

Mc  
Graw  
Hill

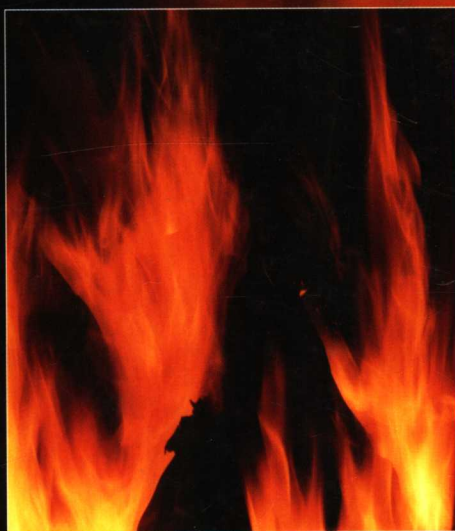
Education

# HANDBOOK OF BUILDING MATERIALS FOR FIRE PROTECTION

# 建筑材料防火手册

[美] C. A. 哈珀 (CHARLES A. HARPER) 主编

公安部四川消防研究所 译



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

Mc  
Graw  
Hill

# 建筑材料防火手册

HANDBOOK OF BUILDING  
MATERIALS FOR FIRE  
PROTECTION

[美] C. A. 哈珀 (Charles A. Harper) 主编  
公安部四川消防研究所 译



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

建筑材料防火手册/[美] 哈珀 (Harper, C. A.) 主编; 公安部四川消防研究所译.  
北京: 化学工业出版社, 2005.11

书名原文: Handbook of Building Materials for Fire Protection  
ISBN 7-5025-7903-6

I. 建… II. ①哈…②公… III. 建筑材料: 防火材料-技术手册 IV. TU545-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 137800 号

Handbook of Building Materials for Fire Protection by Charles A. Harper  
ISBN 0-07-138891-5

Copyright © 2004 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Chemical Industry Press.

本书中文简体字版由化学工业出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。

未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-3310

---

### 建筑材料防火手册

[美] C. A. 哈珀 (Charles A. Harper) 主编

公安部四川消防研究所 译

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 顾淑云

封面设计: 潘 峰

\*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 32 字数 658 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7903-6

定 价: 66.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 原著作者名单

- Jesse J. Beitel 休斯联合有限公司, 巴尔的摩, 马里兰州 (第 6 章)  
Wai K. Chin 美国军用研究实验室, 亚伯丁试验场, 马里兰州 (第 2 章)  
Bradford Douglas 美国森林与纸业协会, 华盛顿州 (第 7 章)  
Richard G. Gewain 休斯联合有限公司, 巴尔的摩, 马里兰州 (第 6 章)  
Debbie J. Guckert 杜邦公司, 弗吉尼亚州 (第 5 章)  
Nestor R. Iwankiw 休斯联合有限公司, 芝加哥, 伊利诺斯州 (第 6 章)  
Susan L. Lovasic 杜邦公司, 弗吉尼亚州 (第 5 章)  
Marc L. Janssens 西南研究所, 旧金山, 得克萨斯州 (第 7 章)  
Richard E. Lyon 联邦空军委员会, 大西洋国际机场, 新泽西州 (第 3 章)  
Frederick W. Mowrer 马里兰大学, 大学园, 马里兰州 (第 1 章)  
Guy Marlair INERIS, Verneuil-Halatte, 法国 (第 8 章)  
Elisabeth S. Papazoglou 大湖聚合物添加剂公司, 印度 (第 4 章)  
Roger F. Parry 杜邦公司, 弗吉尼亚州 (第 5 章)  
Richard Shuford 美国军用研究实验室, 亚伯丁试验场, 马里兰州 (第 2 章)  
Archibald Tewarson 美国工厂联合会研究中心, 马萨诸塞州 (第 2 章与第 8 章)  
Usman A. Sorathia 美国海军表面战争技术研究中心, 马里兰州 (第 9 章)

