

FIRE EXTINGUISHING MECHANISM AND ENGINEERING PRACTICE OF
WATER MIST WITH POTASSIUM SALT ADDITIVES

含钾盐添加剂细水雾的 灭火原理与工程实例

张天巍 杜志明 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

含钾盐添加剂细水雾 的灭火原理与 工程实例

张天巍 杜志明 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了含钾盐添加剂细水雾灭火技术的定义、适用场合、钾盐添加剂的种类和作用、灭火有效性实验方法、灭火的化学热力学与动力学原理等内容,并结合典型的B类火和F类火的燃烧和冷却特点,对含钾盐添加剂细水雾实际工程应用的可行性进行了分析。

本书既有理论的总结、探索和创新,又有对实践的指导,具有很强的可操作性,可作为高等院校安全科学与工程、消防工程等相关专业课和选修课的教材,也可作为应急管理部综合性消防救援队伍的培训教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

含钾盐添加剂细水雾的灭火原理与工程实例 / 张天巍, 杜志明著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.7

ISBN 978-7-5682-7320-6

I. ①含… II. ①张… ②杜… III. ①钾盐-添加剂-水雾-灭火-研究 IV. ①TU998.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第153485号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 15.75

彩 插 / 4

字 数 / 258千字

版 次 / 2019年7月第1版 2019年7月第1次印刷

定 价 / 72.00元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

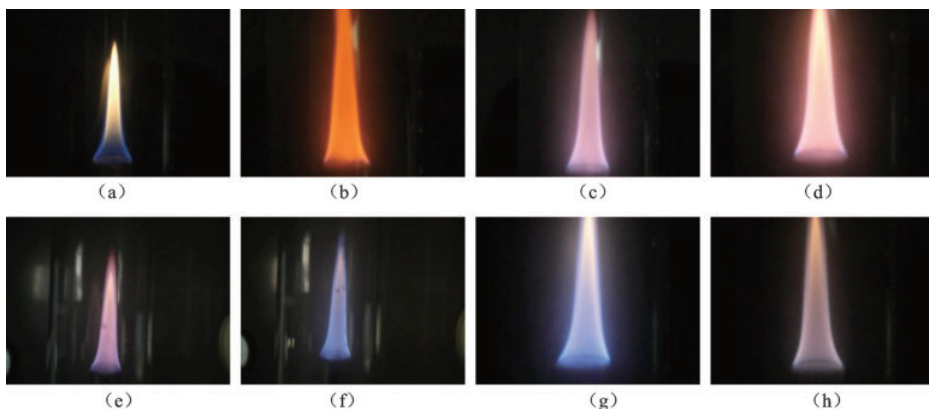


图 3.8 质量分数为 1% 的不同钾盐添加剂细水雾作用下火焰颜色与外形

(a) 无细水雾; (b) 纯水细水雾; (c) 1% $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 细水雾; (d) 1% CH_3COOK 细水雾; (e) 1% K_2CO_3 细水雾; (f) 1% KNO_3 细水雾; (g) 1% KCl 细水雾; (h) 1% KH_2PO_4 细水雾

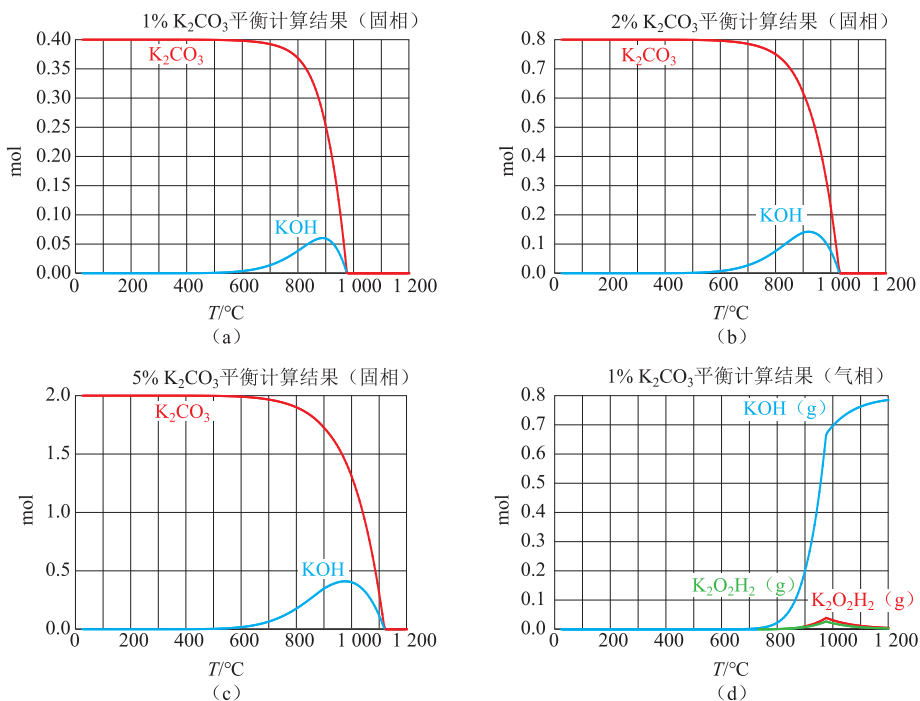


图 4.30 含 K_2CO_3 添加剂细水雾与 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 火焰相互作用产物随体系温度的变化

