

我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望

杨仁树

(中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘要:为找出我国岩巷掘进技术差距,结合我国煤矿岩巷掘进的现状,总结性地回顾了我国岩巷掘进技术发展历程,着重分析了岩巷掘进中钻爆法和综掘法施工工艺存在的问题,调查显示我国岩巷掘进存在“两大两低”的特点,进尺平均仅为80 m/月,正规循环率仅为75%,最后指出我国岩巷安全高效掘进发展方向:钻爆法方面基于新型液压钻车的深部大断面巷道深孔爆破配套技术及装备研究,辅以大断面巷道精细爆破及周边定向断裂控制爆破机理研究和控制爆破药卷的推广应用;综掘法方面基于深孔预裂松动爆破的全岩掘进机掘进工艺研究,综掘机的自动化和遥控化研究和全断面硬岩掘进机(TBM)适应性研究。

关键词:岩巷掘进;钻爆法;综掘法;全岩掘进机;深孔爆破

中图分类号:TD263.2 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2013)09-0018-06

Present Status and Outlook on Safety and High Efficient Heading Technology of Mine Rock Roadway in China

YANG Ren-shu

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In combination with the present status of the mine roadway heading in China, the paper reviewed conclusively the development progress of the mine rock roadway heading technology in China and stressed the analysis on the problems existed in the construction techniques with the drilling and blasting method and the fully mechanized heading method in the mine rock roadway heading. The features of the ‘two high and two low’ existed in China mine rock roadway heading were obtained. The average month heading rate was only 80 m and the normal circulation rate was only 75%. The causes of the low mine rock roadway heading speed were analyzed. Finally the paper pointed out the development orientation of the safety and high efficient heading in China mine rock roadway. Based on the study on the deep bore-hole blasting matched technology and equipment of the new hydraulic drilling jumbo in the mine deep cross section roadway, the drilling and blasting method would assist the mechanism study on the fine blasting of the mine large cross section roadway and the peripheral directional cracking controlled blasting and the promoted application of the controlled blasting cartridge. As for the fully mechanized heading method, based on the study on the tunneling technique of the full rock tunnel boring machine with deep borehole pre-cracking standing blasting, a study on the automatic and remote control of the fully mechanized roadheader and the full rock tunnel boring machine were conducted.

Key words: mine rock roadway heading; drilling and blasting method; fully mechanized heading method; tunnel boring machine (TBM); deep borehole blasting

0 引言

我国煤矿在生产中因岩巷掘进困难而导致采掘比例严重失调,造成矿井采掘接替衔接紧张,以致从20世纪80年代起,矿井设计中常取消岩石集中巷,

将开拓巷道和采准巷道布置在煤层,煤巷的比例由此大幅增加。2008年以来,国有重点煤矿的巷道年掘进总进尺超过800万m,其中煤巷约占70%,半煤岩巷占20%,全岩巷不足10%,由于综掘技术的成功应用,煤巷综掘平均月进尺已经达到500~700

收稿日期:2013-07-10;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(51134025)

作者简介:杨仁树(1963—),男,安徽和县人,教授,博士生导师,博士。E-mail:zhaoran2011@foxmail.com

引用格式:杨仁树.我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望[J].煤炭科学技术 2013 A1(9):18~23.

$m^{[1-2]}$,目前我国煤矿岩巷掘进大部分以钻爆法为主,形成以气腿式凿岩机和全液压钻车为主要设备的作业线;而以悬臂式掘进机为主要设备的综掘法在国内部分煤矿试用,效果不理想,使得岩巷的掘进进尺一直维持在60 m/月左右,落后的岩巷掘进技术对煤矿安全生产和矿井建设速度产生严重影响^[3]。因此,研究总结我国岩巷的掘进技术、装备、工艺等的现状,展望我国岩巷掘进发展趋势,在保证掘进施工安全的条件下,通过科学的组织管理,采用新技术、新材料、新装备、新工艺或成熟的技术工艺,加快岩巷掘进施工速度,确保采掘正常接续。