## 主编的简介

Charles A. Harper 曾担任威斯汀豪斯电子公司的材料工程与技术主管, 目前在一家从事现代材料技术领域教育研究的机构中担任技术委员会主席, 同时也是麦格劳-希尔国际出版公司材料科学与工程系列图书的作者。他早年毕业于约翰-霍普金斯大学的化工专业, 现在是该大学的兼职教授。

# 译者前言

近年来,随着我国国民经济和城市化建设的快速发展,防火安全受到越来越多的重视,尤其是防火材料受到了人们更多的关注。

《建筑材料防火手册》是美国 McGraw-Hill 公司 2004 年出版的全面阐述材料防火性能的图书,采用了大量建筑防火材料在分析、设计、制备以及加工等方面的最新研究成果。应公安部科技强警战略发展要求,公安部四川消防研究所组织优势力量经过近一年的共同努力,完成了这部反映美国防火工作进展的译著。该书内涵丰富、知识面广、信息量大、数据翔实、实用性强、具有指导性,相信会受到广大消防战线工作人员和企业、事业单位的科研、生产、管理人员的欢迎,并将成为从事本领域的科研人员、消防管理人员、施工设计人员以及与消防安全工作有关人员更得力的助手。

本书由公安部四川消防研究所组织翻译。第 1 章 1.0~1.1 节由兰彬研究员翻译;第 2 章由钱建民研究员翻译;第 3 章、第 4 章由何世家助理研究员翻译;第 5 章、第 7 章由刘军军副研究员翻译;第 6 章由卢国建研究员翻译;第 1 章 1.2~1.8 节、第 8 章、序言由张泽江博士翻译;第 9 章由张帆实习研究员翻译;全书由张泽江博士进行统稿,并撰写了内容提要。兰彬研究员对全书进行了译审。在翻译过程中公安部消防局肖学锋博士、公安部四川消防研究所李凤研究员、四川消防总队宋晓勇部长等提出了许多具体的建议,在此表示感谢。

虽然我们在翻译过程中尽了自己最大的努力,但由于水平有限,加上时间仓促,不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

公安部四川消防研究所翻译组  
2006 年 1 月

# 前 言

近年来，随着消防重要性的突现，它越来越受到众多人士的广泛关注。人口密集区与建筑密集区正在使用着大量的建筑材料，为使材料、系统以及织物或加工过程达到安全需求，必将投入更高昂的费用和装备。所幸的是，不管是在高校还是在企事业单位都已主动开展这方面的研究。许多高校还开设了重要的消防课程；在企事业单位中从事消防安全的专家的数量正急剧上升。所有的这些都通过优秀的专业协会联系在一起。

不管从哪方面说，材料都是火灾或火灾危险之源。本书是对建筑防火材料在分析、设计、制备以及加工等方面有兴趣的人士的首选。这本新的《建筑材料防火手册》是第一本对于材料的专著，对于从事消防领域或相关行业的人员具有不可估量的价值。本人非常有幸能与这许多著名的人士（见原著作者名单——编者注）一起为您编著这本书，他们对于该行业的发展具有不可估量的贡献。本书中的信息、数据以及指南对于从事本领域的科研人员、消防管理人员、施工设计人员以及与消防安全工作有关的人员都起着重要指导作用。

本书共9章，由 Charles A. Harper 主编；第1章由马里兰州立大学消防工程系 Frederick W. Mowrer 博士编著，主要涉及材料火灾危险性基本理论，包括材料可燃性、产烟量等；第2章由美国工厂联合会研究中心的 Archibald Tewarson 博士、美国军用研究实验室的 Wai K. Chin 博士和 Richard Shuford 博士共同编著，主要涉及重要材料技术指标、标准和测试；第3章由联邦航空管理局消防安全中心的 Richard E. Lyon 博士编著，主要叙述了塑料和橡胶的有关性能；第4章由大湖聚合物添加剂公司的 Elisabeth S. Papazoglou 博士编著，主要描述了塑料阻燃；第5章由杜邦公司的 Debbie J. Guckert 博士、Roger F. Parry 博士和 Susan L. Lovasic 完成，主要涉及纤维和织物；第6章由 Hughes 联合有限公司 Nestor R. Iwankiw 博士、Jesse J. Beitel 和 Richard G. Gewain 编著，主要涉及构件材料；第7章由西南研究中心的 Marc L. Janssens 博士和 Bradford Douglas 博士完成，主要描述了木材及木制品；第8章由美国工厂联合会全球研究中心 Archibald Tewarson 博士与法国的 Guy Marlair 博士完成，主要涉及液体和化学品；第9章由美国海军研究中心 Usman A. Sorathia 博士完成，主要涉及军用材料。本书中的内容通俗易懂。我非常高兴能带领本组人员为您编著这本书，它是从事消防工作的人员以及对此行业有兴趣的人士的一本无价之宝。

