超声波作用增强水泥基充填体力学性能和料浆流变性能的研究*

沈彬彬[1]，温瑶华[2]，吴煜[3,4]

（1.闽南理工学院， 福建 泉州市 362000；
2.华南理工大学 土木与交通学院， 广东 广州 510640；
3.同济大学 土木工程学院， 上海 200092；
4.中国建筑第八工程局有限公司， 上海 200122）

摘要：针对水泥基充填体抗压强度低、充填成本高、充填效果差的技术瓶颈，采用超声波技术改善水泥基充填料浆的性能，通过开展三因素四水平的正交试验，探究超声功率、超声时间和搅拌时间对水泥基充填料浆流变性能和力学性能的影响，并进一步探讨超声作用的强化机理。研究结果表明：影响充填体抗压强度的因素主次排序为超声功率、超声时间、搅拌时间，超声功率是影响充填料浆屈服应力和塑性黏度的显著性因素，搅拌时间次之，超声时间影响最小；充填体3 d、7 d、14 d和28 d抗压强度随着超声功率、超声时间和搅拌时间的增加均表现出先上升后降低的变化趋势，当超声功率、超声时间和搅拌时间分别为70 W、4 min和6 min时，充填体抗压强度达最优值；充填料浆屈服应力和塑性黏度与超声功率和超声时间均成负相关，而随着搅拌时间的延长呈先降低后增加的变化趋势。这是由于超声作用促进了液相中水泥和尾砂颗粒的分散，提高了浆体均匀性，促进了水泥水化进程；然而过高的超声功率和过长的超声时间导致水泥颗粒絮凝结构重聚，抑制水分子的扩散和浆体结构密实；适宜的搅拌时间有利于浆体分散，削弱颗粒间的摩擦和剪切作用，而过长的搅拌时间导致浆体结构被破坏，削弱了充填体的力学性能。

关键词：超声波；胶结充填体；正交试验；抗压强度；流变性能
中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)04-0046-09

Study on the Enhancement of Mechanical Properties of Cement-Based Filling Body and Rheological Properties of Slurry by Ultrasonic Action

SHEN Binbin[1], *WEN Yaohua*[2], *WU Yu*[3,4]

(1.Minnan University of Science and Technology, Quanzhou, Fujian 362000, China;
2.School of Civic Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
3.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4.China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: Aiming at the technical bottleneck of low compressive strength, high filling cost and poor filling effect of cement-based filling body, ultrasonic technology was used to improve the performance of cement-based filling slurry. Through the orthogonal tests of three factors and four levels, the effects of ultrasonic power, ultrasonic time and stirring time on the rheological properties and mechanical properties of cement-based filling slurry were investigated, and the strengthening mechanism of ultrasonic action was further discussed. The research results indicate that the primary and secondary factors affecting the compressive strength of the filling body are ultrasonic power, ultrasonic time and stirring time. Ultrasonic power is a significant factor affecting the yield stress and plastic viscosity of the filling slurry, followed by stirring time, and ultrasonic time has the smallest impact. The compressive strength of the filling body at 3 days, 7 days, 14 days and 28 days shows a trend of first increasing and then decreasing with the increase of ultrasonic power, ultrasonic time and stirring time. When the ultrasonic power, ultrasonic time and stirring time are 70 W, 4 min and 6 min, respectively, the compressive strength of the filling body reaches its optimal value. The yield stress and plastic viscosity of the filling slurry are negatively correlated with

* **收稿日期**：2024-11-21
基金项目：国家自然科学基金项目(52108240)
作者简介：沈彬彬(1989—)，女，福建泉州人，讲师，主要研究方向为矿山固废资源化利用、土木工程等。E-mail：Jzk198916255@126.com

ultrasonic power and ultrasonic time, and show a trend of first decreasing and then increasing with the extension of stirring time. This is because the ultrasonic action promotes the dispersion of cement and tailings particles in the liquid phase, improves the uniformity of the slurry, and promotes the cement hydration process. However, excessive ultrasonic power and prolonged ultrasonic time lead to the reunion of the flocculation structure of cement particles, which inhibits the diffusion of water molecules and the compactness of the slurry structure. The appropriate stirring time is beneficial to the dispersion of the slurry and weakens the friction and shear between the particles, while the excessive stirring time leads to the destruction of the slurry structure and weakens the mechanical properties of the filling body.

