

国家自然科学基金项目(50674088,50274068,59876045)

国家重点基础研究专项(2001CB40960102)

中国矿业大学研究生教育专项资金资助出版教材

矿井火灾学

王德明 著

中国矿业大学出版社

前 言

矿井火灾是指发生在矿井井下或地面井口附近、威胁矿井安全生产、形成灾害的一切非控制燃烧。根据发生火灾的原因可以将矿井火灾分为内因火灾和外因火灾两大类。内因火灾亦称煤炭自燃火灾,是指煤因氧化产热而自然发火产生的火灾。外因火灾又称外源火灾,是指外部热源如明火、机械冲击与摩擦、电流短路、静电等引燃可燃物造成的火灾。内因火灾是矿井火灾的主要形式,它约占矿井火灾总数的90%;外因火灾虽然发生次数较少,但造成的灾害程度最严重,国内外有记载的重大恶性火灾事故,90%以上属于外因火灾。

矿井火灾是煤矿生产中的主要自然灾害之一。矿井火灾会烧毁大量的煤炭资源和设备;产生大量的高温烟流和有害气体,严重危及井下人员的生命安全;常诱发瓦斯、煤尘爆炸,进一步扩大其灾难性。我国每年都有多起矿井火灾恶性事故发生,给矿井带来了巨大的灾难。近年来我国广泛采用综采放顶煤开采技术,在瓦斯治理中大力推广瓦斯抽放技术,在生产效率大幅提高和瓦斯涌出量大大减少的同时,造成采空区遗留残煤多、漏风严重,使得自燃火灾发生频繁。近年我国国有重点煤矿每年因火灾而封闭的工作面近百个,每年因封闭工作面造成的冻结煤量都在千万吨以上。封闭工作面常使上千万元的综采、综放装备被封闭在火区中,大量的煤炭因火区而冻结,合理的开拓部署和开采顺序常被打破,给矿井带来巨大的经济损失和重大的事故隐患。矿井火灾已成为制约矿井安全生产与发展的主要因素之一。此外,随着大量机电设备和新材料在井下的广泛使用,矿井外因火灾也呈增长趋势,外因火灾发展快、火势大,一旦发生危害特别严重。许多矿井火灾与瓦斯灾害并存,矿井面临更为严峻的安全形势。因此,矿井火灾防治的责任重于泰山。

矿井火灾学是研究矿井火灾发生、发展规律及其防治理论与技术的一门科学。早在17世纪,人们就已开始研究煤的自燃问题,随后提出了黄铁矿作用、细菌作用、酚基作用、煤氧复合作用等假说来解释煤的自燃原因;在煤的自燃防治技术方面,提出了黄泥灌浆、均压、阻化剂、惰气、凝胶、泡沫等技术。在外因火灾防治方面,波兰学者布德雷克(W. Budryk)教授在20世纪20年代末就提出了火风压概念,然后又系统地总结了矿井火灾时期风流紊乱的类型、产生原因及判别准则。在20世纪70年代末,戚颖敏院士通过对这些理论的研究,编著了《矿井火灾灾变通风理论及应用》一书,成为国内较早的矿井火灾救灾的著作之一。1990年,我国矿业安全学科的创始人之一王省身教授和他的学生张国枢教授编写出版了《矿井火灾防治》一书,该书较为系统地总结了我国矿井火灾防治

的理论与技术,是当时我国创办的“矿井通风与安全”本科专业的教学用书。以后,国内在该领域出版的著作有十多部,有根据抚顺矿区防灭火经验编写的《矿井火灾预防与处理》(王云,1992),根据兖州矿区防灭火经验编写的《易自燃煤层开采的防灭火技术与实践》(魏恒泰,陶云春,1996);煤炭自燃方面的著作有《煤矿井下内因火灾防治技术》(秦书玉,赵书田,张永吉等,1993)、《煤自燃危险性区域判定定理》(徐精彩,2001);矿井火灾救灾方面的著作有《矿井火灾救灾理论与实践》(周心权,1996)、《矿井火灾救灾决策支持系统》(王德明,1996)等。这些著作对指导我国矿井火灾防治及救灾决策,推动我国矿井火灾的科技进步起到了重要的作用。但随着最近十多年来煤矿安全科技的不断进步,煤自燃的基础研究更为深入,防灭火手段更为丰富,防灭火新技术不断涌现,过去的教材与著作已不能反映这些年来矿井火灾的发展状况,不能满足现场对矿井火灾防治的技术需求。因此,迫切需要根据我国矿井火灾防治的需求,全面总结矿井火灾防治的最新研究成果,更系统、科学地介绍该领域的完整知识,以此进一步推动矿井火灾防治的科技进步,提高我国矿业安全的科技水平。

我是我国恢复高考后首届考入中国矿业大学的学生,至今已有三十年了,毕业留校后一直从事煤矿安全领域的教学与研究工作。20世纪80年代中期,作为我国改革开放后首批留学生被选派到波兰留学。当我来到波兰克拉科夫矿冶大学采矿系办公楼,看到办公楼门厅里的原系主任布德雷克(W. Budryk)教授的塑像时,心里充满了崇敬之情。能在布德雷克教授工作过的地方进修学习和攻读硕士学位感到十分荣幸。在波学习期间,我认真阅读了布德雷克教授关于矿井火灾方面具有历史贡献的有关原著,同时较全面系统地了解了世界其他国家在该领域的研究进展情况。在国外的学习使我开阔了眼界,对矿井火灾这门学科的认识更为深刻。回国后,师从王省身教授攻读博士学位,王老师把我带到了矿井火灾研究领域的最前沿。研究期间与波兰科学院院士李特维尼申,国际矿山通风大会主席、波兰科学院院士特鲁特温,俄罗斯莫斯科矿业大学教授乌沙可夫,美国密西根技术大学教授格鲁尔等国际矿业安全知名学者进行了学术交流,他们和蔼可敬的形象和精湛的业务能力给我留下了很深的印象,使我深受教育。此外,中国工程院钱鸣高院士、周世宁院士,他们作为我的老师和长辈,多次对我谆谆教诲,引导着我的研究方向紧密结合现场的需求,他们对我的引航使我受益终身。在前辈们的悉心培养下,作者的思想境界和业务能力都得到了很大的提高。

