

分步替水灌浆法在科学钻探西藏钻孔坍塌地层中的应用

胡郁乐¹, 张晓西¹, 陈师逊², 仲崇龙², 张恒春¹

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074; 2. 山东省烟台第三地质大队, 山东烟台 263005)

[摘 要] 地层压力异常是指岩石孔隙流体的压力异常, 存在异常压力的井段容易井塌。西藏罗布莎科学钻探孔处于雅江缝合带, 异常压力层段多, 地层复杂, 深孔钻进过程中经常出现垮孔、钻孔失稳现象。采用常规孔内灌浆进行护壁封孔, 成功率极低, 主要表现为封孔水泥浆由于异常压力原因产生回顶现象而偏离目标孔段, 造成灌浆失败。分步替水灌浆法则利用了孔内异常压力流体的平衡原理, 把替水量分两步压入注浆管, 防止了水泥浆液偏离目标孔段, 灌浆效果好, 有效解决了异常压力地层中的固孔护壁问题。论文研究总结了分步替水灌浆法的原理和工艺方法, 并结合实际工程详细剖析了灌浆压力异常的原因、分步替水控制过程, 提供了一种异常压力地层灌浆新的技术方法。

[关键词] 科学钻探 分步替水灌浆法 水灰比 异常压力 坍塌地层 西藏

[中图分类号] P641.7 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2011)03-469-04

Hu Yu-le, Zhang Xiao-xi, Chen Shi-xun, Zhong Chong-long, Zhang Heng-chun. Application of the grouting cement method with two-step filling water to collapsed formation of the scientific drilling borehole in Tibet [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 469-472.

0 引言

西藏罗布莎铬铁矿床是我国目前已经发现的最大的铬铁矿床, 是进一步开展深部找矿和解决我国铬铁矿资源匮乏的首选靶区, 也是研究铬铁矿成因的关键地区。西藏罗布莎铬铁矿 SZK01 钻孔旨在钻探一口 2000 ~ 2500m 预导孔, 为地学科学服务, 地质期望值高, 从属于《大陆科学钻探选址与科学钻探实验》重大科技项目。

本钻孔于 2009 年 6 月开钻, 由山东地矿第三地质大队来实施。经过技术、经济分析, 选择国产 HXY-8 型钻机, 钻深能力 3000m, 钻塔选用 SGZ23m 管子塔, 承重载荷 55t, 采用绳索取心钻进工艺。

1 问题的提出

由于西藏罗布莎矿区钻遇地层为超基性岩体, 该区域的最大钻探深度记录仅为 800m。钻孔位于雅江缝合带, 岩石蚀变(蛇纹石化)严重, 且范围(深度)大, 异常压力层位多。软酥和硬脆地层无规则分布,

漏失和垮塌时有发生。因此, 钻遇地层非常复杂。

该钻孔结构为: 孔口管 $\Phi 146\text{mm}$, 下入深度 24m; 技术套管 $\Phi 127\text{mm}$, 下入深度 32m; $\Phi 108\text{mm}$ 套管, 下入深度 152m; $\Phi 89\text{mm}$ 套管, 下入深度 760m; 下部用 S75 钻具钻至终孔。多级套管均是由于钻孔发生严重垮塌所采取的措施。钻孔设计终孔直径为 75mm, 下入 760m 深 $\Phi 89\text{mm}$ 套管后, 下部地层已经不具备套管隔离复杂地层的条件, 所以遇到严重垮塌、漏失地层, 水泥浆灌注法成为常规的护壁堵漏方法。在 SZK01 钻孔过程中, 1165m 以深发生钻孔垮塌, 无法继续钻进, 事故现象为整钻整泵。多次采用水泥灌浆时, 发现即使严格遵守灌浆工艺, 替水量计算准确的情况下, 封孔水泥也不能达到预计的下部孔段, 而是回顶到上部孔段, 也即是发生水泥浆向上冒浆回顶现象, 导致灌浆失败。如图 1 所示。在此条件下, 深孔小口径孔内灌浆法适应性需要探讨和研究。

2 机理分析和策略研究

深孔小口径水泥灌浆技术是一项实践性很强的

[收稿日期] 2010-10-11; [修订日期] 2011-03-06; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 大陆科学钻探选址与钻探实验综合研究项目(编号: 201011064)。

[第一作者] 胡郁乐(1970 年-), 男, 博士后, 中国地质大学(武汉)副教授, 从事地质工程专业教学和科研工作。E-mail: yllhu@cug.edu.cn。

