

富水砂卵石层堵漏凝胶的研制及其机理

何鑫¹, 王胜^{*1}, 何焯², 周昌军², 解程超¹, 唐庆东², 李守信²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059;

2. 中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司, 四川成都 611130)

摘要: 针对富水砂卵石层地下连续墙施工过程中槽壁发生垮塌, 而常规堵漏材料(如水泥)并不十分适用的问题, 通过单因素试验分析了成胶剂(阴离子聚丙烯酰胺)、交联剂(铬交联剂)、增强剂和粘土对浅层堵漏聚合物凝胶性能(成胶时间、粘度、强度、稳定性)的影响, 并利用正交试验得到了最终的优化配方, 同时分析了该凝胶材料的形成机理。结果表明: 增强剂能够在凝胶内串联成胶剂, 进一步增强凝胶强度和稳定性; 而粘土同样能够缩短交联时间、增强凝胶体强度, 但粘土不利于浆液的稳定性, 稍微过量便导致浆液分层。最终的优化配方为: 15% 铬交联剂 + 5% 成胶剂 + 8% 增强剂 + 7.5% 粘土, 测试其性能能够满足地下连续墙浅层堵漏的要求。

关键词: 富水砂卵石层; 地下连续墙; 浅层堵漏; 堵漏凝胶; 聚合物凝胶

中图分类号: P634.8; TU47 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)01-0142-08

Development and mechanism of plugging gel for water-rich sand and gravel formations

HE Xin¹, WANG Sheng^{*1}, HE Ye², ZHOU Changjun², XIE Chengchao¹, TANG Qingdong², LI Shouxin²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. Chengdu Hydroelectricity Construction Engineering Co., Ltd of Sinohydro Bureau No.7 Company,
Chengdu Sichuan 611130, China)

Abstract: In view of the collapse of the trench wall and the failure of conventional plugging materials such as cement in the construction of diaphragm walls in water-rich sand and gravel formations, single factor experiment was used to analyze the influence of the gel forming agent (anionic polyacrylamide), the crosslinking agent (chromium crosslinking agent), the reinforcing agent and clay on the properties of polymer gel (gelation time, viscosity, strength and stability) for shallow plugging; and the optimum formulation was obtained by orthogonal test. In addition, the formation mechanism of the gel material was also analyzed. The results show that the reinforcing agent can link the gel-forming agent in gel, and further enhance the strength and stability of gel. Clay can also shorten the cross-linking time and enhance the gel strength, but clay is not conducive to the stability of the slurry. The final optimized formula is: 15% chromium crosslinking agent + 5% gelling agent + 8% reinforcing agent + 7.5% clay. Its performance can meet the plugging requirements of shallow diaphragm walls.

Key words: water-rich sand and gravel formations; diaphragm wall; shallow plugging; plugging gel; polymer gel

收稿日期: 2022-11-12; 修回日期: 2022-12-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.01.020

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目“复杂地层护壁堵漏材料研究”(编号: SKLGP2019Z006)

第一作者: 何鑫, 男, 汉族, 1998年生, 地质工程专业, 硕士研究生在读, 主要从事钻进新材料研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 2338553599@qq.com。

通信作者: 王胜, 男, 土家族, 1982年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事钻进新材料与新技术研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式: 何鑫, 王胜, 何焯, 等. 富水砂卵石层堵漏凝胶的研制及其机理[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 142-149.

HE Xin, WANG Sheng, HE Ye, et al. Development and mechanism of plugging gel for water-rich sand and gravel formations[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 142-149.

0 引言

随着我国城市化建设及地下空间的开发利用逐步深入,城市地铁等基础设施及各类高层建筑的大量建设,使得基坑工程愈加重要^[1-2]。地下连续墙是起支撑上部荷载、兼顾挡土防渗的连续混凝土墙^[3],因其刚度大、强度高、隔水性好,被广泛应用在深基坑及富水地层中^[4]。

在地下连续墙的施工过程中,维持槽壁的稳定是保证施工顺利进行及工程质量的关键。针对这一点,许多学者就槽壁垮塌的机理及影响因素做了相关研究。刘海卿等^[5]采用理论分析,分析了地下水位、泥浆液面高度和内摩擦角对槽壁稳定性的影响。卢鑫^[3]利用有限元研究了T型地连墙槽壁的失稳机理及破坏形式,同时进一步分析了开挖深度、土层参数及施工荷载等因素对槽壁变形的影响规律。李志忠^[6]通过建立整体和局部滑动体模型,结合实际工程地质条件,运用对比分析和数值计算的方法,研究了富水砂卵石层相关地质、工程参数对槽壁稳定性的影响。王启云等^[7]以深厚软弱地层为研究背景,基于土体极限平衡原理推导了槽壁稳定安全系数表达式,并结合工程实例分析了槽壁稳定性影响因素。邱明明等^[4]以深厚富水砂层为背景,通过现场试验结合数值模拟研究了槽壁稳定性特征及影响因素。杜志云等^[8]、夏小刚等^[9]和姜厚停等^[10]都结合实际的工程案例,对影响地下连续墙稳定性的因素进行了分析。这些研究采用了不同的方法对地下连续墙的稳定性的进行了深入的分析,得出的结论却有一定的共通性,即浅层失稳是泥浆槽壁失稳的主要形式;泥浆性质及液面高度、地质条件、地下水位、地面超载及施工工艺是主要的影响因素。

