

国家专业技术人员知识更新工程 (“653工程”)
煤炭行业煤矿安全领域培训教材 (第4册)

煤矿爆炸、火灾及其防治技术

领域主编: 张铁岗 卢鉴章 周心权 王虹桥

本册主编: 张延松 王德明 朱红青

MEIKUANG BAOZHA HUOZAI JIQI FANGZHI JISHU

国家“十一五”重大人才培养工程

国家人事部直接组织领导

中国煤炭工业协会全面负责实施

国家人事部统一颁发培训证书

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

国家专业技术人员知识更新工程(“653 工程”)

煤炭行业煤矿安全领域培训教材

煤矿爆炸、火灾及其 防治技术

领域主编：张铁岗 卢鉴章 周心权
· 王虹桥

本册主编：张延松 王德明 朱红青

中国矿业大学出版社

国家专业技术人员知识更新工程(“653 工程”)
煤炭行业培训教材编审委员会

顾问: 王显政 濮洪九

主任: 路德信

副主任: 姜智敏 孙之鹏 胡省三

钱鸣高 宋振骥 张铁岗

葛世荣 乔建永

委员: (以姓氏笔画为序)

马念杰 王金力 王金华

王虹桥 卢鉴章 叶醒狮

刘峰 刘文生 刘炯天

孙继平 陈奇 杜铭华

宋学峰 宋秋爽 张玉卓

张贤友 周英 周心权

赵阳升 赵跃民 赵衡山

钟亚平 段绪华 都基安

袁亮 徐水师 黄福昌

常心坦 彭苏萍 遇华仁

缪协兴 濮津

国家专业技术人才知识更新工程(“653 工程”)
煤炭行业煤矿安全领域培训教材编审委员会

顾 问：路德信

主 任：孙之鹏 张铁岗 卢鉴章
周心权

委 员：(以姓氏笔画为序)

马 骏 王虹桥 王德明

刘 剑 刘何清 朱红青

李德文 张延松 张明安

武 强 胡千庭 常文杰

常心坦 景国勋

《煤矿爆炸、火灾及其防治技术》

编写人员

领域主编：张铁岗 卢鉴章 周心权
 王虹桥

本册主编：张延松 王德明 朱红青

本册编者：张延松 王德明 朱红青
 刘新强 蔡周全 樊小涛

序

加快人才培养,是建设创新型国家、强国兴业的重要举措。《中共中央、国务院关于进一步加强对人才工作的决定》为加强专业技术人才队伍建设指明了方向,明确了工作重点和政策措施。人事部决定“十一五”期间,在关系我国经济社会发展和科技创新的一些重要行业领域实施专业技术人才知识更新工程(即“653工程”),开展大规模示范性继续教育活动,加快建立健全我国继续教育的工作体系、制度体系和服务体系,大力推动专业技术人员培养工作的深入开展。“653工程”已被列入国家“十一五”发展规划,是国家实施专业技术队伍建设的一项重大人才培养工程。煤炭行业“653工程”是国家“653工程”的重要组成部分,是煤炭行业专业技术人才继续教育工作的示范工程,该工程的全面启动必将有力带动和促进煤炭工业人才培养工作的进程。

煤炭工业是我国的基础产业。发展振兴煤炭工业,人才队伍建设是关键。实施大基地、大集团战略,推进节约发展、清洁发展、安全发展,实现可持续发展,必须以强有力的专业技术队伍作保证。当前,煤炭工业已进入新的历史发展机遇期,但同时又面临着煤炭主体专业人才匮乏、知识更新滞后的严峻挑战。推进实施“653工程”旨在拓展煤矿专业人才培养的广阔空间。根据《煤炭行业专业技术人才知识更新工程(“653工程”)实施办法》,“十一五”期间每年将为110家国有大型煤炭企业培训1万左右的高级专业技术人才,为5000多家规模以上煤炭企业培训3万左右的中高级专业技术人才,五年全国煤炭行业将培训20万左右。国家人事部委托中国煤炭工业协会全面负责煤炭行业“653工程”的组织实施工作,实行统一组织、统一规划、统一教学大纲、统一发证和归口管理、分级实施、

分类指导,创造性地推进“科教兴煤”战略,全面提升煤炭行业专业技术人才队伍素质,从而为煤炭工业的全面、协调和可持续发展提供强大的人才保障和智力支持。

为适应煤炭行业实施“653工程”的需要,我们组织全国有关专家学者编写了《国家专业技术人才知识更新工程(“653工程”)煤炭行业培训教材》,这一教材具有以下三个突出特点:

第一,突出重点专业领域,培训内容丰富。煤炭行业“653工程”专家指导委员会根据煤矿实际需要,立足当前、着眼长远,选定的煤矿专业领域和培训内容都是煤炭行业和企业所必需的。包括采煤工程、煤矿安全、煤矿机电、煤田地质与测绘、煤炭洁净利用及矿区环保这五个重点专业领域,以及高效高回收率采煤方法与技术等34个专业培训方向,全面反映煤炭工业的科技发展趋势。培训教材突出新理论、新知识、新装备、新技术、新方法、新工艺、新材料、新标准、新法规、新政策和新问题等内容,涵盖煤炭行业专业技术人才知识更新的重点,具有很强的针对性。

第二,体现学术权威,保证培训质量。顺利、高效地实施“653工程”,搞好专业技术人才培训,教材编写质量和所体现的学术水平必须得到切实的保证。为此,实行了首席专家负责制,从全国煤炭行业的高等院校、科研院所和煤炭企业推选出一百余名在各自学术研究领域颇有建树和创新的业内知名专家,领衔编写这套培训教材,集中了院校、科研机构和企业多年来理论与实践的丰硕成果,包含了专业基础知识、理论系统讲解,也集锦了一些极具参考价值的典型应用案例。这是建国以来我国煤炭行业在专业技术人才继续教育方面一次规模最大、最为全面的新知识展示,是提高全行业专业技术人员技术水平的一批好教材。

第三,培训方向明确,教材实用性强。根据不同的专业培训对象,立足矿山,站在世界煤炭工业科技发展前沿,针对我国“十一五”煤炭科技发展的需求,广泛吸纳新知识、新技术和新信息,坚持理论与实践相结合、理论知识与案例分析相结合,把专业技术知识内容进

行科学分解,编写成34个分册,既系统成书又独立成册,便于不同领域内的工程技术人员各取所学、研读提高。因此,本套教材既是优秀的培训教科书,也是一套煤炭专业技术人员实际工作中必备的工具书。

我衷心希望这套凝聚着煤炭行业专家学者智慧与心血的教材,能够在实际教学培训中发挥应有的重要作用;同时也希望广大基层专业技术人员通过认真学习、刻苦钻研,不断提高理论水平和实际应用能力,为加快建设新型、现代化煤炭工业做出积极的贡献。

王显政

二〇〇七年八月八日

前 言

在相当长的时期内,煤炭是我国的主要能源,占我国一次能源生产和消费结构中的70%左右。近年来,由于我国经济的快速增长,对煤炭的需求量也增长较快,因此,煤矿事故也频频发生。据2002~2005年统计,煤矿事故占工矿企业一次死亡10人以上特大事故的80%左右,而煤矿事故中又以火灾、爆炸事故的严重度和危害程度最大。

为了确保煤炭工业持续、稳定、健康发展,国家对煤矿安全越来越重视,对安全投入也在增大。为了配合国家在关系我国经济社会发展和科技创新的一些重要行业领域实施专业技术人员知识更新工程(即“653工程”),帮助煤矿技术人员更好地运用新技术和新工艺,作者系统分析并总结多年来的研究成果,查阅和摘引相关学科领域的新技术新工艺,编著本书。

本书旨在帮助读者了解并认识到煤矿火灾、爆炸事故的危害程度及防治措施,便于在实际工作中应用,防止或减少煤矿火灾、爆炸事故的发生。书中重点阐述了煤矿瓦斯爆炸、煤尘爆炸、内因火灾、外因火灾的基本知识、防治技术以及国内外的动态,并列举实例分析,帮助读者理解。由于作者水平有限,编写仓促,书中缺点和错误在所难免,真诚希望广大读者批评指正。

编者

2007年10月

目 录

序	1
前言	1
第一章 煤矿瓦斯、煤尘爆炸及其防治技术	1
第一节 瓦斯爆炸	1
第二节 煤尘爆炸	23
第三节 瓦斯煤尘爆炸防治技术与装备	46
第四节 瓦斯煤尘爆炸相关标准和隔抑爆装置现场应 用安装规范	65
第五节 瓦斯煤尘爆炸国内外发展动态及存在问题	85
第二章 矿井外因火灾	90
第一节 概述	90
第二节 矿井火灾对风流流动状态的影响	99
第三节 外因火灾与其他灾种的相互转换关系	108
第四节 外因火灾的早期预报、预防	110
第五节 矿井外因火灾的重大技术难题及国内外研究 动态	125
第六节 实际案例	127
第三章 矿井内因火灾	133
第一节 煤炭自燃特性	133

