



推荐阅读：

[“智能化煤矿建设关键技术”专题](#)

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业 4.0 与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)

煤矿快速掘进技术与装备专题



移动扫码阅读

王步康.煤矿掘进技术与装备的现状及趋势分析[J].煤炭科学技术,2020,48(11):1-11. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.11.001

WANG Bukang. Current status and trend analysis of coal mine driving technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 1-11. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.11.001

煤矿掘进技术与装备的现状及趋势分析

王步康

(中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030006)

摘要:“采掘失衡”是影响煤炭开采效率的主要原因,通过回顾煤岩截割理论与截割机构的发展历程,归纳了镐型截齿截割机理与截割滚筒研究现状与进展。介绍了地质条件、掘进装备、掘进工艺之间的相互关系,阐述了适应不同地质条件的掘进装备与掘进工艺发展现状,通过对当前悬臂式掘进机、掘锚一体机等煤矿巷道主力掘进装备及其配套工艺的研究,分析了掘进技术装备与工艺在提高巷道掘进效率中产生的作用效果。通过对比国内外掘进装备技术标准,指出标准的缺失落后已成为制约我国煤炭掘进技术与装备发展的重要因素,可通过国际对标,解决掘进技术装备可靠性问题。在总结掘进技术与装备现状的基础上,结合现阶段国家政策、行业发展、市场需求、新技术应用等方面的现象,从巷道掘进基础理论研究、装备智能化与成套化、掘进机器人、现代感知技术等层面,预测了掘进技术与装备未来发展方向与趋势。

关键词:巷道掘进;快速掘进;掘进装备;成套化;智能化

中图分类号:TD42 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)11-0001-11

Current status and trend analysis of coal mine driving technology and equipment

WANG Bukang

(Taiyuan Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group, Taiyuan 030006, China)

Abstract: “Unbalanced mining” is the main reason that affects the coal mining efficiency. This paper reviewed the development of coal and rock cutting theory and cutting mechanism, the research status and progress of pick cutting mechanism and cutting drum were summarized. The relationship between geological conditions, tunneling equipment, and tunneling technology was introduced, and the development status of tunneling equipment and tunneling technology adapted to different geological conditions was explained. Based on the research of the existing cantilever roadheader, tunneling and anchoring machine and other main coal mine tunnel tunneling equipment, this paper analyzed the role of mainstream tunneling equipment and its technology in improving the tunneling efficiency of roadway development. By comparing domestic and foreign technical standards for mine development equipment, it is pointed out the lack of standards is an important factor restricting the development of coal mine development technology and equipment. The problem of reliability of tunneling technology and equipment can be solved by international benchmarking. On the basis of summarizing the present situation of development technology and equipment, combined with the current status of national policies, industry development, market demand and new technology application, etc., the future development direction and trend of tunneling technology and equipment are predicted from the aspects of basic theoretical research of roadway development, intelligent and complete equipment, tunneling robot group and modern perception technology.

Key words: roadway driving; rapid driving; mine driving equipment; complete set; intelligence

0 引言

长期以来,煤炭产量与消费量分别占我国一次

能源生产和消费总量的70%和60%以上,煤炭产业已成为关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业,在未来相当长一段时期内,煤炭在我国能源结构

收稿日期:2020-07-21;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA06A405);山西省科技重大专项资助项目(20181102027)

作者简介:王步康(1965—),男,山西太原人,研究员,博士。

中的主体地位不会改变。我国 90% 以上的煤矿生产属于井工开采,井下数量庞大的各类巷道的安全快速掘进是煤矿安全高效开采的前提,巷道掘进已经成为煤炭开采的先行工程。煤矿井下施工条件恶劣,断层、陷落柱等不确定因素多,掘进工作面地下水突出、瓦斯突出、顶板冒落、粉尘爆炸等事故严重威胁作业人员的安全,这些因素给巷道掘进与支护带来巨大挑战。近年来,随着综合机械化开采水平的提高,年消耗回采巷道数量大幅增加,而掘进水平尚未得到相应提高,综掘平均月进尺仅 180 m,综采工作面平均月消耗巷道超 600 m,全国煤矿掘进队与综采队平均配比 3.1:1.0,采掘比例失衡,严重制约了煤炭安全高效开采^[1-2]。

随着我国科技投入的不断加大,煤矿井下巷道掘进技术与装备取得了一批重要科技成果,实现了从炮掘到机掘的跨越。我国自主研制的高效快速掘进系统在工程示范中数次打破了井下煤巷掘进进尺的世界纪录,同时,在履带千伏级变频牵引调速、高效袋式除尘器、截割电机变频调速等方面取得重要突破,填补相关领域国内外空白^[3-4]。“掘支运一体化快速掘进关键技术与装备”获得了中国煤炭工业科学技术奖特等奖。

国家《“十三五”国家科技创新规划》中明确提出:围绕“安全、绿色、智能”目标,开展煤机装备智能化技术攻关,为煤炭产业转变发展方式、提质增效提供强大的科技支撑。我国各矿区煤层地质和开采条件不尽相同,造成掘进技术与装备对于特定的地质条件适应性和掘进效率存在巨大差距。国家《能源技术创新“十三五”规划》将“掘支运一体化快速掘进系统”作为集中攻关类项目,以期构建形成适应不同地质条件的快速掘进技术与装备体系,全面提高巷道掘进效率。因此,亟须通过不断的理论、技术与装备创新推动完善煤矿掘进技术体系建设,实现高效安全智能掘进。

笔者通过分析介绍掘进技术的研究现状,回顾掘进装备的发展历程和研究进展,归纳巷道掘进领域的代表性成果;通过研究现阶段国家政策、行业发展、市场需求、新技术应用等方面现状,分析了掘进技术与装备的未来发展趋势。

1 截割理论与截割机构

截割理论是研究截割机构在破岩过程中刀具与煤岩之间相互作用机理的基础理论;截割机构是通过刀具进行破碎煤岩的装置,是煤矿掘进装备的工作机构,其结构型式、设计参数及制造工艺水平等因素

决定了掘进装备的机械性能。通过截割理论的研究得到岩石物理力学性质、截割机构几何参数和运动学参数对截割力学参数、比能耗、生产效率等指标的影响规律,用来预测和评估截割机构的截割性能及掘进机械的综合性能,指导截割机构及掘进机械整机设计和现场施工,达到降低刀具消耗率、实现低能耗高效率截割的目标。

