中非铜(钴)成矿带大水地采矿山注浆材料的制备及性能研究*

滕龙[1,2],杨柱[1,2],姚高辉[3],谢世平[1,2],李开[1,2],李阳明[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.中色非洲矿业有限公司 谦比希铜矿, 赞比亚 基特韦市 22592)

摘要:针对中非铜(钴)成矿带部分地采矿山矿坑涌水量大、注浆堵水难等严重制约矿产资源安全开采的问题,以谦比希铜矿为研究对象,研发适用于该矿及类似大水矿山的高效封堵材料与工艺。选取非洲当地黏土、膨润土、某化学材料及国产超细水泥、尾砂5类材料进行室内试验,通过多组配比方案制备浆液,测试各浆液的物理化学性质(黏度、相对密度、析水率和塑性强度)、凝结时间及结石体抗压强度。结果表明,当地泥饼符合制浆要求,改性黏土浆液结石体7 d抗压强度为0.11~0.69 MPa,其黏度随水固比减小而显著增大,适用于大型地面帷幕、井筒帷幕等工程,可降低约30%的材料费用;当地膨润土满足制浆要求,水泥-膨润土浆液结石体7 d抗压强度为0.10~2.34 MPa,在水固比≤2∶1时凝结时间随膨润土掺量增加而缩短,适用于深部难注岩层,在深部多层沙带区域较传统水泥浆可注性提高7倍;超细水泥浆液结石体28 d抗压强度最高可达59.8 MPa,其强度随水胶比增大而降低,适用于微裂隙及壁后注浆,可提升防渗性能,结石体抗压强度高;化学浆液通过调整GROUTEX掺量可实现瞬凝,结石体抗压强度达43.65 MPa,适用于封闭不良钻孔,可实现瞬凝且强度大于43 MPa,可防止井下揭露大水钻孔引发的突水事故;尾砂浆液析水率偏高,结石体7 d抗压强度最高为9.7 MPa,需进一步开展不同添加剂的改良试验。

关键词:中非成矿带;大水矿山;注浆材料;高效封堵;配比优化

中图分类号:TD743 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0050-12

Study on Preparation and Properties of Grouting Materials for Water-Rich Underground Mines in the Central African Copper (Cobalt) Metallogenic Belt

Teng Long[1,2], *Yang Zhu*[1,2], *Yao Gaohui*[3], *Xie Shiping*[1,2], *Li Kai*[1,2], *Li Yangming*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Chambishi Copper Mine, NFC Africa Mining Co., Ltd., Kitwe 22592, Zambia)

Abstract: In view of the problems of large water inflow and difficult grouting and water plugging in some underground mines in the copper (cobalt) metallogenic belt of Central Africa, which seriously restrict the safe mining of mineral resources, Chambishi Copper Mine was selected as the research object, and efficient plugging materials and processes suitable for this mine and similar water-rich mines were developed. Five kinds of materials, including local clay, bentonite, a chemical material, domestic ultrafine cement and tailings from Africa, were selected for laboratory tests. Multi-proportion slurries were prepared according to different mixing schemes, and the physicochemical properties (viscosity, relative density, bleeding rate and plastic strength), setting time and compressive strength of each slurry's stone body were tested. The results show that the local mud cake meets the requirements for pulping. The 7 d compressive strength of the modified clay slurry stone body is 0.11-0.69 MPa, and its viscosity increases significantly with a decrease in water-solid ratio. It is suitable for large-scale ground curtain, wellbore curtain and other projects, and can reduce material costs by about 30%. The local bentonite meets the requirements

* **收稿日期**:2025-08-12

基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ01);京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2026ZD1210200)

作者简介:滕龙(1994—),男,湖北恩施人,硕士,工程师,主要从事矿山水害防治与水环境保护理论、技术等方面的研究工作。E-mail: tenglongcky@163.com

通信作者:杨柱(1982—),男,湖南长沙人,硕士,正高级工程师,主要从事矿山水害防治与水环境保护理论、技术等方面的研究工作。E-mail: 99309986@qq.com

for pulping. The 7 d compressive strength of the cement-bentonite slurry stone body is 0.10 -2.34 MPa. When the water-solid ratio is ≤2∶1, the setting time shortens with the increase in bentonite content, making it suitable for deep poorly injectable strata. In the deep multi-layer sand belt area, its injectability is 7 times higher than that of traditional cement slurry. The 28 d compressive strength of the ultrafine cement slurry stone body can reach up to 59.8 MPa, and its strength decreases with the increase in water-binder ratio. It is suitable for micro-fracture and backfill grouting, offering improved impermeability and high compressive strength. By adjusting the content of GROUTEX, the chemical slurry can achieve instant setting, and the compressive strength of its stone body reaches 43.65 MPa. It is suitable for sealing poorly sealed boreholes, achieving instant setting with a strength greater than 43 MPa, thereby preventing water inrush accidents caused by exposing water-rich boreholes underground. The bleeding rate of the tailings slurry is high, and the 7 d compressive strength of its stone body reaches up to 9.7 MPa; further improvement tests with different additives are therefore necessary.

Key words: Metallogenic belt of Central Africa, Water-rich mine, Grouting material, Efficient plugging, Ratio optimization

0 引言

注浆,又称灌浆,是指按一定配比将具有胶凝性的浆液或化学溶液,借用注浆设备或浆液自重施加压力,通过钻孔输送到受注地层的一种施工技术[1]。该技术的实质是使浆液在受注地层的孔隙或裂隙中渗透、扩散并充填,经一定时间胶凝或固化,从而达到加固地层及抗渗防水的目的[2]。当前,随着全球地下工程的大规模建设,注浆材料研发与应用持续深入,已成为保障工程安全的关键技术。

现有注浆材料体系主要可分为水泥注浆材料[3]、化学注浆材料[4]及无水泥熟料的绿色注浆材料[5]三大类。

国内外研究与实践表明,水泥注浆材料包括单液水泥浆、水泥膨润土浆、水泥黏土浆、水泥水玻璃浆和超细水泥浆[6]。单液水泥浆具有原材料来源广泛、成本低、无毒性、施工工艺简单等优点,但其稳定性较差、易沉淀析水、凝结时间长,注入能力在微细裂隙中往往受到限制[7-8]。水泥膨润土浆是在水泥单液浆的基础上加入一定比例的膨润土,以提高浆液稳定性、抗渗性及耐有机污染物腐蚀能力[9]。水泥黏土浆则在单液水泥浆的基础上加入一定比例的黏土,黏土的分散性高、亲水性好,加入黏土可提高水泥浆液的稳定性和结石率,降低水泥浆的分层离析程度[10]。水泥水玻璃浆通过水泥与水玻璃反应,可缩短凝结时间、提高结石体抗压强度与结石率,从而改善浆液的可注性[11-12]。超细水泥浆(最大粒径小于 20 μm,平均粒径约 4 μm)比表面积大、渗透能力强、凝结体强度高且稳定性好,在微小裂隙或低渗透地层中性能优异,但运输储存难度大[13]。