第二节	煤炭自燃的基础参数测试·····	141
第三节	煤炭自燃的现场监测与预报·····	148
第四节	矿井防灭火技术·····	154
第五节	实际案例·····	177
第六节	国内外的动态·····	184
参考文献·····		186

第一章 煤矿瓦斯、煤尘爆炸及其防治技术

第一节 瓦斯爆炸

瓦斯爆炸是煤矿生产的主要灾害之一。近年来,我国连续发生了几起特别重大瓦斯爆炸事故,造成大量的人员伤亡和财产损失,带来严重的社会影响。

一、瓦斯爆炸基础知识

1. 矿井瓦斯

(1) 瓦斯的形成

古代植物在成煤过程中,经厌氧菌的作用,植物的纤维质分解产生大量瓦斯;此后,在煤的炭化变质过程中,随着煤的化学成分和结构的变化,继续有瓦斯不断生成。在全部成煤过程中,每形成 1 t 烟煤,大约可以伴生 600 m^3 以上的瓦斯。而在由长焰煤变质为无烟煤的过程中,每吨煤又可以产生约 240 m^3 的瓦斯。在长期的地质年代里,由于瓦斯的密度小,扩散能力强,地层又具有一定的透气性以及地层的隆起、侵蚀,大部分瓦斯都已逸散到大气中去,只有一小部分至今还被保存在煤体和围岩内。

煤体之所以能保存一定数量的瓦斯,与煤的结构状态密切相关。煤是一种复杂的孔隙介质,有着十分发达的、各种不同直径的孔隙和裂隙,形成了巨大的自由空间和孔隙表面。因此,成煤过程中产生的瓦斯就能以游离状态和吸附状态存在于这些孔隙与裂隙内。

游离状态也叫自由状态,这种状态的瓦斯服从气体状态方程,存在于煤体或围岩的裂缝和孔裂隙内。煤体内游离状态瓦斯量的大

小,决定于贮存空间的体积和瓦斯的压力与温度。

煤矿井下的瓦斯来自煤层和煤系地层,它主要是腐植型有机物质在成煤过程中生成的。在远古时代,由于成煤植物残骸被泥沙和海水淹没,与空气隔绝,在高温高压环境中,在微生物的分解发酵作用下,成煤植物的残骸逐渐转化成泥炭、褐煤、烟煤、无烟煤。与此同时,生成了大量以甲烷为主的烃类气体就是瓦斯。另一种吸附在煤的微孔表面和煤的微粒内部,称为吸附瓦斯。煤层瓦斯含量是指煤层或围岩在自然条件下所含有的瓦斯,单位是 m^3/t 。煤层的煤化程度越高,存贮瓦斯能力越强,即高变质煤比低变质煤瓦斯含量大;有煤层露头时该带内瓦斯含量低,而无煤层露头时瓦斯含量大;煤层随着埋藏深度增大瓦斯含量增大;煤系透气低的岩层(泥岩、细碎屑岩、裂隙不发育的石灰岩等)越厚,占的比重越大煤层瓦斯含量越高;反之,围岩由厚中粗砂岩,甚至是砾岩等组成,其瓦斯含量少;煤层地质构造也影响煤层瓦斯含量。

(2) 矿井瓦斯的涌出

矿井瓦斯的涌出方式可分为均衡涌出和瓦斯的喷出与突出,矿井瓦斯涌出量为均衡涌出的瓦斯。

① 瓦斯涌出量:绝对瓦斯涌出量为单位时间内涌出的瓦斯量,单位是 m^3/min 或 m^3/d ;相对(吨煤)瓦斯涌出量为每采 1 t 煤平均涌出的瓦斯量,单位是 m^3/t 。

$$q_{\text{绝}} = Q \times C \times 60 \times 24$$

$$q_{\text{相}} = q_{\text{绝}} / A$$

式中 $q_{\text{绝}}$ ——绝对瓦斯涌出量, m^3/d ;

Q ——矿井总回风巷风量, m^3/min ;

C ——矿井总回风巷的平均瓦斯浓度, %;

$q_{\text{相}}$ ——相对瓦斯涌出量, m^3/t ;