1.1 镶型截齿截割机理

镶型截齿是掘进机械广泛采用的刀具。对镶型截齿的截割机理研究主要包括:①截齿破岩过程中的力学参数及影响因素研究;②截齿破岩过程中比能耗、破岩效率及影响因素研究;③截齿磨损机制方面研究。

在镶型截齿破岩力学研究方面,自 20 世纪中叶以来,相关学者通过理论分析和试验对镶型截齿的截割理论进行深入研究,形成了以前苏联学者别隆等为代表的破煤理论和英国学者 EVANS 为代表破煤理论^[6-7]。前苏联破煤理论在综合考虑开采条件、刀具结构参数、截割参数等基础上给出了截割破煤力学模型,现已广泛用于我国煤矿采掘工程领域;EVANS 破煤理论是基于煤岩发生拉伸破坏的观点建立的镶型截齿平面截割力学模型。ROXBOROUGH、GOKTAN 等相继对 EVANS 模型进行修正以使得该模型给出的理论值与实测值接近^[8-9];BILGIN N 团队^[10]以 22 种岩石截割试验为基础,采用多元非线性、神经网络等方法给出了截割力的预测模型;HEKIMOGLU^[11]给出利用切屑图截齿作用面积计算截齿力学参数的方法;综上,对截割力的预测模型给出的公式均为半经验公式,需要通过大量试验确定公式因子,同时,各公式均需在特定条件下方可适用,条件变化时各公式均表现一定的离散性。

在镶型截齿破岩比能耗等性能研究方面,BALCI 等^[12]基于截齿截割试验给出了破岩效率和比能耗的预测模型;PARK 等^[13]利用直线截割试验台分析了打击角对比能耗的影响,结果表明中等强度的岩石在不同打击角的情况下截割力和比能耗变化大,打击角 60° 相对 45° 对应的比能耗更低。

在截齿磨损研究方面,NAHAK 等^[14]利用高分辨率显微镜进行合金头磨损机制研究,结果表明煤岩的非均质性是截齿损坏的主要原因,磨损、疲劳裂纹、煤岩硬质颗粒的冲击是截齿损坏的 3 个步骤,硬质颗粒的冲击将石英等颗粒物进入到合金头微观结构,使合金头其他元素无法与 WC 晶粒结合。SU 等^[15]研究了磨损率与石英含量和截割参数的影响关系,结果表明:当矿岩石英含量 $\leq 50\%$ 时不会引起

截齿合金材料磨蚀,截割速度和比能耗与截齿消耗率呈强相关性。

近年来,国内高校及科研院所通过组建研究团队和建设专业实验室,逐步开始对煤岩截割领域进行科研攻关^[16-17]。来自“煤矿采掘机械装备国家工程实验室”的研究团队依托实验室的截割刀具试验平台开展了相关研究(图1),获得了大量有价值成果,主要有:

1)通过截齿侵入岩石试验发现截齿的破岩机制为:岩石在单齿旋转截割作用下的破碎过程大致可以分为初始压碎区细粒岩屑生成、密实核形成并储能、各向裂纹的扩展与连通、断裂体崩落、二次压碎区细粒岩屑生成5个阶段,且岩屑的断裂是以拉伸为主并伴随着挤压和剪切的共同作用^[18]。

2)通过镐型截齿旋转破岩截割力预测试验,利用回归分析得到截割力学参数与截割厚度的关系,认为截割力与法向力和截割厚度之间呈线性关系,侧向力受截割厚度的影响不显著^[19]。

3)基于BILGIN N单齿载荷预测公式^[10]建立了截割头截割功率预测模型,通过掘进机人工岩体截割试验发现,该模型的预测结果与试验数据线性相关,截割功率平均值相关系数达0.982,对应的预测公式拟合度达96.34%。

4)通过截齿磨损过程试验,截齿破岩过程中累计温度高于600℃,高温作用使截齿硬度明显降低,高温磨损是截齿磨损的形式之一,截割速度、截割力、摩擦力与截齿磨损均呈正相关关系^[20]。



图1 截割刀具试验平台

Fig.1 Cutting tool test platform

1.2 截割滚筒

截割滚筒通常分纵轴式和横轴式2类,其中横轴式滚筒更有利于提高整机截割稳定性。截割滚筒在破岩过程中承受着剧烈的交变冲击载荷,其耐磨性和工作性能是截割滚筒主要的性能评价因素。

截割滚筒的耐磨性主要通过截齿消耗率、滚筒寿命和大修周期等指标衡量。目前,通过截齿磨损

试验,国外装备截齿消耗率约是国内同类装备的1/3。截割滚筒的耐磨性影响因素主要有截齿排布形式、滚筒运动学参数匹配、截齿的材料特性及制造工艺、齿座定位焊接工艺等。在截齿布置研究方面,COPUR等^[21]利用等比例旋转截割试验台分析了不同螺旋头数和截割速度对截割性能的影响,结果表明,双头螺旋相对单螺旋和三螺旋截割效率最高,可有效提高滚筒耐磨性;在截齿的材料特性及制造工艺方面,澳大利亚联邦科学研究院开发的金刚石合金截齿可截割硬度达130~140 MPa。国内研究了深冷回火处理对合金头硬度的影响^[22],结果表明深冷回火处理对YG8硬度的影响范围为15.96~53.01 HV1,进一步提出了该工艺最优参数组合。在齿座定位焊接工艺方面,国内研究提出了截齿空间姿态定位模型^[23],自主开发了滚筒齿座参数化定位系统(图2),截齿齿尖定位精度±2 mm,角度精度±0.5°。实现机械手自动定位焊接、定位精度非接触式快速检测等全过程的截割滚筒高精度智能制造,将是未来掘进领域重要的发展方向^[24]。

