

基于响应面试验的深厚覆盖层植物胶成膜 冲洗液体系研究

王 胜, 潘安邦, 向 杰, 解程超, 李之军

(地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:随着矿产资源的加速消耗,以及国家新一轮找矿突破战略的提出,对地质钻探环境复杂的深厚覆盖层地区勘探找矿提出了新的要求。绳索取心钻探广泛应用于复杂地层钻进。为提高其在深厚覆盖层的钻进效率和岩心采取率,维持孔壁稳定,开展环保植物胶成膜冲洗液体系研究,通过优选试验确定魔芋胶作为成膜基体,在此基础上进一步筛选确定成膜助剂PVA、流变改性剂HJ、聚胺类防塌抑制剂AB-1;然后基于响应面试验优化配方得到植物胶成膜冲洗液体系K-PA:0.3%魔芋胶+0.9%PVA+0.6%HJ+1%AB-1+0.2%纯碱,并分析了其成膜防塌机理;该冲洗液体系具有突出的成膜降滤失与抑制水化特性实现防塌护壁,针对深厚覆盖层具有良好适配性,性能测试结果同模型预测值高度吻合,证明响应面试验设计可靠性高。研究成果为解决复杂地层问题提供了新思路,同时对新型环保无固相冲洗液研制也具有一定的借鉴意义与参考价值。

关键词:深厚覆盖层;绳索取心;成膜防塌;植物胶冲洗液;响应面试验

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)05-0121-10

Research on plant gum film-forming drilling fluid system for deep overburden layers based on response surface experiment

WANG Sheng, PAN Anbang, XIANG Jie, XIE Chengchao, LI Zhijun

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: With the accelerating consumption of mineral resources and the introduction of the national new round of mineral prospecting breakthrough strategy, new requirements have been put forward for exploration and prospecting in complex deep overburden layer, where the geological drilling environment is complex. Wire-line core drilling technology is widely used for drilling in the complex strata. To enhance the drilling efficiency and core recovery of wire-line coring drilling in deep overburden layers, and to maintain borehole wall stability, an environmentally friendly plant-gum film-forming drilling fluid system was developed. Through optimization tests, konjac gum was selected as the film-forming matrix. On this basis, the film-forming aid PVA, the rheology modifier HJ, and polyamine anti-sloughing inhibitor AB-1 were further identified. Based on the response surface test, the optimized formulation K-PA of the plant-based film-forming drilling fluid was obtained, that is 0.3% konjac gum + 0.9% PVA + 0.6% HJ + 1% AB-1 + 0.2% soda ash, moreover, its film-forming and anti-sloughing mechanism was analyzed. This drilling fluid system exhibits outstanding film-forming filtration reduction and hydration inhibition capabilities to achieve anti-sloughing and wall protection, showing good adaptability to deep overburden layers. The performance test results are highly consistent with the model predictions, demonstrating the high reliability of the response surface test design. The research results provide a new approach for solving complex formation problems, and also offer certain reference significance for the development of new environmentally friendly solid-free drilling fluids.

收稿日期:2026-04-06; 修回日期:2026-05-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.013

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备”(编号:2024ZD1003100)

第一作者:王胜,男,汉族,1982年生,教授,博士生导师,地质工程专业,从事钻探新技术与新材料的教学与科研工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式:王胜,潘安邦,向杰,等.基于响应面试验的深厚覆盖层植物胶成膜冲洗液体系研究[J].钻探工程,2026,53(5):121-130.

WANG Sheng, PAN Anbang, XIANG Jie, et al. Research on plant gum film-forming drilling fluid system for deep overburden layers based on response surface experiment[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5):121-130.

Key words: deep overburden; wire-line coring; film-forming anti-sloughing; plant-gum drilling fluid; response surface experiment

0 引言

国家“十四五”规划及2035年远景目标的建议明确提出,要有效解决一批制约国家重大战略实施的重大资源问题。同时,实施新一轮找矿突破战略行动为深部找矿指明了方向,深部矿、覆盖隐伏矿资源的巨大潜力日益得到业界重视^[1-3]。深厚覆盖层通常具有结构松散、胶结性差、含水层发育及力学性能不稳定等特点^[4-5]。绳索取心钻探广泛应用于复杂地层,但在该类地层进行绳索取心钻探时常受地质特性制约难以发挥技术优势,孔壁失稳问题尤为突出,缩径、崩塌、掉块及吸附卡钻等事故频发,岩心采取率低^[6-7]。甘肃张掖ZC1井在超厚沉积层岩心钻探施工中,就因孔壁稳定性控制不力,多次面临坍塌、卡钻等复杂工况,严重制约了工程进度与取心质量^[8]。刘俊辉等^[9]在广西苗儿山地区大厚度水敏性地层的实践表明,适配性冲洗液技术对孔壁稳定和岩心采取率的提升效果显著。

研究认为,采用地层适配性优良的无固相冲洗液是解决绳索取心钻进难题的有效技术手段^[10-11]。成膜冲洗液的研究与调控是近年来国内外发展较快的一类水基冲洗液技术^[12]。白小东等^[13]将常见水基成膜冲洗液体系概括为硅酸盐、聚合醇、甲基葡萄糖苷及植物胶基等。其中植物胶基冲洗液属于天然高分子聚合物,在环保无害前提下具有护心、黏弹性减振、紊流减阻三大特殊功效,能显著降低滤失量、改善润滑效果,适用于解决破碎地层难取心、孔壁失稳等问题。因此确定以植物胶作为冲洗液成膜基体进行深入研究。

在植物胶冲洗液研究方面, Hadadi等^[14]通过实验研究了果胶和黄芪胶作为环保添加剂对冲洗液性能的改良效果,并与黄原胶对比,数据显示这两种天然聚合物在增强性能、降低储层伤害及提高环保效益方面具有明显优势。解程超等^[15]对瓜尔胶进行黄原胶复配和有机硼交联改性,研发出GXB植物胶冲洗液,改善了资源短缺困扰。向浩天等^[16]对魔芋胶无固相冲洗液的防塌性能进行了评价,提出低黏增效粉和乳化沥青对魔芋胶冲洗液的防塌性能具有强化作用。田禹等^[17]基于STJ植物胶开展的滤饼强化研究表明,微米级材料可显著改善滤饼