从静力平衡角度来看,泥浆液柱压力要能够平衡地下水压力及土压力才能保证槽壁稳定^[11]。因此,泥浆液面高度、地下水位及地质条件是最基本、最重要的影响因素。而在条件较恶劣的富水砂卵石地层,仅仅靠泥浆实现槽壁的稳定是不太现实的。由于土层的级配分布不均匀,地下水渗流促使土层中的细颗粒运移,进而出现更多、更大的渗流通道,最终形成空腔,上覆土层失去承载,泥浆大量漏失,进而发生槽壁垮塌。因此,需要控制地层中流体的渗流来确保泥浆液面高度的稳定,维持槽壁的稳定。

对于富水砂卵石层来说,要保证地下连续墙成槽过程中槽壁的稳定,就要尽可能堵塞地下流体

的渗流通道,减少地层中细粒土的流失。当前应用于工程的堵漏材料种类较多,包括桥塞堵漏材料、高失水类材料、聚合物凝胶类和可固化堵漏材料等^[12-14]。这些材料中,桥塞堵漏材料、高失水材料对漏失通道适应性较差,且桥塞材料多为小粒径刚性材料,易影响最终连续墙质量,所以并不十分适用。可固化堵漏材料如水泥,通常需添加各种辅助试剂调整其性能,如抗分散剂、悬浮稳定剂和缓凝剂等,以满足实际应用要求。但该类材料多以超前注浆的方式加固地层,浆液扩散范围难以控制,加大了对地层的污染。同时由于其固化后强度较高,又增加了后续成槽的难度。综合来看,既增加了施工流程延长了工期,又额外增加了工程成本。因此,聚合物凝胶类材料相对更加适合此应用场景,其自适应能力强,有较强的粘滞阻力和抗冲刷能力。

聚合物凝胶类堵漏材料在石油领域研究较多,也有相关产品,如FORM-A-PLUG、FORM-A-SET^[15]和ZNT特种凝胶^[16]等。富水砂卵石层地下连续墙的堵漏要求不同于石油钻井堵漏,其性能要求在于:(1)交联过程尽可能简单,无须外界元素(如温度、盐类)激发;(2)交联时间可控,既要求凝胶在地层中扩散充分,又要及时发生交联产生强度;(3)具有一定的胶凝强度,足够抵御渗流水的压力,发挥堵漏的作用;(4)材料来源广泛,成本较低,能结合现有施工机具、工艺完成堵漏。

而现有凝胶堵漏材料主要存在以下3点不足:(1)制备工艺复杂,辅助试剂较多;(2)预制凝胶需要外界条件引发凝胶过程;(3)应用场景不同,凝胶的相关性能指标不同。石油钻探堵漏地层更深,环境也更复杂。在地下连续墙成槽过程中直接使用显然不合理。一是工艺复杂、试剂较多,不经济的同时,也增加了环境污染的风险;二是性能指标的差异将直接导致堵漏效果变差,甚至无法堵漏。综合来看,以在富水砂卵石层地下连续墙施工为应用背景,针对性地研究一种成本较低、配伍简便、性能指标满足要求的凝胶堵漏材料十分有必要。基于这一点,本文通过试验探究了各组分对凝胶材料性能的影响,并通过正交试验得到了优化配方,最后分析了其成胶机理与堵漏过程。研究结果为地下连续墙的浅层堵漏提供了另一种参考方案,对相似研究有一定的借鉴性。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

根据富水砂卵石层堵漏凝胶的性能要求,选择更易获得、交联过程更简便更易控制的材料具体如下:成胶剂为阴离子1200万聚丙烯酰胺,生产厂家为山东优索化工科技有限公司;增强剂购买自上海臣启化工科技有限公司;铬交联剂购自上海麦克林生化科技有限公司,纯度为分析纯;粘土为成都本地粘土,为贴近实际地层情况,去除大块砾石、植物根系后,经烘干研磨成粉(50~300目)后直接使用。