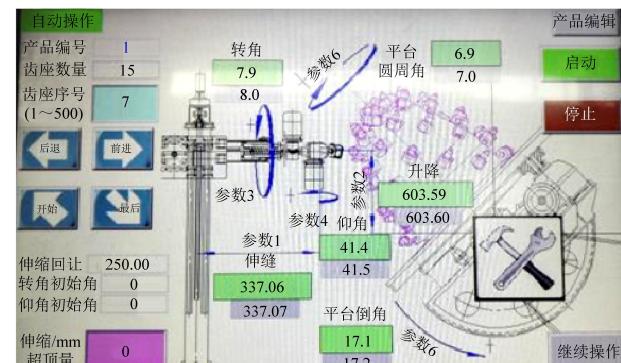


图2 滚筒齿座参数化定位系统界面

Fig.2 Parameterized positioning system interface of cutting roller pick base

截割滚筒的工作性能主要通过下列指标衡量:
 ①理论载荷波动量,用来评价工作载荷的平稳性;
 ②单刀力,用来衡量滚筒的破岩能力。EYYUBOGLU等^[25]基于载荷模拟方法研究截齿排布方式对载荷波动量的影响,结果表明非均匀布置截齿相对均匀布置截齿得到的载荷波动无较大差异;通过载荷模拟发现3头螺旋截割头相对2头和4头螺旋的截割头载荷波动最小,目前三维交互式设计软件已得到成熟应用,实现了载荷波动最小的滚筒优化设计。通过该方法设计的截割头,截齿单刀力提高30%以上。

1.3 其他形式的截割机构

当煤岩的硬度和磨蚀性增大时,截齿和截割滚筒的磨损程度更为严重,以某型掘进机为例,在半煤

岩条件下的截齿消耗低于 0.025 把/ m^3 , 在全岩巷掘进时则高于 0.2 把/ m^3 , 截齿消耗增加近 10 倍^[26]。因此, 滚筒式截割机构在硬岩截割方面存在瓶颈, 需要探索其他更加经济的截割技术。

国外相关机构开发了盘形滚刀、镶齿滚刀^[27]、边缘牙齿形碟盘等截割刀具, 并研制了相应的掘进设备。美国科罗拉多矿业大学地质机械研究院提出基于圆盘滚切的破岩技术。威尔特开发了集掘进、支护、装载、运输、除尘于一体的六臂移动式巷道掘进机, 可开挖圆形、矩形等多种类型巷道^[28-29]。传统盘形滚刀体积大, 截割机构受功率约束只能布置较少滚刀, 从而带来整机振动大的问题, 该研究院开发了微型滚刀(滚刀半径 125 mm、轴径 50 mm), 并研制了相应的截割头和掘进设备(滚刀数量 56、截割功率 300 kW), 通过凝灰岩(UCS 为 170 MPa)截割试验表明, 该机生产效率达 32 m^3/h , 刀具消耗少于 0.16 把/ m^3 , 但最终因刀具消耗等经济因素没有推广应用^[30]。Fairchild 公司开发了用于薄煤层开采的螺旋钻式连续采煤机, 并投放于美国井工采煤设备市场。JOY 和 CDC 公司合作开发了 Dynacut 技术, 该技术采用单个边缘牙齿形碟盘作为截割机构, 应用该技术的 SR1 型露天采矿机生产效率可达 30 m^3/h , 通过截割试验(岩石 UCS 为 80 MPa)测得生产效率高达 80 m^3/h ^[31], 但该技术应用到井工巷道时进刀问题无法解决。

国内学者对盘形滚刀的破岩过程进行了大量研究, 在多滚刀组合回转破岩模型中, 分析了滚刀受力情况及破岩渣质量, 应用比能原则研究相邻滚刀间最优刀间距及最优相位差; 北京中煤矿山工程有限公司建设了专业实验室, 对镶齿滚刀破岩机理展开研究, 并取得了广泛的工程应用; 北方重工集团等企业将盾构技术应用到煤矿巷道掘进中, 建立了全断面掘进机实验室, 具备了全断面掘进机系统集成关键技术研究, 刀盘、刀具驱动等系统的设计、制造及检验的综合能力, 正在进行全断面半煤岩掘进机工业性试验。

1.4 其他截割技术的探讨

英国多斯科在 MK2A 掘进机上引入水裂法截割技术, 并进行了井下试验, 截割对象为煤和页岩组成的岩层, 试验结果表明: 利用压力为 70 MPa 的水射流辅助掘进机破岩效率提高 75% , 比能耗降低 42% ^[33]。2016 年, 基于 Dynacut 的 SR1 型露天采矿机利用 80 MPa 的水射流进行辅助截割试验, 并取得了较理想的试验效果^[31]。我国和欧美等国家都将该技术引入到掘进设备中进行辅助截割尝试, 试

验结果表明^[34-35], 该技术对提高破岩效率和延长截齿寿命、降低产生量均有积极作用。

高压泡沫破裂岩体的方法^[36], 是向钻孔孔底高速注入高压(最大 80 MPa)泡沫, 使岩体破裂。通过对致密的大块片麻岩(单轴抗压强度 $130\sim170$ MPa)进行试验, 破碎每立方米岩石消耗泡沫剂 1 L 左右。使用高压泡沫法破碎岩石消耗的能量约为刀具截割耗能的 $1/2$ 。

2 掘进装备及后配套

煤矿井下煤层赋存条件复杂多变, 需要根据地质环境选择适应的掘进装备和制定适合的掘进工艺。适合的掘进工艺是掘进装备能否实现高效掘进的必要条件。在我国, 伴随截割理论与截割机构的创新发展, 逐步形成了适应我国复杂煤层赋存地质条件下的掘进装备与工艺。

2.1 悬臂式掘进机与综合机械化掘进系统

20 世纪 60 中期至 70 年代初, 我国在消化吸收国外技术基础上开始悬臂式掘进机基础性研究, 并研制了以截割功率 $30\sim50$ kW 为主的轻型掘进机, 以煤炭部太原煤矿机电科学研究所研制的 I 型, II 型、III 型和煤炭科学研究院上海机械研究所研制的 JK-3 型为代表, 形成我国第一代悬臂式掘进机。20 世纪 70 年代末到 90 年代初, 我国分别从英国、奥地利、日本、苏联、德国等国家引进了 16 种、近 200 台悬臂式掘进机, 推动了我国煤矿巷道综合机械化掘进的进程。20 世纪 90 年代中期, 我国步入了掘进机自主研发阶段, 以 EBJ-120TP 型掘进机为代表的新一代掘进机产品不断问世, 技术水平跨入了国际先进国家行列, 产量与使用量均居世界第 1。通过不断的技术创新, 目前我国已研制了截割功率 $30\sim500$ kW、整机质量 $18\sim150$ t、从轻型到超重型的 20 多种系列化掘进机产品, 并在煤巷、半煤岩巷及全岩巷中广泛应用, 部分产品已实现出口。

