



阴燃

路长 余明高/著

火灾学

YINRAN
HUOZAI XUE
吉林人民出版社

阴燃火灾学

路长 余明高 著

吉林人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

阴燃火灾学 / 路长, 余明高著. — 长春: 吉林人民出版社, 2009.8

ISBN 978-7-206-06283-4

I. 阴… II. ①路… ②余… III. ①固体—燃烧—研究 ②火灾—研究 IV. 0643.2 X928.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 148436 号

阴燃火灾学

著 者: 路 长 余明高

责任编辑: 吴兰萍

封面设计: 张 娜

吉林人民出版社出版 发行 (长春市人民大街 7548 号 邮政编码: 130022)

印 刷: 长春市南关区太平彩印有限公司

开 本: 880mm×1230mm 1/32

印 张: 6.5 字 数: 170 千字

标准书号: ISBN 978-7-206-06283-4

版 次: 2009 年 8 月第 1 版 印 次: 2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 18.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

前 言

随着我国国民经济的快速发展和物质财富的不断积累，相应的可燃物数量也在不断增加，使防火安全面临很多新的问题。近年来我国的火灾形势仍比较严峻，重大和特大火灾连续发生，如何采取有效的消防措施以减少火灾造成的人员伤亡和财产损失已成为社会关注的重大课题。

阴燃是固体材料的无火焰燃烧过程，典型的如香烟的燃烧、蚊香的燃烧等。阴燃的特点是在较微弱的热源（火源）作用下就能发生和维持传播。虽然阴燃本身传播速度很慢，造成的破坏也有限，但一旦转化为明火后就会酿成大火灾。我国每年都有非常多的火灾是由于前期阴燃而引起的，每年仅烟头阴燃引起的火灾起数就占到总火灾起数的7%左右。阴燃的危害主要表现在两个方面，一是在经过长时间不易被觉察的潜伏后，条件满足时会突然向明火发生转化，造成大火灾；二是阴燃过程中会释放出大量有毒气体，严重危害人的健康，乃至使人死亡。

本书作者针对国内外至今缺少系统全面介绍阴燃火灾规律的专著的情况，在学习吸收国内外最新研究成果的基础上，结合自己多年来的研究心得撰写了本书。书中主要对最常见的两种阴燃材料，聚氨酯泡沫（海绵）和纤维质颗粒（锯末），进行分析。由此来认识阴燃过程的现象和特点。本书从火灾科学的应用理论基础出发，对阴燃所涉及的气体输运、化学反应、点燃、传播、向明火转化和熄灭等发展变化过程进行了系统而详细的阐述。本书的根本目的在于揭示阴燃火灾的内在规律，解决消防工程中存在的现实问题，为采取合理有效的防火灭火措施，降低阴燃火灾造成的人员伤亡和财产损失提供理论依据。

本书共分七章。第一章介绍我国火灾总体形势，阴燃火灾的特点和发生状况，国内外有关阴燃研究的现状和展望，以及阴燃研究的作用和意义。第二章介绍与阴燃火灾相关的化学、物理基础，包

括化学动力学基础，反应速度和反应机理，物理上的分子输运定律、物理守恒方程等。第三章介绍固体颗粒材料的阴燃和有焰燃烧的联系与区别，具有碳粒的燃烧理论，以及固体材料的热解模型等。第四章介绍多孔阴燃材料的点燃过程，所受影响因素，以及点燃的积分模型和反应源项对比模型等。第五章介绍阴燃传播过程所具有的自相似性特点和所受影响因素，正向阴燃和反向阴燃的规律，阴燃传播模型，以及数值模拟涉及的反应模型、控制方程组、初始条件、边界条件、方程离散化和相关参数的确定等。第六章介绍阴燃向明火转化发生的现象和表现特点，向明火转化发生的温度条件、可燃气体条件和风速条件，以及阴燃向明火转化的模型。第七章介绍阴燃熄灭的基本理论，以及阴燃熄灭的条件和情形。其中第一章第二章以及第四到第七章由河南理工大学路长博士撰写，第三章由河南理工大学余明高教授撰写。

