

C AILIAO RANSHAO XINGNENG
YU SHIYAN FANGFA

材料燃烧性能 与试验方法

杜建科 舒中俊 朱惠军等 ○ 编著

中国建材工业出版社

材料燃烧性能与试验方法

杜建科 舒中俊 朱惠军等 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料燃烧性能与试验方法 / 杜建科等编著. —北京:
中国建材工业出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-5160-0508-8

I. ①材… II. ①杜… III. ①建筑材料-燃烧性能-研究 IV. ①TU502

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 165452 号

内 容 提 要

全书试图从工程防火的实际出发,以最新颁布的建筑材料及制品燃烧性能分级体系(GB 8624—2012)和测试方法为主线,系统介绍了材料的燃烧性能及其测试方法的发展概况、与燃烧性能有关的基本测试技术、建筑材料和制品的燃烧性能分级体系及其试验方法、国外在典型建筑材料和制品的燃烧性能试验以及交通运输火灾试验领域的最新进展等。

本书能够满足国内材料防火安全的实际需要,可供广大建筑工程设计人员、施工安装技术人员和工程监理人员、材料质量监督人员、消防领域相关技术人员、高分子材料和建筑材料开发人员,以及相关专业的本科生和研究生参考使用。

材料燃烧性能与试验方法

杜建科 舒中俊 朱惠军等 编著

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:14.5

字 数:360 千字

版 次:2013 年 8 月第 1 版

印 次:2013 年 8 月第 1 次

定 价:48.00 元

本社网址:www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

前 言

材料的燃烧性能包括材料的不燃性、引燃性、放热性、火焰蔓延性、产烟性和烟气毒性等特性。材料和制品的燃烧性能是防火材料设计和制造、工程防火安全设计、建设和监理以及火灾风险评估的基础,建立科学合理的材料和制品燃烧性能分级体系和测试方法是消防安全的重要前提。

随着人类防火安全意识的不断增强,消防工程与技术迅速发展,取得了大量研究成果,在此基础上世界各国和国际组织普遍制定了相应的材料和制品燃烧性能分级体系和测试方法,这些标准技术在为消防安全发挥巨大作用的同时,也成为外国产品进入本国市场的重要壁垒。为了减少因此而造成的人类共同财富的巨大损失,国际标准组织在材料和制品燃烧性能标准的统一化方面已经做了许多努力。了解和掌握这些技术标准,对于防火和耐火材料开发人员、建筑设计人员、工业产品设计和质量检验人员、工程建设和监督人员,以及消防执法人员都是非常必要的。

本书以最新颁布的建筑材料及制品的燃烧性能分级体系(GB 8624—2012)和标准测试方法为主线,系统介绍了材料的燃烧特性及其测试方法的发展概况、与燃烧性能有关的基本测试技术、建筑材料及制品的燃烧性能分级和标准试验方法、国外在部分典型建筑材料和制品的燃烧性能试验以及交通运输火灾试验领域的最新进展。目的是让读者在系统掌握我国材料燃烧性能分级体系和基本标准测试方法的同时,了解主要工业国家和国际组织相关的燃烧试验方法发展现状,把握该领域的发展方向。

全书由杜建科博士组织编写。其中,第1、2、3章由中国人民武装警察部队学院消防工程系杜建科撰写,第4章由湖北消防总队朱惠军、朱华、张新昌撰写,第5章由中国人民武装警察部队学院消防工程系舒中俊撰写,第6章由湖北消防总队宜昌支队李静波撰写。内容组织上力求能够反映本领域的国内外最新成果和发展动态,但限于编者的能力和时间紧迫,难免存在不少错误和问题,敬请批评指正。

本书在编写过程中参考了大量文献,无法一一列出,敬请谅解并表示衷心感谢。在本书的编写和出版过程中,得到中国建材工业出版社的李杰和武警学院训练部王学谦、岳庚吉等同志的大力支持和帮助,在此同时表示感谢。

编者

2013年5月



中国建材工业出版社
China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部
010-68343948

图书广告
010-68361706

出版咨询
010-68343948

图书销售
010-68001605

设计业务
010-88376510转1008

邮箱：jccbs-zbs@163.com

网址：www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权专有，盗版必究。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。举报电话：010-68343948)