C. A. 哈珀  
(Charles A. Harper)

# 目 录

<b>第 1 章 材料火灾危险性基本理论</b> .....	1
1.0 绪论 .....	1
1.1 燃烧基础理论 .....	2
1.1.1 当量比 .....	3
1.1.2 热化学 .....	8
1.1.3 火焰温度 .....	12
1.2 气体、气雾和粉尘 .....	16
1.2.1 气体和蒸气的可燃极限 .....	16
1.2.2 点火能 .....	19
1.2.3 火焰传播速率 .....	19
1.2.4 气雾和粉尘的点燃 .....	20
1.3 液体 .....	20
1.3.1 燃点 .....	21
1.3.2 蒸气压力 .....	22
1.3.3 液体的可燃性极限 .....	22
1.3.4 液态混合物 .....	23
1.3.5 燃烧速率 .....	23
1.4 固体 .....	26
1.4.1 固体材料的可燃性 .....	28
1.4.2 临界热通量和有效着火温度 .....	34
1.4.3 热分解和燃烧速率 .....	36
1.4.4 火焰传播速率 .....	36
1.4.5 自发升温和阴燃 .....	39
1.4.6 阻燃剂的作用 .....	40
1.5 烟气的产生 .....	41
1.5.1 能见度 .....	41
1.5.2 燃烧产物的毒性 .....	43
1.5.3 非受热性灾害 .....	44
1.6 室内火灾效应 .....	45
1.7 小结 .....	47
参考文献 .....	47

<b>第 2 章 材料技术指标、标准和测试</b> .....	50
2.1 前言 .....	50
2.2 材料特性 .....	52
2.3 材料的软化和熔化 .....	53
2.4 材料的蒸发、分解和炭化 .....	54
2.5 材料着火性 .....	57
2.6 火焰传播、火灾增长和材料的燃烧特性 .....	62
2.7 材料燃烧特性的常用试验方法 .....	64
2.7.1 ASTM D5865 和 ISO 1716: 完全燃烧时的热值试验方法 .....	65
2.7.2 ASTM E136 和 ISO 1182: 在750℃的垂直管式炉内测试材料 燃烧特性的标准试验方法 .....	66
2.7.3 ASTM E906, ASTM E1354 和 ISO 5660: 材料蒸发速率、热 释放速率和化学物质的释放速率的试验方法 .....	67
2.7.4 ASTM E119: 建筑结构和材料的耐火试验 .....	72
2.7.5 ASTM E1529: 对建筑构件和组件的大型油池火试验方法 .....	73
2.8 火焰传播与火灾增长的常用试验方法 .....	74
2.8.1 prEN ISO 和 FDIS 11925-2: 建筑制品对火反应第二部分: 受火焰直接冲击的着火性 .....	74
2.8.2 UL94: 装置和电器用塑料件的可燃性试验方法 .....	75
2.8.3 ASTM D2863 (ISO 4589): 氧指数试验方法 .....	76
2.8.4 ASTM E162 (D3675): 辐射热源测试材料表面着火性的 试验方法 .....	78
2.8.5 ASTM E1321 (ISO 5658): 材料着火性和火焰传播特性的 试验方法 (LIFT) .....	80
2.8.6 ASTM E648 (ISO 9329-1): 辐射热源测铺地材料临界热辐射 通量的试验方法 .....	82
2.8.7 ASTM E 84: 建筑材料表面燃烧特性的试验方法 .....	83
2.8.8 FM 全球认可等级 4910 (NFPA 318): 半导体工业洁净室室内 材料的试验方法 .....	85
2.8.9 ASTM E603: 房间火灾试验指南 .....	88
符号定义 .....	97
参考文献 .....	98
<b>第 3 章 塑料和橡胶</b> .....	102
3.1 绪论 .....	102
3.2 聚合物材料 .....	102
3.2.1 单体, 聚合体, 共聚体 .....	103
3.2.2 聚合物结构 .....	106



