



国外优秀科技著作出版专项基金资助

火灾学基础

Fundamentals of Fire Phenomena

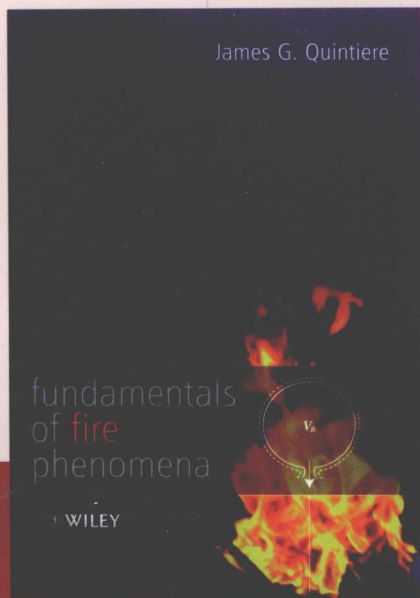
[美] 詹姆斯 G. 昆棣瑞 (James G. Quintiere) 著

杜建科 王平 高亚萍 译

Chemical Industry Press



化学工业出版社





国外优秀科技著作出版专项基金资助

火灾学基础

Fundamentals of Fire Phenomena



[美] 詹姆斯 G. 昆棣瑞 (James G. Quintiere) 著

杜建科 王平 高亚萍 译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要包括火灾中的热化学、控制体中的守恒方程、预混火焰和着火理论、固体火焰传播、火焰传播速度和火羽流、室内火灾以及火灾模拟等内容,重点突出了火灾现象中的基本原理,同时介绍了许多经验公式并做了理论解释,每章均附有丰富的参考文献和习题,便于广大读者使用。

本书内容新颖、深入浅出、通俗易懂,结构合理,内容编排符合一般教学规律,有利于组织教学和广大读者的自学,可作为消防或相关专业高年级本科生、研究生的教材或教学参考书,亦可供消防工程、安全工程、保险等领域的科研工作者、管理人员和工程技术人员作为一般参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

火灾学基础/[美]昆棣瑞(Quintiere, J. G.)著;
杜建科,王平,高亚萍译. —北京:化学工业出版社,
2010.1

书名原文: Fundamentals of Fire Phenomena
ISBN 978-7-122-07268-9

I. 火… II. ①昆… ②杜… ③王… ④高… III.
火灾-基本知识 IV. TU998.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第226199号

fundamentals of fire phenomena/by James G. Quintiere
ISBN-13 978-0-470-09113-5(HB)

Copyright©2006 by John Wiley & Sons Ltd. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley
& Sons Ltd.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons Ltd 授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。
若此书未粘贴威立标签,则视为未经授权图书。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2008-4445

责任编辑:杜进祥

文字编辑:陈雨

责任校对:洪雅姝

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张21½ 字数468千字 2010年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

国外优秀科技著作出版专项基金

FUND FOR FOREIGN BOOKS
OF EXCELLENCE ON
SCIENCE AND TECHNOLOGY
(FFBEST)

管理委员会名单

名誉主任：成思危 全国人大常委会原副委员长
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会名誉会长
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪
潘德润 朱静华 王印海 龚七一
俸培宗 魏 然

委 员 (按姓氏笔画顺序排列)：

王子镐	王心芳	王印海	王光建	王行愚
申长雨	冯 霄	冯孝庭	朱家骅	朱静华
刘振武	杨晋庆	李 彬	李伯耿	李学勇
李静海	吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	俸培宗	徐 宇	徐静安
黄少烈	曹 光	曹湘洪	龚七一	盛连喜
阎三忠	葛 雄	焦 奎	曾宝强	谭竹洲
潘德润	戴猷元	魏 然		

秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

献给将科学思维应用到火灾现象中的人们，
我努力把他们的研究成果融入到本书中！

译者序

《火灾学基础》由“国际火灾安全科学学会”(IAFSS)第二任主席、国际著名的火灾科学家、美国马里兰大学消防工程系教授 Quintiere 博士撰写,是继 Drysdale 的“An Introduction to Fire Dynamics”(第二版,1999)之后又一本关于火灾现象基本原理的力作,必将对国际火灾科学与消防工程领域产生重要影响。