Key words: Ultrasonic, Cement-based filling body, Orthogonal test, Compressive strength, Rheological property

0 引言

矿业是推动国民经济高速发展的重要支柱产业,但采矿活动不可避免地产生尾砂、废石等固体废弃物,并伴随大量的采空区[1-3]。尾砂堆置在地表不仅造成大面积的土地资源浪费,而且污染生态系统;井下采空区容易诱发顶板冒落、地表塌陷、围岩变形等工程地质风险[4-7]。充填采矿法因其回采率高、贫化率低、能大规模处置固废等优势受到国内外矿山企业的青睐。值得注意的是,将尾砂、废石与胶结剂混合制备成充填料浆,通过管道和工业柱塞泵的形式回填至地下采场,不仅能够变废为宝,消除采空区隐患,而且充填体能够充当人工矿柱,支撑顶板,有效控制采场地压[8-11]。

近年来,众多科研工作者开展了工业固体废弃物制备新型胶凝材料以替代普通硅酸盐水泥的研究,并取得了丰硕成果。RUAN 等[12]采用镁渣、粉煤灰和脱硫石膏制备了改性镁渣基胶凝材料,通过水化热、XRD 和 SEM 微观分析发现,脱硫石膏能够有效促进胶凝材料的早期水化进程,而粉煤灰的贡献不明显,甚至会降低水化热。SHAO 等[13]为了降低水泥的单耗量,提出了以脱碳煤气化渣和粉煤灰协同替代水泥的方案。ZHENG 等[14]基于风成砂、煤矸石和粉煤灰配备了膏体充填材料,研究发现当料浆质量浓度为 77.5%,风成砂、煤矸石、粉煤灰和水泥的掺量分别为 42%、8%、17.5%和 10%时,充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度分别为 1.2 MPa、2.5 MPa 和 4.3 MPa,料浆屈服应力和黏度系数分别为 495 Pa 和 3.97 Pa·s。刘树龙等[15]以拜耳法赤泥、脱硫石膏、粉煤灰、生石灰和水泥为原材料开展了新型胶凝材料研究,发现当赤泥、粉煤灰和水泥的质量比为 3∶7∶0.4 时,充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度分别达到 0.76 MPa、1.35 MPa、1.87 MPa,充填胶凝材料成本仅为 78.08 元/t。王再骞等[16]以磨细电解锰渣、高炉矿渣和水泥熟料按照 7∶7∶6 的比例,在 45 ℃条件下烘干,然后球磨 30 min 制备成复合胶凝材料,采用响应面优化设计获得充填材料配方为中粗砂占 20%、复合胶凝材料占 21.84%、原状电解锰渣占 58.16%,当料浆质量浓度为 80%,减水剂掺量 4%,搅拌 6.18 min,料浆流动度达 220 mm,且 28 d 抗压强度超过 1.5 MPa。

尽管新型胶凝材料的理论研究取得了重大突破,但综合考虑经济效益、材料来源、地理位置等多因素,普通硅酸盐水泥仍然是矿山企业的主要胶结剂。然而,水泥基胶结充填体稳定性差、质量低、脆性高是矿山实际充填工程中面临的重要挑战。针对上述问题,诸多学者主要从掺入外加剂的角度开展了系统研究。CAO 等[17]探讨了聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维和玻璃纤维增强充填体力学性能和抗裂性能的变化规律,研究发现纤维增强充填体的抗压强度与纤维掺量呈正相关,纤维能够抑制充填体内部裂纹的扩展和延伸,此外,纤维还可以发挥桥接作用,防止裂缝的二次扩展,从而显著提升充填体的抗裂性能。通过掺入纤维加筋水泥基充填体,可以大幅降低水泥掺量,提高充填体稳定性。CHEN 等[18]开展了水稻秸秆增强水泥基胶结充填体力学性能的研究,结果显示,在试验水平范围内,充填体抗压强度与秸秆掺量和长度均呈正相关。DENG 等[19]提出了微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)技术,考察了胶结液浓度、细菌溶液、胶结液用量、固形物含量和细菌酶活性对水泥胶结充填体力学性能的影响。研究结果表明,充填体抗压强度的提高主要归因于 MICP 反应沉淀的碳酸钙和胶结溶液中的盐物质的共同作用。YANG 等[20]针对水泥基充填料浆容易引发的管道堵塞问题,研究了十二烷基硫酸钠、三萜皂苷、枞酸钠 3 种引气剂对料浆流动性和抗压强度的影响,研究发现,掺入引气剂能够使料浆坍落度增加 10～13 mm,扩展度增加 66～130 mm,黏度降低

0.13～0.20 Pa·s,屈服应力降低 81.47%～93.7%。CHEN 等[21]研究了阴离子聚丙烯酰胺(AAPM)改善料浆流变性能和力学性能的影响规律,结果显示,尽管 AAPM 能够加速细粒尾矿的沉降,增加尾矿浆体的浓度,提高尾矿的利用率,但显著提升了料浆的屈服应力和黏度,略微增加充填体 7 d 抗压强度,阻止了 28 d 抗压强度的发展。

上述研究为水泥基增强胶结充填材料流动性能、流变性能及力学性能提供了有益的探索,然而制备工艺复杂,充填成本高。结合以往的科研成果,本文从充填料浆搅拌环节出发,提出了超声波技术增强水泥基充填料浆颗粒分散新方法,从而优化料浆流变性能和力学性能。基于正交试验设计,开展了以超声功率、超声时间和搅拌时间为自变量的三因素四水平试验,揭示了超声作用强化机理,研究结果以期为矿山水泥基充填复合材料的性能强化提供理论基础和科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

