

电除尘粉煤灰对铅锌尾砂胶结充填体性能的影响*

彭亮^{1,2,3}, 蒋冲¹, 江科^{2,3}, 杨奥生^{2,3}, 余锦柱^{2,3}, 郑伯坤^{2,3}, 尹贤刚^{2,3}, 康瑞海^{2,3}

(1.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;

3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:为研究电除尘粉煤灰(EFA)对铅锌尾砂胶结充填体性能的影响规律。通过坍落度测试和流变性计算,分析了料浆的流动性。同时,测定了充填体抗压强度的变化情况,并通过低场核磁共振技术(L-F NMR)分析了充填体孔隙的变化规律。结果表明,EFA和普通硅酸盐水泥(OPC)的最佳掺比为EFA:OPC=4:6。此时,料浆的坍落度为27.0 cm,且其屈服应力和塑性黏度分别降低了16.60 Pa和0.0258 Pa·s。在最佳的EFA掺比下,后期充填体强度显著增加,且在第28天养护龄期下的充填体抗压强度最高,为2.76 MPa。同时,L-F NMR测试结果表明,在最佳的EFA掺比下,后期充填体中的孔隙率显著降低,第28天充填体总孔隙率为12.50%,充填体中的微孔、过渡孔、中孔和大孔的孔隙率分别为5.51%、4.48%、1.37%和1.14%。铅锌尾砂充填效果改善的原因是最佳的EFA掺比改善了料浆的颗粒级配,降低了料浆的屈服应力和塑性黏度,同时,改善了充填体的内部结构,降低了孔隙率,提高了充填体的密实性和抗压强度。

关键词:电除尘粉煤灰;抗压强度;低场核磁共振;孔隙率

中图分类号:TD853.34 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)06-0081-08

0 引言

铅锌尾矿是矿山生产排放的一种固体废弃物,大量尾矿堆存给周边环境带来巨大的环境风险和安全隐患^[1]。利用充填技术将铅锌尾矿处理成充填体已成为一种广泛应用的方法。粉煤灰作为一种常见的工业废弃物资源化利用材料,具有粒度细、掺配方便等优点,被广泛用于建筑材料和水泥制品中^[2]。

在充填领域,研究人员开展了大量以粉煤灰为掺合材料以改善充填体性能的研究工作^[3-4]。韦寒波等^[5]发现将粉煤灰掺入到粗骨料中,能够优化颗

粒级配,有利于形成稳定的高浓度料浆,同时提高料浆管输性能和充填体强度。汪耀武^[6]研究发现向充填体中添加粉煤灰及粉煤灰活化剂(CaO)能够提高充填体的早期强度。刘音等^[7]以粉煤灰为主要材料制备了一种新型充填材料,该材料具有良好的料浆流动性且后期具有较高的强度。LI等^[8]利用微生物诱导方解石沉淀,用煤矸石和粉煤灰制备一种新型充填材料,降低了料浆的坍落度和泌水率,提高了充填体的抗压强度。CHENG等^[9]研究了粉煤灰和煤底灰的对比对充填材料性能的影响,结果表明,在最佳粉煤灰和煤底灰配比下,泌水率降低,充填体的致密性显著提高。WANG等^[10]研究了粉煤灰的类型和用量对充填材料的黏度和单轴抗压强度的影响,结果表明,粉煤灰的掺量越高,料浆的黏度越大,充填体抗压强度越低。然而,目前关于电除尘粉煤灰(EFA)在铅锌尾砂充填体中的使用研究及其对铅锌尾砂充填体性能的影响尚不清楚。

近年来,低场核磁共振(L-F NMR)技术被广泛用于孔隙表征,可以快速、无损地检测固体孔隙结构^[11-12]。HE等^[13]使用L-F NMR分析了离子螯合剂对充填体孔隙结构的影响,结果表明,离子螯合剂可显著改善充填体的孔隙结构。ZHAO等^[14]利用L-F NMR研究了MgO-CaO膨胀剂掺量对充填体孔隙微观结构的影响,结果表明,充填体的孔隙率随着膨胀剂含量的增加而增大。

本文旨在探究电除尘粉煤灰(EFA)对铅锌尾砂充填体性能的影响,确定最佳的EFA掺合比例,并分析其作用机理。通过分析料浆的坍落度和流变性来评估其流动性。同时,测定了充填体的抗压强度,并采用L-F NMR对充填体中的孔隙结构变化

* 收稿日期:2023-09-26

基金项目:湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4057)。

作者简介:彭亮(1983—),男,贵州遵义人,博士研究生,高级工程师,主要从事充填系统工艺技术研究与设计、采空区处理、胶结剂研究工作,E-mail:lpeng008@qq.com。

进行了分析。通过深入分析,对EFA在铅锌尾砂充填体中的应用及其对铅锌尾砂充填体性能的影响规律有了更深入的了解,有望为类似充填材料的研究提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验样品

