

川渝地区浅表层破碎带漏垮塌治理技术及应用

肖京男, 初永涛, 丁士东, 周仕明, 张晋凯

(中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102200)

摘要:川渝地区浅表层破碎带溶洞发育,漏垮塌并存导致无法正常钻进,严重影响机械钻速,成为区域拦路虎。针对传统水泥塞密度高、滞留性差与溶洞漏失量大、难以填充的难题,利用泡沫密度低与压缩膨胀特性,开发超低密度泡沫水泥浆快干封堵体系,密度范围为 0.7~1.0 g/cm³,候凝时间短,24 h 封堵强度高于 2 MPa。建立氮气泡沫挤注封堵溶洞工艺方法,不仅提高了溶洞填充效果,而且起到了固结井壁的作用。现场应用 5 口井,封堵成功率为 100%,一次性解决了漏、垮、塌并存的重大技术难题,一开钻完井周期缩短了 72%,保证了后续优快钻进,为浅表层破碎带漏垮塌治理及同平台随钻堵漏提供了技术借鉴。

关键词:喀斯特;漏失;钻井堵漏;泡沫水泥浆

中图分类号:TE256 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)09-0204-06

川渝地区浅表层破碎带溶洞、裂缝发育,恶性漏失、沉砂、掉块卡钻频发,先期采取堵漏、打水泥封堵固壁、划捞、侧钻、移井位等系列措施,但井下情况依旧非常复杂,失返、井下持续掉块、卡钻频发,漏、垮、塌并存导致无法正常钻进,甚至被迫弃井重钻,如 D-1 井,处理时间长达 185 d,严重影响了机械钻速与钻完井周期。前期虽然采取了传统水泥塞等堵漏措施,但水泥浆难以滞留或者受重力作用下沉,导致溶洞封堵失败。针对上述难题,利用泡沫水泥浆密度低与压缩膨胀特性,开发快干泡沫封堵体系,提高了溶洞填充成功率。建立氮气泡沫挤注封堵溶洞工艺方法,不仅提高了溶洞填充效果,而且起到了固结井壁的作用,取得了很好的现场应用效果,一次性解决了漏、垮、塌并存的重大技术难题,大幅缩短了钻完井周期,保证了后续正常钻进。

1 浅表层破碎带漏垮塌治理难点分析

川渝地区浅表层破碎带溶洞、裂缝发育,恶性漏失、沉砂、掉块卡钻频发,主要表现如下:

1)浅表层暗河流沙层,多套溶洞、裂缝发育。主要漏失层位为雷口坡组-嘉陵江组上部 400 m 范围内,采用清水钻进,钻遇多套浅层大溶洞及破碎带,

最长放空 31 m,个别井单井漏失量高达 156 314 m³,导致一开耗时长达 80 d 甚至达到了 100 d。

2)地层漏垮塌并存,井况极其复杂。雷口坡组、嘉陵江组钻遇易漏、易垮及溶洞、破碎带层,钻进过程中发生恶性漏失、井下一一直处于失返状态,时有掉块出现,钻进及通井过程经常发生阻卡情况,井况极其复杂。如图 1 所示,为一开钻进过程中返出井口的雷口坡、嘉陵江组的溶洞、裂缝掉块。井壁垮塌造成了严重的井底卡钻,严重影响一开钻井安全。

3)传统水泥塞等堵漏效果不理想。对于裂缝性漏失,多数采取随钻堵漏或者常规水泥塞^[1-2],如图 2 所示,由于传统水泥塞密度高、流动性强、遇水分散,难以在井筒内滞留,无法在井筒内长时间停留并形成一定强度的水泥塞,如 D-1HF 井,前期进行过 3 次水泥塞堵漏、封固井壁施工,但由于井下漏失严重,均未能有效封堵破碎地层,实现堵漏及封固井壁的目的,导致溶洞封堵失败。

2 破碎带漏垮塌治理体系及工艺技术

针对川渝浅表层漏垮塌现象,为解决溶洞填充、井壁垮塌与水泥塞滞留难题,设计开发了超轻

收稿日期:2022-10-09

作者简介:肖京男(1987—),男,山东鄄城人,中石化石油工程技术研究院有限公司,副研究员,油气井工程博士,研究方向为泡沫水泥浆固井技术;通信作者初永涛(1980—),男,山东烟台人,中石化石油工程技术研究院有限公司,副研究员,油气井工程硕士,研究方向为泡沫水泥浆固井技术;丁士东(1967—),男,江苏金湖人,中石化石油工程技术研究院有限公司,教授级高级工程师,油气井工程博士,研究方向为复杂油气井固井工艺技术;周仕明(1972—),男,安徽和县人,中石化石油工程技术研究院有限公司,教授级高级工程师,油气井工程博士,研究方向为特殊水泥浆固井工艺技术;张晋凯(1980—),男,陕西西安人,中石化石油工程技术研究院有限公司,副研究员,油气井工程博士,研究方向为泡沫水泥浆固井工艺技术。



