

采煤综合机械化技术丛书

综采电气设备

于慕松 胡天禄 孙树朴 万伟太 兰献辰 编

煤炭工业出版社

采煤综合机械化技术丛书

综采电气设备

于慕松 胡天禄 孙树朴 万伟太 兰献辰 编

6x14 67

煤炭工业出版社

B 566314

内 容 提 要

本书主要介绍综采工作面的供电系统、煤矿井下低压电网的安全技术和电气保护装置的基本原理,详细介绍了目前我国采用的综采工作面的电气装备及生产机械的控制、信号和通信系统。

本书为煤炭系统综采工程师培训教材,亦可供高等院校综采机电专业学生及有关技术人员参考。

责任编辑:李淑琴

采煤综合机械化技术丛书

综 采 电 气 设 备

于慕松 胡天禄 孙树朴 万伟太 兰献辰 编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092\text{mm}^1/16$ 印张 28 插页 7

字数 674 千字 印数 1—6,400

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

ISBN7-5020-0013-5/TD·15

书号 2927

定价 6.80元

前 言

采煤综合机械化,是加速我国煤炭工业发展,大幅度提高劳动生产率,实现煤炭工业现代化的一项战略措施。综合机械化采煤不仅产量大、效率高、成本低,而且能减轻笨重的体力劳动,改善作业环境,是煤炭工业技术的发展方向。我国综采技术日趋成熟,生产水平、工艺水平已进入世界先进行列。

为了进一步提高我国煤炭综合机械化生产的技术和管理水平,满足从事综采工作的广大现场工程技术人员和各院校机械化专业的需要,煤炭部生产司委托部采掘综合机械化技术研究培训中心和中国矿业学院组织编写了一套《采煤综合机械化技术丛书》。丛书包括:《矿用电子技术》、《综采电气设备》、《煤矿机械液力传动》、《煤矿机械液压传动》、《采煤机》、《液压支架》、《综采输送机》和《采煤方法》共八册,将陆续出版。这套丛书的编委对丛书进行了认真的审阅。

本丛书以介绍综合机械化采煤设备为主,并加强了技术基础理论知识的叙述。这套丛书可以作为综采工程师的培训教材和大专院校机械化专业的参考书,也可供具有中专以上文化程度的煤矿职工自学使用。

本书第一章和第五章由于慕松编写;第二章由胡天禄编写;第三章由孙树朴编写;第四章由万伟太编写;第六章由兰献辰编写。全书由于慕松统稿。

在本书的编写和试用过程中,曾得到吴震春教授和朱建铭教授的热情帮助和指教,有的章节还经他们亲自审查修改,在此表示由衷的感谢。

参加本书审查工作的还有尤家炽、钱罗里等同志。本书在编写过程中曾得到有关厂、矿和院、所的大力支持。煤炭部北京综采培训中心举办的局、矿级机电总工程师和机电工程师培训班的学员对本书经过试用并提出了宝贵意见,在此谨致谢意。

限于编者水平,本书错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 综采工作面供电系统及设备布置	1
第一节 概述	1
第二节 采区供电系统及机电设备布置	2
第二章 井下电网的漏电保护	10
第一节 触电的危险及其预防方法	10
第二节 井下变压器中性点接地方式的分析	12
第三节 漏电保护原理	40
第四节 漏电保护装置	52
第五节 矿井低压电网对地绝缘电阻值和电容值的测量	99
第三章 井下供电系统的过电流保护	105
第一节 井下供电系统的正常运行状态	105
第二节 井下电网短路电流计算	128
第三节 电流保护的基本原理	135
第四节 低压熔断器和电磁式过电流继电器	139
第五节 双金属片热继电器和限流热继电器	146
第六节 电子过电流保护装置	151
第七节 井下供电系统电子电流保护装置实用举例	169
第八节 井下低压供电系统电流保护的选择和整定	203
第四章 综采工作面电气设备	209
第一节 矿用防爆电气设备的类型及其防爆原理	209
第二节 隔爆型高压配电装置	218
第三节 移动变电站	237
第四节 隔爆型自动馈电开关	261
第五节 隔爆型磁力起动器	279
第六节 电钻及照明变压器组合装置	324
第七节 矿用电缆	334
第五章 采煤机的电气控制系统	363
第一节 EDW-300-L型采煤机	363
第二节 采煤机的功率自动调节装置	383
第三节 电牵引采煤机的控制原理	393
第六章 信号及通讯系统	405
第一节 WL-20型通讯设备	405
第二节 “塞瓦德”系统	411

第一章 综采工作面供电系统及设备布置

第一节 概 述

随着煤炭工业的高速度发展,采煤工作面综合机械化程度迅速提高,机电设备的单机容量和总容量随之增大,以采煤机和工作面运输机为例:采煤机在70年代初期约为150kW左右,至70年代后期出现了英国的AM-500型(375kW)和联邦德国的EDW-300L型(300kW)、EDW-450L型(450kW)单电机强力采煤机。不久,英国安德逊公司(AM)和联邦德国艾克霍夫公司(EDW)又研制成每台采煤机使用双电动机牵引的方式,制成了AM-500型(375×2kW)和EDW-600L型(300×2kW)采煤机,使单机功率较原先提高了两倍,1980年艾克霍夫公司又把EDW-450L型改为电牵引,制成了总功率达950kW,供电电压为5000伏的目前世界上功率最大的采煤机,预计80年代中后期采煤机的单机功率还将有所增大。随着采煤机功率的加大,工作面输送机的容量也会相应增加。50年代只要求运煤能力200t/h,电动机功率为120kW;60年代上升到200~500t/h,220kW;至70年代就增加到800~1000t/h时,600kW;预计80年代中后期将高达1200~1500t/h,700~900kW。再加上工作面其它设备如乳化液泵站等,使综采面的总容量迅速增加,目前已达2000~3000kW。我们知道,综采工作面一般为长壁工作面,由于推进速度加快,要求采区走向加长,从而使供电距离增大。这些特点,也对采区供电提出了较高的要求,为了解决好这一新的供电问题,一般采取提高供电电压等级和缩短低压供电距离的方法。目前,世界各国都在进行升压的技术改造。我国过去煤炭生产机械化水平很低,长期以来,井下一直采用380V供电系统。60年代中期在380V电压的基础上进行技术改造,逐步使用660V电压供电。70年代我国引进并自制了采煤工作面综合机械化的成套设备,工作面供电系统也相应地发展到千伏级。近年来随着特大型矿井的出现,需要考虑10kV电压的井下供电系统。