化学注浆材料种类繁多,主要分为水玻璃浆液和无机高分子浆液两大类。水玻璃浆液是以水玻璃为主剂,加入胶凝剂,生成大量硅凝胶从而凝结硬化,主要包括水玻璃-氯化钙浆液、水玻璃-氟硅酸浆液、酸性水玻璃浆液等[14]。其应用价值体现在原材料丰富、成本低廉,主剂安全环保特性突出,浆液具有良好的流动性;其性能短板在于凝胶时间难以精确控制,固化后强度与耐久性差。无机高分子浆液则根据原材料的不同存在不同的优缺点。其中,丙烯酰胺浆液的可注性好、凝结时间短、抗渗强度高,但其价格高、耐久性差[15];聚氨酯浆液可以生成聚氨酯泡沫体,可用于加固地基和防渗堵水[16];其他如木质素类浆液[17]、环氧树脂浆液[18]和甲凝浆液[19]等,也具有不同的优缺点,可以在不同的场景中得到应用。

当前地下工程建设中,注浆材料用量巨大、成本高昂、水泥资源消耗过量及环境负荷沉重,材料生产与生态环境保护的协调发展面临严峻挑战。为应对上述挑战,国内外学者致力于开发无水泥熟料的环保型注浆材料。已有研究表明,粉煤灰、矿渣、钢渣、尾砂等工业废渣能被碱激发[20-21],其固体颗粒较普通水泥颗粒更细且级配分布更为合理,因此可以作为注浆材料原材料。然而,现有研究多集中于材料制备与宏观力学性能,针对特定工程地质与水文地质条件下(尤其是极高涌水、复杂导水通道环境下)的适用性、耐久性及长效封堵机制缺乏系统对比,针对非洲铜钴矿带这类“大水矿山”极端条件的注浆材料选型与配比优化研究则更为罕见。

横贯赞比亚与刚果(金)两国的中非加丹加铜(钴)成矿带,是全球最具代表性的沉积型铜钴矿带之一。该成矿带以超高品位与巨大储量著称,探明

铜资源储量逾2亿t。据行业统计,该成矿带已开发大型矿山超50座,中资企业占比近半,是我国铜(钴)资源保供及践行“一带一路”倡议的核心基地。然而,区域内矿山普遍面临导水构造高度发育、围岩富水性强、防治水技术体系滞后等系统性挑战,严重制约安全开采与经济效益。例如,孔科拉铜矿矿坑总涌水量维持在约22万m^3/d;齐布鲁玛铜矿西矿,突水最大涌水量超20万m^3/d,曾遭淹井;穆富里拉铜矿,涌水量超10万m^3/d,由于未考虑地表河流对矿山开采的影响,最终尾砂溃入井下,造成89人死亡,全矿被淹;中国有色谦比希铜矿主矿体涌水量超4万m^3/d,800 m中段以下超2 000万t矿石被水患压覆,难以开采[22-25]。

因此,本文立足于该成矿带矿山防治水的重大工程需求,通过系统对比试验研究,以期解决以下关键问题:(1)系统对比传统水泥基、化学浆液与绿色碱激发浆液在流动性、凝结性、强度及抗渗性等方面的性能差异;(2)针对不良钻孔、微细裂隙等典型导水通道,明确各类浆液的适用条件与封堵机制;(3)优化提出适用于高水压、大流量水文地质条件的注浆材料配方与工艺参数。研究成果不仅可为谦比希铜矿及类似矿山的水害防治提供技术支撑,也可为绿色注浆材料在极端条件下的应用提供理论依据与数据支撑,对保障国家战略资源安全、推动矿业可持续发展具有重要意义。

1 试样制备与试验方法

1.1 注浆材料选型

为应对谦比希铜矿复杂的水文地质条件,同时考虑到非洲现有的原材料条件和试验条件,选择改性黏土浆液、水泥-膨润土浆液、化学浆液、超细水泥浆液和尾砂浆液共5种注浆材料进行室内试验,对比其强度性能和可注性。

1.2 浆液组分及配比

1.2.1 改性黏土浆液

结构剂采用P·O42.5普通硅酸盐水泥,作为核心结构成型介质,占干料总质量的16%~60%,其水化产物构成浆液固化骨架。添加剂选用赞比亚市售无机盐溶液,通过催化水化反应加速结构形成。添加剂技术指标为:模数n=3.2,波美度为40° Bé,密度为1.35 g/cm^3。试验设计了8种不同配比的改性黏土浆液,见表1。

表1 改性黏土浆液配比

Table 1 Proportions of modified clay slurry

配比编号	水固比	浆液组分配比			添加剂掺量/%
		水泥	泥饼	水	
1	1∶1	1	1	2	1
2		1	1	2	2
3		1	2	3	2
4		1	2	3	3
5		1	3	4	2
6		1	3	4	3
7	0.8∶1	1	1	1.6	2
8		1	2	2.4	2

1.2.2 水泥-膨润土浆液

结构剂采用P·O32.5普通硅酸盐水泥作为浆液固化骨架的主要形成介质,占干料总质量的70%~95%,其水化产物构成材料强度基础。添加剂同上节。试验共设计8种不同配比的水泥-膨润土浆液,见表2。

表2 水泥-膨润土浆液配比

Table 2 Proportions of cement-bentonite slurry

配比编号	水固比	膨润土掺入量/%	添加剂/%
1	1∶1	5	0
2	2∶1	5	4
3		10	4
4		15	4
5	3∶1	15	4
6		20	4
7	4∶1	20	4
8		30	4

1.2.3 化学浆液

颗粒灌浆(FSG)属于镁化学注浆体系,由组分A和组分B反应而成,其反应产物可形成高强度的固结体,并具有易混合、渗透性高、凝胶时间与硬度可控的特点。

单组分聚异戊二烯乙烯基(GROUTEX)作为高渗透性化学浆材,在不稳定的条件下,仍具有较好的柔韧性,可用于密封开放性泄漏。水活化单组分聚氨酯树脂(POLYSEAL)在特定配比条件下,体积可膨胀3倍,且该材料是唯一与水接触就凝结的灌浆料。

在FSG的基础上,通过添加GROUTEX和POLYSEAL两种化学材料来对浆液性质进行改变,使其更契合现场复杂的水文地质条件,进而取得更优的注浆效果。据此,试验共设计了3种不同配比的化学浆液,见表3。

表3 化学浆液配比

Table 3 Proportions of chemical slurry

配比编号	FSG-A/g	FSG-B/g	GROUTEX/g	POLYSEAL/g
1	3 000	2 200	0	834
2	3 000	2 200	0	1 250
3	3 000	2 200	1 250	1 250

1.2.4 超细水泥浆液

超细水泥材料包括BY12-Ⅵ型遇水不分散注浆料、BY12-ⅠA型早凝早强高强注浆料和BY12-Ⅰ型高性能无收缩注浆料,三种注浆料的参数如下。

BY12-Ⅵ型材料的平均粒径范围为0.3～250 μm,粒径分布较均匀,颗粒体积含量随粒径增大而增加,但在0.7～1.6 μm区间内呈下降趋势。该材料粒径主要集中在1.6～55 μm间,少量大颗粒粒径接近200 μm,少量小颗粒粒径接近0.4 μm。颗粒累计体积小于10%的粒径为1.29 μm,累计体积小于50%的粒径为10.95 μm,累计体积小于90%的粒径为40.85 μm。该材料的氧化物以SiO_2、CaO为主,质量占比分别为15.95%、57.64%,其余少量氧化物为Al_2O_3、MgO、Fe_2O_3、SO_3等。