燃烧基本规律和火灾动力学是火灾科学与消防工程的理论基础,也是进行火灾现象研究和开展火灾防治的基本依据。为了满足消防工程的实际需要,结合火灾科学与消防工程领域的最新研究成果,经过作者的精心组织形成了此书。书中系统地介绍了燃烧反应的热化学原理和基本燃烧现象,讨论了预混火焰和自燃过程,利用守恒定律分析了各种火灾现象,并对已有的经验关系式进行了理论解释,概述了室内火灾的基本特征,最后介绍了相似理论与量纲分析在火灾科学与消防工程中的应用,因此而将上述内容整合形成了一门完整的学科。

全书由杜建科教授组织翻译和统稿。其中,第1、2、6、7、8、12章由杜建科教授翻译,第5、9、11章由王平副教授翻译,第3、4、10章由高亚萍讲师翻译。由于原著内容丰富、新颖,尽管我们努力推敲原文,力求用中文忠实地表达原文的科学内涵,但受学识所限,在历时1年的翻译工作中,我们经常因词不达意而深感困惑,加上时间有限,所以不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

在本书的翻译和出版过程中,得到了武警学院院长杨隼博士、北京理工大学材料学院副院长杨荣杰教授、武警学院消防工程系的领导和同事、化学工业出版社责任编辑等人的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

译者

2009年11月

前言

火灾科学的许多重要发展与新泽西有关。美国火灾研究之父，Howard Emmons 出生于莫利斯顿 (Morristown)，就读于新泽西的史蒂文斯工学院；Dick Magee (火焰传播测定研究) 则执教于史蒂文斯工学院；John de Ris (逆风火焰传播研究) 住在 Englewood；Gerry Faeth (湍流火焰研究) 在 Teaneck 长大；Frank Steward (多孔介质中的火焰传播研究) 和 Forman Williams (火灾模化研究) 来自 New Brunswick；Bob Altenkirch (微重力下火焰传播研究) 是新泽西工学院 (早期称为 NCE) 的校长；大西洋城的 FAA 设有飞行器安全火灾重点实验室 (Gus Sarkos、Dick Hill 和 Rich Lyon)；Yogesh Jaluria (火灾中的自然对流研究) 在 Rutgers 任教；居住在 Waldwick 的 Glenn Corbett 在 John Jay 学院讲授火灾科学；Jim Milke (防火安全研究) 在 Cherry Hill 长大；Irv Glassman (液体火焰传播研究) 在普林斯顿大学任教，他鼓励许多人进入火灾研究领域；还有 Fred Dryer (动力学研究)、Thor Eklund (飞行器研究)、Carlos Fernandez-Pello (火焰传播研究)、Takashi Kashiwagi (材料可燃性研究)、Tom Ohlemiller (阴燃研究)、Kozo Saito (液体火焰传播研究)、Bill Sigrignano (数值模拟研究) 等；此外，前任加利福尼亚大学 (伯克利) 的校监 Chiang L. Tien (火灾中的辐射研究)，从普林斯顿毕业后很快进入纽约大学从事机械工程研究，后来也被吸引到伯克利。

我生于新泽西的 Passaic，在 NCE 学习，从纽约大学机械工程专业获得博士学位。我觉得水中的某种东西促使我写这本书。

我所受的教育形成了本书的写作动机和风格。我在纽约大学的学习以与燃烧关系不大的理论热科学为主，我的导师 W. K. Mueller 鼓励做严谨细致的分析以揭示学科的本质原理，借此促进学科的实际应用。离开理论，一门学科只能利用经验公式或现在的计算机程序来推广应用。我一直努力使这本书更加严谨和完善，所以本书重点突出了火灾科学的基础，但同时不希望它成为火灾学的综合性手册。我尽量减少用偏微分方程建立理论，因此一般将控制体看做性质均匀的研究对象，这样只需建立常微分方程。然而，只有理论方法还不足以找出问题的答案，因为理论还无法解释这一领域的复杂火灾现象，但它完全能够为实验现象间的关联奠定基础。实际上，从全书可以看出，火灾模化一词更多地用于经验关系建立的准则而不是纯粹的理论原理，特别是第 12 章的火灾模拟部分，它是深入的理论与高度概括的经验关系间的结合。在借助合理的数据用计算机能够求解大家熟知的火灾学基本方程之前，我们将不得不依赖经验方法。不过，像在其它复杂领域一样，建立在理论原理基础上的简化关系式是

