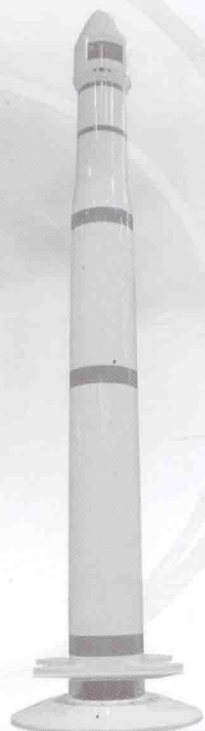




普通高等教育创新型人才培养规划教材



火箭发动机燃烧基础

HUOJIAN FADONGJI
RANSHAO JICHU

陈军 王栋 封锋 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育创新型人才培养规划教材

火箭发动机燃烧基础

陈军 王栋 封铎 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书主要阐述有关燃烧的基础知识、燃烧的基本原理及火箭发动机工作过程的燃烧理论,内容包括绪论、化学动力学基础、热力学原理、化学热力学、燃烧流动控制方程、燃烧中的物理过程、火焰理论、着火和熄火、液体推进剂的燃烧、火箭发动机射流燃烧、固体推进剂的燃烧、固体火箭发动机的侵蚀燃烧和不稳定燃烧及计算燃烧学概论等。前7章为燃烧知识的基础部分,后6章为燃烧知识的专业部分。

全书围绕固体火箭发动机、液体火箭发动机及气体混合物的燃烧,力求系统阐述各燃烧过程的各个方面,在侧重于基本概念与基本理论的同时,兼顾工程应用与计算,除附有例题外,还附有大量工程数表。在内容选取上力求体现燃烧理论的最新发展,以及经典燃烧理论与火箭推进技术的有机结合。

本书可作为高等院校火箭发动机及相关专业的高年级本科生教材(基础部分)或研究生教材(专业部分),也可供从事燃烧理论及火箭推进技术研究、火箭设计与生产的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火箭发动机燃烧基础 / 陈军等编著. — 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-5124-1688-8

I. ①火… II. ①陈… III. ①火箭发动机—燃烧
IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 030070 号

版权所有,侵权必究。

火箭发动机燃烧基础

陈 军 王 栋 封 锋 编著

责任编辑 张军香

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:24 字数:511 千字

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1688-8 定价:50.00 元

前 言

现代武器对动力系统提出了很高的要求,各种火箭推进装置得到了前所未有的发展。这些推进装置具有各自的工作原理、性能特点和适用范围,其燃烧原理至今仍然是研究的热点,这增加了人们全面深入了解它们的难度,特别是相关专业的在读学生和从事武器设计的科研人员。本教材正是在这一背景下撰写的,从基本的燃烧基础知识出发,侧重于火箭推进装置的共性阐述,探讨了不同类型发动机的燃烧和工作原理,有助于综合理解不同火箭发动机的燃烧特点。

本教材是在编者多年讲义的基础上编写的,并参考了相关教材、专著及国内外文献,在内容选取上力求体现燃烧理论的最新发展,以及经典燃烧理论与火箭推进技术的有机结合。根据火箭武器(武器系统与运用工程)、航空宇航推进理论与工程等专业的培养目标和业务范围,为适应教学大纲的新要求,本教材注重与专业课程的衔接和燃烧学知识的系统性,强化了燃烧的基础知识,在传统的固体火箭发动机燃烧知识基础上,扩展了液体火箭发动机和气体混合物的燃烧知识,并增加了计算燃烧学基本原理的相关内容。

全书力求在系统阐述燃烧基本概念与基本理论的同时,兼顾工程应用与计算,除附有例题外,还附有大量工程数表。主要内容包括绪论、化学动力学基础、热力学原理、化学热力学、燃烧流动控制方程、燃烧中的物理过程、火焰理论、着火和熄火、液体推进剂的燃烧、火箭发动机射流燃烧、固体推进剂的燃烧、固体火箭发动机的侵蚀燃烧和不稳定燃烧,以及计算燃烧学概论等,其中第1~7章为燃烧知识的基础部分,第8~13章为燃烧知识的专业部分。本教材用于教学时,基础部分参考教学时数为32学时,基础与专业部分的参考教学时数为48学时。