2 含钾盐添加剂细水雾的灭火原理与工程实例

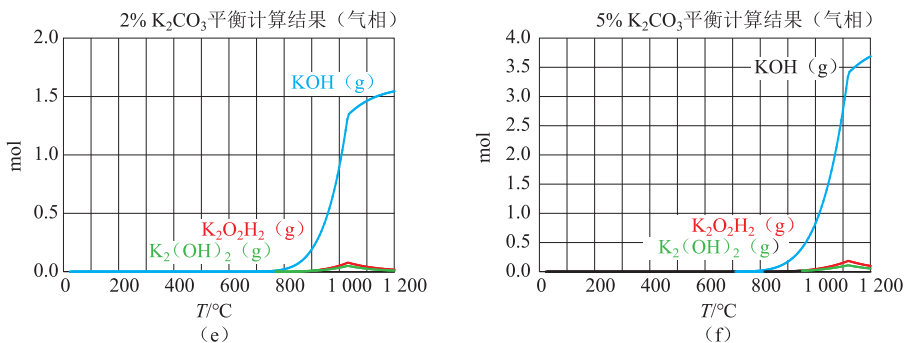


图 4.30 含 K_2CO_3 添加剂细水雾与 CH_4 /空气火焰相互作用产物随体系温度的变化 (续)