BY12-ⅠA型材料平均粒径范围为0.28～400 μm,颗粒体积含量随着粒径的增大而增加,但在0.9～1.5 μm粒径范围内呈下降趋势。该材料粒径主要集中在0.5～50 μm间,少量大颗粒粒径接近200 μm,少量小颗粒粒径接近0.4 μm。颗粒累计体积小于10%的粒径为0.99 μm,累计体积小于50%的粒径为10.13 μm,累计体积小于90%的粒径为41.93 μm。该材料的氧化物以SiO_2、CaO、Al_2O_3、SO_3为主,质量占比分别为13.01%、39.57%、14.81%、15.66%,其余少量氧化物为Fe_2O_3、MgO等。

BY12-Ⅰ型材料平均粒径范围为0.3～200 μm,颗粒体积含量随着粒径的增大而增加,但在0.9～1.6 μm粒径范围内呈下降趋势。该材料粒径主要集中在1.8～60 μm间,少量大颗粒粒径接近180 μm,少量小颗粒粒径接近0.4 μm。颗粒累计体积小于10%的粒径为1.12 μm,累计体积小于50%的粒径为11.92 μm,累计体积小于90%的粒径为39.27 μm。该材料的氧化物以SiO_2、CaO为主,质量占比分别为23.93%、49.51%,其余少量氧化物为Al_2O_3、MgO、Fe_2O_3、SO_3等。

基于上述超细水泥材料的特性,试验设计了6种不同配比的超细水泥浆液,见表4。

表4 超细水泥浆液配比

Table 4 Proportions of ultrafine cement slurry

配比编号	浆液组分配比			
	BY12-Ⅵ型	BY12-ⅠA型	BY12-Ⅰ型	水
1	1	0	0	0.60
2	0	0	1	0.28
3	0	1	0	0.28
4	0	1	1	0.56
5	0	1	1	0.80
6	0	1	1	1.00

1.2.5 尾砂浆液

尾砂浆液主要组分为P·O42.5普通硅酸盐水泥、国内某铜矿的细尾砂和膨润土。

试验的主要内容为测定硅酸盐水泥和细尾砂在不同配合比下的浆液流变性能、析水率、结石体抗压强度、初凝/终凝时间等指标,并进一步通过掺加膨润土改善不同配比下的浆液性能,获得形成"稳定浆液"的最佳配比方案。

(1)细尾砂水泥浆液。普通硅酸盐水泥与胶固粉具有相似的性质,因此将水胶比定义为水的质量与细尾砂、水泥质量之和的比值。不考虑水胶比过大造成析水率较大、结石体强度较低的情况,试验共设计了7组不同配比的细尾砂水泥浆液,见表5。

表5 细尾砂水泥浆液配比

Table 5 Proportions of fine tailings cement slurry

配比编号	水胶比	细尾砂/水泥	浆液组分配比		
			水	细尾砂	水泥
1	1	2/1	3	2	1
2	0.8	1/1	8	5	5
3	0.6	1/1	6	5	5
4	0.6	2/1	9	10	5
5	0.6	1/2	9	5	10
6	0.6	1/3	12	5	15
7	0.5	1/1	1	1	1

(2)细尾砂膨润土水泥浆液。在细尾砂水泥浆液试验的基础上,考虑添加膨润土以降低浆液前期析水率。膨润土质量占比定义为膨润土质量与细尾砂、水泥质量之和的比值,设计掺量为0.2、0.1、0.05、0.025,水胶比设计为1、0.8、0.6。试验共设计了6组不同配比的细尾砂膨润土水泥浆液,见表6。

表6 细尾砂膨润土水泥浆液配比

Table 6 Proportions of fine tailings bentonite cement slurry

配比编号	水胶比	细尾砂/水泥	浆液组分配比			
			水	细尾砂	膨润土	水泥
1	1	1/1	10	5	2	5
2	0.8	1/1	8	5	1	5
3	0.6	1/1	6	5	0.5	5
4	0.6	1/1	6	5	0.25	5
5	0.6	1/3	12	5	2	15
6	0.6	1/3	12	5	1	15

1.3 试验方法

采用马氏漏斗黏度计与ZNN-D6型六速旋转黏度计测定各配比浆液的黏度,并利用比重计测定

其相对密度。将浆液置于玻璃试管中静置,测量水泥颗粒沉淀后的固结体积,据此计算浆液的结石率与析水率。采用维卡仪改装的塑性强度测定仪进行塑性强度测试;同时,利用标准维卡仪测定浆液的初凝、终凝时间。此外,使用全自动抗压抗折一体机对各浆液结石体开展结石抗压强度测试。塑性强度的计算公式为:

$$P_s=\frac{G_1}{S}=\frac{G\cdot\cos\frac{\alpha}{2}}{\frac{\pi h^2}{\cot\frac{\alpha}{2}\cdot\cos\frac{\alpha}{2}}}=\frac{G\cdot\cot\frac{\alpha}{2}\cdot\cos^2\frac{\alpha}{2}}{\pi h^2}=K\frac{G}{h^2} \tag{1}$$

式中:P_s 为塑性强度,10^2 Pa;G_1 为试样质量,g;S 为锥面与试样接触面积,cm^2;G 为试锥活动部分总质量,g;α 为锥顶角度,(°);h 为试锥沉入试样的深度,cm;K 为与锥顶角度有关的系数。

浆液析水率的计算公式为:

$$B_m=\frac{W_b}{\frac{W}{J}J_1}\times100\% \tag{2}$$

式中:B_m 为析水率;W_b 为析水总质量,g;W 为一次拌合用水质量,g;J 为一次拌合的砂浆总质量,g;J_1 为试样质量,g。

2 材料性能研究

2.1 改性黏土浆液的性质特征

2.1.1 浆液的理化性质

不同配比改性黏土浆液的物理化学性能如图 1 所示。其中,浆液黏度随水固比的减小而显著增大。相同水固比条件下,随添加剂掺量增加,浆液的黏度、相对密度、塑性强度及结石率(介于 78.5%~98%间)均呈逐渐增大的变化规律。分析认为,改性黏土浆液性能的变化主要受添加剂的胶凝作用与颗粒表面修饰效应控制。