尾砂取自山东某金矿尾矿坝排料口,通过打包运输至实验室,检测其含水率为 25.29%。烘干后的尾砂外观呈淡黄色粉末状,密度为 2.65 g/cm^3,松散密度为 1.37 g/cm^3,孔隙率为 48.30%。结合筛分法和 Horiba LA-920 型激光散射粒度分析仪检测尾砂粒径特征参数 d_{10}、d_{30}、d_{60} 分别为 2.08 μm、18.76 μm、83.29 μm,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为 40.04 和 2.03,满足 $C_u \geqslant 5$ 和 $1 < C_c < 3$,尾砂级配良好,有利于浆体密实。采用 S4PIONEER 型 X 射线荧光光谱仪分析原材料化学成分,结果见表 1。由表 1 可以看出,尾砂主要由 SiO_2 和 Al_2O_3 构成,分别占总质量分数的 63.05%和 10.76%,表明该尾砂为高硅型尾砂,化学性质稳定且适宜作充填骨料。试验胶结剂采用市售标号 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,密度为 3.08 g/cm^3,比表面积为 362 m^2/kg。水采用实验室自来水。

表 1 原材料主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

材料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	Fe_2O_3	SO_3	K_2O
尾砂	63.05	10.76	5.83	0.19	1.74	1.03	0.25	0.81
水泥	25.76	5.18	58.11	0.36	3.25	3.16	1.65	0.18

1.2 试验设计

为探明超声作用增强水泥基胶结充填体性能的影响,固定料浆质量浓度和灰砂比分别为 74%和 1∶5,选择超声功率(30 W、50 W、70 W、90 W)、超声时间(2 min、3 min、4 min、5 min)、搅拌时间(2 min、4 min、6 min、8 min)为影响因素,开展三因素四水平正交试验。正交试验因素与水平设计见表 2。

表 2 正交试验方案

Table 2 Schemes of orthogonal tests

试验编号	超声功率/W	超声时间/min	搅拌时间/min
1	30	2	4
2	30	3	2
3	30	4	8
4	30	5	6
5	50	2	2
6	50	3	4
7	50	4	6
8	50	5	8
9	70	2	6
10	70	3	8
11	70	4	2
12	70	5	4
13	90	2	8
14	90	3	6
15	90	4	4
16	90	5	2

1.3 样品制备及测试

按照正交试验方案准备原材料并置于 105 ℃干燥箱中烘干备用,采用电子天平精确称量物料并倒入 JJ-5 型胶砂搅拌机中,调整搅拌时间参数值配备料浆,然后迅速将料浆倒入烧杯中,将超声探头置于料浆液面以下,同步开启超声分散仪,磁力搅拌器转速设置为 100 r/min。调整超声时间和超声功率以获得试验所需料浆,然后取少量料浆进行流变性能测试,试验设备采用 Brookfield R/S+型流变仪,转子型号采用直径 20 mm,高度 40 mm 的四叶浆式转子。剪切速率在 0～120 s^{-1}区间内线性递增和递减,收集料浆屈服应力和塑性黏度数据。将剩余料浆倒入高度 100 mm、直径 50 mm 的圆柱形模具中,刮平模具上表面及周围多余料浆,覆盖一层保鲜膜以减少水分流失和外界干扰,室内养护 24 h 后脱模。将脱模后的试块标记并储存至 YH-90B 型标准恒温恒湿养护箱(养护温度 20 ℃,相对湿度大于 90%)中养护 3 d、7 d、14 d 和 28 d。对于达到测试

龄期的试块,采用 DNS100 型微机控制液压式压力机检测抗压强度,设备加载速率为 0.5 kN/s,每个龄期共检测 5 个试块,剔除异常值,取平均值作为最终结果。

2 结果分析与讨论

2.1 正交试验结果

表 3 呈现了不同影响因素作用下充填体各龄期抗压强度和流变参数测试结果。由表 3 可知,第 11 组样品的 3 d、7 d、14 d 和 28 d 抗压强度数值为最大,分别为 2.07, 3.31, 4.28, 6.73 MPa,屈服应力和塑性黏度也获得最大值 235.78 Pa 和 1.85 Pa·s;而第 1 组样品数值均小,表明超声作用能够提升颗粒间的作用力和结构密实度。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal tests

试验编号	抗压强度/MPa				屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)
	3 d	7 d	14 d	28 d		
1	0.68	1.31	2.06	4.15	143.26	0.73
2	0.75	1.42	2.15	4.38	156.72	0.87
3	0.85	1.63	2.39	4.65	151.23	0.83
4	0.83	1.58	2.21	4.57	149.66	0.79
5	1.14	1.99	2.72	5.06	180.83	1.35
6	1.25	2.11	2.89	5.27	169.61	1.08
7	1.43	2.39	3.16	5.52	171.23	1.19
8	1.32	2.27	3.01	5.41	173.98	1.26
9	1.91	3.08	3.92	6.21	229.13	1.72
10	1.99	3.16	4.03	6.49	230.67	1.76
11	2.07	3.31	4.28	6.73	235.78	1.85
12	2.02	3.22	4.19	6.65	220.78	1.67
13	1.57	2.61	3.40	5.82	195.25	1.56
14	1.69	2.81	3.63	6.13	190.27	1.47
15	1.72	2.90	3.76	6.38	186.63	1.42
16	1.61	2.73	3.55	6.02	202.67	1.59

