

地下金属矿山复杂环境下防护口罩适用性及制备方法研究

张晨煜¹, 张鑫^{2*}, 聂兴信¹, 孙泽宇¹, 周天瑜¹, 赵林海³, 李宗利³

(1. 西安建筑科技大学资源工程学院; 2. 温州理工学院建筑与能源工程学院;

3. 宝鸡西北有色二里河矿业有限公司)

摘要:当前国内金属矿山环境问题突出,矿山普遍使用的防护口罩仅重点针对颗粒物的过滤性能进行了研究,而对于复杂的地下金属矿山环境,防护口罩难以提供高效可靠的防护性能保障,加大了作业人员患职业病的概率。基于地下金属矿山复杂环境现状,从粉尘、有害气体、微生物等3方面进行分析,对比了常用矿用口罩的优缺点,重点阐述了现有过滤材料及其制备方法。在大力提倡矿井环境危害治理及预防呼吸系统职业病的背景下,展望了适用于地下金属矿山防护口罩过滤材料的未来发展趋势及研究方向。研究为地下金属矿山防尘装备的发展提供参考。

关键词:地下金属矿山;防护口罩;制备方法;过滤材料;粉尘;防尘装备

中图分类号:TD793

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0059-07

doi:10.11792/hj20251009

引言

随着中国矿山开采规模的持续扩大及大型机械设备的广泛应用,开采技术水平显著提升,从而实现了减员增效的目标。然而,技术进步也带来了新的挑战,特别是粉尘量的增加,进一步加剧了患职业病的风险。根据国家卫生健康委员会统计结果,截至2022年底,全国累计报告的职业病患者达91.5万人,其中,职业性矽肺病占比高达90%,且集中分布于采矿行业^[1]。

与瓦斯爆炸、煤尘爆炸和冒顶等事故不同,粉尘危害因具有累积性和隐蔽性而被忽视。然而,矽肺病对作业人员的健康威胁更为严重,其防控关键在于有效阻止粉尘吸入^[2],因此采取工程措施和佩戴防护口罩至关重要。尤其在工程措施无法完全消除粉尘的情况下,防护口罩作为最后一道防线,可显著降低呼吸性粉尘的暴露水平,从而降低职业病风险。

针对以上问题,研究基于地下金属矿山特殊环境现状,系统分析了地下金属矿山主要污染物,并从常用矿用口罩、过滤材料及材料制备方法等方面进行阐述,同时展望了过滤材料在地下金属矿山防护口罩的未来研究方向和技术创新。本研究旨在为金属矿山科学选用高效防护口罩提供可靠依据,从而提升矿井职业健康防护水平,保障矿山安全生产。

1 地下金属矿山环境复杂性分析

1.1 粉尘

在矿业生产活动中,粉尘作为一种主要固体颗粒物,源于凿岩、爆破、装运等操作,且生产操作会导致粉尘释放和扩散,从而对环境和人体健康构成潜在危害^[3]。金属矿山粉尘的复杂性体现在其含有多种金属元素,如铁、铜、锌、铝、铅、锰、钼、铬、钴、钾、钠、镉、锡、银、铟、铍、铂等。这些金属元素的存在形式和含量受多种因素影响,包括矿石成分、来源及开采方法等^[4]。不同矿石具有不同的物理化学性质,因此矿山粉尘中金属元素种类和含量具有差异性。

近年来,随着矿山开采机械化技术的不断提高与发展,矿产资源开发不断向深部推进,在提高矿山生产效率和质量的同时,也导致粉尘量显著增加,从而加剧了粉尘对工作环境和从业人员健康的危害程度^[5]。特别是在金属矿山采选过程中,大量粉尘,尤其呼吸性粉尘,对工作环境和人体健康构成双重威胁^[6]。此外,呼吸性粉尘中含有游离的SiO₂,其易长时间悬浮在空气中,对周围环境和人员健康造成持续性危害^[7-8]。作业人员长期暴露于粉尘环境中,极易患矽肺病等职业病,严重危害健康,同时也会加速生产设备磨损,缩短使用寿命,最终影响企业的经济效益。

收稿日期:2025-04-27;修回日期:2025-06-15

基金项目:陕西省重点研发计划工业攻关项目(2023-YBGY-137);陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBQN-0453);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(X20240067);陕西省教育厅服务地方专项计划项目(24JC050)