为了深入研究矿井火灾领域前沿中的关键技术和更好地实现科技创新,作者近些年来承担并完成了大量的国家级、省部级及现场委托的科研项目,其中承担与完成的国家级科研项目有:国家“九五”科技攻关重点子课题“矿井救灾辅助决策系统及风流控制技术的研究”(1996~1999),国家自然科学基金面上

项目“井巷网络火灾特性及伴生现象机理的研究”(1999~2001)、“防治煤炭自燃的三相泡沫及特性研究”(2003~2005)、“基于煤低温氧化产物的煤自燃倾向性测试原理研究”(2007~2009),国家自然科学基金重点项目《火灾中若干特殊火行为的研究》子课题“矿井火灾特殊火行为的研究”(2000~2002),国家经贸委技术创新项目“神东矿区煤田自燃及矿井火灾防治技术”(2002~2004),国家重点基础研究发展规划“973”项目《火灾动力学演化与防治基础》子课题“不同热流条件下煤热解动力学模型和着火、燃烧特性”(2002~2006)。正是由于这些项目的支持,使作者在矿井火灾的前沿领域取得了创新的研究成果。在国内最早研制出了矿井火灾辅助救灾决策支持系统及风流远程控制系统,并在枣庄柴里煤矿、兖州南屯煤矿、平顶山一矿、大屯姚桥煤矿等矿井获得了实际应用。随后,作者把研究重点转向了矿井内因火灾。在煤自燃基础特性研究方面,构建了煤自燃特性实验的平台,研制出了煤自燃基础特性测试的新装置并提出了新的测试方法,并积极与国外同行进行合作,使得该项研究进入到了国际前沿。在煤炭自燃防治技术研究方面,发明了三相泡沫发泡装置、稠化悬沙剂等防火新材料与技术,这些研究成果经专家鉴定达到了国际领先水平。这些技术已在全国 70 多个煤矿得到了广泛应用,获得国家发明专利授权 3 项,国家科技进步二等奖 1 项,省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 4 项。

当然,这些成果的取得绝非作者的一人之功,是课题组共同努力的结果。与作者长期合作的同事李增华教授、蒋曙光教授、张仁贵高级实验师、周延教授等都特别敬业、勤奋,具有很强的创新能力,这些研究成果同样凝聚有他们的创造性劳动。此外,还有作者指导的一大批博士、硕士们艰苦劳动的心血。近几年来,作者指导完成的矿井火灾方面的博士论文有:井巷网络火灾特性及其应用研究(周福宝,2000~2003),煤低温氧化自燃过程的实验与模拟的研究(何启林,2001~2004),防治煤炭自燃的三相泡沫理论及技术研究(秦波涛,2002~2005),煤低温氧化及自燃特性的综合实验研究(戴广龙,2002~2005),煤矿新型快速密封阻燃材料的研制(陈舸,2002~2005),煤自燃逐步自活化反应过程研究(陆伟,2003~2006),三相泡沫流动及防灭火特性与应用研究(马汉鹏,2004~2007),煤自燃倾向性的氧化动力学测试方法研究(仲晓星,2005~2008)。其中,周福宝、秦波涛、陆伟和仲晓星在研究生期间分别获得第七届、第八届、第九届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛三等奖、特等奖、一等奖各 1 项。秦波涛的博士论文被评为 2007 年全国百篇优秀博士论文。这些优秀的博士、硕士们的刻苦努力,推动了矿井火灾领域的科技进步。正是由于有他们的支持和现场的迫切需求,作者才感觉有一种完成《矿井火灾学》著作的使命感。完成这部著作一直是作者的心愿。自 2000 年开始,作者就开始不断地收集相关素材,但由于教学科研任务较重、学院管理工作也繁忙,只得断断续续进

行。经过这些年的努力,今天终于完成了本书,有一种如释重负的感觉。

全书共分七章。第一章介绍矿井火灾学基础。对燃烧的一些基础知识、矿井可燃物燃烧特性、火灾产物及烟气毒性、火灾中的燃烧计算等进行了介绍,为以后各章提供理论基础。第二章介绍煤炭自燃。总结了国内外在煤自燃研究方面的成果,介绍了各种煤自燃假说。结合我国煤矿的实际,系统地对煤自燃过程及影响因素进行了较深入的分析。应用热自燃理论对煤自燃过程及发生煤自燃的条件进行了较全面的阐述。重点介绍了对不同煤种在低温氧化过程中的吸附、耗氧、产热、热解气体、煤结构变化、自由基变化特征等试验结果。对煤自燃倾向性的各种测试方法进行了全面总结,提出了基于氧化动力学的煤自燃倾向性鉴定新方法。第三章介绍矿井火灾的预测预报。总结了国内外内因火灾预测预报、外因火灾的监测的技术现状,分析了煤自然发火的产生条件及易发生的地点,较全面地介绍了煤自燃的预测预报方法与技术,概括介绍了当前各种煤自燃隐蔽火源探测及外因火灾的监测技术,并分析了现有技术的特点及存在的不足。第四章介绍内因火灾的防治技术,主要包括开拓开采方法、均压、灌浆、惰气、阻化剂、凝胶和三相泡沫等防灭火技术,特别对三相泡沫的产生原理、防灭火性能、技术特点以及该技术在现场不同应用条件下的工艺和防灭火效果进行了较详细的介绍。第五章介绍矿井火灾时期的风流紊乱现象和产生机理,通过对风流紊乱现象的理论与实验研究,提出了火区热阻力新概念。结合实际案例还对风流紊乱的产生及其防治技术措施进行了介绍。第六章介绍矿井外因火灾防治技术,主要包括矿井外因火灾的消防设计、运输机胶带火灾的防治技术以及矿井火灾时期的救灾决策专家系统与风流远程控制技术。第七章介绍了火区的封闭与启封技术,重点对火区封闭顺序、防火墙构造及位置的选择,封闭火区过程中防止爆炸的最低供风量及火区封闭后可能发生爆炸时间的计算方法等结合实例进行了介绍。