解决工程问题最有效的工具。

20 世纪 70 年代初期是人类发现火灾规律的时代，当时我有幸成为国家标准局（NBS，即现在的美国国家标准技术研究院，NIST）中的一员，在那里凝炼了自己的火灾学知识。在 John Lyons 的带领下，1974 年在 NBS 建立了火灾研究中心（CFR），参与了 3 个课题，确立了火灾研究的国家投资模式。受 Alex Robertson 和 Irwin Benjamin 重视标准的影响，完成了耗氧量热计的技术革新（Bill Parker、C. Huggett 和 V. Babauskas）和其它相关技术，这些合作计划促使人们改变了对火灾的一贯看法。过去许多人一直认为火灾不适合用科学原理来解释，因为这种现象过于复杂或者只需要应用规则就足够了。与此同时，由 Ralph Long（当时已进入 CFR 工作）领导的 NSF RANN 计划投资 200 万美元开展火灾研究。Hoyt Hottel 教授和 Howard Emmons 教授长期呼吁美国应该开展火灾研究工作，终于在 20 世纪 70 年代取得成效。另外，受 Emmons 的影响，工厂共同研究协会（FMRC）组成一个基础研究小组，起初由 John Rockett 领导、接着是 Philip Thomons、后来主要由 Ray Friedman 领导，FM 火灾研究计划成为工程科学在火灾中应用的典范，吸引了 G. Heskestad、J. deRis、A. Tewarson 等人加入到这一领域。

CFR 的职员数量最多时接近 120 人，管理超过 400 万美元用于资助中心以外的研究计划。总统的国家火灾预防与控制委员会则出版它的研究报告（美国燃烧，1973）、授权开展火灾研究和改进火灾服务技术。20 世纪 70 年代丰富的研究成果为撰写此书奠定了良好的基础。我在 CFR 的团队，H. Baum、T. Kashiwagi、M. Harkeroad、B. McCaffrey、H. Nelson、W. Parker、J. Raines、W. Rinkinen 和 K. Steckler 等人都使我获益良多。而与国内重要协会著名学者的交往和对科学家如 X. Bodart、M. Curtat、Y. Hasemi、M. Kokkala、T. Tanaka、H. Takeda 和 K. Saito 等人难忘的访问同样让我收获不小。这一切都来自 CFR 的良好学术氛围，也是在这里工作的所有人员共享的一种学术交流方法。

在 CFR 成立初期，我们通过努力建立了适当的交流程序，鼓励与博学者之间的交流，努力把握火灾的内在规律和消费者安全的“政治需要”。在美国-日本自然资源专门小组（UJNR）的资助下，John Lyons 安排了与日本人的交流，借助这项有影响的研究计划实现了对英国火灾研究所（FRS）的访问。FRS 建立于第二次世界大战之后，20 世纪 60 年代的鼎盛时期在 Dennis Lawson 的带领下，分别由 Philip H. Thomos（火灾模化研究）和 David Rasbash（火灾抑制研究）领导了其中的两个研究部门。他们的共同成果不仅成为研究工作的典范，也是研究工作的新起点。日本人曾经长期开展火灾科学研究，因为 1923 年的东京地震对日本人民和经济都造成了毁灭性的打击，诱发了人们的消防安全敏感性。这个计划还为我们提供了与 S. Yokoi（火羽流研究）、K. Kawagoe（通风流动研究）、T. Hirano（火焰传播研究）等人交流的机会。这项 UJNR 火灾研究交流计划持续了约 25 年，激发了两国研究人员的探索欲望，因此而在 1975~1985 年出现了火灾科学的复兴局面。