密度与护壁效果。近年来,植物胶冲洗液原料来源从单一品种发展为多元化选择,除传统瓜尔豆外,还开发了榆田菁、魔芋、胡里豆等多种天然植物作为胶体原料。

尽管关于绳索取心钻进与无固相植物胶冲洗液已积累较多研究成果,但针对深厚覆盖层绳索取心钻进冲洗液的研究相对较少,亟需构建地层适配性的冲洗液技术体系。同时,关于植物胶本身成膜性能调控及其与多种处理剂协同成膜防塌机理的阐述也较为欠缺。为此,本文从植物胶成膜基体筛选出发,通过优选成膜助剂、流变改性剂、防塌抑制剂,并设计响应面试验确定组分最优加量,研制新型植物胶成膜冲洗液体系。研究成果为研制环保无固相冲洗液解决复杂地层问题提供了新思路,对类似地层绳索取心钻进具有重要工程意义。

1 试验材料与方法

前期准备实验将植物胶划分为种子类与非种子类两大体系进行优选,发现种子类植物胶刺槐豆胶、根茎类植物胶魔芋胶成膜性能较优,最具成膜作用代表性,将二者定为植物胶成膜基体备选。改性处理剂包括成膜助剂、流变改性剂、防塌抑制剂。成膜助剂为三偏磷酸钠、木质素磺酸钠、聚丙烯酸钾K-PAM、聚乙烯醇PVA、树脂类成膜剂A-01。流变改性剂包括聚阴离子纤维素PAC、羧甲基纤维素CMC、改性淀粉CMS、黄原胶XG和天然高分子-纤维复合物HJ。防塌抑制剂筛选材料为DCPAM、有机硅憎水剂、聚胺类页岩抑制剂AB-1。

冲洗液流变性能通过数显六速旋转黏度计测定评价,成膜性能通过滤失特性与抑制特性来表征,其中滤失特性通过API标准滤失仪测定,抑制特性通过岩心线性膨胀率试验测定。

2 植物胶成膜防塌冲洗液体系研制

2.1 植物胶成膜基体优选

加入0.2%纯碱将溶液pH调节至碱性(后文所有溶液均为碱性环境),植物胶溶液浓度测试范围为0.2%~1.2%,变化梯度为0.2%。测试结果见图1。

由图1(a)可知,两种植物胶溶液黏度随加量增

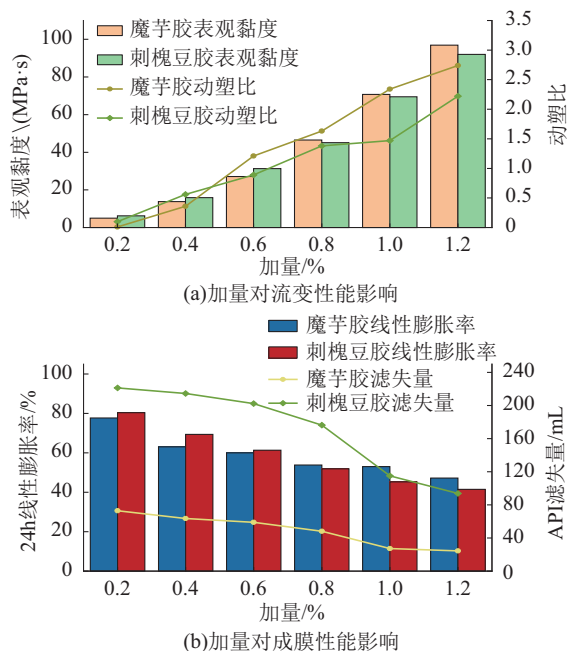


图 1 不同加量条件下植物胶性能变化
Fig.1 Changes in film-forming performance of plant gum under different dosage conditions

加而上升,0.4% 浓度时刺槐豆胶和魔芋胶溶液表观黏度分别为 13.80 和 15.90 MPa·s,动塑比分别为 0.66 和 0.56,均已具良好流变性能,形成了一定结构强度,因此重点以成膜性能择优。图 1(b)可知,随加量增大,两种植物胶溶液成膜能力和质量提升,线性膨胀率和滤失量实现双降。但刺槐豆胶在较低浓度下基本无法形成滤膜阻止滤失,浓度增至 1% 才体现一定的成膜特性,滤失量出现明显降幅,但即使增至 1.2% 浓度,刺槐豆胶 API 滤失量仍高达 93.80 mL,表明所形成的胶膜质量较差,无法满足防塌护壁要求。反观魔芋胶,其成膜性能在较低加量时未出现明显弱化,API 滤失量大幅优于同加量下的刺槐豆胶,且线性膨胀率与刺槐豆胶相近。但在 1.2% 最高浓度下,魔芋胶 API 滤失量 24.4 mL,线性膨胀率 47.23%,处于较差水平,不能达到现场应用标准,需后续添加成膜助剂进一步提升成膜能力。

综合考虑后续复配改性需求,植物胶溶液黏度不宜过高,魔芋胶 0.4% 时流变性能已满足携岩与泵送可行性,成膜性能虽不足但显著优于刺槐豆胶,因此选定魔芋胶为成膜基体,以 0.4% 加量作为后续复配基准浓度。

2.2 成膜助剂优选

成膜助剂筛选材料包括三偏磷酸钠、木质素磺

酸钠、K-PAM、PVA、A-01。将各成膜助剂均以 0.2% 浓度分别加入魔芋胶溶液,测试结果见图 2。

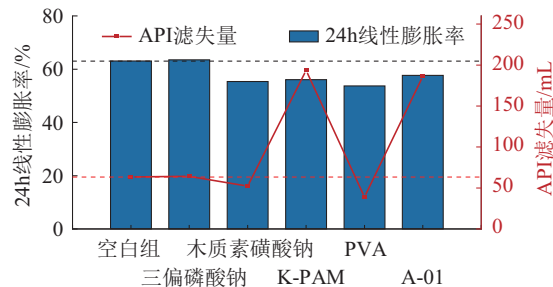


图 2 不同成膜助剂成膜性能测试
Fig.2 Film-forming performance test of different film-forming aids

