

金属矿山深部地下开采高温掘进面降温现状及发展趋势探究

宋晓亮¹, 石 坤², 张 鑫³

(1. 陕西建材院工程设计有限责任公司; 2. 新汶矿业集团有限责任公司; 3. 西安建筑科技大学资源工程学院)

摘要:随着国际矿产资源的开发力度日益加大,如何保障安全生产是目前矿山亟待重点解决的问题之一。分析了目前金属矿山深部地下开采高温掘进面的热源来源及热害影响现状,并对现有降温技术类型、降温技术原理、适用环境等进行总结分析,着重归纳了现有技术的不足与局限性。基于未来发展的实际需求,给出了5个方面的降温技术发展趋势。指出了矿井空调降温技术在未来发展会有更广泛的应用,并强调了节能高效制冷空调技术、新材料融合及智能化降温系统是矿井降温技术研究的主要发展趋势。研究成果可为金属矿山深部地下开采高温掘进面降温技术提供参考,也为矿山安全生产提供借鉴。

关键词:深井开采;地下开采;高温热害;金属矿山;掘进面;降温;矿井空调降温;新材料;智能化

中图分类号:TD727

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)08-0001-06

doi:10.11792/hj20250801

引 言

随着采矿深度的逐渐增加,深井开采面临的环境问题也日益突出,而高温热害问题是目前深井开采中亟待解决的首要问题之一^[1]。开采深度的逐渐增加,使地热流场加剧矿井内部岩温升高,加之开采设备的功率增大、数量增多、生产强度的提升均会引起放热量增大的现象^[2-3],致使矿井温度持续升高。此外,矿井高岩温、渗水、生产用水蒸发等因素形成了掘进面作业环境的高湿度^[4]。相关文献提出作业人员长期在高温高湿环境下作业会导致身体健康遭受严重损害^[5-7]。一方面,高温容易致使人体热平衡遭到破坏,人体通过对流、辐射和蒸发方式散热的能力大幅减弱,会产生如中暑、心率加速、血压异常等一系列对健康有害的反应^[5-6],甚至引发各类慢性疾病^[7]。另一方面,高温对工人生理和心理产生影响,使工人工作协调能力降低、动作准确性和反应速度变慢,增加人为失误的概率,在劳动生产率下降的同时容易引发灾害和事故,对井下安全生产构成严重威胁^[8-9]。因此,迫切需要进行矿井深部掘进作业面降温技术的相关研究。

同时,深井开采还面临着严重的通风不足、作业场所通风不畅及通风成本高等实际问题^[10],使得矿井机械通风系统难以动态满足深井开采的需要。随着开采深度增加,通风线路长、通风阻力大、漏风点多等

原因^[11],使得传输效率大大降低,通风成本直线上升,深井通风愈加困难。生产作业面一旦出现爆破粉尘、炮烟和有毒有害气体不能及时排出或有效稀释的情况,将不可避免地井下工人身心健康造成危害^[12]。

全国矿井高温热害普查资料显示,中国深部矿井中,有一级热害矿井34个,占比24.64%,主要分布在江苏、山东、黑龙江、吉林、河南等省^[13]。国外同样存在许多高温矿井,例如:南非某铂金矿的Merensky矿层经过监测后平均温度达到43.51℃,每百米平均地温增加2.27℃^[14]。为确保安全生产,GB 16423—2020《金属非金属矿山安全规程》规定^[15]:采掘作业地点的干球温度大于28℃时,应采取降温或其他防护措施。现有的降温技术可分为人工降温技术和非人工降温技术^[16]。现有结果表明,非人工降温技术的降温能力很小,需要人工制冷技术作为辅助。虽然目前相关技术及措施已取得了一定的研究成果,但对于地下高温金属矿山掘进面的降温研究仍是不足,更是缺少对现有技术的综述性总结及结合时代需求下的发展趋势研究。

鉴于以上实际情况,本文对目前金属矿山深部地下开采高温掘进面降温现状及不足进行分析,并对未来发展趋势进行总结分析。对中国金属矿山深部地下开采高质量开发提供数据支持,有利于解决高温热害问题,减少因高温引发的各类安全事故,确保矿产资源开采工作能够顺利、高效地持续进行,为中国矿

