

纤维素醚对分级尾砂充填料浆流动性与强度的影响研究

李洪浦¹, 盛宇航^{2*}, 姜千山¹, 王靖丹¹, 刘杰²

1. 山东金洲矿业集团有限公司, 山东 乳山 264501;

2. 山东黄金矿业科技有限公司充填工程实验室分公司, 山东 莱州 261441



摘要:为研究纤维素醚对分级尾砂充填料浆流动性和抗压强度的影响,以羟丙基甲基纤维素作为纤维素醚外加剂,通过开展流变、扩展度、泌水性和单轴抗压强度试验,定量分析了纤维素醚掺量为0.1%~0.3%和未掺加时,分级尾砂充填料浆流动性能与抗压强度的变化情况,并利用化学结合水量、扫描电镜(SEM)和压汞(MIP)等测试方法,探究了充填体微观结构间的差异。结果表明:掺加纤维素醚可提高分级尾砂充填料浆屈服应力和塑性黏度,降低料浆泌水率,增加料浆的稳定性,且纤维素醚掺量越高效果越明显。纤维素醚掺量与料浆扩展度呈负相关关系,纤维素醚的掺加会对料浆流动性产生不利影响。纤维素醚对充填体早期与长期抗压强度的增长产生一定的抑制作用,纤维素醚掺量越高,充填体抗压强度降低幅度越大。掺加纤维素醚未改变胶固粉水化产物类型,但会降低水化产物生成量,会引入空气使充填体宏观孔含量和总孔隙率增大,导致充填体致密性变差。

关键词:分级尾砂充填料浆;羟丙基甲基纤维素;流动性;抗压强度;微观结构

中图分类号:TD853 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-1052-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.088

引用格式:李洪浦,盛宇航,姜千山,等.纤维素醚对分级尾砂充填料浆流动性与强度的影响研究[J].黄金科学技术,2025,33(5):1052-1062.LI Hongpu, SHENG Yuhang, JIANG Qianshan, et al. Study on the Influence of Cellulose Ether on the Fluidity and Strength of Classified Tailings Cemented Backfill[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 1052-1062.

随着采矿工作由浅部转向深部,充填采矿法凭借其在保障矿山安全生产、提高资源回收率和实现尾矿固废减量化、资源化利用等方面的独特优势,成为解决深部开采系列问题的首选方法,也是采矿领域的研究热点(吴爱祥等,2018;蔡美峰等,2019; Yin et al, 2020; 郭利杰等, 2022)。分级尾砂充填技术作为尾砂胶结充填的一种,凭借其工艺简单、技术成熟度高和充填体力学性能优异等优势,在矿山工程中得到了广泛应用(贾住平等, 2022; 寇云鹏等, 2023; 陈鑫政等, 2024)。分级尾砂充填是以旋流器分级粗粒级尾砂作为充填骨料,配以胶凝材料

和水搅拌制备成充填料浆,经管路自流输送至井下待充空区进行充填。由于分级尾砂中细粒级含量较低,易导致泌水量大和料浆离析等问题(盛宇航等, 2024),严重制约了充填料浆的远距离安全输送,并对充填体的整体稳定性产生不利影响。为调控尾砂充填料浆的工作性能,研究人员开展了大量的试验研究。结果表明,阴离子型聚丙烯酰胺可增大似膏体流变参数,增强充填料浆输送的稳定性(张钦礼等, 2016)。通过向充填料浆中添加减水剂、引气剂和辅助胶凝材料(如粉煤灰和矿渣粉),可改善料浆的流变性能,提高其流动性(Yang et al,

收稿日期:2025-02-18;修订日期:2025-07-17

基金项目:国家重点研发计划项目“深部低废高效机械化充填采矿技术研究”(编号:2018YFC0604601)资助

作者简介:李洪浦(1997—),男,吉林省吉林市人,助理工程师,从事充填采矿技术等方面的研究工作。E-mail:867904907@qq.com

*通信作者:盛宇航(1988—),男,山东济宁人,高级工程师,从事尾砂充填技术等方面的研究工作。E-mail:syhiacs@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

2018; Jiang et al, 2020; 甘德清等, 2022; 张雷等, 2023)。但是, 稻草秸秆、膨润土和纤维的掺入会对充填料浆的流动性造成不利影响(Chen et al, 2020; 曹宝栋等, 2023; 宋学林等, 2024)。这些研究为调节全尾砂或细粒级尾砂充填料浆的工作性能提供了参考。针对分级尾砂充填料浆存在的流动性问题, 可借鉴水泥基材料通过添加纤维素醚外加剂的方式解决(王培铭等, 2017; Gu et al, 2021; Gu et al, 2022; Feng et al, 2024)。

然而, 目前关于纤维素醚对分级尾砂充填料浆流动性影响及其改性机理的研究仍相对有限。此外, 纤维素醚的掺入不仅增加了料浆体系的复杂性, 还可能对硬化充填体的力学性能产生显著影响。鉴于充填技术在很大程度上依赖于充填体的力学特性(吴疆宇等, 2021), 系统研究纤维素醚对充填体抗压强度的作用机制显得尤为必要。为此, 本文以分级尾砂充填料浆作为研究对象, 通过流变测试、扩展度和泌水性试验, 研究了纤维素醚对其流动行为的影响规律; 结合单轴抗压强度试验、化学结合水量测定、扫描电镜(SEM)和压汞(MIP)等测试手段, 分析了纤维素醚对充填体抗压强度和微观结构演化规律的影响, 进而揭示了其改性作用机理, 以期纤维素醚(如羟丙基甲基纤维素)在尾砂充填料浆改性中的应用提供理论依据和试验参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 分级尾砂

分级尾砂取自山东黄金集团某金矿充填站。借助激光粒度仪(MS3000)分析尾砂粒级组成, 测试结果如图1所示。分级尾砂中值粒径为139.0 μm , 平均粒径为171.0 μm 。尾砂中-20 μm 粒级含量为6.56%, 粗颗粒尾砂含量较多, 有利于充填体抗压强度的提高。分级尾砂不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为5.08和1.24。测得尾砂密度为2.72 g/cm^3 。

采用X射线荧光光谱(XRF)对分级尾砂的主要化学成分进行分析, 结果如表1所示。分级尾砂以 SiO_2 (53.28%)、 MgO (29.00%) 和 Al_2O_3 (8.63%) 为主, 其余成分有 Fe_2O_3 和 K_2O 等, 含量较低。