目 录

1 材料燃烧性能概述	1
1.1 材料的燃烧	1
1.1.1 材料的燃烧现象	1
1.1.2 材料的易燃性	1
1.2 材料的燃烧性能	2
1.2.1 引燃性	2
1.2.2 质量燃烧速率和热释放速率	5
1.2.3 火焰传播速率	6
1.2.4 烟气及其毒性	8
1.3 材料燃烧性能试验方法简介	11
1.3.1 标准知识	11
1.3.2 材料燃烧性能试验的基本要求	13
1.3.3 各种燃烧性能参数的测试方法	13
1.3.4 试验结果的主要影响因素和相关性	27
1.4 材料燃烧性能试验方法的发展趋势	29
2 燃烧过程基本参数测试技术	31
2.1 温度测量	31
2.1.1 温度测量装置	31
2.1.2 温度测量技术	33
2.2 热流测量	36
2.2.1 热流计	36
2.2.2 火灾试验中热流的测量误差	38
2.3 质量测量	39
2.3.1 主要质量测试仪器	39
2.3.2 数据处理方法	39
2.4 压力测量	39
2.4.1 压力测量系统	39
2.4.2 液柱式压力计	40
2.4.3 火灾试验中压力测量存在的问题	41
2.5 流速测量	41
2.5.1 火灾试验中气流速度测量装置	41
2.5.2 火灾试验中气流速度测量遇到的困难	44
2.6 流量测量	44

2.6.1	火灾试验中的气体流量测量	45
2.6.2	流量测量的误差分析	48
2.7	消光作用	48
2.7.1	火灾试验中的消光性测量装置	48
2.7.2	火灾试验中消光性测量存在的问题	50
2.8	烟气分析	50
2.8.1	火灾烟气定量分析的采样技术	50
2.8.2	火灾试验中气体组成分析装置	51
2.8.3	烟气中粒子浓度测量	54
2.8.4	火灾试验中气体分析遇到的困难	55
2.9	误差和数据处理	55
2.9.1	测量误差	55
2.9.2	数据处理	56
2.9.3	有效数字	63
3	建筑材料及制品的燃烧性能分级	65
3.1	建筑防火与材料的燃烧性能	65
3.1.1	建筑防火技术	65
3.1.2	材料和制品的火灾性能评价	66
3.2	材料燃烧的技术法规体系	67
3.2.1	欧盟的法规	67
3.2.2	美国的法规	71
3.2.3	我国的法规和标准	74
3.3	建筑材料及制品的燃烧性能分级方法	77
3.3.1	基本原理	77
3.3.2	燃烧性能分级与判据	80
3.3.3	影响燃烧性能及其分级的因素	97
3.3.4	分级结果应用范围和分级报告	99
3.3.5	与 GB 8624—2006 及其他国家或组织类似标准的对比	100
4	建筑材料及制品燃烧性能试验方法	103
4.1	试验方法分类	103
4.1.1	模拟真实火灾行为时遇到的困难	103
4.1.2	试验方法分类	103
4.2	建筑材料不燃性试验方法	105
4.2.1	简介	105
4.2.2	试验装置和试样	106
4.2.3	试验步骤	109
4.2.4	试验结果及其准确性	111
4.2.5	GB/T 5464—2010 的局限性及其与 GB/T 5464—1999 的主要差别	113
4.2.6	其他不燃性标准试验方法	114

4.3	建筑材料可燃性试验方法	115
4.3.1	简介	115
4.3.2	试验装置	116
4.3.3	试样	119
4.3.4	试验步骤	119
4.3.5	试验结果表示	121
4.3.6	试验方法的局限性	122
4.4	建筑材料燃烧热值试验方法	122
4.4.1	简介	122
4.4.2	试验装置和试样	122
4.4.3	试验步骤	125
4.4.4	试验结果处理	125
4.4.5	试验方法的局限性	127
4.5	建筑材料或制品的单体燃烧试验方法	128
4.5.1	简介	128
4.5.2	试验装置	128
4.5.3	试样	131
4.5.4	试验步骤	133
4.5.5	试验结果表示	134
4.5.6	试验方法的局限性	140
4.6	铺地材料燃烧性能试验方法	143
4.6.1	简介	143
4.6.2	试验装置和试件	144
4.6.3	试验步骤	147
4.6.4	试验结果表示	148
4.6.5	试验方法的局限性	149
4.7	材料产烟毒性危险分级方法	149
4.7.1	简介	149
4.7.2	基本原理	150
4.7.3	试验装置、试件和实验动物	151
4.7.4	试验步骤	154
4.7.5	试验结果计算和分级结论表示	156
4.7.6	试验方法的局限性	157
4.8	建筑材料的烟密度试验方法	158
4.8.1	简介	158
4.8.2	试验装置和试样	159
4.8.3	试验程序	160
4.8.4	试验结果表示	161
4.8.5	试验方法的局限性	161