本书在完成过程中得到了研究生陆伟、张玉涛、戚绪尧、顾俊杰、胡争国、许涛、徐永亮、郭小云、李大伟、时国庆的帮助,他们帮助作者收集资料、整理初稿,绘图和文字输入等,付出了艰辛的劳动,值本书出版之际,向他们表示衷心的感谢。本书得到了国家自然科学基金委、中国矿业大学研究生教育专项资金的资助,在此表示感谢。在本书出版的过程中,中国矿业大学出版社给予了大力支持,编辑付出了大量的劳动,在此一并表示感谢。

王德明

2007年12月于中国矿业大学文昌校区

前言	1
第一章 矿井火灾学基础	1
第一节 燃烧基础知识	1
第二节 矿井可燃物及燃烧特性	14
第三节 矿井燃烧产物及其危害	22
第四节 自燃理论基础	30
参考文献	42
第二章 煤的自燃及其特性	45
第一节 煤的基础特性	45
第二节 煤的自燃假说	47
第三节 煤的自燃过程及影响因素	51
第四节 煤低温氧化特性	61
第五节 煤的自燃倾向性与自然发火期	86
参考文献	108
第三章 矿井火灾的预测预报	113
第一节 煤矿井下自然发火条件及易发火地点	113
第二节 煤自燃的早期识别与预报	125
第三节 外因火灾的监测	142
第四节 火源位置的探测与判别	145
参考文献	154
第四章 防治煤炭自燃技术	158
第一节 防治煤炭自燃的开采技术措施	158
第二节 堵漏与均压防灭火	168
第三节 注浆防灭火	178
第四节 惰气防灭火	185
第五节 阻化剂防火	203
第六节 凝胶防灭火	211
第七节 三相泡沫	219

参考文献	241
第五章 矿井火灾时期的风流紊乱	245
第一节 风流紊乱的基本形式及产生原因	245
第二节 风流紊乱的发生条件	258
第三节 风流紊乱的实验研究	266
第四节 风流紊乱的案例	270
第五节 风流紊乱的防止措施	276
参考文献	282
第六章 矿井外因火灾防治	284
第一节 矿井外因火灾的预防	284
第二节 矿井外因火灾的灭火技术	289
第三节 胶带输送机火灾的防治	300
第四节 计算机技术在矿井火灾救灾决策中的应用	309
第五节 火灾时期的风远程程控制	320
参考文献	325
第七章 火区封闭和启封	327
第一节 火区封闭	327
第二节 火区管理	342
第三节 火区启封	347
参考文献	354

第一章 矿井火灾学基础

矿井火灾学涉及热物理、流体力学、燃料与燃烧学、传热传质、有机化学以及化学动力学等多学科领域,是一门综合性和实践性很强的边缘性科学。本章为矿井火灾学的基础部分,紧密结合矿井火灾理论与实践的实际需要,主要介绍燃烧的相关知识,包括燃烧的条件、形式、分类、过程以及燃烧与爆炸,矿井可燃物及燃烧特性、火灾基础参数的计算,有关自燃的理论等,为以后各章提供基础的知识与理论。

第一节 燃烧基础知识

可燃物与氧化剂作用发生的放热反应,通常伴有火焰、发光和发烟的现象称为燃烧。放热、发光和生成新物质是燃烧反应的三个特征,是区分燃烧和非燃烧现象的依据。从本质上来说,燃烧是一种氧化还原反应,但它发光、发烟、伴有火焰的基本特征表明它不同于一般的氧化还原反应。矿井下煤炭的自然发火就是煤和氧气发生的燃烧现象,燃烧过程中放出大量热量,同时释放出 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 等气体。

一、燃烧的条件

燃烧的发生需要满足三个方面的条件:可燃物、热源和氧气(O_2),通常称为燃烧三要素。只有在三要素同时具备的条件下燃烧才有可能发生,如果将燃烧的发生比作一个整体的正三角形,则三要素就是组成三角形的三条边,如图 1-1-1 所示,缺少任何一条边都不能构成三角形,燃烧也就不会发生。同样,燃烧发生后,如果缺少任一条件,燃烧就会熄灭。

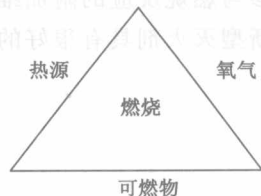


图 1-1-1 燃烧三角形

(一) 可燃物

在煤矿井下,煤炭本身就是一种大量而且普遍存在的可燃物。另外,在生产过程中产生的煤尘、涌出的瓦斯以及所用的坑木、运输机胶带、电缆、机电设备、油料、炸药等都具有可燃性,它们的存在是矿井火灾发生的前提条件。

(二) 热源

热源是触发燃烧的必要因素,在矿井里,煤的自燃、瓦斯、煤尘燃烧与爆炸、爆破作业、机械摩擦生热、电流短路火花、电气设备运转不良产生的过热、吸烟、烧焊以及其他明火都可能是引火的热源。

(三) 氧气

燃烧实际上就是剧烈的氧化,任何燃烧过程,如果缺乏足够的氧气,都难以持续,所以说,氧气的供给是维持燃烧、形成火灾必不可少的条件。

需要说明的是,燃烧的发生和持续仅仅有三要素的存在是不够的,同时它们还必须满足

一定的数量要求。对于可燃物而言,必须要求它能够达到一定的数量和浓度。例如甲烷的浓度小于 1.4% 时便不能燃烧^[3];同样,只有具备足够热量和温度的热源才能引燃可燃物,根据谢苗诺夫理论,只有当热源产生的热量大于散失的热量时,燃烧才能得以发生和维持,这就对热源的强度提出了一定的要求,如低于 595 ℃ 的热源就不能使瓦斯与空气的混合气体燃烧;作为助燃物的氧气也必须达到一定的浓度,几乎所有的有火焰的燃烧都会在氧气浓度低于 10%~12% 时熄灭,但是低温干馏性的燃烧却要在氧气浓度低于 2% 时才会熄灭。瓦斯在氧气浓度低于 12% 的空气中会失去爆炸性。