收稿日期:2025-03-11; 修回日期:2025-05-01

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBQN-0453);陕西省重点研发计划工业攻关项目(2023-YBGY-137);西安建筑科技大学与西安建大城市规划设计研究院有限公司合作研究课题资助项目(X20240067)

作者简介:宋晓亮(1989—),男,工程师,从事非煤矿山设计咨询、安全评价等方面的工作和研究;E-mail:1143348063@qq.com

业的长远稳定发展奠定坚实基础。

1 金属矿山深部地下开采高温掘进面热源及危害

中国矿井热害一般分为4种类型:正常地热增温型、岩温地热异常型、热水地热异常型和碳硫化物氧化热型^[17]。矿井热害形成因素包括以下几点:巷道围岩散热、地下热水放热、机电设备散热、运输的废石及矿石散热、人体散热、地热及其他热源散热等^[18]。

1.1 巷道围岩散热

70多年前,SPALDING^[19]就已经提到原岩温度高会很大程度地限制采矿作业的深度,开采深度增加,原岩温度会上升。相关文献给出中国深部平均地温每百米增加2℃~4℃^[19]。深井深度超过1 000 m后,地层散发的热量占散热总量的比例约为50%。例如:法国劳伦煤矿的采深到达1 000~1 300 m时,温度为30℃~45.5℃^[20]。此外,其他国家的超千米深井同样会面临热害问题。

1.2 地下热水放热

在部分地下高温金属矿山中存在地下热水涌出的情况,热水本身蕴含着大量的热能,当热水涌出到巷道或者掘进面附近时,会与周围的空气及岩体等发生热交换,将自身携带的热量释放出来。热量会从温度高的热水向温度相对较低的空气、岩体等传递,使得掘进面周围环境温度升高,形成局部地热^[21],严重影响作业人员的正常工作及设备的安全运行等。温差越大,单位时间内传递的热量就越多;接触面积越广,热量交换的范围也就越大;而空气流速适当增加有助于带走更多热量,但如果热水涌出量较大且流速

快,依然会使掘进面温度持续升高。

1.3 机电设备散热

机电设备散热是金属矿山深部地下开采掘进面温度升高的重要热源之一^[22]。在巷道掘进过程中,需要运用到大功率的机电设备,如采掘机械、提升机械、运输电机车等。这些机电设备在运转时会消耗电能,而其中大部分会转化为热能。当掘进面有风流流过时,机电设备产生的热量会以热对流的形式散发到空气中。因此,机电设备作为热源时,其周围的空气受热后温度升高、密度变小,从而向上流动,周围较冷的空气则会补充进来,继续被加热、上升,如此循环,使得整个掘进面的风温不断升高^[23]。

1.4 其他热源

许多金属矿山中存在着硫化矿物等具有氧化性的矿物,会与氧气发生氧化反应,并且在氧化过程中释放热量,释放的热量不断积聚,从而致使井下温度升高^[24]。而这种氧化放热是一个持续的过程,只要有新鲜的矿物表面暴露且有氧的持续供应,放热就会不断进行。另外,其他热源还包含如人体散热、爆破放热、充填料放热、生产用水放热等,其影响程度因条件而异。而且矿井进风温度、井下风流的压缩和膨胀等都会影响井下气温的变化^[25]。

