳及水蒸气进行还原反应的速度。反应性的好坏用反应产物中 CO 的生成量和氧化层的最高温度来表示。CO 的生成量越多，氧化层的温度越低，则反应性就越好。

煤的可燃性指的是燃料中的碳与氧发生氧化反应的速度，即燃烧速度。

煤的碳化程度越高，则反应性和可燃性就越差。

综合以上可以看出，不同品种和不同产区的煤，其物理化学和工艺性能往往差别很大。为了合理地利用煤的资源，必须根据煤的特性加以分类研究。

### 第三节 液体燃料的一般性质

液体燃料有天然液体燃料和人造液体燃料两大类。前者指石油；后者指石油加工产品，或从煤炭、油页岩热加工所获得的产物，再进行分馏得到的一系列液体燃料产品。

#### 一、密度

密度即单位体积内所含物质的质量，用符号  $\rho$  表示，国际单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。我国标准规定，石油或石油产品的密度，以  $20^\circ\text{C}$  时的密度  $\rho_{20}$  为标准密度。同体积的油和水的质量比为相对密度，故相对密度为无因次数。

我国常用的油料相对密度为  $20^\circ\text{C}$  的油与  $4^\circ\text{C}$  时同体积的纯水（密度为  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ）的质量之比，以符号  $d_4^{20}$  表示。可见油的密度与相对密度含义不同，但数值是一样的。

若测定相对密度时的油温不是  $20^\circ\text{C}$ ，则可用下式进行换算：

$$d_4^t = d_4^{20} + \alpha(20 - t) \quad (1-2)$$

式中  $d_4^t$ ——油温为  $t^\circ\text{C}$  时油的相对密度测定值；

$d_4^{20}$ ——换算成  $20^\circ\text{C}$  时油的相对密度值；

$t$ ——测定相对密度时的油温， $^\circ\text{C}$ ；

$\alpha$ ——温度校正系数， $1/^\circ\text{C}$ 。

石油产品的相对密度随馏分不同而不同。如汽油的相对密度不大于 0.76；溶剂油相对密度不大于 0.795；煤油的相对密度不大于 0.83；轻质润滑油相对密度在 0.86~0.90 之间；重质润滑油的相对密度可达 0.93；渣油的相对密度在 1.00 左右。燃料油因其组分不同，相对密度在 0.8~0.98 之间。

$d_4^{20}$  测定油料的方法可根据所要求测定相对密度的准确度而采用不同的方法，有相对密度计法、韦氏天平法和相对密度瓶法 3 种。应用相对密度计法较为简便，可自插入试油的恒重相对密度计上直接读出相对密度的数值，然后再根据测试的油温按上式换算成  $20^\circ\text{C}$  下的通用密度。在重油供应系统的设计中，重油相对密度是常用数据，又是表示油中水分和机械杂质沉淀难易程度的指标。相对密度越小，油中的水分和机械杂质越易沉淀，相对密度越大，越难沉淀。液体燃料一般是各种烃的混合物，其相对分子质量是一种平均相对分子质量。一般随馏程增高而增大，可以由一些经验式估算。

## 二、低温性能和流动性

低温性是指在低温下，燃料在燃料供应系统或使用中能否顺利地泵送和通过油滤，保证正常供油。液体燃料在低温下的流动性能不仅关系到燃料供给系统在低温能否正常供油，还与燃料的低温贮存、运输等能否正常进行有密切的关系。

不同液体燃料的低温性能参数表示不同。航空汽油的低温性用结晶点表示，喷气燃料的低温性一般用结晶点或冰点表示，同时还要求测定低温下的黏度。柴油的低温性用浊点、凝点(凝固点)和冷滤点表示，国外也有用倾点表示的。锅炉燃料油馏分较重，颜色较深，一般只要求测定凝点。

### 1. 结晶点和冰点

结晶点是在测定条件下冷却时，能用肉眼观察到燃料中有结晶出现时的最高温度。到达结晶点后，燃料温度逐渐升高，结晶完全消失时的最低温度称为液体燃料的冰点。同一燃料的冰点一般比结晶点高 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。结晶点过高的燃料在寒区使用中会在低温堵塞油滤，影响发动机的正常供油。

结晶点的测试方法为：测定时将试样分别装入两支洁净干燥的双壁试管中，其中一支试管中的油样须按规定的条件进行冷却。当燃料中开始呈现为肉眼所能看见的晶体时，温度计上所示的温度就是该燃料的结晶点。