燃烧三要素为矿井防灭火工作明确了思路,一切防灭火技术都是围绕这三要素展开,其目的就是为了消除三要素中的任何一个或全部,如向采空区或火区内注黄泥或粉煤灰浆,水起到降温消除热源作用,固体不燃介质(黄泥、粉煤灰)覆盖在易自燃的浮煤上阻止了煤与氧气的接触;如注惰性气体(CO₂、N₂ 等),则是为降低氧气浓度,使燃烧缺少氧气;再例如直接灭火中挖出固体可燃物的方法,破坏了燃烧三角形中代表可燃物这条边,是最简单、最彻底的灭火方法。

燃烧三角形足以说明燃烧发生和持续的基本条件,但是根据现已被广泛认可的燃烧链式反应理论,很多燃烧的发生和维持需要自由基(含有未成对电子的原子、原子团、分子或离子)做“中间体”,利用自由基活泼的特性,不断从稳定的原子或分子中夺得一个电子以求达到平衡,从而又不断产生新的自由基,形成链锁反应。据此有人提出了燃烧四面体(如图 1-1-2)的概念,即在燃烧过程中,正是火焰前沿的自由基通过链式反应,迅速增加活化中心来使反应不断加速直至燃烧,从而保证了燃烧的持续,因此燃烧的必要条件除了“三要素”外,还必须再增加一要素——游离基(自由基),这样燃烧三角形就拓展到包括一个说明自由基参与燃烧反应的附加维,从而形成燃烧四面体。基于中断燃烧中链增长反应原理而发明的新型灭火剂具有很好的灭火效果,从而支持了该观点。

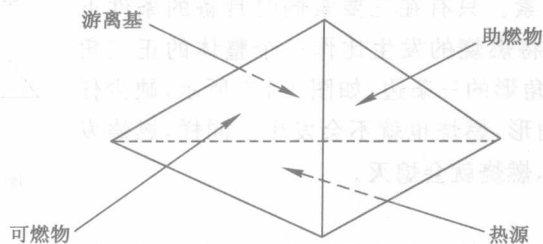


图 1-1-2 燃烧四面体

严格地讲,链反应只存在于燃烧过程中,只是燃烧的一个中间产物,并不能算作燃烧的一个要素,尽管如此,燃烧四面体的提出对于人们研究燃烧的过程机理,采取更有效的手段进行防灭火有十分重要的作用。

二、燃烧的分类及形式

(一) 基本燃烧形式

根据可燃物燃烧过程的差异,燃烧可分为:分解燃烧、表面燃烧、蒸发燃烧、扩散燃烧和预混燃烧这五种基本燃烧形式。

1. 分解燃烧

分解燃烧出现于固体和部分液体燃料的燃烧中。在燃烧过程中,可燃物首先遇热分解,热分解产物和氧气反应发生燃烧产生火焰,如木材、煤、橡胶、合成高分子化合物等固体燃料及柴油、煤油、润滑油等高沸点油脂类流体以及蜡、沥青等固体烃类物质的燃烧都属于此类。例如,木材在空气中燃烧时,火源首先加热木材,使其失去水分而干燥,然后木材发生热分解,释放出挥发性气体,产生燃烧火焰,放出热量,释放的热量继续加热木材,使木材不断分解,从而使燃烧得以延续。矿井火灾中,前期和中期的大部分燃烧现象都属于这一类型。

2. 表面燃烧

表面燃烧发生于固体燃料燃烧的后期。固体可燃物燃烧时(例如木材的燃烧),不断分解出挥发性气体,而挥发性气体燃烧放出的热量继续维持新的固体燃料热分解和燃烧。当原来燃烧的燃料所含挥发性气体完全分解后,只剩下不能分解、气化的固体炭,这时,燃烧在焦炭与空气的接触表面进行,称为表面燃烧。固体燃料呈红热表面,但没有火焰,燃烧的速度与可燃物的表面积有关。

3. 蒸发燃烧

液体燃烧不是液相燃烧而是液体蒸发所产生的蒸气与空气混合发生着火。可燃性液体如酒精、苯等,它们的燃烧就是由于液体蒸发产生的蒸气被点燃起火而形成的,蒸气点燃形成火焰,它放出来的热量进一步加热液体表面,从而促使液体继续蒸发,使燃烧继续下去。萘、硫磺等在常温下虽为固体,但它们熔点低,在受热后会升华产生蒸气或熔融后产生蒸气,因而同样能够引起蒸发燃烧。

4. 扩散燃烧

甲烷、一氧化碳、乙炔等可燃气体从管道孔口或巷道局部空间流出,在与空气汇合时,可燃气体与空气靠分子间扩散而混合,当其混合浓度达到燃烧界限时,遇火源在该范围内就会发生燃烧,并随着可燃气体和氧气的不断补给、混合,使燃烧得以继续,这种燃烧形式称为扩散燃烧。如图 1-1-3 所示。

在煤矿井下的采空区或者采煤工作面,有时候会发生瓦斯涌出遇到点火源而燃烧的现象,这种燃烧就属于扩散燃烧,如果燃烧很稳定,一般情况下是不会发生爆炸的,只要及时加以扑灭,就不会带来重大的人员伤亡。