1 钻爆法岩巷安全高效掘进发展历程

1.1 岩巷掘进施工技术

岩巷掘进施工技术对岩巷掘进速度的提高至关重要,掘进施工技术主要有爆破技术和支护技术2方面,爆破关键技术主要有中深孔爆破技术、光面爆破技术,支护关键技术主要为锚喷支护技术。

1.1.1 爆破技术

对岩巷掘进来讲,工业炸药(水胶炸药、乳化炸药)发展和毫秒雷管的出现为岩巷中深孔爆破和光面爆破技术提供技术支持^[4]。

1) 中深孔爆破技术。我国岩巷爆破技术经历了全断面一次爆破、毫秒爆破、光面爆破3个重要阶段^[4]。中深孔爆破技术主要是指炮眼深度1.8 m以上的爆破技术,由浅孔爆破发展而来,其具有单循环进尺高,节省辅助时间和生产成本的优点,因此,在我国岩巷掘进中得到广泛应用。现阶段,炮眼深度1.8~2.0 m的爆破技术成为主流。炮眼深度2.2~2.5 m及以上的爆破技术推广进展缓慢。

中深孔爆破技术离不开掏槽技术,掏槽效果的好坏由掏槽技术决定。我国岩石平巷掘进掏槽形式主要有直眼掏槽和斜眼掏槽2种主要形式,其优缺点如下:
①斜眼掏槽。典型代表为楔形掏槽、锥形掏槽、楔直复合掏槽等。掏槽效率较高,掏槽面积大,所用炮眼少,但受断面尺寸限制大,角度较难控制;
②直眼掏槽。典型代表为菱形掏槽、三角柱掏槽、四角柱掏槽、螺旋掏槽等,适用于任何断面,操作简单,易于掌握,但全断面炮眼数较斜眼掏槽数目多,抛掷强,另外,也有准直眼、分段直眼掏槽、直眼迈步式掏槽,其断面适应性强,掏槽效率高,但普及性不足。

2) 光面爆破技术和定向断裂控制爆破技术。

光面爆破具有的爆震裂隙少、保护围岩的完整性、提高围岩自稳和承载能力、减少超欠挖、节省成本、提高进度和质量,为巷道安全高效快速施工创造了条件,特别是使之与锚喷技术结合,大幅提高了锚喷支护效果。仅靠改善光面爆破技术,不能精确控制周边质量^[5],在光面爆破基础上发展了切槽孔爆破、切缝药包爆破和异型药包爆破^[6-7],成为控制爆破的高级形式。随着试验手段的进步,模型试验、数值模拟、动焦散和数码技术的应用使得切缝药包的研究更充分。

1.1.2 支护技术

巷道支护技术直接影响到安全、支护速度、服务年限以及经济效益,煤矿巷道支护技术随着开采深度的增加经历了由单一型到联合多强化型的发展历程,支护材料从木材到钢筋混凝土衬砌,再到金属支架支护和锚杆系列支护^[8-10]。我国从1956年起在淮南、开滦等矿区进行锚杆支护应用试验,并获得良好的效果^[11]。20世纪70年代,光爆锚喷技术成为岩巷支护的重要发展方向,进入90年代,煤炭工业部提出了“三小”(小钻头、小锚杆、小药包)工作面示范性推广项目技术^[12]。由于锚喷支护具有技术先进、经济合理、速度快、效率高、围岩稳定性好、安全可靠、操作简便、劳动强度低等优点,受到煤矿井巷工作者的普遍欢迎,应用范围不断扩大。

1.2 岩巷掘进装备

到2009年,国有重点煤矿机械化程度85.5%,综采程度75.79%,综掘程度25.87%^[13]。对于岩巷掘进装备,主要有凿岩、支护、装岩、运输及辅助设备。
①凿岩设备发展主要经历了手持式凿岩机→气腿式风动凿岩机→液压(气动)凿岩台车和液压凿岩机。
②支护设备主要有锚杆钻眼设备和喷浆设备。锚杆钻眼设备的发展主要经历了电动锚杆钻机→爬杆式锚杆钻机→钻车式锚杆钻机→支腿式气动锚杆钻机→机载式液压锚杆钻机;
③喷浆设备主要有潮式、湿式喷浆机。
④耙矸机械的发展经历了人工装岩→耙斗装岩机→侧卸式铲斗装岩机→挖斗装岩机。
⑤运输机械的发展主要经历了人力推车→4~5 t电机车和矿车→带式(转载)输送机→仓式列车和梭式矿车(临时矸石仓)。岩巷掘进装备的发展为岩巷高效机械化掘进及其作业线的产生提供更多便利。