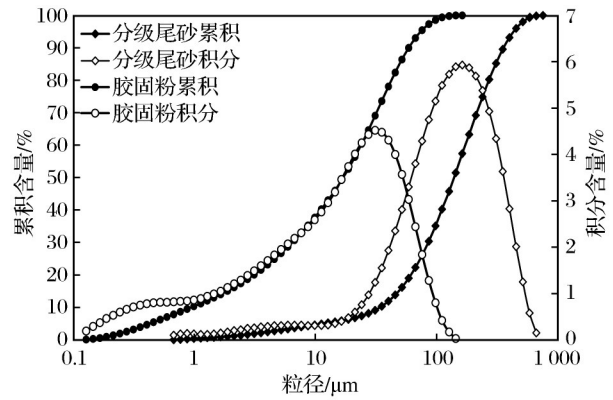


图1 分级尾砂与胶固粉粒级分析

Fig. 1 Analysis of particle size of the classified tailings and slag based cementing

(2) 胶凝材料

胶凝材料选用适用于胶结尾砂的胶固粉, 为碱激发矿渣基胶凝材料, 其粒级组成和化学组成分别如图1和表1所示。测得胶固粉的密度为2.80 g/cm^3 。

(3) 纤维素醚与拌合水

试验用纤维素醚为商用20万羟丙基甲基纤维素(HPMC), 为白色固体粉末, 溶于水。试验用拌合水为自来水。

1.2 料浆制备

为研究纤维素醚对分级尾砂充填料浆流动性和抗压强度的影响, 充填料浆质量浓度设定为70%和72%, 灰砂比为1:4和1:10, 纤维素醚掺量(占固体物料尾砂与胶固粉之和)为0、0.1%、0.2%和0.3%, 共计16组。分级尾砂充填料浆配制过程如下: 先称量所需的水和纤维素醚, 在搅拌锅内混合均匀, 以防止纤维素醚结团成块; 再称量胶固粉和尾砂, 倒入搅拌锅中手动搅拌60 s; 最后在水泥净浆搅拌机下低速搅拌300 s。

表1 分级尾砂与胶固粉化学组成

Table 1 Chemical composition of the classified tailings and slag based cementing (%)

材料	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	Na_2O
分级尾砂	0.47	53.28	8.63	1.90	29.00	1.46	3.76	0.11	0.16	0.36
胶固粉	40.10	24.45	10.30	1.16	5.57	0.50	15.87	0.85	0.05	0.77

1.3 试验测试方法

(1) 流变试验

搅拌好的分级尾砂充填料浆利用 Brookfield RST-SST 型旋转流变仪测试其流变参数。流变仪转子采用直径为 20 mm、高度为 40 mm 的四叶桨式。测试过程为:测试总时间为 240 s,测试程序含上升段与下降段,上升段在 0~120 s 内剪切速率由 0 线性增长至 120 s^{-1} ,下降段在 120~240 s 内剪切速率由 120 s^{-1} 线性减少至 0。由于下降段所测数据重现性更好,故对下降段测得数据进行拟合分析。

充填料浆扩展度采用微型塌落度筒进行测试,微型塌落度筒上端口直径为 50 mm,下端口直径为 100 mm,高度为 150 mm。

(2) 泌水率试验

将充填料浆倒入 500 mL 量筒中测量质量 m_1 ,迅速用保鲜膜将量筒口密封,待充填料浆初凝后读取泌出水的体积 V ,通过式(1)计算得到充填料浆的泌水率,如图 2 所示。

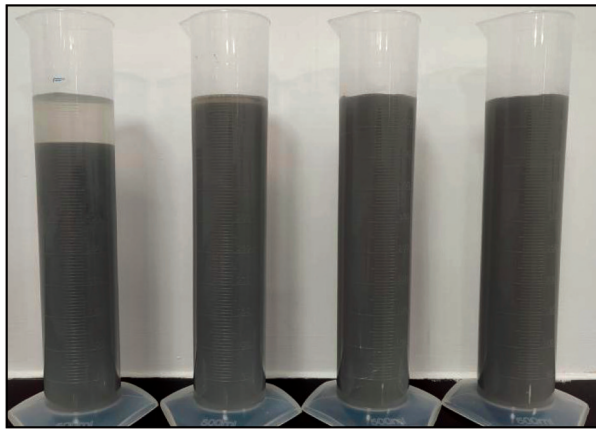


图 2 充填料浆泌水性试验

Fig. 2 Bleeding test of filling slurry

$$B = \frac{\rho V}{(m_1 - m) \times (1 - w_s)} \quad (1)$$

式中: B 为充填料浆泌水率(%); V 为充填料浆泌水体积量(mL); ρ 为水的密度(g/cm^3); m 为 500 mL 量筒质量(g); m_1 为充填料浆与量筒质量之和(g); w_s 为充填料浆中固体物料质量分数(%)。

(3) 单轴抗压强度试验

将搅拌均匀的充填料浆倒入 $\phi 50 \times 100$ mm 圆柱试模中,静置 24 h 后拆模,放入标准养护箱中进行

养护,养护温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度大于 95%。养护至规定龄期(3 d、7 d 和 28 d),采用压力试验机(美国 HM-5030)测试充填体试件抗压强度,每个龄期测试 3 个,取平均值作为充填体强度值。

(4) 化学结合水量测试

完成抗压强度测试的充填体碎块,先放入无水乙醇中浸泡终止其水化反应,再放置于 50°C 恒温干燥箱中干燥。干燥后的试样进行磨细处理,定量称取试样放入 1050°C 马弗炉中灼烧至恒重。充填体化学结合水量 w 计算公式如式(2)和式(3)所示。

$$w = \frac{m_2 - m_3 - W}{1 - W} \quad (2)$$

$$W = (1 - x)w_1 + xw_b \quad (3)$$

式中: w 为充填体化学结合水量(%); m_2 为 50°C 烘干至恒重时试样的质量(g); m_3 为 1050°C 条件下灼烧至恒重时试样的质量(g); W 为固体充填材料(尾砂与胶固粉)烧失量(%); x 为胶固粉质量分数(%); w_1 为尾砂灼烧损失量(%); w_b 为胶固粉灼烧损失量(%)。

(5) 微观结构分析

将养护至规定龄期未进行抗压强度试验的充填体试件分割制成 1 cm^3 左右的样品,放入无水乙醇中浸泡终止其水化反应,再将样品放置于 50°C 恒温干燥箱中干燥。干燥后的样品采用扫描电子显微镜(SEM)和压汞仪(MIP)进行充填体微观形貌与孔结构分析。