2.2 极差分析

通过极差分析判断各因素对考察指标的影响敏感性,采用 A、B、C 分别代表超声功率、超声时间和搅拌时间。通过表 4 呈现的极差分析结果可以看出,影响充填体 3 d、7 d、14 d 和 28 d 抗压强度的因素敏感性主次排序均为 $A>B>C$,最优组合为 $A_3B_3C_3$,即超声功率 70 W、超声时间 4 min、搅拌时间 6 min。影响充填料浆屈服应力和塑性黏度的因素敏感性主次排序均为 $A>C>B$,最优组合为 $A_3B_1C_1$,即超声功率 70 W、超声时间 2 min、搅拌时间 2 min。

表 4 极差分析结果

Table 4 Results of range analysis

项目	水平	因素			主次排序
		A	B	C	
3 d 抗压强度	1	0.78	1.33	1.39	$A>B>C$
	2	1.29	1.42	1.42	
	3	2.00	1.52	1.47	
	4	1.65	1.45	1.43	
	极差	1.22	0.19	0.08	
	最优组合		$A_3B_3C_3$		
7 d 抗压强度	1	1.49	2.25	2.36	$A>B>C$
	2	2.19	2.38	2.39	
	3	3.19	2.56	2.47	
	4	2.76	2.45	2.42	
	极差	1.70	0.31	0.11	
	最优组合		$A_3B_3C_3$		
14 d 抗压强度	1	2.20	3.03	3.18	$A>B>C$
	2	2.95	3.18	3.23	
	3	4.11	3.40	3.23	
	4	3.59	3.24	3.21	
	极差	1.91	0.37	0.05	
	最优组合		$A_3B_3C_3$		
28 d 抗压强度	1	4.44	5.31	5.55	$A>B>C$
	2	5.32	5.57	5.60	
	3	6.52	5.82	5.61	
	4	6.09	5.66	5.59	
	极差	2.08	0.51	0.06	
	最优组合		$A_3B_3C_3$		
屈服应力	1	150.22	187.12	194.00	$A>C>B$
	2	173.91	186.82	180.07	
	3	229.09	186.22	185.07	
	4	193.71	186.77	187.78	
	极差	78.87	0.90	13.93	
	最优组合		$A_3B_1C_1$		
塑性黏度	1	0.81	1.34	1.42	$A>C>B$
	2	1.22	1.30	1.23	
	3	1.75	1.32	1.29	
	4	1.51	1.33	1.35	
	极差	0.94	0.04	0.19	
	最优组合		$A_3B_1C_1$		

2.3 各因素对充填体抗压强度的影响

图 1 显示了不同影响因素作用下充填体养护至 3 d、7 d、14 d 和 28 d 的抗压强度试验结果。从图 1(a)可以看出,各龄期充填体抗压强度均随着超声功率的增加呈先上升后降低的变化趋势,当超声功率达 70 W 时,充填体抗压强度获得最大值。这是由于超声波破坏了水泥颗粒的絮凝结构,增强了水泥浆体的均质性。随着超声功率的增加,这种提升作用逐渐增强,这意味着提高超声功率可以破坏更多的絮凝水泥颗粒,促进水泥颗粒的分散。然而,当超声功率从 70 W 增加至 90 W 时,超声对充填体抗压强度的改善作用变弱。造成这种现象的原因在于过大的功率赋予了分子更高的能量,分子产生高速运动导致破碎的絮凝体重新团聚,反而削弱了颗粒间的均