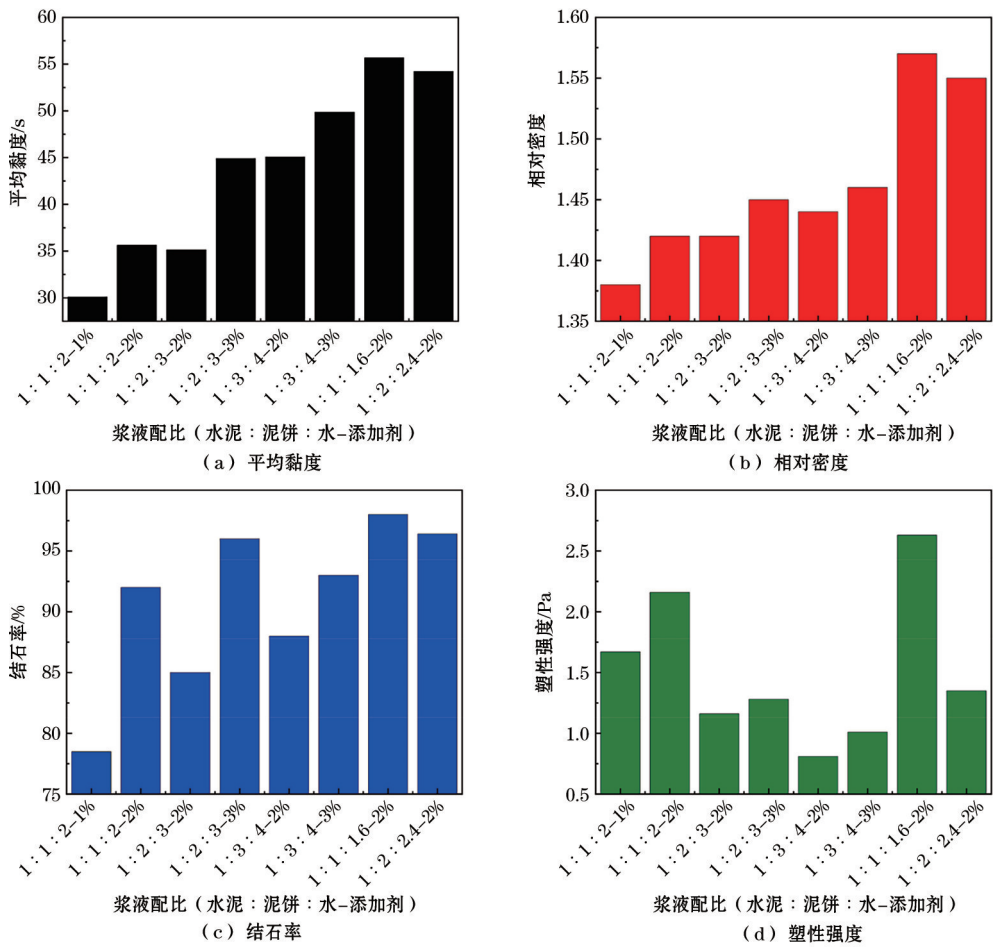


图 1 改性黏土浆液的物理化学性能

Fig.1 Physical and chemical properties of modified clay slurry

2.1.2 浆液凝结时间和结石体抗压强度

不同配比的改性黏土浆液的凝结时间和结石体7 d抗压强度测试结果如图2所示。凝结时间的差异反映了添加剂对浆液水化或胶凝反应速率的调控作用。随着添加剂掺量增加,反应速率加快,浆液凝结时间缩短。在主要浆材配比相同的情况下,受添加剂的影响,浆液凝结时间差距约为3～18 h。

结石体7 d抗压强度的变化则与形成的胶凝产物数量及微观结构密切相关。结果显示,各配比条件下浆液结石体抗压强度在0.11～0.69 MPa之间,其中1∶1∶2-2%和1∶1∶1.6-2%两组配比的浆液结石体抗压强度较为理想。其原因可能是在此特定水固比与添加剂掺量下,浆液形成了最优的颗粒级配效应(细小的添加剂颗粒填充了黏土颗粒间的孔隙)与最佳的化学反应程度,生成了大量强度较高的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶或类似产物,从而获得了相对理想的力学性能。

综上试验结果,改性黏土浆液的优势在于材料成本低廉(利用当地黏土)、流动性可调。结石体强度虽不高(0.11～0.69 MPa),但能够满足封堵大裂隙和破碎岩体的防渗需求。因此,该浆液适合用于大型地面帷幕、井筒帷幕等工程量大、对材料经济性要求较高的注浆工程。基于性能和成本平衡,推荐初灌采用配比1∶3∶4(水泥∶泥饼∶水);当遇溶洞或大裂隙时,可改用高浓度配比(如1∶1∶2～1∶2∶2.4)加压注浆,利用浆液的劈裂和压密效应,增大有效扩散半径。

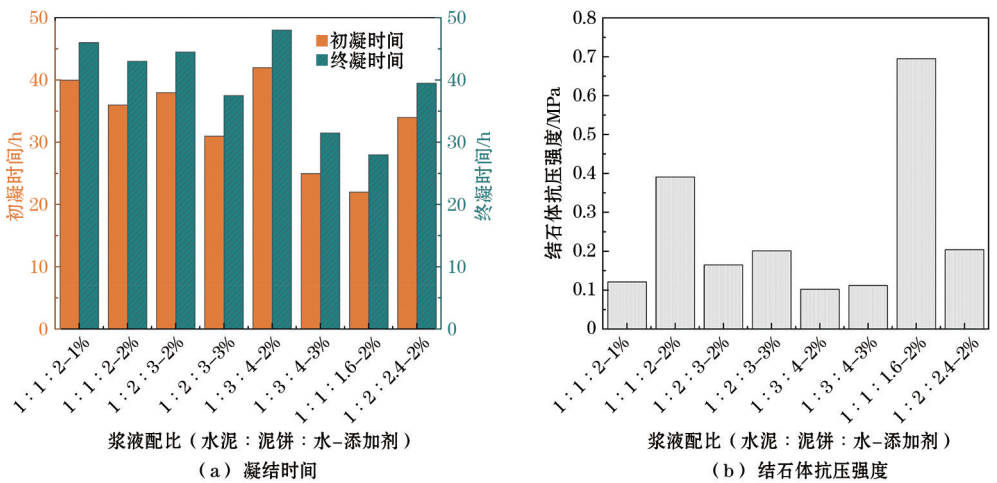


图2 改性黏土浆液的凝结时间和结石体抗压强度

Fig.2 Setting time and stone mass compressive strength of modified clay slurry

2.2 水泥-膨润土浆液的性质特征

2.2.1 浆液的理化性质

不同配比的水泥-膨润土浆液所测得物理化学性能如图3所示。整体而言,随着水固比的增大,浆液的黏度与相对密度均减小;在相同水固比条件下,膨润土掺量越大,浆液黏度越高,浆液的结石率越高。

2.2.2 浆液凝结时间和结石体抗压强度

不同配比的水泥-膨润土浆液凝结时间和结石体7 d抗压强度测试结果如图4所示。结果显示,水固比越小,浆液凝结时间越短。当水固比大于2∶1时,膨润土掺量越多,凝结时间越长;当水固比不超过2∶1时,膨润土掺量越多,凝结时间越短。浆液结石体7 d抗压强度在0.10～2.34 MPa之间,其中,水固比为1∶1和2∶1的浆液结石体抗压强度较为理想,可作为"稳定浆液"。

试验结果揭示了膨润土在水泥浆体系中的双重作用。一方面,膨润土作为一种具有高比表面积的活性矿物掺合料,其遇水膨胀与吸附特性是导致浆液黏度增大、析水率降低的主要原因,其优异的保水性能提高了浆体稳定性,防止水泥颗粒的快速沉降和自由水的析出。另一方面,膨润土对凝结时间的影响呈现复杂性:在高水固比(>2∶1)条件下,其吸水和形成溶胶的特性占主导,稀释了水泥浓度,延缓了水化反应,凝结时间延长;在低水固比(≤2∶1)条件下,体系内水分有限,膨润土的微细颗粒提供了额外的成核位点,促进了水泥水化,故凝结时间反而缩短。抗压强度的增长则遵循水泥基材料的基本规律,水固比降低意味着单位体积内水泥颗粒更密集,水化产物更多,内部结构更致密,从而促使抗压强度显著提高。