人员汇集、政府支持和国际交流使火灾研究工作不仅涌现出大量新理论而且开始了实际应用。本书是在上述经验的启迪和每位参与者学术思想的影响下完成的，对此我深表感激，我希望本书能够恰当地反映出这一切。

本书可作为本科高年级或研究生教材，适合在开设热力学、流体力学和热质传递课程之后学习，学生需要掌握包括一般常微分方程应用的微积分学知识。我相信这是强调燃烧特征和反映火灾学科的全部主要问题的第一本火灾学教材，它借助化学动力学和控制体方法建立了火灾发展过程中预混和扩散火焰之间的关系，在不涉及区域模型全部内容的前提下完善了室内火灾的系统动力学，更多的相关内容可以参考 B. Karlsson 和 J. G. Quintiere 的《受限空间火灾动力学》一书。本教材也受 Dougal Drysdale 的早期著作《火灾动力学导论》的影响，我在 20 多年的相关课程教学中一直利用它建立课程的框架结构。我试图用适当的教学方法使学生加深对工程公式的理解。为了获得关键性工程结论，有时需要大量方程推导，希望一部分学生能够发现这种分析过程的意义，而这可能影响其他人对基本原理的掌握。虽然本教材不是文献资料的综合体现，但将通过列举重要成果或基本原理来充实教材内容。

感谢在本书写作过程中给我灵感和帮助的人们，最直接的支持主要来自以下几位。当我在丹麦技术大学（DTU）正式开始系统写作本书中的各章时，Kristian Hertz 教授慷慨地给我 3 个月公休假，当时正值 DTU 启动消防工程硕士学位教育计划，目的是为丹麦消防安全性能化规范的立法提供必要的技术支持，希望本书能够对 DTU 等院校的消防工程教育计划有所帮助，当然在其它工程学科的课程体系中增加消防安全基础知识也是有益的。为了帮助学生掌握理论分析过程，本书增加了一系列的数理方程，使得文字输入的工作量倍增。为此，感谢 Stephanie Smith 牺牲她的私人时间打印初稿；同样，感谢 Kate Stewart 帮助完成了后期打印工作，特别是解决了一些具体问题并完成大量插图；特别感谢消防工程协会基金为完成这项工作所提供的部分经费支持，希望此书将对他们的会员有所帮助。感谢学生们能够接受早期不完善的教学内容，忍受黑板上乏味的推演过程，也感谢提出修改意见和给我激励的学生们，特别感谢我的研究生们讨论这些观点和试用此书。最后，衷心感谢 John L. Bryan 对我的信任，使我有机会在 1990 年加入一个充满活力的集体从事教学工作。

James G. Quintiere

于美国马里兰大学帕克分校消防工程系

The John L. Bryan Chair

术语表

A	面积 指前因子
b	S-Z 变量 (第 9 章) 羽流宽度
B	Spalding B 数 无量纲羽流宽度
Bi	毕渥数
c	比热容
C	系数
CS	控制面
CV	控制体
d	距离
D	扩散系数 直径
Da	达姆科勒数
E	能量 活化能
f	混合分数
F	辐射角系数 力
Fr	弗劳德数
g	重力加速度
Gr	格拉晓夫数
h	热量或质量传递系数 单位质量的焓值
H	焓
h_{fg}	蒸发热
j	流动表面数
k	热导率
l	长度
L	气化热
Le	路易斯数, Pr/Sc
m	质量
M	相对分子质量
n	液滴数目
$\mathbf{n}$	单位法 (线) 向量
N	混合物中的组分数
Nu	努塞尔数
p	压力
Pr	普朗特数
q	热量