匀性[22]。还可以从图 1 发现,超声功率对充填体抗压强度的提升幅度高于超声时间和搅拌时间的影响,表明超声功率是影响充填体抗压强度的显著性因素。

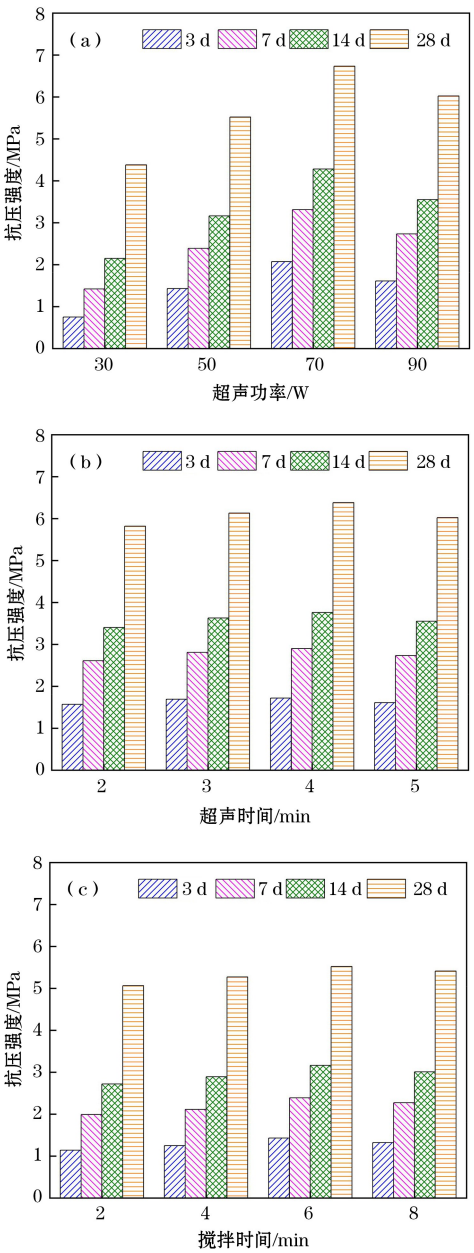


图 1 超声功率、超声时间和搅拌时间对充填体抗压强度的影响

Fig.1 Effects of ultrasonic power, ultrasonic time and stirring time on the compressive strength of filling body

分析图 1(b)可以得知,超声时间从 2 min 提高至 5 min 的区间内,充填体 3 d 抗压强度分别提升 7.64%、1.78%、−6.40%;7 d 抗压强度分别提升 7.66%、3.20%、−5.86%;14 d 抗压强度分别提升 6.76%、3.58%、−5.59%;28 d 抗压强度分别提升 5.33%、4.08%、−5.64%,整体变化幅度较小,超声时间为 4 min 时充填体抗压强度达到最大值。超声时间过长会造成膏体内部分层,大颗粒下沉,小颗粒上浮,物料的均匀性被降低。此外,随着超声时间的增加,料浆中的细小颗粒增加,水化体系愈发密实,水分子扩散运动被限制。同时浆体结构由于细颗粒的絮凝作用导致比表面积增加,料浆中的颗粒无法被水分充分包围,水化反应速率变慢,水化反应不充分,水化产物不足以抵抗外界荷载,充填体强度降低。

通过图 1(c)可以看出,搅拌时间从 2 min 增加至 8 min,充填体 3 d 抗压强度从 1.14 MPa 提升至 1.32 MPa,7 d 抗压强度从 1.99 MPa 提升至 2.27 MPa,14 d 抗压强度从 2.72 MPa 提升至 3.01 MPa,28 d 抗压强度从 5.06 MPa 提升至 5.41 MPa。随着搅拌时间的增加,抗压强度整体呈先增加后降低的变化规律,当搅拌时间为 6 min 时,3 d、7 d、14 d 和 28 d 抗压强度分别达最优值1.43 MPa、2.39 MPa、3.16 MPa 和 5.52 MPa。这是因为随着搅拌时间的增加,尾砂颗粒和水泥颗粒的均匀性提高,促进了颗粒间的相互作用;其次,搅拌时间增加,水化反应加速,形成更多的钙矾石、C-S-H凝胶等水化产物,有利于搭建更致密的网状结构以增加强度。然而,随着搅拌时间的延长,新生成的水化产物黏结在未水化颗粒表面,限制了水分子和水泥颗粒的移动,导致水化反应不充分。然而过长的搅拌时间会破坏浆体结构,增加了内部孔隙率。

2.4 各因素对料浆流变性能的影响

图 2 呈现了各影响因素对充填料浆流变参数的影响。从图 2(a)和图 2(b)可以看出,料浆的屈服应力和塑性黏度均与超声功率和超声时间成负相关。这是因为超声波是一种波长很短的机械波,在传播过程中很容易将能量传递到介质中,从而在介质中主导物理化学反应。值得注意的是,新鲜水泥料浆中含有大颗粒和气泡,大颗粒增加了颗粒间碰撞、剪切、摩擦概率,这既不利于料浆流动,也不利于水泥颗粒的水化反应,从而不易构建絮凝网状结构。因此,在超声波作用下,水泥颗粒剧烈振动,将位置变化所获得的重力势能转化为自身动能,从而膏体中的气泡在超声波产生的正负压交替环境下被压缩,并逐渐变大。当气泡尺寸达到一定临界值时,气泡在负压作用下瞬间崩塌,产生极强的冲击波和微射流,对区域内的水泥颗粒产生强烈的冲击,在动能和重力势能的协同作用下,水泥浆体得到充分分散[23]。因此,当增加超声功率和超声时间时,这种作用力越强,颗粒分散越均匀,水泥浆体的屈服应力