1.3 岩巷掘进工艺

巷道掘进施工是一个复杂的多工序交替进行的过程,破岩、排矸、支护是主要的3大工艺。破岩工艺主要有钻爆法和机械法^[13],钻爆法主要有台阶爆破法和全断面爆破法。机械法以岩巷综掘机破岩;装运工艺有非连续装运和连续装运2种,非连续装运以耙矸机和矿车运输;连续装运以耙矸机和带式输送机或临时矸石仓为代表的排矸工艺;支护工艺的发展以锚(网、索)喷工艺为主,主要有一次支护,二次支护^[14]。

1.4 钻爆法机械化作业线

我国岩巷掘进施工工艺经过多年的发展,形成了多种掘进机械化作业线,其中典型的钻爆法掘进机械化作业线,第1类以气腿式凿岩机配合耙斗式装岩机作业线为代表;第2类以钻眼台车配合侧卸式装岩机作业线为代表。

1) 第1类作业线能根据巷道断面大小选用并配以多台气腿式风动凿岩机、耙装机、适当的转载调车设施及支护设备、不同的施工工艺和劳动组织形式,可以形成不同能力的掘进机械化作业线,以满足不同的施工要求,如图1所示。



图1 钻爆法机械化作业线

2) 第2类机械化作业线(图2),满足侧卸式装岩机的卸载条件与液压钻车的错车条件以及液压钻车的最大打眼范围是决定该作业线是否实用的关键。



图2 液压钻车作业配套线

1.5 钻爆法岩巷安全高效掘进的现状

钻爆法在我国岩巷掘进施工巷道中占95%以上^[15],岩巷掘进水平的提高是技术、装备、工艺、组织管理共同发展作用的结果。

1.5.1 整体掘进水平

通过问卷方式和现场调研对山东、河北、安徽、山西等4省的煤矿岩巷掘进施工情况进行了调查。总体上,整体掘进水平呈现“东强西弱、强弱不均”

的局面。随着煤炭开采技术的发展,我国岩巷掘进的总进尺呈现连年递增的趋势;随着岩巷的埋深不断增大,据调研岩巷掘进断面由20世纪90年代的12 m²左右,发展到现在平均17 m²左右,最高达到25.86 m²。自80年代以来,岩巷掘进进尺水平稳定在60~70 m/月。通过对上述4省主要矿业集团200条典型岩巷调查数据显示,我国岩巷施工进尺平均水平有所提高,已经达到80 m/月,如图3所示。调研巷道中进尺在120 m/月以上的占10%,在100~120 m/月占20%,80~100 m/月占40%,80 m/月以下的占30%。我国岩巷掘进的正规循环率参差不齐,如图4所示,有的正规循环率能够达到90%以上,有的循环率只有20%,循环率的差距较大,平均正规循环率为75%。综上所述,近年来我国岩巷整体呈现“埋深大、断面大,循环低,进尺低”的特点。