2 结果与讨论

2.1 纤维素醚对分级尾砂充填料浆流变性能与扩展度的影响

图 3 展示了料浆质量浓度为 72% 的分级尾砂充填料浆在不同纤维素醚掺量下的流变特性曲线。由图 3 可以看出,不同纤维素醚掺量下料浆的剪切应力与剪切速率均呈现良好的线性关系,相关性较高。然而,随着纤维素醚掺量的增加,料浆的流变曲线发生明显位移,反映出掺量对流变行为具有显著影响。采用 Bingham 流变模型对测量结果进行线性拟合,从而得到充填料浆流变参数,拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.9,表明 Bingham 流变模型能够用来定量描述掺加纤维素醚分级尾砂充填料

浆流变行为。Bingham 流变模型公式表示为

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中: τ 为剪切应力(Pa); τ_0 为屈服应力(Pa); η 为塑性黏度(Pa·s); $\dot{\gamma}$ 为剪切速率(s^{-1})。

图4所示为不同纤维素醚掺量下分级尾砂充填料浆流变参数。由图4可知,纤维素醚掺量显著影响分级尾砂充填料浆的流变参数。随着纤维素醚掺量的增加,料浆屈服应力和塑性黏度随之增大。当灰砂比为1:4时,纤维素醚掺量由0增加至0.1%和0.3%,料浆屈服应力提高了5.19倍和62.66倍,塑性黏度提高了2.56倍和8.55倍。当灰砂比为1:10时,纤维素醚掺量由0增加至0.1%和0.3%,料浆屈服应力提高了1.23倍和21.76倍,塑性黏度提高了3.07倍和7.23倍。究其原因:一方面,羟丙基甲基

纤维素遇水产生溶胀现象,分子中大量羟基及醚键与水分子发生作用(王志荣等,2024),相互缠绕形成絮凝网状结构,提高了水溶液的黏度,增加了水介质的迁移阻力,减弱了水的润滑作用,使得料浆屈服应力和塑性黏度增大;另一方面,料浆中羟丙基甲基纤维素可吸附于多个胶固粉颗粒表面,胶固粉颗粒亦吸附多个羟丙基甲基纤维素,强化了料浆内部絮凝网状结构,使颗粒间的相对移动变得困难,进而提高了充填料浆的屈服应力和塑性黏度。随着纤维素醚掺量的增加,料浆内部絮凝网状结构含量进一步增加,从而大幅增强了料浆的流变性能。分级尾砂充填料浆流变性能的增强,导致料浆中粗颗粒尾砂沉降受到的阻力增大,使料浆呈现出整体稳定的状态,更有利于分级尾砂充填料浆的远距离安全输送。

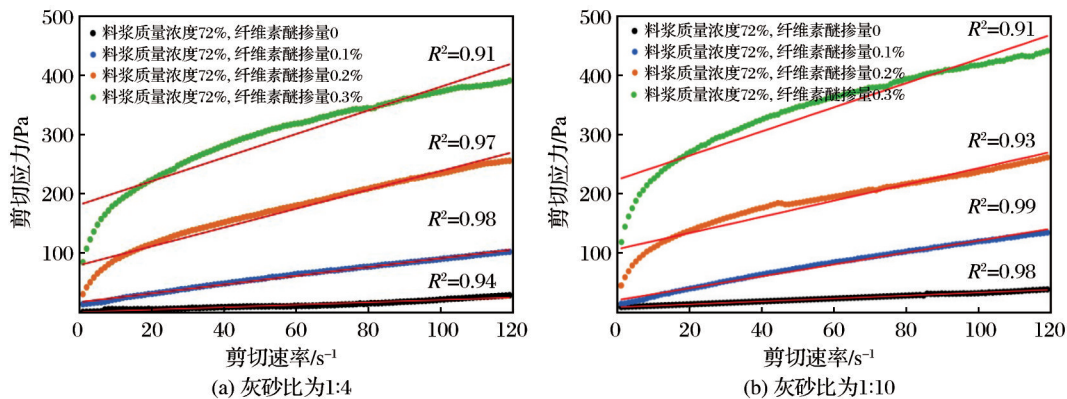


图3 不同羟丙基甲基纤维素掺量分级尾砂充填料浆流变特性曲线

Fig. 3 Rheological curves of CTCB slurry with different HPMC dosages

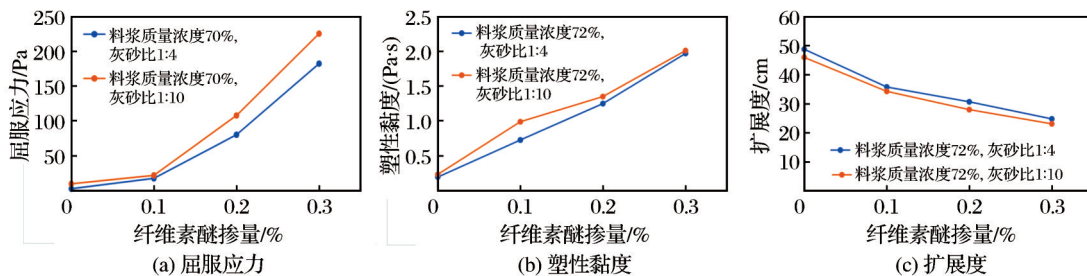


图4 不同羟丙基甲基纤维素掺量分级尾砂充填料浆流变参数与扩展度

Fig. 4 Rheological parameters and expansion of CTCB slurry with different HPMC dosages

图4也展示了不同纤维素醚掺量下分级尾砂充填料浆扩展度。由图4可知,纤维素醚掺量与料浆扩展度呈负相关关系,即随着纤维素醚掺量的增加,料浆扩展度降低,说明纤维素醚的掺入会对分

级尾砂充填料浆的流动产生不利影响。当灰砂比为1:4时,纤维素醚掺量由0增加至0.3%,充填料浆扩展度降低了49.18%;当灰砂比为1:10时,纤维素醚掺量由0增加至0.3%,充填料浆扩展度降低了

49.78%。究其原因主要是料浆中纤维素醚的掺入, 会提高料浆的黏稠度, 使料浆中絮凝网状结构含量增加, 造成料浆中絮团包裹水含量增加、起润滑作用的自由水含量降低, 导致料浆流动性降低。