和塑性黏度显著降低。

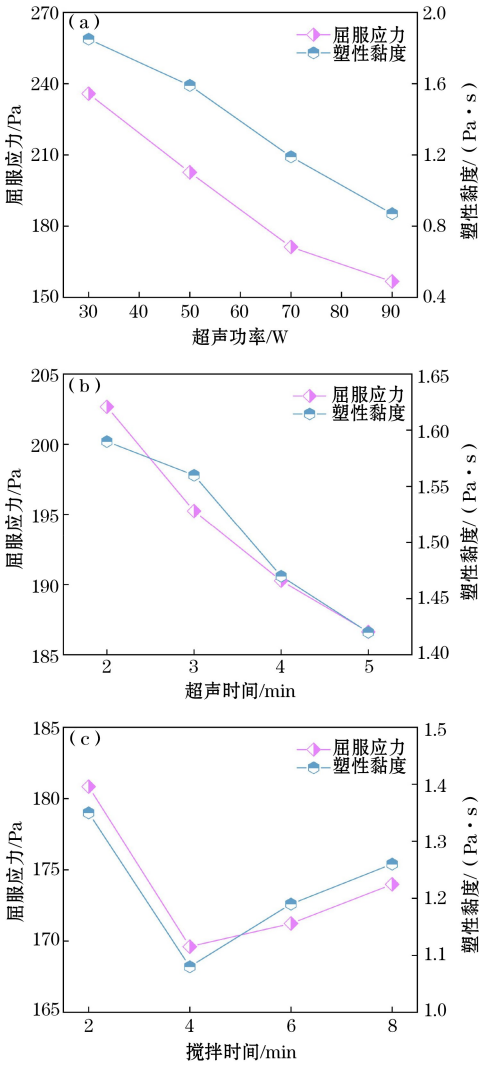


图 2 超声功率、超声时间和搅拌时间对充填料浆流变参数的影响

Fig.2 Effects of ultrasonic power, ultrasonic time and stirring time on rheological parameters of filling slurry

观察图 2(c)可以发现,料浆的屈服应力和塑性黏度随着搅拌时间的延长表现出先降低后升高的趋势,表明搅拌时间对料浆流变性能的改善作用有限。当搅拌时间延长至 4 min 时,料浆的屈服应力和塑性黏度均达到最小值。这是因为适宜的搅拌时间可有效打破料浆中的水泥混合物,提高料浆的整体均匀性,削弱颗粒间的吸引力和摩擦力,从而降低料浆的屈服应力和塑性黏度。然而搅拌时间过长会加速水化反应的进行,消耗大量的自由水,促进料浆的黏结,导致流变参数上升[24]。

2.5 各因素对充填体破坏形态的影响

图 3 至图 5 分别显示了超声功率、超声时间和搅拌时间对充填体破坏形态的影响。从图中呈现的破坏形态可以看出,充填体完整试件的破坏形态主要为垂直方向的拉伸破坏和平行加载方向的剪切破坏以及剪切和拉伸混合模式。以图 3 为例,当超声功率 30 W 时,试块宏观形态以平行于加载方向的"Y"形裂纹为主,但裂纹没有贯穿整个试块,在裂纹周边伴随小面积剥落区域产生,试块以脆性破坏为主。随着超声功率增大,次生裂纹和剥落区逐渐减少,充填体试块的完整性提升,表明超声作用能够有效地延缓裂纹扩展,约束充填体试块的变形。当超声功率为 90 W 时,试块表面二次裂纹数量明显增加,裂纹相互交错将充填体分割成许多具有破碎膨胀特征的小块,试块的抗裂性和延展性显著降低。

同样,从图 4 可观察到,随着超声时间的增加,试件破坏形态与图 3 类似。从图 5 可以看出,当搅拌时间延长至 8 min 时,试块表面还出现平行于加载方向长且宽的裂缝,试块的损伤程度加剧,这显著降低了充填体的稳定性,表明料浆的搅拌时间过长会导致充填体内部形成孔隙结构,降低其承载能力。



(a) 超声功率 30 W (b) 超声功率 50 W (c) 超声功率 70 W (d) 超声功率 90 W

图 3 不同超声功率下充填体的破坏形态

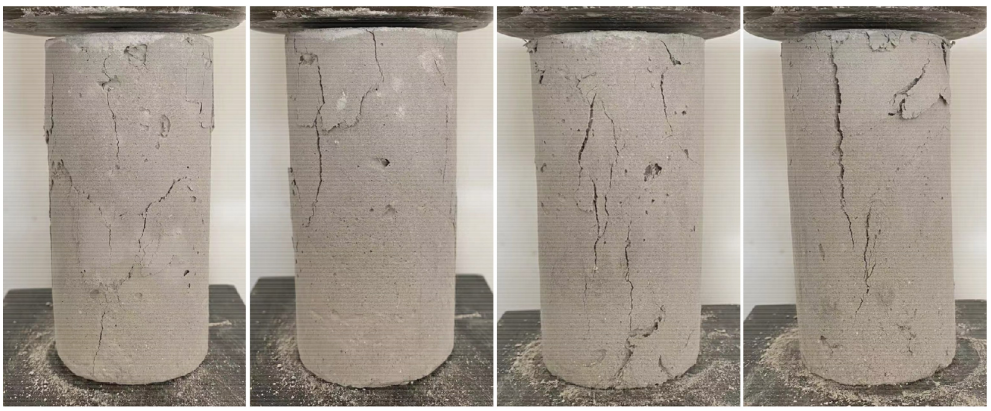
Fig.3 The failure mode of filling bodies under different ultrasonic powers