4.9	表面制品的实体房间火试验方法	162
4.9.1	简介	162
4.9.2	试验装置和试样	163
4.9.3	试验步骤	165
4.9.4	试验结果表示	165
5	部分典型制品的燃烧性能试验	166
5.1	木制品的燃烧试验	166
5.1.1	木制品的 SBI 试验	166
5.1.2	不同木制品的试验结果	167
5.2	建筑外墙包覆材料燃烧性能试验	169
5.2.1	国外相关建筑规范	169
5.2.2	建筑立面全尺寸和中尺寸试验方法	170
5.2.3	外墙包覆材料分级的小尺寸试验方法	173
5.2.4	包覆材料和组合墙体全尺寸试验结果	174
5.3	室内壁面和顶棚材料的燃烧性能试验	178
5.3.1	欧盟的分级体系	178
5.3.2	日本的分级体系	178
5.3.3	澳大利亚的分级体系	178
5.4	夹芯板的燃烧试验	178
5.4.1	对火反应	179
5.4.2	板材的耐火性	179
5.4.3	燃烧试验方法	179
5.4.4	夹芯板燃烧试验结果比较	181
5.5	软包家具和床垫的燃烧试验	184
5.5.1	软包家具和床垫的燃烧特性	184
5.5.2	软包家具和床垫的标准试验	184
5.6	电缆的燃烧试验	186
5.6.1	电缆的火灾危险性	186
5.6.2	燃烧特性	186
5.6.3	电缆耐火性试验	187
5.6.4	欧盟国家对电缆的火灾试验及分级	188
5.7	家用电器产品燃烧试验	191
5.7.1	家用电器的燃烧特性	191
5.7.2	相关标准与规范	194
6	交通运输领域的火灾试验	195
6.1	交通隧道火灾试验	195
6.1.1	隧道火灾试验概述	195
6.1.2	大型隧道火灾试验	196
6.2	民航飞机相关材料及部件的燃烧试验	201

6.2.1 机舱内部材料燃烧试验 201

6.2.2 对机身外部结构材料的燃烧试验 203

6.2.3 机身外部构件燃烧试验及标准 203

6.2.4 机身外构件的要求 205

6.3 旅客列车材料燃烧试验..... 205

6.3.1 美国的规范要求 205

6.3.2 基于热释放速率的规范要求 207

6.4 船舶材料燃烧试验..... 213

6.4.1 规范及标准 213

6.4.2 分隔构件 213

6.4.3 疏散通道围护结构..... 214

6.4.4 内装饰材料 214

6.4.5 保温材料 217

6.4.6 家具设备 217

6.4.7 电线和电缆 219

6.4.8 管道和竖井 219

6.4.9 燃烧试验的发展 219

参考文献..... 222

1 材料燃烧性能概述

1.1 材料的燃烧

1.1.1 材料的燃烧现象

燃烧或火是由于升温或自由基引发的速率失去控制的放热化学反应。发生燃烧时必须同时具备四个条件，即可燃物、助燃物、火源和自由基连锁反应，并要满足一定的数量要求和发生相互作用。

火灾是失去控制的火蔓延所形成的一种灾害性燃烧现象，是人类社会遇到的极具毁灭性的灾害之一。火灾的直接损失远超过地震，仅次于干旱和洪涝灾害，火灾发生的频率居各灾种之首。火灾对人类的影响是否会成为社会问题取决于一个国家的意识形态和经济基础，对火灾预防 and 控制的重视程度取决于一个国家的风险意识和社会价值观，对消防安全的投入依赖于风险认知水平。可靠的风险分析必须建立在完整的统计数据之上。

从消防角度来看，高温下不同材料可能发生各种变化：

与空气中的氧迅速反应，引发燃烧、产生火焰、释放热量，提高自身和环境温度，成为新的火源；

机械强度下降或者结构破坏，造成垮塌、裂缝、软化或熔化等现象，失去原有的支承或防护功能，导致着火范围扩大；

将着火区的热量传导向未着火区，使后者的温度逐渐升高，最后达到材料的燃点而起火或引燃其他物体；

材料发生化学变化分解或与空气中的成分发生化学反应而放出各种气体（烟气），烟气中存在刺激性、窒息性或有毒成分，使人失去自护能力、昏迷甚至死亡。

为保障某一系统的消防安全，设计、建（制）造时应尽可能选择不燃或阻燃材料，为此必须首先了解材料的燃烧性能。

所谓材料的燃烧性能，是指材料对火反应的能力。即材料和（或）制品遇火燃烧时所发生的一切物理、化学变化，具体包括吸热、热解、着火燃烧、火焰蔓延、熄灭等多个方面。材料对火的反应特性反映了火灾初始阶段（即轰燃前阶段）材料表现出的燃烧行为。