本书的完成得益于河南省基础与前沿技术研究计划项目(092300410045, 082300463205)，河南理工大学博士基金(648183)的资助，在此表示感谢。

由于阴燃火灾学是一门新兴的交叉学科，很多知识内容还需更深入的研究，也由于作者的水平有限，本书的错漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2009年8月

目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 火灾现象及其危害性.....	1
1.1.1 火灾及其危害性.....	1
1.1.2 我国目前的火灾形势.....	5
1.2 阴燃火灾及其特点.....	7
1.2.1 阴燃的有关概念.....	7
1.2.2 阴燃的特点及其危害.....	10
1.2.3 我国阴燃火灾概况.....	11
1.3 阴燃研究的现状与意义.....	13
1.3.1 阴燃研究的现状.....	13
1.3.2 阴燃研究的作用与意义.....	22
第二章 阴燃火灾的化学物理基础.....	24
2.1 化学动力学基础.....	24
2.1.1 浓度及其表示法.....	24
2.1.2 化学反应速度.....	27
2.1.3 反应级数和反应分子数.....	29
2.1.4 影响反应速度的因素.....	30
2.1.5 化学动力学方程.....	34
2.1.6 链锁反应机理.....	35
2.2 燃烧物理基础.....	37
2.2.1 分子输运基本定律.....	37
2.2.2 多组分反应系统的守恒方程.....	41
2.2.3 泽尔多维奇转换与广义雷诺比拟.....	43
2.2.4 斯蒂芬流和相界面上的边界条件.....	45

第三章 固体材料的有焰燃烧与阴燃	51
3.1 固体颗粒的燃烧	51
3.1.1 固体颗粒的有焰燃烧与阴燃	51
3.1.2 扩散动力控制的碳粒表面燃烧	54
3.1.3 碳粒的扩散燃烧	56
3.1.4 碳粒阴燃的内孔效应	57
3.2 固体材料的热解模型	60
3.2.1 纤维质热解过程的单方程模型	60
3.2.2 纤维质热解过程的平行竞争反应双方程模型	64
3.2.3 纤维质材料的其他热解模型	66
3.2.4 聚氨酯泡沫材料的热解模型	67
第四章 阴燃材料的点燃	69
4.1 阴燃材料的点燃过程	69
4.1.1 聚氨酯泡沫的点燃过程	69
4.1.2 纤维质颗粒的点燃过程	73
4.2 点燃过程的影响因素	75
4.2.1 外热源功率的影响	75
4.2.2 氧气浓度的影响	78
4.3 材料点燃过程模型	80
4.3.1 点燃过程积分模型	80
4.3.2 反应源项对比模型	85
第五章 阴燃的传播	96
5.1 阴燃传播的特点	96
5.1.1 阴燃传播的稳定性	96
5.1.2 一维传播过程的自相似模型	100
5.1.3 影响阴燃传播的因素	104
5.2 正向阴燃传播	107
5.2.1 聚氨酯泡沫的正向阴燃	107

5.2.2	纤维质颗粒的正向阴燃	111
5.2.3	正向阴燃传播模型	112
5.3	反向阴燃传播	116
5.3.1	聚氨酯泡沫的反向阴燃	116
5.3.2	纤维质颗粒的反向阴燃	120
5.3.3	反向阴燃传播模型	121
5.4	阴燃传播数值模拟基础	126
5.4.1	阴燃反应模型	126
5.4.2	阴燃过程控制方程组	127
5.4.3	边界条件与初始条件	129
5.4.4	模型中相应参数的确定	130
5.4.5	控制方程组的离散化	131
5.4.6	应用软件介绍	132
第六章	阴燃向明火的转化	135
6.1	阴燃向明火转化的特点	135
6.1.1	阴燃向明火转化的现象与危害	135
6.1.2	受限氧气条件下阴燃向明火的转化	137
6.1.3	阴燃和明火条件下的材料消耗率	139
6.1.4	阴燃向明火转化的发生位置	142
6.1.5	适度水分下阴燃中出现明火	146
6.2	阴燃向明火转化的条件	152
6.2.1	温度条件	152
6.2.2	热解可燃气体条件	154
6.2.3	风速条件	158
6.3	阴燃向明火转化的模型	159
6.3.1	模型的建立	159
6.3.2	结果与讨论	168
6.3.3	模型同实验的比较	172

