

钟茂华 著

火灾过程 动力学特性分析



科学出版社

www.sciencep.com

火灾过程动力学特性分析

钟茂华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者 1995 年以来完成的国家自然科学基金项目、“九五”和“十五”科技攻关项目等的总结。全书共 10 章, 主要介绍了我国火灾概况、火灾过程动力学特性分析的理论基础、室内家具轰燃的实验研究、多层多室建筑火灾实验研究、典型材料燃烧特性的实验测试、多层多室建筑火灾烟气蔓延过程计算模拟、典型火灾过程非线性动力学特性分析、多层多室建筑火灾烟气运动的网络模拟、矿井火灾时期风流定量优化控制研究、城市突发重大事件应急指挥系统性能分析等。结合实验的方法, 本书对火灾过程动力学特性分析方法进行探讨。

本书可供从事火灾安全性分析、安全评价的技术人员参考, 也可作为高等院校安全工程专业高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

火灾过程动力学特性分析/钟茂华著. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018061-2

I. 火… II. 钟… III. 火灾-动力学 IV. TU998.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 110562 号

责任编辑: 胡晓春 朱海燕 卜 新 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—2 000 字数: 262 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

火灾动力学研究的是系统在火灾条件下系统特性参数随时间的变化而变化的规律。了解火灾的发生与发展过程的动力学特征是火灾安全科学的重要研究内容。本书在前人研究的基础上,应用模型实验、模拟实验和非线性科学的理论和方法,从动力学的角度对典型火灾过程进行研究。这里涉及的火灾主要有多层多室建筑火灾、矿井火灾、森林火灾等。至于其他种类的火灾如石油化工类的火灾、火灾引起的二次灾害等,这里没有涉及。本书是笔者1995年攻读博士学位以来的主要研究工作的总结。这些工作是笔者先后在东北大学、中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室和中国安全生产科学研究院完成的。

全书共10章。

第1章为火灾概述,主要以有关文献数据为依据,以现有的省级行政区划为地理界限,以规定的时间段为基础,对中国历史上的火灾事故及其原因进行简要统计分析。其中,数据来源难免有一定的局限性,但结论对我们今天了解过去的火灾史具有帮助与启迪意义。同时,笔者把近年的火灾事故主要趋势与中国历史上的火灾事故规律进行对比分析,并分析了当前火灾安全科学的研究热点。

第2章主要介绍火灾过程动力学特性分析的理论基础,研究火灾过程的分形分析方法和混沌分析方法以及遗传算法的基本概念、基本算子、基本原理、基本步骤、基本过程描述、应用设计等。

第3章对室内典型家具的轰燃现象进行了实验研究,利用实验方法成功地观测到室内家具轰燃的全过程,介绍了轰燃实验的设计方法、测量方法。

第4章主要介绍多层多室建筑火灾模型实验研究。笔者利用中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的模型实验楼,对多层多室建筑室内火灾时烟气运动过程的规律进行研究,实验过程主要对烟流成分、温度、气压差和烟流速度等进行测量与分析,并基于《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ2-2002),就烟流成分对人的危害进行分析。结果表明:多层多室建筑火灾时,着火源点垂直高度上温差最大。随着烟流蔓延和扩散,烟气层温度基本趋于一致。对于木垛火灾和煤油火灾,最先超过一般人的生理极限的主要成分是 SO_2 、 CO 、 CO_2 ,其次是 NO 、 NO_2 。在多层建筑火灾过程中,烟流的气压差波动幅度及频率较大,容易导致烟流在流动过程中充分蔓延到流经通道的每一个空间,使人员避灾难度加大。

第5章主要介绍典型材料燃烧特性的实验测试,这些材料包括木垛、电缆等

可燃物。为了进一步分析火灾危险性及其可能导致的后果,必须了解清楚可燃物的燃烧特性,如热释放速率和燃烧过程中的一氧化碳浓度、二氧化碳浓度、氧气浓度等的变化情况。利用基于 ISO 9705 标准的全尺寸燃烧间 ($3.6\text{m} \times 2.4\text{m} \times 2.4\text{m}$) 内典型材料燃烧特性的实验方法所产生的测试结果,在第 6 章中进行数值模拟。