图1 雷口坡组和嘉陵江组溶洞、裂缝掉块返出井口

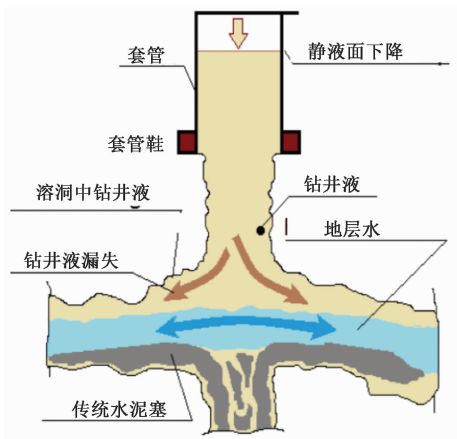


图2 常规水泥塞难以封堵溶洞

质泡沫水泥浆体系,结合泡沫水泥浆固井工艺,建立了破碎带漏垮塌治理工艺方法。

2.1 破碎带封堵超轻质水泥体系

泡沫水泥浆具有密度低、弹塑性、顶替效果好等优势,在国内外页岩气井、北美墨西哥湾、低压易

漏地层中广泛应用^[3-11]。但是泡沫水泥浆体系主要应用于常规固井作业中,针对溶洞封堵及井壁固结的报道较少。

为增强水泥浆在暗河上的滞留性,增大溶洞中漏失阻力,提高溶洞充填成功率,分别选用常规水泥浆体系(密度为 1.86 g/cm³)与快干水泥浆体系(密度为 1.70 g/cm³),加入发泡稳泡剂,设计了密度小于等于 1.0 g/cm³的泡沫水泥浆封堵体系。

1)常规体系配方 1# :800 gJHG+24 gWG+8 g 降失水剂 DZJ-Y+0.85 g 缓凝剂 DZH-2+390 g 水+20 g 发泡稳泡剂 SF-1,密度为 1.86 g/cm³。

2)快干体系配方 1# :700 g 快干水泥+21 g 降失水剂 FSAM+378 g 水+3 g 缓凝剂+20 g 发泡稳泡剂 SF-1,密度为 1.70 g/cm³。

按照《API10426-4 常压泡沫水泥浆制备与评价推荐做法》^[9],对泡沫水泥浆封堵体系进行综合性能评价(表 1)。实验结果表明,泡沫水泥浆具有优异的触变性,进入地层后提高阻力。

图 3 所示为泡沫水泥浆封堵常规体系稠化曲线,初始稠度为 14.2 Bc,稠化时间为 269 min,尽可能让泡沫水泥浆填充溶洞,逐步增加流动阻力。

图 4 所示为泡沫水泥浆封堵快干体系稠化曲线,初始稠度为 17.6 Bc,稠化时间仅为 44 min。利

表 1 封堵水泥浆综合性能

配方序号	剪切应力读数 (600/300/200/100/6/3)	API 失水, mL/30 min	自由液 体积/ mL	流动度/ cm
	35 ℃、20 min	35 ℃、6.9 MPa		
1	187/117/89/59/29/25	—	—	—
2	75/46/35/25/12/11	44	0	22