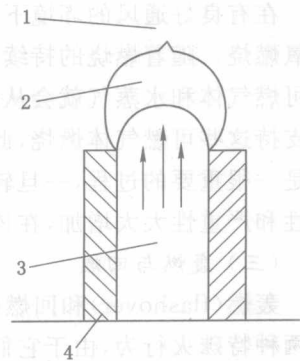


图 1-1-3 扩散火焰结构图

1——空气;2——扩散混合区;
3——气态燃料;4——管口

5. 预混燃烧

预混燃烧又称混合燃烧、动力燃烧、爆炸式燃烧。在井下一定环境条件下,可燃气体与空气在着火前已经预先充分混合,且其浓度处于燃烧(爆炸)界限之内,遇火源即会发生燃烧,称为预混燃烧。这种燃烧在混合气体分布空间快速蔓延,在一定条件下还会转变为爆炸。矿井火灾引起的爆炸事故往往是由预混燃烧引起的,因为扩散燃烧仅在很小的扩散区内进行,分解燃烧也仅在小范围的空气与挥发物混合界面进行,作用范围小。在一定通风条件下,煤层涌出的瓦斯与矿井火灾分解的高温挥发性气体混合,可形成较大范围可燃性气体,一经点燃就会出现预混燃烧,并可能在半封闭空间内迅速地自我加速发展成为爆炸。在井下的环境中,要特别注意保持合理的通风系统,防止瓦斯及其他可燃气体在井下一定空间的聚集与混合,否则具备预混燃烧的条件,一旦遇上火源,就会发生

爆炸式燃烧,将带来特别严重的灾难性后果。

(二) 富氧燃烧与富燃料燃烧

井下的火灾发生在受限空间中,受限空间中的火灾特性与通风条件密切相关。根据供风量的大小,受限空间的火灾可以分为富氧燃烧与富燃料燃烧两种类型。

1. 富氧燃烧

富氧燃烧(Oxygen-rich Fire)是供氧充分的燃烧,又称为非受限燃烧或燃料控制型燃烧。由于氧气充分,火源燃烧产生的挥发性烟气在燃烧中已基本耗尽。燃烧产生的火焰以热对流和热辐射的形式加热邻近可燃物至燃点,保持燃烧的持续和发展。燃料的供给量相对较少,氧气剩余(火灾发生时下风侧氧浓度一般保持在15%以上),所以这类燃烧的特点是耗氧量少、火源范围小、火势强度小和蔓延速度较低。

2. 富燃料燃烧

富燃料燃烧(Fuel-rich Fire)是供氧不足的燃烧,又称受限燃烧或通风控制型燃烧。该燃烧一般发生在空间受限制或通道断面较小、供氧受限的情况下。当火源燃烧时,如火势大、温度高,火源将产生大量炽热挥发性烟气,不仅供给燃烧带消耗,还能与被高温火源加热的主风流汇合形成炽热烟流,预热火源下风侧较大范围的可燃物,使其继续生成大量挥发性烟气;另一方面,燃烧位置的火焰通过热对流和热辐射加热紧邻可燃物使其温度升至燃点。由于保持燃烧的可燃物和热源这两种因素的持续存在和发展,此类火灾使燃烧在更大范围进行,并以更大速度蔓延致使主风流中氧气几乎全部耗尽,剩余氧浓度可低于3%。所以,此类火灾蔓延受限于主风流供氧量。

在有良好通风的环境下,绝大多数火灾在初期时氧气的供给量都大于燃烧需求量,属于富氧燃烧。随着燃烧的持续,当燃烧产生的热量聚集使温度升高到一定数值后,甲烷、氢气等可燃气体和水蒸气就会从煤、木材和其他可燃材料中释放出来,但是由于没有足够的氧气来支持这些可燃气体燃烧,此时燃烧就变成富燃料燃烧。燃烧从富氧燃烧发展到富燃料燃烧是一很重要的过程,一旦转变为富燃料燃烧,表明火势大、供风不足,预示着发生灾难的危险性和严重性大大增加,在该环境下必须及时撤离包括救护队员在内的所有人员。

(三) 轰燃与回燃

轰燃(flashover)和回燃(backdraft)是受限空间火灾中对火灾过程产生突然而巨大影响的两种特殊火行为,由于它们对人员的安全构成特别严重的威胁,故受到国内外火灾科学工作者的关注,成为当前火灾科学研究中的一个热点。

1. 轰燃

轰燃是受限空间火灾局部缓慢燃烧发展到空间内所有可燃物突然全面快速燃烧的特殊火行为^[4],其特点是在一定受限空间中所有的可燃物几乎同时被点燃。

(1) 轰燃的形成

受限空间火灾通常分为三个阶段:发展阶段、完全发展阶段和熄灭阶段^[5]。在火灾的发展阶段与完全发展阶段之间有一个温度急剧上升的狭窄区,通常称为轰燃区,如图1-1-4所示,它是火灾发展的重要转折阶段。

发展期火势发展较小,火灾是局部和低强度的。当热量聚集到一定的程度,更大范围的可燃物被点燃,从而产生更大的热量,最后使整个空间内的可燃物全部被点燃,由于该过程发生得很快,所有可燃物有一种突然同时被点燃的效应,故称轰燃。轰燃发生时从外观上看

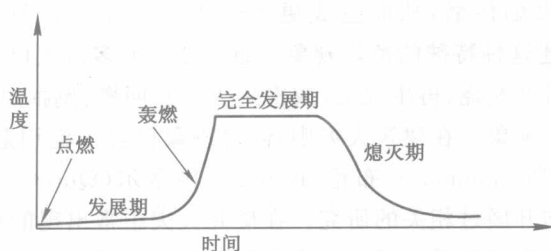


图 1-1-4 受限空间火灾发展过程示意图

形成一片火海,是受限空间火灾由局部燃烧向全面燃烧的瞬间快速过渡过程。图 1-1-5 为矿井巷道内坑木发生轰燃后的景象。

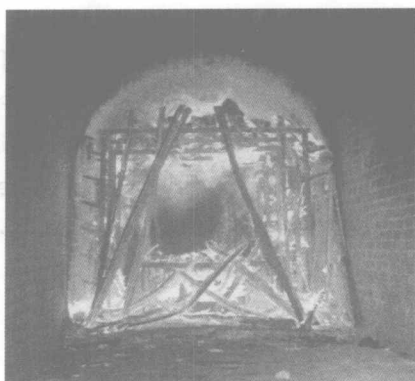


图 1-1-5 矿井巷道内坑木发生轰燃后的景象

轰燃的出现是燃烧释放的热量大量积累的结果。受限空间某处发生火灾后会释放大量的热量和高温烟气,它们以辐射形式对受限空间中的其他可燃物加热,随着燃烧的持续,热烟气层的厚度和温度都在不断增加,使得可燃物的燃烧速率不断增大,当受限空间内火源的释热速率达到发生轰燃的临界释热速率时,轰燃就会发生。