2 金属矿山深部地下开采高温掘进面降温措施及不足

2.1 掘进面降温措施

就降温技术研究而言,中国开发了多种相关技术手段,已在深部高温矿井展现出较好的应用前景。现有降温技术汇总如表1所示。

表1 现有降温技术汇总

Table 1 Summary of existing cooling technologies

降温技术	措施		效果	不足
非机械降温技术 ^[26-27]	隔热	隔热材料,隔热设施的布置	隔热效果较为突出,阻隔热量传递、降低掘进面温度	成本相对较高
	个体防护	个体防护装备:降温服,降温头盔,制冷背心等	通过内置的制冷介质或制冷循环系统,带走人体散发的热量,从而保持工人身体的凉爽	制冷续航时间有限,价格相对较高
	加大风量方式	更换大功率通风机、增加通风机数量或优化通风网络等方式	增加风量排出热量、降低风温及改善人体散热条件	井巷断面大小的限制,通风机能力限制
	合理通风系统选择	减少进风路线长度,通风系统与实际开拓系统的良好结合	进风路线越短,风流在沿途吸收的热量就越少,到达掘进面时的温度相对就越低	矿体分布的差异使其形式略有不同
矿井空调降温技术 ^[28]	水冷却	利用制冷剂的制冷机组进行井下热害控制的方法	在空气冷却器内,冷水与高温风流进行热交换,冷水吸收风流中的热量,自身温度升高后再回流至制冷机组进行重新冷却,如此循环,达到降低掘进面风流温度的目的	制冷机组的制冷能力、冷水流量及热交换情况要求较高
	冰冷却	制冰机制出的冰水混合物通过管路运输到工作面及降温地点喷洒,通过冰水的物理变化进行热量交换;在井下建立融冰池,待形成冰水混合物后将冷冻水输送到采掘工作面,利用空冷器进行换热,达到热害控制的目的	在融冰装置中,冰块吸收周围风流的热量逐渐融化,变成低温水,低温水再与风流进行热交换,实现风流降温	制冰及输送设备成本较高,冰块或冰浆的输送管道系统较为复杂

从表1可以看出:隔热材料对于隔热效果较为突出,目前常用的隔热材料也有多种,如聚氨酯泡沫、岩棉、玻璃棉及新型的气凝胶毡等。因此,常采用在巷道壁面敷设隔热层的方式,部分矿山还会对通风管道等进行隔热包裹。隔热材料增大了热量传递的热阻,减少风流吸收的热量,降低了风流温度,实现掘进面温度下降^[26]。个体防护装备能够主动帮助人体散热,减轻高温对身体的不良影响,减少因高温导致的注意力不集中、操作失误等情况发生^[29];加大风量在一定程度上确实能够起到明显的降温作用,但受制于井巷断面及通风机的性能指标^[27]。由于矿山自身的地质条件和开采规划存有差异,需要对不同通风系统进行选择、规划。这就使得对于开采中或实际作业环境中的矿山应用明显不足,更多是前期设计使用。综合以上看来:水制冷技术的适用范围较广,尤其适用于有稳定水源且巷道条件便于铺设水管路的矿山。从降温效率来看,其能够较为有效地降低掘进面风流温度,一般可使风流温度降低 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ ^[28],具体取决于制冷机组的制冷能力、冷水流量及热交换情况等因素。而制冰制冷技术有着更加显著的优势,冰的相变潜热较大,在同等制冷量需求下,制冰制冷所需的输送量可能比水制冷更小^[30],能减少输送设备的规模和能耗;另一方面,制冰可以在地面利用低谷电价等优惠时段进行,降低运行成本^[31]。然而,仍需要对制冰制冷技术所面临的实际问题进行因矿制宜的应用研究。

2.2 降温技术实施局限

从技术层面来看,部分降温技术的成本依然较高,一些技术在复杂地质条件、长距离巷道等特殊工况下的适用性需进一步提高^[32]。从整体的研究角度来看,不同地区的矿山地质条件差异较大,如何开发出更具通用性、灵活调整的降温技术方案需进一步探索与实践;在保障降温效果的同时,实现节能减排、减少对环境的影响也是未来需要重点关注和解决的方向。目前降温技术的实施局限性主要分为以下几项:

1)局部通风降温存在的局限性。随着掘进深度不断增加及巷道距离的拉长,轴流风机要将地面的新鲜空气输送到作业面,面临的阻力极大,长距离的输送过程会造成大量的风量损失,使得最终到达作业面的新鲜空气量严重不足,难以起到良好的降温作用;在空气输送过程中胶质软管风筒由于自身材质特性会产生较大的阻力,进一步削减风量。此外,其隔热性能差,当外界围岩温度较高时,风筒内的空气在流经过程中容易吸收热量^[33],使得到达作业面的风温升高,风量小、风速低的情况加剧;在井下相对封闭的空间中,轴流风机运行产生的噪声加剧工人的身心健康

影响^[33],造成风机关机不送风的现象,通风降温效果严重下降。

2)其他降温技术的局限性。在实际操作中,有部分单位会采取释放作为凿岩机动力源的压缩空气来缓解高温高湿状况^[34],但效果并不理想。一方面,压缩空气的温度接近常温,难以对高温的作业环境起到实质性的改善作用。另一方面,释放压缩空气会造成作业气源无法保障,影响到其他依赖压缩空气的设备正常运行^[34],同时导致运营成本大幅升高;此外,部分降温技术在复杂地质条件或深部矿井应用时会受到较大限制。例如,在地层结构复杂、岩石特性多变的深部矿井时,特定地质条件研发的制冷技术可能无法正常发挥作用。