本教材由陈军、王栋和封锋编写,其中第2、3、4章由王栋编写,第6、7、8章由封锋编写,其余由陈军编写。全书由孙思诚主审,他对教材中的内容提出了很多指导性意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点、错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2015年1月于南京

主要符号意义(功、热和能)

符 号	意 义	单 位
e	体积总贮能(单位体积的贮能), $e = \rho E$	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$
e_u	比内能	J/kg
E	比贮能, $E = e_u + V^2/2 + gz$	J/kg
	活化能	J/mol 或 kJ/mol
E_m	质量总贮能	J
f	比赫姆霍尔兹自由能	J/kg
F	赫姆霍尔兹自由能	J
g	比吉布斯自由能	J/kg
gz	比重力位能	J/kg
G	吉布斯自由能	J
$G_{m,T}$	摩尔吉布斯自由能	J/mol 或 kJ/mol
$G_{m,T}^0$	标准摩尔吉布斯自由能	J/mol 或 kJ/mol
$G_{f,T}^0$	标准生成自由能	J/mol 或 kJ/mol
$\Delta G_{RT,T}^p$	反应自由能	J/mol 或 kJ/mol
$\Delta G_{RT,T}^0$	标准反应自由能	J/mol 或 kJ/mol
h	比焓	J/kg
h_0	总焓	J/kg
H	质量焓	J
$H_{b,T}^0$	燃烧焓, 标准摩尔燃烧焓	J/mol 或 J/kg , kJ/mol 或 kJ/kg
$H_{m,T}^0$	标准摩尔焓	J/mol 或 kJ/mol
$H_{f,T}$	生成焓	J/mol 或 J/kg , kJ/mol 或 kJ/kg
$H_{f,298}^0$	标准生成焓	J/mol 或 J/kg , kJ/mol 或 kJ/kg
H_L	汽化潜热	J/kg 或 kJ/kg
$\Delta H_{RT,T}^p$	反应焓	J/mol 或 J/kg , kJ/mol 或 kJ/kg
$\Delta H_{RT,T}^0$	标准反应焓	J/mol 或 J/kg , kJ/mol 或 kJ/kg



续表

符 号	意 义	单 位
q	一般意义的热量(如化学反应热)符号,指单位物质系统获得或放出的热量(比热量)	J/kg 或 J/mol, kJ/kg 或 kJ/mol
$\dot{q}$	热流密度(热流率)	W/m ² 或 J/(s · m ²)
Q	系统热量	J
δQ	微元过程(微元体积)系统热量	J
$Q_{b,T}^0$	热值	J/mol 或 J/kg, kJ/mol 或 kJ/kg
$Q_{b,T,h}^0$	高热值	J/mol 或 J/kg, kJ/mol 或 kJ/kg
$Q_{b,T,l}^0$	低热值	J/mol 或 J/kg, kJ/mol 或 kJ/kg
$\dot{Q}$	单位时间获得的总热量	J/s 或 W
$\dot{Q}_G$	给定体积的总放热率	J/s 或 W
$\dot{Q}_L$	给定体积的总散热率	J/s 或 W
$\delta \dot{Q}$	单位时间单位体积系统的总热量	W/m ³ 或 J/(s · m ³)
$\delta \dot{Q}_R$	除开导热项的单位时间单位体积系统的总热量	W/m ³ 或 J/(s · m ³)
$\delta \dot{Q}_G$	单位体积的放热率,即空间放热率	J/(s · m ³) 或 W/m ³
$\delta \dot{Q}_L$	单位体积的散热率,即空间散热率	J/(s · m ³) 或 W/m ³
U	内能(热力学能)	J
$v^2/2$	比动能	J/kg
w	单位质量物质做的功	J/kg
W	系统做功	J
δW	微元过程(微元体积)系统做功	J
$\dot{W}$	单位时间做的功,功率	J/s 或 W