分析图 2 可知,仅有木质素磺酸钠和 PVA 同时实现滤失量和线性膨胀率明显降低,且 PVA 成膜改性效果最佳,API 滤失量由 63.60 mL 降为 39.00 mL,线性膨胀率由 63.08% 降为 53.70%,说明 PVA 与魔芋胶配伍性良好,可增强溶液成膜性能。故选用 PVA 进行加量试验,浓度测试范围为 0~5%,其中 0~1% 范围内变化梯度为 0.2%,1%~5% 范围内变化梯度为 1%。具体试验数据见图 3。

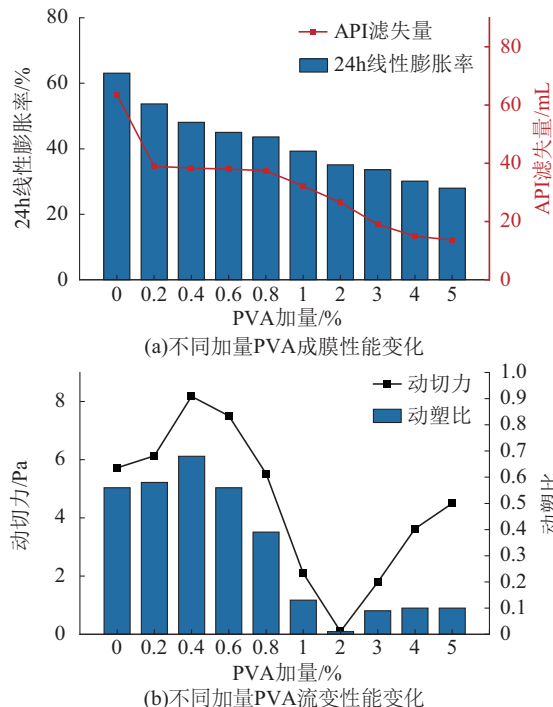


图 3 不同加量 PVA 性能变化
Fig.3 Performance changes of PVA with different dosages

观察图3(a)、(b)可知,随着PVA加量增加,体系成膜性能得以增强,API滤失量与线性膨胀率均持续降低;溶液的黏度和动塑比则呈现出先增大后减小再增大的变化趋势。成膜性能与流变性能的变化趋势说明PVA与魔芋胶复配体系性能变化主要可分为三个阶段:初始阶段少量PVA(加量<0.6%)可通过氢键、缠结等物理作用同魔芋胶形成复合网络,增强体系结构,提高溶液黏度和滤饼质量减少滤失;随着PVA浓度进一步增加,一方面与魔芋胶协同成膜限制水分子渗透和黏土分散,另一方面PVA分子相互间发生接触,链段缠结作用力增大,逐渐聚集成团破坏魔芋胶原有网络,削弱结构强度降低黏度;当PVA浓度持续升高至临界值后(加量>3%以后),体系转变为由PVA主导,形成新的缠结网络结构,最终表现为黏度再次上升,滤失量与线性膨胀率持续降低,且PVA主导后体系动切力增长幅度低于黏度变化,导致动塑比降低。

综上所述,PVA用量过少时无法发挥与魔芋胶协同成膜的优势,过多又将劣化钻井液流变性能。由于当加量到达1%后,体系成膜作用加强,因此对PVA浓度1%~5%进行分析。1%浓度PVA成膜性能虽略低,但其动塑比0.13为该范围内最高,而2%~5%加量下动塑比过低,且黏度迅速增大,不利于携带岩屑与开泵,故考虑工程经济成本与性能平衡,将PVA的加量控制在1%进行后续试验。

2.3 流变改性剂优选

筛选得到的魔芋胶-PVA体系虽然可以协同增强成膜能力,但动塑比略低会直接影响工程性能。因此,通过引入不同作用机制的流变改性剂进一步提升体系的携岩能力和成膜致密性。筛选材料为PAC、CMC、CMS、XG和HJ。具体试验数据见图4。

图4(a)可知,5种流变改性剂对体系抑制性影响较小,降滤失性能呈不同程度改善,其中流变改性剂HJ降滤失作用效果最优。图4(b)表明在流变性能方面,具明显提黏增切作用的为PAC、CMC与HJ,但前两者成膜性能均弱于HJ。因此选定HJ在0~1%加量范围内以0.2%变化梯度进行加量优化试验。试验结果见图5。