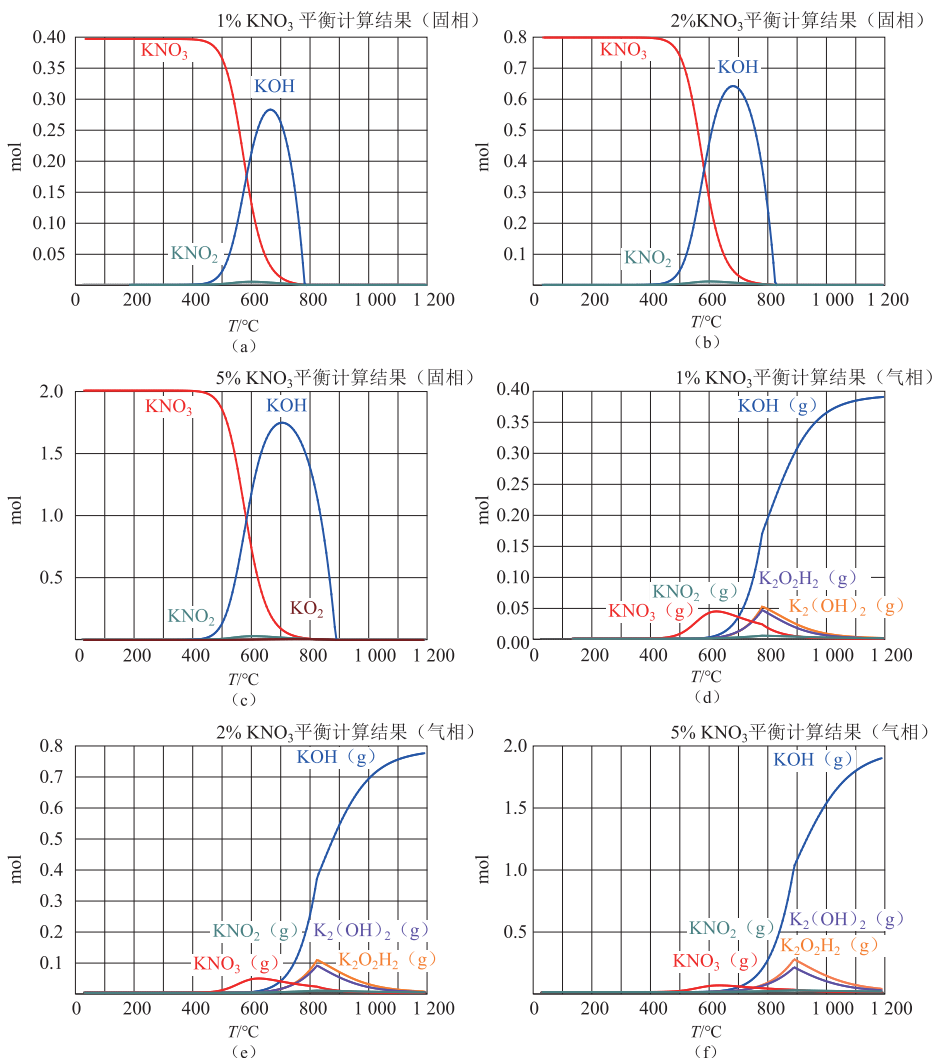
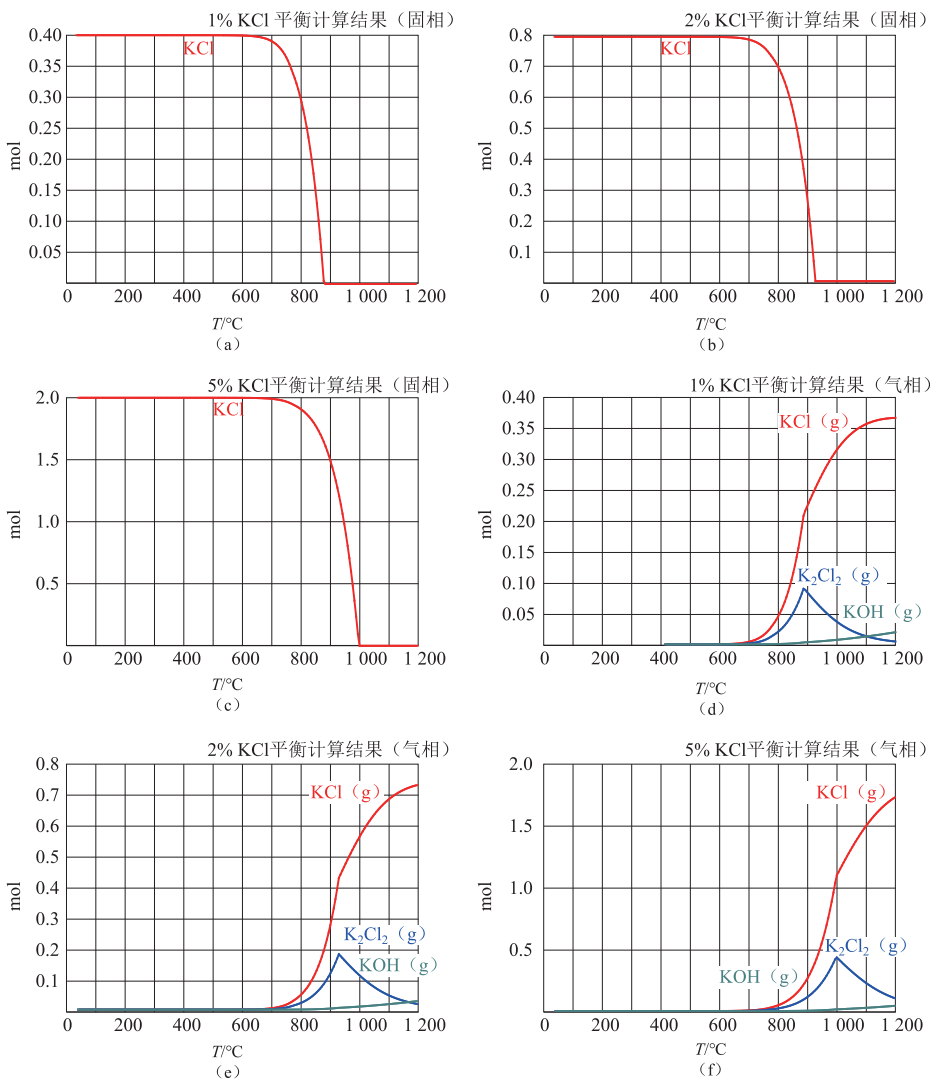