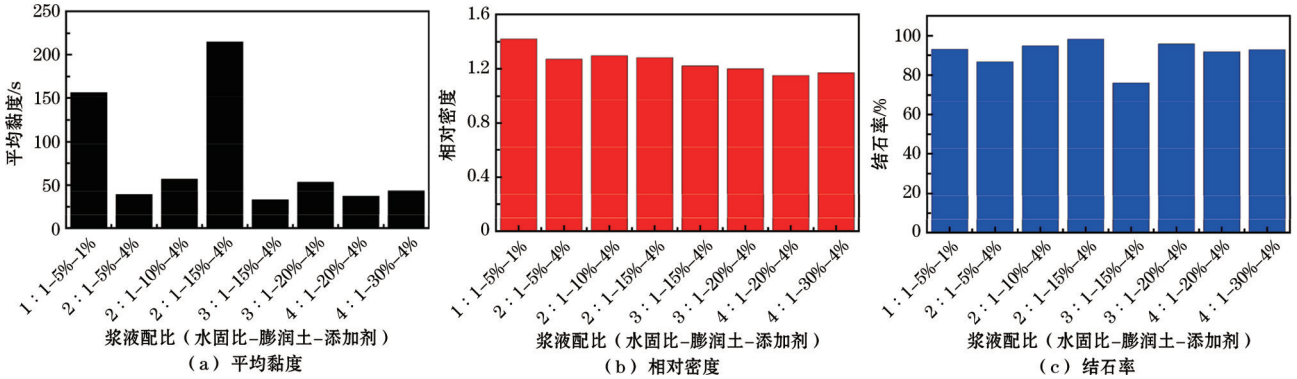


图 3 水泥-膨润土浆液物理化学性能

Fig.3 Physical and chemical properties of cement-bentonite slurry

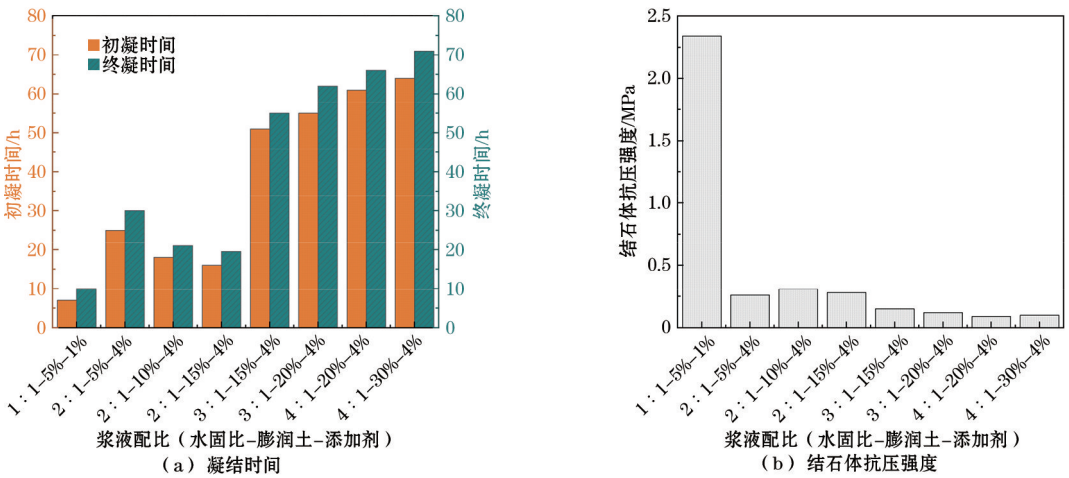


图 4 水泥-膨润土浆液的凝结时间和结石体抗压强度

Fig.4 Setting time and stone mass compressive strength of cement-bentonite slurry

水泥-膨润土浆液兼具水泥的强度和膨润土的稳定性,性能可通过调节水固比和膨润土掺量进行大范围调控。试验表明,在低水固比(≤2∶1)条件下,浆液结石体强度较高且凝结时间可控。该浆液特别适用于深部、高应力条件下的难注岩层(如深部多层沙带)。现场工程验证表明,采用该浆液后,岩体平均透水率由 5.19 Lu 降至 1.47 Lu,衰减率达 71.68%,可注性较传统水泥浆提高 7 倍。推荐注浆工艺为:初灌采用水固比 2∶1、膨润土掺量分别为 15%、10%、5%的三组浆液逐级灌注;若不起压,则改用 1∶1(5%)配比。

2.3 化学浆液的性质特征

2.3.1 浆液的理化性质

将多个 FSG 样本在 60 ℃水中浸泡 84 d,结果显示了 FSG 出色的耐久性,其抗压强度测试结果如图 5 所示。聚异戊二烯乙烯基(GROUTEX)和聚氨酯树脂(POLYSEAL)具有良好的黏结强度,耐用性、抗紫外线和抗冲击能力强,具有出色的轴承能力和良好的流动性,其 24 h 强度测试结果见表 7。

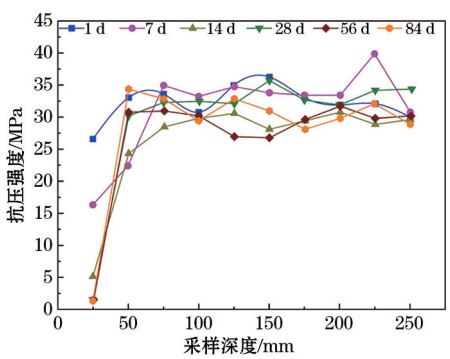


图 5 FSG 抗压强度

Fig.5 Compressive strength of FSG

表 7 聚异戊二烯乙烯基和聚氨酯树脂的强度

Table 7 Strength of GROUTEX and POLYSEAL

性质	GROUTEX/MPa	POLYSEAL/MPa
抗弯强度	17	29
抗压强度	22	89
抗拉强度	7	18
黏结强度	4	—

2.3.2 化学浆液的凝结时间和抗压强度

不同配比的化学浆液的凝结时间和结石体 7 d 抗压强度测试结果见表 8。结果表明,三种化学材料按固定比例搭配,凝结时间可调节,黏度大,形成的结石体抗压强度可达 30 MPa 及以上。在混合浆液中加入适量的 GROUTEX 浆液,可使浆液瞬凝,且结石体强度可达 43.65 MPa,可用作矿山封闭不良钻孔及其他特殊导水通道的快速封堵材料。

表 8 化学浆液的配比试验结果

Table 8 Proportion test results of chemical slurry

FSG-A/g	FSG-B/g	GROUTEX/g	POLYSEAL/g	初凝时间/h	相对密度	黏度/s	抗压强度/MPa
3 000	2 200	0	834	5	1.53	135	31.72
3 000	2 200	0	1 250	4	1.51	127	29.81
3 000	2 200	1 250	1 250	瞬凝	1.64	—	43.65

化学浆液的卓越性能源于其完全不同于颗粒性浆液的固化机制。一方面,FSG(环氧或丙烯酸盐体系)反应生成的三维交联网络聚合物结构使其具有出色的长期耐久性,该结构化学性质稳定,耐水解和化学侵蚀。另一方面,POLYSEAL 极高的抗压强度和 GROUTEX 的快速瞬凝特性,使特定的单体预聚物在催化剂作用下,发生快速链增长和交联反应,这种反应不依赖于水,且能形成致密的高强度固体。将二者加入 FSG 体系,可实现性能调控:GROUTEX 作为反应性速凝剂,迅速消耗体系中的部分组分并形成高强度骨架,引发 FSG 的快速共聚,最终形成一种互穿网络聚合物(IPN)结构,兼具高强度和快速封堵能力。