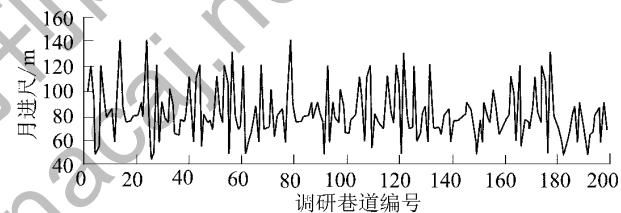


图3 岩巷平均月进尺统计

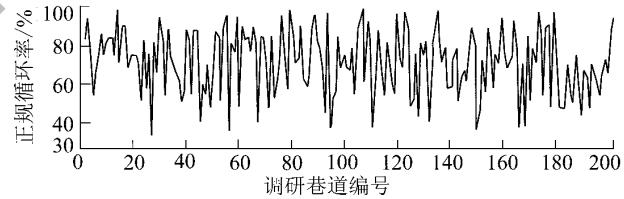


图4 岩巷施工正规循环率

1.5.2 掘进技术现状

1) 中深孔爆破技术的应用离不开掏槽。现阶段越来越多的大断面巷道被采用的前提下,直眼掏槽技术由于其眼数多且费时,楔形掏槽技术应用占90%以上。目前炮眼深度基本为1.8~2.0 m,单循环进尺在1.5~1.8 m,炮眼利用率平均只有83%左右。楔直复合掏槽和准直眼掏槽具有突出的破岩效率,其中楔直复合掏槽的掏槽效率一般在90%左右^[16]。而准直眼掏槽虽然已经进行了工业试验^[17],但离推广还有较大距离;基于“先切后掏”思想的切缝药包掏槽技术爆破平均炮眼利用率能达到97%^[18]。

随着千米深井的不断建设,深部岩巷掘进所面

临的“三高一扰动”问题给岩巷工作者提出了新的挑战^[15]。深部高应力岩巷掘进爆破时,爆破裂纹的扩展带有明显的方向性,掏槽爆破难度加大,应增加掏槽爆破装药量^[19]。随着高地应力不断增大,岩石呈现流变大变形特性,传统利用气腿凿岩机的钻爆法已不能满足深部岩巷掘进技术要求,液压钻车、侧卸式装岩机的机械化作业线来解决大断面中深孔爆破和深部全断面岩巷的一次掘进技术问题,掘进速度能提高30%以上^[15]。

2)周边成型主要采用光面爆破技术进行控制,周边眼超(欠)挖一般能控制在150 mm左右,对硬及中硬岩眼痕率能达到50%以上,基本能达到光爆的要求,但对于软岩来讲,眼痕率难以保证。在岩巷施工尤其是中硬岩巷道中,炮眼的钻眼时间占到单循环时间的30%~50%。周边眼眼数所占比例在各类炮眼中所占比例最高,占30%~40%,随着大断面巷道的越来越普遍,钻周边眼所占时间会越来越长。若采用切缝药包进行定向控制爆破不仅能使周边超(欠)挖控制在100 mm以下,眼痕率达到90%以上,并且炮眼间距能扩大到550 mm,周边眼数量减少近20%^[20]。

3)锚喷支护技术依然是岩巷掘进普遍采用的支护技术,锚网喷(锚索)的联合支护效果较好。岩巷断面越来越大,采用联合支护的方式,由于支护强度和密度增加,工作量更大,再采用传统的一次喷浆支护成型已经不适应高效快速掘进的进行,这也为岩巷的“二次支护”技术的提出了新要求;随着我国开采深度的加大,针对围岩自重压力、构造应力增强、硬岩软化、强膨胀、强流变的问题,提出了锚网梁索注联合支护技术和“钢柔匹配、杆索互补、补强适时”的支护新思想^[21]。

1.5.3 掘进装备及工艺现状

我国岩巷掘进施工的机械化水平、施工工艺、施工速度和西方发达国家相比还较落后,成为目前矿山建设的薄弱环节。对岩巷掘进作业线来讲,大部分煤矿岩巷钻眼施工基本上是用7655型的钻机械,200条巷道中有100条巷道在施工中采用7655型凿岩机,占整个调研巷道数量的50%;而YT28和YT29两种类型有68条巷道采用,占到调研巷道数量的34%。液压钻车只有18条巷道采用,占到整个巷道数量的9%。显示我国岩巷钻眼机械化水平基本呈现多种打眼机械并存,以7655(YT-23)型凿

岩机为主,整体效率较低见表1。对岩巷掘进作业线来讲,耙矸机和矿车以及耙矸机和带式输送机的组合是排矸的主力装备组合。耙矸机作为排矸设备的巷道占到80%,其中,耙矸机加矿车的组合占38%,耙矸机加带式输送机的组合占30%。其他排矸设备只占到20%左右(表2)。