但是,采区供电究竟选用多高电压,要根据工作面机电设备的总功率、最大电动机的单机功率和供电距离等因素确定,一般功率越大,供电距离越长,选用的电压也越高。

从下表看出,各国采用的升压方式,大体上是按原来的额定电压增加 $\sqrt{3}$ 或2倍。这种方式便于在两种电压换接过程时期利用 $\Delta\sim Y$ 或串并联的方法设计新旧电压共同使用的

表 1-1-1 八个主要采煤国采区供电电压

国 别	升压前的电压 (V)	升压后的电压 (V)	备 注
英 国	550	1100	550、1100V为应用较广的电压等级
美 国	480、550、1000	1000、2300、4160	美国矿业局批准采用2300、4160V
法 国	500	950、1000	1963年开始使用,1965年推广1000V
联邦德国	500	1000、5000	1964年开始用1000V、1980年试用5000V
苏 联	380、660	660、1140	1975年煤炭部颁发了1140V的使用条例,并推广使用
波 兰	380、500	1000、660	1969年开始采用1000V、1970年已推广
日 本	500	1140、1500	日本电压等级较乱,这里是指综采面
荷 兰	500	865	

设备，有利于对生产矿井逐步进行技术改造。

随着电压升高，采区电气事故引起的煤尘、瓦斯爆炸、电火灾和人身触电及烧毁电气设备的危险性也随之增加。因而对供电系统、漏电系统、控制操作系统和通讯照明系统提出了较高的要求，各种电气设备中都应有较完善的保护装置，一旦发生电气事故，能立即切断电源，防止其它事故的发生和蔓延。

第二节 采区供电系统及机电设备布置

一、概述

综合机械化采煤要求采、装、运、支等生产环节能有机配合，协调动作。要求供电系统安全可靠和减少电能损失。目前，国内外均采用移动变电站的供电方式。它的主要特点是从中央变电所将6kV高压电送到采区变电所，经过配电装置再送到工作面顺槽的移动变电站，经变电站中的干式变压器将高压变为1140V或660V低压后，再经低压馈电开关和配电点的磁力起动器送到各用电设备。

我国千伏级供电系统的主回路和保护装置示意图如图1-2-1所示。

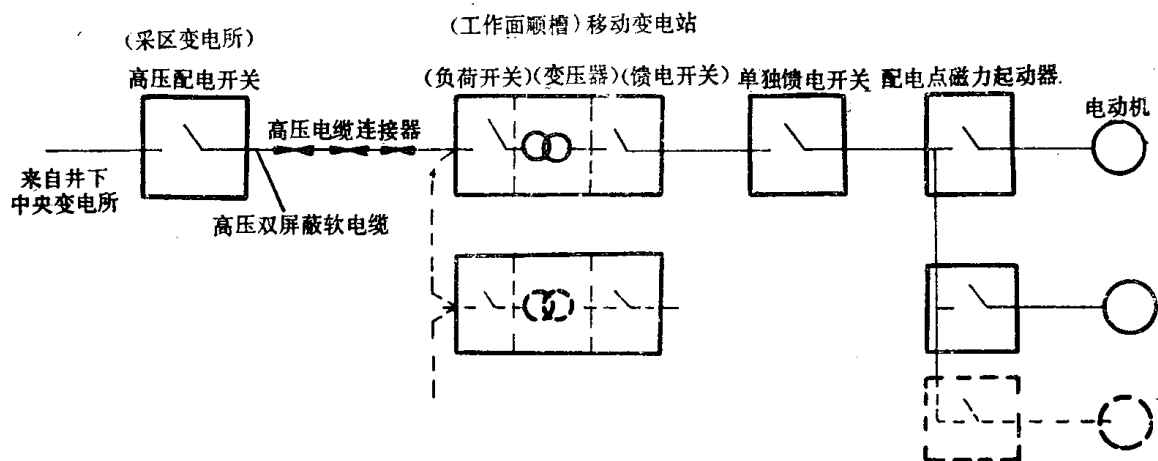


图 1-2-1 千伏级供电系统示意图

（一）6kV高压系统

1. 6kV高压系统的组成

6kV高压系统由高压防爆配电装置、高压双屏蔽软电缆、高压电缆连接器和移动变电站等组成。

2. 技术和保护特性

（1）高压6kV防爆配电开关采用SF₆断路器（或真空断路器），断流容量可达100MVA，分断速度快、性能良好，较油断路器安全。在6kV高压供电范围内发生的短路、漏电、过载和欠压等电气故障均由高压开关实现保护。同时，这些保护装置也是移动变电站二次侧短路故障的后备保护。