化学浆液具有可注性好、凝结时间可调(从数小时至瞬凝)且结石体强度极高的特点,但其成本高昂,不适用于大面积帷幕注浆,而应作为一种特殊材料,用于处理局部关键险情。具体而言,该浆液适用于封闭不良钻孔、处理井下突水点,以及封堵其他常规水泥浆无法见效的特殊导水通道。推荐采用瞬凝配比为 FSG-A∶FSG-B∶GROUTEX∶POLYSEAL=30∶22∶125∶125,实现对高压大流量涌水的快速封堵。

2.4 超细水泥浆液的性质特征

2.4.1 材料的抗压强度

超细水泥浆液性能差异的核心在于材料组成与水化机理的不同,不同配比的超细水泥浆结石体抗压强度测试结果见表 9。

表 9 结石体强度的测试结果

Table 9 Test results of stone mass strength

配比编号	7 d 抗压强度/MPa			7 d 平均抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa			28 d 平均抗压强度/MPa
1	1.8	1.5	1.8	1.7	4.9	4.4	4.9	4.7
2	35.4	37.3	36.6	36.4	36.2	43.4	40.8	40.1
3	56.5	60.4	67.9	61.6	61.6	59.7	58.2	59.8
4	25.6	28.7	34.2	29.5	55.9	41.6	47.9	48.5
5	16.8	13.8	15.2	15.3	19.6	24.2	25.6	23.1
6	7.3	11.5	9.9	9.6	14.3	14.4	15.7	14.8

BY12-Ⅵ型材料的核心成分为黏土类物质,主要靠物理吸水膨胀和少量胶凝反应提供强度,无大量高强度水化产物生成,故强度偏低且不易成型。结石体 7 d 平均抗压强度为 1.7 MPa,28 d 平均抗压强度为 4.7 MPa,增长幅度为 176%。

BY12-Ⅰ型材料具有高性能无收缩的特点,在水胶比 0.28 的条件下,浆液流动性良好、易于成型,结石体 7 d 平均抗压强度为 36.4 MPa,28 d 平均抗压强度为 40.1 MPa,增长幅度为 10.2%。

BY12-ⅠA 型材料具有早凝早强的特点,试验中该材料加水 3 h 时已达到较高凝结程度。结石体 7 d 平均抗压强度为 61.6 MPa,28 d 结石体平均抗压强度为 59.8 MPa,增长幅度为-2.9%,说明其早期已达到较高抗压强度,后期增长不明显,符合其早凝早强的特性。

2.4.2 不同配比浆液的抗压强度

配比编号 4、5、6 组均为 BY12-ⅠA 型材料与 BY12-Ⅰ型材料质量比为 1∶1 的组合配比,区别在于加水量依次增加。由表 9 可知,随着水胶比的增大,结石体 7 d 与 28 d 抗压强度逐渐降低。水胶比为 0.28 时,结石体 7 d 平均抗压强度为 29.5 MPa,28 d 平均抗压强度为 48.5 MPa,增长幅度为 64.4%;水胶比为 0.4 时,结石体 7 d 平均抗压强度为 15.3 MPa,28 d 平均抗压强度为 23.1 MPa,增长幅度为 50.9%;水胶比为 0.5 时,结石体 7 d 平均抗压强度为 9.6 MPa,28 d 平均抗压强度为 14.8 MPa,增长幅度为 54.2%。随着水胶比的增大,结石体抗压强度随时间的增长幅度呈先减小后增大的趋势。

机理分析表明,BY12-ⅠA 型材料的“早强早凝”特性通常通过掺入硫酸盐类材料(如石膏)或纳米成核剂实现,这些组分可加速硅酸三钙(C_3S)的水化进程,促使水化硅酸钙(C-S-H)凝胶快速大量生成,故早期强度极高,后期强度增长空间小。而 BY12-Ⅰ型材料更接近纯超细水泥,水化进程平稳,后期强度持续增长。水胶比对强度的影响规律则体

现为水胶比增大,多余水分蒸发后残留的毛细孔增多,导致结石体密度下降,强度降低。

超细水泥浆液弥补了传统水泥浆“颗粒粗、无法注入微细裂隙”和化学浆“成本高”的不足。该类型浆液价格高于普通水泥但远低于化学浆,因此,其最佳适用场景是微裂隙发育地层和壁后注浆工程。当传统水泥浆因颗粒过粗而难以注入时,超细水泥是经济有效的替代方案。推荐在水胶比为 0.28 时使用 BY12-ⅠA 型材料,可获得最佳的早期强度和流动性。

2.5 尾砂浆液的性质特征

2.5.1 细尾砂水泥浆液的理化性质和抗压强度

不同配比细尾砂水泥浆液的理化性质及结石体抗压强度测试结果分别见表 10、表 11。当水胶比为 1 和 0.8 时,细尾砂水泥浆液的流动性较大,漏斗黏度(马氏漏斗黏度计测得的黏度)、塑性黏度及屈服强度均较低,析水率较大,结石体强度偏低。水胶比为 0.6 时,细尾砂与水泥的比例对浆液流变性与析水率影响较小,但对结石体强度影响显著,水泥所占比越高,结石体强度越大。该水胶比条件下,结石体 7 d 平均抗压强度最大为 9.6 MPa,28 d 平均抗压强度最大为 13.9 MPa。当水胶比降低至 0.5 时,细尾砂水泥浆液流动性降低。综合比较可得,细尾砂水泥浆液的最优配比为水胶比 0.6、细尾砂水泥质量比 1∶3。

表 10 细尾砂水泥浆液理化性质测试结果

Table 10 Test results of physical and chemical properties of fine tailings cement slurry

配比编号	漏斗黏度/s	析水率/%	塑性黏度/(mPa·s)	屈服强度/Pa
1	15	38.2	14	0.0
2	18	27.5	15	1.6
3	26	16.8	29	4.2
4	29	13.6	31	4.5
5	24	12.4	27	4.1
6	26	13.2	28	4.4
7	48	10.7	42	14.9

表 11 细尾砂水泥浆液结石体抗压强度测试结果

Table 11 Test results of stone mass compressive strength of fine tailings cement slurry

配比编号	7 d 抗压强度/MPa			7 d 平均抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa			28 d 平均抗压强度/MPa
1	1.2	1.1	1.0	1.1	1.7	1.4	1.7	1.6
2	3.0	3.2	3.3	3.2	4.5	4.8	4.7	4.7
3	4.7	5.0	5.5	5.1	6.4	6.8	6.7	6.6
4	2.3	2.3	2.1	2.2	3.1	3.3	3.2	3.2
5	9.1	9.2	8.7	9.0	11.2	12.4	12.6	12.1
6	9.8	9.9	9.1	9.6	14.6	13.8	13.4	13.9
7	6.3	6.7	6.2	6.4	8.7	8.4	8.6	8.6

2.5.2 细尾砂膨润土水泥浆液的理化性质和抗压强度

不同配比细尾砂膨润土水泥浆液的理化性质及结石体抗压测试结果分别见表 12、表 13。可以看出,在相同水胶比和细尾砂与水泥比例下,随膨润土含量增加,浆液流动性越差,析水率越低。水泥含量较低时,膨润土对结石体强度有一定削弱作用;水泥含量较高时,膨润土对结石体抗压强度的影响基本可以忽略。水胶比为 1 和 0.8 时,浆液流变性符合“稳定浆液”的标准,但析水率偏高,结石体强度偏低。