材料的燃烧性能和构件的耐火极限是决定火灾危害大小的重要因素之一。

1.1.2 材料的易燃性

易燃性（flammability）是指规定条件下材料或制品发生有焰燃烧的能力（ISO FDIS 13943—2008 “Fire safety-Vocabulary”）。具体指材料被引燃、随后的燃烧和放热程度、火焰蔓延倾向、气化和燃烧过程中烟气及毒性燃烧产物的生成速率等。

为了全面评定材料的易燃性，必须建立一个能反映材料在真实火灾条件下的火灾危险性

参考场景，同时确定适当的试验条件，找出能准确反映材料在火灾危险情况下的性能参数，这是材料燃烧性能测试技术中必须解决的问题。

以建筑材料和制品的燃烧性能分级所用的试验方法为例。参考火灾场景为室内火灾，即建筑制品在小火焰的作用下被引燃，火焰逐渐蔓延传播，最终引起整个房间的轰燃。火灾增长过程包括三个阶段的火灾场景。第一阶段是引燃建筑制品的起火阶段，即小火焰接触到制品的局部区域。用于模拟人员不慎将烟头、火柴等小火源作用于建筑材料上引起的局部燃烧。第二阶段是火灾从小火源逐渐扩大的发展阶段。这一阶段火源不断变大，房间温度逐渐升高，火源开始对临近材料产生辐射作用。在燃烧性能分级体系中，用房间角落处单一火源模拟火灾过程中角落火源对相邻制品表面的热辐射引发的燃烧过程。根据建筑制品或房间中可燃物的燃烧性能，这一阶段的火灾增长极可能非常迅速。第三阶段时火灾已经发展起来，火焰甚至已经蔓延到房间的顶棚并在其下方形成热烟气层，火焰通过门窗开始向邻近房间或走廊的铺地材料辐射传热。这一阶段是火灾增长过程中发展最快的阶段，如果可燃物数量充足且通风条件良好，火灾将迅速增长而引发整个房间的轰燃。轰燃发生后，所有可燃制品均开始燃烧，火灾进入不可逆发展阶段。在上述火灾发生、发展和轰燃的整个过程中，找出对火灾形成和发展起决定作用的燃烧性能参数，建立能准确反映材料易燃性的方法，正是做好建筑材料和制品易燃性评价工作的前提条件。

全面评价材料的燃烧性能通常需要多组试验数据，必要时还需结合其他分析或模拟化手段。

1.2 材料的燃烧性能

多种燃烧性能参数会影响材料的燃烧性能，一般通过小型试验直接测量或经进一步计算获得材料的燃烧性能数据。

1.2.1 引燃性

根据火灾的发展过程，首先考虑材料和制品的引燃性。引燃性主要用于测试特定火灾条件下材料被引燃的难易程度。材料的引燃抗力是决定易燃性的主要因素。如果无法引燃，就不存在火灾危险性。当然，某些环境条件下持久气化或阴燃也会威胁到生命安全。

从生命安全的角度出发，最受关注的问题包括：在一定的热暴露下，材料或构件能否被引燃，需要多长时间引燃？我们无法仅仅依据材料的化学组成或结构回答这一问题，因为引燃发生在气相，会受几何和环境因素的影响。已经建立几种在不同热暴露条件下测定材料引燃性的方法，一般涉及多种辐射加热形式。大部分引燃试验使用引火源（火焰、火花、热导线等）诱导引燃过程的发生。除了自然着火外，已燃物品产生的火花或灰烬可作为引火源引发火灾，这种引燃模式与室内火灾密切相关。这里主要讨论高温固体的引燃着火。

固体引燃过程中会发生一系列物理和化学变化。通常可分为三个阶段，即简单升温（物理变化）、热分解和气体混合物开始发生气相反应。在升温阶段，升温速率主要取决于施加的热流量、对环境的热损失和材料的热物理性质，其次是相变潜热、辐射源和材料的光谱特征。升温阶段结束后，表面附近开始出现热解区，并缓慢向材料内部发展。材料分解（热解）的速率由分解反应动力学和吸热或放热性质决定。固体材料的气化部分（热解产物）从