2.2 纤维素醚对分级尾砂充填料浆泌水率的影响

图5所示为分级尾砂充填料浆泌水率随纤维素醚掺量的变化曲线。由图5可知, 随着纤维素醚掺量的增加, 充填料浆泌水率呈明显降低趋势, 表明纤维素醚对充填料浆能够起到良好的保水作用。对于料浆质量浓度为70%、灰砂比为1:4的充填料浆, 当纤维素醚掺量从0增加至0.1%和0.3%时, 泌水率分别降低了86.12%和100%; 对于料浆质量浓度为70%、灰砂比为1:10的充填料浆, 纤维素醚掺量从0增加至0.1%和0.3%, 泌水率降低了85.90%和100%。究其原因: 由于分级尾砂充填料浆中粗颗粒尾砂含量较多, 由比表面积大的细颗粒自絮凝所产生的空间网络结构的数量就少, 使得料浆中自由水含量高, 易出现高泌水现象。随着纤维素醚的掺入, 料浆中絮凝网状结构逐渐增多, 水分更多地以絮团水的形式被束缚于体系内部, 导致泌水率显著降低。分级尾砂充填料浆泌水率的大幅下降, 有效改善了料浆的均匀性, 减轻了离析现象, 从而有助于提高分级尾砂充填的接顶率。

2.3 纤维素醚对分级尾砂充填体抗压强度的影响

图6所示为不同纤维素醚掺量充填体抗压强度随时间的演变规律。由图6可知, 纤维素醚的掺

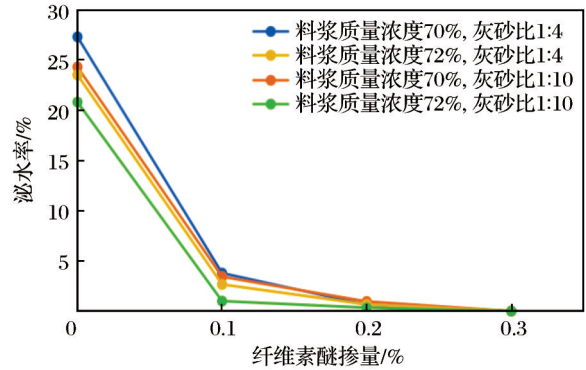


图5 羟丙基甲基纤维素掺量对分级尾砂充填料浆泌水率的影响

Fig. 5 Effect of HPMC dosages on bleeding rate of CTCB slurry

入会对充填体早期(3 d)和长期(28 d)抗压强度的增长产生一定的抑制作用, 且随着纤维素掺量的增加, 充填体抗压强度降低幅度也增大。对于料浆质量浓度为72%、灰砂比为1:4的充填体, 纤维素醚掺量由0分别增加至0.1%和0.3%, 3 d抗压强度分别降低了28.91%和49.44%, 28 d抗压强度分别降低了24.40%和41.17%。对比图6(a)和图6(b)发现, 对于不同料浆质量浓度、灰砂比的充填体, 其抗压强度变化规律随纤维素醚掺量的增加均呈显著降低趋势, 说明纤维素醚对充填体抗压强度的影响受料浆浓度和灰砂比的影响较小。以料浆质量浓度为70%的充填体为例, 当灰砂比为1:4时, 纤维素醚掺量由0分别增加至0.1%和0.3%, 3 d抗压强度

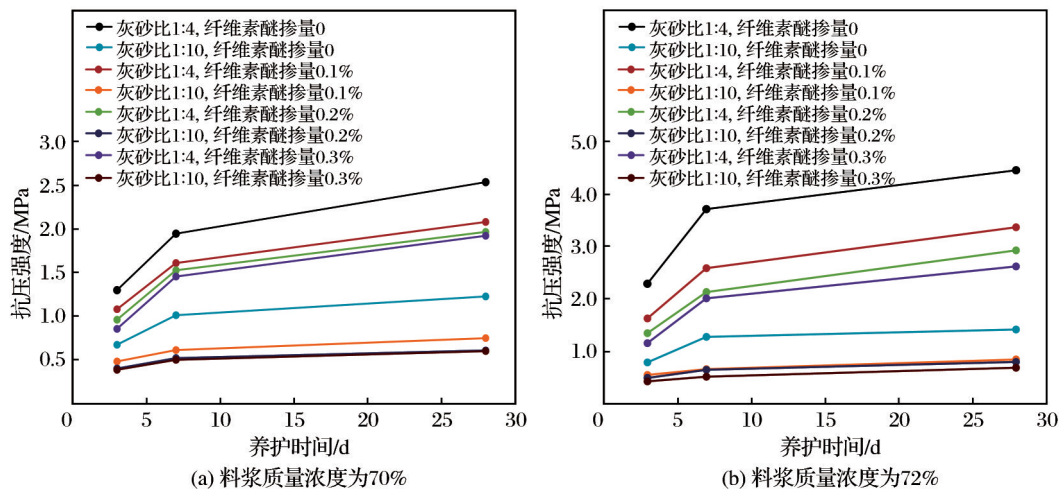


图6 羟丙基甲基纤维素掺量对分级尾砂充填体抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of HPMC dosages on compressive strength of CTCB

分别降低了 16.81% 和 34.22%, 28 d 抗压强度分别降低了 18.03% 和 24.25%; 当灰砂比为 1:10 时, 在相同掺量条件下, 3 d 抗压强度降幅分别为 28.48% 和 42.73%, 28 d 抗压强度则分别降低了 38.90% 和 51.06%。同样, 对于料浆质量浓度为 72%、灰砂比为 1:10 的充填体, 纤维素醚掺量由 0 分别增加至 0.1% 和 0.3%, 3 d 抗压强度分别降低了 28.48% 和