1.2 实验方法

1.2.1 胶凝时间

胶凝时间对于材料的堵漏效果至关重要。胶凝时间过短,材料流动距离有限,先胶凝的材料堵塞后续材料流道路径,最终导致堵漏范围有限;胶凝时间过长,投入堵漏材料量加大的同时,材料本身性质易受环境影响。常用的胶凝时间的测试方法为挑挂法^[17],即用玻璃棒挑挂凝胶,观察其凝胶状态,当其能被挑挂时即视为已胶凝。该方法简便、快捷,但仍颇具主观性。本文采用气泡法结合挑挂法测试,减少主观因素的影响。气泡法即用针筒向胶凝材料内注入空气,当气泡能够在内部悬浮时,视为已胶凝。

1.2.2 粘度

胶凝材料浆液的粘度过高不利于在地层孔隙中的流动。本文利用旋转粘度计测试浆液粘度。

1.2.3 胶凝强度

聚合物胶凝材料由于其本身的特性,难以使用常规岩石强度的测试方法,因而选择突破真空度法^[17-18]。本文使用的装置如图1所示,通过调节活塞玻璃管的开合调节抽吸力,当管道中出现凝胶体匀速缓慢上升时,真空泵显示压力稳定,记录此时压力为突破压力。每个试样测试3次,确保数值的有效性。

1.2.4 稳定性

胶凝材料应用于富水的环境中,如果其在短时间内便与水相互作用,失去原来性质而收缩、水解,便无法堵漏。实验所采用的方法与文献^[19]测试稳定性方法近似,选择水中放置5 d后凝胶体质量变化率来衡量。

2 实验结果与讨论

2.1 交联剂加量对凝胶体性能的影响

交联剂作为引起成胶物质发生交联,形成三维



图1 突破压力测试装置

Fig.1 Breakthrough pressure test device

网状结构的反应物,对凝胶体的性质有直接影响。在实验前期对比了不同种类交联剂的作用效果,选择了交联反应更加可控、胶凝更加均匀的铬交联剂进行单因素试验。试验了成胶剂加量为2%(注:成胶剂与粘土加量均为水的质量分数,交联剂与增强剂加量为成胶剂的质量分数),以探究不同加量交联剂对凝胶体性能的影响,试验结果如图2所示。

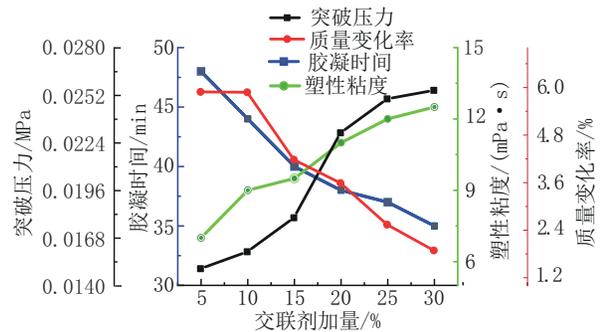


图2 交联剂加量实验结果

Fig.2 Experimental results of cross-linking agent dosage

从图2可以看出,交联剂增加,胶凝时间是逐渐缩短的,交联剂加量越多,单位时间内能够结合的成胶剂越多,交联时间自然缩短。同时,交联程度的增加也导致了粘度的上升。而交联剂的增加,增强了成胶剂交联形成的三维网状结构强度。而质量变化率方面,已有相关研究表明,交联剂加量过高,会使得凝胶中液体析出^[18,20]。分析认为,正是因为该影响的存在结合凝胶体强度的增加,抵消了部分溶胀的效果,使得质量变化率逐渐减小。

2.2 成胶剂加量对凝胶体性能的影响

聚丙烯酰胺作为成胶的基础,其加量对凝胶体性能的影响是十分显著的。实验保持交联剂加量固定(10%),单一调整成胶剂加量,结果如图3所示。

从图3可以看出,成胶剂加量的增加,塑性粘度

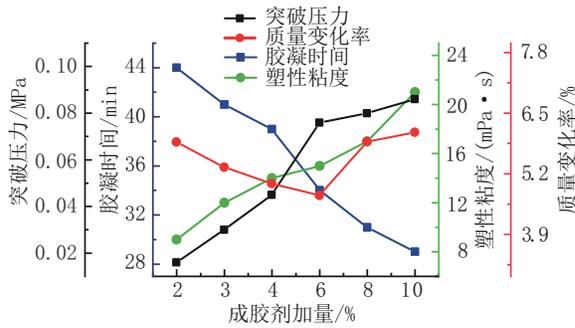


图3 成胶剂加量实验结果

Fig.3 Experimental results of gelling agent dosage

升高,胶凝时间下降。原因十分好理解,聚丙烯酰胺本身即可作为增粘剂,加量增加,粘度自然上升。同时,聚丙烯酰胺加量增加,提升了反应物浓度,提供给交联剂结合的活性位点数量增加,胶凝时间自然缩短。凝胶体突破压力在成胶剂加量 $>4\%$ 后有了显著提升。而质量变化率方面,随着成胶剂加量的增加,在 6% 处出现拐点,低于此加量,凝胶体吸水溶胀逐渐减小,而高于此加量则逐渐增加。分析认为, 6% 加量是一个平衡点,在该点之前,成胶剂形成的三维网状结构束缚水的能力逐渐增强,溶胀程度减小;在该点之后,由于成胶剂加量过高,形成的三维网状总体上是一种“欠饱和”的状态,结构间水含量不足,空隙较多,吸水也就增加。