（2）6kV供电采用带有监视线的高压双屏蔽电缆。它与高压开关中的漏电监视保护

装置相配合，一旦发生电缆故障就能提前切断电源，防止事故的发生，从而确保6kV高压对采区的供电安全。

(3) 6kV高压供电网络采用插拔式高压电缆连接器，使电缆在移动变电站移动时拆装方便。

(4) 移动变电站由高压负荷开关、干式变压器和低压馈电开关三部分组成。一般采用三位一体的组合结构(苏联、波兰和中国等)，它整体紧凑，下部装有轮子，可以在轨道上行走。移动变电站应尽量设在靠近工作面的地方，通常离工作面50~300m，以缩短低压1140V供电电缆的长度，减小电压损失，提高供电质量。

移动变电站的高压侧还装有高压负荷开关、母线、终端元件及按钮。

移动变电站的电源来自采区变电所。在采区变电所的配电装置内装有漏电监视保护装置。采用“故障——安全”型保护电路。这种电路保证在正常供电时，有一个检测电流通过高压屏蔽电缆的接地线→移动变电站高压侧的终端元件→高压屏蔽电缆的监视线→高压配电装置，使检测电流构成回路，保持晶体管及继电器处于工作状态，随时监视接地线及保护继电器本身的好坏。一旦监视线与地线短接、断线或晶体管线路出现故障，终端元件便失去整流作用，使高压配电开关中的漏电监视装置动作，将继电器释放，开关跳闸，切断移动变电站的电源，以防止隐患扩大甚至造成事故。其示意图见图1-2-2。

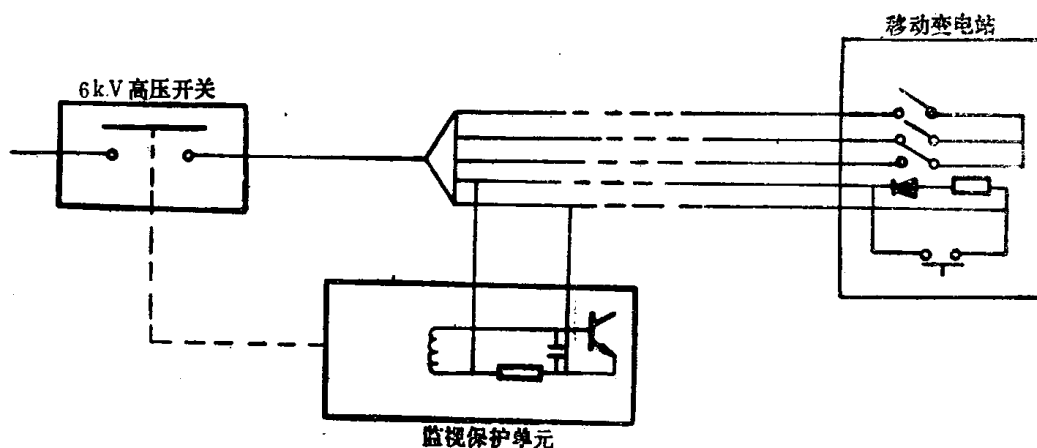


图 1-2-2 高压监视保护示意图

移动变电站的主体为三相变压器，绕组绝缘材料一般为H级，隔爆外壳有散热片，此外，还设有保护绕组过热的温度继电器。

(二) 低压1140V系统

1. 低压1140V系统的组成

移动变电站将6kV变为1140V，低压馈电开关内设漏电、过载、短路保护装置。由移动变电站引出的三相电缆接至自动馈电开关，再由屏蔽橡套电缆接至磁力起动器，馈电给各用电设备。

2. 技术和保护特性

(1) 自动馈电开关和磁力起动器有较高的分断能力，各级开关均装有过流保护装置，通过合理整定，能较好实现采区短路故障的选择性保护和后备保护。从合理保护配合

考虑,要求磁力起动器的动作速度慢于馈电开关,即当短路电流大于馈电开关整定值时,系统短路故障均由馈电开关可靠分断,磁力起动器不分断短路电流,当短路电流小于馈电开关整定值,大于磁力起动器整定值时,磁力起动器能可靠分断,馈电开关不动作。

(2) 自动馈电开关和磁力起动器内设有漏电闭锁单元,在供电线路不漏电的情况下,允许合闸送电,当线路发生漏电时,漏电继电器动作,实行自锁并有漏电故障显示,以防止断路器在线路漏电情况下合闸送电。并根据信号显示寻找漏电故障点,及时进行修复。

(3) 1140 V 供电线路采用分相屏蔽电缆以配合漏电保护装置。一旦电缆漏电就可切断电源。防止短路故障发生和蔓延,确保安全供电。

(4) 采用真空接触器代替原磁力起动器及馈电开关内的空气接触器。它具有体积小(一般比同等级的空气接触器小1/2左右)、寿命长(比空气接触器寿命长3倍以上)、分断能力强、维护方便和安全可靠(因电弧不外泄)等优点。目前国外已有系列产品,并在井下广泛使用。我国经多年研制,已有批量生产。在井下试运行中,效果较好,但还存在操作过电压和真空开关管的慢性漏气等技术问题,需要进一步研究解决。

(5) 磁力起动器的控制回路采用安全火花电路。在这种电路里,无论是正常工作或故障状态下,所产生的电火花能量限制在瓦斯引爆所需要的最小能量以下(国际电工委员会规定为0.5mJ),以确保安全。为了限制电火花能量,这种控制回路的工作电压和电流都很小。因此,目前只用于低压小功率的信号通讯和监测仪表和动力设备的控制回路。