图5(a)可知,API滤失量随HJ加量增加呈持续下降,0.6%时降至10.00 mL,然而持续提升加量,仅小幅降至8.40和8.20 mL,出现边际效益递减;而

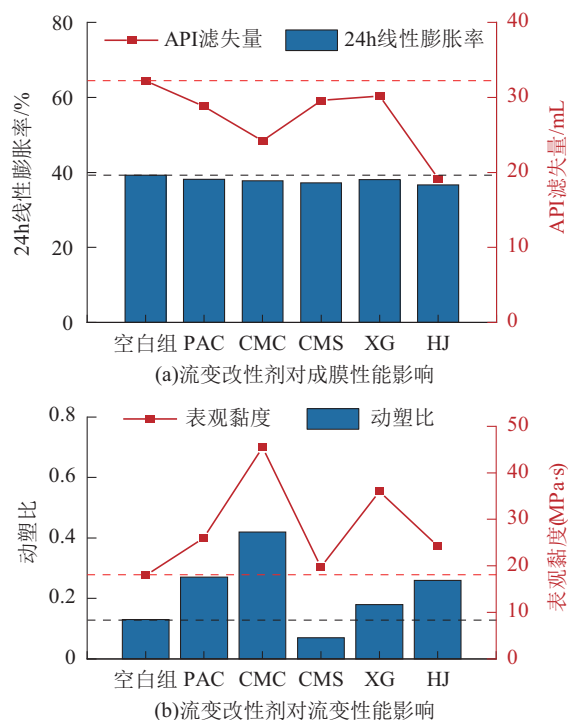


图4 不同流变改性剂对体系性能的影响

Fig.4 Effects of different rheology modifiers on system performance

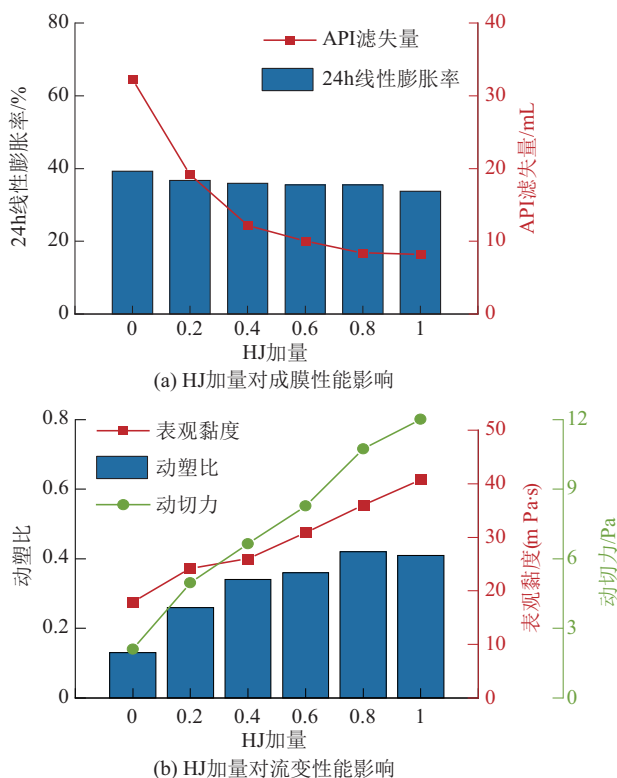


图5 流变改性剂HJ加量对冲洗液性能影响

Fig.5 Effect of rheology modifier HJ dosage on drilling fluid performance

线性膨胀率受浓度影响较小。图5(b)可知,随着HJ改性剂加量增加体系黏度逐渐上升,网络结构强度显著增强,剪切稀释性得到优化。当加量超过0.6%后,黏度增速加快,而切力提升略显滞后,导致动塑比提升变缓,表明加量过量可能引发链缠结过载,流变均衡性降低。

总体而言,HJ在0.6%加量时,流变性能与成膜性能达到较优平衡,后续加量虽能小幅提升性能,但伴随着黏度增长过快及经济性下降。故选择0.6% HJ加量进行后续优化试验。

2.4 防塌抑制剂优选

筛选材料为CPAM、有机硅憎水剂、AB-1,加量范围为0.2%~0.4%,变化梯度为0.2%。在魔芋胶-PVA-HJ体系溶液中分别加入上述加量范围的防塌抑制剂,测试其对体系的作用效果,结果见图6。

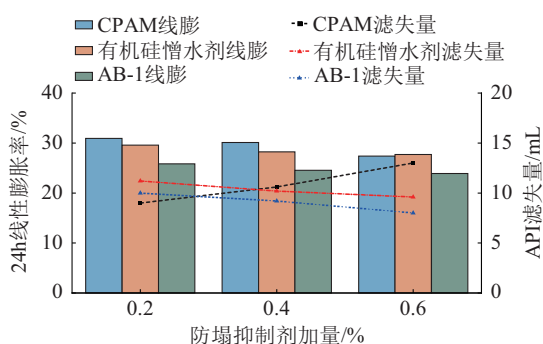


图6 不同种类防塌抑制剂对冲洗液成膜性能影响
Fig.6 Effect of different types of anti-sloughing inhibitors on the film-forming performance of drilling fluid

图6表明,三种抑制剂均能发挥抑制水化作用,使线性膨胀率下降。但随CPAM加量增加,体系降滤失性能劣化。AB-1的滤失量和线性膨胀率随加量增加实现双降,且降幅大于有机硅憎水剂,在0.6%加量时线性膨胀率降至23.91%,降幅达32.65%,抑制效果最优。因此,对AB-1按0~1.4%范围、0.2%变化梯度进行加量试验,结果见图7。

由图7可知,API滤失量从10.00 mL逐步降至8.00 mL,线性膨胀率由35.5%持续下降至21.55%,在1%加量后降幅微弱,到达减弱边际。综合来看,AB-1在1%加量时为最优选择,此时冲洗液体系成膜性能接近峰值,可同时实现流变稳定

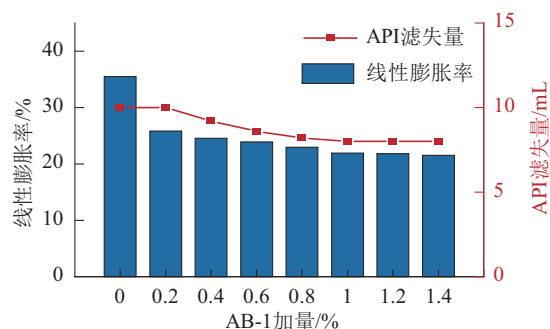


图7 AB-1加量对冲洗液成膜性能影响

Fig.7 Effect of AB-1 dosage on the film-forming performance of drilling fluid

性与成膜致密性的最优协同。

2.5 机理分析

魔芋胶主要成分为魔芋葡甘露聚糖,其分子链与PVA都富含活泼羟基,二者在水溶液中通过氢键交联形成三维网状结构^[18-19]。HJ中的天然高分子-纤维复合物作为刚性架桥粒子嵌入该网络,构建起“纳米-微米”多级封堵结构协同封堵。AB-1作为聚胺类抑制剂,其阳离子基团可静电吸附于带负电的黏土表面,中和表面电荷、压缩双电层,抑制渗透水化^[20];其多个胺基能充填于黏土颗粒晶层之间并将其束缚,有效降低黏土吸水倾向^[21]。

深厚覆盖层主要由松散堆积物构成,缺乏胶结,岩心易松散破碎,孔壁自稳能力差。本冲洗液体系的魔芋胶-PVA-HJ复合网络形成保护性胶膜,对取心起包裹固结作用,维持岩心完整;同时膜层对孔壁的物理胶结作用,维持孔壁稳定。覆盖层中砂层与砂卵石层孔隙率高、渗透性强,常规冲洗液易漏失。体系魔芋胶-PVA-HJ能在孔隙入口形成桥接,多层次协同堵漏。