2.3 增强剂加量对凝胶体性能的影响

在确定交联剂与成胶剂加量对凝胶体性能的影响后发现,单一地增加交联剂与成胶剂的量并不能很好地调整凝胶体性能以适应实际工程需要,比如交联剂对凝胶体强度的影响不及成胶剂,但成胶剂的增加对粘度的影响同样大,不利于堵漏材料在地层裂隙中的流动。基于该原因,选择了增强剂对凝胶体性能进行调整。固定交联剂(10%)、成胶剂(2%)加量进行实验,实验结果如图4所示。

从图4可以看出,增强剂同样能够影响凝胶体的4项性能,其中对胶凝时间与凝胶体强度的影响最明显。增强剂同样能够参与交联反应,对成胶剂形成的凝胶补强。增强剂的添加相当于提高了反应物的加量,因而胶凝时间有所缩短。从突破压力曲线可以看到 $0\sim 2\%$ 段斜率较大,可见增强剂加与不加的影响是十分明显的,此后的曲线斜率逐渐稳定,规律性较强,便于调整增强剂加量来控制凝胶体强度。

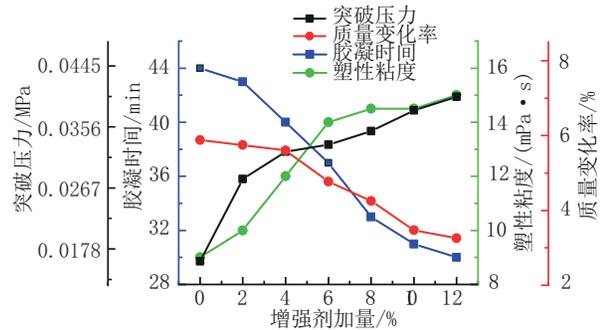


图4 增强剂加量实验结果

Fig.4 Experimental results of reinforcing agent dosage

2.4 粘土加量对凝胶体性能的影响

在实际的地下连续墙成槽过程中,土是不可避免的一类因素,忽视堵漏过程中土的作用,必然对堵漏结果造成影响。同时,相近的一些研究表明,向三维网状结构固体中加入少量小粒径材料能够增加固结体的强度,如利用蒙脱石粉、淀粉等物质合成复合纳米水凝胶体系^[18],利用蒙脱石和超细水泥制备堵漏材料^[19],以及水泥研究中加入玻璃粉^[21]、硅灰等超细材料改善结石体性能^[22]等。因此,研究粘土对该凝胶堵漏材料的影响十分必要。在实验过程中发现,当粘土加量 $>15\%$ 时,凝胶材料分层严重,无法作为堵漏材料使用,因而在加量 $<15\%$ 内探讨,实验结果如图5所示。

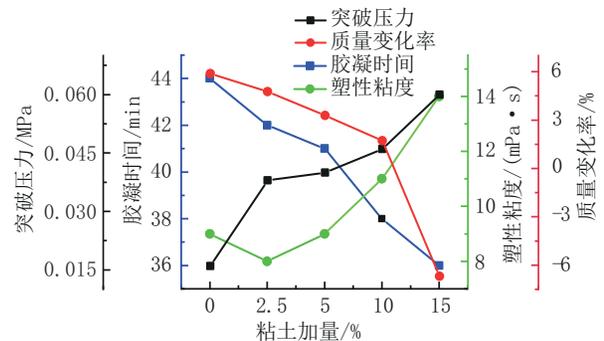


图5 粘土加量实验结果

Fig.5 Experimental results of clay dosage

从图5可以看到胶凝时间是呈缩短的趋势,分析认为聚丙烯酰胺作为一种污水处理的试剂,能够在土颗粒间形成絮体并由此产生表面吸附作用^[23]。这就在凝胶体体系里形成了聚丙烯酰胺浓度局部的升高,进而使得交联反应加快,胶凝时间缩短。同时,也能看到在粘土加量较少(2.5%)时,凝胶体系的粘度是低于未添加粘土试样的,分析认为:粘土本

身不参与交联反应,而聚丙烯酰胺具有絮凝作用,粘土不均匀聚集在反应前期是起破坏胶凝浆液整体性的,因而粘度有所下降。而随着加量的增加,聚丙烯酰胺聚集粘土更多,整体分散也就更均匀。而从突破压力上可以看到,适量加量的粘土是起增强作用的。在稳定性方面,凝胶体呈现两极化,在加量10%以前是溶胀,在10%之后是收缩(析水)。分析认为,粘土颗粒占据了凝胶体三维网状结构中的空隙,压缩了水分子的赋存空间,因而表现为质量变化率的降低。而随着粘土加量的升高,凝胶无法稳定过多粘土,在交联过程中粘土凝胶体系就会分层。这也就导致了凝胶体收缩,稳定性下降。