(6) 广泛采用性能良好的电子保护。它具有重量轻、体积小、动作迅速可靠和调整范围广等优点,但线路复杂,要求维修水平高。

二、供电系统及设备布置

由于用电设备的功率较大,综采工作面一般都采用移动变电站供电。目前,有两种布置供电和供液设备的方式。一是在采区下顺槽运输巷内,在可伸缩胶带输送机一侧敷设一条专供移动变电站及工作面配电点和乳化液泵站等设备装置的平车移动轨道,随着工作面推进,供电、供液装置移动很方便,可以减少电缆压降损失和液压沿程损失。但这种方式要求巷道断面宽,支护成本高,其示意图如图1-2-3所示。

另一种是将移动变电站、工作面配电点及泵站均设置在单独的辅助巷道内,每隔一定距离用横川与运输巷相连。这种供电供液方式的巷道截面小,支护成本低,但须多掘一条设备巷和若干横川,并且增加了煤柱损失,供电供液设备的移动也不如第一种方案,其示意图如图1-2-4所示。

还有一种是把供电、供液设备安装在距工作面较远的峒室内,不随工作面推进而经常移动。这种方式适合于顶板比较破碎、压力较大、巷道维护困难的一些综采面,由于减小了巷道截面(与第一种方式相比)和巷道开拓量小(与第二种方式相比),具有投资少、维护方便的优点,但供电、供液的距离远,电缆压降损失和液压沿程损失均较大,其示意图如图1-2-5所示。