3)成本问题的局限性。不同的降温技术在设备购置、安装、运行及维护等方面所需成本差异较大,且其降温效果也各有不同。对于通风降温技术,加大风量需要更换大功率通风机来实现,设备购置成本、安装成本、运行成本、维护成本均有较大支出,成本预算成为其首要制约条件;对于隔热技术,隔热材料成本因种类不同而有较大差别。隔热设施布置时,敷设施工需要人工成本,若对通风管道等进行包裹,还涉及额外的包裹材料及施工费用;对于水制冷技术所需的设备较为复杂,地面的制冷主机价格昂贵,相关配套设备,加上安装调试、设备维护维修等费用相对较高。同样对于制冰制冷技术,制冰机的购置成本较高,整个系统的初期投资成本相比水制冷技术更高^[35]。

因此,针对目前的局限性需要综合多方面因素考虑。不仅要根据矿山自身的地质条件、巷道布局、经济实力等来选择合适的降温技术组合,还要注重技术的长期运行稳定性和维护成本控制,实现降温效果与成本效益的良好平衡,确保矿山在安全舒适的环境下高效生产。

3 金属矿山深部地下开采高温掘进面降温发展趋势

3.1 深化降温机理与理论研究

目前缺少对不同地质条件、开采深度及不同类型金属矿山中各热源的热量释放规律、相互影响关系等的深入探究。同时,由于热传递过程涉及围岩、风流、机电设备等多介质间的复杂换热^[36],因此,针对不同矿体仍需要进一步完善热传递机制的理论模型,精确量化各因素对掘进面温度升高的影响。此外,当前研究缺少对作业人员在高温环境下的热舒适性研究,需要对温度、湿度、风速、劳动强度等多方面因素进行联动研究,建立适用于金属矿山深部地下开采高温掘进面特殊工况的热舒适评价指标体系,使降温措施的制

定更贴合保障作业人员健康与舒适工作的实际需求。

3.2 相关技术研发与节能高效制冷技术

针对深度大、岩温高、巷道距离长的独头掘进工作面局部通风局限问题,研发高效的通风设备和新型风筒材料。同时,对局部通风系统的风流组织进行优化模拟,设计更合理的通风布局,确保新鲜贯穿风流能有效送达作业面。

随着环保与节能理念在各行业的不断深入,金属矿山深部地下开采高温掘进面降温领域也愈发重视节能型制冷空调技术的发展。以地热、热涌水、电站余热等为制冷动力的节能减排制冷空调技术展现出了广阔的发展前景^[37]。

从资源利用角度来看,利用地热、热涌水的热量来助力制冷过程,实现了对掘进面的有效降温,不仅提高了资源利用率,还避免了能源的浪费。对于邻近电站的矿山,合理引入电站排放的余热作为制冷空调的动力,在降低矿山降温成本的同时,也使得电站余热得到了有效利用,减少了对周边环境的热排放影响。从环保节能角度来看,以地热、热涌水、电站余热等为制冷动力的技术,减少了对电能的依赖,降低了因发电产生的二氧化碳等温室气体排放,有助于缓解能源消耗带来的环境压力;从降低运营成本角度来看,利用天然热源或余热作为制冷动力,可大幅减少矿山企业在制冷空调系统运行过程中的电费支出等成本,从长期运营来看,其节省的成本相当可观。综合来看,以地热、热涌水、电站余热等为制冷动力的节能减排制冷空调技术未来有望成为金属矿山深部地下开采高温掘进面降温的主流技术^[38],在推动矿山可持续发展、保障井下作业安全舒适等方面将发挥更为重要的作用。

3.3 新材料融合与制冷降温技术

随着科技的不断发展,金属矿山深部地下开采高温掘进面降温领域也逐渐呈现出新材料融合的趋势。从隔热角度来看,纳米气凝胶材料就是一种极具前景的新材料^[39],具有极低的导热系数,是目前隔热性能最好的材料之一。将其应用于金属矿山深部地下开采高温掘进面的巷道壁面隔热处理时能够更有效地阻隔围岩向巷道内风流传递热量。同时,在制冷方面,通过纳米技术对制冷剂进行改性,使其相变吸热效率更高,从而增强制冷效果^[40]。而且纳米传感器能够实时精准地感知温度、压力等参数变化,实现制冷系统的精细化运行,降低能耗。