第七章 阴燃的熄灭.....	175
7.1 熄灭的基本理论.....	175
7.1.1 熄灭的热理论.....	175
7.1.2 熄灭的链锁反应理论.....	178
7.2 阴燃熄灭的情形.....	181
7.2.1 风速增加导致的阴燃熄灭.....	181
7.2.2 材料参数对熄灭的影响.....	184
7.2.3 水分导致的阴燃熄灭.....	186
参考文献.....	190

第一章 绪 论

阴燃是指固体材料依靠异相氧化反应所放出的热量维持传播的燃烧过程。阴燃过程没有火焰，多发生在松软有孔的材料中，典型的如香烟，常见的还有纺织品、海绵、化纤、棉花、木材纤维质颗粒、纸屑等等，以及其他粉尘状、颗粒状、丝状、小片状固体。与之相对应，有火焰的燃烧过程，我们在此称之为明火。在安全领域，阴燃所造成的危害主要表现在两个方面，一是阴燃过程产生大量的有毒烟气，使人中毒甚至窒息死亡；二是在一定条件下阴燃转化成明火，酿成大火灾。在实际的火灾过程中，两者通常都是共同作用导致人员伤亡和财产损失。在美国的火灾原因统计中，由阴燃引起的火灾，发生数量占总数量的比例是最高的。在我国的火灾统计中，每年仅由“吸烟”这一典型阴燃引起的火灾数占总起数的比例就在7%左右。要防范和控制阴燃火灾，必须对其发生、发展、突变和熄灭的过程有深入的认识和理解。

1.1 火灾现象及其危害性

1.1.1 火灾及其危害性

火的使用是人类的伟大创举之一，可以追溯到远古时代的刀耕火种、取暖烤食及吓退野兽等。火的使用不仅改善了人类的饮食和取暖条件，而且不断促进社会生产力的发展，使人类创造出了大量的社会财富。可以说，火在人类文明和社会进步中起着无法估量的重要作用。

然而应当指出，万事万物有利必有弊。火若失去控制，让它在

具备燃烧条件的地方自由发展，它就会四处蔓延，吞噬那里的各种可燃物质。往往由于一把火，人们辛苦多年创造和积累的财富转眼间化为灰烬，千百年来的茂盛森林几天内就变成荒野。火还可无情的夺取许多人的生命。这就是自然和社会的一种主要危害——火灾。

火灾是人们所不希望的一种失去控制的由燃烧造成的灾害。凡是具备燃烧条件的地方，如果用火不当，或者由于某种事故或其他因素，造成了火焰不受限制的向外扩张，就可能形成火灾。

火灾对人类和社会造成的破坏非常巨大。其造成的损失大大超过其直接财产损失。直接、间接财产损失，人员伤亡损失，扑救消防费用、保险管理费用以及投入的火灾防护工程费用统称为火灾代价。根据世界火灾统计中心以及欧洲共同体研究的结果，大多数发达国家每年的直接火灾损失占国民经济总产值 0.2% 左右，而整个火灾代价约占 1%。根据联合国世界火灾统计中心提供的资料，近年来，在全球范围内，每年发生的火灾就有 600 万~700 万起，有 65 000~75 000 人死于火灾。由此可见，火灾防治是人类社会的一项长期的重要任务。

最近一二十年来，我国正处于火灾形势比较严峻的时期，火灾的次数和损失均居高不下，尤其是发生了多起特大和重大火灾，有的还造成了严重的群死群伤事件。例如新疆克拉玛依友谊馆火灾、河南东都商厦火灾中的死亡人数均超过 300 人，衡阳特大火灾死亡消防队员 20 人，其影响震惊中外。图 1-1 给出了最近十几年我国每年的火灾直接损失统计数据。表 1-1 则列出了最近十几年来我国一些特大火灾概况。