第 6 章针对中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的五层模型楼,利用数值模拟-场模拟方法,研究多层多室建筑火灾烟气流动及蔓延规律,分析烟气蔓延时温度变化、一氧化碳浓度变化、烟气流场的变化、烟气蔓延过程和可见度的分布情况,并把这些模拟的结果与第 4 章中的实验结果进行对比分析。

第 7 章主要是对典型火灾过程非线性动力学特性进行分析,矿井火灾过程动力学特性分形分析和确定性混沌分析是以英国 Fernhill 煤矿发生的一次火灾为例。该章还对煤炭自燃过程进行了分析,以实验为基础对林火蔓延突变行为进行了分析。

第 8 章主要介绍多层多室建筑火灾烟气运动的网络模拟技术,研究了网络模型的基本方法、网络模型的关键技术处理,并以中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的五层模型楼为分析对象,分别对有无风机、有无室外风流、门窗开启等条件下的建筑火灾进行模拟,就假设火灾情况下可能受烟气污染的房间和烟气的危险范围进行数值模拟。

第 9 章主要研究矿井火灾时期风流定量优化控制问题,首先介绍国内外矿井火灾时期风流控制的研究现状,然后讨论矿井火灾时期风流优化控制的非线性规划模型,并从井下火灾灾变时期风流定量优化控制入手,应用非数值并行算法,从三个方面来研究通风系统灾变时定量优化控制问题:①井下火灾时期烟流扩散的模拟及计算机仿真。②井下火灾时期风流的定量优化控制的非数值并行方法探讨。利用现有的风流优化控制数学模型,求解灾变时风流最优控制策略。③火灾灾变风流优化控制问题求解过程中有关参数选择方法的研究。

第 10 章引入 Petri 网来对我国典型的城市突发重大事件应急指挥系统性能进行分析,初步建立城市重大事件应急联动系统性能分析的 Petri 网模型。这些突发事件包括火灾、交通事故、医疗急救等。本书对突发事件发生时各种不同的应急策略的性能进行了量化分析。

在本书撰写过程中,引用了大量国内外同行的研究成果,参考了大量文献,笔者深表感谢。本书的实验部分是在中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的厉培德老师的指导和帮助下完成的,书中部分数值模拟得到史聪灵博士的鼎力支持,书稿的构思及整理得到韦星同志的大力支持和帮助,在此深表谢意。同时,本书也是多项研究成果的结晶,如国家自然科学基金委员会和二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(项目批准号:50579100)、国

国家自然科学基金项目(项目批准号:50674079和50106017)、国家“九五”科技攻关项目(编号:96-918-01-02)、国家“十五”科技攻关项目(编号:2004BA803B05)、国家安全生产监督管理总局项目等。在本书撰写过程中得到东北大学陈宝智教授和中国工程院院士范维澄教授的指导以及北京航空航天大学钟群鹏院士的鼓励,同时还得到中国安全生产科学研究院刘铁民研究员、吴宗之研究员、张兴凯教授、李湖生教授、邢娟娟研究员、邓云峰博士、符泰然博士、何理工程师、刘功智高级工程师、耿凤高级工程师,湖南科技大学肖国清教授,中国科学技术大学陆守香教授、廖光煊教授、张和平教授、蒋勇博士、韦亚星博士,东北大学王英敏教授,广州市地下铁道总公司徐明杰研究员、徐一平高级工程师、张建根高级工程师,南京市地下铁道有限责任公司许巧祥高级工程师,深圳地铁有限公司陈湘生教授、黎忠文教授,北京市地铁设计研究所蒋玉琨教授,沈阳建筑大学张培红教授,国电电力建设研究所程永锋博士,清华大学水利水电工程系林鹏博士,东京大学 Ritsu Dobashi教授,英国南岸大学(South Bank University)化学工程系 P. Nolan 教授,荷兰代尔夫特理工大学 A. R. Hale 教授,国际应急管理杂志执行主编 Jean-Luc Wybo 教授等的帮助,在此深表谢意!