作者简介:张晨煜(1999—),男,硕士研究生,从事矿业工程等方面的研究工作;E-mail:zhangyu0623@xauat.edu.cn

*通信作者:张鑫(1991—),男,副教授,博士,从事通风除尘等方面的研究工作;E-mail:Zhangxin17@xauat.edu.cn

1.2 有害气体

地下金属矿山生产过程中会产生有毒有害物质,导致空气成分发生变化。金属矿山采矿过程中,常见的有毒有害气体包括但不限于:一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、硫化氢(H₂S)、二氧化硫(SO₂)及含氧碳氢化合物等。这些有毒有害气体的主要来源包括爆破作业中释放的炮烟、柴油机运转产生的废气、硫化矿物的氧化反应等。爆破后释放的大量炮烟弥散在空气中,不仅对作业人员的健康构成威胁,而且还会造

成设备腐蚀和环境污染。此外,部分作业人员对各类有毒有害物质的危害认知不足,加之自我防护意识差,致使中毒事故和矽肺病等职业病时有发生^[9]。

根据 AQ 2013.1—2008《金属非金属地下矿山通风技术规范 通风系统》^[10]、GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分:化学有害因素》^[11],矿井中常见有毒有害气体的职业接触限值见表1。

表1 常见气体职业接触限值及规程允许浓度

Table 1 Occupational exposure limits and permissible concentrations of common gases

序号	气体名称	OELs/(mg·m ⁻³)			矿山安全规程允许浓度限值	临界不良健康效应
		MAC	PC-TWA	PC-STEL		
1	一氧化碳(CO)	非高原			不得超过 30 mg/m ³ , 爆破后浓度降至 0.02 % 以下	碳氧血红蛋白血症
		高原	20	30		
		海拔 2 000 ~ 3 000 m	20			
		海拔 3 000 m 以上	15			
2	氮氧化物(一氧化氮和二氧化氮)		5	10	不得超过 5 mg/m ³	呼吸道刺激
3	硫化氢(H ₂ S)	10			不得超过 10 mg/m ³	神经毒性、黏膜刺激
4	二氧化硫(SO ₂)		5	10	不得超过 15 mg/m ³	呼吸道刺激
5	二氧化碳(CO ₂)		9 000	18 000	最高容许浓度为 0.5 %	呼吸中枢、中枢神经系统作用,窒息
6	氢气(H ₂)	4			最高容许浓度为 0.5 %	无色无味,具有爆炸性

注:OELs为职业接触限值;MAC为最高容许浓度;PC-TWA为时间加权平均容许浓度;PC-STEL为短时间接触容许浓度。

1.3 微生物

微生物在调控生态系统、维持地球物质循环及缓冲和净化污染物等方面发挥关键作用。相较于动植物,微生物对环境胁迫的响应更为灵敏,因此常被视为评估环境质量的敏感指标^[12]。在金属矿山环境中,强烈的环境胁迫会显著改变微生物群落的多样性,通过监测微生物群落的变化,可以有效评估矿山环境质量。

矿山微生物群落主要分为原核微生物和真核微生物,目前研究多集中于原核微生物^[13]。典型金属矿山原核微生物包括嗜酸菌属、硫化杆菌属、铁质菌属、钩端螺旋菌属,其中,钩端螺旋菌属是优势类群^[14];真核微生物以曲霉属、轮枝菌属为主,其他类群相对丰度均较低。当前,矿山微生物研究多集中于废矿、闭矿、矿井水、矿山生态修复等方面,而对于地下金属矿山中微生物种类及数量方面的研究仍较为薄弱。

2 常用矿用口罩类型

口罩是一种重要的个人防护用品,其主要作用是过滤空气中的有害气体、粉尘、飞沫、细菌和病毒。通

过物理屏障和过滤机制防止有害物质进入或释放到佩戴者的呼吸道。在地下金属矿山,口罩对保护作业人员健康具有关键作用,可以有效防止其吸入有害气体、粉尘及化学物质,降低职业病发生风险。

根据过滤原理的不同,矿用口罩可分为3种类型:自吸式防尘口罩、动力送风式防尘口罩和隔绝压风式防尘口罩^[15-16]。自吸式防尘口罩:通过呼吸克服过滤部件的阻力,即利用吸气使空气通过过滤层实现粉尘截留;动力送风式防尘口罩:通过外置的动力装置克服过滤部件的阻力,在确保空气得到有效过滤的同时降低呼吸负荷;隔绝压风式防尘口罩:采用完全隔绝作业环境的方式,杜绝有害物质的侵害,具备优异的防尘保护效果,适用于粉尘浓度极高或存在有毒气体的环境,可提供更高水平的保护。这3类口罩工作原理不同,可适应不同的作业环境和防护需求。正确选用矿用口罩类型,可显著提升防护效果,降低粉尘对健康的影响,提高作业安全性。