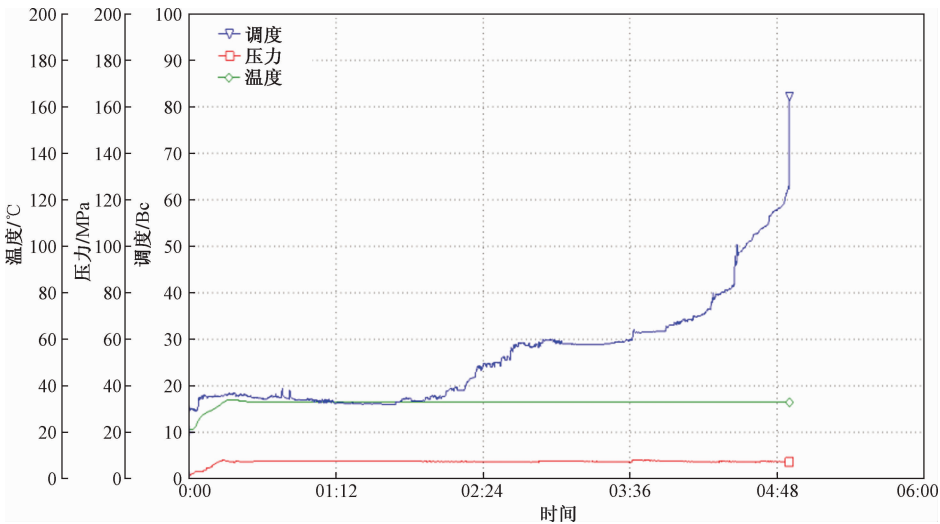


图3 泡沫水泥浆封堵常规体系稠化曲线(35 ℃、15 min、8 MPa)

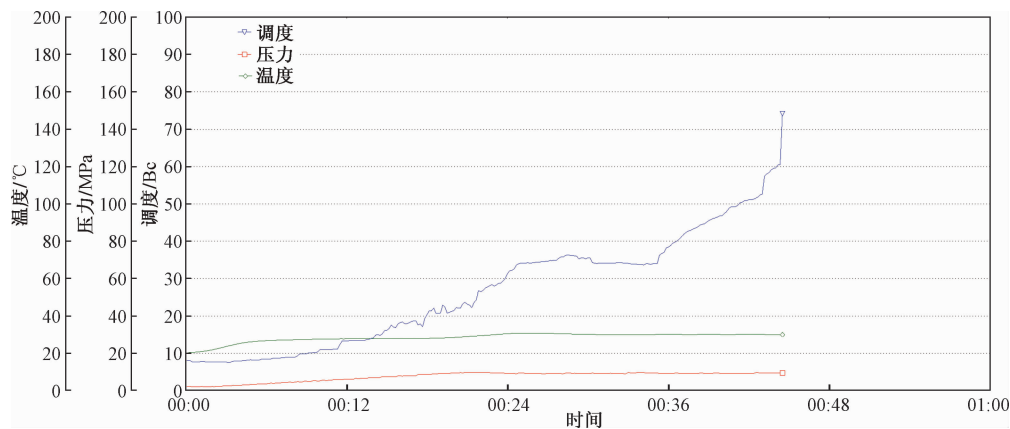


图 4 泡沫水泥浆封堵快干体系稠化曲线(30 °C、20 min、10 MPa)

用短候凝体系,可以保证将在泡沫水泥浆滞留在井壁周围与井筒内,形成水泥塞。

根据 GB 19139—2003,对泡沫水泥石进行抗压强度测试,见表 2,常规水泥浆体系制备出密度 1.0 g/cm³ 泡沫水泥石块,35 °C、72 h 水泥石强度为 5.88 MPa。泡沫水泥浆封堵快干体系密度在 0.7~1.0 g/cm³,且随着密度增加,抗压强度增大,24 h 抗压强度均大于 2 MPa,可以满足浅表层封堵要求。

表 2 不同泡沫封堵体系抗压强度

配方序号	泡沫封堵体系 密度/(g·cm ⁻³)	泡沫水泥石抗压强度/MPa		
		35 °C、24 h	35 °C、48 h	35 °C、72 h
1	1.86	—	—	18.3
	1.00	—	—	5.88
2	1.70	9.5/8.2	11.7/9.6	—
	1.00	3.54	4.16	—
	0.90	3.05	3.45	—
	0.80	2.58	3.01	—
	0.70	2.18	2.43	—

2.2 破碎带漏垮塌治理工艺方法

为实现泡沫水泥浆一次性填充溶洞,同时起到固结井壁的作用,结合泡沫水泥浆固井工艺,建立破碎带漏垮塌治理工艺方法。

2.2.1 氮气泡沫水泥浆固井工艺方法

除水泥泵车等常规固井设备外,泡沫水泥浆固井需要特殊的泡沫水泥浆固井设备与液氮设备,如图 5 所示。施工前,将水泥泵车与泡沫水泥浆固井设备入口连接,泵送设计密度与排量的水泥浆;同时,液氮储罐经低压软管与泡沫固井设备的液氮入口连接,泵送低温液氮,经高压汽化后与发泡剂、稳泡剂、水泥浆混合,在高压密闭环境中产生泡沫水泥浆,经钻杆泵送至井中,达到设计层位。

