

A large, stylized graphic of flames in shades of brown and orange, occupying the upper half of the cover.

消防燃烧原理

刘永基 主编

辽宁人民出版社

消 防 燃 烧 原 理

刘永基 主 编

王作福 副主编

单大国



辽 宁 人 民 出 版 社

1992年·沈阳

消防燃烧原理

Xiaofang Ranshao Yuanli

刘永基 主编

辽宁人民出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳市和平区北一马路103号) 朝阳新华印刷厂印刷

字数: 350,000 开本: 850×1168 1/32 印张: 15 1/2 插页: 2
印数: 1—6,099

1992年9月第1版

1992年9月第1次印刷

责任编辑: 刘锡远

责任校对: 刘亚杰

封面设计: 袁明

版式设计: 金岳

ISBN 7-205-02166-9/D·429

登记号: (辽)新登字1号 定价: 8.50元

前 言

随着国民经济和社会的发展,生产和生活用火日益广泛。然而,燃烧灾害之多、损失之大,又是屡见不鲜。为了更好地保卫生产建设和人民生命财产免受火灾危害,广大消防安全工作者需要有一定的燃烧理论知识作指导。国内已经出版的有关燃烧理论的著作虽为数不少,但多是研究如何利用燃烧热能作为能源的专著,从消防角度系统地研究燃烧理论的正式出版物却见之不多。为了适应这一需要,本书作者阅读了国内外燃烧理论和防火防爆技术等专著文献,总结了多年来消防教学工作和防火灭火工作的实践经验,尝试编著了这本《消防燃烧原理》一书。

本书从消防角度出发,探讨了与火灾爆炸事故有关的燃烧理论及防火灭火基本原理。本书内容大多取材于国内外近几年公开出版的专著文献。本书共分十章,主要论述了燃烧反应及其计算,热着火与连锁着火机理,各种点火源的点燃原理,某些物质的自燃原理,气、液、固态可燃物的燃烧或爆炸原理,可燃粉尘的爆炸原理,炸药的燃燃与爆炸原理,爆炸事故的危害程度及其计算以及防火灭火的基本原理等知识。

本书是以中国人民武装警察部队学院消防管理系1985年印刷的《消防燃烧学》教材和上海科学技术出版社1989年出版的《灭火手册》燃烧基础理论篇(本书主编参与了这两份教材和资料的编写)作为基础,又增加了近年来消防燃烧理论和防火灭火

措施的新资料及新的实践经验而编著成的。本书的燃烧理论和防火灭火基本原理力求联系消防工作的实际应用。书中包括大量插图和表格，较详尽地给出常见可燃物质的闪点、自燃点、爆炸浓度极限等燃烧爆炸特性数据，以备读者查阅。书中计算公式大多给出推导过程和计算例题，以便大多数读者自学或作教学参考用书。

本书可供公安消防监督员和灭火指战员，社会上各单位消防保卫人员和安全技术人员，以及有关院校消防专业、安全专业或劳功保护专业的师生阅读参考。

本书在编著过程中，引用了国内外一些专家的有关著作和论文资料，并得到中国人民武装警察部队学院程世玉、宋光积两位消防教授的热心指教和大力支持，最后由程世玉教授修改定稿。在此一并表示衷心的感谢。

参加本书编著的作者有刘永基（主编）、王作福、单大国。由于本书涉及的内容很广，作者水平有限，所以，书中错误和不妥之处在所难免，热望读者批评指正，以便今后修改。

作 者

1991年8月

目 录

前 言	1
绪 论	1
第一章 燃烧反应及其计算	16
第一节 燃烧反应的概念和要素	16
第二节 燃烧所需空气量的计算	25
第三节 燃烧产物的计算和性质	32
第四节 燃烧热值的计算	48
第五节 燃烧温度的计算	54
第二章 着火机理	67
第一节 热着火机理与自燃点	67
第二节 连锁反应与连锁着火机理	91
第三章 点火源的点燃能力	106
第一节 火焰对可燃物的点燃能力	107
第二节 高温物体对可燃物的点燃能力	119
第三节 电火花对可燃物的点燃能力	129
第四节 绝热压缩对可燃物的点燃能力	137
第五节 撞击与摩擦对可燃物的点燃能力	139
第六节 日光照射与聚焦对可燃物的点燃能力	143
第七节 化学反应放热对周围可燃物的点燃能力	149
第四章 物质的自燃过程	153
第一节 物质自燃的定义和条件	153