2.1 自吸式防尘口罩

自吸式防尘口罩主要包括简易防尘口罩和复式防尘口罩2种类型。简易防尘口罩(随弃式口罩),结

构较简单、轻便、易清洗、成本低;但是,随着使用时间延长,呼吸阻力增加,会因过滤细粉尘能力差、贴合性差等出现泄漏。复式防尘口罩的吸气和呼气路径分离,吸气时空气通过滤尘盒过滤,而呼气时则通过呼吸阀排出,减少了呼吸阻力,提高了舒适度和过滤效

率^[17]。简易防尘口罩和复式防尘口罩在矿山环境中使用各有优缺点(见表2)。简易防尘口罩虽然成本低且轻便,但其呼吸阻力大且过滤效果有限;复式防尘口罩可提供更好的防护效果和舒适度,但其成本高、清洗困难且影响视线。

表2 简易及复式防尘口罩优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of simple and complex dust mask

口罩类别	优点	缺点
简易防尘口罩	结构简单、轻便、成本较低	结构简单、气密性不佳,随着滤尘量的增加,呼吸阻力逐渐增加,导致呼吸困难和憋气感的产生
复式防尘口罩	气密性好、过滤效率高、防尘效果好	成本较高,长时间佩戴或频繁移动会不便

自吸式防尘口罩应依据 GB 2626—2019《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》^[18]进行规范。过滤材料主要由丙纶纤维制成,是一种由多层纵横交错的网状超细纤维组成的熔喷非织造布。其过滤原理是通过纤维的拦截作用,将空气中的粉尘颗粒拦截在纤维表面^[19]。粉尘在惯性作用和布朗运动的扩散下,撞击并附着于纤维中,从而实现粉尘的有效过滤,保障作业人员的呼吸安全^[20]。许多矿山企业出于经济成本考虑,未及时更换口罩或滤芯,严重危害作业人员健康。矿山企业需要在经济成本与人员健康之间找到平衡点,确保及时更换口罩或滤芯,以保障作业人员的安全和作业效率。

2.2 动力送风式防尘口罩

动力送风式防尘口罩通过电力驱动的送风装置主动吸入外界空气,并送至呼吸面罩内,有效降低了呼吸阻力,并显著改善了佩戴舒适度,特别适用于矿井高强度作业环境。国内自20世纪80年代开始对这类呼吸器进行深入研究,其中,长管呼吸器技术现已成熟,具备良好的应用前景^[21]。这些设备的推广和应用,不仅能够大幅度提升矿山健康防护水平,而且还能提高作业人员的工作效率^[22]。动力送风式防尘口罩工作原理见图1,将含尘空气经过滤器净化后通过动力装置输送至口罩上的呼吸阀排出,风机在一定范围内可调节。

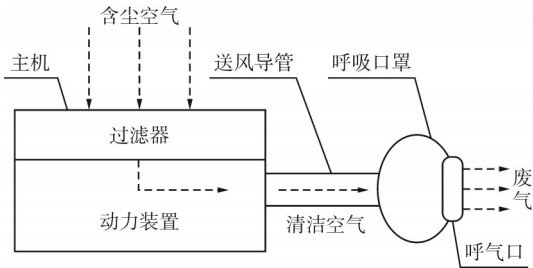


图1 动力送风式防尘口罩工作原理示意图^[23]

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of powered air-purifying dust masks

2.3 隔绝压风式防尘口罩

隔绝压风式防尘口罩是一种具有重要防护功能的设备,其主要优点包括:①设计密封性高,能够有效阻止外界有害物质进入口罩内部,从而保护人员的呼吸系统免受污染。②配备通风系统,可以提供清新空气,减轻呼吸阻力,提高佩戴的舒适度和长时间工作的可持续性。③口罩覆盖面积广,可有效保护面部和呼吸系统,为人员提供安全可靠的呼吸防护。然而,隔绝压风式防尘口罩也存在一些缺点:①成本相对较高,制造、维护和使用均需要较高投入。②使用、维护相对复杂,需要经常检查和维护各个部件,以确保其正常运行和有效防护。③对电源的依赖性较强,需要可靠的电源供应来提供通风系统所需的动力。