笔者在本书的撰写过程中虽然已尽了最大努力,但由于水平有限,错误和不足之处在所难免,敬请读者赐教。

钟茂华

2006年1月于北京

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 中国火灾现状	1
1.2 中国火灾史简析	3
1.2.1 中国早期的火灾记载	3
1.2.2 中国历史上火灾多发区变化趋势分析	4
1.2.3 中国历史上的火灾原因简析	5
1.3 火灾过程危险评价研究现状	8
1.3.1 火灾危险评价的指数法	9
1.3.2 火灾危险评价的动态分级方法	11
1.3.3 火灾过程危险评价的主要软件	12
1.4 火灾过程控制方案的决策	13
1.4.1 火灾过程控制的定性研究	14
1.4.2 火灾过程控制的定量研究	15
1.5 火灾动力学研究对象	15
1.6 火灾防治技术研究对象	16
1.7 火灾科学研究热点与展望	17
参考文献	18
第 2 章 火灾过程动力学特性分析的理论基础	22
2.1 概述	22
2.2 事故过程的分形动力学特性分析方法	23
2.3 事故过程的混沌动力学特性分析方法	25
2.3.1 相空间的重构	25
2.3.2 由单变量时间序列计算 Lyapunov 指数	28
2.4 遗传算法	29
2.4.1 遗传算法的基本概念	30
2.4.2 遗传算法的基本算子	30
2.4.3 遗传算法的基本原理	31

2.4.4 遗传算法的基本步骤	32
2.4.5 遗传算法基本过程描述	35
2.4.6 遗传算法的应用设计	39
参考文献	40
第3章 室内家具轰燃的实验研究	43
3.1 概述	43
3.2 实验设计	44
3.2.1 实验室结构	44
3.2.2 实验装置	45
3.3 家具轰燃实验	46
3.4 实验分析	50
参考文献	51
第4章 多层多室建筑火灾实验研究	53
4.1 概述	53
4.2 实验设计	54
4.2.1 五层模型实验楼	54
4.2.2 实验燃料	55
4.2.3 实验测试系统	56
4.2.4 实验测试程序设计	62
4.3 实验室结构及设计	62
4.4 典型实验结果	63
4.5 实验结果分析	97
参考文献	101
第5章 典型材料燃烧特性的实验测试	102
5.1 概述	102
5.2 实验原理	102
5.3 实验装置和方法	103
5.4 数据采集系统与处理系统	103
5.5 实验材料	104
5.6 主要实验结果	105
5.6.1 木垛实验结果	106
5.6.2 电缆实验结果	106
参考文献	111
第6章 多层多室建筑火灾烟气蔓延过程计算模拟	112

6.1 计算模拟方法介绍	112
6.2 计算流动、燃烧、传热模型	112
6.2.1 基本控制方程求解过程	112
6.2.2 湍流流动模型	114
6.2.3 燃烧模型	115
6.2.4 辐射传输模型	116
6.3 模拟计算主要考察问题	116
6.4 火灾烟气模拟的参数设置	116
6.4.1 建筑物模型的结构尺寸	116
6.4.2 火源位置与火源功率设定曲线	117
6.4.3 排烟设置	117
6.4.4 计算区域网络解析	118
6.4.5 场景设置	119
6.5 模拟计算结果与分析	120
6.5.1 五层模型楼空间温度场变化	120
6.5.2 CO 浓度变化	120
6.5.3 速度场分布	134
6.5.4 烟气蔓延过程及可见度分析	142
6.6 讨论	157
参考文献	158
第7章 典型火灾过程非线性动力学特性分析	159
7.1 矿井火灾过程动力学特性分形分析	159
7.1.1 火灾过程的分形动力学特征分析	159
7.1.2 系数对关联维数的影响	162
7.2 矿井火灾过程动力学特性的确定性混沌分析	163
7.3 煤炭自燃过程的尖点突变模型及应用实例	164
7.3.1 煤炭自燃影响因素的量化处理	164
7.3.2 内因火灾的突变模型	166
7.3.3 实例分析	167
7.4 林火蔓延突变行为分析	169
7.4.1 实验装置	169
7.4.2 林火行为的实验分析	170
7.4.3 林火行为的尖点突变分析	172
参考文献	173