3.2.3	商品材料 .....	108
3.2.4	热力学值 .....	109
3.3	燃烧过程 .....	116
3.3.1	火灾三角形 .....	116
3.3.2	燃烧过程中的化学反应 .....	117
3.4	塑料的燃烧特性 .....	129
3.4.1	着火性 .....	129
3.4.2	稳定燃烧 .....	135
3.4.3	不稳定燃烧 .....	140
	符号定义 .....	144
	参考文献 .....	145
<b>第4章</b>	<b>塑料阻燃</b> .....	<b>150</b>
4.1	绪论 .....	150
4.2	阻燃工业综述 .....	151
4.3	阻燃机理 .....	153
4.4	商品阻燃剂的分类 .....	155
4.4.1	无机水化物 .....	155
4.4.2	卤素阻燃材料 .....	156
4.4.3	三氧化二锑 .....	167
4.4.4	磷添加剂 .....	170
4.4.5	膨胀阻燃体系 .....	181
4.5	聚合物家族——阻燃剂的选择 .....	182
4.5.1	聚丙烯 .....	183
4.5.2	聚乙烯 .....	189
4.5.3	聚苯乙烯 .....	190
4.5.4	ABS .....	193
4.5.5	聚碳酸酯 .....	194
4.5.6	PC与ABS的混合物 .....	195
4.5.7	尼龙 .....	201
4.5.8	热塑性聚酯 .....	206
4.5.9	聚氯乙烯 .....	209
4.5.10	热固性树脂 .....	212
4.5.11	弹性体或橡胶 .....	214
4.6	纳米复合材料 .....	216
4.6.1	层状硅酸盐 .....	216
4.6.2	聚合物纳米复合材料结构 .....	217
4.6.3	制备方法 .....	217

4.6.4	纳米复合材料的阻燃性 .....	218
4.6.5	纳米材料的阻燃机理 .....	220
	参考文献 .....	224
<b>第5章</b>	<b>纤维和织物 .....</b>	<b>228</b>
5.1	火灾保护中对织物的规定 .....	228
5.2	纤维和它们的性质 .....	228
5.2.1	制造纤维的材料 .....	228
5.2.2	应用纤维的形式 .....	228
5.2.3	纤维的性质 .....	229
5.2.4	可燃性 .....	229
5.2.5	阻燃剂 .....	232
5.3	织物的类型 .....	234
5.4	织物的可燃性 .....	234
5.4.1	燃烧织物的性质 .....	234
5.4.2	对织物的热性能测试 .....	235
5.4.3	性能标准 .....	243
5.5	应用——防护服 .....	247
5.5.1	烧伤 .....	248
5.5.2	轰燃 .....	249
5.5.3	建筑和野外火灾 .....	252
5.5.4	电弧 .....	256
5.5.5	熔化金属 .....	258
5.5.6	防护服的污染和清洗 .....	259
5.6	应用——装饰物 .....	260
5.6.1	结构 .....	260
5.6.2	交通运输 .....	268
5.7	挑战未来 .....	270
	参考文献 .....	271
<b>第6章</b>	<b>构件材料 .....</b>	<b>275</b>
6.1	建筑构件 .....	275
6.1.1	前言 .....	275
6.1.2	结构材料 .....	275
6.2	耐火试验的发展情况 .....	276
6.2.1	历史上的火灾事件 .....	276
6.2.2	早期的耐火试验方法 .....	278
6.2.3	标准耐火试验方法 .....	278
6.2.4	试验装置 .....	281