表1 钻眼机械分布

钻眼机械型号	巷道数量/条	所占比例/%
7655	100	50
YT-28	44	22
YT-29	24	12
液压钻车	18	9
其他	14	7

表2 岩巷排矸工艺设备组合

排矸工艺组合	巷道数量/条	所占比例/%
耙矸机+矿车	76	38
耙矸机+带式输送	60	30
耙矸机+刮板输送机+带式输送	8	4
侧卸装岩机+刮板输送机	8	4
耙矸机+带式输送+梭车+矿车	18	9
侧卸装岩机+矿车	6	3
履带式挖掘机+矿车	8	4
侧卸装岩机+带式输送+临时矸仓	14	7
其他	2	1

1.5.4 钻爆法掘进存在的主要问题

中深孔爆破技术和锚喷支护技术普遍采用,多种装备并存,并没有带来掘进速度的快速发展,主要原因还是“重技轻管”的传统使然,首先考虑的是“爆得出、支得住”的问题,而对于能不能“运得去”及“支得完”,最后能否形成正规循环则没有过多的考虑。所以,我国岩巷掘进技术的进步,通常只表现在单进水平上的提高,而月进尺通常提高不大,因为其他的配套设施及管理没有跟上,制约了整个掘进水平的提高。

我国岩巷掘进尤其是对于硬岩巷道来讲,普遍存在钻眼数与进尺的矛盾,“少打眼,多装药”导致“进尺低,成型差”的问题突出。所以,目前来讲,我国岩巷掘进的钻眼装备落后,钻眼速度慢,技术水平低,爆破效果差依然是主要的问题。排矸装备及工艺落后,导致后路出渣滞后,掘进工作面积矸严重,制约后续工作开展,是目前我国岩巷掘进速度提高的另一主要制约因素。组织管理水平落后,缺乏激励机制是又一个主要问题。

2 综掘法岩巷安全高效掘进的发展历程

综掘法是近20~30年内迅速发展起来的一种先进的巷道掘进技术^[22],其关键设备是掘进机,主要以悬臂掘进机和刀盘掘进机为主,集切割、装载及转运、降尘等功能于一体的大型高效联合作业机械设备。连续掘进是其主要特点,称作岩巷掘进第3类作业线,如图5所示。刀盘掘进机(TBM)在隧道掘进中应用较多,但在矿山应用并不成功,中煤能源集团等正在进行TBM的煤矿适应性改造。

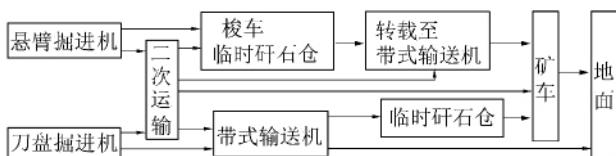


图5 综掘法机械化作业线

悬臂式掘进机作业线是综掘法的主要形式,由主机与后配套设备组成:悬臂式掘进机、机载锚杆钻机、除尘系统、桥式转载机、带式输送机。掘进机把岩石切割后,经转运机构把破碎的岩石转运至掘进机尾部卸下,再由转载机、输送机或梭车运走。

我国掘进机的研制和应用起步于20世纪70年代初,比世界各主要产煤国晚15~20年^[23]。经过30多年对技术的引进与吸收,到20世纪末,形成掘进机生产能力100余台/a,20余种型号,基本满足国内市场的需求。掘进机也从轻型、中型到重型的发展,到今已经形成了EBJ、EBZ、EBH系列型号产品,其中最新研制的EBZ300TY型掘进机可截割岩石强度达120 MPa的半煤巷和中等硬度的岩巷,不移位截割断面达38 m²^[24]。

国家“十一五”科技支撑计划重点项目“半煤岩及岩巷快速掘进与装备的研制”,该机配套综合除尘系统,在神华神东煤炭集团和山东新汶矿业集团的井下试验表明,其能截割普氏系数8~10的岩石,全岩巷道掘进断面为21 m²,月进尺达175 m^[25];淮南朱集矿的断面17 m²岩巷,2011年3月掘进进尺256 m,创造大断面岩巷综掘施工记录。目前,综掘法掘进技术不足主要表现在以下4个方面。