图 4.33 含 KNO_3 添加剂细水雾与 CH_4 /空气火焰相互作用产物随体系温度的变化

图 4.36 含 KCl 添加剂细水雾与 CH_4 /空气火焰相互作用产物随体系温度的变化

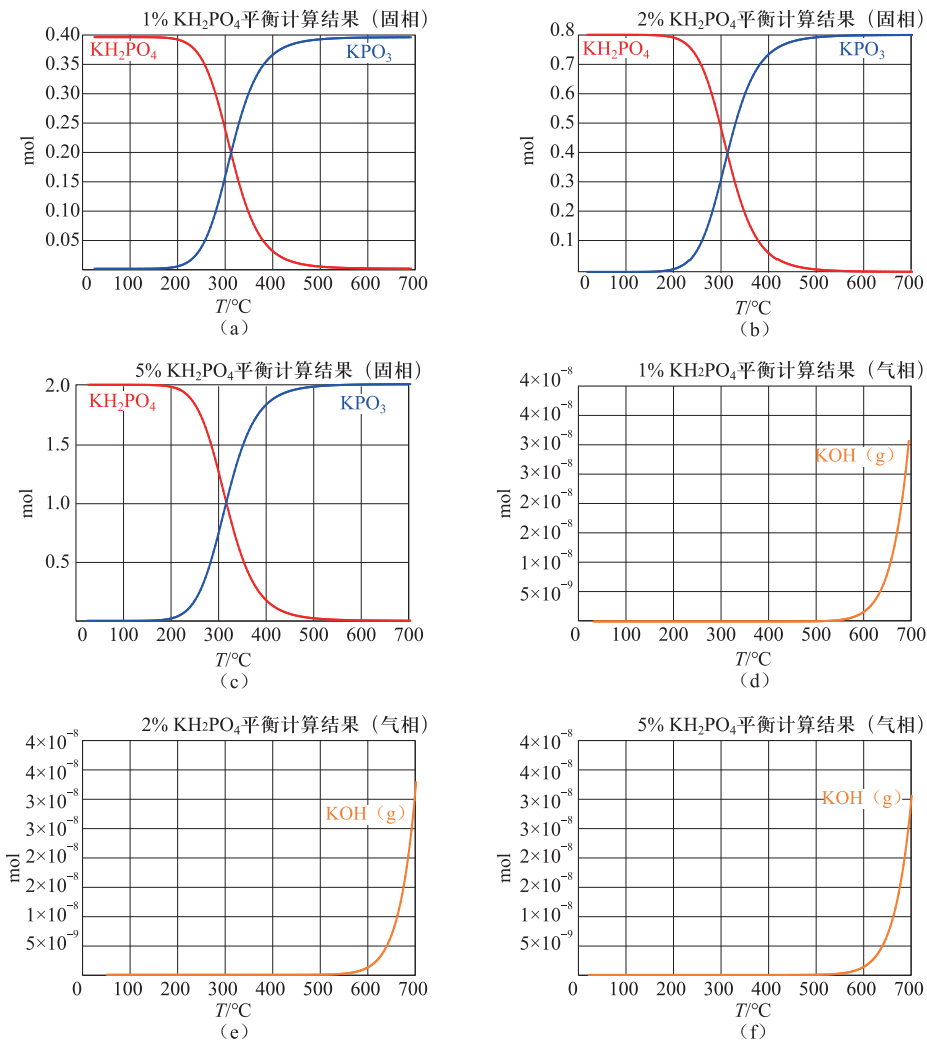


图 4.38 含 KH₂PO₄ 添加剂细水雾与 CH₄/空气火焰相互作用产物随体系温度的变化

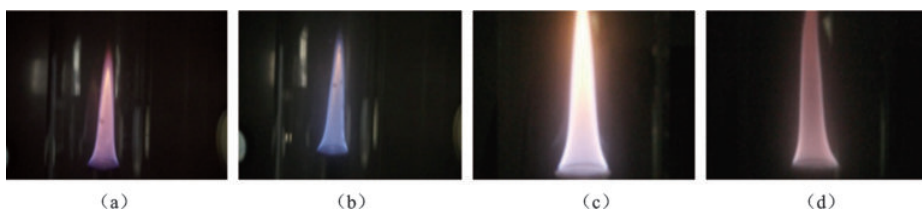


图 4.41 不同钾盐添加剂粉体作用下火焰颜色与外形
 (a) K_2CO_3 粉体; (b) KNO_3 粉体; (c) KCl 粉体; (d) KH_2PO_4 粉体