(a) 超声时间 2 min (b) 超声时间 3 min (c) 超声时间 4 min (d) 超声时间 5 min

图 4 不同超声时间下充填体的破坏形态

Fig.4 The failure mode of filling bodies under different ultrasonic time



(a) 搅拌时间 2 min (b) 搅拌时间 4 min (c) 搅拌时间 6 min (d) 搅拌时间 8 min

图 5 不同搅拌时间下充填体的破坏形态

Fig.5 The failure mode of filling bodies under different stirring time

2.6 超声波作用强化机理

对于无超声作用的水泥基材料体系,当水泥颗粒与水接触时,颗粒表面的硅、铝、钙、铁氧化物在水分子的作用下通过克服相互作用力,逐渐扩散至水溶液中。同时,溶解的硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙等矿物颗粒与水分子相互作用形成钙矾石、C-S-H 和 C-A-H 凝胶,并释放大量热量。随着水化反应的进行,反应界面不断向内推进,导致水泥颗粒逐渐溶解。

值得注意的是,水泥颗粒的水化速率不仅与料浆质量浓度、灰砂比、温度等外界因素有关,还与水泥颗粒表面晶格缺陷区域的数量有关。这些区域主要由矿物颗粒的弱相互作用确定,极易被水分子破坏,也被称为活化点。在超声波的作用下,水泥颗粒表面原有的活化点被充分活化,而且在水泥颗粒相互碰撞的过程中,新生成的活化点也在不断增加,这使得水泥颗粒溶解得更快,释放更多的热量,从而产生更多的水化产物,填充颗粒间孔隙,提高结构致密度。

3 结论

(1) 影响充填体抗压强度的因素主次排序为超声功率、超声时间、搅拌时间;超声功率是影响充填料浆屈服应力和塑性黏度的显著性因素,搅拌时间次之,超声时间影响最小。

(2) 超声波作用能显著增强水泥基充填材料的力学性能。然而,不同的超声功率、超声时间和搅拌时间对增强充填体抗压强度的影响差异显著。充填体 3 d、7 d、14 d 和 28 d 抗压强度均随着超声功率、超声时间和搅拌时间的增加呈先增加后降低的变化趋势,当超声功率为 70 W、超声时间为 4 min、搅拌时间为 6 min 时,充填体各龄期抗压强度达最优值。

(3) 超声波作用能破坏液相中的絮凝网状结构和粗细颗粒间的黏结,从而促进颗粒间的分散,并有利于细小的水泥颗粒均匀地分散在液相中。此外,

在超声波作用下,水泥颗粒和尾砂颗粒及水分子间的碰撞、剪切作用削弱,显著降低了料浆的屈服应力和塑性黏度。

(4)适当延长料浆的搅拌时间,有利于破坏颗粒间的黏结并提高料浆均匀性,从而削弱颗粒间的摩擦力,降低浆体屈服应力和塑性黏度。当搅拌时间延长至6 min时,能够加速液相水化反应,生成更多的水化产物,促进料浆的黏结并降低流动性,并提高充填体抗压强度。然而,继续延长搅拌时间,会导致充填体内部形成孔隙结构,浆体结构被破坏,降低充填体的承载能力。

参考文献(References):

[1] 侯永强.金川二矿区废石尾砂复合胶结充填体力学特性及损伤破裂机理研究[D].北京:北京科技大学,2023.
HOU Yongqiang. Study on mechanical properties and fracture mechanism of waste rock tailings composite cemented backfill in Jinchuan No.2 mining area[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2023.

[2] 朱瑞军,李立涛,夏长念,等.充填料浆制备浓度前馈调控工艺及技术途径[J].中国矿山工程,2024,53(1):36-40.
ZHU Ruijun, LI Litao, XIA Changnian, et al. Feedforward control process and technical approach for filling slurry preparation concentration[J].China Mine Engineering,2024,53(1):36-40.

[3] 杨纪光,李强,吴再海,等.中细粒全尾砂静动态絮凝沉降规律试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(5):13-18.
YANG Jiguang, LI Qiang, WU Zaihai, et al. Experimental study on static and dynamic flocculation sedimentation law of medium fine full tailings [J]. Mining Research and Development,2023,43(5):13-18.

[4] 郑伯坤,石勇,黄腾龙,等.老挝固体钾盐尾矿低成本胶凝固化材料研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):66-73.
ZHENG Bokun, SHI Yong, HUANG Tenglong, et al. Research on Low-cost cementitious solidification materials for solid potash tailings in Laos[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):66-73.