固体表面流出后进入气相形成燃料-氧化剂混合物。闪燃时点火器附近燃料浓度近似等于易燃下限，预混火焰从点火器周围经易燃混合物向固体表面蔓延。如果热解产生挥发分的速率足以维持燃烧，扩散火焰将稳定在燃料表面，此即为材料的“燃点”，此时材料被引燃。虽然多数情况下闪点出现后很快就到达燃点，但在某些情况下（特别是氧浓度较低或流速加快）可能只出现闪燃而不发生持续燃烧。

显然，上述固相和气相现象均与引燃过程有关。因为材料的组成极其复杂，引燃时的实际热物理过程也相当复杂。例如，材料中可能含有吸热组分、成炭或膨胀促进剂、自由基销毁剂等。此外，非均质性（例如木材、复合材料）或各向异性可能影响固体中的热质传递过程。完整地模拟这些物理过程是比较困难的，虽然已经有人做过尝试，但多数简化的理论分析方法仍以固相作为研究对象，并以某些固相临界条件判断是否能够引燃，例如临界表面温度或临界热解速率。

引燃的基本判据是挥发分（热解产物）的临界质量流量（critical mass flow of volatiles），即热解产物燃烧释放的热量足以补充初生火焰传递给材料表面的热损失，能够使火焰温度维持在熄火温度以上时的挥发分最低质量流量。虽然通过试验确定临界质量流量极其困难，但实验发现燃料种类一定时，燃点附近材料受到的辐射热变化时质量流量变化不大。在火灾环境下，氧浓度增大时临界质量流量稍有下降。

鉴于测定引燃的气相过程或临界质量流量相当困难，绝大多数理论分析方法将临界表面温度作为引燃判据，通常称为引燃温度（ignition temperature, T_{ig} ）。根据 ASTM D 1929 “Standard Test Method for Determining Ignition Temperature of Plastics” 测量的部分材料引燃温度见表 1.1。虽然通常认为材料的引燃温度为一常数，但没有理论能够支持这一说法，因为引燃实际上是一个气相过程。试验表明，热流量增大时冷杉的 T_{ig} 降低，但对于常见聚合物来说 T_{ig} 随热流量增大而增大，这点与数值模拟结果一致。不过，通常引燃温度随固体表面附近氧浓度的下降或流速的加快而增大。由于热解速率对表面温度的变化非常敏感，除极端条件（例如环境氧浓度或流速变化很大）外，引燃通常发生在极窄的表面温度范围内。正因为如此，根据惰性固体加热过程提出的热引燃理论以引燃温度为判据确定引燃时间的方法是可行的。

表 1.1 部分材料的引燃温度

材 料	引燃温度(℃)	材 料	引燃温度(℃)
聚四氟乙烯	560	PU(硬质泡沫)	310
尼龙 6	420	聚乙烯	340
ABS	390	聚丙烯	320
聚苯乙烯	350	硝酸纤维	130
PVC(硬质)	390	松木	240
PVC(软质)	330	纸张	230
PMMA	300		

为了全面描述固体的引燃过程，提出了引燃时间（time to ignition，或延迟着火时间 ignition delay time, t_{ig} ）的概念，定义为表面温度达到引燃温度所需的时间。研究表明，环境氧浓度对引燃时间的影响不大。例如，氧浓度从 18% 提高到 25% 时，PMMA 的引燃时间

变化不大。引燃时间可通过模拟固体升温至引燃温度所需时间来确定。

不考虑材料进一步热解的情况下,简单引燃过程可通过一维非稳态导热方程分析。

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1.1a)$$

式中, ρ 和 c 为材料的密度和热容; k 为热导率; x 为空间坐标。

则引燃过程分析转化为在适当的边界条件下解方程 (1.1a) 确定 t_{ig} 的过程。

边界条件是材料表面传导的热量等于材料表面接收的净热流量,即

$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \dot{q}_{net}''(t) \quad (1.1b)$$

另一边界条件是传给表面的热量 $\dot{q}_{net}''$ 由外热源 $\dot{q}_e''$ 、对流 $\dot{q}_{conv}''$ 和辐射热损 $\dot{q}_{rr}''$ 组成。即

$$\dot{q}_{net}'' = \alpha \dot{q}_e'' - \dot{q}_{conv}'' - \dot{q}_{rr}'' \quad (1.2)$$

式中, α 为表面辐射吸收率。

对于热薄型固体,通常认为在其厚度范围内温度相同,可利用方程 (1.1a) 的集总热容形式。当外部热源的热流量远大于对流和辐射热损时,传给材料的净热流量近似为常数 $\alpha \dot{q}_e''$,则热薄型材料引燃时间可由下式确定,即

$$t_{ig} = \rho c \delta \frac{T_{ig} - T_{\infty}}{\alpha \dot{q}_e''} \quad (1.3)$$