试验所用原材料取自于某铅锌矿山。其中,充填骨料为铅锌矿全尾砂,胶结材料为P·O 42.5普通硅酸盐水泥(OPC)和EFA。通过X射线荧光光谱分析仪(XRF)测定了原材料的化学组成,见表1。

表1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials %

原材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
全尾砂	3.91	44.95	14.16	3.41	12.82	7.64	12.54	0.57
OPC	62.82	21.87	5.78	2.52	3.40	0.91	2.23	0.47
EFA	18.31	53.72	16.76	4.19	3.02	2.24	1.43	0.33

从表1可以看出,EFA中的CaO含量超过15%,属于高钙粉煤灰。同时,EFA中CaO、Al₂O₃、SiO₂的含量超过80%。由粉煤灰的活性计算公式($Ma = (M_{CaO} + M_{Al_2O_3}) / M_{SiO_2}$)^[9]计算出EFA的活性率为0.65。因此,EFA具有较高活性,可以用来替代部分水泥。图1为OPC和EFA的SiO₂-CaO-Al₂O₃三元相图。阴影区域表示材料具有火山灰活性。粉煤灰是煤燃烧产生的一种副产品。通常来说,粉煤灰具有火山灰材料的活性^[15-16]。三元相图中的红色虚线(CaO含量为10%)是分界线(颜色标识见电子版),根据该分界线,发现EFA具有较多的碱活性成分。OPC提供了大量的CaO作为水硬性黏合剂。

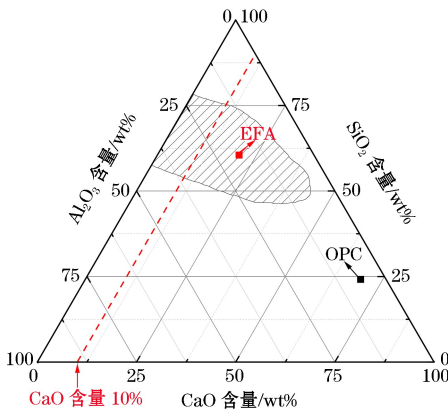


图1 EFA和OPC的CaO-SiO₂-Al₂O₃体系三元相图
Fig.1 Ternary phase diagram of CaO-SiO₂-Al₂O₃ system of EFA and OPC

开展全尾砂、OPC和EFA的粒度分析有助于了解充填材料的性能、强度和微观结构。对全尾砂、OPC和EFA进行取样和制样,并利用激光粒度分析仪进行粒度测试。进行了多次测试,以防止取样偏差,经分析、整理,得到全尾砂、OPC和EFA的粒度分布结果,如图2所示。同时,全尾砂、OPC和EFA的D₁₀、D₃₀、D₆₀和平均粒径(D_{平均})见表2。

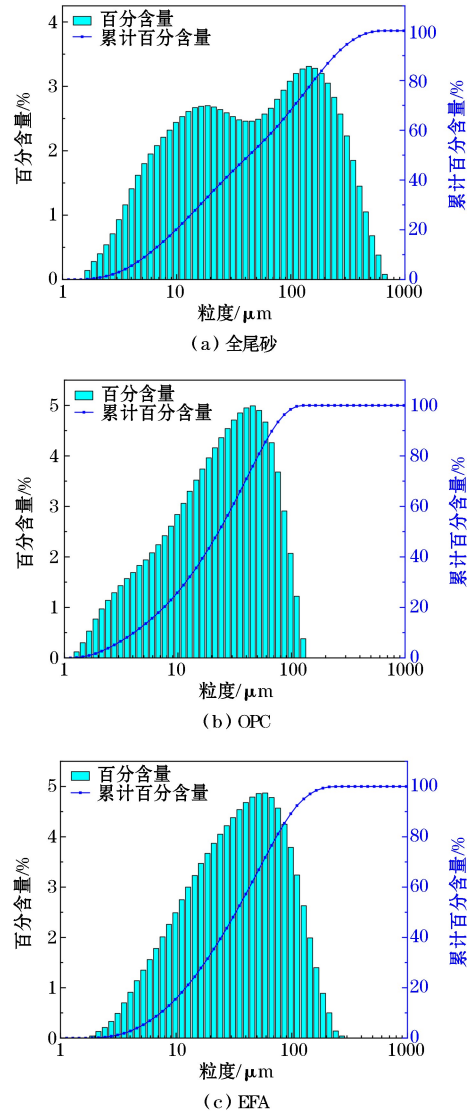


图2 全尾砂、OPC和EFA的粒度分布
Fig.2 Particle size distribution of full tailings, OPC and EFA

表2 原材料的粒度分析结果

Table 2 Results of particle size analysis of raw materials

原材料	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	D _{平均}
全尾砂	5.56	16.34	71.45	89.50
OPC	4.31	11.95	29.25	30.00
EFA	16.78	17.55	42.85	45.10