6.2.5	耐火极限判据 .....	282
6.2.6	特殊的耐火性能试验 (快速升温曲线) .....	285
6.3	结构材料与火灾 .....	285
6.3.1	结构材料的对火反应 .....	285
6.4	结构材料的防火保护 .....	297
6.4.1	耐火材料 .....	297
6.4.2	耐火系统 .....	303
6.5	通过试验测定耐火性能 .....	306
6.5.1	钢结构 .....	306
6.5.2	混凝土建筑 .....	313
6.5.3	贯穿物和接头 .....	313
6.6	通过计算确定耐火性能 .....	314
6.6.1	钢结构 .....	314
6.6.2	混凝土建筑 .....	331
6.7	耐火等级的应用 .....	331
	参考文献 .....	332
<b>第7章</b>	<b>木材与木制品 .....</b>	<b>334</b>
7.1	单位 .....	334
7.2	简介 .....	334
7.2.1	木材 .....	334
7.2.2	林业 .....	334
7.2.3	木材与碳 .....	335
7.2.4	木材与火 .....	335
7.3	木材作为一种建筑材料 (美国惯用单位) .....	335
7.3.1	锯木 .....	336
7.3.2	平板制品 .....	336
7.3.3	工程木制品 .....	337
7.3.4	其他材料 .....	338
7.4	物理与化学特性 (国际标准单位) .....	339
7.4.1	植物学分类 .....	339
7.4.2	物理结构 .....	339
7.4.3	含水率 .....	340
7.4.4	化学成分 .....	340
7.4.5	热解和高温分解 .....	341
7.4.6	阻燃处理 .....	342
7.5	热性能 (国际标准单位) .....	343
7.5.1	木材和焦炭 .....	343

7.5.2 其他材料 .....	355
7.6 力学性能 .....	356
7.6.1 常温下的特性 .....	357
7.6.2 高温时的性质 .....	357
7.7 对火反应 (国际标准单位) .....	359
7.7.1 着火 .....	359
7.7.2 热释放和炭化速率 .....	361
7.7.3 燃烧产物 .....	368
7.7.4 表面火焰蔓延 .....	368
7.8 耐火性能 (美国惯用单位) .....	372
7.8.1 暴露的木质构件 .....	373
7.8.2 木结构建筑的保护 .....	381
参考文献 .....	384
<b>第 8 章 液体和化学品</b> .....	<b>391</b>
8.1 前言 .....	391
8.1.1 储存于仓库中的液体事故 .....	392
8.1.2 储存于槽、容器和管中液体的泄漏事故 .....	394
8.2 与财产有关的液体着火、燃烧和火蔓延行为 .....	395
8.3 液体的汽化和沸腾特征 .....	395
8.4 液体的着火特性 .....	401
8.4.1 液体的闪点 .....	401
8.4.2 液体的自燃温度 .....	403
8.4.3 根据抗点燃性对液体的危险性分类 .....	404
8.5 液体的可燃性 .....	406
8.6 液体的燃烧特性 .....	408
8.6.1 油池火中液体蒸气的释放速率 .....	410
8.6.2 热释放速率 .....	414
8.6.3 产物释放速率 .....	427
8.7 发烟点 .....	429
符号定义 .....	430
参考文献 .....	431
<b>第 9 章 军用材料</b> .....	<b>435</b>
9.1 前言 .....	435
9.2 应用于军事中的合成材料 .....	435
9.3 高分子复合材料 .....	439
9.3.1 传统和新型的合成树脂 .....	440
9.3.2 制造技术 .....	441

9.3.3 复合系统的成本 .....	442
9.4 火灾的威胁 .....	443
9.5 聚酯合成物和火灾 .....	444
9.6 聚合物防火的规则和要求 .....	445
9.6.1 基础设施与防火规范 .....	445
9.6.2 地面运输与防火规范 .....	448
9.6.3 空运与防火标准 .....	448
9.6.4 商业海运与防火规范 .....	449
9.6.5 军用合成材料与防火标准 .....	450
9.7 合成物的火灾特性与测试方法 .....	450
9.7.1 表面燃烧性能 .....	450
9.7.2 烟和可燃性气体的产生 .....	452
9.7.3 火焰增长 .....	453
9.7.4 阻火 .....	462
9.7.5 火灾中结构的完整性 .....	470
9.7.6 被动防火保护 .....	478
9.7.7 主动防火 .....	490
参考文献 .....	491