式中, δ 为材料厚度; T_{∞} 为环境温度,同时等于固体内部温度。

通常,厚度小于 1mm 的物体可看作热薄型固体,例如一张纸、布、塑料薄膜;但非隔热基材上的薄涂层或多层材料通常不是热薄型材料,因为基材的导热作用使多层材料产生与厚型材料类似的热传导现象。

实际材料多数是“热厚型”的,其内部温度分布不均匀,所以分析过程会复杂一些。假定外热源强度远大于热损,则根据方程 (1.1a) 得热厚型材料的引燃时间为

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} k \rho c \left(\frac{T_{ig} - T_{\infty}}{\alpha \dot{q}_e''} \right)^2 \quad (1.4a)$$

式中, $k \rho c$ 为材料的热惯性。

适用条件是 $t_{ig} \ll k \rho c / h_T^2$ 。 h_T 为总传热系数,包括对流散热和线性近似后的表面辐射热。

在低辐射热流量下,不能忽视表面热损,则

$$t_{ig} = \frac{k \rho c}{\pi h_T^2} \left[1 - \frac{h_T (T_{ig} - T_{\infty})}{\alpha \dot{q}_e''} \right]^2 \quad (1.4b)$$

适用条件为 $t_{ig} \gg k \rho c / h_T^2$ 。

在氧浓度较高和流速较慢而气相化学反应速度较快的情况下,上述方程与试验结果的一致性非常好。若气相燃烧反应较慢,计算引燃时间时还必须考虑气相诱导时间的影响。

假定上述方程中 $t_{ig} \rightarrow \infty$,则已知总传热系数时,实际引燃温度可利用引燃时的临界热流量进行估算:

$$T_{ig} = T_{\infty} + \alpha \dot{q}_{cr}'' / h_T \quad (1.5)$$

式中, $\dot{q}_{cr}''$ 是指引燃时间趋于无限长时引燃热流量 $\dot{q}_e''$ 的临界值。

通过上述分析可以看出,与引燃过程有关的材料基本火灾性能包括引燃温度 T_{ig} 、热惯性 $k \rho c$ 和临界热流量 $\dot{q}_{cr}''$ 。材料的热惯性可通过试验绘制 $t_{ig}^{-1/2}$ 对 $\dot{q}_e''$ 的曲线确定 ($\dot{q}_e'' \gg \dot{q}_{cr}''$)

时)。热惯性是在不考虑热损或经线性近似得到总传热系数的前提下,由惰性加热方程得到的表观值,当然也未考虑材料的吸热分解反应(通常会发生热解反应),所以与材料的实际 k 、 ρ 、 c (与温度有关)之间存在一定差别。此外,表观热惯性不是材料的固有性质,会受环境条件、试验装置和数据处理技术等影响。尽管如此,利用特定条件下的易燃性试验结果可对材料进行易燃性分级,但无法据此推测环境条件差别较大时体系的实际火灾场景。

1.2.2 质量燃烧速率和热释放速率

1.2.2.1 质量燃烧速率

质量燃烧速率(mass burning rate, $\dot{m}''$)是指单位时间单位面积固体材料的热解质量。质量燃烧速率决定火灾时的热释放速率(heat release rate, HRR)和燃烧产物的质量,是一个重要的火灾性能参数。在稳态燃烧阶段,可利用材料表面吸收的净热量 $\dot{q}_{\text{net}}''$ 和材料的有效汽化热(effective heat of gasification, ΔH_g)计算质量燃烧速率。即

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_{\text{net}}''}{\Delta H_g} \quad (1.6)$$

通常燃烧条件会影响有效气化热的大小,考虑火焰本身的对流 $\dot{q}_{\text{fc}}''$ 和辐射热反馈 $\dot{q}_{\text{fr}}''$ 时,可将净热流量定义为

$$\dot{q}_{\text{net}}'' = \alpha \dot{q}_{\text{e}}'' + \dot{q}_{\text{fc}}'' + \dot{q}_{\text{fr}}'' - \dot{q}_{\text{rr}}'' \quad (1.7)$$

这里假定通过热传导向材料内部的热量明显小于材料表面吸收的热量,显然这一假定在某些情况下是不成立的。 $\dot{q}_{\text{e}}''$ 由远处的火焰、热气层或室内表面产生; $\dot{q}_{\text{rr}}''$ 主要取决于燃烧材料的表面温度,通常在 $500 \sim 700^\circ\text{C}$ 之间。火焰辐射热 $\dot{q}_{\text{fr}}''$ 和对流换热 $\dot{q}_{\text{fc}}''$ 的大小则由材料的绝热火焰温度、成炭性、实际尺寸及其与重力之间的相对取向有关。火势增大到一定程度时,火焰传回到材料表面的辐射热大于对流传热量。