1) 截割范围窄,对环境要求高。以悬臂式掘进机为主的机械化作业线,主要适用于地质条件比较简单、巷道断面为16~35 m²、岩石普氏系数不大于8,巷道长度大于2 000 m的条件^[3],且要求所掘巷道的曲率半径大,不能适应我国煤矿巷道要求,特别

是岩性变化大,遇到涌水、断层破碎带等地质条件时,适应性差,掘进速度明显下降,甚至无法工作。

2) 掘进工作面降尘效率低。我国《煤矿安全规程》规定:煤矿井下粉尘中游离SiO₂含量大于10%时,总粉尘浓度不得超过2 mg/m³。目前普遍采用的内、外喷雾降尘方式无法满足井下对掘进工作面的环境要求。

3) 配件可靠性有待提高。掘进工作面地质条件复杂多变,掘进机截割时,截割头载荷异常复杂,严重影响整机可靠性和寿命,虽然国产掘进机在整机设计参数方面已经和国外先进机型看齐,但可靠性和寿命仍需改进。

4) 自动控制技术尚需提高。“十一五”以来,在掘进机自动控制方面得到发展,能够实现整机全功能遥控,并在掘进机定向、智能监测方面实现了突破,与国外相比,总体水平偏低。

3 岩巷安全高效掘进技术展望

近10年来,虽然我国岩巷的平均月进尺约以每年1 m的速度增长,但岩巷掘进月进尺水平依然很低。巷道的掘进施工机械化是实现我国岩巷快掘的必然途径,从发展新技术、装备、工艺角度,在巩固第1类机械化作业线成果的同时,大力开展第2、3类作业线。因此,我国岩巷掘进技术要在以下几个方面取得突破。

3.1 钻爆法方面

1) 基于新型液压钻车的深部大断面巷道深孔爆破配套技术及装备研究。深部大断面岩巷的快掘,深孔爆破时必然趋势,深孔掏槽技术和破岩机理的研究是关键,尤其是炮孔深度超过2.5 m情况下,气腿式凿岩机已不适应安全高效掘进,全液压钻车将是钻爆法掘进的主要设备,尤其是研究钻支一体的新型液压钻车,以及基于新型液压钻车的深孔爆破技术和与之配套的排矸运输设备是钻爆法发展方向之一。

2) 大断面巷道精细爆破及周边定向断裂控制爆破机理研究。随着“节能减排”观念的深入人心,掘进断面和爆破药量不断加大,为减少围岩损伤,达到安全高效的目的,控制炸药能量释放的精细爆破及“绿色”爆破必将更大的发展。如果周边控制爆破专用药卷能够得到推广,岩巷钻爆法的安全高效快速掘进将变得更容易。

3.2 综掘法方面

1) 基于深孔预裂松动爆破的全岩掘进机掘进工艺研究。由于全岩掘进机的破岩机理与钻爆法相比具有先天的优势,更有利于实现岩巷的安全高效快速掘进。随着全岩掘进装备的不断发展,我国的大断面岩巷掘进在不远的将来会出现综掘占主导的局面。现阶段在硬岩巷道施工中配合采用(超)深孔预裂松动爆破有利于实现大断面硬岩巷道的综合机械化掘进,将为破解现阶段硬岩中岩巷综掘机低效率难题另辟蹊径。

2) 新型截割技术和破岩理论研究。随着控制技术、制造工艺、液压技术的发展,以及新型破岩方法的出现:利用滚压破岩原理以及将盘形滚刀破岩技术应用到综掘机上,能极大地提高掘进机截割硬岩的能力,使得悬臂式掘进机应用更广泛。

3) 综掘的自动化和遥控化研究。综掘自动化研究的重点是掘进机自动控制系统。该系统应具有推进方向监控、全功能遥控、智能监测、预报型故障诊断、记忆截割及数据远程传输等系统的总称。综掘自动化是建设数字化矿山的重要环节,通过数字化矿山建设,实现远程控制、可视化,真正实现综掘自动化、智能化,促进煤矿企业的安全高效发展。