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 燃烧的一般概念	1
1.1.1 可燃物	2
1.1.2 不同状态物质的燃烧	4
1.2 燃烧科学的发展	5
1.2.1 经典燃烧学	6
1.2.2 火箭推进剂燃烧学	7
1.2.3 计算燃烧学	12
1.3 着火、火焰传播与熄火	14
1.3.1 着 火	14
1.3.2 火焰传播	17
1.3.3 熄 火	18
参考文献	21
第 2 章 化学动力学基础	22
2.1 多组分气体混合物	22
2.1.1 分压强和分容积	23
2.1.2 气体混合物组分的表示方法	24
2.1.3 气体混合物参数的换算关系	25
2.2 化学反应速率	26
2.2.1 基元反应与总包反应	26
2.2.2 基元反应的化学反应速率	27
2.2.3 总包反应的化学反应速率	30
2.3 化学反应级数	33
2.3.1 化学反应级数的定义	33
2.3.2 化学反应级数的实验测定	35
2.4 化学反应的机理	41
2.4.1 碰撞理论	41
2.4.2 过渡态理论	43
2.4.3 阿累尼乌斯定律	44



2.4.4 用阿累尼乌斯定律表示的化学反应速率公式·····	45
2.4.5 影响化学反应及化学平衡的因素·····	46
2.5 链反应·····	49
2.5.1 直链反应·····	50
2.5.2 分支链反应·····	51
参考文献·····	54
第3章 热力学原理 ·····	55
3.1 热力学基本知识·····	55
3.1.1 热力学系统·····	55
3.1.2 功与热量·····	56
3.1.3 热力学第一定律·····	58
3.1.4 热力学第二定律·····	59
3.2 热力学第三定律与绝对熵·····	62
3.3 状态函数·····	63
3.4 热力学普遍关系式·····	64
3.4.1 全微分的性质·····	64
3.4.2 麦克斯韦尔关系式·····	64
3.4.3 比热容·····	66
3.4.4 其他热力学普遍关系式·····	67
3.5 气体混合物的热力性质·····	69
3.5.1 气体混合物的内能和焓·····	69
3.5.2 气体混合物的比热容·····	70
3.5.3 气体混合物的熵·····	70
3.5.4 气体混合物的标准摩尔焓、标准摩尔熵、标准摩尔比定压热容 和 JANAF 热力数据表·····	71
3.5.5 气体混合物的自由能·····	77
参考文献·····	77
第4章 化学热力学 ·····	78
4.1 化学反应与化学反应热·····	78
4.1.1 热化学反应方程式和反应热·····	78
4.1.2 盖斯定律·····	83
4.1.3 基尔霍夫定律·····	84
4.2 燃料及其燃烧性质·····	87
4.2.1 燃料的化学组成·····	88



4.2.2 燃料燃烧性质的工程计算	91
4.3 化学反应平衡	95
4.3.1 化学反应的进行方向	96
4.3.2 标准反应自由能与标准生成自由能	97
4.3.3 化学反应平衡	100
4.4 平衡组分与绝热燃烧温度	106
4.4.1 复杂化学反应系统的平衡组分	106
4.4.2 绝热燃烧温度	109
参考文献	111
第5章 燃烧流动控制方程	113
5.1 有限速率化学反应流动	113
5.1.1 组分及气体混合物连续方程	114
5.1.2 动量方程	115
5.1.3 能量方程	117
5.1.4 控制方程组的矩阵表示法	119
5.1.5 柱坐标系下的控制方程	121
5.2 有限速率化学反应湍流流动	123
5.2.1 雷诺时均方程	124
5.2.2 湍流模型	126
5.2.3 湍流燃烧模型	128
5.3 流动与燃烧模型方程	129
5.3.1 等截面一维流动控制方程	129
5.3.2 变截面一维定常流动控制方程	131
5.3.3 二维柱坐标定常流动控制方程	133
参考文献	135
第6章 燃烧中的物理过程	136
6.1 输运系数	136
6.1.1 输运定律	136
6.1.2 输运系数的计算	138
6.1.3 温度和压强对输运系数的影响	142
6.1.4 输运系数的相似准则	143
6.2 燃烧中的传热和传质	145
6.2.1 传热的基本定律	145
6.2.2 边界层理论	149