1.2.2.2 热释放速率

单位面积的热释放速率 $\dot{Q}_{HRR}'$ (heat release rate, HRR)是火灾危险性的重要标志,它决定了火灾增长速度。 $HRR_{\text{总}}$ 与卷吸的空气质量(产烟量)、羽流温度和速度以及是否发生轰燃有关。单位面积的热释放速率 $\dot{Q}_{HRR}'$ 是质量燃烧速率与燃烧热 ΔH_c 的乘积。

$$\dot{Q}_{HRR}' = \dot{m}'' \Delta H_c \quad (1.8)$$

ΔH_c 是实际火灾条件下消耗单位质量燃料时释放的热量,等于理论燃烧热 ΔH_T 与燃烧效率(combustion efficiency, χ)的乘积,即

$$\Delta H_c = \chi \Delta H_T \quad (1.9)$$

通风良好时纯燃料的 χ 值接近1,但通风受限时 χ 可降至0.4。

因此,单位面积的热释放速率 HRR 为

$$\dot{Q}_{HRR}' = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_g} \dot{q}_{\text{net}}'' \quad (1.10)$$

即热释放速率与燃烧热和材料吸收的净热成正比,与气化热成反比。部分可燃物的热释放速率见表1.2。

$\Delta H_c / \Delta H_g$ 称为热释放参数(heat release parameter)或可燃性比(combustibility ratio),是净传热速率恒定时决定稳态热释放速率的火灾性能参数,也是影响质量传递或

“B”数（即释放的化学能与单位质量燃料蒸发所需能量的比值）的重要因素。

表 1.2 部分可燃物的热释放速率

可燃物	热释放速率	可燃物	热释放速率
燃烧的烟头	5W	1m ² 汽油	2.5MW
普通灯泡	60W	3m 的木垛火	7MW
正常状态的人	100W	2m ² ×4.9m 纸装的 聚苯乙烯瓶燃烧	30~40MW
废纸篓燃烧	100kW	核电站输出功率	500~1000MW

1.2.3 火焰传播速率

材料支持火焰传播的能力是影响火灾危险性的重要因素，它会通过扩大燃烧区影响总热释放速率。火焰传播可看做材料未燃部分的引燃速度和已着火部分持续燃烧速度相互竞争的结果。

火焰传播速率（flame spread rate, V ）定义为固体热解前沿的加热长度 l 与引燃时间 t_{ig} 之比

$$V = \frac{l}{t_{ig}} \quad (1.11)$$

根据 t_{ig} 计算式，有

$$\text{热薄型} \quad V = \frac{(\dot{q}''_e + \dot{q}''_{fc} + \dot{q}''_{fr} - \dot{q}''_{rr})l}{\alpha \delta (T_{ig} - T_s)} \quad (1.12a)$$

$$\text{热厚型} \quad V = \frac{4(\dot{q}''_e + \dot{q}''_{fc} + \dot{q}''_{fr} - \dot{q}''_{rr})^2 l}{\pi k \rho c (T_{ig} - T_s)^2} \quad (1.12b)$$

式中， T_s 为材料表面的初始温度；在火焰传播过程中，大多数材料可以看作黑体， $\alpha=1$ 。

如果气相反应速度很快，则影响引燃和火焰传播的主要因素必然相同。热流量的大小和火焰传播区的特征长度 l 取决于火焰传播过程的几何因素和环境条件。

固体火焰传播有两种模式，即顺风（wind aided）火焰传播和逆风（opposed flow）火焰传播。逆风火焰传播是指火焰传播方向与空气流动方向相反，而顺风火焰传播时火焰传播方向与空气流动方向相同。火场的空气流动通常由燃烧过程引起，顺风火焰传播包括火焰在垂直表面的向上传播或火焰在吊顶上的辐射传播，逆风火焰传播包括火焰在垂直表面的向下或横向传播和火焰在地板上的辐射传播。由于顺风火焰传播过程中材料表面暴露在强热流中的面积比逆风火焰传播时大，通常火焰的顺风传播速率比逆风传播速率大 1~2 个数量级，所以顺风火焰传播比逆风火焰传播的火灾危险性大得多。