42.73%, 28 d 抗压强度分别降低了 48.25% 和 51.38%。通过分析充填体微观结构间的差异, 阐述纤维素醚对充填体抗压强度产生不利影响的原因。

2.4 充填体微观结构分析

(1) 充填体 SEM 分析

不同纤维素醚掺量下料浆质量浓度为 72%、灰砂比为 1:4 的分级尾砂充填体内部结构 SEM 图如图 7

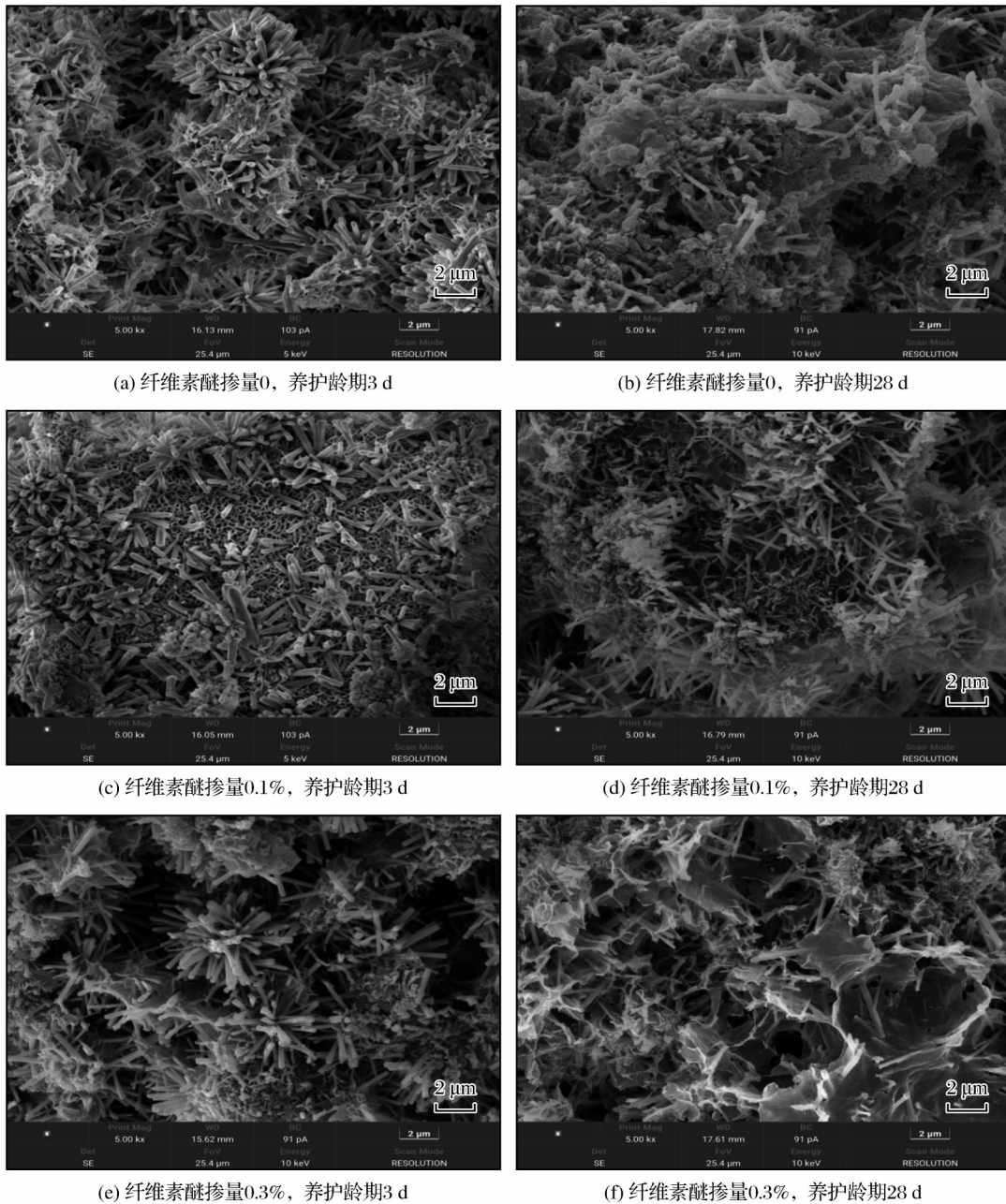


图 7 不同掺量羟丙基甲基纤维素分级尾砂充填体 SEM 图

Fig. 7 SEM micrographs of CTCB with different HPMC dosages

所示。由图7可见,掺与未掺纤维素醚的充填体中水化产物均主要由纤维状、箔片状的水化硅酸钙(C-S-H)和针棒状的钙矾石(AFt)构成,纤维素醚的掺入未改变胶固粉水化产物类型。随着养护时间由3 d增加至28 d,胶固粉水化反应不断进行,水化硅酸钙和钙矾石生成量增多,填充于尾砂颗粒堆积所形成的空隙中的水化产物增多,充填体致密性得到提高,抗压强度随之增加。对比相同养护时间下掺与未掺纤维素醚充填体SEM图,发现未掺纤维素醚的充填体内部含有更多的水化产物,充填体致密程度更高。在未参加纤维素醚的充填体中,水化硅酸钙(C-S-H)附着于尾砂颗粒及钙矾石表面,并与钙矾石相互搭接,形成空间网络结构;同时,钙矾石在孔隙间穿插生长,有效分割、细化孔隙结构,提升了充填体的密实度。相比之下,掺入纤维素醚的充填体水化产物总量减少,水化硅酸钙与钙矾石之间的搭接作用减弱,钙矾石对孔隙的填充和优化效果下降,导致充填体内部形成大量独立孔洞,整体致密性降低。究其原因:一是纤维素醚会吸附到胶

固粉颗粒和水化产物表面形成保护层,阻碍了水与胶固粉颗粒的结合和进一步水化反应,减缓了胶固粉水化反应的进程(蹇守卫等,2011);二是纤维素醚对分级尾砂充填料浆起到保水作用,降低了料浆的泌水率,使得胶固粉中水化矿物溶解后的液相离子浓度降低,延缓了水化产物的结晶与沉淀过程(杨晓杰等,2019),二者共同作用降低了水化产物的生成量,使充填体致密性变差,抗压强度降低。

掺入纤维素醚的充填体中水化产物的减少,可通过化学结合水含量的测定结果进一步验证。不同纤维素醚掺量充填体化学结合水测量结果如图8所示。充填体中化学结合水含量越高,说明充填体中水化产物含量越高。由图8可知,对于料浆质量浓度为72%、灰砂比为1:4的充填体,当纤维素醚掺量由0分别增加至0.1%和0.3%时,3 d龄期充填体的化学结合水量分别降低了17.87%和23.75%;28 d龄期充填体的化学结合水量则分别降低了7.63%和11.21%,结果表明,纤维素醚掺量越高,充填体化学结合水量降幅越大。