6.3 斯蒂芬流	163
参考文献	165
第7章 火焰理论	166
7.1 燃烧现象的分类	166
7.1.1 直接法	167
7.1.2 邓克勒准则	168
7.2 简单化学反应系统	168
7.3 预混燃烧	170
7.3.1 本森灯	170
7.3.2 燃烧波	172
7.3.3 层流火焰的传播动力学	176
7.3.4 湍流预混火焰传播	179
7.3.5 火焰的稳定	182
7.4 湍流燃烧模型	183
7.4.1 湍流扩散火焰的 $k-\epsilon-\bar{b}_f-g$ 燃烧模型	184
7.4.2 湍流预混火焰的燃烧模型	187
参考文献	189
第8章 着火和熄火	190
8.1 热自燃着火与熄火	190
8.1.1 谢苗诺夫热自燃理论	190
8.1.2 熄火	197
8.2 强迫着火	198
8.2.1 炽热颗粒的引燃	198
8.2.2 火焰点火	200
8.2.3 电火花点火	201
8.2.4 高能点火	203
8.3 火箭发动机的点火和熄火	203
8.3.1 火箭发动机的点火过程	204
8.3.2 滞止点火理论	205
8.3.3 流动传热点火理论	207
8.3.4 火焰的传播	208
8.3.5 火箭发动机的熄火	209
参考文献	211



第 9 章 液体推进剂的燃烧	213
9.1 液滴的蒸发	213
9.1.1 液滴蒸发模型与控制方程	213
9.1.2 液滴蒸发速率的解	214
9.1.3 传质数的计算	217
9.1.4 液滴的蒸发时间——液滴寿命	220
9.2 液滴的燃烧	221
9.2.1 液滴燃烧模型与控制方程	221
9.2.2 液滴燃烧速率的解	222
9.2.3 液滴的燃烧时间	224
9.2.4 液滴燃烧的火焰位置	224
9.2.5 液滴燃烧的温度分布	225
9.2.6 液滴燃烧的浓度分布	227
9.3 雾化燃烧	228
9.3.1 雾化原理	228
9.3.2 雾化装置	229
9.3.3 雾化性能	232
9.3.4 对流燃烧	235
9.3.5 雾化燃烧	236
9.4 液体推进剂火箭发动机	238
9.4.1 液体火箭发动机的结构原理	238
9.4.2 燃烧过程	240
9.4.3 喷嘴参数设计	241
参考文献	243
第 10 章 火箭发动机射流燃烧	244
10.1 射流的基本知识	244
10.1.1 射流的结构和特征	244
10.1.2 物理射流控制方程	246
10.1.3 控制方程的解	247
10.1.4 层流射流的解	248
10.1.5 湍流射流的解	249
10.1.6 温度与组分分布	250
10.2 自由射流的燃烧	251
10.2.1 控制方程及求解	251