1.2.3.1 逆风火焰传播

对于向下或逆风火焰传播过程，火焰传播方向与周围空气的流动方向相反，除非火焰与加热区之间的辐射形状系数（radiation view factor）较大（例如水平火焰传播），否则加热区的长度尺度（ l ）一般不超过几个毫米。

对于平板上的逆风火焰传播，方程（1.7）中的对流部分近似为

$$\dot{q}''_{fc} = C_1 (k_g \rho_g c_{pg} V_g)^{1/2} (T_f - T_{ig}) \quad (1.13)$$

对流加热区的长度近似与边界层厚度成正比。

$$l \propto \delta Re_{\delta}^{-1/2} = C_2 V_g^{-1/2} \quad (1.14)$$

式中, δ 为系统的特征长度, V_g 为空气流速, C_2 为常数。

则火焰传播速率

$$\text{热薄型} \quad V = \frac{[C_3 (k_g \rho_g c_{pg})^{1/2} (T_f - T_{ig}) + (\dot{q}_e'' + \dot{q}_{fr}'' - \dot{q}_{rr}'')l]}{\rho c \delta (T_{ig} - T_s)} \quad (1.15a)$$

$$\text{热厚型} \quad V = \frac{4}{\pi} \frac{[C_3 (k_g \rho_g c_{pg})^{1/2} (T_f - T_{ig}) V_g^{1/4} + (\dot{q}_e'' + \dot{q}_{fr}'' - \dot{q}_{rr}'')l^{1/2}]^2}{k \rho c (T_{ig} - T_s)^2} \quad (1.15b)$$

式中, C_3 为常数, 可通过修正试验结果与理论值间的差别确定。

上述方程适用于气相反应速度很快的情况。否则, 需考虑诱导时间的影响。

1.2.3.2 火焰向上传播

火焰向上传播是顺风传播的一个特例, 因为火场浮力决定了氧化剂的流速。这是火势蔓延的主要方式。

火焰向上传播的速率比逆风传播快, 是由于加热区的长度尺度 l 可能达到几十厘米甚至几米。

对于顺风火焰传播, l 近似等于火焰长度 l_f 。其中, 层流火焰的长度由质量流量决定, 湍流火焰的长度与单位面积的热释放速率和燃烧区 (热解区) 的高度 l_p 有关, 即

$$l = l_f \propto (l_p Q_{HRR}')^n \quad (1.16)$$

对于垂直壁面的湍流燃烧, 指数 n 约为 $2/3$ 。

将上式代入方程 (1.12), 则火焰向上传播速率为

$$\text{热薄型} \quad V \propto \frac{(\dot{q}_e'' + \dot{q}_{fc}'' + \dot{q}_{fr}'' - \dot{q}_{rr}'')(l_p Q_{HRR}')^{2/3}}{\rho c \delta (T_{ig} - T_s)} \quad (1.17a)$$

$$\text{热厚型} \quad V \propto \frac{4}{\pi} \frac{(\dot{q}_e'' + \dot{q}_{fc}'' + \dot{q}_{fr}'' - \dot{q}_{rr}'')^2 (l_p Q_{HRR}')^{2/3}}{k \rho c (T_{ig} - T_s)^2} \quad (1.17b)$$

显然, 因热解区的高度不断增加, 火焰向上传播为加速过程。

考虑到稳态燃烧时, Q_{HRR}' 正比于净热流量和热释放参数 $\Delta H_c / \Delta H_g$ 的乘积, 则火焰向上传播速率主要由热释放参数、火焰和热解区长度及火焰热流量决定。

火焰经对流反馈到材料表面的热流量 $\dot{q}_{fc}''$ 与火焰温度和火势大小有关。随着火势的增大, $\dot{q}_{fr}''$ 逐渐增大, $\dot{q}_{fc}''$ 的影响逐渐变小。

火焰辐射强度不仅与火势大小有关, 还与绝热火焰温度和燃料的成炭性有关。

为了简化计算过程, 有时将式 (1.17a)、式 (1.17b) 中的分子合并为火焰传播指数 (flame spread parameter), 其中薄型材料用 ϕ 表示, 厚型材料用 Φ 表示。

可通过试验方法估算 ϕ 或 Φ 的数值, 即

$$\text{热薄型} \quad V = \frac{\phi}{\rho c \delta (T_{ig} - T_s)} \quad (1.18a)$$

$$\text{热厚型} \quad V = \frac{\Phi}{k \rho c (T_{ig} - T_s)^2} \quad (1.18b)$$

火焰传播指数可用于材料的易燃性分级。显然, 热惯性、引燃温度和火焰传播系数共同决定火焰传播。