[5] 程锦山.基于超声波横波传播特性胶结充填体力学特性反演研究[D].赣州:江西理工大学,2023.
CHENG Jinshan. Back analysis of mechanical properties of cemented backfill based on ultrasonic shear wave propagation characteristics[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2023.

[6] 刘树龙,王发刚,李公成,等.基于响应面法的复合充填料浆配比优化及微观结构影响机制[J].复合材料学报,2021,38(8):2724-2736.
LIU Shulong, WANG Fagang, LI Gongcheng, et al. Optimization of mixture ratio and microstructure influence mechanism of composite filling slurry based on response surface method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2021,38(8):2724-2736.

[7] 许向前.聚丙烯纤维胶结充填体与花岗岩接触面的力学特性[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
XU Xiangqian. Mechanical behavior of interface between polypropylene fiber reinforced cemented paste backfill and granite rock[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing),2021.

[8] 杨纪光,王辉,王增加,等.某金矿膏体料浆流变特性研究与神经网络分析[J].有色金属工程,2023,13(11):117-125.
YANG Jiguang, WANG Hui, WANG Zengjia, et al. Research on rheological characteristics of a gold mine paste slurry and neural network analysis[J]. Nonferrous Metals,2023,13(11):117-125.

[9] 杨纪光,王义海,吴再海,等.某金矿全尾砂高浓度充填流变特性与微观结构的分析[J].有色金属科学与工程,2023,14(2):249-256.
YANG Jiguang, WANG Yihai, WU Zaihai, et al. Analysis on rheological characteristics and microstructure of high concentration filling the tailings from a gold mine[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(2):249-256.

[10] 刘树龙.基于矿渣基胶凝材料的充填体早期力学行为宏细观响应机制[D].淄博:山东理工大学,2021.
LIU Shulong. Macro and meso response mechanism of early mechanical behavior of backfill based on slag-based cementitious material[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2021.

[11] 刘志义.水-力耦合作用下尾砂胶结充填体力学特性与损伤机理[D].唐山:华北理工大学,2023.
LIU Zhiyi. Mechanical characteristics and damage mechanism of cemented tailings backfill under the coupled hydro-mechanical effect [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2023.

[12] RUAN Shishan, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. Development and field application of a modified magnesium slag-based mine filling cementitious material[J]. Journal of Cleaner Production,2023,138269.

[13] SHAO Xiaoping, XU Baowa, TANG Renlong, et al. Preparation and properties of a decarbonized coal gasification slag-fly ash filling material[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30:45015-45028.

[14] ZHENG Zhijun, YANG Baogui, GU Chengjin, et al. Experimental investigation into the proportion of cemented aeolian sand-coal gangue-fly ash backfill on mechanical and rheological properties[J].Minerals,2023,13:1-17.

[15] 刘树龙,王贻明,吴爱祥,等.赤泥复合充填材料浸出行为及固化机制[J].复合材料学报,2023,40(12):6729-6739.
LIU Shulong, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. Leaching behavior and solidification mechanism of red mud composite filling material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2023,40(12):6729-6739.

[16] 王再骞,赵小蓉,谢秀情,等.电解锰渣胶结膏体材料的充填性能[J].土木与环境工程学报,2023,45(6):180-188.
WANG Zaiqian, ZHAO Xiaorong, XIE Xiuqing, et al. Filling performance of paste material cemented with electrolytic manganese residue[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2023,45(6):180-188.

[17] CAO Shuai, YILMAZ Erol, SONG Weidong. Fiber type effect on strength, toughness and microstructure of early age cemented tailings backfill[J]. Construction and Building Materials,2019,223:44-54.

[18] CHEN Xin, SHI Xiuzhi, ZHOU Jian, et al. Determination of mechanical, flowability, and microstructural properties of cemented tailings backfill containing rice straw [J]. Construction and Building Materials,2020,246:118520.

[19] DENG Xuejie, YUAN Zongxuan, LI Yu, et al. Experimental study on the mechanical properties of microbial mixed backfill [J]. Construction and Building Materials,2020,265:120643.

[20] YANG Baogui, WANG Xiaolong, YIN Peng, et al. The rheological properties and strength characteristics of cemented paste backfill with air-entraining agent [J]. Minerals,2022,12:1-15.

[21] CHEN Qiusong, TAN Yunbo, ZHANG Qinli, et al. The rheological, mechanical and heavy metal leaching properties of cemented paste backfill under the influence of anionic polyacrylamide[J]. Chemosphere,2022,286:131630.

[22] SARI Muhammet, YILMAZ Erol, KASAP Tugrul, et al. Exploring the link between ultrasonic and strength behavior of cementitious mine backfill by considering pore structure [J]. Construction and Building Materials,2023,370:130588.

[23] XU Zhishan, JI Yongsheng, MA Zhanguo, et al. Strengthening mechanism of ultrasonic action on mechanical properties of cement-based materials[J]. Construction and Building Materials,2023,362:129788.

[24] YANG Liuhua, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Effect of mixing time on hydration kinetics and mechanical property of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials,2020,247:118516.