A ——矿井平均日产量, t。

② 矿井瓦斯等级划分。一个矿井中只要有一个煤(岩)层发现瓦斯,该矿井即定为瓦斯矿井。瓦斯矿井必须依照矿井瓦斯等级进

行管理。

根据矿井相对瓦斯涌出量、矿井绝对瓦斯涌出量不同,矿井瓦斯等级划分为:

低瓦斯矿井:矿井相对瓦斯涌出量小于或等于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 且矿井绝对瓦斯涌出量小于或等于 $40 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

高瓦斯矿井:矿井相对瓦斯涌出量大于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 或矿井绝对瓦斯涌出量大于 $40 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

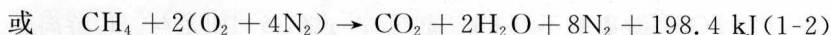
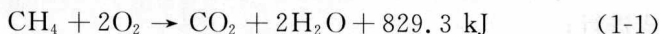
煤(岩)与瓦斯(二氧化碳)突出矿井。

每年必须对矿井进行瓦斯等级和二氧化碳涌出量的鉴定工作,报省(自治区、直辖市)负责煤炭行业管理的部门审批,并报省级煤矿安全监察机构备案。

新矿井设计文件中,应有各煤层的瓦斯含量资料。

2. 瓦斯爆炸的反应过程

就本质而言,瓦斯爆炸是一定浓度的甲烷和空气中的氧气在一定温度作用下产生的激烈氧化反应,其化学反应式如下:



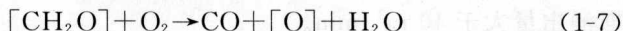
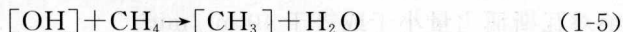
瓦斯爆炸是一个复杂的化学反应过程,上式只是反应的最终结果。

近年来的研究确定,矿井瓦斯爆炸是一种热—链式反应(也叫链锁反应)。当爆炸混合物吸收一定能量(通常是引火源给予的能量)后,反应分子的链即行断裂,离解成两个或两个以上的游离基(也叫自由基)。这类游离基具有很大的化学活性,成为反应连续进行的活化中心。在适合的条件下,每一个游离基又可以进一步分解,再产生2个或2个以上的游离基。这样循环不已,游离基愈来愈多,化学反应速度也愈来愈快,最后就可以发展为燃烧或爆炸式的氧化反应。对于甲烷爆炸的中间反应过程,已经提出了几种不同的反应方式。其中之一认为, CH_4 吸收能量后分解成 $[\text{CH}_3]$ 和 $[\text{H}]$ 两个游离基。 $[\text{CH}_3]$ 、 $[\text{H}]$ 又分别与 O_2 反应,各自生成新的游离基 $[\text{CH}_2\text{O}]$ 、

[OH]和[OH]、[O]:



这些游离基又能进一步反应:



这样迅速发展下去,反应就会以极其猛烈的爆炸形式表现出来,它的最终产物则是 CO_2 和 H_2O [式(1-1)]。如果氧气不足,反应不完全,也能产生 CO 。采用现代的检查方法,在甲烷的爆焰内检查到了[O]、[OH]、[CH₃]、[CH₂O]等游离基的大量存在,从而证实了热—链式理论的正确。

在下列条件下,链反应中断,就不会发展为瓦斯的燃烧或爆炸:

(1) 混合物中的氧气浓度不够,反应不能按式(1-3)与式(1-4)式进行;

(2) [OH]游离基不与 CH_4 起反应[式(1-5)]而是与[H]游离基结合生成 H_2O [$[\text{OH}] + [\text{H}] \rightarrow \text{H}_2\text{O}$];

(3) 活化中心与固体表面(或粒子)碰撞,失去其活化能;

(4) 混合物中加入足够数量能与活化中心起反应的某些元素(如卤族元素),这类元素很容易与活化中心结合生成活性很小的根或分子。

由式(1-2)可知,要使1个体积的甲烷完全反应,必须具有10个体积的(氧浓度为20%)空气,所以在矿井条件下,瓦斯爆炸的最完全反应是在甲烷浓度为9.1%时。

$$[1/(1+2 \times 100/20))] \times 100\% = 9.1\%$$

如果是在新鲜空气(氧浓度21%)中,则甲烷浓度应为9.5%即 $[1/(1+2 \times 100/21))] \times 100\% = 9.5\%$;但是,根据实验,瓦斯最易引火的浓度则为7%~8%。