第 8 章 多层多室建筑火灾烟气运动的网络模拟	174
8.1 概述	174
8.2 网络模拟的基本原理	174
8.2.1 网络阻力定律	175
8.2.2 节点风量平衡定律	175
8.2.3 网络风压平衡定律	175
8.2.4 节点处烟气运动处理	175
8.2.5 网络模型的回路计算方法	176
8.3 实例分析	176
8.3.1 没有火灾风机正常工作下的风流情况	177
8.3.2 火灾情况下的烟气运动情况	179
8.3.3 模拟结果讨论	179
参考文献	180
第 9 章 矿井火灾时期风流定量优化控制研究	181
9.1 问题的提出	181
9.2 矿井火灾时期风流控制的研究概述	181
9.3 矿井火灾时期风流控制的一些主要问题	183
9.3.1 矿井火灾时期风流控制的一般原则	183
9.3.2 确定矿井火灾时期的通风要求	184
9.3.3 矿井火灾时期风流控制方案的可行性	184
9.3.4 矿井火灾通风控制方案的优选	185
9.4 矿井火灾时期风流优化控制的非线性规划模型	185
9.4.1 已知条件	185
9.4.2 未知变量	186
9.4.3 灾变时风流优化控制的数学模型	186
9.5 矿井火灾时期风流定量优化控制问题的非线性规划方法	186
9.5.1 遗传算法的参数选择	187
9.5.2 实例分析	188
参考文献	190
第 10 章 城市突发重大事件应急指挥系统性能分析	192
10.1 概述	192
10.2 分析方法	194
10.2.1 Petri 网简介	194
10.2.2 Petri 网用于系统性能分析的理论基础	195

10.2.3 中国典型的城市应急联动系统的模拟	196
10.3 实例分析	198
10.3.1 应急联动系统性能定性分析	199
10.3.2 性能定量分析	200
10.3.3 分析与讨论	208
参考文献	208

第 1 章 绪 论

1.1 中国火灾现状

在各类伤亡事故中，火灾事故不仅危害严重，而且对社会的负面影响也很大（范维澄等，2000；钟茂华，2004）。近年来，中国火灾损失惊人，且居高不下，如图 1.1～图 1.3 所示。从近来中国发生的火灾事故来看，有以下主要特点（公安部消防局，2005；Liu Tiemin *et al.*，2005；Zhong Maohua *et al.*，2006）：

◆ 群死群伤火灾仍时有发生。这类事故不仅带来重大的经济损失，同时也造成极坏的社会影响。

◆ 商场市场、宾馆饭店、公共娱乐场所、易燃易爆物品生产、经营单位火灾比较突出。石油化工企业、易燃易爆场所火灾仍很严重。

◆ 个体、私营企业及个人承包企业火灾明显增多。

◆ 城市居民火灾日趋严重。违章用火、用电、用气和违反安全操作规程等人为因素是引起众多火灾的直接原因。

◆ 部分城市公共消防设施和消防装备建设严重滞后，是造成特大火灾的主要原因。近几年来，全国的城市公共消防设施和消防装备建设从总体上看，虽取得了一定的进步，但各地发展很不平衡。公共消防设施和消防装备的严重不足，给灭火工作特别是重特大火灾的扑救带来了极大的困难，使小火变成大火，大火变成大灾。