# 第 1 章 材料火灾危险性基本理论

Frederick W. Mowrer 博士

马里兰州立大学消防工程系

## 1.0 绪论

在建筑和其他构筑物中使用的材料、产品及组件的火灾危险性，需要人们长期给予关注和加以规范。大多数可燃性气体、固体或液体已为大家所认识和了解，并已对其生产、运输和使用进行了管理和控制，以前当可燃材料作为建筑结构部件时，其防火规定要比作为装饰、装修材料严格得多，但我们更深入地了解此类产品造成的火灾后，发现最近几年建筑内装饰、装修材料的火灾危害性和风险性不断增加，因而备受重视。

20 世纪已经开发了大量的火灾试验方法以适应规范的要求。在这些火灾试验方法中，有很多只是评价某个产品或产品中某个组成的一种或几种火灾危险特性。通常，采用这些火灾试验方法得到的结果是以技术指标的形式提供给规范使用的，而跟材料最终应用时所表现出来的火灾危险性只有很少的联系。因此，尽管某些产品具有严重的火灾危险性，还是被认可使用了。

过去的十年掀起了一场发展性能化 (performance-based) 建筑火灾安全分析方法和采用建筑性能化防火安全规范的运动。这场运动的核心是确定基于设定火灾的火灾场景和分析这些火灾所造成的可能后果。因此，朝性能化火灾安全分析、设计和规范方向发展的潮流要求比使用传统的规格式方法更应该掌握好材料火灾危险性和建筑火灾动力学方面的知识。

材料火灾危险性评价过程很复杂，因为有许多可变因素会影响这个过程。这些可变因素包括材料的性质、结构、环境条件和室内火灾效应。因此，不同材料的火灾危险性不仅取决于其本身的物理化学特性，还与其应用情况有关。例如，同样的纺织物用在墙上和吊顶上时与用在地板上的火灾危害性和风险性都是不同的，折叠堆放的报纸与同质量松散放置的报纸的燃烧过程也相距甚远，放在饭店大厅中的圣诞树着火后比放在家中的圣诞树燃烧起来要猛烈得多。因此，需要开发一种能对材料、产品及其组件在其可能的应用范围内评价其火灾危险性的方法。

最后，当评价材料、制品及组件的火灾危险性时，须注意下列问题。

- 产品的着火难易性如何？

- 材料具有自发热 (self-heating) 特性吗? 如果有, 在什么情况下其自发热性会使其自燃?
- 在何种环境下, 材料会被具有不同的点火密度和暴露时间的不同的点火源点燃?
- 制品一旦着火, 其火焰增长速率和传播速率有多快?
- 在什么情况下火灾会蔓延至附近区域?
- 火将变得多大, 会燃多久?
- 作为时间的函数, 释放的热量会有多大?
- 制品燃烧时会产生多少烟?
- 燃烧产物是什么?

只要解决了这些问题, 就可以分析出材料、制品及其组件在特定的应用情况下的火灾后果:

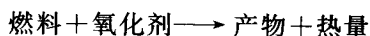
- 材料、制品及其组件燃烧会导致什么样的火灾情况?
- 在不同的位置会有什么样的温度和热流?
- 在不同的位置会有什么样的烟气浓度?
- 这些火灾情况会影响材料的燃烧特性吗?
- 其他材料、产品及组件将被点燃吗? 如果会, 那么点然后会如何燃烧?
- 这些火灾情况的后果是什么?
- 对建筑会有什么后果?
- 对建筑内的人会有什么后果?
- 对建筑内装饰装修材料和设备会有什么后果?
- 对环境和邻近的结构会有什么后果?

