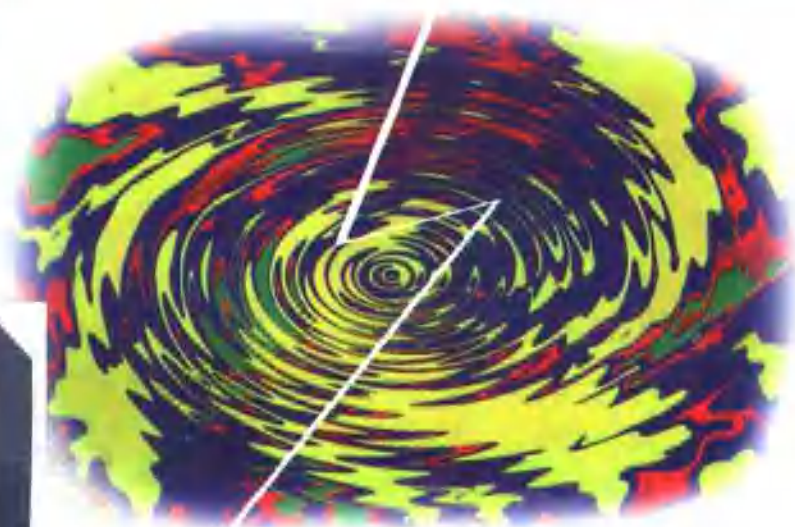


快速断电安全技术

王彦文 著



煤炭工业出版社

快速断电安全技术

王彦文 著

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

快速断电安全技术/王彦文著 [北京:煤炭工业出版社, 1996]

ISBN 7-5020-1411-X

I. 快… II. 王… III. 电力系统-断电事故-继电保护-安全技术 IV. TM771

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 25064 号

· 1 ·

快速断电安全技术

王彦文 著

责任编辑:姜庆乐

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京安定门外和平里北街 21 号)

北京密云春雷印刷厂 印刷

*

开本 787 × 1092mm¹/₃₂ 印张 4¹/₄ 插页 1

字数 102 千字 印数 1—860

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

书号 4180 定价 6.90 元

前 言

据不完全统计，在煤矿的瓦斯、煤尘爆炸事故中，由电火引起的占45%左右。电火仍是煤矿井下的主要点火源之一。因此，防止电火外露，实现包括电缆在内的“全方位”防爆是煤矿安全的基本任务，也是矿井供电安全水平的重要标志。

针对煤矿井下的特殊工作环境，为了提高煤矿供电的安全性，50年代初提出了“快速断电”这一课题。但直到70年代末、80年代初，“快速断电”才成为切实可行的安全技术。前苏联、德国、波兰和我国都进行了“快速断电”的实用性研究，并取得了可喜的成果，部分产品已得到了应用。为了帮助从事矿井供电安全专业的科技人员对“快速断电安全技术”有一个完整的了解，推广其应用，特编写此书。

本书共分七章。第一章介绍了煤矿用电的特殊性以及快速断电安全技术的发展过程；第二章分析了现有煤矿电气安全技术的原理，功能及局限性；第三章介绍了快速断电安全技术的几个基本概念及故障形成时间的测定方法；第四章专门讨论了漏电保护的有关问题；第五章分析了快速短路保护的有关理论和参数优化问题；第六章介绍了快速断电无触点开关的通、断机理及有关计算公式；第七章介绍了两种快速断电安全技术的新产品——移动变电站和煤电钻综合保护装置。

在本书的编写过程中，得到了张丙军教授、胡天禄教

授，周伯寅高级工程师的热情指导和大力支持；在书稿整理过程中，得到了王素锋同志的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

1996年11月20日

目 录

第一章 概论	1
一、恶劣的环境条件	1
二、特殊的工作条件	3
三、煤矿井下使用电能的危险性	3
四、煤矿井下安全用电回顾	5
五、快速断电——供电系统的综合防火防爆安全措施	6
第二章 矿井电气安全技术	10
一、电气防爆技术	10
二、本质安全电路	18
三、漏电保护	19
四、其它保护切断技术	24
第三章 快速断电安全技术	25
一、定义与概念	25
二、低压橡套电缆的故障形成时间	27
三、快速断电供电系统的整体防火防爆安全性	33
第四章 快速漏电保护技术	38
一、人身触电电流的瞬态分析	38
二、漏电保护取样分析	46
三、快速漏电保护取样器的最佳参数	68
四、快速漏电保护装置	78
五、小结	79
第五章 快速短路保护	81