煤巷及半煤岩巷掘进机一直占据着掘进作业主力机型的位置。随着我国煤矿开采规模的逐步扩大, 全岩巷道掘进工程量增多, 重型及超重型岩巷掘进机的市场占比逐年增加, 已成为未来掘进机的主要发展方向。围绕岩巷掘进及其除尘技术, 在国家科技政策的持续支持下, 取得了一批重要成果。

1) EBH315 重型掘进机。针对岩巷综合机械化掘进的难题, 依托“十一五”国家科技支撑计划项目, 山西天地煤机装备有限公司研制了可截割硬度达 f12 的全岩巷悬臂式掘进机, 采用双齿条齿轮回转机构、重载横轴可伸缩截割机构、全功能运行工况

实时监测、截割断面监视与记忆截割等技术,经神东大柳塔矿的应用表明,该设备在坡度16°、硬度8~10,局部硬度12的全岩巷道掘进中,月进尺达175 m^[1]。

2)智能化超重型岩巷掘进机。针对岩巷掘进机截割效率低的问题,依托国家“863计划”项目,国内首台EBH450智能化超重型岩巷掘进机,攻克掘进机截割工况识别技术和截割转速自动调节技术,实现了自适应截割,该机2016年在阳泉煤业集团完成井下工业性试验,截割岩石单轴抗压强度最大为124 MPa。在单轴抗压强度为80~120 MPa、最大124 MPa的岩巷中试验3个月,累计进尺1 027 m(标准断面8 m²),最高月进尺达381 m(标准断面8 m²)。

3)煤矿井下干式除尘系统。针对岩巷掘进粉

尘治理的难题,依托国家“863计划”项目,开发了煤矿井下干式除尘系统,采用小体积无龙骨自承式菱形滤袋技术、气动脉冲自动连续清灰技术、低高度Z形风道技术,干式除尘系统除尘效率高,但是体积大,而湿式除尘系统体积小、维护方便,除尘效率较低。干式除尘系统通过原在山西潞安集团进行的工业性试验表明,该系统巷道总粉尘浓度降尘率达95.8%~99.7%;呼吸性粉尘降尘率达93.4%~97.8%^[36]。

对比市场上重型掘进机性能(表1)可见,我国重型掘进机的研制已达国际同类先进水平,下一步需在元部件可靠性、硬岩截割技术、自动控制技术等方面进一步改进提高。

表1 国内外重型掘进机性能参数对比

Table 1 Comparison of performance parameters of heavy duty roadheader at home and abroad

重型掘进机型号	EBZ260	EBZ300	EBH315	MT720	MK5
最大掘进高度/m	5.0	5.0	5.83	6.6	5.35
最大掘进宽度/m	6.0	6.0	7.01	9.1	7.75
煤岩单向抗压强度/MPa	100	100	120	120	120
整机质量/t	80	85	135	135	120
总功率/kW	426	447	533	555	590
截割功率/kW	260/200	300	315	300	>350

为适应巷道掘进对快速支护的施工要求,掘进机机载锚杆钻机技术自20世纪80年代发展起来,通过在悬臂式掘进机的基础上安装多组锚杆钻机实现掘锚交替作业(图3),代表机型有日本MRH-S220型、英国LHI300H型等,该技术于20世纪末被引入我国,但因锚杆钻机的适应性等问题使用效果并不理想,掘进速度没有得到显著提升。目前,国内部分掘进机制造企业研发出多种改进版新型掘进机,并配套自移式临时支护装置,提高了支护作业安全性,降低了锚杆支护劳动强度,但该技术对地质条件要求较高,适应范围受到限制。



图3 综合机械化掘进作业线

Fig.3 Comprehensive mechanized tunneling operation line

2.2 连续采煤机与双巷掘进系统

连续采煤机起源于美国,自1948年美国利诺斯公司成功研制出第1台连续采煤机以来,已经历70余年发展历程。目前国内外共推出1 800余台连续采煤机。该装备在20世纪60年代前主要用于房式

或房柱式开采,到60年代之后,随着长壁机械化开采的迅速发展,因连续采煤机生产效率高的特点,美国、英国、澳大利亚等国相继将连续采煤机推广到巷道快速掘进中,目前,连续采煤机已广泛应用于许多国家的房柱式采煤、边角煤回收和巷道快速掘进中。目前,国外连续采煤机制造企业已经推出采高0.6~4.7 m,截割功率118~520 kW,整机质量20~100 t,40余种型号的全系列连续采煤机产品^[35]。

我国从1979年开始引进连续采煤机进行煤炭开采,前期以单机引进为主,直至20世纪90年代,以神东煤炭集团为代表的大型煤企采用成套引进方式,将连续采煤机及其配套设备用于巷道掘进,取得了较好的应用效果。神东矿区采用连续采煤机进行巷道掘进,月均进尺达1 100 m。

在国家“十一五”科技支撑计划项目课题“煤柱及不规则块段开采关键技术”的支持下,中国煤炭科工集团太原研究院研制出国内首台具有自主知识产权的连续采煤机。目前已研制出采高1.3~5.5 m、截割功率340 kW、多种系列的连续采煤机,并研制了多种型号的锚杆钻车、梭车等配套装备

(图4),在煤巷掘进、短壁开采、露天边坡开采、钾盐矿开采等领域广泛应用。



图4 连续采煤机及配套装备

Fig.4 Continuous miner and its supporting equipment

国产连续采煤机从初始研制到技术成熟经历了多次技术升级和可靠性提升,解决了一系列重大技术难题。

1)高可靠性重载截割齿轮箱。针对小体积大功率截割传动造成安全系数低的技术难题,采用双支撑式驱动轮毂和等厚三角型面轴,实现等体积下传递功率提高30%。

2)千伏级交流变频牵引调速技术。针对半煤岩截割牵引阻力大、掏槽困难的技术难题,在履带式驱动装置上首次采用直接1140 V四象限交流变频调速技术,实现了截割牵引反馈闭环控制,根据不同工况自动调节掏槽速度,同时满足了调速范围广、启动转矩大、过载能力强等工况要求。

3)连续采煤机导航定位技术。针对薄煤层巷道掘进远程控制及掘进定向的技术难题,开发了连续采煤机惯性导航组合系统,连续采煤机在巷道掘进方面的应用,主要以双巷掘进工艺为主,该工艺采用连续采煤机、锚杆钻车、梭车、破碎机和带式输送机等配套装备,连续采煤机与锚杆钻车采用交叉换位作业方式(图5),即连续采煤机在一侧巷道掘进,锚杆钻车在另一侧巷道进行锚杆支护,当二者各自完成作业工序后互换工位,该工艺解决了掘支平行作业的难题,但该工艺只能在顶底板中等稳定、具有