2.4 矿用口罩对比

将常见矿用口罩进行对比,结果见表3。不同类型的矿用口罩各有优缺点,选择时需根据具体工作环境、污染物类型、佩戴时间和个人需求综合考虑。对于一般粉尘环境,常用的矿用口罩即可满足要求;而在复杂的地下金属矿山环境中,常用的矿用口罩则无法满足所有防护需求。为解决这些问题,亟须研发先进的制备技术及更高效的过滤材料,更好满足复杂地下金属矿山环境中的安全和舒适需求。

3 过滤材料及制备方法

口罩的过滤原理主要是依靠过滤材料对空气中的颗粒物进行过滤和捕集,其过滤效率取决于过滤材料的种类、密度、厚度、结构及口罩密封性等因素。常见口罩类型包括医用口罩、N95口罩、KN95口罩等,它们采用不同的过滤材料和制备工艺,具有不同的过滤性能和适用场景^[24]。现有矿用口罩材料主要针对粉尘和有害气体进行防护,缺少对微生物防护的研究,在地下金属矿山等复杂污染环境,这一问题尤为突出,因此需要合适的口罩过滤滤材和制备方法,

表 3 常见矿用口罩对比
Table 3 Comparison of common mining masks

口罩名称	过滤效率	材质	设计	佩戴舒适度	认证标准 ¹⁾	价格/(元·只 ⁻¹)	使用周期/d	产品样式
3M9501+ 3M9502+	KN95 (国标)	无纺布, 滤棉, 熔喷布	耳戴式、头戴式	可调节鼻夹, 可折叠	KN95级	2.2	使用随弃	
H910plus H910plus+	KN95 (国标)	无纺布, 熔喷布	耳戴式、头戴式	内置海绵鼻垫, 棉质弹性耳带	KN95级	1.4	使用随弃	
3M9541V	KN95 (国标)	熔喷布及活性炭材料	三重折叠, 配有单向呼吸阀	内置海绵鼻垫, 针织耳带	KN95级	6.8	2~3	
3M8021CN	KN95 (美标)	熔喷布	头戴式, 无呼吸阀	内置海绵鼻垫, 皮筋耳带	KN95级	6.15	使用随弃	
保为康9590	KN95 (国标)	无纺布, 熔喷布, 棉纱	耳戴式, 无呼吸阀	外置金属鼻夹, 高弹性耳带	KN95级	2.8	使用随弃	

注:1)GB 2626—2019《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》。

以提升对微生物的阻隔能力,确保个体防护效果。同时,考虑到矿用口罩使用量大,滤芯需要经常更换等情况,需要重视过滤材料的重复使用性,以降低成本和提高效率。此外,随着矿山开采深度不断增加,深部矿井对矿用口罩的要求更为严格^[25-26]。

3.1 熔喷非织造材料

矿用防尘口罩通常由多层过滤材料构成,核心材料为聚丙烯熔喷布。这种材料经过驻极处理后,过滤效果良好。其中,聚丙烯(PP)作为一种常用的聚合物材料^[27],具有耐腐蚀性、热稳定性、可回收性、低密度、低熔融温度、疏水性、化学性质稳定、防霉耐汗等特点,因此被广泛应用于熔喷非织造材料的生产中^[28-30]。但是,该材料制成的熔喷布一经水洗,驻极电荷会减少或消失,导致口罩的过滤效果降低,从而在一定程度上限制了其应用。因此,未来需要进一步解决这些问题,以提高口罩的使用效能和环境友好性。

3.2 聚四氟乙烯材料

聚四氟乙烯(PTFE)是一种在超高效空气净化中广泛应用的覆膜材料,其独特的高过滤性备受瞩目。通过对原材料进行改性和制备工艺调整,可获得各种微孔形状和不同孔隙率的薄膜^[31]。这些薄膜的尺寸多为微米级别,有的甚至可达几十纳米^[32]。e-PTFE作为一种新型医用高分子材料,相对于普通熔喷布,其滤膜的孔径更小,过滤效率更高。单一PTFE制成的口罩存在颗粒物沉积速度快、过滤效率低等问题,目前研究方向集中于将PTFE与其他材料组合形成复