2.5 正交试验设计及结果分析

根据前文实验的相关结果,设计了四因素三水平的正交试验(表1),通过正交试验来探究各因素对4项性能指标的影响程度,同时得出优化配方。正交试验结果如表2及图6所示。

表1 试验设计
Table 1 Test design

水 平	影响因素			
	A 交联剂/%	B 成胶剂/%	C 增强剂/%	D 粘土/%
1	12.5	4	6	5
2	15	5	8	7.5
3	17.5	6	10	10

表2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal experimental results

组号	影响因素/%				胶凝时间/ min	塑性粘度/ (mPa·s)	突破压力/ MPa	稳定性/ %
	A	B	C	D				
1	12.5	4	6	5	33	8	0.048	-3.40
2	12.5	5	8	7.5	28	9	0.072	-0.65
3	12.5	6	10	10	22	15	0.095	1.74
4	15	4	8	10	27	12	0.081	-3.98
5	15	5	10	5	25	11	0.076	3.12
6	15	6	6	7.5	22	13	0.085	2.44
7	17.5	4	10	7.5	24	12	0.077	-1.25
8	17.5	5	6	10	23	13	0.075	-1.24
9	17.5	6	8	5	20	15	0.094	4.98

由图6可知,各因素对胶凝时间影响的主次关系为:成胶剂>交联剂>增强剂>粘土,成胶剂与交联剂作为主要的反应物质,对交联反应进程的影响是最为直接的。而增强剂作为辅助试剂也能参与其中的交联反应,促进三维网状结构的形成。而粘土则是从外在影响成胶剂的局部浓度进而影响交联反应进程。各因素对塑性粘度影响的主次关系为:成胶剂>交联剂>粘土>增强剂,除交联反应的进程会影响体系粘度外,材料本身的性质也会对粘度有所影响,成胶剂本身有增粘作用,而粘土本身能够吸收一定的自由水,这也就使得粘土的影响程度高于增强剂。各因素对凝胶体强度影响的主次关系为:成胶剂>增强剂>粘土>交联剂,除成胶剂外,其余三者的极差相差不大,表明在当前加量梯度下三者对凝胶体强度的增强效果相似。各因素对稳定性影

响的主次关系为:成胶剂>粘土>增强剂>交联剂,成胶剂聚丙烯酰胺本身是促进粘土颗粒沉淀,但在该凝胶体系中,由于交联反应的进行,能够悬浮、稳定部分的粘土,使其参与三维网状结构的搭建,但过量则会引起浆液的分层,破坏体系的稳定性。这也是图中粘土曲线与其余三者趋势相反的原因。

综合来看,地下连续墙浅层失稳主要发生在5~15 m。要满足地下连续墙浅层堵漏的应用,其胶凝时间 ≤ 25 min,其粘度在初期较低,便于流通扩散。根据近似工程经验,突破真空度应大于0.04 MPa^[24],以发挥堵漏效果。稳定性方面应控制在不发生收缩,允许轻微溶胀。以上述要求为准,得出的优化配方为:15% 铬交联剂+5% 聚丙烯酰胺+8% 增强剂+7.5% 粘土。经测试其基本性能指标如表3所示。