爆炸温度——研究人员在瓦斯浓度为 9.5% 条件下测定过爆炸时的瞬时温度,在自由空间内可达 1 850 °C,在封闭空间内最高可达 2 650 °C。井下巷道呈半封闭状态,其爆炸温度将在 1 850 °C 与 2 650 °C 之间。

爆炸压力——由于爆炸时气体温度骤然升高,必然引起气体压力的突然增大。在容积固定的条件下,爆炸后的气体压力可用下式计算:

$$p_1 = p_0 (273 + t_1) / (273 + t_0) \quad (1-9)$$

式中 p_0, t_0 ——爆炸前混合气体的压力(Pa)与温度(°C);

p_1, t_1 ——爆炸后混合气体的压力(Pa)与温度(°C)。

假使爆炸前 $p_0 = 1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$), $t_0 = 15 \text{ °C}$, 爆炸后的温度 $t_{1\text{封闭}} = 2\,650 \text{ °C}$ 和 $t_{1\text{自由}} = 1\,850 \text{ °C}$, 分别代入式(1-9), 则可求出爆炸后的气体压力分别为 10.1 atm 和 7.4 atm, 其平均值约为 9 atm, 即在理想的条件下爆炸后的压力约为爆炸前的 9 倍。事实上, 爆炸压力不可能这样高。但当发生瓦斯连续爆炸时, 其第二次爆炸的初始压力有时会高出正常大气压, 这就会越爆越猛, 出现很高的冲击压力。

3. 瓦斯爆炸的条件及其影响因素

瓦斯爆炸必须具备三个条件: 一定浓度的甲烷、一定温度的引火源和足够的氧。

(1) 瓦斯浓度

根据上述热—链式反应的理论, 一定浓度的瓦斯吸收足够的热能后, 就将分解出大量的活化中心, 完成整个氧化反应过程, 并放出一定的热量(每摩尔甲烷完全氧化时, 能放出 51.8 kJ 的热量)。如果生成的热量超过周围介质的吸热和散热能力, 而混合物又有足够的 CH_4 和 O_2 存在, 那么在此条件下, 就会生成更多的活化中心, 使氧化过程迅猛发展成为爆炸; 若参与反应的瓦斯浓度不够, 氧化生成的热量与分解的活化中心都不足, 则这一反应不能发展成为爆炸; 假若瓦斯的浓度过高, 相对来说氧的浓度就不够, 不但不能生成足够的

活化中心,而且因为甲烷的热容量较大(约为空气的 2.5 倍),氧化生成的热量为周围介质所吸收,当然也不会发展成为爆炸。因此,瓦斯爆炸具有一定的浓度范围,其临界值即为瓦斯爆炸界限,其最低浓度界限叫爆炸下限,最高浓度界限叫爆炸上限。在新鲜空气中,瓦斯爆炸界限一般为 5%~16%,5%为下限,16%为上限。

由式(1-2)可知,在新鲜空气中含有甲烷 9.5%时,遇有火源,混合气体中的全部氧和瓦斯都参与反应,这是形成瓦斯爆炸的最适宜条件。

(2) 着火源

瓦斯爆炸的第二个条件是高温火源的存在。点燃瓦斯所需的最低温度叫引火温度。瓦斯的引火温度一般认为是 650℃~750℃。明火、煤炭自燃、电气火花、赤热的金属表面、吸烟、甚至撞击或摩擦产生的火花等煤矿井下所能遇到的绝大多数火源都足以引燃瓦斯。

煤矿井下可能存在的着火源及温度如下:

① 冲击波的速度大于 1 250~1 350 m/s,其前沿后面的温度大于 500℃。

② 瓦斯和煤尘爆炸火焰前沿的温度达 2 000℃~2 500℃。

③ 炸药爆炸产物的温度为 4 500℃。

④ 电弧、电火花的平均温度为 4 000℃(放电主通道的温度 10 000℃)。

⑤ 火柴的明火温度 1 200℃。

⑥ 点燃香烟温度 600℃~800℃。

由于瓦斯爆炸热—链式反应时,大量活化中心的产生与形成需要一定的时间过程,达到爆炸浓度的瓦斯遇到高温火源时并不能立即发生爆炸。这种需要延迟一个很短时间才爆炸的现象称为引火延迟现象,其引火延迟时间称为感应期(或诱导期)。感应期的长短与瓦斯浓度、引火温度及压力有关。表 1-1 为实验室条件下测得的感应期。