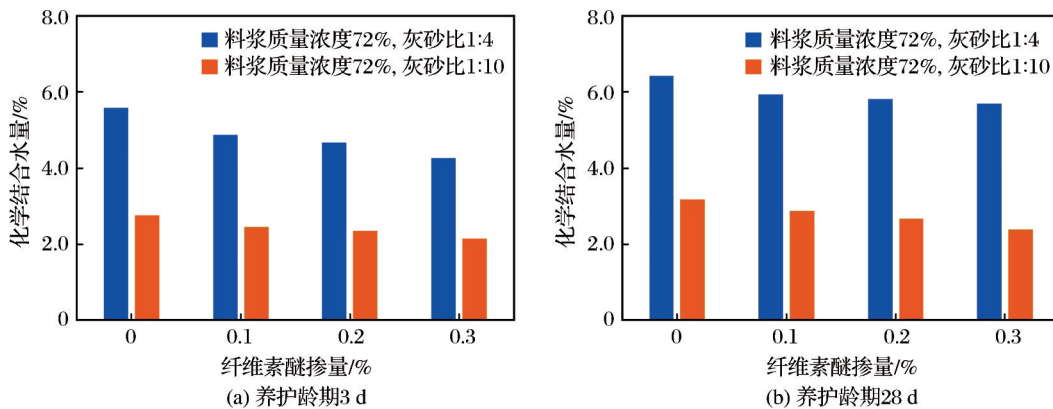


图8 羟丙基甲基纤维素掺量对分级尾砂充填体化学结合水量的影响

Fig. 8 Effect of HPMC dosages on chemical binding water of CTCB

(2) 充填体孔结构分析

孔隙结构是表征充填体密实性的良好指标。图9所示为料浆质量浓度为72%的不同纤维素醚掺量分级尾砂充填体内部孔径分布曲线。对比图9(a)和图9(b)可知,随着养护时间的增加,相同纤维素醚掺量充填体的临界孔径(Yilmaz et al, 2011)(进汞量最多处所对应的孔径)向小孔径一侧移动,临界孔径变小。当纤维素醚掺量为0时,充填体在养护3 d时的临界孔径为1.314 μm,至28 d时减小至

0.552 μm。临界孔径随养护时间的延长而减小,表明水化产物不断生成,促使内部孔隙结构细化,密实度提高,该结果与SEM分析结果一致。在相同养护时间下,不同掺量纤维素醚充填体的临界孔径相差不大,但各孔径的体积量存在差异。究其原因可能是纤维素醚影响充填体内部水化产物生成量,其“缓凝效应”降低了胶固粉的水化反应程度使水化产物生成量降低,导致充填体内部由尾砂颗粒堆积形成的空隙被填充、细化的量降低,使不同掺量纤

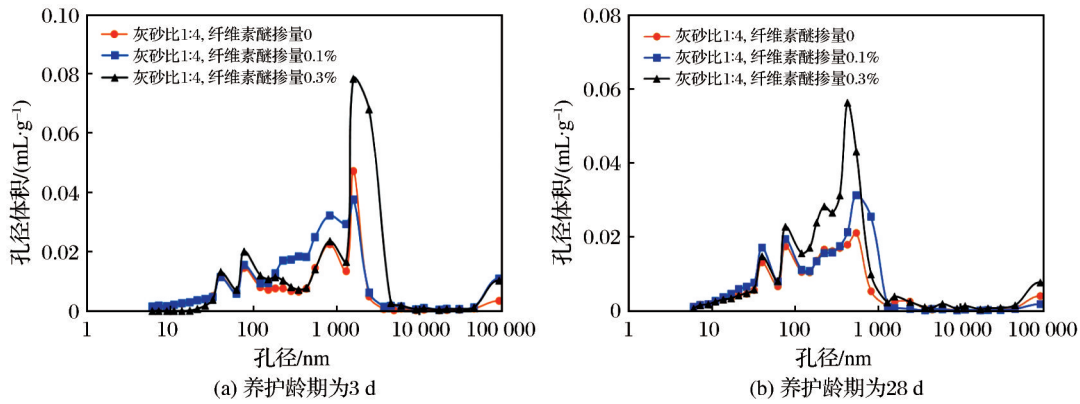


图9 分级尾砂充填体孔径分布曲线

Fig. 9 Pore size distribution of CTCB

纤维素醚充填体孔隙呈现出差异。

表2所示为不同纤维素醚掺量分级尾砂充填体孔径特征分析结果。由表2可知,纤维素醚的掺入可显著增大充填体总孔隙率、平均孔径、中值孔径和0.05 μm 以上宏观孔的比例。充填体总孔隙率和宏观孔含量增加的原因,除了纤维素醚降低

胶固粉水化产物生成量外,另一原因是掺加的纤维素醚在充填料浆搅拌制备过程中会引入空气,增加料浆中气泡含量,而纤维素醚的膜结构又具有稳定气泡和促进气泡融合的作用(王培铭等,2017),使得气泡在料浆硬化过程得到保留,转化为充填体中大小不一的气孔,降低了充填体的密实程度。

表2 不同掺量羟丙基甲基纤维素分级尾砂充填体孔结构特征

Table 2 Characteristic parameters of pore structure in CTCB with different HPMC dosages

类型	养护龄期/d	总孔隙率/%	平均孔径/ μm	中值孔径(体积)/ μm	0.05 μm 以上孔隙率/%
浓度 72%, 灰砂比 1:4, 纤维素醚掺量 0	3	35.78	0.107	0.587	30.02
浓度 72%, 灰砂比 1:4, 纤维素醚掺量 0.1%	3	40.86	0.117	0.924	35.90
浓度 72%, 灰砂比 1:4, 纤维素醚掺量 0.3%	3	43.53	0.283	1.583	40.98
浓度 72%, 灰砂比 1:4, 纤维素醚掺量 0	28	32.77	0.081	0.241	26.30
浓度 72%, 灰砂比 1:4, 纤维素醚掺量 0.1%	28	38.37	0.097	0.258	32.65
浓度 72%, 灰砂比 1:4, 纤维素醚掺量 0.3%	28	42.27	0.125	0.514	37.33

3 结论

(1) Bingham 模型能够较好地定量描述掺加纤维素醚的分级尾砂充填料浆的流变行为。随着纤维素醚掺量的增加,料浆的流变性能显著增强,表现为流变参数明显提高。纤维素醚掺量与料浆扩展度之间呈负相关关系,掺量越高,扩展度越低,表明纤维素醚对料浆流动性产生一定的抑制作用。

(2) 掺加纤维素醚能显著降低分级尾砂充填料浆的泌水率,当纤维素醚掺量为 0.1% 时,料浆泌水率降低幅度超过 85.0%,有效缓解了料浆离析现象,有助于料浆的远距离安全输送和充填接顶率的提高。