冰点的测试方法为：将 $25\text{mL}$ 试样倒入洁净干燥的双壁试管中，在试管中装好搅拌器和温度计，将双壁试管放入有冷却介质的保温瓶中，在不断搅拌下使试样降温，直到试样中出现肉眼能看到的晶体，然后取出试管使试样缓慢升温直至结晶完全消失时的最低温度称为燃料冰点。

为防止燃料在低温下析出冰晶，需减少燃料中的水分含量，防止水分析出，降低水的冰点，避免形成冰晶，为此工程上通常采用冷冻过滤法除去冰晶，加热燃油，使用防冰添加剂(醇类和醚类化合物)等方法改善燃料的低温性能。

### 2. 黏度

低温黏度是表示石油产品低温下( $0^{\circ}\text{C}$ 以下)流动性大小的指标。燃料的黏度对燃料输送、油泵寿命、喷嘴雾化、低温点火启动等有很大关系。黏度越大，喷雾质量越差。黏度主要取决于燃料中所含碳氢化合物的组成(黏度依如下次序降低：多环环烷烃、环烷烃、芳香烃、烷烃)，同时随温度而极为显著地变化(尤其低温)。

黏度是评价黏性油品流动性的指标。它对作为燃料油的重油卸车、脱水、管线压力降以及在炉膛中雾化质量有重要影响。和其它燃料油一样，重油的黏度随温度而变化。油温高黏度小，降低温度黏度增大。根据重油这一物理性质，采用加热方法降低其黏度以满足重油储运和雾化的要求。

液体的黏度实为液体分子之间的一种物性，一般的液体当受到外力作用，如果液体沿管道内流动时，管道截面上的各层液体的流速并不相同，管道中心的液体流速最大，而管壁上的液体流速为零。这是因为液体流动时，液体内部各流动层之间产生了摩擦力，它阻止靠近管壁的液体流动。液体流动时产生阻力的这种物性称为液体的黏度。液体种类不同，其分子结构型式各异，因而即使在相同温度下，不同液体的黏度也各不相同。在工程计算中，对同一种液体，有动力黏度、运动黏度及恩氏黏度等不同名称。这只是用不同的单位表示相同的黏度，它们之间的数值可以换算。

(1) 动力黏度( $\mu$ )。动力黏度的国际单位为帕·秒(Pa·s), 或牛·秒/米<sup>2</sup>(N·s/m<sup>2</sup>)。温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 的某种液体的动力黏度用符号 $\mu_t$ 表示。在有关的热工手册中可查到不同温度下各种油品的 $\mu_t$ 值。

(2) 运动黏度( $\nu$ )。某一种液体在同一温度下, 其动力黏度与密度之比值称为该液体的运动黏度, 即:

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho_t} \quad (1-3)$$

式中  $\nu_t$ ——液体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\mu_t$ ——液体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的动力黏度,  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ;

$\rho_t$ ——液体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(3) 恩氏黏度。200mL 温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 的燃油通过恩氏黏度计的标准容器, 全部流出所需时间与同体积的 $20^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水由同一标准容器中流出时间之比, 称为该油在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的恩氏黏度, 用符号 $^{\circ}E_t$ 表示。它和运动黏度的关系为:

$$\nu_t = 7.31^{\circ}E_t - \frac{6.31}{^{\circ}E_t} \quad (1-4)$$

燃油的黏度与温度有关, 它随着温度升高而降低。燃油的黏度随着分子量的增大而增大。燃油的黏度按下列油品顺序依次递增, 即汽油、宽馏分, 煤油、柴油以及重油。对高黏度的重油, 为了保证其在管道中顺利输送与在喷嘴处良好的雾化, 需对它进行预热。

此外在压力较低时(1~2MPa), 压力对黏度也有影响, 可以不计。但在压力较高时, 黏度则随压力升高而变大。

重油就是按照其黏度的大小分成四个等级牌号: 20号、60号、100号和200号, 它的牌子是指它在 $50^{\circ}\text{C}$ 时的恩氏黏度值, 如200号重油即表示该油在 $50^{\circ}\text{C}$ 时恩氏黏度为 $200^{\circ}\text{E}$ 。