2.2.2 破碎带漏垮塌治理工艺方法

利用井筒挤注工艺,依次泵入泡沫隔离液、超低密度泡沫水泥浆、快干泡沫水泥浆体系,可以在地层中形成泡沫隔离屏障,大幅增加地层中流动阻力,减少工作液漏失量。当泡沫工作液进入漏失地

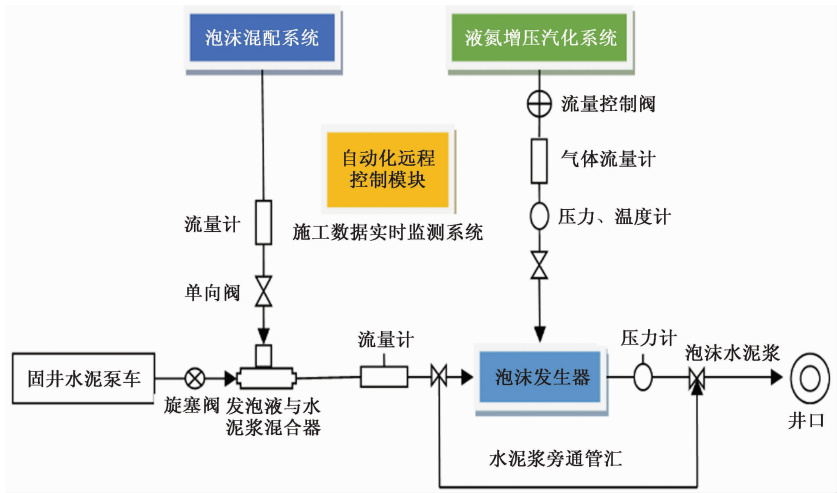


图 5 泡沫水泥浆固井工艺流程

层,高压泡沫发生膨胀,可以完全充满溶洞,随后快速凝固,起到填充溶洞与加固井壁的作用,如图 6 所示。

破碎带漏垮塌治理流程如下:

1)密度设计。首先根据井筒内液面位置,计算判断地层漏失当量密度,据井下实际液面位置反推地层承压当量,据此设计泡沫水泥浆封堵体系密度,保证部分泡沫水泥浆可以滞留在井筒内不发生漏失。

2)井底挤注。将光钻杆下入漏失位置,泵送密度 $0.9\sim1.0\text{ g/cm}^3$ 泡沫水泥浆,用以顶替井筒内钻井液及清洗井壁。随着水泥浆进入溶洞,压力降低,泡沫将发生急剧膨胀,水泥浆将进一步填充溶洞,增加流动阻力,为后续水泥浆滞留提供有利条件。

3)井口挤注。泵送结束后,起出钻杆,关闭环空 BOP,泵送密度 $0.7\sim0.9\text{ g/cm}^3$ 泡沫水泥浆快干封堵体系,及时填充井眼及近井地带漏失地层,保证注浆过程中稠化并滞留在井筒及漏失地层内,形成具有一定强度的水泥塞,起到固结井壁的作用。

4)候凝钻塞。待泡沫水泥浆候凝 24 h 结束后,利用钻头进行扫塞,利用清水进行验漏成功后进行继续钻进。

该治理工艺一次作业成功率高,挤注量大,不仅适用于单井漏垮塌治理,也适用于川渝地区同平台浅表层的治理,可以大幅缩短一开钻完井时间,提高钻井时效,保证后续安全钻进。

3 现场应用情况及效果

以川渝地区 D 区块为例,如表 3 所示,该地区雷口坡组-嘉陵江组漏失严重,漏失速度高达 $80\text{ m}^3/\text{h}$,虽然采取水泥塞与双液法固井等堵漏措施,但效果甚微,在抢钻过程中漏失性失返,频繁遇卡,憋停钻具,导致无法正常钻进。

采用低密度泡沫封堵体系与挤注封堵溶洞工艺方法,在 D-1HF 等 5 口井中开展了现场治理试验,以 D1HF 为例,依次向井中泵入泡沫隔离液、泡沫水泥浆,替浆结束后起钻至井口,关闭环形空间,