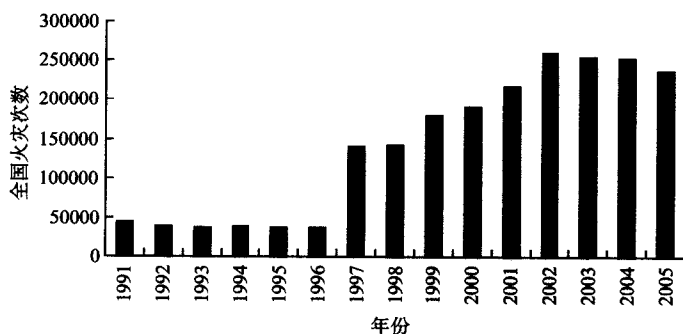


图 1.1 1991～2005 年中国发生的火灾次数统计

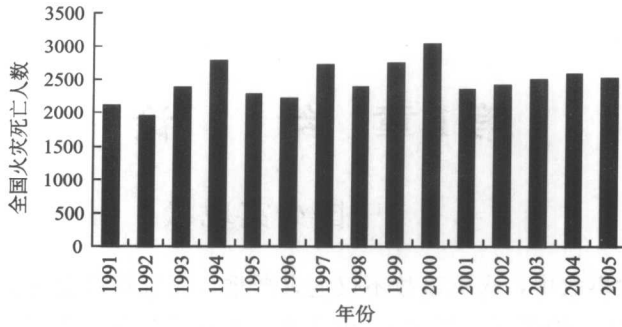


图 1.2 1991~2005 年中国因火灾而死亡的人数

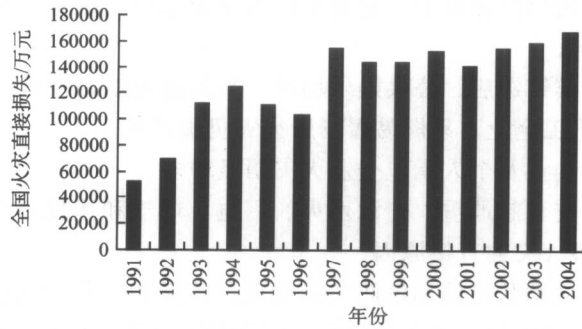


图 1.3 1991~2004 年中国火灾事故造成的直接经济损失

与其他国家相比,中国的火灾形势也很严峻,如图 1.4 所示。通过比较,可以看出,中国的火灾事故每年死亡的人数较多,这要求中国采取各种科学合理的技术和方法来预防和控制火灾事故的发生 (Wang *et al.*, 1997)。

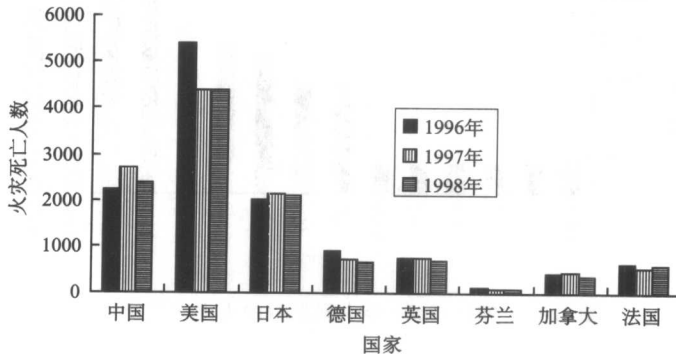


图 1.4 中国与部分国家火灾死亡人数比较 (1996~1998 年)

当我们回顾历史,甚至追溯到远古时代的中国火灾事故是如何分布时,其中的结论对今天生活在高科技时代及和平环境下的人们有深刻的启迪(胡化凯,1995)。下面对先秦至新中国成立前的数千年期间人们使用火及记录的火灾事故的分布进行分析,找出火灾事故多发区的历史变迁规律,并对其中的原因进行初步探究(钟茂华,2004)。

1.2 中国火灾史简析

1.2.1 中国早期的火灾记载

人类历史是一部利用火,并不断地同火灾抗争的历史(Malamud *et al.*, 1998)。在中国历史长河中,与其他人为灾害相比,有关火灾的记录是相当丰富和详实的,这些记录对于今天我们研究火给人类带来的各种有利与不利的方面具有重要意义,其中的许多经验和教训仍然可以指导今天的人们预防和控制火灾的发生。有的记录甚至告诉我们在火灾事故发生前应采取哪些步骤,火灾过程中及火灾发生以后应采取哪些相应的对策。

据《中国火灾大典》,目前已知的中国最早的火灾记录源于甲骨文记载:

[癸巳卜, □, 贞 旬 亡 祸]。一。

[王] 占曰,有祟,其有来艰。迨至六[日戊戌, 允有来艰, 有] 仆在甕, 宰在[□, 其□羹], 亦焚鬲三。

[癸巳卜], 争, [贞] 旬 [亡] 祸。二。

王占曰,有祟, 甕光其有来艰。迨至六日戊戌, 允有[来艰], 有仆在甕, 宰在□, 其□羹, 亦焚鬲三。十一月。

中国最早的关于我国消防机构及措施的记载为公元前564年春的一段记录,出自《左传·襄公九年》:

[鲁襄公]九年(宋平公十二年),春,宋灾。乐喜为司城以为政。使伯氏司里,火所未至,彻小屋,涂大屋;陈畚揭,具绠缶,备水器;量轻重,蓄水潦,积土涂;巡丈城,缮守备,表火道。使华臣具正徒,令隧正纳郊保,奔火所。使华阅讨右官,官庀其司。向戎讨左,亦如之。使乐遽庀刑器,亦如之。使皇郕命校正出马,工正出车,备甲兵,庀武守。使西鉏吾庀府守。令司官、巷伯微宫。二师令四乡正敬享,祝宗用马于四墉,祀盘庚于西门之外。