(2) 煤矿井下的轰燃现象

井下可燃物荷载分布较多的地点就易发生轰然现象。如输送机胶带巷道发生火灾时,如果火焰的热辐射强度足够引燃其下端一定距离外的胶带并且风流不足以对燃烧的持续构成影响时,那么就容易发生胶带火焰逐段蔓延的局部轰燃现象。该现象最初被形象地称为“跳火”,即火焰沿烟流流动方向下端的胶带面蔓延开来,逐段地传播下去,这种现象对火灾的传播速度影响较大,它能加快火灾沿胶带表面的传播速度,试验表明其数值可达 $10 \text{ m/min}^{[6]}$ 。

2. 回燃

回燃是指富燃料燃烧产生的高温不完全燃烧产物(烟气)遇新鲜空气时发生的快速爆燃现象^[7]。在井下一些堆积有较多的可燃物但通风量较小的巷道与硐室内,一旦可燃物着火,随着火势的发展会出现空气供应的不足,火灾就会逐步进入富燃料燃烧状态(缺氧燃烧),形成的热烟气中将含有大量未燃的高温可燃组分,这些高温可燃烟气一旦与新鲜空气接触,就

会产生爆燃和快速的火焰传播,从而造成更大危害。国外文献中曾用 Flameover、Backdraft、Flashback 来表述这种特殊的燃烧现象。近年来,大多数人已接受 Backdraft 的表述方式^[8]。国内则用过回火燃烧、再生火灾(或次生火灾)、回燃、倒抽风燃烧、逆通风爆炸等词来描述这种特殊火行为现象。在建筑火灾中,回燃现象已经广泛引起了国内外众多火灾科研人员的重视,如托马斯(Thomas)、布伦(Bullen)、昆蒂尔(Quintiere)、帕格内(Pagin)、范维澄、霍然、宋卫国等均开展过相关的研究。在矿井火灾中常出现的再生火灾或次生火灾通常就是指的回燃现象。作者曾通过承担国家自然科学基金重点项目子课题“矿井火灾特殊火行为的研究”,对矿井网络中的回燃现象进行了试验研究,试验结果表明火灾时期风流的逆转常导致这种特殊火行为的发生^[9]。因为发生火灾的易逆转的支路中(如下行通风主干支路),在逆转前风量经历了逐渐减少到无风的过程,因火源分支供风不足,火灾变为富燃料燃烧,一旦逆转后富含可燃物的高温烟气遇上新鲜空气就发生回燃。

(1) 回燃发生的条件

回燃现象中的可燃物来自于前导燃烧中产生的大量未燃可燃组分。当前导燃烧在通风不良条件下进行时,由于氧气的供应不足,可用的氧气不断减少,燃烧效率逐渐下降,富余的热解产物在巷道中不断积聚,形成了大量未燃可燃组分。如果通风条件得不到改善(没有新鲜空气流入),前导火灾会随着时间而减弱,甚至熄灭,回燃不会发生。若前导火灾还未完全熄灭时与富含氧气的空气突然接触,回燃现象便会发生。因此,回燃发生的必要条件可以归纳为两点,一是存在前导燃烧,形成大量未燃的高温可燃组分;二是这种高温可燃组分与新鲜空气的突然接触。

(2) 煤矿井下的回燃现象

煤矿井巷发生富燃料火灾后,其下风侧烟流常为高温预混可燃气体,由于其含氧量少(如低于3%),不足以构成燃烧。

图 1-1-6 为富燃料火灾中“跳蛙”现象示意图。

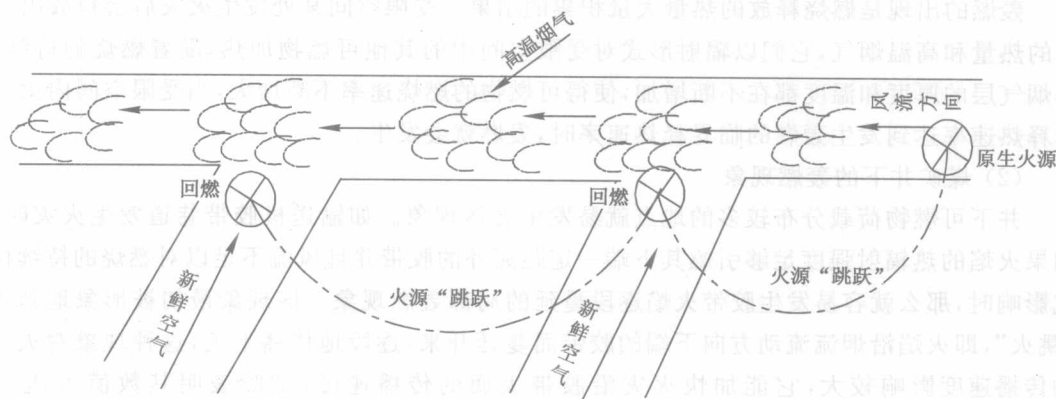


图 1-1-6 富燃料火灾中“跳蛙”现象示意图

当高温烟流在流动过程中与旁侧支路的新鲜风流交汇时,便在巷道连接处发生回燃,即形成新的火源点(见图 1-1-6)。新火源又会消耗了大量氧气再次使高温烟流中氧气的含量不足,高温可燃烟气继续向前流动,如果在巷道附近又有新鲜空气涌入,在连接口附近又会再次发生回燃而形成又一个新的火源点,这种在矿井下远离火源点形成的一个或多个再生