10.2.2 火焰形状·····	253
10.3 贝克-舒曼受限射流燃烧·····	254
10.3.1 贝克-舒曼受限射流燃烧方程·····	255
10.3.2 贝克-舒曼火焰形状·····	257
10.3.3 贝克-舒曼火焰高度·····	258
10.4 火箭燃气射流·····	259
10.4.1 火箭燃气射流的特点·····	260
10.4.2 第一马赫盘的位置·····	262
10.4.3 射流边界·····	264
10.4.4 射流火焰·····	268
参考文献·····	270
第 11 章 固体推进剂的燃烧 ·····	271
11.1 双基推进剂的稳态燃烧机理·····	273
11.1.1 双基推进剂的燃烧波结构·····	273
11.1.2 双基推进剂的稳态燃烧理论·····	275
11.2 AP 复合推进剂的稳态燃烧机理·····	282
11.2.1 AP 复合推进剂的燃烧波结构·····	282
11.2.2 粒状扩散火焰模型(GDF 模型)·····	284
11.2.3 BDP 多火焰模型·····	289
11.3 复合改性双基推进剂的稳态燃烧机理·····	297
11.3.1 AP/CMDB 推进剂的稳态燃烧·····	298
11.3.2 HMX/CMDB 推进剂的稳态燃烧·····	299
11.4 含金属推进剂的稳态燃烧·····	300
11.4.1 金属粉末的燃烧特性·····	300
11.4.2 含铝推进剂的燃烧·····	301
11.5 超高燃速推进剂的稳态燃烧·····	305
11.5.1 超高燃速推进剂的结构特征·····	305
11.5.2 超高燃速推进剂的燃烧特性·····	306
11.5.3 超高燃速推进剂的对流燃烧理论·····	307
参考文献·····	310
第 12 章 固体火箭发动机的侵蚀燃烧和不稳定燃烧 ·····	312
12.1 侵蚀燃烧·····	312
12.1.1 侵蚀函数·····	312
12.1.2 侵蚀燃烧的机理·····	314



12.1.3 勒努尔-罗比拉德侵蚀燃烧理论	316
12.1.4 扩散火焰弯曲理论	318
12.2 不稳定燃烧	320
12.2.1 不稳定燃烧的基本概念	320
12.2.2 声不稳定燃烧的机理	325
12.2.3 声不稳定燃烧的线性稳定性预估	329
参考文献	333
第 13 章 计算燃烧学概论	335
13.1 燃烧流动控制方程及其性质	336
13.1.1 燃烧流动控制方程组的类型	336
13.1.2 守恒型方程和非守恒型方程	339
13.1.3 方程的无量纲化	340
13.2 燃烧流动控制方程的离散	341
13.2.1 网格生成	341
13.2.2 控制方程组的有限差分离散	343
13.2.3 离散方程的相容性、收敛性和稳定性	349
13.3 数值计算格式	350
13.3.1 对流-扩散方程及其精确解分析	350
13.3.2 中心差分格式	352
13.3.3 对流项一阶迎风格式	354
13.3.4 对流项高精度迎风格式	355
13.3.5 TVD 格式	357
13.3.6 离散方程组的求解	358
13.4 求解燃烧问题的 SIMPLE 方法	360
13.4.1 控制方程的统一形式	360
13.4.2 交错网格与动量方程的离散	362
13.4.3 压强校正	362
13.5 数值模拟软件	365
13.5.1 模拟软件编制	365
13.5.2 商业软件简介	366
参考文献	368

第1章 绪论

火的应用是人类文明的重要标志,是人类最早征服的自然现象之一,其历史至少有 50 万年了。火即意味着燃烧,人们应用燃料燃烧产生的热能进行取暖、烹饪和照明,大大促进了人类文明的进步。科技发达的今天,人类活动与燃烧更加紧密,燃烧的应用已深入到武器系统、航空航天、基础建设、低碳环保、防灾减灾等各个领域。

火药是中国的四大发明之一,它的出现预示着热兵器时代的到来,从而使得燃烧与武器系统密切相关。武器的发展与燃烧科学的发展紧密相连。霹雳弹、枪、火炮、火箭弹、导弹等的发展变迁反映了燃烧科学的发展。

飞翔和探索星空一直是人类的梦想。飞机的发明,使得人们可以穿云破雾,翱翔蓝天。航天飞机、卫星的出现,使人们的视线扩展到地球之外。火箭的出现,使人类探索外太空真正成为可能。人类从仰望星空,发展到探索星空,依赖于物质燃烧的研究成果。