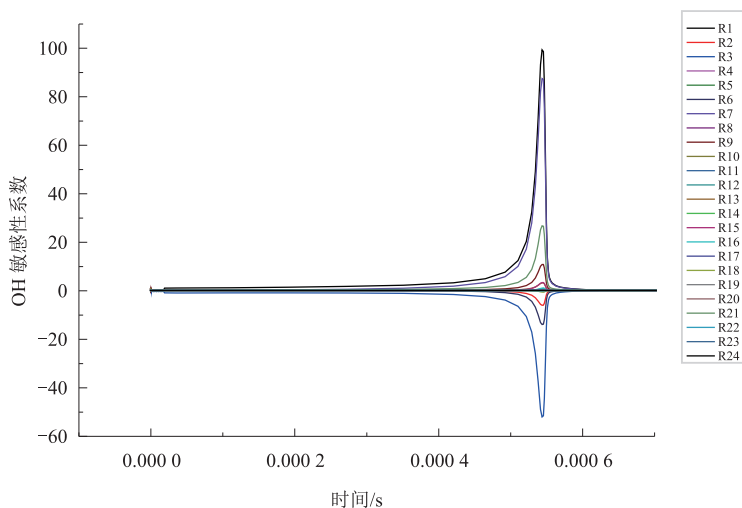


图 5.9 各基元反应对OH自由基的敏感性系数

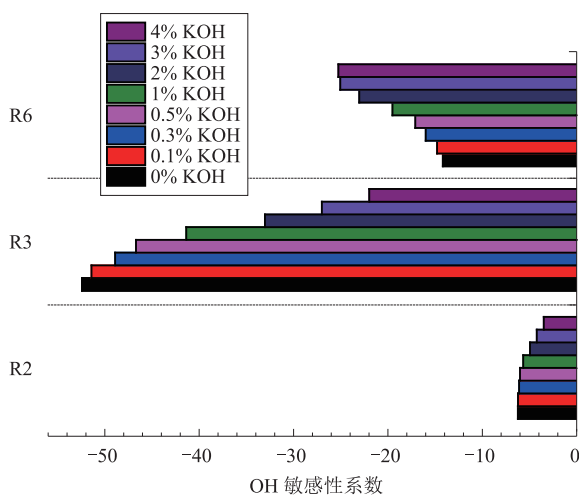


图 5.11 不同KOH浓度条件下关键基元反应中OH的敏感性系数

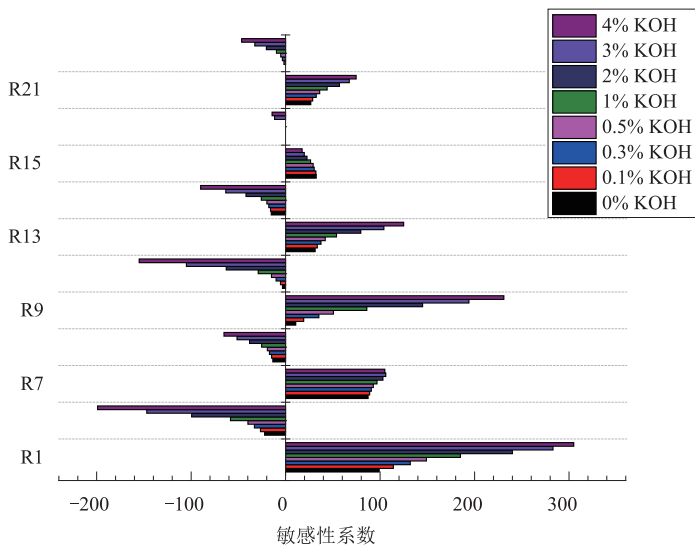


图 5.12 不同 KOH 浓度条件下抑制 OH 消耗的主要反应敏感性系数

(注：① R13、R15 正反应的敏感性系数扩大 10 倍，R15 逆反应的敏感性系数扩大 10 000 倍；
② R1、R7、R9、R13 和 R21 逆反应的敏感性系数扩大 1 000 倍)