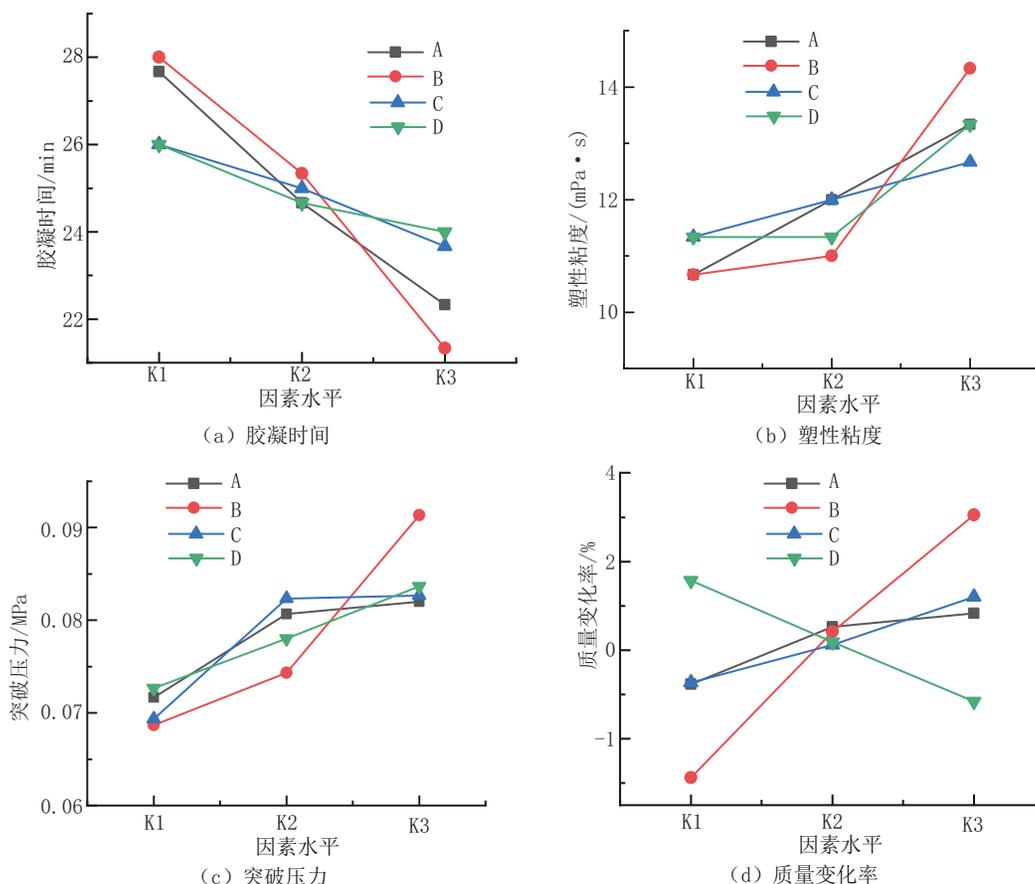


图 6 正交试验因素分析结果

Fig.6 Factor analysis results of orthogonal test

表 3 优化配方性能测试结果

Table 3 Performance test results of the optimized formula

胶凝时间/ min	塑性粘度/ (mPa·s)	τ_0/μ_p	突破压力/ MPa	稳定性/ %
27	11	0.33	0.078	0.75

3 成胶机理分析

成胶剂与交联剂的交联方式如图 7 所示。交联剂中的铬以离子(Cr^{3+})的形式分散于水中,当向溶液中加入成胶剂阴离子聚丙烯酰胺后, Cr^{3+} 受到成胶剂中的羧基团的吸引,形成配位键。随着交联反应的持续进行,最终形成三维网状结构。而增强剂本身亲水性强、环保无污染,同样能够与 Cr^{3+} 发生交联反应,对水的束缚更强,能够串联在整个体系中,提升了凝胶三维网状结构的强度。

整个凝胶体系的形成过程如图 8 所示。一般来说,聚丙烯酰胺的交联过程分为诱导、快速交联和形成稳定结构 3 个部分^[17]。

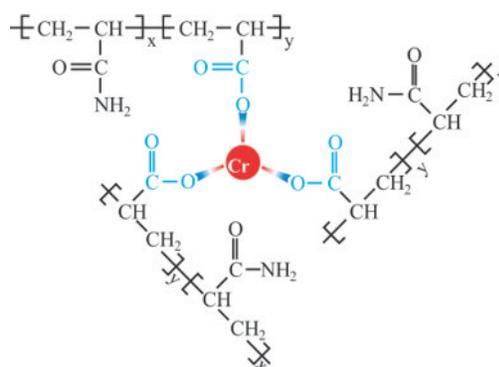


图 7 交联反应原理^[25]

Fig.7 Principle of cross-linking reaction

在诱导阶段,成胶剂分散在溶液中,随着交联反应的进行,铬离子与羧基络合,并且与同一聚合物链上另一羧基结合,引起分子内交联,形成预凝胶聚集体。此后,进入快速交联阶段,预凝胶聚集体浓度升高,超过临界重叠浓度后,则分子间交联建立^[26]。体系内分子间交联方式有 3 种,主要为成胶剂分子间、成胶剂与增强剂间的交联,增强剂间的交联因增