火炸药的发明使人类可以大规模改造自然。开山凿路、水利工程、城市建设……人类生活由此焕然一新。化石燃料的开采与燃烧应用,极大地促进了现代文明的发展。

燃烧在促进人类文明发展的同时,其不合理应用也会给人类带来灾害,甚至可能使千年文明付之一炬。温室气体的排放即是其一。因此,低碳环保的理念需要不断强化,“清洁燃烧”是目前燃烧科学最迫切、最热烈的研究前沿。另外,火灾是人类面临的重大灾难之一,每年有大量人力物力消耗在防火和灭火上。

因此,燃烧不仅促进了人类文明,而且还应该保护人类文明。

1.1 燃烧的一般概念

通常把一切强烈放热的、伴随有光辐射的快速化学反应过程都称为燃烧。在燃烧反应中,把放出活泼氧原子的物质称为氧化剂,而被氧化剂氧化的另一类物质则称为燃料(或称可燃物、还原剂)。一般地,氧化剂是指所含元素的化合价降低的反应物,而燃料是指所含元素的化合价升高的反应物。如氧、高锰酸钾等是氧化剂,氢、酒精、汽油、木炭等是燃料。

从微观上看,燃烧是可燃物和氧化剂的分子间进行了激烈的快速化学反应,原来的分子结构被破坏,原子的外层电子重新组合,经过一系列中间产物的变化,最后生成最终燃烧产物。这一过程,物质的化学能是降低的,降低的能量大都以热能和光能的形式释放出来而形成火焰。从物理观点看,燃烧过程总伴随物质的流动,可能是单



相流,也可能是多相流;可能是层流,也可能是湍流。

燃烧必须满足三要素,即燃料、氧化剂及温度要达到燃点。燃烧过程主要包括燃料与氧化剂的物理扩散混合过程和它们之间的化学反应过程。对于液体燃料与液体氧化剂,还包括液体的雾化、蒸发等过程;对于固体燃料和固体氧化剂(如固体火箭推进剂),还包括固体相变、分解等过程。可见,燃烧是一个包括热量传递、动量传递、质量传递和快速化学反应的综合物理化学过程,至今我们对燃烧的认识还不够充分。

1.1.1 可燃物

凡是能与空气中的氧或其他氧化剂起燃烧化学反应的物质称为可燃物,又称燃料。可燃物种类繁多,不胜枚举,大多是含碳和氢的化合物,某些金属如镁、铝、钙等在某些条件下也可以燃烧,还有许多物质如肼、臭氧等在高温下可以通过自己的分解而放出光和热。可燃物按其物理状态分为气体可燃物、液体可燃物和固体可燃物三种类别。根据化学结构不同,可燃物可分为无机可燃物和有机可燃物两大类。无机可燃物又包括无机单质和无机化合物两类,其中无机单质有氢、钾、钠、钙、镁、磷、硫、硅等,无机化合物有一氧化碳、氨、硫化氢、磷化氢、二硫化碳等。有机可燃物可分为低分子可燃物和高分子可燃物,又可分为天然可燃物和人工合成可燃物。有机物中除了多卤代烃如四氯化碳、卤代烷(二氟、氯、溴甲烷)等不燃外,其他绝大部分有机物都是可燃物。常见的有机可燃物有天然气、液化石油气、汽油、煤油、柴油以及三大合成材料,即合成塑料、合成橡胶、合成纤维等。

根据可燃物的物态和火灾危险特性的不同,参照危险货物的分类方法,可将可燃物分成六大类,即爆炸性物质、自燃性物质、遇水燃烧物质、可燃气体、可燃液体、可燃固体。爆炸性物质是指在一定的温度、震动或受其他物质激发的条件下,能够在极短的时间内发生剧烈化学反应,释放出大量的气体和热量,并伴有巨大声响而爆炸的物质。自燃性物质是指在正常环境状态下,不需外界施加点火能量,只依靠物质自身与外界的相互作用(包括化学、物理甚至生物的作用)而释放热量,从而能发生自行燃烧的物质。可燃性物质是指在正常环境状态下,需要施加一定的点火能量才能发生燃烧的物质。应当指出,氧化剂中的有机过氧化物等,因其自身能够分解并含碳氢元素,所以也是可燃的物质。另外,爆炸性物质中某些爆炸性化合物如硝化甘油等分子结构中含有氧元素,某些爆炸性混合物如黑火药等药剂中含有氧化剂,这些物质在没有氧气的情况下也能够燃烧或爆炸。