合材料,以弥补PTFE的不足,提升口罩的性能和持久性,为防护装备领域的发展带来新的突破和可能性。

3.3 金属-有机骨架材料

金属-有机骨架材料(MOFs)是一种具有网络多孔结构的超分子晶体,其由金属离子和有机配体构成^[33]。相比于其他材料,MOFs拥有更大的比表面积和孔容积,在吸附过滤有害气体方面表现更为优越。同时,MOFs具有较好的可塑性,这是由于其骨架连接主要依赖于配位键的形成,具有一定的可调性和适应性。但是,其稳定性稍差,因为骨架连接易受外界因素的影响而破坏。因此,在选择防护材料时,需要权衡材料性能和稳定性,以确保防护装备的可靠性和持久性。

3.4 纳米微纤化纤维材料

纳米微纤化纤维材料(NFC)是一种具有较大比表面积的天然纤维材料,适用于制备空气过滤材料。相对于传统的熔喷布聚丙烯材料,NFC具有更小孔径、更高孔隙率及更大比表面积,从而具有更高效的过滤性能^[34]。经过特殊处理的NFC口罩,其过滤效率可达到99%以上,且可重复使用,使用寿命为传统口罩的20倍以上,这使得其在防护性能和可持续性方面均有显著优势。但是,其生产工艺较为复杂,价格较高,需要解决成本问题以更好地服务于工业生产。因此,未来发展方向是在保持其优越性能的同时,寻求生产工艺的优化,以降低成本,推动其在工业防护装备中的广泛应用。

3.5 气凝胶复合材料

气凝胶复合材料通过溶胶凝胶法制备,具有超高孔隙率的三维多孔结构,是理想的过滤材料^[35]。其具有低密度、低折射率、小孔径、高比表面积和高孔隙率等特性,因此具备良好的透光性、环保性和隔声性能,适用于多种应用场景。但是,其机械性能较差,若用于防尘口罩制备,需要综合考虑其过滤性能和机械性能之间的平衡,以实现口罩在防护过程中的有效性和可靠性。

3.6 碳纳米材料

碳纳米材料种类繁多,包括零维碳点、一维碳纳米管和二维石墨烯及其衍生物(如氧化石墨烯和还原氧化石墨烯),这些材料在口罩制备中具有广泛的应用前景。其中,氧化石墨烯由石墨烯氧化而成,具有良好的水加工性和两亲性,可以通过部分还原成类石墨烯薄片得到还原氧化石墨烯^[36],为口罩材料的改性提供了一种有效途径。

碳纳米材料因独特的性质和优异的抗菌活性,可作为更有效的阻挡层,为口罩提供更高水平的防护。石墨烯可作为口罩的过滤材料,能够提高口罩的超疏水性,增强口罩对气溶胶的抗湿性,进而提升口罩的自我清洗能力,使口罩更具持久性和稳定性。同时,石墨烯具有优异的电热行为,在外界电场作用下易局部高温,而高温有利于灭活微生物,提高口罩的杀菌效果,进一步保障人员的健康安全。石墨烯纳米材料包括石墨烯、氧化石墨烯和还原氧化石墨烯,固有的抗微生物特性可以有效阻止微生物的生长和繁殖,从而增强口罩的抗菌性能和保护效果。特别是在复杂环境下和微生物抗性方面,石墨烯纳米材料具有潜在的应用前景,为地下金属矿山口罩的改进和性能提升提供了新的思路和方法。

3.7 制备方法

目前,喷涂法、静电纺丝法、浸渍提拉法是制备金属类空气过滤材料较常用的方法^[37]。

1)喷涂法。喷涂法是一种利用喷嘴将液体、粉末或颗粒状物质等涂料均匀地涂覆于被涂物表面,形成薄膜或涂层的材料制备方法,被广泛应用于涂装、防腐等领域,同时在科研实验室中也被用于制备材料、薄膜和涂层等。而熔喷非织造布是在高速热空气作用下,通过熔喷喷涂形成超细纤维,这些超细纤维被收集至集网帘上,形成熔喷非织造布。熔喷非织造布相比市场上其他单一非织造工艺产品具有显著优势,如更高的过滤效率和更好的机械性能。

汤静丽等^[38]采用喷涂法分别将热致变色微胶囊/水性聚氨酯涂料和银纳米线分散液喷涂到涤纶织物的正反面,制备出电控热致变色涂层织物,并研究了

变色涂料配比和喷涂工艺在电控条件下的影响。位振等^[39]采用模板法和喷涂法在未硫化的氟硅橡胶表面喷涂二氧化硅粒子,其表面具有优异液滴弹跳性能和良好自清洁性能,为制备超疏水表面提供了一种新方法。姜丽娜等^[40]将空气过滤布与熔喷布喷涂,制备出过滤性能良好的复合过滤材料,其具有2种材料的优点,为制备高效过滤材料提供了新思路。