新技术与新材料的融合,对于提升降温效果和拓展应用场景有着显著的作用。不仅可以提升降温效果,能将掘进面的温度控制在更适宜的范围内,保障作业人员的健康和安全,提升劳动生产率;还可以拓

展应用场景,使其满足在深部高温、长距离巷道的复杂工况,或不同地质条件、不同矿产类型的矿山环境,都能通过调整材料的使用方式或技术的参数配置,实现有效降温^[41]。新技术新材料的融合为金属矿山深部地下开采高温掘进面降温带来了新的机遇和希望,未来需进一步深入研究和实践探索,使其更好地应对日益严峻的高温热害挑战。

3.4 智能化降温系统

随着物联网、大数据、人工智能等先进技术逐渐地融入金属矿山深部地下开采高温掘进面降温领域,构建智能化降温系统已然成为未来的重要发展趋势^[42]。通过在掘进面及相关区域布置大量的温度传感器、湿度传感器等各类物联网感知设备,可实时收集环境数据,并将数据准确无误地传输至统一的监控平台。依托大数据技术,能够对海量的温度数据及其他关联数据(如通风量、设备运行参数等)进行深度分析^[42];可以掌握挖掘不同时间段、不同作业条件下温度变化的规律,为制定精准的降温策略提供依据;还能通过数据分析提前预测温度升高趋势,以便提前采取应对措施。在此基础上,加入人工智能技术,让降温系统具备自动调控降温设备的能力。智能算法可以根据实时监测数据及预设的温度阈值,自动判断是否需要启动、调制冷设备的功率^[43],或者改变通风系统的通风量、风向等参数,避免能源浪费,实现节能增效。

智能化趋势对于提高降温效率、优化资源配置有着重大意义。从提高降温效率来看,实时监测与自动调控能够确保降温措施的及时性和精准性,避免了人工干预可能存在的滞后性和误差,使掘进面的温度始终维持在较为适宜的状态,为作业人员创造良好的工作环境。在优化资源配置方面,通过精准调控设备运行,避免了设备的过度运行或无效运行,降低了能耗,减少了设备的损耗,延长了设备使用寿命,同时也降低了矿山企业的运营成本,提升了整体经济效益。综合来看,智能化降温系统有望成为解决金属矿山深部地下开采高温掘进面高温热害问题的关键手段,也是推动矿山行业朝着更加安全、高效、可持续发展的方向发展的必然趋势。

3.5 增加实践与示范项目

选择不同地质条件、开采深度、热源类型的典型地下高温金属矿山,建立多个掘进面降温技术试验示范点。在示范点全面应用和测试各类新技术、新设备、新材料及新的管理措施等,通过长期的实际运行数据收集和效果评估,总结经验教训,为其他矿山提供可参考、可复制的成功案例^[44]。此外,要多维度鼓励矿山企业与高校、科研院所紧密合作,将科研成果

更快地转化为实际生产力。科研机构针对企业面临的具体降温难题开展专项研究,企业则为科研项目提供试验场地、设备及资金支持等,形成产学研用协同创新的良好局面,加速金属矿山深部地下开采高温掘进面降温技术的更新换代和推广应用。通过以上建议的实施,有望在金属矿山深部地下开采高温掘进面降温领域取得更多突破,为保障矿山井下作业安全、高效及行业的可持续发展奠定坚实基础。

4 结论与展望

如何保障安全生产是目前亟须重点解决的问题之一。本文分析了目前中国金属矿山深部地下开采高温掘进面的热源来源及热害现状,并对现有的降温技术类型及不足等现状进行总结分析。基于此,给出了金属矿山深部地下开采高温掘进面降温技术的未来发展趋势,主要结论如下:

1)在热源分析方面,明确井下热源是多因素共同作用的结果,包含了巷道围岩散热、地下热水放热、机电设备散热及其他热源散热等。

2)对比总结分析了现有降温技术的工作原理、实施效果及不足,并从目前现有技术的局限性角度出发,重点从矿山自身的地质条件、巷道布局、经济实力及运行稳定性和维护成本等因素来选择合适的降温技术组合。