1.2 试验设计

制备新型胶凝材料的原料为 EFA 和 OPC。基于预试验的结果,本研究中充填料浆的质量浓度固定为 70%,灰砂比选定为 1:6,EFA 和 OPC 的掺量比设定为 2:8、3:7、4:6、5:5,并且补充纯 OPC 作为对照组。

1.3 试验方法

1.3.1 坍落度测试

充填料浆的坍落度可以直观反映充填料浆黏聚力和摩擦阻力的大小,同时也能够直观地反映其泵送性能^[17]。依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016),坍落度测试使用顶部直径为 100 mm、底部直径为 200 mm、高度为 300 mm 的标准圆锥体^[18],坍落度测试示意如图 3 所示。平行测量 3 次,并取 3 次测量结果的平均值作为料浆的坍落度,试验在(25±1)℃的条件下进行。

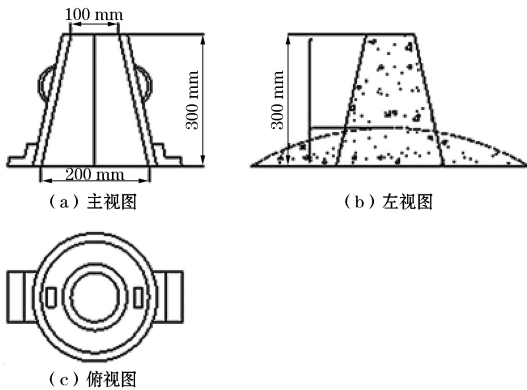


图 3 坍落度测试

Fig.3 Slump test

1.3.2 流变性测试与计算

流变学是研究荷载下物质流动与变形规律的科学。研究表明,全尾砂充填料浆的流变特性较为复杂。通常来说,探究充填料浆流变学的主要目的是研究流体黏度特性以及料浆在管输中的摩擦阻力损失。在本研究中,通过 RST-SST 流变仪(转子直径 40 mm,长度 60 mm,间隙 5 mm)测定充填料浆的流变性能,试验在(25±1)℃下进行。按流变学理论划分,本文研究的充填料浆属于宾汉姆流体,其流变方程见式(1)^[19]。

$$\tau = \mu\gamma = \tau_0 + K\gamma \quad (1)$$

式中, τ 为剪切应力,Pa; μ 为表观黏度,Pa·s; γ 为剪切速率, s^{-1} ; τ_0 为动态屈服应力,Pa; K 为稠度系数,Pa·s。

τ_0 是阻碍塑性变形的最大应力,由材料之间的

附着力和摩擦力引起,反映了新型掺粉煤灰充填料浆的形变能力。当 $\tau > \tau_0$ 时,料浆产生流动形变。 K 反映流体各平流层之间产生的与流动方向反向的阻止其流动的黏滞阻力的大小,表征料浆流动的速率, K 越大,浆体黏聚性越好,在相同外力作用下流动越慢。

1.3.3 充填体抗压强度测试

单轴抗压强度依据《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T 51450—2022)进行。按照试验设计方案配料,将料浆均匀地加入到规格为 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的标准三联铁制模具中,根据料浆沉降和凝固情况完成添模和刮模;试块初凝后,脱模养护,养护温度为 24℃,湿度≥95%;养护至 3 d、7 d 和 28 d 龄期,分别测试强度。使用 TYE-20 型压力机以 1 mm/min 的轴向位移率对圆柱形试样进行单轴抗压强度试验,以获得抗压强度大小。所有试验重复 3 次,取 3 次试验的平均值。

1.3.4 L-F NMR 测试

使用低场核磁共振纳米孔分析仪(NMRC12-010V)分析充填体的孔隙分布。L-F NMR 是通过将 T_2 光谱转换为孔隙分布的方法获得样品的孔隙率^[20-21]。为了获得充填体的孔隙分布,将 5 g 充填体样品和 25 mL 超纯水置于高速离心机中,并以 13 200 r/min 的速度离心 99 min,制备水饱和和充填体。通过这种方法,获得了用于 L-F NMR 测试的水饱和和充填体样品。L-F NMR 测试在 12 MHz 的光谱仪频率和(0.3±0.05)T 的磁场强度下进行。探头线圈直径为 25 mm,回波时间为 0.3 ms。磁体的温度保持为 32℃,回波次数为 18 000。