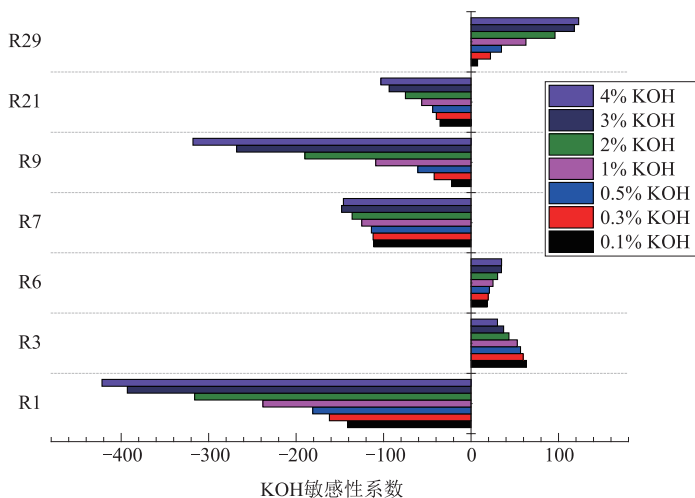


图 5.13 对 KOH 浓度变化较为敏感的基元反应

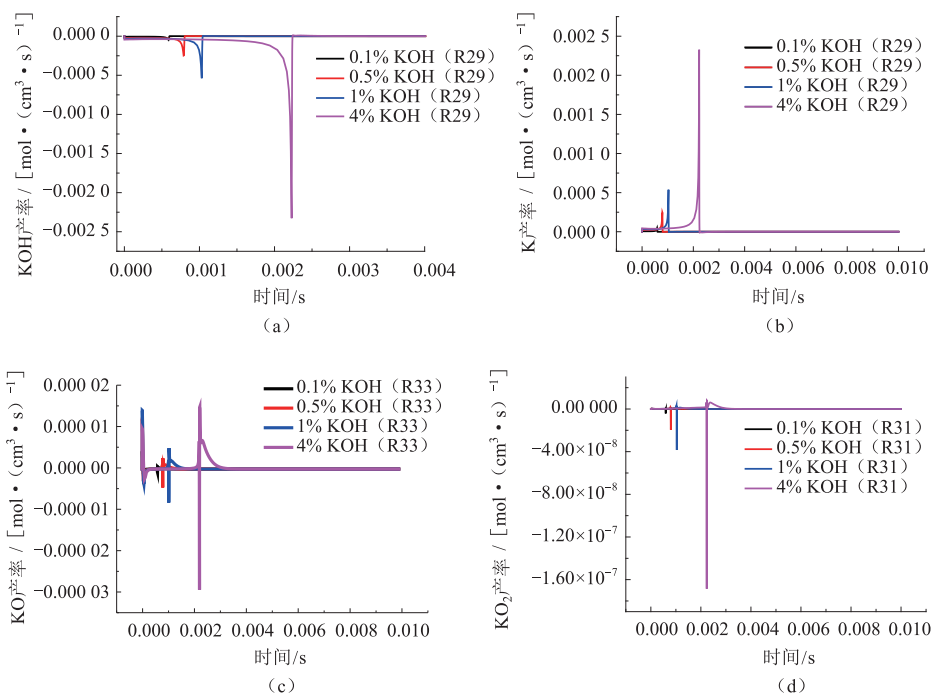


图 5.18 不同KOH浓度条件下KOH、K、KO和 KO_2 产率
(a) KOH; (b) K; (c) KO; (d) KO_2



前 言

在各种灾害中，火灾是最常见和最普遍的威胁公众安全和社会发展的主要灾害之一。火灾不但会对人们的生命、财产造成重大威胁，而且会对自然环境造成严重的破坏。因此，如何灭火成为伴随人类用火历史不断发展的一个重要课题。

细水雾灭火技术因具有无环境污染、耗水量低、灭火迅速、适用多种类型火灾、对受灾物品破坏小等特点，被视为哈龙灭火技术的主要替代品。在高新技术领域与重大工业危险源的特殊火灾领域获得了广泛的应用，并展现出了良好的发展潜力。然而，水灭火仍属于物理作用范畴，效能低于哈龙灭火剂和其他化学灭火剂。含添加剂细水雾除了通过水对燃料表面冷却、火焰气相冷却和稀释氧气浓度等作用机制来抑制熄灭火灾外，还可以通过捕捉燃料燃烧过程中产生的自由基、中断燃烧过程中的链式反应，或是在火焰温度下分解产生惰性物质通过冷却和窒息作用达到灭火目的。含添加剂细水雾的物理和化学机理在灭火过程中发挥的协同作用使水的整体灭火效能得到显著提高。

我国于2013年颁布了《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013)作为细水雾灭火系统设计的一般性原则和统一标准，标志着细水雾灭火技术已经有成熟的实施标准。然而，含添加剂细水雾由于其对存储设备的腐蚀性、溶质的溶解性及保质期等问题，并没有进入大规模的实际应用阶段，虽然添加剂能够明显地提高细水雾灭火性能，但是由于添加剂的灭火机理和一些应用方面的问题还没有得到解决，并且细水雾及含添加剂细水雾的最小灭火浓度对消防设计和科学研究都是非常重要的参数，但实际规范中均未涉及，使得在实际应用中对细水雾或含添加剂细水雾灭火系统的评价还没有统一的标准，这些都限制了含添加剂细水雾系统的推广应用。

本书的撰写可适应现代社会的实际需要，解决含添加剂细水雾在灭火有效性评价、灭火原理及工程设计中的有关问题，满足综合性消防救援队伍更新知识、运用新技术的需要，满足高等院校教学、科研发展的需要，有助于提高从业人员运用科学技术手段提高抗御火灾的基本能力，同时可填补我国

在含添加剂细水雾灭火技术专业丛书出版方面存在的空白。

本书主要介绍了含钾盐添加剂细水雾的定义、添加剂的种类和作用、灭火有效性评价实验及建模方法、添加剂化学灭火的热力学和动力学原理等内容,设计更加贴近实际工程的全尺寸灭火实验方案,探讨含添加剂细水雾实际应用的可行性。本书在编写过程中注意吸收国内外灭火剂方面的先进技术和有益经验,突出实用性和可操作性,力求系统地介绍内容,深入浅出,循序渐进。