3 响应面试验优化配方

通过植物胶成膜冲洗液体系建立,确定了植物胶及3种处理剂的种类和较优加量。但上述试验仅考察了处理剂在单独掺入情况下对冲洗液体系成膜性能的影响,未能揭示多组分协同作用下的配伍规律。将单筛试验各因素最优加量设定为中水平,上下各取一高、低水平加量,按式(1)、(2)计算各因素滤失量和线性膨胀率随水平提升的变化量,结果见表1,分析得出对体系成膜性能影响最大的3个因素。

$$R_{FL}=FL_{low}-FL_{high} \tag{1}$$

$$R_{LS}=LS_{low}-LS_{high} \tag{2}$$

式中： R_{FL} ——滤失量变化量； R_{LS} ——线性膨胀率变化量； FL_{low} ——低水平时滤失量； FL_{high} ——高水平时滤失量； LS_{low} ——低水平时线性膨胀率； LS_{high} ——高水平时线性膨胀率。

表1 各因素滤失量和线性膨胀率变化量
Table 1 Filtration loss and linear expansion rate for each factor

因素	滤失量变化量/mL	线性膨胀率变化量/百分点
魔芋胶	14.00	17.70
PVA	8.50	10.90
HJ	3.80	0.92
AB-1	0.20	1.12

分析表1可知,魔芋胶和PVA在加量梯度变化下对冲洗液成膜性能呈现显著调控作用,滤失量和线性膨胀率改善明显。虽然流变改性剂HJ对体系抑制性能影响较小,试验中线性膨胀率仅降低0.92个百分点,但降低滤失量作用较为突出下降3.8 mL,而防塌抑制剂AB-1加量变化对体系成膜性能影响性小,已到达减弱边际。因此,后续研究将AB-1加量维持为1%,重点构建魔芋胶-PVA-HJ三元体系的多因素响应模型。通过设计三因素三水平的响应面试验,系统考察处理剂间的交互作用,调控处理剂最优加量。

采用响应面法中的Box-Behnken实验设计方法,分别以API滤失量(R_1)及线性膨胀率(R_2)为响应指标,将魔芋胶加量(A)、PVA加量(B)及HJ加量(C)设为影响因素,设定因素水平,得出如表2所示的三因素三水平编码表。

表2 三因素三水平编码表
Table 2 Three-factor, three-level coding table

水平	因素		
	魔芋胶(A)	PVA(B)	HJ(C)
-1	0.3	0.8	0.3
0	0.5	1.2	0.5
1	0.7	1.6	0.7

3.1 响应曲面实验滤失量模型建立与分析

基于三因素交互作用对API滤失量的影响,试验参数设计及响应值如表3所示。

表3 基于响应面法的滤失量优化设计方案

Table 3 Optimization design scheme for filtration loss based on response surface methodology

试验编号	A	B	C	API滤失量/mL
1	-1	-1	0	15.8
2	1	-1	0	12.4
3	-1	1	0	10.4
4	1	1	0	9.2
5	-1	0	-1	12.4
6	1	0	-1	9.6
7	-1	0	1	9.4
8	1	0	1	7.2
9	0	-1	-1	13.6
10	0	1	-1	8.1
11	0	-1	1	8.2
12	0	1	1	7.2
13	0	0	0	8.2
14	0	0	0	8.4
15	0	0	0	8.5
16	0	0	0	8.3
17	0	0	0	8.8

采用二次多项式模型对表3中的试验数据进行拟合,并得出二次多项式(如式3所示),对该式进行方差分析与评价,如表4所示。

表4 API滤失量模型方差分析

Table 4 ANOVA of API filtration loss model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	92.38	9	10.26	81.23	<0.0001	显著
A	11.52	1	11.52	91.17	<0.0001	—
B	28.5	1	28.50	225.56	<0.0001	—
C	17.11	1	17.11	135.42	<0.0001	—
AB	1.21	1	1.21	9.58	0.0175	—
AC	0.09	1	0.09	0.7123	0.4266	—
BC	5.06	1	5.06	40.07	0.0004	—
A ²	15.89	1	15.89	125.74	<0.0001	—
B ²	10.35	1	10.35	81.88	<0.0001	—
C ²	2.26	1	2.26	17.88	0.0039	—
残差	0.8845	7	0.1264	—	—	—
失拟项	0.6725	3	0.2242	4.23	0.0714	不显著
误差	0.2120	4	0.0530	—	—	—
总回归	93.26	16	—	—	—	—

$R^2=0.9905, Adj.R^2=0.9783, Pre.R^2=0.8811$

$$R_1 = 8.44 - 1.2000A - 1.8875B - 1.4625C + 0.5500AB + 0.1500AC + 1.125BC + 1.9425A^2 + 1.5675B^2 - 0.7325C^2 \quad (3)$$

分析表4中数据可知,API滤失量模型显著性检验显示 F 值为81.23($P < 0.01$),证明二次多项式模型具有高度显著性;模型失拟项 P 值 > 0.05 ,表明试验误差可控;校正决定系数 $\text{Adj.}R^2$ 为97.83%,表明二次项方程能有效地拟合API滤失量与三因素间的响应关系; $\text{Pre.}R^2$ 与 $\text{Adj.}R^2$ 差值小于0.2,表明可应用该模型对体系滤失量进行理论预测。观察各因素、交互因素的 P 值大小可知,因素 A 、 B 、 C 对滤失量的影响都极为显著,各因素交互作用影响滤失量的显著性大小排序为: $BC > AB > AC$ 。以体系API滤失量实际测量值为 X 轴,预测值为 Y 轴,绘制如图8所示散点图。