表 3 川渝地区 D 区块浅表层复杂情况

井号	井深/m	复杂情况
D-1HF	845	强钻至一开中完井深 845 m,时有掉块出现,钻进及通井过程经常发生阻卡情况,历经 3 次常规水泥塞堵漏无效,井下垮塌严重,只能通井至井深 375 m
D-2HF	500	钻进过程中 450~493 m 频繁遇卡,憋停钻具,478~493 m 反复划眼入,下光钻杆注双液固井,注水泥 $36\text{ m}^3+30\%$ 堵漏浆 10 m^3 ,下钻到底探沉砂 13 m
D-3HF	716	开钻钻进至 453 m 时发生漏失,漏速 $10\text{ m}^3/\text{h}$,钻进至 580 m 时漏速增加至 $80\text{ m}^3/\text{h}$,钻进至 611 m 时失返,井底有沉砂,探液位 208 m,光钻杆下至 707 m
D-4HF	500	钻进到 412 m 失返,钻进过程中 415~471 m 频繁遇卡,憋停钻具,415~456 m 反复划眼
D-5HF	605	钻进过程中 573 m 失返,钻进至 575 m 间歇性返浆,钻进至 605 m 再次失返且扭矩异常

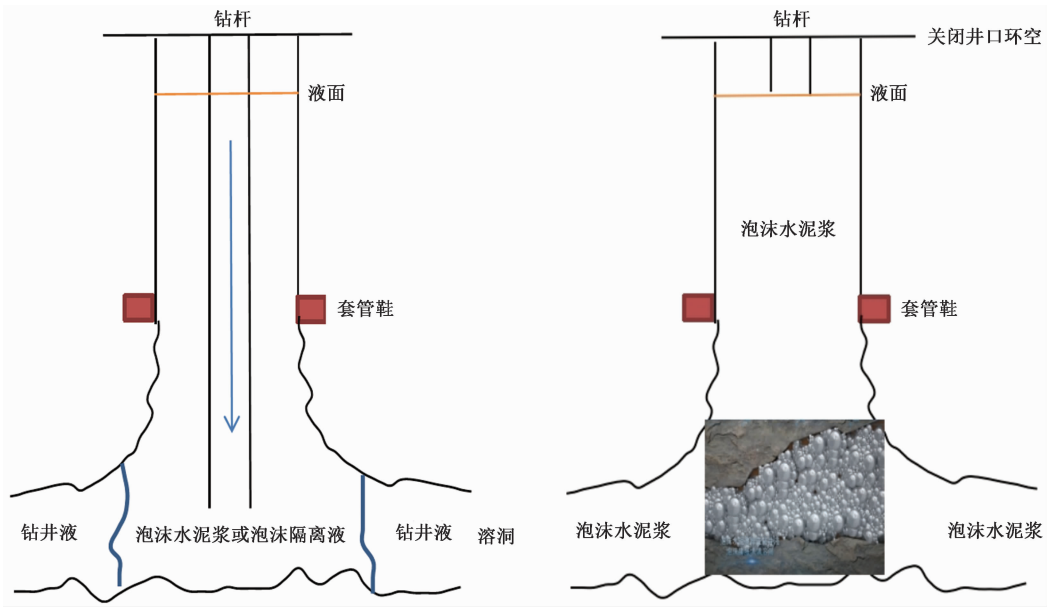


图 6 泡沫封堵体系井底挤注与井口挤注两道工艺

由井口挤注快干泡沫封堵体系,现场施工参数见表 4。

泡沫水泥浆封堵体系比传统水泥塞更具优势,滞留性强,如表 5 所示,在挤注泡沫封堵体系结束后,井口压力上涨,停泵后没有发生压力下降与地层漏失的现象,一次性封堵作业成功,在钻进过程中返出水泥与地层砂粒胶结物,起到了封堵溶洞型与固结井壁的作用。D-1HF 井扫塞返出的水泥与砂粒的胶结物如图 7 所示。

表 4 泡沫封堵挤注工艺现场参数

序号	施工内容	工作介质	密度/ (g·cm ⁻³)	用量/ m ³	排量/ (m ³ ·min)	泵压/ MPa
1	下钻	钻具下深:350 m				
2	试压	配浆水	1.02			15
3	注前置液	前置液	1.02 (0.5)	6	1.0	6
4	注水泥浆	水泥浆	1.91 (0.7)	32	1.0	7
5	替浆	泥浆	1.02	1.5	1	5
6	起钻至井口候凝,候凝 4 h 后进行下步作业,候凝期间禁止提前探塞					
7	注水泥浆	水泥浆	1.91 (0.8)	39	0.6	5
8	替浆	泥浆	1.02	2	0.5	4