本书在撰写过程中得到了中国人民警察大学、北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室、北京市天安门地区消防支队和湖南安全技术职业学院等单位专家的大力支持。在此,谨向帮助和支持本书撰写工作的领导、专家及所有同志深表谢意。由于笔者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者和同行批评指正。

本书共分7章,第1章由杜志明完成,其余章节由张天巍完成。本书第2~7章的内容得到了中国人民警察大学刘皓博士和梁强博士、北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室韩志跃博士、北京市天安门地区消防支队防火监督处监督指导科马冀昆及湖南安全技术职业学院刘玲博士等单位专家的大力支持。在此,谨向帮助和支持本书撰写工作的领导、专家及所有同志深表谢意。由于笔者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者和同行批评指正。

本书可供从事灭火剂研究的工程技术人员,国家综合性消防救援队伍指挥员、消防员,企、事业单位消防管理干部使用,也可作为高等院校消防工程、安全科学与工程、化学工程等专业的教学参考书。

最后,感谢北京理工大学研究生院为本书出版创造了一个宝贵的机会。感谢北京理工大学优秀博士学位论文出版项目基金资助。感谢中国人民警察大学的成员在作者从事研究和撰写本书过程中给予的关心和支持。感谢国家自然科学基金委员会和河北省自然科学基金委员会,本书的相关研究得到国家自然科学基金项目(No.51804314)和河北省自然科学基金项目(No.E2018507020)等项目的资助,在此表示衷心感谢。

张天巍 杜志明

E-mail: zhangtianwei_119@outlook.com

中国人民警察大学

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室



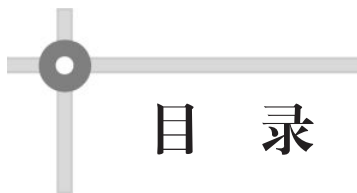
主要符号说明

符号	物理意义	单位
α	对流换热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
β	升温速率	$^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$
ε	辐射热系数	—
λ	波长	m
μ_g	空气运动黏度	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ_l	液体密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_g	空气密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ	表面张力	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
ω	反应速率	—
A_k	指前因子	s^{-1}
c_p	定压比热容	$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
D	粒径	μm
E_k	活化能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔG^0	吉布斯自由能	kJ
$\Delta H'$	焓变	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
K_p	化学平衡常数	—
L_v	蒸发潜热	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
M	物质的量	mol
P	压力	Pa
Q	燃烧热	J
R	通用气体常数	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
S	面积	m^2
ΔS_T^0	标准反应熵差	—
T	温度	K
u	空气流速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V	体积	m^3



主要缩略词表

缩略词	英文全称	中文全称
AFFF	Aqueous Film Forming Foam	水成膜泡沫
CFD	Computational Fluid Dynamics	计算流体力学
DPM	Discrete Phase Model	离散相模型
DSC	Differential Scanning Calorimetry	差示扫描量热法
DTA	Differential Thermal Analysis	差热分析法
GWP	Global Warming Potential	全球变暖潜势
LA	Local Application	局部
MEC	Minimum Extinguishing Concentration	最小灭火浓度
ODP	Ozone Depression Potential	臭氧消耗潜值
PSR	Perfectly Stirred Reactor	完全混合反应器
SEM	Scanning Electron Microscope	扫描电子显微镜
TCA	Total Compartment Application	全覆盖
TGA	Thermogravimetric	热重法
XRD	X-ray Diffraction	X射线衍射
ZA	Zoned Application	区域



目 录

第1章 绪论	1
1.1 细水雾灭火技术简介和研究现状	1
1.1.1 细水雾灭火技术简介	2
1.1.2 细水雾灭火技术研究现状	7
1.2 含添加剂细水雾灭火技术简介和研究现状	9
1.2.1 含添加剂细水雾灭火技术简介	9
1.2.2 含添加剂细水雾灭火技术研究现状	9
1.3 小结	15
第2章 Cup-burner 扩散火焰装置的设计与灭火实验	17
2.1 Cup-burner 的设计	18
2.1.1 Cup-burner 实验系统	18
2.1.2 细水雾发生及控制系统	19
2.1.3 细水雾收集系统	22
2.2 Cup-burner 火焰特征	22
2.2.1 Cup-burner 火焰特征实验	22
2.2.2 Cup-burner 火焰特征数值模拟	24
2.3 超声雾化细水雾的粒径及雾化效果	30
2.3.1 细水雾粒度分布	30
2.3.2 细水雾雾滴在气流中的受力分析	34
2.3.3 影响雾化效果的因素分析	36
2.4 细水雾抑制熄灭 Cup-burner 火焰的最小灭火浓度	39
2.4.1 细水雾抑制熄灭 Cup-burner 火焰的实验研究	39
2.4.2 细水雾抑制熄灭 Cup-burner 火焰的数值模拟	42
2.5 小结	47
第3章 含钾盐添加剂细水雾抑制熄灭 Cup-burner 火焰的有效性研究	49
3.1 含钾盐添加剂细水雾的 Cup-burner 灭火实验	50
3.1.1 含钾盐添加剂细水雾的粒度分布	50