第二节	可燃物在空气中的自燃	156
第三节	活性物质遇水自燃	182
第四节	可燃物与强氧化性物质的混合接触自燃	187
第五章	气态可燃物的燃烧	197
第一节	爆炸浓度极限	197
第二节	气态可燃物的火焰传播	241
第三节	爆炸压力与爆轰压力	266
第六章	液态可燃物的燃烧	279
第一节	液体及液化气体的蒸发	279
第二节	液态可燃物的爆炸温度极限、闪点及燃点	297
第三节	液态可燃物的燃烧速度	316
第四节	液面燃烧时火焰的形状与高度	331
第五节	沸溢式燃烧和喷溅式燃烧	333
第七章	固态可燃物的燃烧	349
第一节	固态可燃物的闪点和燃点	349
第二节	固态可燃物的表面燃烧	352
第三节	固态可燃物的蒸发燃烧	354
第四节	固态可燃物的分解燃烧	355
第五节	固态可燃物的熏烟燃烧	369
第六节	固体析出气体的轰燃	370
第八章	可燃粉尘的爆炸	373
第一节	可燃粉尘的概念	373
第二节	可燃粉尘爆炸的条件	374
第三节	可燃粉尘的爆炸过程与特点	380
第四节	影响可燃粉尘爆炸特性的因素	382
第九章	炸药的爆炸	390
第一节	炸药的种类及其主要化学变化	390

第二节	炸药的热分解和热安定性·····	394
第三节	炸药的燃烧和爆轰·····	398
第四节	炸药的感度·····	401
第五节	炸药的其他常见爆炸特性·····	403
第六节	化学爆炸时的作功能力与梯恩梯当量的理论 估算·····	421
第七节	化学爆炸时空气冲击波超压的理论估算·····	426
第八节	爆炸时梯恩梯当量和冲击波超压的事故现场 估算·····	428
第九节	爆炸空气冲击波对人与建筑物的危害·····	430
第十节	炸药的殉爆与安全距离·····	432
第十章	防火灭火的基本原理·····	435
第一节	防火基本原理·····	435
第二节	灭火基本原理·····	461
附 录	·····	472
单位换算表	·····	472
主要参考文献	·····	474

绪 论

一、燃烧唯心史观的演变及唯物史观的建立

燃烧，俗称火，是自然界里最早存在的自然现象之一。但是，人类对火这个自然现象的认识却经历了漫长而曲折的道路，如果从我们的祖先“西侯度人”和“元谋人”使用野火的那个时候算起，至今起码也有一百多万年的历史。在这悠悠的历史长河中，关于火，有着种种传说和学说。

在古希腊的神话中，据说火是天神普罗米修斯冒着触犯天条的风险从天上偷到人间来的。在我国古代，人们则传说，火是一位名叫燧人氏的圣人发明的。在远古人看来，火是那么不可理解，火完全是一种神秘的东西，以致把火当作崇高的神来顶礼膜拜。

用火，是人类认识火的真正起点。远古时期的人学会了钻木取火或以燧石打出火星来生火，开始用火熟食，后来又用火制陶、酿酒、煮盐、冶炼金属、烧制玻璃等等。人们从用火的实践中开始认识到火除了发光、发热之外，还能使物质发生变化。于是，出现了关于火的“本源”说。例如：在我国古代“五行”说的金木水火土中，有火；古印度“四大”说的地水火风中，有火；古希腊“四元”说的水土火气中，也有火。这些学说把火看成是万物之源，火能化育万物。