Q	火源能量 (或热量)
r	化学计量的氧气-燃料质量比
R	通用气体常数
Re	雷诺数
s	化学计量的空气-燃料质量比, 单位质量的热熵
S	面积
S_u	层流燃烧速度
Sc	施密特数
Sh	舍伍德数
t	时间
T	温度
v	速度
V	体积
w	z 方向分速度
W	宽度 功
x	坐标
X	摩尔分数 辐射分数 (指定下标)
y	坐标
y_i	单位质量燃料气化时组分 i 的质量产率
Y	质量分数
z	垂直坐标
α	热扩散系数
β	体积膨胀系数
γ	比热容比 第 7、9 章定义的变量
δ	间距 达姆科勒数 (第 5 章)
Δ	差值, 间距
Δh_c	燃烧热
Δh_v	蒸发热
ϵ	发射率
θ	无量纲温度 角度
$\theta_{FO,i}$	$r_0(B+1)/[B(r_0+1)]$ (第 9 章)
K	辐射吸收系数
λ	波长
μ	动力黏度
ν	运动黏度, μ/ρ
ν_i	化学计量系数
ξ	无量纲距离
π	3.1416……
Π	无量纲数群
ρ	密度
σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
τ	无量纲时间
τ_0	$c_p(T_v - T_\infty)/L$
ϕ	无量纲温度 燃料供给系数

下标

a, air	空气
ad	绝热的
b	燃烧
B	气球
BL	边界层
c	燃烧 对流 临界的
d	扩散
dp	露点
e	外部的
f	火焰
F	燃料
g	气体
i	组分
l	液体
L	下限
m	质量传递
o	最初的 通风口
O ₂ , ox	氧气
p	产物 压力 热解前锋
py	热解
Q	熄灭
r	辐射
R	反应
s	表面
st	化学计量的
t	总计的
T	热的
u	未燃混合物
U	上限
v	蒸发
w	墙壁 水
x	坐标方向
∞	环境的

其它

$\dot{a}$	a 的变化率
$\tilde{a}$	每摩尔的 a
a'	单位长度的 a
a''	单位面积的 a
a'''	单位体积的 a
$\mathbf{a}$	矢量 a

目 录

1 绪论	1
1.1 人类与火灾	1
1.2 火灾与科学	5
1.3 20 世纪的消防安全及其研究	7
1.4 发展前景	10
1.5 本书简介	10
参考文献	15
习题	15
2 热化学	16
2.1 引言	16
2.2 化学反应	17
2.3 气体混合物	19
2.4 系统中的守恒定律	21
2.5 生成热	24
2.6 质量和能量守恒在化学反应中的应用	25
2.7 火灾中的燃烧产物	28
参考文献	32
习题	32
3 控制体中的守恒定律	38
3.1 引言	38
3.2 雷诺输运定理	38
3.3 控制体与系统体积间的关系	41
3.4 质量守恒	41
3.5 反应组分的质量守恒	42
3.6 动量守恒	45
3.7 控制体中的能量守恒	46
习题	52

4 预混火焰	57
4.1 引言.....	57
4.2 反应速率.....	58
4.3 自燃.....	59
4.4 引燃.....	62
4.5 火焰速度, S_u	65
4.6 熄火直径.....	70
4.7 易燃极限.....	72
4.8 计算易燃下限的经验公式.....	75
4.9 引燃、火焰传播和熄灭现象的定量分析.....	77
参考文献	80
习题	80
 5 自燃	86
5.1 引言.....	86
5.2 自燃理论.....	88
5.3 实验方法.....	91
5.4 自燃时间.....	93
参考文献	95
习题	96
 6 液体着火	99
6.1 引言.....	99
6.2 闪点	100
6.3 蒸发动力学	101
6.4 克劳修斯-克拉贝龙方程	104
6.5 蒸发速率	107
参考文献.....	112
习题.....	113
 7 固体着火	116
7.1 引言	116
7.2 着火时间的估算	117
7.3 热导着火模型	120
7.4 火灾中的热通量	121
7.5 热薄型固体着火	124
7.6 热厚型固体着火	128
7.7 常见材料的着火性质	135
参考文献.....	138