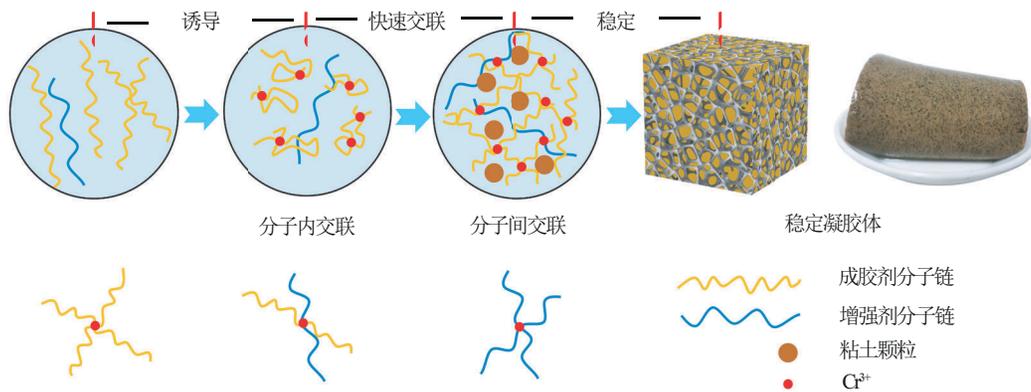


图8 堵漏凝胶成胶机理

Fig.8 Gelation mechanism of water plugging gel

强剂加量较低的原因较少。分子间交联的发生意味着三维网状结构的生长,此时粘土颗粒逐渐被分散、填充在生长的网状结构中,充当内支撑骨架的作用。分子间交联反应的持续进行,最终形成稳定的三维网状结构(堵漏凝胶),也表示整个体系交联反应的完成。

4 结论

对成胶剂、交联剂、增强剂及粘土的掺量对凝胶材料的性能影响进行了实验研究,并利用正交试验优化了配方,分析了其成胶机理,得出了以下结论。

(1)成胶剂和交联剂加量的增加,提供了更多的活性位点与提高了离子浓度,能够加速交联反应,缩短了交联时间,提高了凝胶体的强度,但也使得体系的初始粘度升高,不利于浆液在地层中的流动。而成胶剂加量超过一定限度还会使得凝胶体的溶胀程度增加。

(2)增强剂的添加能够增强凝胶体的强度,同时能够减轻凝胶体的溶胀,有利于凝胶体的稳定性。增强剂同样能够发生交联反应,能够串联在成胶剂形成的网状结构中,增强了三维网状结构的强度。而少量的粘土能够使得成胶剂局部富集,从而加速交联反应。同时,在成胶过程中,粘土能够填充在三维网状结构内,充当骨架的作用,提升了凝胶体的强度。但粘土对于稳定性十分不利,加量过多会导致凝胶体收缩,不利于堵漏。

(3)正交试验的结果表明,对凝胶体强度影响的主次关系为:成胶剂>增强剂>粘土>交联剂。得出的最终优化配方为:15% 铬交联剂+5% 聚丙烯

酰胺+8% 增强剂+7.5% 粘土,其性能指标基本能够满足浅层堵漏的需要。

参考文献(References):

- [1] 薛洪松,朱雅倩,刘希胜,等.暗挖车站洞内地下连续墙施工导洞环境效应分析[J].科学技术与工程,2021,21(24):10440-10451. XUE Hongsong, ZHU Yaqian, LIU Xisheng, et al, Analysis of environmental effect of pilot tunnel for diaphragm wall construction in excavated stations[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(24):10440-10451.
- [2] 殷俊鹏,张啸,阮怀宁,等.基坑开挖对T型地下连续墙水平位移的影响[J].科学技术与工程,2017,17(7):232-236. YIN Junpeng, ZHANG Xiao, RUAN Huaining, et al. Effect of excavation on horizontal displacement of T-type diaphragm wall[J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(7):232-236.
- [3] 卢鑫.T型地下连续墙槽壁稳定性及变形研究[D].广州:华南理工大学,2013. LU Xin. Study on the deformation and stability of T-shaped diaphragm wall panel trench[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [4] 邱明明,杨果林,申权,等.深厚砂层地下连续墙槽壁稳定性特征及影响因素研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(5):1129-1139. QIU Mingming, YANG Guolin, SHEN Quan, et al. Study on characteristics and influence factors of slurry trench stability of diaphragm wall in deep sandy stratum[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(5):1129-1139.
- [5] 刘海卿,于海峰,于波.深层地下连续墙槽壁稳定机理研究[J].科学技术与工程,2006,6(8):1011-1013. LIU Haiqing, YU Haifeng, YU Bo. Stability mechanism analysis of groove inside of continuous underground wall[J]. Science Technology and Engineering, 2006,6(8):1011-1013.
- [6] 李志忠.富水砂卵石地层连续墙槽壁稳定性与施工技术研究[D].长沙:中南大学,2014. LI Zhizhong. Study on stability of diaphragm wall construction in water-rich sandy pebble strata [D]. Changsha: Central South