2 结果与讨论

2.1 料浆坍落度变化

不同 EFA 和 OPC 掺量下的充填料浆坍落度测试结果如图 4 所示。结果表明,在相同的充填料浆浓度和灰砂比的条件下,EFA 的掺量对充填料浆的坍落度有较大影响,随着 EFA 掺量的增加,充填料浆的坍落度先增加后减小。使用纯 OPC 时,料浆的坍落度值为 27.0 cm。而当 EFA:OPC=4:6 时,坍落度为 28.6 cm,此时充填料浆的流动性最好。然而,随着 EFA 掺量的继续增加,充填料浆的坍落度逐渐减小。产生上述现象的原因可能是 EFA 的粒径比 OPC 的粒径大。其中,EFA 的 D_{30} 值为 17.55 μm , $D_{\text{平均}}$ 值为 45.10 μm ,而 OPC 的 D_{30} 值为 11.95 μm , $D_{\text{平均}}$ 值为 30.00 μm 。球状的粉煤灰颗粒能填补骨料间的缝隙,使得充填料浆的级配合理,并

使充填料浆更具均质性,降低了充填料浆的坍塌度^[22]。同时,由表面光滑的球状玻璃体组成的EFA的合理掺入能够减少颗粒间的相互摩擦,降低颗粒间的摩擦阻力,并降低充填料浆的黏聚性,从而增加坍塌度^[23]。由此可见,合理的EFA掺量对充填料浆的流动性有很大的益处。

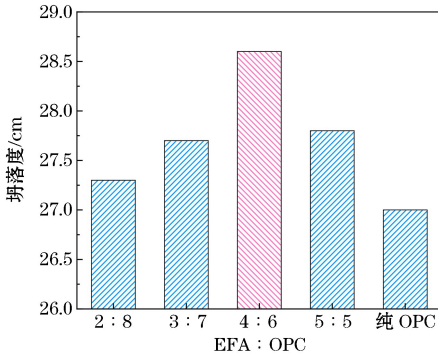


图4 不同EFA和OPC掺量下的充填料浆坍塌度测试结果

Fig.4 Slump test results of filling slurry with different EFA and OPC dosages

2.2 充填料浆流变性分析

当全尾砂充填料浆处于静止状态时,细颗粒会形成一个骨架结构以抵抗剪切力,当施加扭矩剪切力时,料浆开始流动所需要的最小应力被称为屈服应力^[24]。屈服应力的定义可根据具体情况而有所差异,取决于材料的性质和测试方法。料浆在流动过程中,颗粒间的运动速度差异会导致颗粒相互摩擦,从而产生一种被称为“黏性”的特性,通常用塑性黏度来描述这种性质^[25]。根据上述论述可知,在充填料浆浓度为70%,且灰砂比为1:6的条件下,当EFA和OPC的掺比为4:6时,料浆坍塌度值最大。因此,在坍塌度的基础上,进一步验证相同条件下充填料浆的屈服应力和塑性黏度的变化情况,对评估料浆的输送性能具有重要意义。

通过RST-SST流变仪和宾汉姆流体模型拟合,可以得出充填料浆屈服应力和塑性黏度的变化情况。图5和图6分别为在相同充填浓度和灰砂比的条件下,最佳EFA掺量和OPC的使用对充填料浆塑性黏度的影响和剪切速率-剪切应力的拟合曲线。流变拟合回归试验结果(宾汉塑性流体)见表

3。结果表明,当纯添加OPC时,充填料浆的屈服应力和塑性黏度分别为49.26 Pa和0.1932 Pa·s。然而,当EFA:OPC=4:6时,充填料浆的屈服应力和塑性黏度分别降低了16.60 Pa和0.0258 Pa·s。这表明EFA的添加能增强充填料浆的输送性能。

EFA的添加引起料浆屈服应力和塑性黏度降低,可能是因为EFA的添加改善了充填料浆的颗粒级配,使得颗粒间的孔隙率减小,从而减少了充填料浆中赋存的气泡。研究表明,料浆中的水分在填满颗粒间的孔隙后,剩下的水分会包裹在颗粒的表面,从而形成一层水膜,水膜越厚,料浆的流动性越好。EFA的加入降低了颗粒间的孔隙率,从而使得料浆中的水分在填满颗粒间的孔隙后,剩下包裹在颗粒表面的水分增加,从而增加颗粒表面的水膜,减少了颗粒间的摩擦,降低了料浆的屈服应力和料浆的塑性黏度。

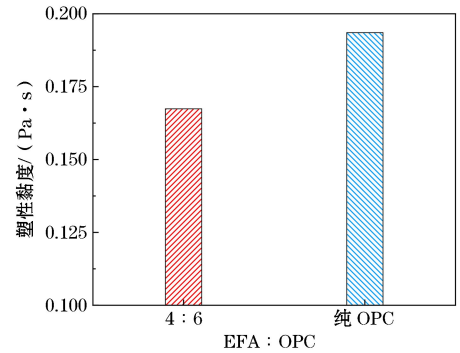


图5 充填料浆塑性黏度分析

Fig.5 Plastic viscosity analysis of filling slurry

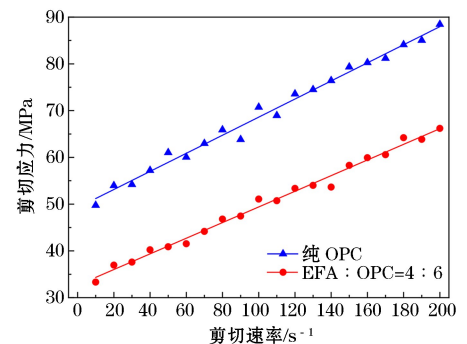


图6 充填料浆剪切速率-剪切应力曲线

Fig.6 Shear rate-shear stress curves of filling slurry

表3 流变拟合回归试验结果(宾汉塑性流体)