习题.....	138
8 固体表面和内部的火焰传播	141
8.1 引言	141
8.2 表面火焰传播——热薄型系统	143
8.3 瞬态效应	146
8.4 热厚型固体表面的火焰传播	147
8.5 固体表面火焰传播的实验分析	149
8.6 表面传播的部分主要结果	155
8.7 其它条件下的火焰传播实例	157
参考文献.....	161
习题.....	162
9 燃烧速率	167
9.1 引言	167
9.2 液体燃料的扩散燃烧	172
9.3 影响扩散火焰的因素	179
9.4 一定流动条件下的对流燃烧	182
9.5 辐射对燃烧的影响	188
9.6 燃烧速率计算时有关性能参数的选取	192
9.7 燃烧的抑制与熄灭	193
9.8 复合材料的燃烧速率	198
9.9 扩散燃烧理论中控制体的选择	199
9.10 灭火过程的一般动力学分析.....	205
9.11 扩散燃烧理论在灭火中的应用.....	208
参考文献.....	211
习题.....	212
10 火羽流.....	219
10.1 引言.....	219
10.2 浮力羽流.....	222
10.3 燃烧羽流.....	229
10.4 有限的真实火的影响.....	231
10.5 火羽流的瞬时特征.....	242
参考文献.....	247
习题.....	248
11 室内火灾.....	251
11.1 引言.....	251

11.2	流体动力学.....	253
11.3	热传递.....	256
11.4	燃料性能.....	260
11.5	区域模型和守恒方程.....	262
11.6	经验关系式.....	264
11.7	谢苗诺夫图、轰燃及其不稳定性.....	269
	参考文献.....	272
	习题.....	273
12	模拟和无量纲数群.....	278
12.1	引言.....	278
12.2	建立无量纲数群的方法.....	279
12.3	根据守恒方程建立的无量纲数群.....	280
12.4	具体关系式举例.....	291
12.5	相似模型.....	297
	参考文献.....	302
	附录.....	304
	燃烧参数 Archibald Tewarson 提供 (美国马萨诸塞州 Norwood, FM 全球 公司)	304

1 绪论

1.1 人类与火灾

早在蒙昧时期人类就已经认识了火，火造就了宇宙万物，从人类起源至今一直是人类社会的重要组成部分。在日常生活中，随着取暖、照明、煮饭和工业生产过程对火依赖程度的减小，人类已经不太关注燃烧现象了。虽然人们花费大量资金研究维持燃烧的技术，但极少考虑到阻止燃烧的发生。当然，在人类的编年史中同样也记录了灾难性火灾，但这只是增加了人们对火的敬畏而不是从中吸取教训，或许从一次次孤立的火灾经历中我们学得更多的是如何忘记它。相对于它在远古文化中所处的中心地位，当今发达世界的人类生活中火则处于次要位置。既然火几乎退出了人类生活的舞台，为什么我们还要研究它呢？

随着社会进步，人类的价值观取决于生产了什么和用什么原料生产。然而，随着获取产品的方法越来越简单，价值观便转向了最基本的社会福利和生存环境。失控的燃烧可能毁坏人类现有的财富和生产原料，关系到火灾预防和灾后重建的成本。火灾对人类和环境的影响能否成为社会问题取决于一个国家的意识形态和基本经济状况，而对火灾预防与控制的关注程度取决于一个国家的风险意识和社会价值观。虽然任何国家都同样面临这些问题，但在重大社会和技术进步的过程中，20 世纪可能已经为合理利用科学原理分析火灾现象奠定了基础，发达国家更是如此。

现代社会消防安全的投入取决于对风险的认知水平，而可靠的风险分析必须建立在完整的统计数据之上。20 世纪 70 年代初的火灾成为美国政府关注重大火灾损失的主要原因，这一点在国家火灾预防与控制委员会的报告中有清楚的陈述^[1]。报告指出火灾每年造成美国 110 亿美元以上的财产损失和 12000 人死亡，其中 3500 人死于汽车火灾；但早期的统计数据因小数点位置出现错误而使这一数据缩小为 1/10 倍（只有 350 人死于汽车火灾）。不过，如果资金投入向这一领域倾斜，则真正的年度死亡人数可控制在 8000 人左右（一项新的研究成果使每年的死亡人数减少了大约 4000 人！），当前每年因火灾死亡的人数大约为 4000 人（1998 年为 4126 人^[2]）。从 1971 年死亡人数约 8000 人减少到现在约 4000 人的主要原因在于感烟探测器使用数量的不断增加，即从 1971 年几乎无人使用到 1981 年以后普及率超过了 66%^[3]，所以火灾死亡人数的减少似乎与火灾探测器的普及程度有关。通常还无法建立明确的关系来解