表 5 泡沫封堵体系应用效果

井号	泡沫封堵体系 密度/(g·cm ⁻³)	封堵治理效果
D-1HF	0.7	停泵后稳压 0.8 MPa,封堵成功
D-2HF	0.9	停泵后稳压 1 MPa,封堵成功
D-3HF	1.0	停泵后稳压 0.56 MPa,封堵成功
D-4HF	0.9	停泵后稳压 2 MPa,封堵成功
D-5HF	1.0	停泵后稳压 0.4 MPa,封堵成功



图 7 D-1HF 井扫塞返出的水泥与砂粒的胶结物

该技术一次性解决了浅表层连续 40 余天由于

垮塌、掉块无法钻进的重大技术难题,大幅缩短了钻井周期,累计节约钻井成本 1 500 万元以上,经济效益显著。

4 结论与建议

1)采用超低密度泡沫快干封堵体系与氮气泡沫挤注封堵溶洞工艺方法,一次性解决了浅表层连续多天由于漏失、垮塌、掉块无法钻进的重大技术难题,保证了后续钻完井的安全作业。

2)泡沫水泥浆封堵体系比传统水泥塞更具优势,具有密度低、触变性强、膨胀填充性和滞留性强的特点,既能提高溶洞填充成功率,又起到固结井壁的作用,更适合于溶洞型漏失治理。

3)该技术能够大幅缩短钻井周期,节约钻完井成本,经济效益显著,值得在川渝浅表层破碎带治理及随钻堵漏应用中推广。

参考文献

[1] 李伟,白英睿,李雨桐. 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.

[2] 彭博一,于培志. 破碎带地层钻探化学凝胶护壁堵漏技术的研究与应用[J]. 钻探工程,2022,49(1):64-71.

[3] 匡立新,刘奎,丁士东. 机械充氮泡沫水泥浆固井技术在页岩气井的应用[J]. 石油机械,2022,50(7):26-33.

[4] 匡立新,陶谦. 渝东地区常压页岩气水平井充氮泡沫水泥浆固井技术[J]. 石油钻探技术,2022,50(3):39-45.

[5] 肖京男,刘建,桑来玉. 充气泡沫水泥浆固井技术在焦页 9 井的应用[J]. 断块油田,2016,23(6):835-837.

[6] 姜政华,陶谦,匡立新. 泡沫水泥浆固井技术在页岩气生产套管固井中应用研究[J]. 内蒙古石油化工,2019,45(2):76-80.

[7] 王建云,张红卫,邹书强. 顺北油气田低压易漏层泡沫水泥浆固井技术[J]. 石油钻探技术,2022,50(4):25-30.

[8] DAN A O,LENDE G,REHMAN K,et al. Use of foam cement to prevent shallow water flow on three wells in norwegian waters[C]//International Petroleum Technology Conference, Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia; Society of Petroleum Engineers,2020;IPTC-19747-MS.

[9] AHMADY A,TURTON S,LEWIS S,et al. Improved channeling and gas migration issues using foam cement: case history, Montney Formation[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA; Society of Petroleum Engineers,2020;SPE-199614-MS.

[10] GUILLOT D J,BASTARD E L. Learnings from foamed cement job simulations[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA; Society of Petroleum Engineers,2012;OTC-23666-MS.

[11] KJØSTVEDT T. New methodology for foam cement

mixing to better reflect onsite mixing method[D]. Stavanger: University of Stavanger, 2011.

[12] 常压下泡沫水泥浆的制备及试验方法: GB/T 39533—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

Application of Cement Slurry to Solve Mud Loss for Shallow Fracture Zone in Sichuan and Chongqing

XIAO Jingnan, CHU Yongtao, DING Shidong, ZHOU Shiming, ZHANG Jinkai
(SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineer Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Karst caves in the shallow fracture zone in Sichuan and Chongqing are developed. The problem of leakage and collapse is widespread, which seriously affects the ROP. In view of the problems that the traditional cement plug is difficult to stay and the karst cave is difficult to plug, an ultra low density foam cement slurry quick drying plugging system has been developed, with a density range of 0.7~1.0 g/cm³, the thickening time is adjustable, and the 24 h plugging strength is higher than 2 MPa. The technology of nitrogen foam plugging has been successfully applied in five wells, and the plugging success rate was 100%. It not only improves the filling effect of Karst cave, but also consolidates the well wall. The major technical problems of leakage, collapse and collapse were solved at one time. The surface drilling period was shortened by 72%, ensuring the follow-up excellent and fast drilling, and providing a technical reference for the treatment of leakage and collapse in the shallow fracture zone.

Keywords: Karst; mud loss; drilling plugging; foamed cement slurry