Table 3 Results of rheological fitting regression test (Bingham plastic fluid)

质量浓度/%	灰砂比	条件	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	回归方程	相关系数R ²
70	1:6	纯 OPC	49.26	0.1932	$\tau = 49.26 + 0.1932\gamma$	0.984 74
70	1:6	OPC:EFA=6:4	32.66	0.1674	$\tau = 32.66 + 0.1674\gamma$	0.988 21

2.3 充填体抗压强度变化

不同养护龄期下的充填体抗压强度变化曲线如图 7 所示。随着养护龄期的增加,充填体抗压强度不断增加。其中,当养护龄期为第 3 天时,纯使用 OPC 的充填体的抗压强度最高,为 0.74 MPa。但是,当养护龄期增加至第 28 天时,EFA : OPC = 4 : 6 的充填体的抗压强度最高,为 2.76 MPa,相较于纯使用 OPC,EFA : OPC = 4 : 6 的充填体的抗压强度提高了 9.96%。据推测,早期 OPC 水化作用的产物填充了充填体中的孔隙,增加了材料的密实性和抗压强度,同时水化产物会在充填体中逐渐生长,形成坚固的晶体结构,从而增加了充填体的早期抗压强度。然而,随着养护龄期的增加,在最佳 EFA 掺量下,EFA 中的活性硅酸物质在水化反应中与水结合形成凝胶,填充充填体中的孔隙。同时,EFA 本身填充了充填体中的孔隙,增加了充填体的密实性,填补了水泥颗粒和尾砂颗粒之间的间隙,减少了颗粒之间的孔隙,提高了充填体的密实度和抗压强度。此外,EFA 中的微细颗粒具有较大的比表面积,可在水泥水化过程中提供更多的活性表面。这些纳米颗粒提供了更多的水化反应界面,有助于水泥反应产物的生成和晶体的生长,从而增强充填体的抗压强度。

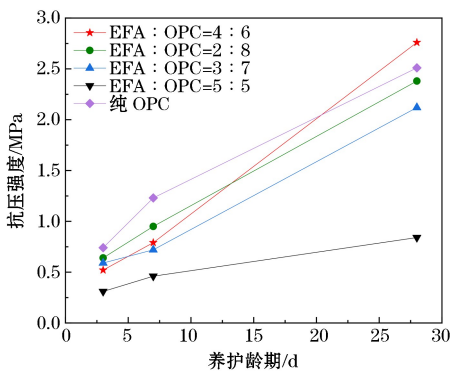


图 7 充填体抗压强度变化曲线

Fig.7 Change curves of compressive strength of backfill

2.4 L-F NMR 测试分析

根据相关文献中描述的固体孔径分类,孔隙的种类可分为大孔(>1000 nm)、中孔($100 \sim 1000$ nm)、过渡孔($10 \sim 100$ nm)和微孔($0 \sim 10$ nm)^[26]。图 8 和图 9 分别给出了第 3 天充填体的孔隙分布和不同类型孔隙的孔隙率。结果表明,当 EFA : OPC = 4 : 6 时,充填体的总孔隙率为 19.38%,而纯使用 OPC 时,充填体的总孔隙率为 16.95%。明显地,纯

使用 OPC 的条件下,第 3 天充填体中不同类型孔的孔隙率皆高于 EFA : OPC = 4 : 6 时的充填体。在 EFA : OPC = 4 : 6 的条件下,微孔、过渡孔、中孔和大孔的孔隙率分别为 7.47%、6.65%、2.32% 和 2.94%。在纯使用 OPC 条件下,充填体中的微孔、过渡孔、中孔和大孔的孔隙率分别为 6.76%、5.31%、2.12% 和 2.74%。据推测,EFA 中的活性硅酸物质颗粒较小,可能无法完全填充充填体中的孔隙,导致早期孔隙率较大。同时,EFA 中含有不同的矿物掺和物,如硅酸钙、氧化铝、氧化铁等。这些矿物掺和物的添加可以改变水泥的反应性和水化产物的形成过程,从而影响充填体的孔隙结构和分布,并导致孔隙增加,使得早期充填体的抗压强度较低。