由图8可知,体系滤失量预测值与实际值相关

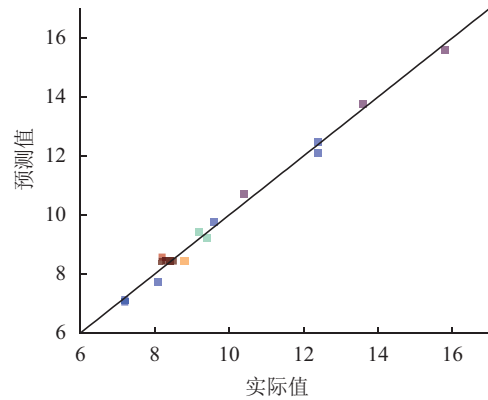


图8 API滤失量模型可靠性评估

Fig.8 Reliability evaluation of the API filtration loss model

性较高,实际测量值均匀分布于直线及其两侧,离散型较小,说明模型拟合精度高,可靠性好。建立三维曲面响应图如图9所示。

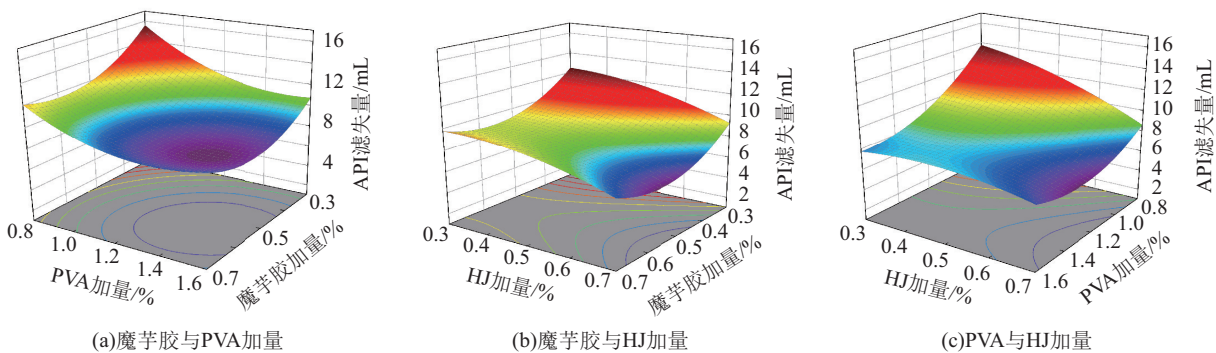


图9 各影响因素对API滤失量的交互影响

Fig.9 Interactive effects of various influencing factors on API filtration loss

图9(a)表明,魔芋胶与PVA加量对滤失量的影响相近:固定其一,滤失量随另一者增加略微先降低后增加,且两者均略大于中值时滤失量最低。图9(b)中,HJ低水平时滤失量随魔芋胶增加而降低;HJ高水平时滤失量随魔芋胶增加先减后增,且魔芋胶取中值时滤失最低。图9(c)显示,固定PVA时滤失量随HJ增加而降低;HJ低水平时滤失量随PVA增加而降低,HJ高水平时随PVA增加先减后增。整体上,PVA与HJ均取较高水平时滤失量最低。

3.2 响应曲面实验线性膨胀率模型建立与分析

基于表1研究了魔芋胶(A)、PVA(B)及HJ(C)三因素交互作用对体系线性膨胀率的影响,试验参数设计及响应值如表5所示。

采用二次多项式模型对表5中的试验数据进行拟合,并得出二次多项式(如式4所示),对该式进行方差分析与评价,如表6所示。

$$R_2 = 0.2451 - 0.0019A - 0.0148B - 0.0091C + 0.0042AB + 0.0089AC - 0.0008BC - 0.0120A^2 - 0.0071B^2 - 0.0062C^2 \quad (4)$$

分析表6中数据可知,线性膨胀率显著性检验显示模型 F 值为98.83($P < 0.01$),证明二次多项式模型具有极高显著性;模型失拟项 P 值为0.2367(> 0.05),表明试验误差较小;校正决定系数 $\text{Adj.}R^2$ 达99.22%,说明二次项方程能有效地拟合线性膨胀率与三因素间的响应关系; $\text{Pre.}R^2$ 与 $\text{Adj.}R^2$ 差值小于0.2,表明该模型对体系线性膨胀率有较好的理论预

表 5 基于响应面法的滤失量优化设计方案
Table 5 Optimization design scheme for filtration loss
based on response surface methodology

试验编号	A	B	C	24 h 线性膨胀率/%
1	-1	-1	0	24.78
2	1	-1	0	23.28
3	-1	1	0	21.08
4	1	1	0	21.25
5	-1	0	-1	24.55
6	1	0	-1	22.68
7	-1	0	1	20.92
8	1	0	1	22.62
9	0	-1	-1	25.52
10	0	1	-1	22.62
11	0	-1	1	23.91
12	0	1	1	20.67
13	0	0	0	24.55
14	0	0	0	24.69
15	0	0	0	24.43
16	0	0	0	24.60
17	0	0	0	24.25

测作用。观察各因素、交互因素的 P 值大小可得单因素影响动塑比的显著性大小排序为： $B>C>A$ ，各因素交互作用影响的显著性排序为： $AC>AB>BC$ 。以体系线性膨胀率实际测量值为 X 轴，预测值为 Y 轴，绘制如图 10 所示散点图。

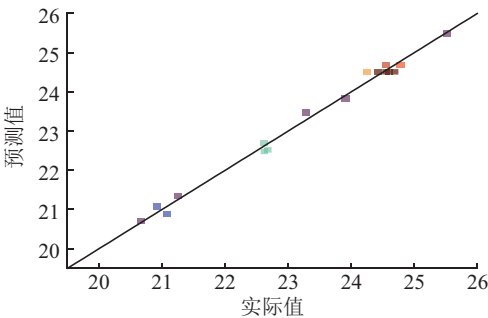


图 10 线性膨胀率模型可靠性评估
Fig.10 Reliability evaluation of the
linear swelling rate model

由图 10 可知，体系线性膨胀率预测值与实际值相关性较高，实际测量值均匀分布于直线及其两侧，离散型较小，说明模型拟合精度高，可靠性好。建立三维曲面响应图如图 11 所示。

图 11(a)表明，固定魔芋胶时，线性膨胀率随 PVA 加量增加而降低；固定 PVA 时，线性膨胀率随魔芋胶加量先增后减，PVA 低水平时趋势更明显；整体上 PVA 取较高水平时线性膨胀率最低。图 11(b)显示，魔芋胶低水平时，线性膨胀率随 HJ 加量增加而下降；魔芋胶高水平时，随 HJ 加量先略增后减；固定 HJ 时，线性膨胀率随魔芋胶加量先增后减，HJ 低水平时尤为明显；总体魔芋胶较低、HJ 较高时线性膨胀率最低。图 11(c)中，固定 HJ 时线性膨胀率