火源的现象被形象地称为火源发展的“跳蛙”现象。回燃的出现加快了火灾蔓延的速度,同时发生回燃的地点易发生爆炸。

三、燃烧过程及其热传递

(一) 燃烧的过程及温度变化

1. 燃烧过程

气体、液体和固体三种不同状态的物质,其燃烧过程有所不同,绝大多数物质的燃烧,最终都是气体或液体蒸发后的蒸气在气相中的燃烧,如图 1-1-7 所示。

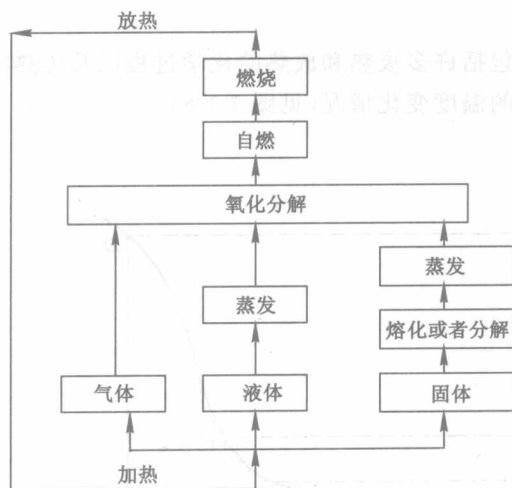


图 1-1-7 物质燃烧过程示意图^[10]

由图 1-1-7 可以看出,可燃气体最容易燃烧,所获得的热量全部用于氧化分解,达到燃点或自燃点就可以燃烧。气体的燃烧经历如下过程:燃烧首先从局部开始,局部气体受热被点燃后释放出一定量的热量,释放的热量又引起周围未燃气体至燃点,使得燃烧得以持续和发展,如此反复进行直至因可燃气体燃尽或氧气不足而终止燃烧。

液体燃料的沸点低于其燃点,因此可燃液体则是在热源作用下,首先蒸发成为蒸气,然后不断地被氧化分解,并在一定的温度和充足的氧气环境中发生燃烧。对于极少数的重质液体燃料来说,液体在燃烧前有一个热分解过程,即燃料由于受热而裂解成轻质碳氢化合物和炭黑。轻质碳氢化合物以气态形式燃烧,而炭黑则以固相燃烧形式燃烧。

可燃固体的燃烧过程比较复杂,主要有两种类型:诸如硫、磷、石蜡之类的简单物质,首先受热熔化,然后蒸发成为蒸气或者直接升华为气态,氧化后,遇到合适的条件开始燃烧,燃烧是在气相中进行的;而对于复杂的可燃固体化合物,受热后直接分解、析出气态或液态产物同时留下一些不分解不挥发的固体,然后气态或液态产物的蒸气首先发生着火燃烧,释放出大量的热量,在这些高温热量的作用下不分解不挥发的固体最后在表面燃烧,这种形式的燃烧既在气相中进行,又在固体表面进行,如煤在燃烧时就属于此种情况。首先煤颗粒被加热干燥,而后裂解析出 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 等可燃气体。在足够高的温度和供氧条件下,这些气体达到着火点后在煤颗粒周围着火燃烧,形成光亮的火焰。可燃气体的燃烧使得氧气不能进入煤表面阻碍了煤颗粒本身的燃烧,然而另一方面可燃气体在煤周围的燃烧对煤

本身有强烈的加热作用,所以在可燃气体燃尽后,不分解不挥发的固体颗粒最后迅速地在其表面燃烧起来。

三种形态物质的燃烧过程有所不同,但是无论哪一种燃烧都遵循如下规律,即:首先被点燃的局部可燃物燃烧,燃烧过程释放出大量热量,放出的热量加热周围未燃可燃物质,使其达到燃点或着火点而燃烧,这样燃烧便在空间内蔓延开来,激烈的氧化反应便继续进行下去,若没有外界因素的干扰,燃烧过程将在三要素得到满足的条件下持续进行,直至三要素之一缺失而终止燃烧。

2. 温度变化

可燃物质的燃烧过程包括许多吸热和放热的化学过程以及传热的物理过程。下面介绍可燃物质氧化燃烧过程中的温度变化情况(见图 1-1-8)。

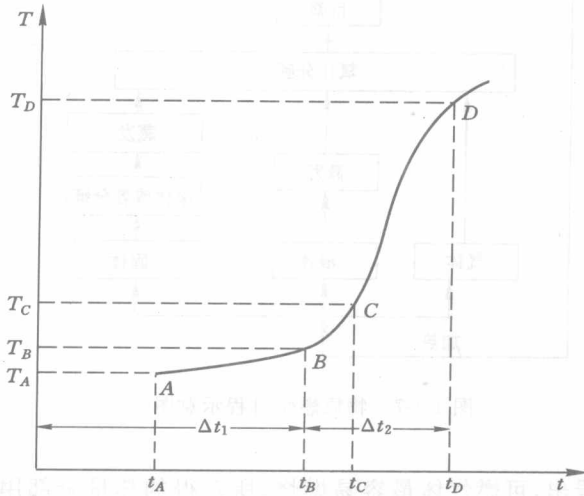


图 1-1-8 可燃物燃烧过程温度分布图^[11]

A 点的温度 T_A , 是环境的初始温度。此阶段可燃物内部变化微弱, 外界提供的热量使其温度略有升高, 为氧化反应做好准备。

B 点的温度 T_B , 当可燃物温度达到 T_B 时, 开始氧化并放热, 但由于温度尚低, 故氧化速度较慢, 氧化所产生的热量还小于体系向周围环境的散热。

C 点的温度 T_C , 当可燃物温度上升到 T_C 时, 表明可燃物氧化产生的热量和体系向环境散失的热量相等, 也就是说, 在 T_C 温度时体系产生的热量和向环境散失的热量达到平衡。因此, T_C 为体系从不燃烧到燃烧的转折点, 即为可燃物的燃点, 可燃物加热到一定程度能自动燃烧的最低温度。

D 点温度 T_D 为着火温度, 当可燃物温度上升到 T_D 时, 可燃物就燃烧起来, 同时出现火焰, 并且温度持续上升, T_D 为着火点又称燃点。

E 点的温度 T_E , 此时是可燃物经过燃烧后, 其产物达到最高温度。

综上所述, 可燃物从 T_A 升到 T_B 的过程中, 温度较低且变化缓慢, 氧化现象不明显, 不易为人们所察觉, 一般称为准备期或潜伏期; 如图 1-1-8 中的 Δt_1 所示, 温度达到 T_B 后, 氧化产热现象开始出现, 当温度超过 T_C 后, 氧化生成物和产热开始明显, 容易被察觉, 从 T_B