4) 全断面硬岩掘进机(TBM)适应性研究。全断面硬岩掘进机是当今世界上公认的快速开挖隧洞的最有效的机具。现阶段岩石全断面掘进机虽然可连续作业,工序简单,施工速度快,但构造复杂,成本高,对掘进巷道的岩石性质和长度及断面均有一定要求。所以,其小型化是适应煤矿岩巷条件必然趋势。

3.3 安全高效快速掘进的系统管理

技术的进步并不等于岩巷掘进速度的突飞猛进,先进的工艺并未取得理想的效果。科学的组织管理、合理的管理制度作为保障,是岩巷掘进水平更上一层楼的重要保障。把掘进作业作为一个系统来考虑,在系统视角下,进行技术、装备、工艺、组织管理的系统耦合管理,进行与岩巷高效快速掘进相适应的管理制度创新研究,尤其是适合煤炭企业激励制度研究,为安全高效快速掘进提供制度保障。

参考文献:

- [1] 王 虹. 我国煤矿巷道掘进技术和装备的现状与发展[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1):57~62.
- [2] 赵学社. 煤矿高效掘进技术现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(4):1~10.
- [3] 赵宏伟. 我国煤矿岩巷快速掘进技术现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1):5~7.
- [4] 唐健军. 我国平巷掘进凿岩爆破技术发展现状的观察与分析[J]. 有色金属(矿山部分), 1993, 45(1):44~46, 49.
- [5] 于慕松, 杨永琦, 杨仁树, 等. 炮孔定向断裂爆破作用[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2):159~165.
- [6] 杨永琦, 张 奇, 于慕松, 等. 定向控制断裂爆破技术的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3):60~63.
- [7] 王继峰. 岩石爆破技术的现状与发展[J]. 煤矿爆破, 2005, 23(3):25~28.
- [8] 杨仁树, 姜琳琳, 杨国梁, 等. 不耦合定向断裂爆破试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(11):11~13.
- [9] 岳中文, 杨仁树, 陈 岗, 等. 切缝药包空气间隔装药爆破的动态测试[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3):398~402.
- [10] 杨仁树, 王雁冰, 杨立云, 等. 双孔切槽爆破裂纹扩展的动焦散实验[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6):868~872.
- [11] 杨仁树, 王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7):1337~1343.
- [12] 张少波. 我国煤矿光爆锚喷支护技术发展现状和趋势[J]. 煤矿爆破, 2007, 25(3):20~23.
- [13] 潘洪九, 经天亮, 姜智敏, 等. 煤炭工业重大技术装备政策研究[C]//中国煤炭经济研究(2005~2008)(下册)[s. n]: 2009:32.
- [14] 季 清, 刘文江, 杨仁树, 等. 深部岩巷二次锚喷耦合支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3):258~262.
- [15] 季 清, 杨仁树, 等. 深部大断面岩巷快速掘进技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(10):1~4.
- [16] 杨仁树, 张志帆, 孙 强, 等. 淮南矿区深部硬岩巷道钻爆技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(2):42~45.
- [17] 单仁亮, 黄宝龙, 高文蛟. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破新技术应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2):224~232.
- [18] 杨国梁, 杨仁树, 佟 强. 切缝药包掏槽爆破研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3):385~388.
- [19] 王汉军, 杨仁树, 季 清. 深部岩巷爆破机理分析和爆破参数设计[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4):373~376.
- [20] 杨仁树, 张召冉, 杨立云, 等. 基于硬岩快掘技术的切缝药包聚能爆破试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2):317~323.
- [21] 张 军, 杨仁树, 段绪华. 深部软岩巷道变形机理及卸荷本构关系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(12):32~37.
- [22] 王 宏. 国外巷道掘进施工技术及发展趋势[J]. 中国煤炭, 2000, 26(4):56~57.
- [23] 叶仿拥, 马永辉, 徐晋勇, 等. 掘进装备在我国煤矿中的发展及趋势[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(4):61~64.
- [24] 郝建生. 悬臂式重型掘进机关键技术探讨[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(4):4~6.
- [25] 王 虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40a[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11):1815~1820.