火灾在造成巨大经济损失的同时，还会对环境和生态系统造成不同程度的破坏。燃烧产生的大量烟雾、二氧化碳、一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物等有害气体，不仅对环境产生不良影响，而且影响地面光照质量和数量，从而影响农作物的生长和收成。高强度火影响土壤结构，破坏营养元素循环，使土壤微生物减少、森林大火能够烧死大量植物，使植物难以回复，系统失去自我调节能力，

表 1-1 1995-2006 年我国城镇部分特大火灾概况

时间	失火单位	原因火灾	直接损失/ 万元	死/伤人
1995 年				
1 月 20 日	河南郑州天然商厦	电线短路	2 096.1	0 / 9
10 月 15 日	山东胶州青岛世原鞋业公司	电缆短路	2 785.8	-
12 月 8 日	广东广州芬兰浴中心	吸烟引燃	145	18/0
1996 年				
4 月 2 日	辽宁沈阳商业城	纵火嫌疑	5 519.2	-
8 月 9 日	河南濮阳中原油田输油管	哄抢漏油引燃	1.6	40 / 57
12 月 8 日	湖南安乡县大富豪夜总会	电线故障	20	11 / 0
1997 年				
1 月 29 日	湖南长沙市燕山酒店	酒精炉取暖	97	40 / 89
6 月 27 日	北京东方化工厂乙烯储罐	燃气泄漏静电	11 700	8 / 40
11 月 17 日	新疆喀什工贸中心大楼	电热毯过热	400	15 / 21
1998 年				
1 月 31 日	黑龙江佳木斯华联商厦	电热管加热	3 638	1 / 5
3 月 5 日	陕西西安煤气公司	液化气泄漏	477.8	11 / 30
1999 年				
1 月 9 日	北京丰台区华龙灯具批发商场	电气	1736	-
1 月 10 日	四川达州市通州百货商场	违反规定	3 163.1	-
2000 年				
1 月 11 日	安徽合肥市城隍庙市场庐阳宫	电气	2 178.9	-
1 月 12 日	江苏省盐城市招商商场	纵火	1 289.9	1 / 13
4 月 1 日	云南昆明市南窑商品批发市场	玩火	1 821.3	0 / 2
12 月 25 日	河南省洛阳市东都商厦	违章电焊	150	309 / 7
2001 年				
6 月 5 日	江西广播电视艺术幼儿园	蚊香失火	-	13 / 4
12 月 19 日	内蒙古呼和浩特宾馆	电器线路故障	910	5 / 19
2002 年				

4月21日	三亚市“阳光购物城”	电线接触不良	-	7 / 20
6月16日	北京市蓝极速网吧	纵火	-	24 / 13
7月11日	安徽佳通轮胎有限公司仓库	纵火	2 692	-
2003年				
11月3日	湖南衡阳市衡州大厦	火灾坍塌	-	20 / 11
4月2日	海口社会福利厂泡沫包装分厂	用氧气焊支解	100	-
2004年				
2月15日	吉林中百商厦	烟头引燃	-	53 / 70
2月15日	浙江海宁市黄湾镇五丰村	失火引燃草棚	-	40 / 3
2005年				
6月10日	广东汕头市潮南区华南宾馆	电气	81	31/28
12月15日	吉林辽源市中心医院	电气	821.9	37/95
2006年				
6月5日	安徽滁州市天长市天正购物广场	电气	1 702.9	-
9月14日	浙江湖州市织里镇复音大厦	电气	736	15/2