### 3. 浊点、凝点和冷滤点

浊点是在规定条件下对液体燃料降低温度, 燃料中开始产生蜡晶或冰晶而变浑浊的最高温度。

浊点的测定方法为: 在与测定结晶点相同的仪器中进行。按规定方法冷却的油样, 在预计浊点前 $5^{\circ}\text{C}$ , 开始与未进行冷却的油样比较。如未发现浑浊, 应再进行冷却, 每降低 $1^{\circ}\text{C}$ 观察一次, 直到试油出现浑浊为止, 试油开始出现浑浊的温度即为该油的浊点。浊点表示可能堵塞过滤器的温度, 它是柴油的重要使用指标。为保证发动机低温下燃料的正常供应, 柴油使用温度一般应高于浊点 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。

凝点又称凝固点, 是石油产品在低温下失去流动性的最高温度。

凝点测定方法为: 将试油放在规定的玻璃试管中, 当冷却到预期的温度时, 将试管倾斜 $45^{\circ}$ 经过1min, 观察液面是否移动。反复试验, 直至确定某温度下油样液面停留不动而提高 $2^{\circ}\text{C}$ 又能使液面移动, 取使液面保持不动的温度, 称为试油凝点。

燃油的凝点与它的组成有关。一般说, 重质油较高, 轻质油较低, 如重油凝点一般在 $16\sim 36^{\circ}\text{C}$ , 或更高, 而柴油则在 $-35\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。按国家标准, 柴油是按其凝点高低来分等级, 如轻柴油可分成10号、0号、 $-10$ 号、 $-20$ 号和 $-35$ 号五级, 重柴油则分成RC3-10与RC3-20两级。等级号码就是它的凝点的数值, 如 $-10$ 号轻柴油就是指它的凝点为 $-10^{\circ}\text{C}$ , RC3-20重柴油就是指它的凝点为 $-20^{\circ}\text{C}$ 。

冷滤点是在规定试验条件下, 试油在1min内开始不能通过过滤器20mL时的最高温度。

冷滤点测定测定方法为：取 45mL 油样在规定条件下冷却后，在 2kPa 压力下抽吸，使试样通过一个 363 目的过滤器。当试油冷却到一定温度后，以 1~2℃ 间隔降温，测定 20mL 油通过过滤器的时间。在 1min 内，过滤器滤网不能通过 20mL 油样的开始温度称为柴油的冷滤点。

冷滤点表示柴油的最低使用温度。冷滤点比浊点和凝点更具有实用性。柴油温度降至浊点时，蜡结晶颗粒很小，并不一定引起滤清器堵塞，而在温度尚未降至凝点之前，滤清器就已堵塞，所以浊点和凝点实用意义不大，许多国家用冷滤点取代了浊点和凝点。

工程上改善柴油低温性能的措施通常将柴油经过脱蜡工艺，脱蜡程度越深，柴油的低温性就越好。或是采用降凝剂，降低柴油的凝点和冷滤点。

### 三、馏程与沸点

馏程是指馏分的温度范围，馏程中的馏分组成则表达了不同温度下馏出物量的关系。燃油的馏程是极为重要的，它很大程度上决定了燃料的物理性质和燃烧性质，决定了每吨原油可产该种燃油的产出率。希望增大产出率则要加宽馏程，即多“切”一些。这时可以降低初馏点，或提高终馏点。这样在增大产量的同时，一定会影响到燃料的性质(例如闪点、冰点等)。

燃油是混合物，所以没有单一的沸点，常用 50% 馏点温度来表征燃油的沸点，然后其他各物性(如黏度、比热容等)又与平均沸点或中馏点来建立关系。常压下中馏点又称正常沸点。

### 四、蒸气压和临界参数

当燃料表面保持气液平衡时，饱和蒸气产生的分压称为饱和蒸气压。在任何压力下均能将气体液化的最低温度称为临界温度。换句话说，在临界温度之上无论加多大压力都不可能使气体液化，在临界温度时与液相处于平衡的气相压力为临界压力。在临界状态时，纯物质的气态和液态性质已经没有区别(密度一样，蒸发潜热为零)。临界参数在计算(例如密度、导热性等)时要用到。

### 五、比热容、导热系数

在传热计算及蒸发计算中用到燃油比热容。在很高飞行速度下的飞行器中，燃油可以用来吸收热量，这时比热容是燃油的重要性质。烷烃是最佳的，比环烷烃或芳烃的比热容都高。燃油的比热容与温度有关，在  $t^{\circ}\text{C}$  下，其比热容可用下式计算：

$$c_{pt} = 1.737 + 0.0025t \quad (1-5)$$

式中  $c_{pt}$ —— $t^{\circ}\text{C}$  时的燃油比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