表 6 线性膨胀率模型方差分析
Table 6 ANOVA of linear swelling rate model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.0039	9	0.0004	98.83	<0.0001	显著
A	0.0000	1	0.0000	6.41	0.0391	—
B	0.0018	1	0.0018	399.91	<0.0001	—
C	0.0007	1	0.0007	149.54	<0.0001	—
AB	0.0001	1	0.0001	15.73	0.0054	—
AC	0.0003	1	0.0003	72.52	<0.0001	—
BC	2.609×10^{-6}	1	2.609×10^{-6}	0.5928	0.4665	—
A^2	0.0006	1	0.0006	137.32	<0.0001	—
B^2	0.0002	1	0.0002	48.04	0.0002	—
C^2	0.0002	1	0.0002	36.46	0.0005	—
残差	0.0000	7	4.401×10^{-6}	—	—	—
失拟项	0.0000	3	6.338×10^{-6}	2.15	0.2367	不显著
误差	0.0000	4	2.949×10^{-6}	—	—	—
总回归	0.0039	16	—	—	—	—

$R^2=0.9922, Adj.R^2=0.9822, Pre.R^2=0.9182$

随PVA增加而降低;固定PVA时随HJ增加显著下降。整体PVA与HJ均取较高水平时线性膨胀率最低。

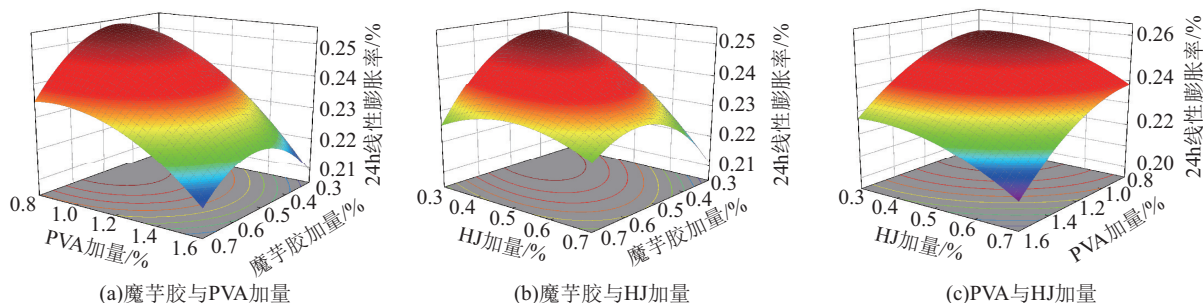


图 11 各影响因素对线性膨胀率的交互影响
Fig.11 Interaction of the influence factors on the linear swelling rate

3.3 植物胶成膜防塌冲洗液最优配方

由前文响应曲面分析,探究了魔芋胶、PVA、HJ加量对体系 API 滤失量及线性膨胀率的交互作用及显著性影响。为得到成膜防塌冲洗液体系的最优配合比,设置了如式 5 所示的优化条件。

$$\begin{cases} \max R_1 \\ \min R_2 \end{cases} \begin{cases} \min A \\ \min B \\ \min C \end{cases} \quad (5)$$

通过三个模型的复合计算,最终确定体系的优化配比:魔芋胶、PVA、HJ 分别为 0.3%、0.887%、0.621%,模型计算 API 滤失量为 12.678 mL,线性膨胀率 23.30%。考虑实际操作的便利性,进一步优化模型的参数取值,得到植物胶多元复合成膜防塌冲洗液体系优化配方 K-PA:0.3% 魔芋胶+0.9% PVA+0.6% HJ+1% AB-1+0.2% 纯碱。

通过重复性试验测试了 K-PA 优化配方的综合性能,其中体系 API 滤失量为 12.40 mL,24 h 线性膨胀率为 23.15%,预测值与试验实际测量值吻合度极高,表明响应面试验设计科学有效,性能测试结果见表 7。

表 7 优化配方性能测试

Table 7 Performance test of the optimized formulation						
优化 配方	AV/ mPa·s	PV/ mPa·s	YP/ Pa	τ_0/μ_p	API 滤 失/mL	24 h 线性 膨胀率/%
K-PA	30.75	22.40	8.53	0.38	12.40	23.15

4 结论

(1)试验初期研究了最具成膜作用代表性的种子类植物胶刺槐豆胶与非种子类植物胶魔芋胶的

流变特性及成膜能力,结果表明魔芋胶具有较优的流变特性和良好的成膜性能,可作为冲洗液成膜基体;在此基础上优选 PVA 复合强化体系成膜性能,流变改性剂 HJ 保证体系剪切稀释性能,防塌抑制剂 AB-1 增强抑制水化能力。

(2)基于响应面试验,得出结论 PVA 加量与 HJ 加量均取较高水平时滤失量与线性膨胀率最低。通过模型的复合计算,得到植物胶成膜防塌冲洗液配方 K-PA:0.3% 魔芋胶+0.9% PVA+0.6% HJ+1% AB-1+0.2% 纯碱。

(3)对 K-PA 冲洗液体系进行性能测试,结果同模型预测值高度吻合,证明响应面试验设计科学有效。该冲洗液体系具有适中黏度满足绳索取心钻进技术,优良的剪切稀释性能,还有突出的成膜降滤失与抑制水化特性实现防塌护壁,针对深厚覆盖层具有良好适配性。

参考文献 (References):

[1] 王润生,郝兴中,胡蕾,等.基于重磁资料在山东齐河——禹城探获矽卡岩型富铁矿:对超深覆盖区找矿的启示[J].中国地质,2023,50(2):331-346.
WANG Runsheng, HAO Xingzhong, HU Lei, et al. Discovery of skarn iron-rich deposit based on gravity and magnetic data in the Qihe-Yucheng, Shandong Province: Enlightenment to prospecting of the super-deep coverage area [J]. Geology in China, 2023, 50(2): 331-346.