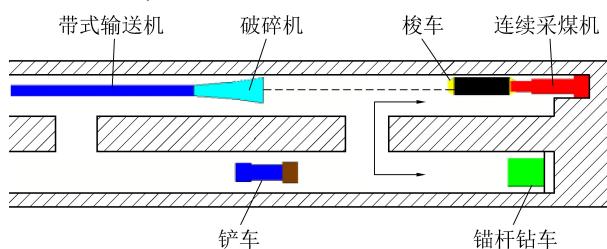


图5 连续采煤机双巷掘进工艺

Fig.5 Double lane driving technology of continuous miner

较大的空顶距(一般 ≥ 8 m)的围岩条件下才能充分发挥出较高效率。

国产连续采煤机及其配套装备在我国煤巷掘进中取得较好的应用效果,2008年在神东矿区进行巷道掘进,月最高进尺1351 m;2016年在陕西金鸡滩煤矿进行巷道掘进(巷道规格:宽6 m \times 高5.4 m),连续截割断层296 m,月均进尺达1500 m。

2.3 掘锚一体机及后配套

为提高掘进速度、实现单巷掘进下的掘锚平行作业,奥钢联采矿设备公司于1991年研制了第1台掘锚一体机—ABM20,并在澳大利亚Tahmoor Colliery矿试验成功,该机设计了可相对滑移的副主机架,主机架安装多组锚杆钻机及临时支护,副机架安装与巷道同宽的截割机构并相对主机架滑动实现割煤,从而实现掘锚平行作业,减少了设备反复碾压对巷道的破坏,巷道一次成型,同时设备空顶距小(≤ 2 m),可适应围岩条件较差的工况。目前,掘锚一体机已在综采准备巷道掘进领域中广泛应用,共400余台,主要分布在美国、南非、澳大利亚、俄罗斯、中国等地,其中我国在用掘锚一体机近100台。经过近30年发展,奥地利、美国、日本、德国等国外掘锚一体机制造企业已经研制了采高1.2~5.5 m、截宽4.0~7.2 m、截割功率200~340 kW、整机质量60~115 t、30余种型号、适应不同工况条件的全系列掘锚一体机产品,并在智能掘锚、掘锚探一体化、钻机电液控制、自动铺网等掘锚一体机相关研究领域开展了大量理论与试验研究。

我国对掘锚一体机的研究应用发展较快,目前已形成采高2.8~5.0 m、截宽5.0~6.5 m、截割功率270~340 kW、整机质量90~110 t、多种系列的掘锚一体机产品(图6)。



图6 掘锚一体机

Fig.6 Intellectualized driving and anchor machine

在掘锚一体机研发过程中,相关科研机构在消化吸收国外技术的基础上,结合我国煤矿井下巷道工程实际,开展了大量相关技术创新研究,提高了掘锚一体机的适应性,满足了我国不同地质条件下的

使用要求。优点有:

1)宽履带低比压底盘。针对国外掘锚一体机因接地比压大难以适应底板偏软工况的技术难题,通过轻量化设计,研制了轻型宽履带底盘及辅助支撑机构,将整机行走接地比压及截割与支护作业接地比压降低20%左右^[3],增强了整机对底板的适应性。同时,采用交流变频行走驱动技术,通过大启动扭矩和高精度定量调速减少了“卧机”现象。

2)双驱动高速合流重型截割减速器。针对全宽截割时动载荷大引起传动系统发热、截割能力较低等问题,研制了高可靠性截割减速器,该减速器内置齿轮泵和冷却回路,实现截割减速器主动润滑和强制冷却,并通过多种传感器对截割润滑状态监测预警;截割减速器通过双电机驱动、高速级合流,既解决了传统单电机维护不便的难题,同时增加了截割功率及截割能力。

3)前探式临时支护。针对传统临时支护因空顶距大不能适应破碎顶板的技术难题,研制前探式机载临时支护,将临时支护空顶距由1.0 m减至0.4 m^[3],提升了锚护作业安全性,同时提高了锚杆及时主动支护效果。

掘锚一体机煤巷掘进采用一次成巷工艺,即在一个作业循环内,掘进和支护同步进行,当锚杆支护完成一个排距后,系统前移进行下一个作业循环,其后配套一般采用梭车或桥式转载机进行间断或连续的转运。神东矿区是我国应用掘锚一体化技术较成熟的矿区,采用一次成巷工艺平均月进尺达800 m左右。与连续采煤机双巷掘进工艺相比,该工艺适用范围广,支护效果好、掘进工效显著,安全性高,因而引起世界采矿界的广泛关注,被誉为掘进史上的一次技术革命。

尽管掘锚一体机实现了掘锚平行作业,但掘进与支护的作业时间占比仍不均衡,支护与掘进的平行作业率仅30%左右,掘进速度仍难以满足综采接续的要求,需要进一步创新掘进装备和工艺。

2.4掘支运一体化快速掘进系统

为提高掘支平行作业率,我国通过持续探索攻关,以掘支运一体化平行作业为目标,完成了全球首套快速掘进系统的研制。目前,我国已形成系列化、配套多样化、个性定制化的快速掘进产品谱系。按巷道围岩稳定性条件,掘支运一体化快速掘进系统主要分为稳定围岩条件下和中等稳定围岩条件下2类快速掘进系统。

1)稳定围岩条件下掘支运一体化快速掘进系统。稳定围岩条件是指顶、帮稳定,空顶距和空帮距

均大于20 m的巷道条件,主要分布于神东、榆林等矿区。稳定围岩条件快速掘进系统主要由掘锚一体机、破碎转载机、跨骑式锚杆钻车、柔性连续运输系统等组成(图7),主要技术特点如下^[2]:①掘支分离、集中支护。跨骑式锚杆钻车机载10组钻机,完成所有支护任务,通过跨骑式底盘实现与输送机相对穿行,从而实现了掘、支完全分离、互不影响;②重叠搭接、连续装运。柔性连续运输系统采用可伸缩带式输送机和迈步式自移机尾重叠搭接,搭接行程达150 m^[37],满足快速掘进圆班进尺的要求;③集中控制、多机协同。以跨骑式锚杆钻车为中心建立中央集中控制系统,实现多设备远程操控、协同作业;④作业辅助、减人强安。除尘系统、供电系统、材料存储均有效集成,随系统同步前移,消除相关辅助工序。