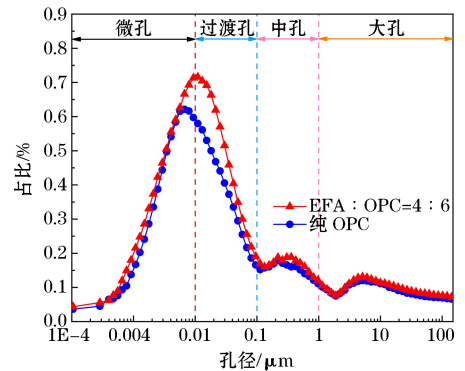


图 8 第 3 天充填体的孔隙分布

Fig.8 Pore distribution of backfill on day 3

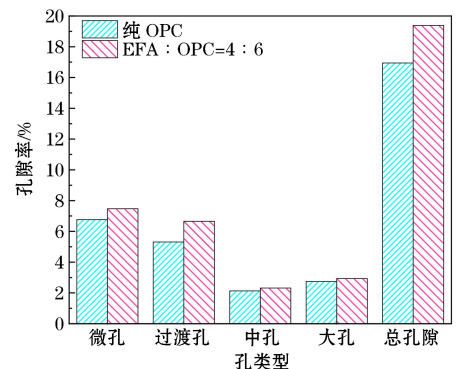


图 9 第 3 天充填体的不同类型孔隙的孔隙率

Fig.9 Porosity of different types of pores in the backfill on day 3

随着时间的增加,第 28 天时,在合理的 EFA 掺量下,充填体的孔隙率显著下降。图 10 和图 11 分别给出了第 28 天充填体的孔隙分布和不同类型孔隙的含量。结果表明,当 EFA : OPC = 4 : 6 时,充填体的总孔隙率降为 12.50%,而纯使用 OPC 时,充填体的总孔隙率为 16.22%。EFA : OPC = 4 : 6

时,第 28 天充填体中各类孔隙的孔隙率皆低于纯使用 OPC 的条件下的充填体。在纯使用 OPC 的条件下,微孔、过渡孔、中孔和大孔的孔隙率分别为 6.64%、6.14%、1.74% 和 1.70%。而当 EFA : OPC = 4 : 6 时,充填体中的微孔、过渡孔、中孔和大孔的孔隙率分别为 5.51%、4.48%、1.37% 和 1.14%。据推测,EFA 中存在活性硅酸物质,如硅酸钙、硅酸镁等。这些物质在水泥水化反应中与水结合形成凝胶,填充了充填体中的孔隙,导致孔隙率降低。此外,EFA 作为一种矿渣掺合材料,其中的熟料颗粒可以与水泥中的颗粒发生反应。这些反应有助于生成水化产物,并进一步填补充填体的孔隙空间。熟料颗粒的反应还有助于润湿和覆盖水泥颗粒表面,减少了孔隙生成的可能性。同时,随着时间的推移,充填体中的水化产物会进一步晶化和成熟,产生更加致密的结构。这种长期龄期效应导致内部孔隙减少和孔隙率降低,同时提高了充填体的抗压强度。

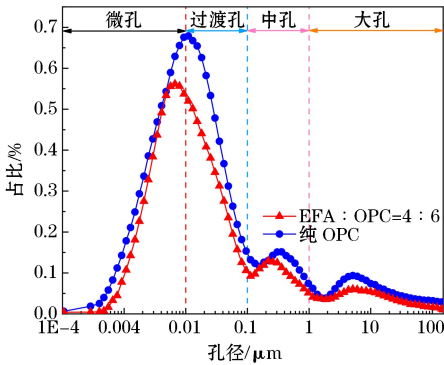


图 10 第 28 天充填体的孔隙分布

Fig.10 Pore distribution of backfill on day 28

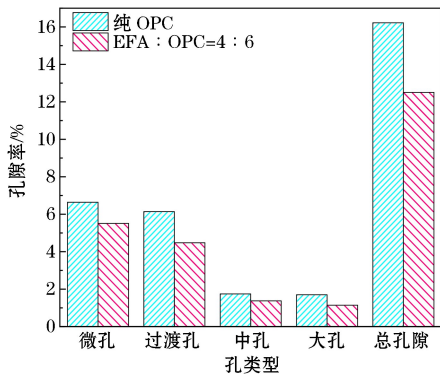


图 11 第 28 天充填体的不同类型孔隙的孔隙率

Fig.11 Porosity of different types of pores in the backfill on day 28

3 结论

(1) 新型胶凝材料中 EFA 和 OPC 的最佳掺比

为 4 : 6,相较于纯使用 OPC,此掺比下充填料浆的坍落度增加了 1.6 cm。

(2) 在最佳的 EFA 掺量下,充填料浆的流变性能有所改善。纯使用 OPC 时,充填料浆的屈服应力和塑性黏度分别为 49.26 Pa 和 0.1932 Pa · s;然而,当 EFA : OPC = 4 : 6 时,充填料浆的屈服应力和塑性黏度分别降低了 16.60 Pa 和 0.0258 Pa · s。