[2] 周文纳,禅永康,徐柏虎,等.无人机航磁全张量梯度系统及其补偿方法研究[J].地质论评,2025,71(S1):223-224.
ZHOU Wenna, CHAN Yongkang, XU Baihu, et al. Research on UAV aeromagnetic gradient tensor system and compensation methods [J]. Geological Review, 2025, 71(S1): 223-224.

[3] 汪青松,颜廷杰,汪雅菲.中国覆盖区类型及覆盖区找矿技术方法现状与发展趋势[J].地质学报,2025,99(9):3221-3240.
WANG Qingsong, YAN Tingjie, WANG Yafei. Current status

- and development trends of coverage area types and exploration techniques in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 99(9): 3221-3240.
- [4] 于富安,刘维平,孙健越.双聚防塌冲洗液在覆盖层钻探中的应用[J].*钻探工程*, 2025, 52(2): 59-64.
YU Fuan, LIU Weiping, SUN Jianyue. The application of dual-polymer anti-sloughing flushing fluid for drilling in covering layers[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(2): 59-64.
- [5] 宋玉才.深厚覆盖层坝基帷幕灌浆技术研究及工程应用[D].武汉:武汉大学, 2014.
SONG Yucai. Research on curtain crouting technology of dam foundation and engineering application for deep overburden[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [6] 雷洁力,胥红.绳索取心技术在新疆沙尔湖煤田中的应用[J].*中国煤炭地质*, 2013, 25(4): 72-74.
LEI Jieli, XU Hong. Application of wire-line coring technology in Sharhu Coalfield, Xinjiang[J]. *Coal Geology of China*, 2013, 25(4): 72-74.
- [7] 唐茂勇.水电工程深厚覆盖层中绳索取心勘探技术存在的问题及解决思路[J].*中华建设*, 2025(3): 86-88.
TANG Maoyong. Problems and solutions of wireline coring exploration technology in deep overburden layers of hydropower projects[J]. *China Construction*, 2025(3): 86-88.
- [8] 田志超,于森,翟育峰,等.甘肃张掖三岭湾ZC1井超厚沉积层岩心钻探施工技术[J].*钻探工程*, 2025, 52(1): 54-61.
TIAN Zhichao, YU Sen, ZHAI Yufeng, et al. Core drilling technology for ultra thick sedimentary layers of ZC1 well in Sanlingwan, Zhangye, Gansu[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(1): 54-61.
- [9] 刘俊辉,李晓东.广西苗儿山大厚度水敏性地层冲洗液技术研究及应用[J].*钻探工程*, 2024, 51(5): 154-162.
LIU Junhui, LI Xiaodong. Research and application of drilling fluid technology for thick water-sensitive formations in the Miaoershan area of Guangxi[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(5): 154-162.
- [10] 李定桥.钻井液在深孔绳索取心钻探中的应用研究[D].武汉:中国地质大学(武汉), 2012.
LI Dingqiao. Application research of drilling fluid in deep hole wireline core drilling[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2012.
- [11] 吴景华,谢俊革.永冻地层绳索取心钻井无固相冲洗液的研制[J].*大庆石油地质与开发*, 2012, 31(1): 125-128.
WU Jinghua, XIE Junge. Development of the no-solid-phase rinsing fluids of rope coring drilling in eternal frost formation[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2012, 31(1): 125-128.
- [12] 李浩.水基成膜钻井液体系的研究与应用[D].成都:成都理工大学, 2010.
LI Hao. Research and application of water-based film forming drilling fluid system [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [13] 白小东,蒲晓林.水基钻井液成膜技术研究进展[J].*天然气工业*, 2006, 26(8): 75-77.
BAI Xiaodong, PU Xiaolin. Evolution of membrane forming technology of water-based mud [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(8): 75-77.
- [14] Hadadi M, Kamali F, Mirhosseini J, et al. Experimental investigation of biopolymers influences on rheology and filtration properties of water-based drilling fluids [J]. *Heliyon*, 2024, 10(23): e40780.
- [15] 解程超,王胜,颜鹏,等.含煤地层植物胶冲洗液改性及机理研究[J].*煤田地质与勘探*, 2023, 51(6): 207-214.
XIE Chengchao, WANG Sheng, YAN Peng, et al. Study on modification of plant gum flushing fluid in coal-bearing strata and its mechanism [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(6): 207-214.
- [16] 向浩天,李之军,邱豪,等.无固相冲洗液的防塌性能及其强化实验[J].*中国科技论文*, 2021, 16(12): 1366-1371.
XIANG Haotian, LI Zhijun, QIU Hao, et al. Experimental study on anti-collapse property and strengthening of solid-free washing liquid [J]. *China Sciencepaper*, 2021, 16(12): 1366-1371.
- [17] 田禹,李之军,唐伟旭,等.STJ植物胶冲洗液滤饼强化研究[J].*钻探工程*, 2025, 52(6): 26-33.
TIAN Yu, LI Zhijun, TANG Weixu, et al. Study on filter cake strengthening of STJ plant gum drilling fluid [J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(6): 26-33.
- [18] 顾蓉,穆宝宁,郭康权.魔芋粉-壳聚糖-聚乙烯醇共混胶黏剂的结构表征[J].*农业工程学报*, 2013, 29(7): 277-283.
GU Rong, MU Baoning, GUO Kangquan. Structural characterization of konjac powder-chitosan-PVA blending adhesive [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 277-283.
- [19] LANG Shuang, ZHANG Xin, LIU Guowei, et al. Developing a novel konjac flour/poly-vinyl alcohol composite film: Preparation, properties and characterization [J]. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 2024, 40(2): 191-205.
- [20] Li X, Huang D C, Wang J C, et al. Preparation and mechanism of low-molecular-weight amine-based inhibitor that completely inhibits surface hydration of clay minerals [J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2024, 60(2): 481-490.
- [21] 邱春阳,张亚男,秦涛,等.山古区块井壁稳定钻井液体系优化及应用[J].*精细石油化工*, 2024, 41(4): 5-9.
QIU Chunyang, ZHANG Yanan, QIN Tao, et al. Optimization and application of drilling fluids system for wellbore stability in Shangu Block [J]. *Speciality Petrochemicals*, 2024, 41(4): 5-9.

(编辑 王文)