一、概述	81
二、短路电流暂态分析	82
三、电动机起动电流的暂态分析	90
四、快速短路保护的取样	93
五、快速短路保护取样技术	106
六、小结	112
第六章 快速断电半导体中性点开关	114
一、电力电子技术及其在煤矿井下的应用	114
二、中性点开关的通态电流	119
三、半导体中性点开关的关断过程	121
四、半导体中性点开关的散热问题	128
五、小结	130
第七章 快速断电开关装置	132
一、KSGBY-100/6 矿用隔爆型快速断电移动变电站	132
二、KZB-2.5/660 矿用隔爆型快速断电煤电钻变压器 综合保护装置	139
主要参考文献	143

第一章 概 论

众所周知，井工开采的煤矿，时刻受着水、火、瓦斯的威胁，伤亡事故的发生率比任何工业部门都高。根据全国煤矿 3 人以上重大事故的调查分析，顶板事故居第一位，占死亡人数的 37%；爆炸事故居第二位，占死亡人数的 20%；提升事故居第三位，占死亡人数的 20%；机电事故居第四位，占死亡人数的 8%；其它是火灾（4%）、放炮事故（4%）、水灾（3.8）等。瓦斯一直是煤矿安全生产的大敌，世界各主要产煤国都在为防治瓦斯事故投入巨大的人力、物力、财力，但是重大瓦斯爆炸等恶性事故仍不断发生。瓦斯爆炸事故，一次死亡人数多，所造成的经济损失严重，不仅影响着煤炭工业的形象，而且给工人家庭带来很大的痛苦。从爆炸事故的统计资料可以看出，造成人员重大伤亡的瓦斯、煤尘爆炸次数是相当多的，在足够长的一段时间内，年爆炸次数接近常数。造成以上情况的主要原因是煤矿井下的环境条件和生产条件都十分恶劣。

电能的广泛应用，标志着采掘工业的发展。然而，由于煤矿井下环境条件和生产条件的特殊性，矿井安全用电遇到了极大的困难。

一、恶劣的环境条件

矿井采掘工作的基本形式是井下巷道作业。矿井大气靠人工通风提供，有可燃、易爆性介质；有自然涌水；有煤体自然发火的威胁；人、货、料靠提升设备升降。其特殊性大

致如下：

1. 矿井大气中有可燃、易爆炸性介质

在煤的形成过程中，一些有机物在高温高压的作用下形成了多种气体。这些气体的主要成分是甲烷（ CH_4 ）及其它高碳烃物（如丙烷、丙烯）等，统称瓦斯。因此，随着采掘切割作业的进行，煤层和半煤岩层的瓦斯会自然涌出、喷出或大规模地与煤（岩）突出。甲烷气体无色无味，对空气的比重为 0.554，所以容易分层，在采空区顶板处浓度最高。在采掘过程中，还会有煤尘飞扬。

甲烷、煤尘及其它高碳烃类在矿井大气中的含量达一定值后，就具有爆炸危险性。甲烷及其它高碳烃类在常温常压下均呈气态，所以称它们与空气的混合物为爆炸性气体混合物。

我国的煤矿 98% 为井工开采，大多数矿井属瓦斯矿，三分之二为高瓦斯矿，一半以上有瓦斯突出危险。

2. 有自然发火危险，温度高、湿度大

我国多数矿井有煤自然发火的危险。由于开采水平的延伸和火区的存在，巷道、硐室和工作面的温度升高，一般为 $25 \sim 40^\circ\text{C}$ ，四季昼夜变化不大。

由于有井下涌水，所以顶板有淋水，空气的相对湿度高，一般为 95%，高者达 100%。

3. 恶劣的地质条件

人工开凿的巷道空间狭小，人工照明条件不好，并且经常会发生冒顶、片帮等顶板事故；顶板淋水有酸性的和碱性的，有霉菌；不能及时排出的自然涌水会淹井；爆破工艺会造成强烈的冲击震动。电气设备会受到各种自然条件的破坏。