2)静电纺丝法。静电纺丝法通过施加高电压对聚合物溶液或熔融体进行牵伸,形成细长纤维。该工艺在纳米纤维材料的生产中备受关注,能够生产出具有高孔隙率的纳米纤维材料,这种材料在空气过滤、医用纺织品等领域具有广泛的应用前景。静电纺丝法工作原理涉及静电喷雾技术,带电溶液在电场作用下出现离散化现象及泰勒锥现象,喷头尖端溶液形成锥形结构,当表面电荷超过表面张力时,形成射流并在收集电极上沉积为纳米纤维。

静电纺丝技术能够制备直径为纳米到微米级的纤维,这些纤维具有高比表面积和良好的力学性能,过滤效果显著优于传统的熔喷非织造过滤材料。然而,静电纺丝技术也存在一些缺点,最明显的是需要在特定的环境条件下操作,这会影响材料的一致性和性能。此外,静电纺丝制备的材料在力学强度方面也存在不足,需要改进以增强其适用性。总体而言,尽管静电纺丝技术在纳米纤维膜的制备和空气过滤应用中表现出显著优势,但仍需进一步改进以克服纤维直径不均匀和材料力学强度不足的问题,以提升其在实际应用中的可靠性和性能。

3)浸渍提拉法。浸渍提拉法是一种通过将基片垂直浸入镀膜溶液(溶胶)中,然后缓慢提拉,使附着在基片上的液膜在空气中凝胶形成均匀薄膜的制备方法。其操作步骤如下:

(1)调制溶液。配制适当浓度和pH的镀膜溶液,这些参数将直接影响薄膜的质量和性能。

(2)超声清洗。使用超声波清洗去除基片表面的杂质和污染物,确保基片表面干净,便于溶液均匀附着。

(3)缓慢浸渍。将清洁后的基片缓慢浸入溶液中,确保溶液充分覆盖基片表面。浸渍速度、时间和角度会影响溶液附着的均匀性。

(4)均匀提拉。将基片缓慢提出,使溶液均匀附着在基片表面。提拉速度和角度直接影响薄膜的厚度和均匀性。

(5)自然干燥。将提拉后的基片放置在通风良好的环境中,使溶液中的溶剂逐渐挥发,形成固态薄膜。干燥温度和时间会影响薄膜的致密性和质量。

浸渍提拉法是一种高效的薄膜制备方法,适用于

制备均匀且性能优良的薄膜。该方法通过精确控制溶液参数、基片清洁度、浸渍和提拉过程,以及干燥条件,确保薄膜的质量和性能。这一过程的关键在于各个步骤的细致操作,以获得预期的薄膜特性。

这3种常见制备过滤材料的方法,各有优势和局限性,过滤材料的制备将朝着高效、低成本、环保和多功能化方向发展。融合多种制备方法的复合工艺将成为趋势^[41],可以弥补单一方法的不足,满足日益增长的市场需求。同时,应根据实际情况选择制备方法,提高材料性能。

4 结 论

研究基于地下金属矿山复杂污染物对防护口罩和过滤材料进行梳理分析,从地下金属矿山环境的复杂性、常用矿用口罩类型、过滤材料及制备方法等进行阐述,进一步讨论过滤材料在地下金属矿山口罩防护的未来研究重点。

1)随着浅部矿床资源的逐渐枯竭,矿业活动向深部或地质条件更为复杂的矿床转移,导致开采环境的复杂化。从粉尘、有害气体、微生物3个方面阐述了地下金属矿山环境的复杂性,并总结了地下金属矿山粉尘分类及允许浓度、常见有害气体的职业接触限值及规程允许浓度。

2)现有防尘口罩在过滤能力和密封性方面已经取得了显著的进步,在一定程度上满足了作业人员对健康与安全的需求,但仍存在需要改进的方面。按照粉尘过滤原理将地下金属矿山常用口罩分为3种,并对比过滤效率、过滤材料、佩戴舒适度、价格等,探讨了地下金属矿山防尘口罩装备的未来发展趋势,提出通过材料制备技术研发更高效的过滤材料,满足复杂地下金属矿山环境中的安全和舒适需求。