到 T_C 再到 T_D 的过程通常称为自热期 (Δt_2); 当温度达到 T_D 时进入燃烧期。

(二) 燃烧过程中的热传递

燃烧现象的发生一般都伴随着能量的释放和传递,热量的传递均衡了燃烧物体内部之间、内部与外界之间的热量,加速了能量的转化。热量的传递有三种基本的方式,即热传导、对流换热和热辐射。

1. 热传导

由传热学可知,如果在物体内部存在温度梯度,则能量从高温区向低温区转移。这种能量传递的方式称为热传导,也叫导热。从微观角度讲,之所以发生导热现象是由于微观粒子的碰撞、转动和振动等热运动而引起能量从高温部分传向低温部分。导热是主要与固体相关的传热现象,虽然也在液体内部发生,但常为对流所掩盖。在矿井中,最常见的热传导现象就是热量在巷道围岩内的扩散。

热传导服从傅立叶定律,即:在不均匀的温度场当中,由于导热所形成的某地点的热流密度正比于该时刻同一地点的温度梯度。在一维温度场中其数学表达式是:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1-1-1)$$

式中 q_x ——热通量,单位时间内经单位面积传递的热量, W/m^2 ;

dT/dx ——沿 x 方向的温度梯度, $^{\circ}C/m$;

k ——热导率, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。

上式中负号表示热通量的方向与温度梯度方向相反。热导率 k 表示物质的导热能力,数值上等于单位温度梯度下的热通量。不同的导热物质其热导率不同,同种导热物质的热导率也会因为材料的结构、密度、湿度、温度等因素的变化而不同。表 1-1-1 给出了矿井几种常见煤岩和物质的热导率。

表 1-1-1

矿井下几种常见煤岩和物质的热导率^[12]

材料	$k/W \cdot (m \cdot ^{\circ}C)^{-1}$	材料	$k/W \cdot (m \cdot ^{\circ}C)^{-1}$
煤	0.25~0.28	空气	0.062
砂岩	2.11~2.72	普通砖	0.690
泥质页岩	0.84~0.93	混凝土	0.8~1.4

2. 对流换热

对流换热是指流体在流动过程中与周围固体或流体之间发生相对位移,引起的热量交换。在矿井条件下对流换热主要就是通风风流与巷道壁面之间的热交换。

表述对流换热的基本公式为:

$$q_s = h\Delta T \quad (1-1-2)$$

式中 q_s ——单位时间内经单位壁面积上的对流换热量, W/m^2 ;

ΔT ——流体和壁面间的温差, $^{\circ}C$;

h ——对流换热系数,表示流体壁面温差为 $1^{\circ}C$ 时,单位时间内单位壁面面积和流体之间的换热量, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

3. 热辐射

热辐射是一种不依赖物质的接触而由热源自身的温度作用向外发射能量的热传递方式。它和热的传导、对流不同,它不依靠媒质而把热直接从一个系统传给另一系统。热辐射是以电磁波辐射的形式发射出能量,温度的高低,决定于辐射的强弱。辐射能定义为单位时间内,物体的单位表面积向周围半球发射的所有波长范围内的总辐射能,用 E 表示,单位是 W/m^2 。它表示了辐射能力的大小。辐射力与温度有关,同一温度下不同物体的辐射力不同。在矿井火灾中,热辐射是火灾对井下周围环境传递热量的主要方式。

四、燃烧与爆炸

爆炸与燃烧没有本质的区别,而是燃烧剧烈程度的表现形式。如果燃烧的速度极快(达到每秒数十米到数百米),则因高温条件下产生的气体和周围气体共同膨胀作用,使得能量直接转化为机械功,在压力释放的同时产生强光、热和声响,这就是所谓的爆炸^[13]。

(一) 爆炸类型

按照爆炸前后物质成分变化不同,爆炸可以分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。

体系中物质因状态或压力发生突变而引起的物理能量的快速释放,并转变为机械功、光、热等能量形式的爆炸现象称为物理爆炸。在煤矿井下用水灭火时发生的水煤气爆炸或地面自燃的矸石山遇雨水而发生的矸石山爆炸主要是由于水的相变,即液体的水在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时会膨胀 1 700 倍成为高温高压的水蒸气而造成的热物理爆炸^[14]。

体系中物质以极快的速度发生放热反应并产生高温、高压气体而引起爆炸称为化学爆炸。化学爆炸的特点是爆炸前后,体系中物质的性质和组分都发生了根本的变化。煤矿井下发生的爆炸大多数都是化学爆炸,如瓦斯爆炸、煤尘爆炸等。本书中涉及的爆炸,若无特别说明,均指的是化学爆炸。

核爆炸是原子裂变,因不属本书研究内容故不再涉及。

(二) 爆炸极限

可燃物与空气必须在一定的浓度范围内均匀混合,形成预混气体,遇火源才能发生爆炸。这个浓度范围就是爆炸极限。可燃气体和蒸气的爆炸极限的单位,是以其在混合物中所占体积分数(%)来表示的。例如在矿井下甲烷的爆炸极限为 $5\% \sim 16\%$,在这个范围内爆炸有可能发生,超出了这个范围(这个范围不是一成不变的,会随着环境温度、压力等因素的影响而变化),爆炸不会发生。

用公式表示爆炸极限就是:

$$L_x = \frac{V_i}{V_h} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

式中 L_x ——体积分数, %;

V_h ——混合气体体积, m^3 ;

V_i ——可燃气体或蒸气的体积, m^3 。

可燃粉尘的爆炸极限可用单位体积混合气体中所含的可燃物的质量,也称作体积质量浓度(g/m^3)来表示。用公式表示就是:

$$L_y = \frac{W_i}{V_h} \quad (1-1-4)$$