二、特殊的工作条件

采掘工作面是地下的移动车间。随着采掘工作面的推移，井下电网和电气设备必须不断地移动和搬迁。带电的电缆要经常地在巷道和工作面被拖曳。

由于地质条件的变化，煤（岩）硬度是不均匀的，回采过程中经常会遇到夹石和硫磺包以及断层和褶曲。采掘机械经常有冲击负荷，而且常常需要重载密接通断。

三、煤矿井下使用电能的安全性

除矿井停电会造成停风、有害气体积聚；停止排水淹井；停止提升，受灾人员不能升井，救灾人员不能下井，造成矿毁人亡的恶性事故外，煤矿井下使用电能的最大危害是故障电流的危险性。冒顶、片帮会砸伤电缆和电气设备，在照明不足的狭窄巷道中运动的矿车和采掘机械也会使电缆受到损伤，尤其是在炮采工作面，爆破也经常使软电缆受到创伤，受伤的电缆或造成漏电，或形成短路故障，如不及时切除，会造成人身触电，或引起电火灾，更甚者是电火花外露，引起瓦斯、煤尘爆炸事故。从煤矿井下开始使用电能至今，电火花仍是矿井电火灾和爆炸事故的主要点火源。

1. 人身触电事故

在煤矿井下潮湿的环境中，尤其是被采掘机械拖曳的软电缆，最容易被各种机械损伤，因此漏电事故十分频繁，有的工作面甚至平均每班发生 1~2 次漏电故障。仅统配煤矿不完全统计，每年因漏电影响生产在 90 万 t 以上。近年来由于坚持使用漏电保护装置，井下交流电网触电死亡事故已明显减少，但尚未彻底杜绝。直流架线电网由于没有漏电保护措施，每年触电死亡人数约 30~50 人。漏电事故不仅可造成人身触电伤亡事故，其放电火花还是爆炸事故的点火源。

2. 电机、电缆大量烧毁

由于采掘机械经常是在重载的条件下频繁起动,过载、堵转不断发生,继电保护很难与之配合,因此,采掘机械的驱动电动机经常烧毁。就全国统配煤矿不完全统计,平均每年烧毁电动机 15000 台左右,折合总功率约 4500MW 左右,大约每采百万吨煤炭将烧毁电动机 50 台,合 1500kW。此外,电缆着火不断发生,并大量烧毁。统配煤矿平均每年发生 400~600 次电缆着火事故。据不完全统计,每采万吨煤炭将消耗 16mm² 以下电缆 10m,按年产 5 亿吨煤炭统计,一年将消耗 500km 电缆。煤炭工业是我国电缆的第一大用户。

3. 煤矿井下的外因火灾主要是电火灾

1970~1981 年间所统计的 30 次重大火灾事故中,电火灾 8 次死亡人数占总死亡人数的 57%。1983~1986 年间煤矿发生 112 起重大火灾事故,其中外因火灾 60 起,占 53.6%,而电气设备引起的外因火灾 41 起,占 72%。1987~1988 年共发生重大火灾事故 4 起,死亡 40 人,重伤 2 人,其中由电气开关、变压器、电缆着火引起的 3 起,死亡 37 人。1970 年河南新密王庄矿,电缆短路着火,致使一百多人中毒,死亡 96 人。

4. 电火是矿井爆炸事故的主要点火源

世界采矿史上最大的一次爆炸事故发生在南满时期,1942 年本溪矿,一次死亡一千五百多人,爆炸的点火源是电线短路电弧。

50 年代山西阳泉老白洞矿的爆炸事故,一次死亡五百多人。80 年代初在平顶山发生的一起电缆引爆事故中有 300 人丧生。1988 年 12 月 9 日安徽淮南潘一矿发生瓦斯爆炸事故,死亡 45 人。1988 年 5 月 29 日山西霍县矿务局圣佛矿掘进头

由于电钻开关失爆引起瓦斯爆炸事故,死亡 50 人。1993 年 4 月沈阳矿务局林盛矿发生瓦斯爆炸事故,当即死亡 23 人。

根据 1970~1981 年全国煤矿调查统计,在 255 次重大爆炸事故中,电火引爆 115 次,占 45%;1983~1986 年间共发生瓦斯爆炸事故 49 起,煤尘爆炸事故 7 起,其中电气火花引爆 24 次,占 49%;1987~1988 年间共发生瓦斯爆炸事故 22 起,电火花引爆 10 起,占 45.4%,死亡人数占 58%。

四、煤矿井下安全用电回顾

在矿井中使用电能存在着一系列的危险:人身触电、火灾、外露电弧、瓦斯煤尘爆炸等。为了保证安全生产,在开采有煤与瓦斯突出危险的急倾斜煤层的矿井采掘工作面上,只好使用安全的压气能,这显然不能适应现代化煤炭工业发展的要求。因此必须制订保证人身、设备和矿井安全的有效措施,使电能煤炭生产中发挥应有的作用。