1. 爆炸性物质

爆炸性物质主要包括点火器材,如导火索、点火绳、点火棒等;起爆器材,如导爆索、雷管等;炸药及爆炸性药品,如环三次甲基三硝胺(黑索今)、硝铵炸药(铵梯炸药)、硝化甘油混合炸药(胶质炸药)、硝化棉、黑火药、三硝基甲苯(梯恩梯)等;还有其他爆炸品,如焰火、爆竹等。用于制造固体火箭推进剂的主要物质绝大部分属于爆炸性物质。



2. 自燃性物质

按不同的易燃程度,自燃性物质分为一级和二级两大类。一级自燃物质在空气中易氧化或分解、发热而引起自燃,如黄磷、三乙基铝、三异丁基铝、三乙基硼、三乙基锡、二乙基锌等。二级自燃物质在空气中能缓慢氧化、发热而引起自燃,如油纸及其制品、粉片柔软云母等。

3. 遇水燃烧物质

遇水燃烧物质又称遇湿易燃物品,也分为一级和二级两大类。一级遇水燃烧物质与水或酸反应极快,产生可燃气体,发热,极易引起自行燃烧,如钾、钠、锂、氢化锂、氢化钠、四氢化锂铝、氢化铝钠、镁铝粉、十硼氢、五硼氢等。二级遇水燃烧物质与水或酸反应较慢,不易引起自行燃烧,包括钙、锌粉、氢化铝、氢化钡、硼氢化钾、硼氢化钠等。

4. 可燃气体

可燃气体可分为甲类和乙类两大类。甲类可燃气体的爆炸浓度下限 $<10\%$,极易燃烧,如氢气、硫化氢、甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、乙烯、丙烯、乙炔、氯乙烯、甲醛、天然气等。乙类可燃气体的爆炸浓度下限 $\geq 10\%$,包括氨、一氧化碳等。

5. 可燃液体

可燃液体分为甲类、乙类和丙类三大类,其中甲类和乙类液体为易燃液体,丙类液体为一般可燃液体。

甲类液体(闪点 $<28^{\circ}\text{C}$),包括二硫化碳、氰化氢、正戊烷、正己烷、正庚烷、正辛烷、1-己烯、2-戊烯、1-己炔、环己烷、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯丁烷、甲醇、乙醇、50度以上的白酒、正丙醇、乙醚、乙醛、丙酮、甲酸甲酯、乙酸乙酯、丁酸乙酯、乙腈、丙烯腈、呋喃、吡啶、汽油、石油醚等。

乙类液体($28^{\circ}\text{C}\leq\text{闪点}<60^{\circ}\text{C}$),包括正壬烷、正癸烷、二乙苯、正丙苯、苯乙烯、正丁醇、福尔马林、乙酸、乙二胺、硝基甲烷、吡咯、煤油、松节油、芥籽油、松香水等。

丙类液体(闪点 $\geq 60^{\circ}\text{C}$),包括正十二烷、正十四烷、二联苯、溴苯、环己醇、乙二醇、丙三醇(甘油)、苯酚、苯甲醛、正丁酸、氯乙酸、苯甲酸乙酯、硫酸二甲酯、苯胺、硝基苯、糠醇、机械油、航空润滑油、锭子油、猪油、牛油、鲸油、豆油、菜籽油、花生油、桐油、蓖麻油、棉籽油、葵花籽油、亚麻仁油等。