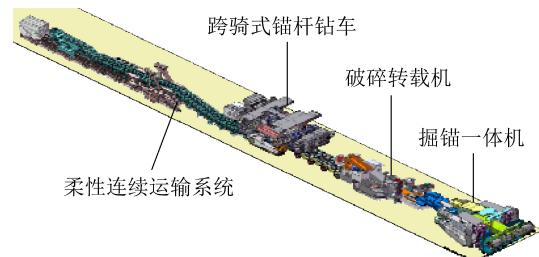


图7 3 000 m 级高效快速掘进成套装备系统

Fig.7 3 000 m level efficient and rapid tunneling equipment system

3 000 m 级高效快速掘进成套装备系统于2014年8月在神东大柳塔、补连塔矿相继使用,平均月进尺2 400 m,最高月进尺3 088 m^[3]。

2)中等稳定围岩条件下掘支运一体化快速掘进系统。中等稳定围岩条件是指顶、帮中等稳定,空顶距和空帮距均大于2.5 m的巷道条件,广泛分布于晋陕蒙宁新等主要产煤区。中等稳定围岩条件快速掘进系统主要采用掘锚一体机、锚杆转载机、柔性连续运输系统的配套方式(图8)。该系统采用分段平行支护工艺,即掘进工作面通过掘锚一体机实现低密度强力锚杆支护控制顶板,后部利用锚杆转载机同步实施增强永久支护,形成“前疏后密,快速推进”协同支护体系,根据巷道支护参数和围岩自稳定性,优化各设备的支护任务,再优化设计锚杆转载机的钻机空间位置、调整行程和数量,提高掘支平行作业率。



图8 千米级快速掘进成套装备系统

Fig.8 1 000 m level rapid tunneling equipment system

千米级快速掘进成套装备系统主要技术特点如下:①锚索自动连续钻孔。集成自动锚索钻机技术(图9),该钻机利用旋转机构旋转及机械手自动续装钎杆,采用旋转式钎杆仓一次可存储9根,最大钻孔深度可达11 m,钻孔用时20 min;②支护工艺参数可调。当巷道条件发生变化时,可灵活调整掘锚一体机和锚杆转载机的支护任务,实现安全支护。

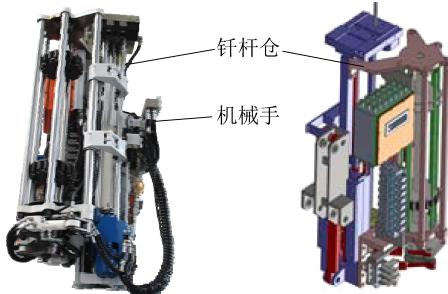


图9 自动锚索钻机

Fig.9 Automatic roof bolter

千米级快速掘进成套装备系统于2018年6月在神木汇森凉水井矿投入使用,日最高进尺75 m,月最高进尺1 506 m,掘进队人员数量减少25%^[37]。

3 掘进装备的国际与国内标准

国内已颁布了MT/T 238.3—2006《悬臂式掘进机第3部分 通用技术条件》、MT/T 971—2006《悬臂式掘进机 电气控制设备》、MT/T 1138—2011《悬臂式掘进机 切割机构设计导则》等20余种悬臂式掘进机产品系列化的煤炭行业标准,满足了国内掘进机标准化要求。但是,连续采煤机、掘锚一体机等设备的有关标准还未颁布,现主要按悬臂式掘进机相关标准作为检验依据,因相关结构和参数的差异性,悬臂式掘进机相关标准无法全面衡量连续采煤机、掘锚一体机的制造水平,具有一定局限性。

国内掘进装备在产品可靠性上与国外装备差距较大,主要原因不仅是原材料和设计水平,还有制造工艺水平及产品质量控制。国外设备经过多年技术积累,形成了成熟的技术标准,成为装备高可靠性的保障。澳大利亚发布的连续采煤机机械设计标准(MDG17)^[38],规定了操作安全、制动系统、噪声、液压系统、整机结构、结构件焊接质量及检测等的技术要求。国内掘进装备标准应与国际接轨。除单机标准对接国外标准要求,借助国际标准化组织采矿技术委员会(ISO/TC82)组织,积极对标国际同类标准外,其他安全类标准也应满足国际化标准组织的系列化要求,完整的、先进的技术标准体系才能提高装备可靠性,同时这也是国内掘进装备走出国门的

前提。

4 掘进技术与装备的发展趋势

在科研人员不懈努力下,我国煤矿井下掘进技术与装备得到了快速发展,尤其是“机械化换人、自动化减人”政策出台以来,一批先进科技成果得到转化应用。目前仍然存在单班下井人员在千人的矿井,巷道掘进生产系统复杂,掘进工作面数量多、作业用人多,自动化、智能化程度不高等实际问题。因此,需要结合我国煤矿实际地质条件,因地制宜,精准施策,逐步发展和完善掘进技术与装备体系。进入“十四五”时期,世界能源产业将发生深刻变革,掘进装备研究应重点提高掘进自动化和智能化水平,提升掘进效率及安全性,实现掘进工作面单班作业9人以下,人均效率提高20%以上,为智慧矿山建设提供有力支撑,逐步推进我国掘进技术装备的高端发展。

4.1 巷道掘进基础理论与方法

煤矿井下巷道掘进是一个复杂的系统工程,施工对象是构造复杂的煤岩体。利用遥感、大数据、云计算等现代手段分析我国煤炭赋存区域的构造情况,为掘进装备与工艺的优选提供依据;加强锚杆支护效果和围岩条件的在线监测技术研究,实现掘进工艺参数随围岩条件实时优化,在保证安全掘进的前提下尽量减少掘进工作面支护密度,将支护任务尽量滞后由其他钻机施工完成,提升掘锚平行作业率,最终实现掘进效率的科学提升;同时,加大多物理场耦合作用下围岩强化机理研究,构建临时支护、永久支护与截割煤岩三场耦合作用模型,为永久支护效果评价、截割路径优化、临时支护和永久支护空顶距的优化、钻机工作参数匹配等提供重要参考;加强截割机构动态特性、生产效率、比能耗的分析与试验研究,建立岩壁截割试验场,为截割机构的设计和升级改造提供平台支撑;深入开展“大截宽”下截割能耗优化研究,进一步提高薄煤层大截宽滚筒的破岩能力和生产效率。