上述几种综采面供电、供液设备布置方式各有其优缺点,在设计时必须根据现场地质条件,进行技术经济比较,以选择最优方案。

现列举两种典型综采面的供电系统及设备布置实例。

1. MK-Ⅱ型采煤机工作面的供电系统及设备布置(图1-2-6)

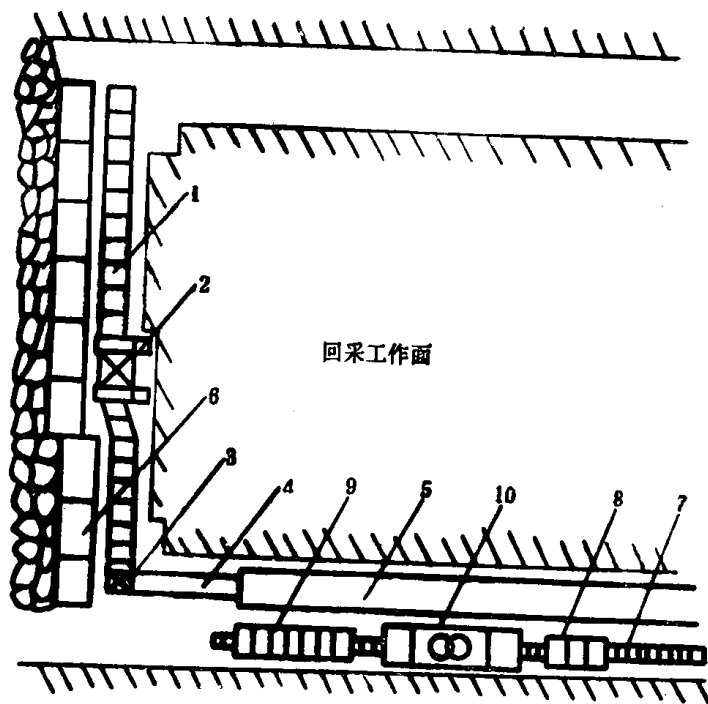


图 1-2-3 综采工作面设备布置

1—输送机；2—采煤机；3—破碎机；4—转载机；5—胶带输送机；6—液压支架；7—轨道；8—乳化液泵站；9—配电开关；10—移动变电站

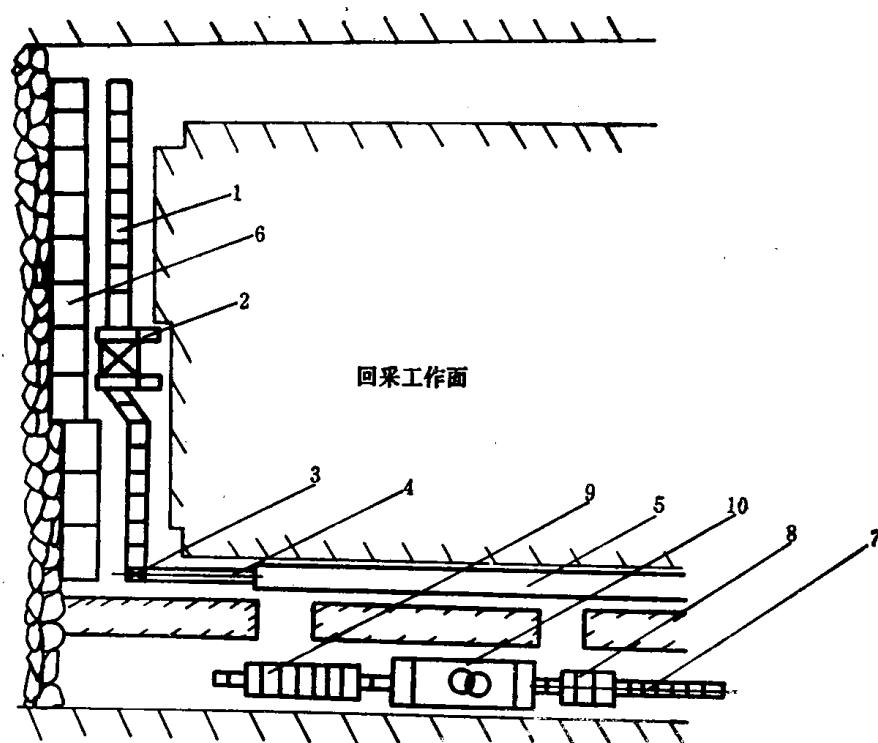


图 1-2-4 综采工作面设备布置

1—输送机；2—采煤机；3—破碎机；4—转载机；5—胶带输送机；6—液压支架；7—轨道；8—乳化液泵站；9—配电开关组；10—移动变电站

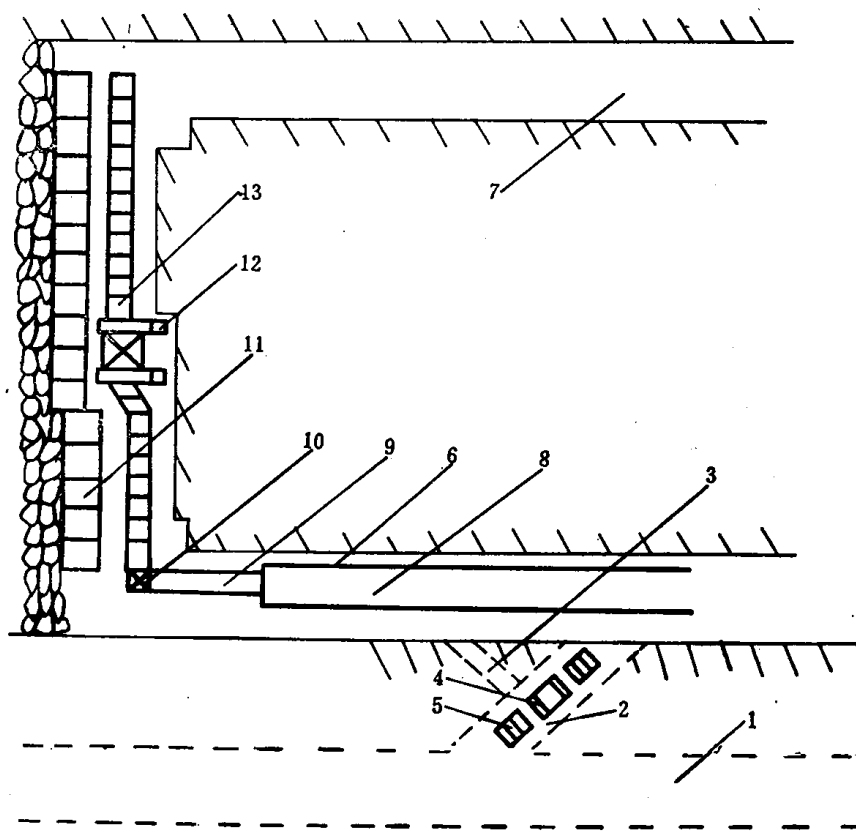


图 1-2-5 远距离供电供液设备布置

1—运输大巷；2—短石门；3—斜巷；4—移动变电站；5—泵站；6—运输巷；7—回风巷；8—胶带输送机；9—转载机；10—破碎机；11—液压支架；12—采煤机；13—输送机

如图所示，MK-Ⅱ型采煤机综采面共有三台移动变电站，其中一台（500kVA）设置在顺槽口，供顺槽内两台胶带输送机用电，其余两台设置在离工作面50~300m处，其中一台（750kVA）供工作面机组和油泵用电，另一台（315kVA）向工作面输送机和转载机供电。工作面附近的控制开关、起动器和油泵等均放在专用的平车上，移动变电站和平车可随工作面推进而沿顺槽专用轨道移动。