为了在煤矿井下安全使用电能,从本世纪初至 30 年代,德国、前苏联和英国等先后开展了矿井电气安全的研究工作,在电气防爆技术、人身触电安全技术(漏电保护与保护接地)、电气设备短路保护、屏蔽电缆、瓦斯超限自动断电等方面作了坚持不懈的努力。

1903~1905 年,拜林(Belling)根据德国采矿工业企业提出的课题,在矿山电气设备防爆措施的研制方面首次进行了系统化研究。他在一批试验研究中指出,利用宽 25mm 的法兰之间的间隙可以把矿井气体的爆炸限制在壳体内部。

1915 年英国人 H. 戴维发明了安全火灯,利用金属网作“隔爆外壳”。

1920~1938 年经易尔斯利(Jlsley)、刘易斯(B.Lewis)等人的研究,完善了间隙隔爆理论。

1928~1930年哈尔科夫机电厂(ФЭМЗ)第一次研制了УТ型防爆电动机。

1932年ФЭМЗ第一次研制了ПБГ型防爆手动起动器。

1934年ФЭМЗ开始生产ПМВ型磁力起动器。

本世纪初,英国学者提出通过限制电气参数,控制电路放电火花能量,达到安全用电的设想,并将本质安全技术首先用于井下信号系统。从50年代开始,英国、前苏联和德国从本质安全防爆理论发展到本质安全型电气设备的实际应用。

30年代至60年代,隔爆型、本质安全型电气设备在煤矿井下逐步得到了广泛应用。在此期间,矿井电网保护接地技术、漏电保护技术、屏蔽电缆技术均成功地在煤矿井下得到了推广应用。

60至70年代,英、德、前苏联及我国又相继研制开发了瓦斯超限断电保护装置。

但是,从50年代初,前苏联和德国的矿井电气安全研究人员就已发现,采用隔爆外壳、本质安全电路、漏电保护、屏蔽电缆、瓦斯断电保护和保护接地等安全措施,不能杜绝电火引爆事故的发生,设备的“点”式防爆,不能解决供电系统的整体防火、防爆问题。

五、快速断电——供电系统的综合防火防爆安全措施

1952年前苏联斯柯钦斯基矿业研究所的H.X.什士金教授和苏联科学院通讯院士A.B.道古金承担了在有爆炸危险介质的条件下,建立防火防爆安全供电系统的课题。他们第一次提出了用专用的装置使供电系统超快速断电或隔绝电缆故障点的能源供应,实现在供电系统电明火外露之前快速断电的设想。实践证明,在50至60年代提出这一课题超越

了时代。实现这一设想的外部条件，直至近年来才成熟，因为进入 80 年代现代电力半导体技术才提供了研制快速断电供电系统的条件。目前，快速断电安全技术已形成了一专门的学科，并已获得国际的承认。

50 年代前苏联的马凯耶夫采矿工业劳动安全科学研究所的一级研究员舒绵柯进行了超前断电安全时间的试验研究工作。他们认为在煤矿井下电缆受机械创伤有 47% 是被冒顶砸伤，因此首先在爆炸实验槽中进行了 2m 高度重物自由落体破坏带电电缆的试验，所得结论为：（在电缆内部）不使漏电火花形成的超前时间为 1ms。他们还认为，有 22.5% 的电缆创伤是受尖锐物刺伤的。之后，又进行了尖锐物快速创伤电缆的试验研究。在研究过程中发现，采用 PY-2 型漏电继电器和 AΦB-1322 作保护切断装置，不能完成安全时间的试验，因为 AΦB 的固有动作时间为 30~40ms。为此，他们研制了一个快速断电装置，用雷管作快速动作机构，将开关炸开。试验得出，引燃概率 $P=0.5$ 的超前断电时间如下：

尖锐物的破坏速度 (m/s)	超前断电时间 (ms)
14.5	5.5
8.0	7.0
3.3	~11.0
1.3	12.0

从以上的试验可以得出两个推论：一是证实了当时尚不具备开展超前断电技术开发研究的条件；二是以雷管作开关执行机构所进行的试验数据的可信度不高，尽管使用外推法获得了引燃概率 $P=f(t_0)$ 的关系曲线（一直到 10^{-6} ），但