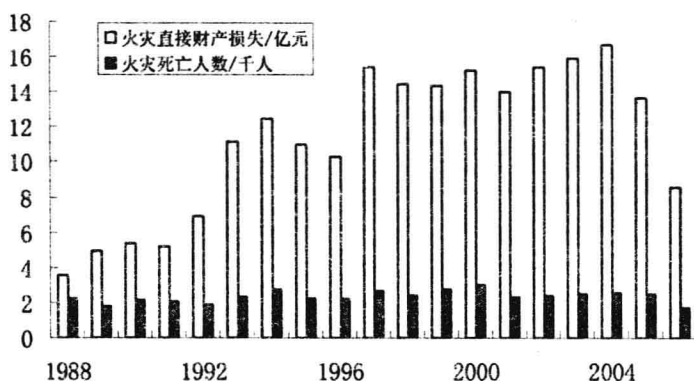


图 1-1 1988-2006 年我国火灾直接财产损失和死亡人数统计

同时受伤林木生命力下降，病虫害易于发生，从而促进林木进一步死亡，加速生态系统崩溃。此外，海面上的油轮火灾，伴随原油泄漏，对海洋环境和生态也造成不良的影响。而且，火灾还会给社会

带来不安定因素。

因此，充分认识火灾的基本现象和危害性，掌握火灾发生、发展和蔓延的基本规律，以火灾安全工程学为理论基础，依靠科技进步，在有限的防火安全投入下，采取切实可行、有效的火灾防护措施，降低火灾发生概率及火灾发生后的损失程度是广大科学与消防工程研究工作者的共同目标。

1.1.2 我国目前的火灾形势

近年来，随着我国经济建设的快速发展，导致火灾的因素也大量增加，火灾形势仍然严峻。据统计，2002-2006年的五年内，全国共发生火灾 986 565 次，造成死亡 12 881 人，受伤 21 076 人，直接财产损失 73.3 亿人民币(以上统计数字均不包括港、澳、台地区和森林、草原、军队、矿井地下发生的火灾，下同)火灾次数逐年增多，火灾损失也呈日趋上升趋势。表 1-2 为过去五年我国的火灾统计数字。

仅 2002 年，全国就发生火灾 258 315 次，死亡 2 393 人，受伤 3 414 人，直接财产损失 15.4 亿元。与上年相比，起数上升 19.2%，死亡上升 2.5%，受伤下降 9.7%，直接财产损失上升 10.1%。

表 1-2 我国 2002-2006 年火灾情况

年份	火灾次数/ 次	死亡人数/人	受伤人数/人	直接财产损失/ 亿元
2002	258 315	2 393	3 414	15.4
2003	253 932	2 482	3 087	15.9
2004	252 804	2 562	2 969	16.7
2005	235 941	2 500	2 508	13.7
2006	231 881	1 720	1 565	8.6
总计	1 232 873	11 657	13 543	70.3

当前我国火灾主要有以下特点：

1. 重特大火灾时有发生

2002年，全国共发生重大火灾344起，造成477人死亡，202人受伤，直接财产损失1.396亿元；发生特大火灾25起，造成70人死亡、44人受伤，直接财产损失12188元。其中，一次死亡10人以上的特大火灾3起，造成61人死亡，36人受伤。重特大火灾的发生不仅对人民的生命财产造成巨大损失，而且影响到国家经济建设和人民群众安居乐业。多年来，我国消防工作者殚精竭虑，致力于预防和减少重特大火灾的发生。

2. 公众聚集场所火灾比较严重

尽管近几年来我国各级人民政府加大了对商场市场、宾馆饭店、歌厅舞厅、医院学校等公众聚集场所消防安全治理力度，但这类场所的火灾仍然比较突出。2002年，全国共发生各类公众聚集场所火灾9499起，造成333人死亡，分别占全年各类火灾总数的4%和14%。

3. 物质储存场所及各类堆场火灾突出

近几年，这类场所的火灾日趋增多，造成的财产损失越来越严重。2002年，全国发生这类火灾达34457起，直接财产损失18580.3万元，起数和直接财产损失都是近几年较多的一年。

4. 私营企业、个体工商户等小型经营场所火灾所占比例较大

2002年，全国私营企业、个体工商户共发生火灾79955起，造成1529人死亡，2096人受伤，直接财产损失54065.5万元。四项数字分别占各类单位火灾总数的95.0%、93.3%、86.8%和75.3%。