4.2 智能化和成套化的高端装备

煤炭生产企业对智能化、成套化的高端掘进技术装备的需求日趋强烈。掘进装备已加快步伐将信息化、自动化、远程遥控、人机交互等元素融入到装备之中,增强装备智能化水平,进一步降低作业人员的劳动强度。配置的集中控制平台将自动顺序控制、高级诊断功能、机器性能监测分析系统组合在一起,可使掘进系统处在高效低耗的最佳状态。掘进机自动截割控制系统实现了截割断面自动成形。并

下巷道封闭空间内掘进装备导航一直是实现装备机器人化作业的“卡脖子”关键技术,澳大利亚联邦科学研究院等国内外科研机构针对该项技术一直在持续不断探索,已有样机产品推出,试验效果有待检验。

矿井绿色安全高效生产促使掘进系统不断地进行功能集成化和装备成套化研发。快速掘进成套装备为掘支运一体化高效掘进提供了装备支撑,但掘探一体化、智能锚钻、智能控制等关键技术仍有待突破。发展掘、锚、探一体化技术,研制高效掘锚探综合机组,解决全断面掘进工作面超前探测的技术难题;发展自动锚杆钻机与掘锚一体机的集成技术,实现工作面智能掘锚,无人掘进;研究超宽带定位技术等近感探测技术,实现多机自动跟进、防碰撞及人员接近预警;开展掘进工作面数据感知、交互、上传及健康诊断技术研究,建立成套装备数据感知系统,构建融合Wi-Fi、5G等无线通信技术的工作面信息网络,实现人员定位信息、视频图像、语音、工业数据的共网高速传输;推进快速掘进地面监控中心升级,实现对掘进工作面人、机、环境的集中管理与监控,融合应用大数据和云计算等技术,实现数据存储、分析与判断。积极开展数字孪生技术在掘进工作面的应用^[39]。

4.3 掘进机器人的研制

煤矿井下灾害种类繁多、安全风险大,存在众多潜在威胁,尤其在顶板稳定性差、瓦斯含量高等条件的施工过程中。因此,开展掘进机器人的研制,推进煤矿井下巷道掘进技术与装备向智能化方向转型升级,代替人在井下恶劣环境工作,实现掘进装备由远程操作到少人、无人操作的目标。2019年,国家煤矿安全监察局发布《煤矿机器人重点研发目录》^[40],对掘进、临时支护、钻锚机器人提出具体要求。在掘进机器人方面,研发能够自主决策、智能控制的掘进机器人,具备定位导航、纠偏、多参数感知、状态监测与故障预判、远程干预等功能,实现掘进机定位定向、位姿调整、自适应截割及掘进环境可视化;在临时支护机器人方面,研发掘进巷道围岩状态智能感知、自主移动定位临时支护机器人,具备支撑力自适应控制、支护姿态自适应调控、多架协同及远程干预等功能,确保掘进巷道临时支护及时可靠;在钻锚机器人方面,研发由锚杆机、锚杆仓及智能控制系统组成的钻锚机器人,实现锚杆间排距自动定位、整机自动或遥控行走、钻孔、填装锚固剂、锚杆装卸、锁紧锚杆等功能,满足井下巷道的快速支护要求。

目前国内外主要制造厂商和科研机构都在掘进

机器人技术领域开展探索和攻关,其中锚杆锚索支护机器人、掘进机器人以及辅助运输机器人等已成为行业研究热点。

煤矿巷道掘进作业人员数量多,大致占煤矿总作业人员的40%左右,而且工作环境恶劣,劳动强度大,装备自动化、智能化水平低,尤其是多样化的地质构造条件造成现有高端装备的适应性有限,各矿区装备技术水平不均。在未来我国综掘智能化发展过程中应以煤炭企业为主,自上而下建立相应技术标准,打破矿井装备、人员、环境之间的信息壁垒,构建智能掘进新模式。

5 结语

巷道掘进是煤炭开采的先期基础性工程,发展煤矿掘进技术与装备是新技术的推动、市场的需求,也是国家的要求。掘进技术与装备是煤炭工业高质量发展的核心技术与装备支撑,笔者通过系统分析掘进技术的相关基础理论与研究现状,调查研究适应不同地质条件的掘进装备与配套的掘进工艺,归纳制约我国煤炭掘进技术与装备发展的因素,在总结了现阶段掘进技术与装备的基础上,全面分析研究了现阶段国家政策导向、行业发展方向、市场内在需求、新技术应用,给出了掘进技术与装备未来发展方向与趋势。通过对煤矿掘进技术与装备的现状及趋势分析研究,总结出该领域的代表性研究成果与问题,以此为行业发展进步提供参考。

参考文献(References):

- [1] 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.
WANG Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1815-1820.
- [2] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):23-33.
KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.
- [3] 王虹,王建利,张小峰.掘锚一体化高效掘进理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(6):2008-2020.
WANG Hong, WANG Jianli, ZHANG Xiaofeng. Theory and technology of efficient roadway advance with driving and bolting integration [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2008-2020.
- [4] 张忠国.煤巷快速掘进系统的发展趋势与关键技术[J].煤炭科学技术,2016,44(1):55-60.
ZHANG Zhongguo. Development tendency and key technology of