综合比较,推荐的材料配比为水胶比为 0.6、细尾砂和水泥质量比为 1∶3、膨润土质量占比为 0.05。然而,此配比下结石体抗压强度仍有待提高,且析水率偏高。

表 12 细尾砂膨润土水泥浆液性质的试验结果

Table 12 Test results of physical and chemical properties of fine tailings bentonite cement slurry

配比编号	漏斗黏度/s	析水率/%	塑性黏度/(mPa·s)	屈服强度/Pa
1	20	16.4	30	1.1
2	22	18.3	33	1.2
3	38	12.1	37	9.6
4	28	15.6	27	8.7
5	47	7.3	36	13.6
6	38	10.5	30	8.8

表 13 细尾砂膨润土水泥浆液结石体抗压的试验结果

Table 13 Test results of stone mass compressive strength of fine tailings bentonite cement slurry

配比编号	7 d 抗压强度/MPa			7 d 平均抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa			28 d 平均抗压强度/MPa
1	1.4	1.5	1.8	1.6	2.6	2.7	2.9	2.7
2	3.4	3.3	3.1	3.3	4.7	4.5	3.9	4.4
3	5.2	5.1	5.4	5.2	6.6	6.8	7.2	6.9
4	5.2	5.2	5.6	5.3	7.2	8.0	7.8	7.7
5	9.6	10.0	9.2	9.6	13.8	13.3	14.3	13.8
6	9.7	9.4	10.0	9.7	14.1	14.2	13.6	13.9

尾砂浆液的本质是颗粒堆积与水泥水化复合体系,其流变性和强度是固相颗粒级配、浓度(水胶比)和胶凝反应共同作用的结果。高水胶比条件下,浆液虽流动性好但析水率高,原因是大量自由水无法被颗粒间孔隙有效束缚,上浮析出,导致上部形成多孔、低强度的结石体。降低水胶比或加入膨润土,提高了体系的固体浓度和保水性,减少了析水,形成更为密实的颗粒堆积结构,从而提高了结石体强度。

水泥掺量越高,提供的胶凝产物越多,对尾砂颗粒的胶结作用越强,强度相应越高。

膨润土在低水泥含量时"削弱强度",是由于自身胶凝性差,在胶凝材料不足的情况下,进一步稀释了水泥的浓度,削弱了胶结作用。而在高水泥含量时,水泥水化形成的强度骨架已占绝对主导,膨润土的负面稀释效应被掩盖,其正面稳定效应得以保留。

尾砂浆液的核心优势在于"以废治害",成本极低,且在一定配比下能达到注浆的基本强度要求(7 d 抗压强度最高约 10 MPa)。然而,过高的析水率是制约其工程应用的关键瓶颈,高析水率会导致结石体收缩、防渗性能下降。因此,目前该浆液尚不推荐直接用于现场注浆工程。若需利用其低成本优势,未来应重点研究通过添加保水剂(如聚丙烯酰胺、纤维素醚等)降低析水率,并优化颗粒级配,待改良试验成功后可进行现场试验。

3 结论

针对中非铜(钴)成矿带水文地质条件对注浆材料的特殊需求,系统对比了改性黏土浆液、水泥-膨润土浆液、化学浆液、超细水泥浆液及尾砂浆液 5 类材料的性能,并通过试验揭示了各浆液性能调控机理与适用性原则,得出以下主要结论。

(1) 改性黏土浆液的性能受水固比和添加剂掺量双重控制。黏度、相对密度、塑性强度及结石率均与水固比呈反比,与添加剂掺量呈正比;结石体 7 d 抗压强度为 0.11～0.69 MPa。赞比亚谦比希矿区当地的黏土可以用作改性黏土浆液的基础材料。初灌可采用 1∶3∶4(水泥∶泥饼∶水)配比黏土浆液。灌注过程中遇到溶洞或大裂隙时,采用高浓度的黏土浆液(1∶1∶2～1∶2∶2.4)加压注浆,通过劈裂或压密作用使浆液固结,促使浆液侧向扩散,增大有效扩散半径。制备的改性黏土浆液适用于大型地面帷幕、井筒帷幕等,通过成本测算和类似工程经验,可降低约 30%的材料费用。

(2) 水泥-膨润土浆液中膨润土呈现双重效应,高水固比(>2∶1)时延缓凝结,低水固比(≤2∶1)时促进凝结;结石体 7 d 抗压强度为 0.10～2.34 MPa,随水固比的降低而显著提高。谦比希当地市场膨润土满足基本要求,可作为改性膨润土浆液的基础添加剂。初灌可采用 2∶1(15%、10%、5%)三组配比的浆液,逐级增加膨润土掺量,当灌入浆量超一定标准仍不起压时,可改为 1∶1(5%)配比或更小水固比。在谦比希铜矿主矿体 800 m 中段开展注浆工程试验,注浆后岩体平均透水率为 1.47 Lu,平均衰减 71.68%,与矿山前期 770 m 中段注浆工程相比,该浆液及工艺在深部多层沙带区域可注性提高了 7 倍,堵水率可达 70%以上。

(3) 超细水泥浆液的强度与水胶比密切相关。水胶比从 0.28 增加至 0.50 时,BY12-ⅠA 与 BY12-Ⅰ混合浆体的 28 d 强度逐渐降低。当遇超细裂隙时,传统水泥浆、改性黏土浆、改性膨润土浆扩散距离不够或难以注入时,可选用超细水泥浆液,推荐水胶比为0.28,较传统水泥浆防渗性能更高,较化学浆造价更低。

(4) 化学浆液可通过调整 GROUTEX 掺量实现凝结时间从数小时至瞬凝的精确调控,配比为 FSG-A∶FSG-B∶GROUTEX∶POLYSEAL = 30∶22∶125∶125 时,结石体抗压强度达 43.65 MPa。封闭不良的钻孔可采取本次试验所用南非化学浆液进行快速封堵,该浆液通过调整配比可实现凝结时间调控,采用上述配比时,可达瞬凝要求,且结石体抗压强度可达 43 MPa 以上,可高效封闭井下揭露大水钻孔导致的突水。

(5) 细尾砂水泥浆液和细尾砂膨润土水泥浆液在浆液黏度、结石体抗压强度等方面可满足注浆浆液要求(7 d 最高抗压强度为 9.7 MPa),但析水率偏高(>10%),其原因可能是该尾砂密度较大、颗粒级配单一、磨圆度好,或是其表面电势不利于絮凝。建议暂不直接用于现场工程,仍需进一步开展尾砂本身的物理化学性质测定分析和保水剂改良试验,以解决其体积收缩问题,同时尝试不同添加剂(聚丙烯酰胺等)的多配比试验。

参考文献(References):

[1] Nonveiller E. Grouting theory and practice [M]. Amsterdam: Elsevier Science,2013.

[2] Zahra Zainab Saleem Abdul. Review on properties and applications of grouting technique[J]. Journal of Water Resources and Geosciences,2024,3(1):66-97.