5. 城乡居民住宅火灾呈多发态势

2002年，全国城乡居民住宅共发生火灾51711起，造成1622人死亡，1341人受伤，直接财产损失21118.0万元。四项数字分别占火灾总数的20%、67.8%、39.3%和14%。与上年相比，起数和死亡人数分别上升4.8%和9.7%。

6. 放火案件不容忽视

2002年6月16日发生的北京市“蓝极速”网吧，2002年7月11日安徽省佳通轮胎有限公司成品仓库等特大放火案件，对人民生

命安全和国家财产都造成惨重的损失。2002 年全国共发生放火案件 8 415 起，占火灾总数的 3%。

1.2 阴燃火灾及其特点

1.2.1 阴燃的有关概念

阴燃，简单地说就是无火焰的燃烧过程，以固体表面氧化反应为主。常见和典型的阴燃如香烟的燃烧、蚊香的燃烧等。它通常发生在疏松多孔的固体材料中。与阴燃相对应的是明火，即有火焰的燃烧过程，以空间中的气相氧化反应为主。

为了更好地描述阴燃过程中的一些状态和特征，文献以及本文中都会应用一些特定的术语来进行表达。为了更好地了解这些术语在阴燃过程中的特定含义，在此进行简单的说明。

阴燃 (Smoldering):

指材料主要依靠固体与氧气间的异相表面反应所放出的热量维持自身传播的燃烧过程。

明火 (Flaming Combustion):

指可燃气体与氧气间的同相反应为主的燃烧过程，即通常所指的燃烧，与阴燃相对应。

自维持传播 (Self-sustained Propagation):

依靠材料自身氧化反应放出的热量推动阴燃不断向前传播的过程。由于阴燃的反应速度较慢，在向外界存在热损失的情况下，如果反应区域很小，依靠自身的热量将不能使阴燃持续传播而导致熄灭。这种情况通常发生在阴燃的初期，从而需要外热源进行持续的加热。

异相反应 (Heterogeneous Reaction):

指多孔阴燃材料的固体与氧气之间的直接反应，区别于固体热解生成的可燃气体与氧气之间的同相反应 (homogeneous

reaction)。异相反应是发生于固体表面的氧化反应，因此也称为表面反应 (surface reaction)。

阴燃反应 (Smoldering Reaction):

指阴燃过程中有固态参与的所有化学反应的总称，总体上是放出热量的。包括以下反应的之一或全部，(1) 放热的氧气与材料的氧化热解反应 (oxidation pyrolysis reaction); (2) 吸热的无氧参与的热解反应 (pyrolysis reaction); (3) 放热的氧气与前两种反应生成的炭的氧化反应 (char oxidation reaction)。

阴燃前锋 (Smoldering Front):

指阴燃传播中反应区向前推进所到达的位置，即未反应材料与已反应材料的交界处。这个位置的固体材料已经开始发生化学反应，温度应达到 300°C 以上。但这是一个相对模糊的位置，如果要精确定位这一点，文献会通过一个准确的温度值 (如 300°C 或 350°C) 来确定。如果细分还可以分为氧化反应前锋 (oxidation front) 和热解反应前锋 (pyrolysis front)。

峰值温度 (Peak Temperature):

也称为阴燃最高温度 (maximum temperature)。在阴燃的稳定传播中，各个点具有相同的温度变化规律，一开始处于低温度，随着阴燃前锋的到达而温度升高，并在最高温度值处维持一段时间，随着阴燃前锋的离开而温度开始下降。各位置点所能到达的最高温度值几乎都是相同的。在任一时刻，总是正在发生氧化反应的区域温度处于最高 (这一区域的宽度随着阴燃过程的不同而有差异)，两边的已反应区和未反应区温度都较低，呈现出一个峰的性状，因此称为峰值温度。

阴燃波 (Smoldering Wave):

就是指阴燃的向前推进传播。任一时刻阴燃过程的温度空间曲线都呈现出两端低中间高的形态，类似于波的形状。在传播过程中也类似于波的传播，中间高的波峰不断向前推进。因此就引入了阴燃波这一概念。