因方法和基础数据不精确，尚不能作为科学依据。

60年代至70年代，前苏联东方煤炭工业安全研究所和马凯耶夫煤炭工业安全研究所，分别完善了试验装置，开展了矿井电网的故障形成时间和超前断电系统防爆安全性的研究工作，在矿井低压供电系统故障形成时间（从发生漏电或短路故障至电火花外露引燃甲烷—空气混合物的时间）方面作了大量的实验研究工作，得出了最小故障形成时间为5ms的结论。至1974年，斯柯琴斯基矿业研究所和全苏防爆电器研制中心与库兹巴斯电机厂一起研制了АБК-2.5快速无触点开关的样机，在斯柯钦斯基矿业研究所H.Φ.什士金教授的主持下进行了具有超前断电功能的供电系统防爆性的试验研究，研究得出：矿井低压供电系统的最小故障形成时间为5ms；当断电时间为2.5ms时，系统的防爆水平为引燃概率 $P \leq 10^{-3}$ ，即相当于隔爆型电气设备的安全水平。

近年来，随着大功率半导体器件的发展，才使快速断电安全技术进入了工业应用的开发研制阶段。1977~1979年，АБК-2.5快速无触点开关在有瓦斯突出危险的顿巴斯中部矿区等局、矿开始得到了推广应用，成功地防止了多次爆炸事故，取得了良好的社会和经济效益。70年代末至80年代初，斯柯琴斯基矿业研究所全苏防爆电器研制中心与顿巴斯自动开关厂等协作，生产了АБК-250快速自动馈电开关及ПМ-1电动机短接器等配套产品。这两种开关的全断电时间均为3.5ms。之后又研制了ТЧМ-160超前断电移动变电站。

原西德在60年代至70年代期间主要研究电弧短路对隔爆外壳的破坏性，后来又研究了电缆引爆瓦斯的故障形成时间。至1987年，他们研制的SS-1000快速断电开关的固有

分断时间为 1ms (不包括故障取样时间), 额定电压 1000V, 额定电流 400A, 但至今尚未见在煤矿井下工业应用的文献报导。

1977 年波兰的艾玛格 (EMG) 高瓦尔斯基 (Kowalski Zbigniew) 研制了中性点绝缘系统超快速断开中性点的电路, 其固有动作时间为 1ms。

我国自 80 年代初开始从事快速断电安全技术的研究工作, 经过“七·五”科技攻关, 试验研究了矿用低压橡套电缆受机械创伤故障形成时间, 并先后研制成功了三种快速断电开关装置, 它们是: KSZB - 400/1140 真空馈电开关、KZB1 - 2.5 煤电钻变压器综合保护装置、KSCBY - 100/6 移动变电站, 其断电时间均小于 3.5ms。然而, 在这一新的矿井电气安全学科分支中还存在着大量的研究课题, 很多技术关键尚未得到系统的理论性阐述, 有些分布参数、随机变量对快速断电时间指标的影响还不能消除, 大功率半导体无触点开关的通断机理仍未得到清晰透彻的理论分析。本书将较全面地论述快速断电安全技术的基本原理、关键技术、参数优化以及某些具体措施的实施, 以期达到为指导实际研制工作、技术推广工作提供理论依据的目的。

第二章 矿井电气安全技术

矿井电气安全技术包括：保护接地及接地系统连续性监视技术，难燃屏蔽电缆及电缆芯线监视保护技术，电气防爆技术，漏电保护技术，过流保护技术，瓦斯断电保护技术及近年来新兴的快速断电安全技术等。本章将综述电气防爆技术、漏电保护、瓦斯断电保护的原理、应用和安全水平。

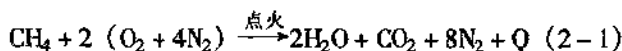
一、电气防爆技术

电气防爆技术包括隔爆外壳、本质安全电路、增安型防爆外壳、正压型防爆外壳、充气（惰性气体）和充砂型等各种型式的防护技术。电气防爆技术的广泛应用，为在有爆炸危险性环境中安全使用电能提供了实用且较为可靠的安全技术措施。下面将着重讨论隔爆外壳—间隙隔爆技术。

1. 矿井瓦斯和煤尘的爆炸

甲烷氧化有三种形式：分子燃烧、燃烧和爆炸。爆炸是燃烧的一种高速反应形式。

当甲烷空气混合物中的甲烷达到一定浓度时，在足够能量的火源作用下即发生爆炸。一般这种反应可用方程式表示



上式是甲烷空气混合物在火源的作用下，完全反应的方程式。等式的左边为初始混合物，右边为反应生成物和反应放出的热量。混合物中空气的近似组成为 $(\text{O}_2 + 4\text{N}_2)$ 。从式中可以看出，为了使 1g 分子的甲烷完全反应，需要 2g 分子