3)未来发展趋势应以节能型制冷空调技术、新材料融合技术,以及智能化降温系统为未来发展的主流方向。

总之,本研究较为全面地梳理了金属矿山深部地下开采高温掘进面降温的现状,剖析了现存问题,并对未来发展趋势做出了合理展望,以期为该领域后续的研究与实践提供有益参考,助力矿山行业更好地应对高温热害挑战,保障井下作业安全、高效进行,推动行业可持续发展。

参考文献

- [1] 韩颖,李向威,闫志佳.我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望[J].煤炭技术,2023,42(10):186-189.
- [2] 王运敏,李刚,徐宇,等.我国深部矿井热环境调控研究近20 a进展及展望[J].金属矿山,2023(3):1-13.
- [3] 黄兆阳.矿井高温采煤工作面热害致因及降温技术研究[D].合肥:安徽理工大学,2024.
- [4] 孔艳婷,康宏奎,郭耀昇.煤矿井下地质构造对煤矿开采的影响[J].内蒙古煤炭经济,2023(6):174-177.
- [5] MILOŠEVIĆ I, STOJANOVIĆ A, NIKOLIĆ Đ, et al. Occupational health and safety performance in a changing mining environment: Identification of critical factors [J]. Safety Science, 2025, 184: 106745.
- [6] ZHANG L, WANG W, YUE F, et al. Research on cold-energy loss of long-distance sleeve-type insulated pipe for high-temperature deep mines[J]. Energies, 2025, 18(2): 397.
- [7] 柳光磊.矿井高温高湿环境下人体热交换机制及实验研究[D].湘潭:湖南科技大学,2023.
- [8] 聂兴信,王廷宇,孙锋刚,等.高温矿井热湿环境对人体机能的影响[J].金属矿山,2020(4):186-193.
- [9] 童兴.高温煤矿作业人员热反应规律及热应激计算评价模型研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2018.
- [10] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
- [11] 杨卓明,朱瑞军,陈庆刚.金属非金属矿山深井通风关键技术与工程实施对策[J].中国矿山工程,2024,53(1):79-82.
- [12] 邱观华,马帅帅,刘喜亮,等.机械通风参数对半煤岩巷道掘进面粉尘扩散特性的影响[J].煤矿机械,2024,45(9):43-46.
- [13] 姚韦靖,庞建勇.我国深部矿井热环境研究现状与进展[J].矿业安全与环保,2018,45(1):107-111.
- [14] 黄永祥.南非某铂金矿降温系统设计研究[J].矿业研究与开发,2021,41(6):131-136.
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属非金属矿山安全规程:GB 16423—2020 [S].北京:中华人民共和国应急管理部,2020.
- [16] 崔益源,李坤,梅国栋,等.深井热害分析与控制技术研究进展[J].有色金属(矿山部分),2021,73(2):128-134.
- [17] 王君健.高温掘进巷道通风与局部隔热耦合降温机理与技术研究[D].长沙:中南大学,2023.
- [18] 康婉婷,刘清,余涛.相变温控技术在矿井热害防控中的应用进展[J].地下空间与工程学报,2024,20(增刊2):1 028-1 038.
- [19] SPALDING J. Deep mining: An advanced textbook for graduates in mining and for practising mining engineers [M]. London: Mining Publications, 1949.
- [20] 王进,赵运超,梁栋.矿井降温空调系统的分类及发展现状[J].逻辑学研究,2007(2):109-113.
- [21] 陆博,喻晓丽,李杰林,等.大红山铜矿西矿段地温梯度测定及热害地质成因分析[J].采矿技术,2022,22(3):215-218.
- [22] 陈虎,简俊常,张震,等.赵楼煤矿7302工作面热源分布特征[J].煤矿现代化,2023,32(1):75-79.
- [23] 李宵琳.煤研石山内部温度场无线监测系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [24] LI Z J, ZHU Z J, ZHOU K, et al. Law of characteristic gases production in the low-temperature oxidation stage of spontaneous combustion of sulfide ores [J]. Fuel, 2025, 380: 133195.
- [25] KIM Y S, CONG H N, DINH B H, et al. Effect of ambient air and ground temperatures on heat transfer in underground power cable system buried in newly developed cable bedding material [J]. Geothermics, 2025, 125: 103151.
- [26] 罗勇东,王海宁,张迎宾.矿井高温掘进巷道降温技术研究及应用[J].有色金属科学与工程,2020,11(1):85-91.
- [27] QU M, ZHANG Y, ZHANG X, et al. A review of the research progress of cooling technology in deep mining [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149: 1-23.
- [28] 左金宝.矿井空调降温系统分类及适用条件分析[J].能源技术与管理,2015,40(5):145-146.