(3) 纤维素醚对充填体早期及长期抗压强度的

增长均表现出抑制作用,且随着纤维素醚掺量的增加,充填体的抗压强度降幅增大。SEM 图像显示纤维素醚的掺入未改变胶固粉水化产物类型。造成掺加纤维素醚充填体抗压强度降低的原因:一是纤维素醚会延缓胶固粉水化反应进程,降低了水化产物生成量;二是在料浆搅拌过程中纤维素醚会引入空气,其膜结构能够促进空气转化为充填体内部孔隙,使得充填体总孔隙率和宏观孔含量增大,降低了充填体密实程度。

参考文献 (References):

Chen X, Shi X Z, Zhou J, et al, 2020. Determination of mechani-

- cal, flowability, and microstructural properties of cemented tailings backfill containing rice straw [J]. *Construction and Building Materials*, 246: 118520.
- Feng K W, Ma K L, Yang H Z, et al, 2024. Influence of cellulose ethers on rheological properties of cementitious materials: a review [J]. *Journal of Building Engineering*, 95: 110347.
- Gu L N, Liu T J, Wu K, et al, 2022. Temperature-dependent water retention and bleeding of fresh cement-based materials with VEAs [J]. *Cement and Concrete Composites*, 130: 104539.
- Gu X W, Li X H, Zhang W F, et al, 2021. Effects of HPMC on workability and mechanical properties of concrete using iron tailings as aggregates [J]. *Materials*, 14(21): 6451.
- Jiang H Q, Fall M, Yilmaz E, et al, 2020. Effect of mineral admixtures on flow properties of fresh cemented paste backfill: assessment of time dependency and thixotropy [J]. *Powder Technology*, 372: 258-266.
- Yang L, Yilmaz E, Li J W, et al, 2018. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents [J]. *Construction and Building Materials*, 187: 290-298.
- Yilmaz E, Belem T, Bussière B, et al, 2011. Relationships between microstructural properties and compressive strength of consolidated and unconsolidated cemented paste backfills [J]. *Cement and Concrete Composites*, 33 (6): 702-715.
- Yin S H, Shao Y J, Wu A X, et al, 2020. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 247: 119590.
- 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华, 2019. 金属矿深部开采现状与发展战略 [J]. *工程科学学报*, 41(4): 417-426. Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua, 2019. Current status and development strategy of metal mines [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 41(4): 417-426.
- 曹宝栋, 郭攀, 2023. 减水剂对掺膨润土胶结充填体强度及流动性能的影响研究 [J]. *金属矿山*, 52(10): 247-252. Cao Baodong, Guo Pan, 2023. Study on the influence of water reducing agent on the strength and flow performance of bentonite-doped cemented backfill [J]. *Metal Mine*, 52 (10): 247-252.
- 陈鑫政, 郭利杰, 2024. 金属矿山充填技术工程实践与发展趋势 [J]. *铜业工程*, (4): 130-141. Chen Xinzheng, Guo Lijie, 2024. Engineering practice and development trend of metal mine backfill technology [J]. *Copper Engineering*, (4): 130-141.
- 甘德清, 杜双成, 张友志, 等, 2022. 不同种类引气剂对充填料浆流变特性及力学性能的影响 [J]. *矿业研究与开发*, 42(1): 23-28. Gan Deqing, Du Shuangcheng, Zhang Youzhi, et al, 2022. Effect of different air entraining agents on rheological and mechanical properties of filling slurry [J]. *Mining Research and Development*, 42(1): 23-28.
- 郭利杰, 刘光生, 马青海, 等, 2022. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展 [J]. *煤炭学报*, 47(12): 4182-4200. Guo Lijie, Liu Guangsheng, Ma Qinghai, et al, 2022. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 47(12): 4182-4200.
- 贾住平, 郑禄璟, 胡亚飞, 等, 2022. 贵州锦丰金矿胶固粉-分级尾砂充填技术研究与应用 [J]. *金属矿山*, 51(9): 43-48. Jia Zhuping, Zheng Lujing, Hu Yafei, et al, 2022. Research and application of filling technology with glue powder and graded tailing in Jinfeng gold mine, Guizhou Province [J]. *Metal Mine*, 51(9): 43-48.
- 蹇守卫, 马保国, 苏雷, 等, 2011. 纤维素醚改性砂浆的研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 30(3): 560-566. Jian Shouwei, Ma Baoguo, Su Lei, et al, 2011. Research progresses of cellulose ether-modified mortar [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 30(3): 560-566.
- 寇云鹏, 郭沫川, 谭玉叶, 等, 2023. 分级细尾砂胶结充填体早期水化放热及强度演化特性 [J]. *工程科学学报*, 45(8): 1293-1303. Kou Yunpeng, Guo Mochuan, Tan Yuye, et al, 2023. Early hydration heat release and strength evolution of cemented backfill with graded fine tailings [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 45(8): 1293-1303.
- 盛宇航, 裴佃飞, 齐兆军, 等, 2024. 尾砂粒级组成对胶结充填料流变特性与强度的影响 [J]. *黄金科学技术*, 32(4): 631-639. Sheng Yuhang, Pei Dianfei, Qi Zhaojun, et al, 2024. Influence of particle size composition of tailings on rheological characteristics and strength of cemented tailings backfill [J]. *Gold Science and Technology*, 32(4): 631-639.
- 宋学林, 张春雷, 付玉华, 等, 2024. 纤维影响胶结充填体初始微观结构及流动性能研究 [J]. *有色金属工程*, 14(9): 138-149. Song Xuelin, Zhang Chunlei, Fu Yuhua, et al, 2024. Study on the initial microstructure and flow properties of fibre-influenced cemented fillers [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 14(9): 138-149.
- 王培铭, 赵国荣, 张国防, 2017. 纤维素醚在新拌砂浆中保水增稠作用及其机理 [J]. *硅酸盐学报*, 45(8): 1190-1196. Wang Peiming, Zhao Guorong, Zhang Guofang, 2017.