由于这些问题的答案取决于环境可变因素和材料的性质与外形, 因此希望能确定和测量材料的基本性质, 并结合使用合适的分析或计算模型来评价材料、制品及组件在全部可能的应用场合下的预期性能。最近几年, 大家已朝这个目标取得了显著的进展, 但当前的技术还不足以使我们作全面的性能化分析。这就是我们仍旧依赖于传统的、指标式的、合格或不合格 (pass-fail) 式的火灾试验方法来制定规范的原因之一。随着我们对室内火灾动力学和材料燃烧性能更多的了解, 这种情况正在改变。

本章主要讨论材料火灾危险性的基本理论。在讨论了火灾和气体、液体、固体材料的燃烧危害性之后, 介绍了基本的燃烧问题。然后, 与确定烟气特征的方法一道讨论了烟气的产物。最后, 介绍了有关建筑火灾动力学的室内火灾效应。在后续的章节中, 这些原理将用于对材料及其应用的分类。

## 1.1 燃烧基础理论

火灾是燃烧的一种现象, 即燃料和氧化剂发生放热反应并产生燃烧产物和热量的过程。通常可由下式表示:



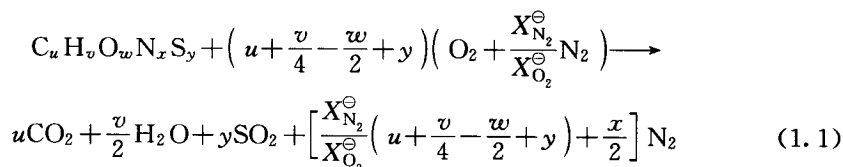
火灾的燃烧反应有两种方式：有焰燃烧（flaming combustion）和阴燃（smoldering combustion）。有焰燃烧是呈气态的燃料和氧化剂发生反应，阴燃只是在固体相表面产生的燃烧反应。阴燃的例子有香烟的灰烬和烧烤炉中的火炭。液体和固体燃料的有焰燃烧需要在气相燃烧反应之前将其分子汽化或高温分解，“高温分解”（pyrolysis）这个术语的含义是指材料的受热分解。

火焰可以分为预混型（premixed）或扩散型（diffusion）、层状型（laminar）或湍流型（turbulent）。预混火焰是指燃料和氧化剂在进入反应区域前已预先混合好；扩散火焰是指火焰的反应区发生在燃料和氧化剂的交界面上。气体燃烧炉的火焰是一个预混火焰的例子。蜡烛火和篝火则是属于扩散火焰，蜡烛火焰光滑且形状固定，是一种层状扩散型火焰；而篝火是跳动和摇摆的，是一种湍流扩散火焰。

大多数造成严重危害的火灾都与湍流扩散火焰有关，但显然也有例外。泄漏的可燃气体与空气混合后被点燃而形成的火会像预混火焰一样地蔓延。因为这个混合物一旦着火，就会点燃从泄漏源释放出来的气体，从而形成扩散型火焰。同样，在可燃性液体火灾中，由于在液体表面有充足的可燃气体与空气形成了可点燃的混合气，因此液体燃烧火焰沿液体表面蔓延的初期阶段跟预混火焰一样，而在液体表面上形成的火焰将是扩散型火焰。

### 1.1.1 当量比

术语“当量比（stoichiometry）”是用来描述化学反应过程中反应物与生成物（或产物）之间数量关系的。当量比反应是指在产物中不含有过量反应物的反应。如 Strehlow 所指出的<sup>[1]</sup>，使用“当量比”的目的是要精确地确定一种燃料被完全地氧化成二氧化碳、水蒸气、氮和二氧化硫等产物需要多少空气。一个典型的当量比反应是以一个基本摩尔单位为基准来表示的。例如，1mol 含任意比例的碳、氢、氧、氮、硫的燃料（CHONS），其当量比平衡关系式为：



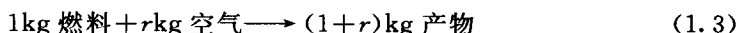
在一个以空气为氧化剂的实际当量比反应计算中，当氧气在空气中的摩尔比为  $X_{O_2}^{\ominus} = 0.21$ ，氮的标准大气摩尔比为  $X_{N_2}^{\ominus} = 0.79$ ，其他空气中的微量组分如氩、二氧化碳和水蒸气可以忽略。因此，氮与氧在通常空气中的比率为： $X_{N_2}^{\ominus} / X_{O_2}^{\ominus} = 0.79 / 0.21 = 3.76$ 。