- University, 2014.
- [7] 王启云,林华明,臧万军,等.深厚软弱地层地下连续墙槽壁稳定性分析[J].科学技术与工程,2018,18(35):58-64.
WANG Qiyun, LIN Huaming, ZANG Wanjun, et al. Stability analysis of trench of diaphragm wall in deep water-soaked soft stratum[J]. Science Technology and Engineering, 2018,18(35): 58-64.
- [8] 杜志云,冯庆元.复杂地质条件下超深地下连续墙槽壁稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):856-863.
DU Zhiyun, FENG Qingyuan. Extra-deep diaphragm wall trench stabilities analysis under multiply geological ground condition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020,16(S2):856-863.
- [9] 夏小刚,张子洋,刘济遥.富水砂卵石地层地下连续墙槽壁稳定性影响因素数值分析[J].西部探矿工程,2020,32(1):7-11.
XIA Xiaogang, ZHANG Ziyang, LIU Jiyao. Numerical analysis of factors affecting the stability of underground continuous wall slot in water rich sand egg formation[J]. West-China Exploration Engineering, 2020,32(1):7-11.
- [10] 姜厚停,周秀普,李志强,等.厚卵石地层地下连续墙槽壁失稳机理及护壁泥浆性能研究[J].市政技术,2019,37(6):220-223.
JIANG Houting, ZHOU Xiupu, LI Zhiqiang, et al. Study on instability mechanism of diaphragm wall and the performance of wall-protecting slurry in thick pebble formation[J]. Municipal Engineering Technology, 2019,37(6):220-223.
- [11] 丁勇春,李光辉,程泽坤,等.地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2704-2709.
DING Yongchun, LI Guanghui, CHENG Zekun, et al. Analysis of trench face stability of diaphragm wall panel during slurry trenching[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(S1):2704-2709.
- [12] 李伟,白英睿,李雨桐,等.钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策[J].科学技术与工程,2021,21(12):4733-4743.
LI Wei, BAI Yingrui, LI Yutong, et al. Research and application progress of drilling fluid lost circulation materials and technical countermeasures for lost circulation control[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(12):4733-4743.
- [13] 王胜,吴丽钰,蒋贵,等.深孔纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究[J].钻探工程,2021,48(12):7-13.
WANG Sheng, WU Liyu, JIANG Gui, et al. Nano composite cement based wellbore protection and plugging materials for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):7-13.
- [14] 周生伟,孙平贺,苏卫锋,等.玄武岩纤维堵漏体系在高海拔非开挖钻进中的应用研究[J].钻探工程,2022,49(3):139-145.
ZHOU Shengwei, SUN Pinghe, SU Weifeng, et al. Use of basalt fiber drilling fluid in trenchless works at high altitudes[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):139-145.
- [15] 张希文,李爽,张洁,等.钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J].钻井液与完井液,2009,26(6):74-76,79.
ZHANG Xiwen, LI Shuang, ZHANG Jie, et al. Research progress on lost circulation materials and lost circulation control technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(6): 74-76,79.
- [16] 张新民,聂勋勇,王平全,等.特种凝胶在钻井堵漏中的应用[J].钻井液与完井液,2007,24(5):83-84,94.
ZHANG Xinmin, NIE Xun Yong, WANG Pingquan, et al. A special gel for mud loss control[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(5):83-84,94.
- [17] Zhao G, Dai C, You Q, et al. Study on formation of gels formed by polymer and zirconium acetate[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2013,65(3):392-398.
- [18] Singh R, Mahto V. Synthesis, characterization and evaluation of polyacrylamide graft starch/clay nanocomposite hydrogel system for enhanced oil recovery[J]. Petroleum Science, 2017,14(4):765-779.
- [19] Liu D, Shi X, Zhong X, et al. Properties and plugging behaviors of smectite-superfine cement dispersion using as water shutoff in heavy oil reservoir[J]. Applied Clay Science, 2017,147:160-147.
- [20] Hajri S, Mahmood S, Akbari S, et al. Gelation behavior as a function of concentration of sodium thiosulfate for PAM gels cross-linked with chromium[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2019,9(2):1539-1546.
- [21] 赵毅,马盼盼,刘雷明.不同粒径废玻璃粉水凝胶砂力学性能试验研究[J].建筑科学,2019,35(7):86-89.
ZHAO Yi, MA Panpan, LIU Leiming. Experimental study on mechanical properties of cement mortar mixed with different diameter-waste glass powder[J]. Building Science, 2019,35(7): 86-89.
- [22] 徐迅,许园园.矿物掺合料对硫氧镁水泥性能的影响研究[J].建筑科学,2018,34(7):85-90.
XU Xun, XU Yuanyuan. Study on effect of mineral admixture on the properties magnesium oxysulfate cement[J]. Building Science, 2018,34(7):85-90.
- [23] 陈念.木质素基阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的制备及其在水处理中的应用[D].广州:华南理工大学,2020.
CHEN Lian. Preparation of lignin-based cationic polyacrylamide flocculant and its application for water flocculation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [24] 陈军,陈小龙.低成本延迟交联凝胶堵漏体系研究[J].山东化工,2020,49(6):141-144,147.
CHEN Jun, CHEN Xiaolong. Study on a low-cost delayed crosslinking gel loss circulation system[J]. Shandong Chemical Industry, 2020,49(6):141-144,147.
- [25] Zhang S, Guo J, Gu Y, et al. Polyacrylamide gel formed by Cr(III) and phenolic resin for water control in high-temperature reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,194:107423.
- [26] Bai B, Zhou J, Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(4):525-532.