- Mechanism on water retention and thickening of cellulose ethers in fresh mortars[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 45(8): 1190-1196.
- 王志荣, 石锦民, 王新坤, 等, 2024. 增稠剂对膏体充填料浆流动特性的影响及其工程应用[J]. *有色金属科学与工程*, 15(1): 97-104. Wang Zhirong, Shi Jinmin, Wang Xinkun, et al, 2024. Effect of thickeners on the flow characteristics of paste filling slurry and its engineering application [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 15(1): 97-104.
- 杨晓杰, 董鹏, 马一平, 等, 2019. 聚丙烯酰胺对水泥砂浆塑性收缩开裂性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 22(1): 1-6. Yang Xiaojie, Dong Peng, Ma Yiping, et al, 2019. Influence of polyacrylamide on plastic shrinkage cracking of cement mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 22(1): 1-6.
- 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等, 2018. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. *工程科学学报*, 40(5): 517-525. Wu Aixiang, Yang Ying, Cheng Haiyong, et al, 2018. Status and prospects of paste technology in China [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 40(5): 517-525.
- 吴疆宇, 靖洪文, 浦海, 等, 2021. 分形矽石胶结充填体的宏观细观力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 40(10): 2083-2100. Wu Jianguyu, Jing Hongwen, Pu Hai, et al, 2021. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(10): 2083-2100.
- 张雷, 李凡, 郭利杰, 等, 2023. 减水剂类型对细尾砂充填料浆流动性及强度的影响[J]. *有色金属工程*, 13(9): 110-120. Zhang Lei, Li Fan, Guo Lijie, et al, 2023. Effect of different water reducers on fluidity and strength of fine tailings filling slurry [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 13(9): 110-120.
- 张钦礼, 王石, 王新民, 等, 2016. 不同质量浓度下阴离子型聚丙烯酰胺对似膏体流变参数的影响[J]. *中国有色金属学报*, 26(8): 1794-1801. Zhang Qinli, Wang Shi, Wang Xinmin, et al, 2016. Influence of anionic polyacrylamide on rheological parameters of paste-like slurry under different mass concentrations [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 26(8): 1794-1801.

Study on the Influence of Cellulose Ether on the Fluidity and Strength of Classified Tailings Cemented Backfill

LI Hongpu¹, SHENG Yuhang², JIANG Qianshan¹, WANG Jingdan¹, LIU Jie²

1. Shandong Jinzhou Mining Group Co., Ltd., Rushan 264501, Shandong, China;

2. Backfill Engineering Laboratory, Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Laizhou 261441, Shandong, China

Abstract: To investigate the influence of cellulose ether on the fluidity and compressive strength of classified tailings cemented backfill (CTCB), hydroxypropyl methyl cellulose (in concentrations ranging from 0.1% to 0.3%) was utilized as a cellulose ether admixture. The variations in fluidity and strength of CTCB, both with and without cellulose ethers, were quantitatively assessed through rheological, expansion, bleeding, and unconfined compressive strength tests. Furthermore, the differences in microstructures of CTCB and the mechanism underlying cellulose ether-modified CTCB were investigated using chemical bonding water tests, scanning electron microscopy (SEM), and mercury intrusion porosimetry (MIP). The findings indicate that, compared to CTCB slurry without cellulose ether, at a concentration of 72%, an ash-to-sand ratio of 1:4, and a cellulose ether content of 0.3%, the yield stress and plastic viscosity of the slurry increased by factors of 62.66 and 8.55, respectively, while the bleeding rate was completely eliminated. The addition of cellulose ethers to CTCB slurry results in increased yield stress and plastic viscosity, while simultaneously reducing the bleeding rate and enhancing the stability of the slurry. The effects become more pronounced with higher dosages of cellulose ethers. Notably, the expansion of the CTCB slurry decreases by 49.18%, indicating a negative

correlation between cellulose ether dosage and slurry expansion, which suggests an adverse impact on the fluidity of the CTCB slurry. Furthermore, cellulose ethers exhibit an inhibitory effect on both the early (3 day) and long-term (28 day) compressive strength of CTCB. Specifically, when the cellulose ether content is increased from 0 to 0.3%, the 3-day compressive strength decreases by 49.44%, and the 28-day compressive strength decreases by 41.17%. The reduction in compressive strength becomes more significant with higher dosages of cellulose ethers. Scanning electron microscopy (SEM) analysis indicates that the incorporation of cellulose ethers does not alter the type of hydration products formed by the cementitious powders. The findings from the chemical binding water test suggest that incorporating cellulose ethers leads to a reduction in the content of hydration products. Observations utilizing mercury intrusion porosimetry (MIP) demonstrate that cellulose ethers introduce air, which subsequently increases the macropore content and overall porosity of the backfill. This results in suboptimal densification of CTCB. These research outcomes offer a valuable reference for the application of cellulose ethers in the modification of CTCB.

Key words: classified tailings cemented backfill; hydroxypropyl methyl cellulose; fluidity; compressive strength; microstructure

山东地矿局交出找矿亮眼“成绩单”

9月12日,山东省地矿局新一轮找矿突破推进会在济南召开。会上透露,2024年以来,该局新提交矿产地11处,新增资源量金42 t、银14 t、铁矿石1.2亿 t、铜铅锌等有色金属31万 t、石墨矿物量179万 t、脉石英221万 t、萤石35万 t、菱镁矿1396万 t,助力山东省提前完成“十四五”找矿目标。

会议通报了该局近2年地质找矿开展情况,解读了《山东省地矿局推动新一轮找矿突破若干措施》,7个局属地勘单位围绕推动新一轮找矿突破战略行动取得的新进展、新成果作了交流发言。

会议认为,要聚焦重点任务,精准把握找矿突破战略主攻方向,突出战略性矿产勘查,持续强化科技攻关,加强青年人才培养,努力找大矿、找好矿,为全省经济社会高质量发展筑牢资源根基。

会议提出,要发挥好地勘单位地质找矿主力军作用,进一步压实各级责任,凝聚找矿工作合力,争取政策、项目和资金支持,确保新一轮找矿突破战略行动取得新成果。要紧盯关键矿种,在重点勘查区和重要矿山“攻深找盲”,拓展省外潜力区,推进

境外合作项目,实施好海上项目,促进战略性矿产增储上产。要培育发展特色找矿品牌,积极获取优质矿业权,强化科技创新,加快高端找矿装备建设,加强找矿专业技术人才队伍建设,在服务大局中彰显担当、在持续突破中厚植动能。要强化责任落实,压紧压实各级责任,在全局上下形成统筹协调、密切配合、共同推进的地质找矿工作格局。要强化激励机制,树立找矿立功的鲜明导向,定期评选表彰先进,落实激励政策,充分调动各方面的找矿积极性。要强化考核督导,充分发挥考核奖励的作用,科学设置考核指标,严格开展督导检查,确保地质找矿工作取得实效。要强化后勤保障,设立局驻新疆工作站和野外地质工作保障中心,为局属单位提供全方位服务保障,切实提升找矿能力。

会议要求,下一步,要准确把握新一轮找矿突破战略行动面临的新形势、新任务,充分认识当前地质找矿工作存在的短板和不足,把解决问题作为重要的工作抓手,进一步攻坚克难、勇挑重担,奋力开创地质找矿工作新局面。

(来源:中国矿业报)