火既然能使事物千变万化，那么使粪土化为黄金又何尝不

可？在这种思想的指导下，我国秦汉之际和西方奴隶社会的末期，用火转变物质的科学便萌生出来，“化学以炼金术的原始形式出现了”。（恩格斯：《自然辩证法》）按炼金术的传统观念，一切金属在本质上是一样的，都是阳性、火性、燃烧性的“硫”和阴性、水性、挥发性的“汞”相结合的产物。当时，所谓硫和汞还不是化学元素，而是某种神秘的本原。金属的“贵贱”，决定于这两种本原在量上的差异。汞多就“贵”，硫多则“贱”。火能烧去其中的硫，而留下贵重的汞。所以，“贱”金属愈炼愈精，最后变成宝贵的黄金。炼金术士关在与世隔绝的幽暗的炼丹房里，沉醉于点石成金、发现“人造黄金”、“长生不老药”和能消融万物的“万能神水”的梦幻之中。炼金术先后在我国、阿拉伯国家和欧洲的封建社会里盛传了1700多年，它们用来说明火和燃烧性的“硫”，始终是一种神秘得像幽灵一样的东西，没有把人类对火的认识推进一步。在炼金术士统治的这个漫长时期内，关于火和燃烧现象的说法，本质上是唯心主义的。

从15世纪开始，在欧洲社会由封建制度向资本主义过渡的社会大变革中，由于新兴资产阶级生机勃勃的活动，社会的物质生产以及与此相适应的精神生产空前繁荣起来。社会进步的历史潮流推动了近代自然科学的飞跃发展。新生的、充满着生命力的唯物主义精神到处都在向一切陈旧、落后的意识形态包括炼金术士的哲学挑战。站在这一斗争前列的，有英国资产阶级的早期活动家罗伯特·波义耳。

波义耳坚决反对炼金术士把火看成是从物体中分解出来的神秘观念。在他看来，火应当是一种实实在在的、由具有重量的“火微粒”所构成的物质元素。从这一点出发，他认为，植物燃料在燃烧时，物体的极大部分都变成火焰散失到空气中

去，只留下同物体本身的重量相比是微不足道的灰；而金属燃烧时，从燃料中散发出来的火微粒钻进了金属，并与它结合成了比金属本身要重的煅灰。把煅灰看成是金属的化合物，这比炼金术前进了一步。但波义耳在实验中只注意到密闭容器里的金属重量增加的一面，而没有同时考察和金属密切接触着的空气是否也发生了什么变化的另一面。结果，为了说明金属煅烧增重的事实，只好形而上学地找了个“火微粒”来充数，因而也就不可能正确揭示火和燃烧现象的秘密。

什么是火和燃烧？面对着这个古老而又复杂的命题，人们作出了种种不同的解释。除波义耳的“火微粒”外，有人说是燃烧性的“油”，也有人说是燃烧性的“土质”。众说纷纭，但又万变不离其宗，不外都是炼金术传统观念中的燃烧性“硫”的翻版。为了统一对燃烧现象的认识，18世纪初，普鲁士王的御医施塔尔，在概括已有观念和综合各种事实的基础上，把炼金术的燃烧性“硫”和波义耳的“火微粒”扭在一起，提出了一种折中的“燃素”学说。

燃素学说认为，火是由无数细小而活泼的微粒构成的物质实体。由这种火微粒构成火的元素，就是“燃素”。按照燃素说，所有可燃物都含有燃素，并且在燃烧时将燃素释放出来，变为灰烬；不含燃素的物质则不燃烧；物质在燃烧时之所以需要空气，是因为空气能吸收燃素。用燃素说解释燃烧现象，一切与燃烧有关的化学变化都可以归结为物体吸收燃素和释放燃素的过程。从此，化学就“借燃素说从炼金术中解放出来”（恩格斯：《自然辩证法》），发展成一门独立的科学。可见，燃素说在科学技术发展史上起过积极的作用。但是，燃素说毕竟是从炼金术脱胎出来的，就不可避免地存在着许多固有的缺陷。它把燃烧的现象当成了燃烧的本质。结果同炼金术一样，