- mine seam gateway rapid driving system [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 55-60.
- [5] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.
- KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [6] EVANS I. A theory of the cutting force for point attack picks [J]. International Journal of Mining Engineering, 1984, 2(1): 63-71.
- [7] EVANS I. Basic mechanics of the point-attack pick [J]. Colliery Guardian, 1984, 232(5): 189-193.
- [8] ROXBOROUGH F F, LIU Z C. Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting [C]//Proceedings of the sixth underground operator's conference. Kalgoorlie: Australia, 1995: 189-194.
- [9] GOKTAN R M. A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits [C]//Proc of the 4 th Int. Symp. On Mine Mechanization and Automation. Brisbane, Queensland, Australia: 1997: A4-A57.
- [10] BILGIN N, DEMIRCIN M A, COPUR H, et al. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43: 139-156.
- [11] HEKIMOGLU Q Z. A pick force calculation method suggested for tool lacing of mechanical excavators employing drag tools [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, doi: 10.1080/17480930.2017.1317946.
- [12] BALCI C, DEMIRCIN M A, COPUR H, et al. Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance [J]. The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, 104 (11): 633-641.
- [13] PARK Jinyoung, KANG Hoon, LEE Jaewook, et al. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 215-229.
- [14] NAHAK Sakuntala, DEWANGAN Saurabh, CHATTOPADHYAYA Somnath, et al. Characterization of failure behavior in distorted WC-Co tip of coal mining picks [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017, 17(1): 136-143.
- [15] SU Okan, AKKA Muhammet. Assessment of pick wear based on the field performance of two transverse type roadheaders: a case study from amasra coalfield [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020.
- [16] 王立平. 采掘机械镐型截齿截割破岩机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- WANG Liping. Study on failure mechanism of rock cutting by conical picks of mining machinery [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [17] 王 想. 镐型截齿破岩机理及悬臂式掘进机截割性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- WANG Xiang. Study on rock breaking mechanism using conical picks and cutting performance of roadheaders [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [18] 张倩倩, 韩振南, 张梦奇, 等. 截齿破岩机制及截线间距优化试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2172-2179.
- ZHANG Qianqian, HAN Zhennan, ZHANG Mengqi, et al. Experimental study of breakage mechanisms of rock induced by a pick and associated cutter spacing optimization, [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2172-2179.
- [19] 张梦奇, 郝建生, 马健康. 锥形截齿旋转破岩切割力预测方法试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 98-103.
- ZHANG Mengqi, HAO Jiansheng, MA Jiankang. Experimental study on rock cutting force by rotational moving for coal mining equipment conical pick [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 98-103.
- [20] 张倩倩, 韩振南, 张梦奇, 等. 冲击载荷作用下锥形截齿磨损的试验和数值模拟研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 58-65.
- ZHANG Qianqian, HAN Zhennan, ZHANG Mengqi, et al. Tests and simulation for wear of conical pick under impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 58-65.
- [21] COPUR Hanifi, BILGIN Nuh, BALCI Cemal, et al. Effects of different cutting patterns and experimental conditions on the performance of a conical drag tool [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(6): 1585-1609.
- [22] 王学成, 闫献国, 董 良. 深冷回火处理对掘进机截齿齿尖硬度的影响研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 45-49.
- WANG Xuecheng, YAN Xianguo, DONG Liang. Effect of cryogenic tempering treatment on hardness of pick tip of roadheader [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 45-49.
- [23] 徐小粤. 掘进机截割头截齿安装参数的检验 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(5): 59-61, 38.
- XU Xiaoyue. Inspection of cutting bit installation parameters for cutting head of mine road header [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(5): 59-61, 38.
- [24] 张梦奇, 闫献国. 截割头齿座参数化定位技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 23-29.
- ZHANG Mengqi, YAN Xianguo. Research on parameterized positioning technology for pick box of cutting head [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 23-29.
- [25] EYYUBOGLU E M, BOLUKBASI N. Effects of circumferential pick spacing on boom type roadheader cutting head performance [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20: 418-425.
- [26] 郝建生. 煤矿巷道掘进装备关键技术现状和展望 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 69-74.
- HAO Jiansheng. Present status and outlook of key technology for mine roadway heading equipment [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 69-74.
- [27] GERICKE B L, KLISHIN V I, GERICKE P B. Highly efficient hard rock-breaking tool for mining machines [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 262: 12019-12026.

- [28] BROWN E T. Fifty years of the ISRM and associated progress in rock mechanics [C]. Proc 12th ISRM Cong on 'Rock mechanics', 2011; 29-45.
- [29] 王焱金,张建广,马昭.综掘装备技术研究现状及发展趋势 [J].煤炭科学技术,2015,43(11):87-90.
WANG Yanjin, ZHANG Jianguang, MA Zhao. Present situation and development of fully mechanized excavating equipment [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 87-90.
- [30] TIRYAKI B, GIPPS I D, LI X S. Laboratory comparison of mini-discs with point-attack picks [J]. Advanced Materials Research, 2010, 126: 189-194.
- [31] SIFFERLINGER Nikolaus August, HARTLIEB Philipp, MOSER Peter. The importance of research on alternative and hybrid rock extraction methods [J]. BHM Bergund Hüttenm nnsische Monatsshefte, 2017, 162(2): 58-66.
- [32] 刘建琴,刘蒙蒙,郭伟.硬岩掘进机盘型滚刀回转破岩仿真研究 [J].机械工程学报, 2015, 51(9): 199-205.
LIU Jianqin, LIU Mengmeng, GUO Wei. Research on the simulation of cutting rock rotary by hard rock tunnel boring machine disc cutters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (9): 199-205.
- [33] 江红祥.高压水射流截割头破岩性能及动力学研究. [D] 徐州:中国矿业大学, 2015.
WANG hongxiang. Study on rock fragmentation performance of high-pressure water-jets cutting head and its dynamics [D]. Xuzhou: China University of mining and technology, 2015.
- [34] CICCU R, GROSSO B. Improvement of the excavation performance of PCD drag tools by water jet assistance [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43: 465-474.
- [35] HOOD M. Waterjet-assisted rock cutting systems the present state of the art [J]. International Journal of Mining Engineering, 1985(3): 91-111.
- [36] CHAPMAN Young. Controlled foam injection method and means for fragmentation of hard compact rock and concrete: US Patent 6,375,271 B1 [P]. 2002-04-23.
- [37] 张小峰.高效快速掘进后配套系统在大柳塔矿的应用 [J].煤炭技术,2016,35(9):262-263.
ZHANG Xiaofeng. Application of supporting system after efficient and rapid excavation in Daliuta Mine [J]. Coal Technology, 2016, 35(9): 262-263.
- [38] ME Ż YK Arkadiusz, PAWLAK Mariusz, KANIA Jan, et al. A new concept of vibration-control system in continuous miner machine [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11 (1): 2072050824.
- [39] Mine Safety Operations Division. New south wales department of primary industries. mechanical design guideline for the construction of continuous miners [S/OL].[2020-06-04]. <https://www.dpi.nsw.gov.au/minerals/safety>.
- [40] 葛世荣,张帆,王世博,等.数字孪生智能采煤工作面技术架构研究 [J].煤炭学报,2020,45 (6): 1959-1972.
GE Shirong, ZHNAG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workforce: Technological frame and construction [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (6): 1959-1972.
- [41] 杨健健,张强,王超,等.煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展 [J].煤炭学报,2020,45 (6):2045-2052.
YANG Jianjian, ZHANG Qiang, WANG Chao, et al. Status quo and development of robotization research of coal mine roadheader [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (6): 2045-2052.