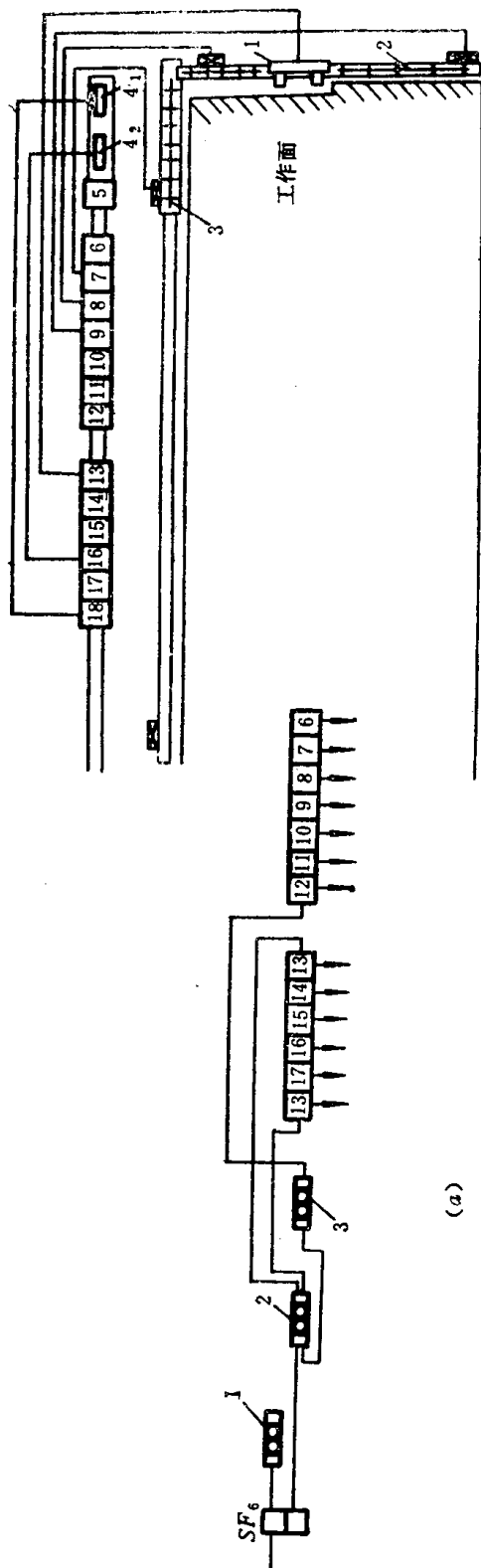
2. EDW-300-L型采煤机综采面的供电系统（图1-2-7）

如图所示，综采工作面的主要电力负荷有：

(1) 双滚筒采煤机电机	300kW
(2) 工作面输送机	2×160kW
(3) 转载机电动机	110kW
(4) 破碎机电动机	110kW
(5) 乳化液泵站电机	2×75kW
(6) 装在馈电开关8SK8555内的通讯照明变压器	7kVA
(7) 装在泵站开关8SK8155内的通讯变压器	3kVA

这些联邦德国西门子公司制造的配套电器设备，其供电电压分别为：

(1) 高压	6kV
(2) 采煤机、工作面输送机、转载机、破碎机和乳化液泵站	1140V



(a)

(b)

图 1-2-6 MK-I 型综采机组工作面供电系统及设备布置

a—供电系统

1—供顺槽胶带输送机的移动变电站；2、3—供工作面机械的移动变电站

b—工作面设备布置

1—采煤机；2—工作面输送机；3—转载机；4—1、2号油泵；5—油箱；6—控制台；7—供转载机开
关；8、9—工作面输送机开关；10、12—备用开关；11—照明变压器开关；13—供采煤机开
关；14、17—备用开关；15—电站变压器开关；16、18—供1、2号油泵开关

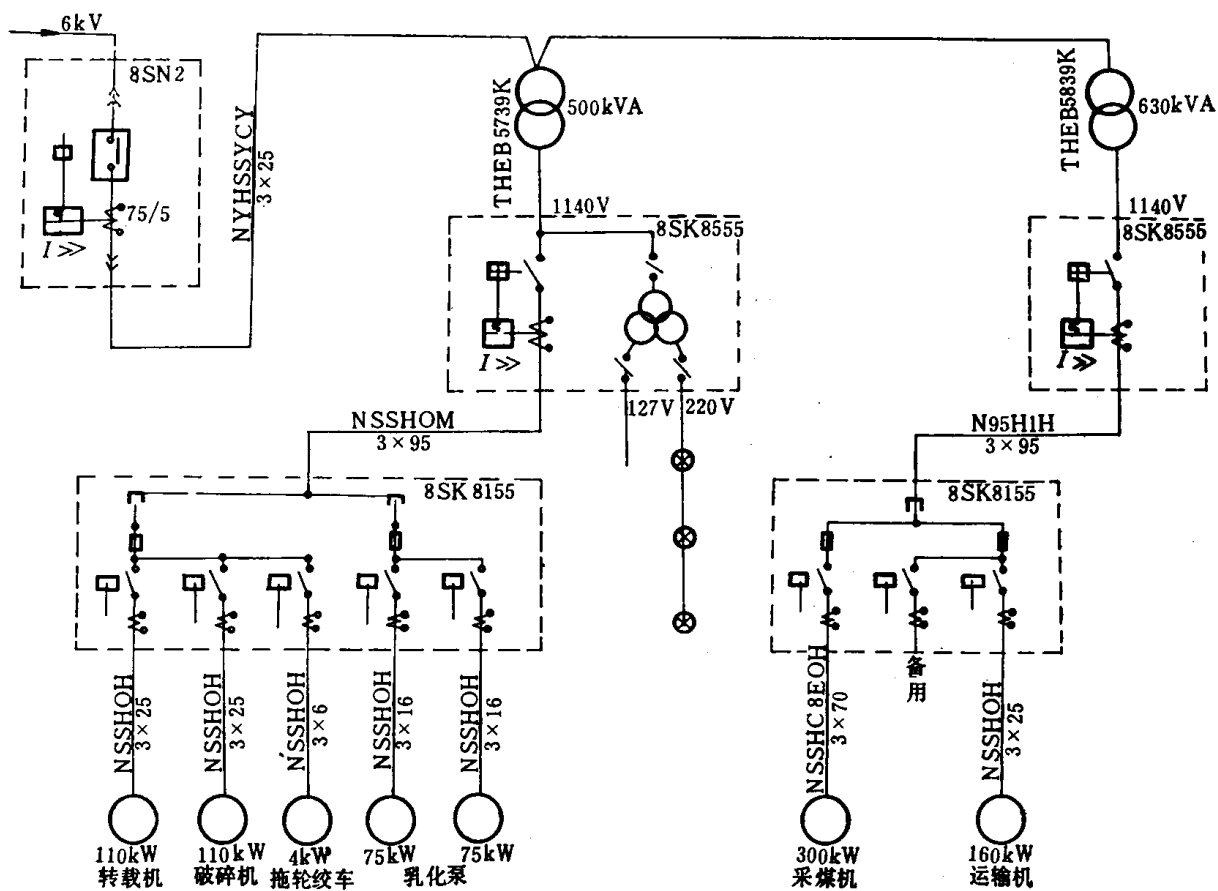
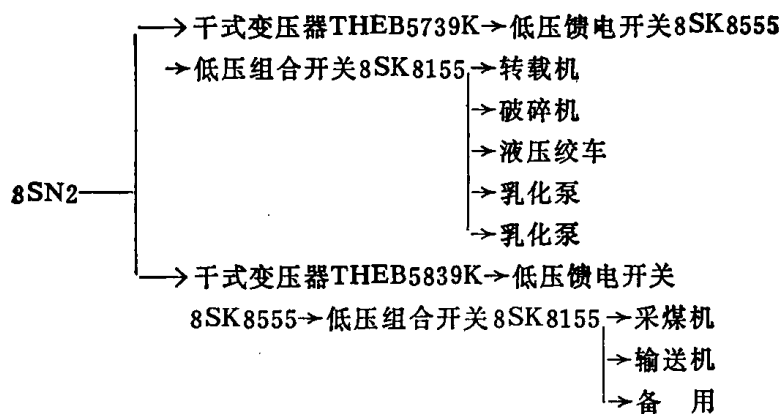