在燃素说中，金属被看成是煅渣和燃素的化合物，煅渣却成了构成金属的元素。燃素说虽然比炼金术能解释更多定性的化学现象，但是它同炼金术一样不能解释金属煅烧增重的事实。既然金属在煅烧时要逸出燃素，为什么煅渣的重量反倒增加了呢？为了说明这一点，人们不得不强加给燃素一些神秘莫测的性质：什么燃素和地心是排斥的，具有负重量，因此金属失去燃素，好比活着的人失去了灵魂，死体比活着的时候要重，死的灰渣自然就比活的金属重；等等。所以，在燃素说中还深深地遗留着“万物有灵论”的痕迹。

1774年英国化学家普列斯特利（J·Priestly）在实验室里用聚光镜分解汞煅灰时，析出并发现了氧。但他是燃素说的虔诚信徒，却没有认识到自己这个发现的重要性。后来，这一发现被法国化学家拉瓦锡（A·lawosier）得知，便在普列斯特利实验的基础上重复作了大量的实验，经过综合分析和归纳，得出了关于燃烧的氧化学说，并于1777年公布于世。这一学说认为：物体只有在氧中才能燃烧，燃烧是物体和氧的化合反应。由于燃烧是物体和氧的化合反应，燃烧产物所增加的重量必然和物体所吸收的氧的重量相等。从而揭开了燃烧之谜，宣告了燃素说的破灭。

人类对自然界的认识是不断发展的。在科学史上，燃烧的氧化理论代替了燃素说，这是个不可磨灭的伟大的进步。但是氧化理论也还不是对火和燃烧认识的终结。正如后来出现了燃烧的连锁理论一样，人类对火和燃烧的认识还会继续发展，还要在与天奋斗的实践中，继续前进。

二、燃烧对人类社会发展的贡献及火灾危害史记

火的使用，对人类的进化发展和社会的进步产生了巨大的

深远的影响。由于食用经过烧烤的果实和兽肉，人类摆脱了“茹毛饮血”的野蛮时代，促进了自己的智力和整个体质的发展。用火不仅能够防御野兽的侵袭，而且可以在洞穴中御寒，增强人类的生存能力。人类在学会摩擦生火之后，用火更加广泛，用火技能不断提高，极大地促进了生产力的发展和社会的进步。请看历史：新石器时代，火被用来烧制陶器；四五千年前，人类用火冶炼某一种金属——青铜。青铜器时代使人类从野蛮蒙昧的状态进入“文明时代”；稍后，人类又用火冶铁。铁制工具的出现推动了农业和手工业的发展，人类又从奴隶社会迈入封建社会；到了18世纪，蒸气机的发明和广泛利用，促进了近代工业的兴起和资本主义的发展；直到科学发达的今天，不论是人们的衣食住行，还是工业农业的发展，都离不开火。总之，火同人类息息相关。从用火烧烤食物、照明、御寒到围捕野兽、加工箭头矛尖；从刀耕火种到制陶、冶铜、酿酒、煮盐；从蒸气机的使用到核电站的建立、火箭上天，火一直伴随着人类到今天。可以说，没有火的利用，就没有今天的物质文明和精神文明，也就没有今天的人类社会。一部人类的历史，可以说就是一部用火发展史。

世界上的一切事物都是一分为二的。火也是如此。它既能服从人们的意志，造福人类，也会违背人们的意志，给人类造成灾难。正如古人云：火“善用之则为福，不能用之则为祸”。无数事实说明，失控的火必成灾。火灾，自从有火那时起便接踵而至，相随人类，时刻威胁着人们的生命和财产的安全。