同样的记载在《公羊传·卷一九》、《汉书·五行志》、《谷梁传·卷一五》等文献中均有。

人们要利用火,必须首先了解有关火与火灾的特性。春秋时期,人们对于火及火灾的有关规律、环境与气候的影响及火灾的后果严重性已有了相当深入的了解,较早的论述见于著名的《孙子兵法·火攻篇》(孙武[春秋],1999):“行火

必有因，因火必素具。”“火发上风，无攻下风。昼风久，夜风止。”公元 208 年 11 月的赤壁之战是成功地利用火来改变时局的实例之一。中国历史上有名的战例还有火烧连营。

目前人们所知道的证明人类开始使用火的实物要早于文献记载，较有名的是周口店“北京人”用火的考古实证，考古发现的灰烬层可能是“北京人”早期消防意识的反映（贾兰坡等，1984）。

16 世纪，李时珍在《本草纲目》中谈到了当时人们对火的看法，认为火是气（元气）而非质（实际的物质）。和其他单一元素不同，火可分为阴火和阳火两种，并且每一种都有更细的分类，见表 1.1。

表 1.1 李时珍关于火的分类

类别	火	
天	阳火	阴火
	(1) 太阳真火 (2) 星精飞火	(1) 龙火 (2) 雷火
地	(1) 钻木之火 (2) 击石之火 (3) 翼金之火	(1) 石油之火 (2) 水中之火
人	丙丁君火	(1) 命门相火 (2) 三昧之火
未分类	(1) 萧丘火（=寒火、冷热、天然气火） (2) 泽中之阳焰 (3) 野外之鬼磷 (4) 金银之精气	

1.2.2 中国历史上火灾多发区变化趋势分析

随着中国的经济发展和改革开放的进行，近年来发生在中国沿海省份的火灾事故损失比其他省份更严重，广东、浙江和山东尤为明显，据 1995 年的统计，全国 22% 的特大火灾事故发生在广东省。当人们回顾历史，甚至追溯到远古时代的中国火灾事故多发区是如何变迁的时候，其中的结论是相当有趣的。

火对于社会的发展至关重要。中国是一个地域广阔、历史悠久、人口众多的多民族国家，就全国来说，可以说每天甚至每小时都有火灾发生。这里所统计的火灾是中国历史上有文字记载的火灾，这些对当时的人们来讲，教训是极其深刻的。我们的分析以史料记载的火灾为依据。所涉及的火灾事故是从全国各地的地方志、档案、碑刻和报刊等史料中统计出来的，主要源自文献《中国火灾大典》，其中记载了新中国成立前的火灾事故共 29649 起。历史上火灾统计的数据来源难免有一定的局限性，要从中得出一些规律确实很难，但我们仍尽力依据现有的记

载来对我国历史上的火灾情况进行分析和总结（钟茂华，2004）。

火灾从来不是孤立的，而是一定的历史、社会条件下的产物。火灾与消防是人类文明史的一个重要组成部分。已成为历史的火灾事故，虽然早已灰飞烟灭，然而记载火灾文献的字里行间却反映出许多当时的政治（周振鹤，1983）、经济、军事（马德宝，2000；张元伟，2000）、文化（卢云，1987）、科学技术（王鸿生，1997；李约瑟，2001）等情况，从这些信息，后人可以看出人类社会各个阶段的轨迹。历史是一面镜子，后人可以“以史为鉴”。下面对先秦时期到新中国建立前的史料上记载的火灾事故进行统计。

先秦及秦朝时期，火灾主要发生在黄河中下游地区，这一区域是当时中国经济、政治和文化比较发达的地区，当时中国人口集中在这一区域，其间火灾多发区主要是现在的山东省、河南省、陕西省和山西省。由于这一区域是中华民族文化的发祥地，从这个意义来讲，人类文明与火灾是有密切联系的。

汉朝时期火灾多发区的中心仍在黄河流域。三国时期，火灾多发区的中心在黄河中游地区，但同时黄河以南的地区即现在的安徽、江苏的火灾事故已位居全国第二位和第三位，此时，在长江流域也开始出现了火灾多发现象。