6. 可燃固体

可燃固体分为甲、乙、丙、丁四类,其中甲类、乙类为易燃固体,丙类为一般可燃固体,丁类为难燃固体。

甲类固体的燃点与自燃点很低,易燃,燃烧速度快,燃烧产物毒性大,如红磷、三硫化磷、五硫化磷、闪光粉、氨基化钠、硝化棉(含氮量 $>12.5\%$)、重氮氨基苯、二硝基苯、二硝基苯肼、二硝基萘、对亚硝基酚、2,4-二硝基间苯二酚、2,4-二硝基苯甲酸、2,4-二硝基甲苯、可发性聚苯乙烯珠体等。

乙类固体的燃烧性能比甲类固体差,燃烧产物毒性也稍小,如安全火柴、硫磺、镁



粉(镁带、镁卷、镁屑)、铝粉、锰粉、钛粉、氨基化锂、氨基化钙、萘、卫生球、2-甲基萘、十八烷基乙酰胺、苯磺酰肼(发泡剂 BSH)、偶氮二异丁腈(发泡剂 Vazo)、樟脑、生松香、三聚甲醛、聚甲醛(低分子量,聚合度 8~100)、火补胶(含松香、硫磺、铝粉等)、硝化纤维漆布、硝化纤维胶片、硝化纤维漆纸、赛璐珞板或片等。

丙类固体包括燃点 $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高熔点固体和燃点 $<300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天然纤维,燃烧性能比甲、乙类固体差,如石蜡、沥青、木材、木炭、煤、聚乙烯塑料、聚丙烯塑料、有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯塑料)、聚苯乙烯塑料、丙烯腈丁二烯苯乙烯共聚物塑料(ABS)、天然橡胶、顺丁橡胶、聚氨酯泡沫塑料、粘胶纤维、涤纶(聚对苯二甲酸乙二醇酯树脂纤维)、尼龙-66(聚己二酰己二胺树脂纤维)、腈纶(聚丙烯腈树脂纤维)、丙纶(聚丙烯树脂纤维)等。

丁类固体是指在空气中受到火烧或高温作用时难起火、难炭化、有自熄性的物质,如沥青混凝土、经防火处理的木材及纤维织物、水泥刨花板、酚醛塑料、聚氯乙烯塑料、脲醛塑料、三聚氰胺塑料等。

1.1.2 不同状态物质的燃烧

自然界的一切物质,在一定温度和压强下,都以固体、液体或气体的一定状态存在。这三种状态的物质其燃烧过程是不同的。固体和液体发生燃烧,需要经过分解和蒸发,生成气体,然后由气体成分与氧化剂作用发生燃烧,气体物质不需要经过蒸发,可以直接进行燃烧。

1. 固体物质的燃烧

固体是有一定形状的物质,其化学结构比较紧凑,化学组成有的比较简单,如硫、磷、钾等都是由同种元素构成的物质;有的比较复杂,如木材、纸张和煤炭等,是由多种可燃元素构成的化合物;有的是既包括燃料又包括氧化剂的复杂组元,如固体火箭推进剂。

由于固体物质的化学组成不同,燃烧时情况也不一样。有的固体物质可以直接受热分解蒸发,生成气体,进而燃烧。有的固体物质受热后先熔化为液体,然后气化燃烧,如硫、磷、蜡等。

此外,各种固体物质的熔点和受热分解的温度也不一样,有的低,有的高。熔点和分解温度低的物质,容易发生燃烧,如赛璐珞(硝化棉)在 $80\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就会软化,在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就开始分解, $150\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时自燃。但是大多数固体物质的分解温度和熔点是比较高的,如木材先是受热蒸发掉水分,析出二氧化碳等不燃气体,然后外层开始分解出可燃的气态产物,同时放出热量,开始剧烈氧化,直到出现火焰。

另外,固体物质燃烧的速度与其体积和颗粒的大小有关,小则快,大则慢。如散放的木条要比垛成堆的圆木燃烧得快,其原因就是木条与氧的接触面大,燃烧较充分,因此燃烧速度就快。