我国是个文明古国，用火的历史悠久，不言而喻，火灾也始终是困扰着中华民族的一大灾害。至今，我国还流传着“水火不留情”的俗语。且不说史前时期那无数燎原大火，仅有史

记载的历朝历代的火灾就够触目惊心的了。春秋战国时期，是我国从奴隶社会向封建社会过渡的时期，农业和手工业逐渐发展起来，用火已较以前普遍，火灾也相对增多。孔子著的《春秋》和左丘明著的《左传》中就曾记载，自公元前698年至公元前492年，鲁国就先后发生过7起大火，其中，“鲁桓公14年（公元前698年）秋8月壬申，御廩灾（即宫室谷仓起火）”的记载是我国有文字记载的第一例火灾情况。汉代以后，封建经济逐步发展起来，开始用煤冶铁，用天然气煮盐。公元588年8月，南朝陈国东冶在铸铁时发生火灾，铁水飞出墙外，烧毁一些居民住房。到了隋唐时期，我国水上运输业蓬勃发展起来，船舶火灾屡屡发生。公元763年（唐广德元年）12月辛丑夜，鄂州（今武昌）大风，江中起火，焚舟3000艘，蔓延到岸上又烧毁民居2000余家，大火中四五千人丧生。宋朝时期，我国城市发展非常迅速，10万户以上的城市已由唐代的10余个增至40多个，城市火灾频起，损失严重。据《宋史·五行志》记载，南宋建都后，杭州先后发生大火20次，其中5次使全城为之一空。如公元1201年（嘉泰元年）3月戊寅，一场大火烧了数天，延烧城内外10余里，烧毁宫室、军营、仓库、民宅等58000多家，受灾达186300余人。其火烧面积之大，损失之重，可谓我国城市火灾之最。我国第一支消防部队——“防隅军”或“潜火队”，就是在宋代城市中建立起来的。

火药是我国四大发明之一。自从宋代发明了火药之后，火炸药、火器、军械制造业逐步发展起来，火药起火爆炸事故显著增多，特别是到了明、清两代，事故相当频繁，损失极为惨重。公元1626年（明天启六年）五月初六，北京城内王恭厂（兵工厂）起火爆炸，共炸塌烧毁方圆四五里之内的房屋1万多间，烧死、炸死、坠死3千余人。鸦片战争以后，中国进

入半封建半殖民地社会，封建经济逐渐解体，近代工业、商业、交通运输业开始发展，蒸汽机、内燃机等机械、电器设备的使用及化学工业的兴起，增添了不少的火险因素，火灾相继发生。如1889年开工的官督商办企业上海机器织布局，不到四年就付之一炬。1900年2月14日，广东潮州金山机器局因盗窃者引燃火药爆炸起火，炸倒附近民屋数十间，压死居民17人。进入民国以来，连年军阀混战，民不聊生，大火频起。1923年6月26日，北京紫禁城中起火，顷刻间将建福宫一带的楼台亭阁烧成一片焦土，清皇室珍藏的大批历代珍宝化为灰烬。1927年8月27日，北京前门外劝业场发生火灾，一连烧了81家商店。国民党统治时期，政府腐败无能，国穷民贫，消防事业得不到重视，曾发生过不少震惊中外的大火。例如，1947年4月9日上海一仓库发生火灾，大火一连烧了5昼夜，损失达500亿元以上（折合1千万美元）。1949年9月2日，重庆市发生了一起解放前夕最大的火灾，大火烧了近90个小时，受灾居民9千多户，死亡近3千人，受伤4千人，被毁街巷39条，学校7所，机关10个，银行钱庄33家，大小仓库129座和大量物资，被称为重庆市“数十年的空前浩劫”。

新中国成立后，共产党和人民政府把同火灾作斗争当作国计民生的大事来抓，消防事业得到前所未有的发展。但是，由于我国经济建设的迅速发展，全国人口持续增长，城镇数量与规模不断扩大，人民物质文化生活水平逐步提高，生产、生活用火、用电、用油、用气，采用具有火灾危险性的工艺和设备日益增多，火灾仍然是威胁经济建设和人民生命财产安全的一大灾害。据统计，我国自1950年至1989年（缺1966年至1970年资料）共发生火灾近190万起，直接经济损失达69亿（这里还不包括森林、矿井地下部分和军队系统的火灾）。其中，1980