从式（1.1）可以得到 1mol 燃料完全反应需要的氧气量（mol），可由式（1.2）计算得到：

$$\left( \frac{n_{O_2}}{n_f} \right)_{\text{当量比}} = \frac{\left( u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right)}{1} = \left( u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right) \quad (1.2)$$



当量比反应也可以用一个基本质量单位来表示,而不是用摩尔单位来表示。如 Drysdale 提出的<sup>[2]</sup>如下全球公认的以基本质量单位来表示的当量比反应式:



$r$  表示空气的当量比质量比率,表示一个单位质量的燃料完全燃烧时需要的空气质量。有的用符号  $s$  代替  $r$  来表达空气的当量比比率,因此,读者须仔细分辨不同出版物规定的术语及术语定义。由于知道氧气在空气中的比例,由空气的当量比比率可推知氧气的当量比比率,通常情况下为  $X_{\text{O}_2}^{\ominus} = 0.233$ 。

$$r_{\text{O}_2} = Y_{\text{O}_2, \infty}^{\ominus} \cdot r_{\text{空气}} \quad (1.4)$$

氧气的当量比比率可以由式 (1.2) 计算得到:

$$r_{\text{O}_2} = \left( \frac{m_{\text{O}_2}}{m_{\text{f}}} \right)_{\text{当量比}} = \frac{n_{\text{O}_2} \cdot MW_{\text{O}_2}}{n_{\text{f}} \cdot MW_{\text{f}}} \\ = \frac{\left( u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right) \cdot MW_{\text{O}_2}}{1 \cdot (u \cdot MW_{\text{C}} + v \cdot MW_{\text{H}} + w \cdot MW_{\text{O}} + x \cdot MW_{\text{N}} + y \cdot MW_{\text{S}})} \quad (1.5)$$

要知道由两个氧原子组成的氧气分子的摩尔质量 ( $MW_{\text{O}_2} \approx 32$ ) 是 2 倍于氧原子的 ( $MW_{\text{O}} \approx 16$ )。在式 (1.5) 分母中所有的元素符号均是单原子,而氧是双原子。在表 1.1 中提供了一些燃料的氧气的当量比比率, Babrauskas<sup>[3]</sup> 提供了多种燃料的更详细的氧气当量比比率表。

表 1.1 部分燃料在 25℃ 时的氧燃烧热<sup>[3]</sup>

燃料	化学式	氧气当量比( $r_{\text{O}_2}$ ) /(g O <sub>2</sub> /g 燃料)	净燃烧热 /(kJ/mol 燃料)	净燃烧热 /(kJ/g 燃料)	氧燃烧热 /(kJ/g O <sub>2</sub> )
烷烃	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$				
甲烷	$\text{CH}_4$	4.000	802.48	50.03	12.51
乙烷	$\text{C}_2\text{H}_6$	3.725	1428.02	47.49	12.75
丙烷	$\text{C}_3\text{H}_8$	3.629	2044.01	46.36	12.78
丁烷	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	3.579	2657.25	45.72	12.77
戊烷	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	3.548	3245.31	44.98	12.68
己烷	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	3.528	3855.25	44.74	12.68
庚烷	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	3.513	4464.91	44.56	12.68
辛烷	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	3.502	5075.94	44.44	12.69
壬烷	$\text{C}_9\text{H}_{20}$	3.493	5685.32	44.33	12.69
癸烷	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	3.486	6294.47	44.24	12.69
烯烃	$\text{C}_n\text{H}_{2n}$				
乙烯	$\text{C}_2\text{H}_4$	3.422	1323.12	47.17	13.78
丙烯	$\text{C}_3\text{H}_6$	3.422	1926.84	45.79	13.38
丁烯	$\text{C}_4\text{H}_8$	3.422	2541.89	45.31	13.24
戊烯	$\text{C}_5\text{H}_{10}$	3.422	3130.60	44.64	13.04
己烯	$\text{C}_6\text{H}_{12}$	3.422	3740.07	44.44	12.99
庚烯	$\text{C}_7\text{H}_{14}$	3.422	4350.36	44.31	12.95
辛烯	$\text{C}_8\text{H}_{16}$	3.422	4659.68	44.20	12.92