(3) 在最佳的 EFA 掺量下,后期充填体抗压强度显著增加。当养护龄期为 28 d 时,EFA : OPC = 4 : 6 的充填体抗压强度最高,为 2.76 MPa,相较于纯使用 OPC 而言,充填体抗压强度提高了 9.96%。

(4) 在最佳的 EFA 掺量下,后期充填体中的孔隙率显著降低。当养护龄期为 28 d 时,最佳 EFA 掺比下充填体总孔隙率为 12.50%。此时,充填体中的微孔、过渡孔、中孔和大孔的孔隙率分别为 5.51%、4.48%、1.37% 和 1.14%。

参考文献(References):

[1] 翟旭东.某铅锌尾矿回收氧化锌选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2023(3):110-115.
ZHAI Xudong. Experimental research on recovery of zinc oxide from a lead-zinc tailings [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(3):110-115.

[2] 何骞.采煤沉陷区充填治理粉煤灰-建筑骨料浆液性能研究[J].煤矿安全,2023,54(7):178-187.
HE Qian. Performance study on filling and treating fly ash-building aggregate slurry in coal mining subsidence area[J]. Safety in Coal Mines, 2023,54(7):178-187.

[3] 槐衍森.可变浓度大掺量粉煤灰充填材料与流动规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2017.
HUAI Yansen. Variable concentration with high volume of fly-ash filling materials and its flow law research [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017.

[4] 游少洋,黄杰,马吉庆,等.煤矿并用赤泥/粉煤灰充填材料的抗压抗折性能研究[J].矿产保护与利用,2023,43(1):148-154.
YOU Shaoyang, HUANG Jie, MA Jiqing, et al. Study on compressive and flexural properties of red mud/fly ash filling material for coal mine [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(1):148-154.

[5] 韦寒波,巴蕾,高谦.粉煤灰掺量对胶结充填体强度影响规律研究[J].矿业研究与开发,2020,40(12):28-32.
WEI Hanbo, BA Lei, GAO Qian. Study on the influence law of fly ash content on the strength of cemented backfill [J]. Mining Research and Development, 2020, 40 (12): 28-32.