年至1989年的10年间共发生火灾约38万起，直接经济损失达32亿元。平均每天发生火灾103起，损失88万元。80年代10年间与50年代10年间相比，火灾损失上升了5.7倍。建国40年，我国火灾损失翻了五番，平均每隔8年翻一番。尤其是我国经济改革开放以来，不少沿海发达地区火灾上升趋势更为明显。例如广东省1989年的火灾损失比10年前上升了6倍；福建省泉州市1989年的火灾损失比10年前上升了14倍。人类社会的进步，无法回避火灾的挑战。当今世界的各类灾害中，火灾是发生频率较高的一种灾害。人们虽然在与火灾的斗争中逐渐认识、掌握和摸索出了火灾发生与预防的一些科学规律，但是，规律也并非像机械运动那样死板，火灾更有其偶然性、突发性等特点，人们现已掌握的火灾规律，有时也会有所变化。正因如此，人们就更需要想方设法进一步研究探索预防和控制火灾的理论和对策，以期有效地保卫国家生产建设和公民生命财产的安全。

三、消防燃烧原理的研究内容及学习方法

自从拉瓦锡创立了燃烧的氧化学说以后，燃烧作为一门独立的科学很快地发展起来，研究燃烧科学的各种书籍也相继陆续问世。燃烧学的内容多是以研究燃料燃烧作能源为目的的，概括起来说，包括燃烧理论和燃烧技术两部分。燃烧理论着重研究燃烧反应机理，燃烧过程能量释放，火焰的结构和传播原理，预混可燃气体（蒸气）的着火和熄灭，单一油滴和碳粒的燃烧等。它主要是运用化学、化学热力学、传热传质学及流体力学的有关理论，解释各种燃烧现象的物理化学本质。在有些文献中把燃烧学的燃烧理论内容称为燃烧化学和燃烧物理学。燃烧技术则主要是把燃烧理论中所阐述的理论概念和基本规律

与实际工程中的燃烧问题联系起来,对现有的燃烧方法进行分析和改进,对新的燃烧方法进行探索和实验,从而不断提高燃料利用率和燃烧设备的技术水平。近些年来,燃烧学研究的领域正向解决能源危机、防治燃烧灾害、消除燃烧污染等方面扩展。国内外从事消防安全工作的学者、专家针对森林火灾、建筑火灾、石油化工火灾与爆炸、煤矿矿井火灾与爆炸等专题,从燃烧原理上进行了大量的研究,发表了大量的学术论文和专著。这些研究成果对预防、控制和消除火灾爆炸事故提供了大量的理论依据,同时也为燃烧学在消防安全技术领域中的应用奠定了基础。

消防燃烧原理是以燃烧学为基础,研究可燃物质燃烧爆炸的规律和特性,以及防火灭火基本原理的新的学科。主要内容包括:燃烧反应及其计算,可燃物的着火机理,各种点火源对可燃物的点燃能力,某些物质的自燃过程,气态可燃物的燃烧,液态可燃物的燃烧,固态可燃物的燃烧,可燃粉尘的爆炸,火炸药的爆炸,以及防火灭火的基本原理等。有关可燃物的燃烧爆炸特性则包括:燃烧所需要的空气量,燃烧产物的数量和性质,燃烧热值,燃烧温度,自燃点,延迟时间,最小点火能量,闪点,爆炸极限,爆炸压力,爆炸压力上升速度,燃烧速度,火焰蔓延速度,以及火焰的形状和高度等。防火灭火基本原理就是根据这些燃烧爆炸规律和特性,以防止燃烧条件的产生出发,达到预防和限制火灾的目的;从消除燃烧条件的存在出发,达到扑灭火灾和减少火灾损失的目的。消防燃烧原理所研究的可燃物质,涉及具有各种形态和特性的物质,如可燃性气体、可燃性液体、可燃性固体、可燃性粉尘、爆炸性物质、自燃性物质、遇湿易燃性物质、混合接触危险性物质等。随着科学技术的进步,不断出现新材料、新技术、新设备,这就需