3)概述了喷涂法、静电纺丝法、浸渍提拉法等制备金属类空气过滤材料常用技术的工作原理及现状,并结合当前常用过滤材料,提出了石墨烯纳米材料在地下金属矿山复杂污染源下适用的展望。

“绿水青山就是金山银山”,在实现“双碳”目标和绿色矿山需求的背景下,发展高效、环保的过滤材料是关键。未来矿用口罩和过滤材料在提升作业人员健康防护水平的同时,需减少环境污染,推动矿山行业的绿色转型,真正实现金属矿山的可持续发展目标。

【参 考 文 献】

[1] 国家卫生健康委规划发展与信息化司. 2022年我国卫生健康事业发展统计公报[J]. 中国病毒病杂志, 2022, 14(4): 317-325.
[2] 王舒哈, 张鑫, 聂兴信, 等. 地下金属矿山袋式除尘器捕尘材料研究现状及展望[J]. 黄金, 2024, 45(11): 104-110.

[3] 王金华, 谢和平, 刘见中, 等. 煤炭近零生态环境影响开发利用理论和技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1 198-1 209.
[4] 李刚, 吴将有, 金龙哲, 等. 我国金属矿山粉尘防治技术研究现状及展望[J]. 金属矿山, 2021(1): 154-167.
[5] 李德文, 隋金君, 刘国庆, 等. 中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 1-7, 13.
[6] ABRAHAM J L, CRAWFORD J A, SCALZETTI E, et al. Analysis of lung particle burden in a 28 year old man with rapidly progressive coal worker's pneumoconiosis (accelerated silicosis)[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2016, 193: A7074.
[7] 李刚, 周哲, 胡锦涛. 基于知识图谱的我国矿井粉尘防治技术研究进展与展望[J]. 金属矿山, 2023(7): 28-39.
[8] XIA Y, LIU J F, SHI T M, et al. Prevalence of pneumoconiosis in Hubei, China from 2008 to 2013 [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(9): 8 612-8 621.
[9] 黄心如. 我国尘肺病问题多主体协同治理机制与运行演化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
[10] 国家安全生产监督管理总局. 金属非金属地下矿山通风技术规范 通风系统: AQ 2013.1—2008[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.
[11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 工作场所所有害因素职业接触限值 第1部分: 化学有害因素: GBZ 2.1—2019[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2019.
[12] 梁宗林, 秦亚玲, 王沛, 等. 云南省蒙自酸性矿山排水微生物群落结构和功能[J]. 生物工程学报, 2019, 35(11): 2 035-2 049.
[13] 杨富淋, 江烨, 高佳, 等. 典型硫铁矿矿渣微生物群落组成和环境驱动因子[J]. 黄金, 2024, 45(12): 31-36.
[14] 彭珂萍, 曾伟民. 紫金山铜矿酸性矿山废水微生物群落多样性[J]. 微生物学通报, 2020, 47(9): 2 887-2 896.
[15] 郑万成. 矿山个体防尘装备的发展与探讨[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(6): 107-109, 119.
[16] 葛晓青, 常生, 赵娟芝, 等. 自吸过滤式防颗粒物呼吸器新旧标准对比[J]. 针织工业, 2020(8): 1-4.
[17] PASQUALE P, UMBERTO C, GIOVANNA N, et al. Facing COVID-19 pandemic: Development of custom-made face mask with rapid prototyping system [J]. Journal of Infection in Developing Countries, 2021, 15(1): 51-57.
[18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器: GB 2626—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
[19] LIAO L, XIAO W, ZHAO M, et al. Can N95 respirators be reused after disinfection? How many times? [J]. ACS Nano, 2020, 14(5): 6 348-6 356.
[20] MITRA A, ADHIKARI A, MARTIN C, et al. Evaluation of a filtering facepiece respirator and a pleated particulate respirator in filtering ultrafine particles and submicron particles in welding and asphalt plant work environments[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(12): 6437.
[21] 维维, 刘昶, 张新宇, 等. 矿用动力送风跟随式防尘口罩设计研究[J]. 科学技术创新, 2018(1): 181-182.
[22] 王宽, 谢文强. 矿用供风式防尘口罩的研制与应用[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(5): 87-90.
[23] 赵恩彪, 邓楠, 隋金君, 等. 煤矿用送风式防尘口罩的设计与实现[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 104-108.