图 1-2-7 EDW-300-L型采煤机供电系统

(3) 胶带输送机	660 V
(4) 照明	220 V
(5) 通讯	127 V
(6) 控制电源	42 V
(7) 安全火花控制系统	12 V

如图所示, 这种综采工作面的供电系统是:

井下中央变电所的6kV高压→采区变电硐室的高压配电开关→



采区电气设备的供电电缆是：6kV高压用塑料绝缘屏蔽电缆，1140V用 橡套 绝缘屏蔽电缆，采煤机供电用强拉力拖曳电缆，通讯和控制用安全火花型塑料绝缘电缆。

综采面的设备布置与MK-Ⅱ型综采面大致相同，移动变电站、低压开关、乳化泵等设备装在平车上，可随工作面推进沿着顺槽的专用轨道移动。

第二章 井下电网的漏电保护

煤矿井下环境比较潮湿，供电电缆又容易被砸和挤压，在此条件下运行的电气设备和电缆，随时都有可能发生漏电故障。漏电的结果，不仅会引起人身触电，还可能导致瓦斯、煤尘爆炸，甚至使电雷管提前引爆。此外，大量的漏电电流，还可能使绝缘材料发热着火，造成火灾及其它危及矿井安全的严重事故。因此井下电网必须采取切实可靠的漏电保护措施，以确保供电安全。

在变压器中性点不接地的供电系统中，漏电保护的措施有下列几方面：

(1) 装设灵敏可靠的漏电保护装置（即检漏继电器）。当电网发生严重漏电或人身触电事故时，它能立即动作，使电源开关跳闸，为保证电缆损坏时漏电保护装置能可靠地动作，最好能与屏蔽电缆配合使用；

(2) 采用保护接地装置，防止电气设备绝缘损坏时外壳带电，造成触电事故；

(3) 设法补偿电网对地的电容电流，以减少漏电电流值；

(4) 提高漏电保护装置和自动馈电开关的动作速度，以缩短人身触电时间。提高动作速度虽不能完全防止瓦斯引爆，但能使漏电故障存在的时间缩短，减少爆炸的可能性。根本解决的办法是采取超前切断电源装置。

多年的实践证明，上述漏电保护措施是行之有效的，但与安全的要求相比，还有不小差距，应逐步加以改进和完善。

第一节 触电的危险及其预防方法

人身接触带电导体或因绝缘损坏而带电的设备外壳，都可能造成触电事故。煤矿井下的工作条件特殊，接触电气设备的机会较多，因此，发生触电的可能性也较大。

触电对人体组织的破坏是很复杂的。一般讲，电流对人体的伤害大致分为两种类型，即电击和电伤。电击，是指电流通过人体的内部，影响呼吸、心脏和神经系统，造成人体内部组织的损伤和破坏，导致残废或死亡。在触电死亡的事故统计中，多数是由电击造成的，所以，电击是最危险的一种。电伤，主要是指电弧对人体表面的烧伤。当烧伤面积不大时，不致有生命危险。在高电压的触电事故中，这两种情况同时存在。对低电压来讲，主要是指电击。

电击对人体的伤害程度与下面一些因素有关。

1. 人身电流、电阻和电压

电击对人体的伤害程度，首先与通过人体的电流大小有直接关系，电流越大越危险。对于工频交流电，1mA的电流通过人身，就开始有麻刺和痛的感觉，当达到25mA时，便会使人感觉麻痹或剧痛，甚至呼吸困难，使自己不能摆脱电源。如果电流再大、而且不能及时切断电源，则会有生命危险。对于煤矿井下的条件，常取30mA为 人身触电电流的安全极限值。各种不同电流值对人体的伤害程度示于表2-1-1中。

其次，流经人身电流的大小，与人身电阻有密切关系。人身电阻越大，通过人身的电

表 2-1-1 电 流 对 人 体 的 影 响

电流类别 电流 (mA)	50 Hz 交 流	直 流
0.6~1.5	开始有感觉,手指有麻刺	没有感觉
2~3	手指有强烈麻刺,颤抖	没有感觉
5~7	手部痉挛	感觉痒,刺痛、灼热
8~10	手已难于摆脱带电体,但是还能摆脱,手指尖部到手腕有剧痛	热感觉增强
20~25	手迅速麻痹,不能摆脱带电体,剧痛,呼吸困难	热感觉增强较大,手部肌肉不强烈收缩
50~80	呼吸麻痹,心房开始震颤	有强烈热感觉,手部肌肉收缩,痉挛,呼吸困难
90~100	呼吸麻痹,持续3s或更长时间,则心脏麻痹,心室颤动	呼吸麻痹
300及以下	作用时间0.1s以上,呼吸和心脏麻痹、肌体组织遭到电流的热破坏	