- [29] 孙其飞,滕杰田,苏学凯,等.热害矿井个体御热装备设计优化与性能研究[J].黄金,2024,45(4):86-90.
- [30] CHEN Y, ZHANG X, JI J, et al. Cold chain transportation energy conservation and emission reduction based on phase change materials under dualcarbon background: A review [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86: 111258.
- [31] 张辉,营从光,张晓磊.矿井热害冰制冷降温技术经济性分析[J].能源技术与管理,2008(6):136-138.
- [32] 宋桂梅,张朝昌.高温矿井独头掘进面降温技术与方案对比[J].矿业安全与环保,2006(1):43-45.
- [33] 高思奇.矿用低压轴流风机气动噪声特性及叶尖噪声降噪研究[J].自动化应用,2024,65(18):28-30.
- [34] AKHTER M, TANG X, MALLAMS J, et al. Shockwave and plasma assisted rock cracking for geothermal drilling[J]. Renewable Energy, 2025, 241: 122351.
- [35] 张辉,营从光,张博,等.高温矿井冰制冷降温系统经济性[J].西安科技大学学报,2009,29(2):149-153.
- [36] 田龙,周智勇,陈建宏.配备辅助通风的高温矿井采掘区温度分布数值模拟[J].黄金科学技术,2020,28(1):61-69.
- [37] ZHANG C, WANG H, HUANG Y, et al. Immersion liquid cooling for electronics: Materials, systems, applications and prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 208: 114989.
- [38] 张爱民,叶勇,陈庆刚.深井矿山热害防治及制冷降温技术应用[J].中国矿山工程,2024,53(1):72-78.
- [39] LOU F, DONG S, ZHU K, et al. Thermal insulation performance of aerogel nano-porous materials: Characterization and test methods[J]. Gels, 2023, 9(3): 220.
- [40] SATHISHKUMAR A, SUNDARAM P, CHERALATHAN M, et al. Effect of nano-enhanced phase change materials on performance of cool thermal energy storage system: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 110079.
- [41] 黄康娜,李银川,邢之林,等.复合隔热材料在治理矿井热灾害中的应用[J].安徽建筑,2024,31(4):109-110.
- [42] 郑伟卫.智能化综采工作面装备选型及关键技术的研究应用[J].山东煤炭科技,2024,42(10):101-105.
- [43] PÉREZ-GOMARIZ M, LÓPEZ-GÓMEZ A, CERDÁN-CARTAGENA F. Artificial neural networks as artificial intelligence technique for energy saving in refrigeration systems—A review [J]. Clean Technologies, 2023, 5(1): 116-136.
- [44] 刘啸尘,康昊宸,干雨杭,等.高温矿井深部热源分析与降温措施模拟研究——以南方某硬岩铀矿井为例[J].铀矿冶,2024,43(4):76-84.

Cooling status and development trends of high-temperature tunneling faces in deep underground mining of metal mines

Song Xiaoliang¹, Shi Kun², Zhang Xin³

(1. Shaanxi Building Materials Research Institute Engineering Design Co., Ltd.;

2. Xinwen Mining Group Co., Ltd.; 3. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology)

Abstract: With the intensification of global mineral resource development, ensuring safe production has become one of the urgent issues that mines must address. This study analyzes the current sources of heat and the impacts of heat hazards at high-temperature tunneling faces in deep underground mining of metal mines. It also summarizes and analyzes existing cooling technologies in terms of types, working principles, and applicable conditions, with an emphasis on the deficiencies and limitations of current approaches. Based on actual future needs, 5 development trends for cooling technologies are proposed. The study points out that mine air-conditioning and cooling systems will see broader applications in the future and highlights that energy-efficient cooling technologies, integration of new materials, and intelligent cooling systems represent the main directions for future research in mine cooling. The findings can serve as a reference for developing cooling technologies for high-temperature tunneling faces in deep underground mining of metal mines and offer valuable insights for safe mine operations.

Keywords: deep mining; underground mining; heat hazard; metal mine; tunneling face; cooling; mine air-conditioning and cooling; new material; intelligentization