- [24] ARMAND Q,WHYTE H E,VERHOEVEN P,et al.Impact of medical face mask wear on bacterial filtration efficiency and breathability[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 28: 102897.
- [25] 吴赛赛,金韬,郝文青,等.深部环境下锚索耐久性退化及应力腐蚀断裂研究[J].*采矿与安全工程学报*, 2024, 41(2): 267-276.
- [26] 吴赛赛,张曾瑞,金韬,等.深部矿山锚杆腐蚀失效风险评估研究[J].*中国安全科学学报*, 2023, 33(增刊1): 180-184.
- [27] 王元民,由松江,马章印,等.不同纤维种类及掺量条件下胶结充填体力学行为研究[J].*黄金*, 2023, 44(11): 18-22.
- [28] 冯智,何彩婷,崔中雪,等.口罩用聚丙烯熔喷布的结构与过滤性能研究[J].*中国纤检*, 2023(3): 108-112.
- [29] 刘琛,杨凯璐,陈明星,等.熔喷非织造材料制备及其应用研究进展[J].*现代纺织技术*, 2024, 32(5): 116-129.
- [30] SANDARADURA I, GOEMAN E, PONTIVIVO G, et al. A close shave? Performance of P2/N95 respirators in healthcare workers with facial hair: Results of the BEARDS (BENCHMARKING Adequate Respiratory Defences) study [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2020, 104(4): 529-533.
- [31] 刘宇升,王洪,单伟哲.聚四氟乙烯滤料高温裂解和动态力学性能[J].*复合材料学报*, 2024, 41(9): 5 032-5 038.
- [32] 倪敬,崔智,何利华,等.聚四氟乙烯材料切削工艺和应用研究进展[J].*中国机械工程*, 2024, 35(3): 498-514.
- [33] 赵文昊,王琪,王恺华,等.去溶剂绿色化合成金属有机骨架材料研究进展[J].*精细化工*, 2025, 42(2): 267-278.
- [34] 刘成跃,颜鑫,王习文.纳米微纤化纤维素在口罩用过滤材料中的应用研究[J].*中国造纸*, 2020, 39(9): 10-14.
- [35] 田志广,郭俊卿,陈拂晓.SiO₂气凝胶/酚醛树脂复合材料隔热性能研究[J].*化工新型材料*, 2024, 52(7): 162-166.
- [36] 陈淑敏,吕子全,邹旋,等.新冠常态下功能性口罩研究进展[J].*应用化学*, 2023, 40(11): 1 504-1 517.
- [37] 赵倩,陈锦苗,邱长玉,等.口罩用抗菌空气过滤材料的研究进展[J].*产业用纺织品*, 2023, 41(2): 1-8.
- [38] 汤静丽,刘婷,贺梦娟,等.电致热致变色涂层涤纶织物的制备与性能[J].*东华大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(3): 53-60.
- [39] 位振,戴飞,何强.多级结构超疏水表面的制备与性能分析[J].*材料导报*, 2024, 38(9): 260-264.
- [40] 姜丽娜,任元林,田甜,等.亚高效针刺熔喷复合过滤材料的制备及性能研究[J].*纺织科学与工程学报*, 2019, 36(1): 106-109.
- [41] 丁成,蔚志红,巩春龙,等.黄金纳米复合材料工业化生产工艺设计及应用[J].*黄金*, 2023, 44(5): 32-36.

Applicability and preparation methods of protective masks in complex environments of underground metal mines

Zhang Chenyu¹, Zhang Xin², Nie Xingxin¹, Sun Zeyu¹, Zhou Tianyu¹, Zhao Linhai³, Li Zongli³

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology;

2. College of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of Technology;

3. Baoji Northwest Nonferrous Metals Erlihe Mining Co., Ltd.)

Abstract: The current environmental issues in China's metal mines are prominent. Commonly used protective masks in mines primarily focus on the filtration performance against particulate matter. However, in the complex environment of underground metal mines, these masks often fail to provide efficient and reliable protection, thereby increasing the risk of occupational diseases among workers. Based on the complex conditions of underground metal mines, 3 major factors were investigated: dust, harmful gases, and microorganisms. The advantages and disadvantages of commonly used masks during mining were compared, with emphasis placed on existing filter materials and their preparation methods. Against the backdrop of growing emphasis on mitigating hazards to mine environments and preventing respiratory occupational diseases, future development trends and research directions for filter materials suitable for protective masks in underground metal mines were proposed. This research provides a reference for the development of dust prevention equipment in underground metal mines.

Keywords: underground metal mine; protective mask; preparation method; filter material; dust; dust prevention equipment