流也就越小,反之,则越大。

人身电阻是由两部分组成的,即体内电阻和皮肤电阻。体内电阻是由细胞、血管和神经等组成,基本上不受外界的影响,一般不低于 500Ω 。皮肤电阻是指皮肤表面角质层的电阻。皮肤表面角质层是一层不完善的电介质,其厚度约为 $0.005\sim 0.2\text{mm}$ 。它的电阻不是定值,随外界客观条件的变化而变化。如果皮肤表面角质层完好,皮肤干燥,而且在低电压作用下,其电阻值可高达 $10\text{k}\Omega$ 以上。当条件变坏时,如角质层损伤、皮肤潮湿、多汗或有导电性的粉尘等,其电阻值便急剧下降。在一般情况下,人身电阻主要由皮肤电阻来决定。由于煤矿井下潮湿多尘,而且工人劳动繁重,流汗较多,所以我们在井下工作的人身电阻定为 $800\sim 1500\Omega$,通常取 1000Ω 进行计算。

流经人身的电流与作用于人身的电压高低也有关系。电压越高,通过人身的电流也越大。由于皮肤的电阻随电压的升高而减少。因此,人身电流增大得更多,危险性也更大。

2. 触电时间

触电对人身的伤害程度与电流作用的时间长短、也有密切关系,触电的时间越长越危险。也就是说,即使是安全电流,若流经人身的的时间太久,也会造成伤亡事故。这是因为随着触电时间的延长,人体发热出汗,人身电阻便会逐渐减少,电流随之增大。反之,虽然流经人身的电流较大,若能在很短的时间内把电流切断,也不致造成生命危险。由此可见,人身触电的伤害程度,不仅与电流的大小有关,而且与触电的时间长短有关。因此,人们常常以人身触电电流 I_R 与触电时间 t 的乘积来衡量,当不超过某一安全极限值 K 时,就认为是安全的,并以此作为衡量人身安全的标准。关于 K 值,国外做了大量的试验研究工作,一般取 $K=30\text{mA}\cdot\text{s}$,由此便可求得当人身电流为 I_R 时允许的触电时间 t :

$$t \leq \frac{30}{I_R} \text{ s}$$

随着人身触电电流值 I_R 的增大,允许的触电时间 t 便要缩短,也就是说,必须加快漏电保护装置和自动馈电开关的动作速度,才能保证人身安全。

3. 人身电流的途径

一般认为,电流通过心脏、肺部和中枢神经系统,其危害程度较其它途径要大。特别

是通过心脏时，危险性最大。几十毫安的电流，即可引起心室颤动，使心脏停止工作，中断血液循环，从而导致死亡。实际观察证明，两手之间和手到脚的电流途径是最危险的，在工作中要特别注意。

4. 电流的频率

多数研究者的结论证明：25~300Hz的交流电对心肌的影响最大，其中50~60Hz是对人体伤害最严重的频率，2000Hz以上的电流对心肌的影响就很小了。根据用狗做的试验表明：在50Hz时，死亡率为100%，在100Hz时，死亡率为45%；在125Hz时，死亡率为20%，而在150Hz时，死亡率几乎为零。

对人来讲，也是如此，频率越高，危害就越小。即高频电流的伤害程度，要比工频小得多。因此，医生常用高频电流给病人治病。但是，也必须指出，在高频高压的电击过程中，也可能发生触电死亡事故。

除上述一些因素外，触电的伤害程度与触电者本人的健康状况、精神状态等也有关系。一般来说，心脏病、神经系统有毛病或患有肺结核病的人，在触电后所引起的伤害程度，要比健康人严重些。

总之，触电是危险的，但是，只要措施有力，坚决按照安全规程的要求执行，事故也是可以避免的。

结合煤矿井下的具体情况，可以采取下列防止人身触电的措施：

(1) 将带电导体、电器元件、电缆接头等，都封闭于坚固的外壳内。并在电气设备的外壳与盖之间，设置可靠的机械闭锁装置，以保证未合上外盖时，不能接通电源，或者在给上电源后，不能打开外盖；

(2) 对于那些不能封闭在外壳内的裸露导体，如电机车用的架空线，则将其悬挂在一定的高度，勿使人身接触。按煤矿安全规程规定，一般在行人的巷道内，高度不得低于2m；在井底车场，从井底到乘车场的巷道内，不得低于2.2m；

(3) 加强手持式电动工具（如手持式电钻等）手柄的绝缘，以防止绝缘损坏时，手柄带电而引起触电事故；

(4) 对于人身接触机会较多的电气设备和电器，都采用较低的供电电压，以减少触电的危险性。例如，手持式电钻、照明设备和信号装置等的额定电压，都不应超过127V，而控制回路的电压，则不得超过12~42V；

(5) 井下变压器禁止中性点直接接地，但专供架线电机车变流设备用的变压器，不在此限。同时，也禁止用地面上中性点接地的变压器或发电机直接向井下供电；

(6) 采用灵敏可靠的漏电保护装置；

(7) 采取有效的保护接地措施等等。

第二节 井下变压器中性点接地方式的分析

煤矿井下低压电网的安全运行条件，与变压器中性点的接地方式有关。下面先分析中性点不接地方式（又叫中性点绝缘方式）和直接接地方式，然后再分析经高阻抗接地方式。

一、变压器中性点不接地方式

由于电网的对地电容值不同，在变压器中性点不接地方式下，人身触电电流和单相接地电流的数值和变化规律不同，有必要分别予以说明。