晋朝和南北朝时期，长江流域的部分地区已开始出现火灾多发区。隋唐开始，中国的火灾多发区开始向南扩散，并向长江流域迁移，这个时期正是中国历史上人口从北方大量南迁的时候。元、明朝时中国火灾多发区中心已移至长江中下游地区和东南沿海地区，如明朝时火灾事故次数最多的区域是现在的江西和福建一带。实际上这个时期中国人口的重心已移至南方。从清朝开始，东北地区已成为当时中国人口增长的中心，其间火灾事故也较多，仅次于长江流域地区。民国期间，中国火灾的多发区主要集中在长江中下游地区及沿海地区和东北地区，这些地区是当时经济比较发达的地区。这一时期，火灾事故最多的三个省份依次为江苏、浙江和安徽。

1.2.3 中国历史上的火灾原因简析

中国历史上记载的火灾，是对人们有着深刻教训和纪念意义的火灾，每一次火灾对当时的人们来讲，都是人员或财产损失惨重的火灾，统计其中的原因至少对于我们今天的消防具有重要意义。对史料记载的火灾分析可知，导致火灾发生的原因有生活用火、雷击、放火等，但记载最多的是战争导致的火灾，每一次战争给人们带来的教训和代价实在是太大了，人们为了警示后人，把每一次战争导致的火灾都记入史册，也是要让后人知道，战争的代价是惨痛的，战争给人类带来的是痛苦，战争带来了火灾，如图 1.5 和图 1.6 所示。中国唐朝的发明家发明了火药，当时在军事上的应用记载不多，宋朝时候，一些军官开始在战场上使用火药，元朝时已广泛应用（远德玉，2000），所以，元朝时期，战争导致的火灾

频率最高，平均每场战争要导致 5 起火灾发生，其次是清朝。

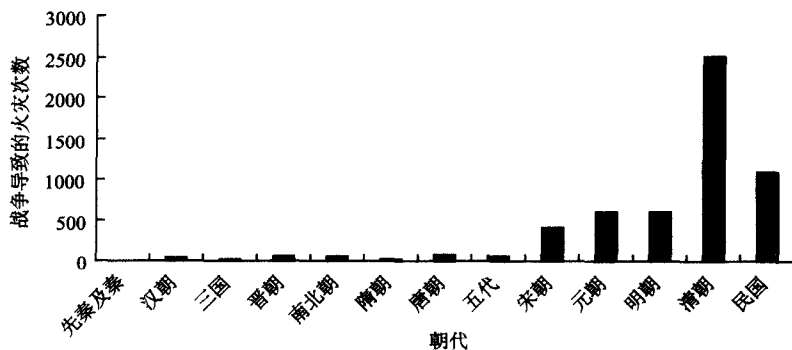


图 1.5 每个朝代中战争导致的火灾次数

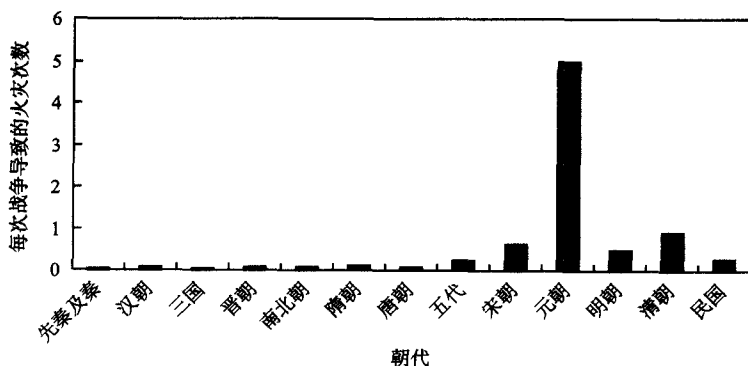


图 1.6 中国历史上每次战争导致的火灾次数

历代火灾事故统计中，导致火灾的原因与现在有些不一样，从许多国家近年来的火灾统计资料中可以看出，电气导致的火灾比例最大。对中国的历代火灾事故进行统计分析，战争导致的火灾高于其他原因导致的火灾，图 1.7 是历代中国火灾中战争导致的比例。

隋朝虽短，但因战争所致的火灾占同期所有火灾的比例最高，史料中所记载的 70% 左右的火灾源于战争。三国、晋朝、五代及元朝时期，战争导致的火灾基本占同时期火灾总数的 50%。

历代每年源于战争的火灾次数最多的是民国时期。这一时期，中国是第二次世界大战的亚洲主战场，中国人民为此付出了沉重的代价。其次是清朝，特别是晚清时期，其间的连年战争导致了大量的火灾事故发生（施和金，2000；樊树