2 含钾盐添加剂细水雾的灭火原理与工程实例

3.1.2	含钾盐添加剂细水雾的雾化效果	51
3.1.3	含钾盐添加剂细水雾最小灭火浓度的确定	55
3.2	含钾盐添加剂细水雾化学灭火作用效能的描述	59
3.2.1	含钾盐添加剂细水雾抑制熄灭 CH_4 火焰的热机理	59
3.2.2	含钾盐添加剂溶液热容值的确定	62
3.2.3	含钾盐添加剂细水雾化学灭火作用的量化	67
3.3	小结	71
第4章	含钾盐添加剂细水雾抑制熄灭Cup-burner火焰机理的热力学分析	73
4.1	含钾盐添加剂的热行为	74
4.1.1	TGA-DSC实验方法	74
4.1.2	含钾盐添加剂的热分析实验	74
4.1.3	含钾盐添加剂的热分析动力学	79
4.2	含钾盐添加剂细水雾加热产物分析	83
4.2.1	实验方法	83
4.2.2	不同温度条件下含钾盐添加剂细水雾加热产物表征	85
4.2.3	不同浓度条件下含钾盐添加剂细水雾加热产物表征	93
4.2.4	不同溶质条件下含钾盐添加剂细水雾加热产物表征	94
4.2.5	不同含钾盐添加剂细水雾加热产物晶粒生长动力学	96
4.3	含钾盐添加剂细水雾在一定条件下的化学热力学分析	100
4.3.1	含钾盐添加剂细水雾灭火的一般过程	100
4.3.2	化学热力学理论基础	102
4.3.3	化学热力学分析	104
4.4	含钾盐添加剂粉体的Cup-burner灭火实验	123
4.4.1	实验装置及方法	123
4.4.2	结果与讨论	125
4.5	含钾盐添加剂细水雾灭火有效性综合分析	128
4.6	小结	131
第5章	含钾盐添加剂细水雾抑制熄灭Cup-burner火焰机理的动力学分析	134
5.1	PSR模型概述	135
5.1.1	PSR模型的基本描述	135
5.1.2	PSR模型的局限性	136
5.2	含气态KOH的 CH_4 /空气混合物燃烧机理简化模型	137
5.2.1	CHEMKIN概述	137

5.2.2	CH ₄ /空气燃烧动力学简化模型	139
5.2.3	含气态KOH的CH ₄ /空气燃烧动力学简化模型	141
5.3	含气态KOH的CH ₄ 燃烧动力学机理分析	142
5.3.1	含气态KOH的CH ₄ /空气动力学简化模型的可行性分析	142
5.3.2	含气态KOH的CH ₄ /空气动力学简化模型的敏感性分析	145
5.3.3	气态KOH抑制CH ₄ /空气混合物燃烧过程的机理分析	150
5.4	温度、湿度和大气压对灭火效率的影响	156
5.4.1	环境温度的影响	156
5.4.2	环境湿度的影响	157
5.4.3	大气压强的影响	157
5.5	小结	159
第6章	含钾盐添加剂细水雾在B类火中的应用	160
6.1	含钾盐添加剂细水雾与B类火相互作用的实验研究	161
6.1.1	全尺寸灭火实验工况下细水雾的灭火机理	161
6.1.2	全尺寸灭火实验系统的设计及实验方法	166
6.1.3	实验用B类火模型的燃料特性	173
6.1.4	纯水细水雾与B类油池火相互作用实验	177
6.2	含钾盐添加剂对细水雾扑灭B类火有效性的影响	181
6.2.1	含钾盐添加剂种类的影响	181
6.2.2	含钾盐添加剂浓度的影响	185
6.3	小结	188
第7章	含钾盐添加剂细水雾在F类火中的应用	190
7.1	含钾盐添加剂细水雾扑灭食用油火的实验研究	191
7.1.1	灭火实验设备与方法	191
7.1.2	食用油火的燃烧特性	192
7.1.3	纯水细水雾与食用油火相互作用实验	194
7.1.4	含添加剂细水雾与食用油火相互作用实验	197
7.2	含钾盐添加剂细水雾冷却食用油的实验研究	206
7.2.1	冷却实验设备与方法	207
7.2.2	食用油的冷却过程	208
7.2.3	沸溢层的影响因素	209
7.2.4	含钾盐添加剂细水雾对食用油冷却过程的影响	212
7.3	小结	215
	参考文献	217