燃油导热系数在做传热计算时用到，它随温度升高而降低，对于运动黏度为  $(2.0 \sim 13.5) \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  的燃油可用下式计算：

$$\lambda_t = \lambda_{20} - k_{\lambda}(t - 20) \quad (1-6)$$

式中  $\lambda_{20}$ —— $20^{\circ}\text{C}$  时的燃油导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，高黏度裂化重油约为  $0.158 \text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，低黏度油约为  $0.145 \text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

$k_{\lambda}$ ——常数，对裂化重油取  $0.00018$ ，直馏渣油取  $0.00011$ 。

## 六、燃烧性质

燃料的燃烧性质影响到火焰温度，影响到可燃边界、着火性、化学反应速率以及生成烟粒子的倾向。

### 1. 液体燃料热值

热值是燃料最重要的性质。单位质量或体积的燃料完全燃烧所放出的热量称为质量热值或体积热值。单位质量燃料(温度 25℃)和空气(温度 25℃)燃烧产物冷却下来最终温度回到 25℃(在常压下)所放出的燃烧热(这时燃烧产物中水蒸气冷凝成水)称为高热值。在高热值中扣去由于水蒸气冷凝所放出的热称为低热值。在低热值中假设燃烧产物全部都是气态。

### 2. 自燃着火温度

自燃着火是在没有外界点火源时完全因燃油自身温度升高而使燃油自动着火的。自燃着火温度可测定如下：

将少量油样置于已加热处于高温的坩埚内，测量其达到着火的时间延迟。随后降低温度，重复试验，这时着火时间延迟增大，直到某个最小着火温度，比这温度再低，无论延迟时间多长，都不着火了。着火温度是随压力降低而增大的。

### 3. 闪点、燃点、着火点

闪点也称闪火点，是指油料的蒸气与空气的混合物在临近火焰时发生短暂(时间不超过 5s)燃烧的温度。从火焰的物理化学本质来看，即是可燃气体与空气混合物极小的爆炸。如同所有的混合气体爆炸一样，闪火只能在一定混合物组成的情况下产生，当可燃气体过多或过少，爆炸都不能发生。因此，它和可燃液体的蒸发性以及在空气混合物中的最低含量有关。

在常温下，大多数液体燃料的蒸气是不能同空气中的氧气发生闪火的。为了测定油料的闪点，就需要将油料加热，并在加热过程中每隔一定时间试验闪点能否发生。测定是在严格的规定条件下进行的。它与使用的仪器及实验方法的每一个细节都有密切关系。所以闪点也是一个条件常数。闪点测定的方法有开口杯法(油表面暴露在大气中)和闭口杯法(油表面封闭在容器中)，开口杯法一般测定闪点较高的油，如重油等，闭口杯法一般测定闪点较低油，如汽油。同一油品开口法测定的闪点值较闭口法高 15~25℃。表 1-2 列出了常见石油产品的闪点。燃油的密度越低，相对分子质量越小，闪点越低；沸点越低，闪点也越低；燃油的压力越高，闪点越高。

表 1-2 常见石油产品的闪点

| 燃油类别 | 汽油     | 煤油       | 轻柴油      | 重柴油      | 重油        | 石油       |
|------|--------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| 闪点/℃ | -20(闭) | 20~30(闭) | 50~60(闭) | 65~80(闭) | 80~130(闭) | 30~50(闭) |

闪火只是瞬间的现象，它不会继续燃烧。如果油温超过闪点，使油的蒸发速度加快，以致闪火后能继续燃烧而不熄灭(不少于 5s)的最低油温叫做油的燃点。燃点一般要高于闪点 10~30℃(或更多)。如果继续提高油温，则油表面的蒸气会自己燃烧起来，这种现象叫自燃，这时对应的最低油温叫做油的着火点。

闪点、燃点和着火点是防止火灾，鉴别油着火、燃烧性能的重要指标。同时对于燃油贮存和运输的安全性以及燃油的燃烧性能具有重要的意义。为了安全起见，在开口容器中加热燃油时，加热温度至少应低于其闪点 10℃，以免发生火灾。燃烧室或炉膛中的温度不应低