[3] 赵光明,王艳芬,艾洁,等.矿用水泥基注浆材料的发展及展望[J].中国矿业大学学报,2024,53(1):1-22.
Zhao Guangming, Wang Yanfen, Ai Jie, et al. Development and prospects of cement-based grouting materials for coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(1):1-22.

[4] 张芯睿.化学注浆材料在渗漏水治理中的选择和应用[J].化学工程与装备,2024(10):172-174.

Zhang Xinrui. Selection and application of chemical grouting materials in water leakage treatment [J]. Chemical Engineering& Equipment,2024(10):172-174.

[5] 陈汝先,荣亚鹏.绿色注浆充填材料采空区处治效果评价[J].山西交通科技,2023(4):27-31.
Chen Ruxian, Rong Yapeng. Evaluation of the treatment effect of green grouting filling materials in mined-out region [J]. Shanxi Science & Technology of Transportation,2023(4):27-31.

[6] Jiang Bolin, Wu Mengjun, Wu Shanshan, et al. A review on development of industrial solid waste in tunnel grouting materials: feasibility, performance, and prospects [J]. Materials,2023,16(21):6848.

[7] 周谟远,高岗荣,冯旭海.富水砂层单液水泥浆水平孔注浆模拟试验研究[J].煤炭技术,2018,37(3):105-107.
Zhou Moyuan, Gao Gangrong, Feng Xuhai. Experimental study of single cement liquid horizontal hole grouting simulation for rich water sand stratum [J]. Coal Technology,2018,37(3):105-107.

[8] 尚宏波,靳德武,柳昭星,等.地下含水层帷幕注浆单液水泥浆扩散规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):134-141.
Shang Hongbo, Jin Dewu, Liu Zhaoxing, et al. Research on diffusion law of pure liquid cement slurry for curtain grouting in underground aquifer [J]. Coal Science and Technology,2021,49(11):134-141.

[9] 费子豪,吴进高,明华军,等.水泥-膨润土浆液配比及适用性研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(4):51-54.
Fei Zihao, Wu Jin'gao, Ming Huajun, et al. Study of ratio of cement-bentonite slurry and its applicability[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2019,41(4):51-54.

[10] 雷进生,戴康,涂保林,等.掺膨胀剂水泥-黏土浆体膨胀性能的试验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(6):54-58.
Lei Jinsheng, Dai Kang, Tu Baolin, et al. Experimental study on the expansion of cement-clay paste mixed with expansive agents [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2019,41(6):54-58.

[11] 王旌,张雅铭,董彦习,等.水泥-水玻璃双液浆入水状态下凝胶时间及强度时效研究[J].混凝土,2025(2):26-31.
Wang Jing, Zhang Yaming, Dong Yanxi, et al. Setting time and strength time effect of cement-sodium silicate binary slurry in the water[J]. Concrete,2025(2):26-31.

[12] 朱定桂,施成华,孙晓贺,等.考虑迂曲度的水泥-水玻璃双液浆柱形渗透机制研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(5):1800-1809.
Zhu Dinggui, Shi Chenghua, Sun Xiaohe, et al. Cylindrical penetration mechanism of cement and sodium silicate mixed grout considering tortuosity[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(5):1800-1809.

[13] 张毅,马有宝,左志昊,等.低黏度超细水泥浆液单裂隙注浆试验效果分析[J].煤矿安全,2020,51(11):55-60.
Zhang Yi, Ma Youbao, Zuo Zhihao, et al. Analysis on experimental results of single crack grouting for low viscosity ultra-fine cement slurry[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(11):55-60.

[14] 甄泽强.水玻璃类浆材注浆性能及工程应用研究[D].太原:太原理工大学,2019.
Zhen Zeqiang. Study on grouting performance and engineering application of water glass material[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2019.

[15] 宋海瑞,王卫红,安刘生.丙烯酰胺浆液整治隧道渗漏水[J].山西建筑,2002(4):60-61.
Song Hairui, Wang Weihong, An Liusheng. Using acrylamide mortar to treat tunnel's leakage [J]. Shanxi Architecture,2002(4):60-61.

[16] 陶伟明,卢春房,叶长文,等.聚氨酯复合注浆材料浆液扩散特性及应用研究[J].铁道学报,2023,45(7):1-9.
Tao Weiming, Lu Chunfang, Ye Changwen, et al. Study on grout diffusion characteristics and application of polyurethane composite grouting materials[J]. Journal of the China Railway Society,2023,45(7):1-9.

[17] 沈玉旭,王成帅,郭俊庆,等.基于正交试验的注浆材料力学性能及最优配比研究[J].矿业研究与开发,2025,45(5):63-71.
Shen Yuxu, Wang Chengshuai, Guo Junqing, et al. Research on mechanical properties and optimal ratio of grouting materials based on orthogonal test [J]. Mining Research and Development,2025,45(5):63-71.

[18] 曾娟娟,陈海基.快速固化型环氧树脂灌浆材料的制备及性能[J].中国塑料,2020,34(4):6-11.
Zeng Juanjuan, Chen Haiji. Preparation and properties of fast curing epoxy resin grouting materials [J]. China Plastics,2020,34(4):6-11.

[19] Anagnostopoulos Costas A. Cement-clay grouts modified with acrylic resin or methyl methacrylate ester: physical and mechanical properties [J]. Construction and Building Materials,2007,21(2):252-257.

[20] 李新旺,吴荣元,李磊,等.粉煤灰/煤矸石离层注浆充填材料性能研究[J].煤炭与化工,2024,47(10):1-5+11.
Li Xinwang, Wu Rongyuan, Li Lei, et al. Research on the performance of fly ash/coal gangue separation layer grouting filling materials[J]. Coal and Chemical Industry,2024,47(10):1-5+11.

[21] 夏小亮.注浆材料优化配比与注浆试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2011.
Xia Xiaoliang. Study on optimization ratio of grouting materials and grouting experiment [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2011.

[22] 李辉,王贻明,武鹏杰,等.谦比希铜矿井下深孔加密注浆堵水技术研究及效果分析[J].金属矿山,2023(10):60-66.
Li Hui, Wang Yiming, Wu Pengjie, et al. Research and effect analysis of underground deep hole densification grouting water closure technology in Chambishi Copper Mine[J]. Metal Mine,2023(10):60-66.

[23] 赵耀强.谦比希铜矿主西矿体 900 mL 3# 深锥沉淀仓系统改造[J].中国有色金属,2023(增刊 1):355-356.
Zhao Yaoqiang. System modification of the 900 mL 3# deep cone sedimentation silo in the main west ore body of Chambishi Copper Mine[J]. China Nonferrous Metals,2023(Suppl.1):355-356.

[24] 张兵,张梦昭,梁权宇,等.谦比希铜矿涌水水化学特征及防治技术应用[J].矿业研究与开发,2025,45(7):227-233.
Zhang Bing, Zhang Mengzhao, Liang Quanyu, et al. Hydrochemical characteristics and prevention and control technology application of Chambishi Copper Mine water inrush [J]. Mining Research and Development,2025,45(7):227-233.

[25] 王亮,滕龙,刘超,等.基于地下水数值模拟的控制疏干方案优化及矿坑涌水量预测[J].矿业研究与开发,2025,45(7):191-198.
Wang Liang, Teng Long, Liu Chao, et al. Optimization of control drainage scheme and prediction of mine pit inflow based on groundwater numerical simulation [J]. Mining Research and Development,2025,45(7):191-198.