- [6] 汪耀武.粉煤灰对三山岛金矿充填体强度影响的试验研究[J].中国矿业,2020,29(9):137-140.
WANG Yaowu. Experimental study on influence of fly ash on backfill strength of Sanshandao gold mine[J]. China Mining Magazine,2020,29(9):137-140.
- [7] 刘音,王昊宇,郭皓,等.大掺量粉煤灰充填材料优化配比及性能研究[J].矿业研究与开发,2020,40(3):56-61.
LIU Yin, WANG Haoyu, GUO Hao, et al. Proportion optimization and performance of filling materials with large-content of fly ash[J]. Mining Research and Development, 2020,40(3):56-61.
- [8] LI M, PENG Y F, ZHANG J X, et al. Properties of a backfill material prepared by cementing coal gangue and fly ash through microbial-induced calcite precipitation [J]. Construction and Building Materials,2023;131329.
- [9] CHENG B C, LIU R T, LI X H, et al. Effects of fly and coal bottom ash ratio on backfill material performance[J]. Construction and Building Materials,2022;125831.
- [10] WANG J, FU J X, SONG W D, et al. Viscosity and strength properties of cemented tailings backfill with fly ash and its strength predicted[J].Minerals,2021,11(1):78.
- [11] YANG A S, LIAO Y F, AN M Y, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on flocculation filtration of low-rank coal slurry[J].Molecules,2022,27(19):6460.
- [12] LUO T, CHENG H, LIU F, et al. Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete[J].Case Studies in Construction Materials,2022,16:e01048.
- [13] HE P, ZENG S G, ZHOU Z C, et al. Effect of ion chelator on water sorption and transport behavior of unsaturated mortars with high volume fly ash and blast furnace slag[J]. Construction and Building Materials,2022;129539.
- [14] ZHAO H T, LI X L, CHEN X D, et al. Microstructure evolution of cement mortar containing MgO-CaO blended expansive agent and temperature rising inhibitor under multiple curing temperatures[J].Construction and Building Materials,2021,278;122376.
- [15] ALBERICI S, BEER J D, HOORN I V D, et al. Fly ash and blast furnace slag for cement manufacturing[J]. BEIS Research Paper,2017(19):1-34.
- [16] XU G, SHI X M. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review[J]. Resources, Conservation Recycling, 2018, 136: 95-109.
- [17] 陈贺新,胡立强.某金矿全尾砂充填材料改性试验与配比优化研究[J].金属矿山,2023(9):24-28.
CHEN Hexin, HU Liqiang. Study on modification and ratio optimization of unclassified tailings filling material in a gold mine[J]. Metal Mine,2023(9):24-28.
- [18] 崔春阳,李春元,王美美,等.富孔贫胶固废充填材料双组分破坏试验及强度模型[J].煤炭科学技术,2023,51(9):77-87.
CUI Chunyang, LI Chunyuan, WANG Meimei, et al. Failure test and strength model of high-porous low-cementitious waste backfilling material [J]. Coal Science and Technology,2023,51(9):77-87.
- [19] 吴少康,张俊文,徐佑林,等.煤矿高水充填材料物力学特性研究及工程应用[J].采矿与安全工程学报,2023,40(4):754-763.
WU Shaokang, ZHANG Junwen, XU Youlin, et al. Research and engineering application on physical and mechanical properties of coal mine high water filling materials[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023,40(4):754-763.
- [20] MAO Y Q, XIA W C, XIE G Y, et al. Rapid detection of the total moisture content of coal fine by low-field nuclear magnetic resonance[J].Measurement,2020,155:107564.
- [21] WEN X D, YIN G J, XIA L, et al. Spatiotemporal evolution of water and pore structure in cement-based material containing SRA by LF NMR[J].Materials Today Communications,2023,35:106076.
- [22] 许建疆,何明胜,郭军林,等.粉煤灰微珠-沙漠砂陶粒混凝土正交试验研究[J].非金属矿,2022,45(5):83-88.
XU Jianjiang, HE Mingsheng, GUO Junlin, et al. Orthogonal experimental study on fly ash cenosphere desert sand ceramsite concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45 (5):83-88.
- [23] 程子扬,李敬芳,陈旭勇,等.骨料含水量的差异对于粉煤灰再生混凝土性能的影响[J].武汉工程大学学报,2021,43(5):534-538.
CHENG Ziyang, LI Jingfang, CHEN Xuyong, et al. Influence of water content of aggregate on properties of fly ash recycled concrete [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2021,43(5):534-538.
- [24] 郝宇鑫,黄玉诚,李育松,等.研石似膏体充填料浆临界流速影响因素研究[J].煤炭工程,2022,54(4):128-133.
HAO Yuxin, HUANG Yucheng, LI Yusong, et al. Influencing factors of critical flow rate of gangue paste-like filler slurry[J]. Coal Engineering,2022,54(4):128-133.
- [25] 王小林.掺粗骨料高浓度充填自输送平直管道磨损规律[D].北京:北京科技大学,2023.
WANG Xiaolin. Wear law of horizontal straight pipe for the transport of high concentration backfill containing coarse aggregate by gravity[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [26] YANG A S, LIAO Y F, AN M Y, et al. Effect of surfactant and flocculant on low-rank coal slime filtration: From filter cake characteristics point of view[J].Fuel,2022, 327:125136.

Effect of Fly Ash Collected by Electrofilter on Cementation Backfill Performance of Lead-Zinc Tailings*PENG Liang*^{1,2,3}, *JIANG Chong*¹, *JIANG Ke*^{2,3}, *YANG Aosheng*^{2,3},*YU Jinzhu*^{2,3}, *ZHENG Bokun*^{2,3}, *YIN Xiangang*^{2,3}, *KANG Ruihai*^{2,3}

(1.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;

3.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In order to investigate the influence of Fly ash collected by electrofilter (EFA) on the cementation filling performance of lead-zinc tailings, the flowability of the slurry was analyzed by slump and rheological calculation. At the same time, the change of the compressive strength of the backfill was measured, and the change rule of the porosity of the backfill was analyzed by low-field nuclear magnetic resonance (L-F NMR). The results show that the optimum blending ratio of EFA and OPC is 4 : 6. At this time, the slump of the slurry is 27.0 cm, and its yield stress and plastic viscosity are reduced by 16.60 Pa and 0.0258 Pa · s, respectively. Under the optimal EFA blending ratio, the strength of the later backfill increases significantly, and the compressive strength of the backfill is the highest at the curing age of 28 days, which is 2.76 MPa. Meanwhile, the L-F NMR test shows that the porosity of the later backfill is significantly reduced under the optimal EFA blending ratio. At 28 days, the total porosity of the backfill is 12.50%, and the porosity of the micropores, transition pores, mesopores and macropores in the backfill is 5.51%, 4.48%, 1.37% and 1.14%, respectively. The reason for the improvement of the filling effect of lead-zinc tailings is that the optimal EFA blending ratio improves the particle gradation of the slurry, reduces the yield stress and plastic viscosity of the slurry, and improves the internal structure of the backfill. Meanwhile, the porosity is reduced, and the density and compressive strength of the backfill are improved.

Key words: Fly ash collected by electrofilter, Compressive strength, Low-field nuclear magnetic resonance, Porosity