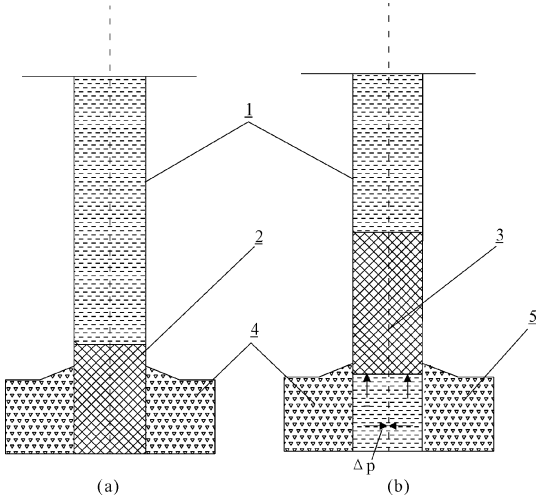


图1 正常和异常压力地层灌浆后的效果

Fig.1 Effect of normal and abnormal pressure formation after grouting

a-正常压力地层;b-异常压力地层;1-灌浆后的替水;2-正常压力地层水泥浆处于目标段;3-异常压力地层被灌水泥浆被回顶;4-异常压力地层段;5-异常压力增量
a-normal pressure formation; b-abnormal pressure formation; 1-filling water after grouting; 2-normal grouting; 3-abnormal grouting; 4-abnormal pressure hole section; 5-abnormal pressure increment

技术,但只要工艺正确,发生以上事故的例子并不多见。分析认为,发生水泥浆向上冒浆回顶现象,还是由于孔内流体的压力平衡出现了问题。研究发现,停泵之后,孔口滞后溢流现象明显,说明孔内存在异常压力流体,尽管泵送停止,孔内还继续往外返流。在钻进过程中还发现,泵压也是一个缓慢上升,最后达到一个稳定的异常高压过程,分析研究认为孔内类似一个储压罐。在钻进过程中,泥浆泵向地层补水补压,停泵后,压力释放也需要一定时间,以达到最终的平衡。一般地,在水泥浆灌注过程中,水泥浆必须驱替钻杆内的泥浆,使之从孔口返回地表。在钻进过程中,泥浆先期进入地层空间形成压力容器,而不是全部返流至地表,说明孔内流体形成了异常压力。正常情况下,当灌注完一定体积的水泥浆后,将继续进行替水作业,替水把部分水泥浆排出灌浆管,计算好的替水量完全注入后应达到孔内的液体平衡。此时,在孔内平衡条件下提钻,水泥浆不会和泥浆混合,凝固时间和强度不会受到影响。但由于 SZK01 钻孔 1165m 孔段地层压力异常,这种平衡被破坏,被灌入的水泥浆被地层储备的相对高压泥浆流体混合稀释,并通过钻孔通道向上涌动,水泥浆被携带和顶回至钻孔的上部孔段,无法使水泥浆停驻在目标孔段,无法凝固并形成相应的强度,致使灌注失败。

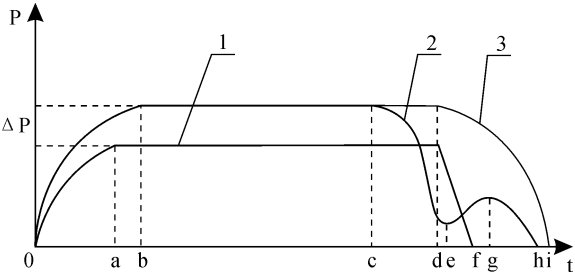


图2 不同地层和工艺的灌浆压力随时间变化曲线

Fig. 2 Curves showing variation of pressure with time in different strata by varied grouting technology

1-正常压力地层的灌浆压力曲线;2-分步替水灌浆法的压力变化曲线;3-一次性替水灌浆的压力变化曲线;a,b-稳定压力形成时间;c,d-停泵对应时间;e-分步替水第二次开泵时间;f,h,i-泵压归零时间;g-分步替水二次压力建立时间
1- pressure curve of normal formation 2- pressure curve of grouting cement method with two-step filling water 3- pressure curve of one-step filling water; a,b-forming time of steady pressure; c, d-time of stopping pump; e- second pumping time of two-step filling water; f, h, i-time of zero pressure; g- forming time of the second pressure with two-step filling water

根据以上分析,要解决水泥浆冒顶上窜的问题,必须解决地层储压流体异常压力的释放问题,在异常压力释放过程中,被灌水泥浆应停留在灌浆管内,被保护起来,待压力释放至孔口不返流后,再排放出水泥浆,此时孔内能满足相应的压力平衡,水泥浆液才能保障停驻在设计孔段。也即是说,替水量的注入分两步来实现,首先的注水应顶替水泥浆至灌浆管的前端,但水泥浆的前锋尚未抵达灌浆管的出口,停止压入替水,把水泥浆保护在灌浆管内。同时,使灌浆管与钻孔环隙间的异常流体压力尽量通过孔口释放,待达到平衡后,把剩余的替水全部压入灌浆管,使水泥浆释放出灌浆管,最后再提升灌浆管,完成水泥浆的灌注。此方法可称为二次分步替水法。这种孔内灌浆方法未见有关报道。如图2为正常压力地层、异常压力地层一次替水灌浆和分步替水灌浆压力(泵压)随时间的变化曲线图。其中曲线1为正常压力地层的灌浆压力变化情况;曲线2为异常压力地层采用分步替水灌浆法的压力变化曲线;曲线3为异常压力地层按一次性替水灌浆的压力变化曲线。从图2可以看出:正常压力地层和异常压力地层在灌浆压力上有 ΔP 的差异,异常压力地层灌浆时建立的压力要高,并且形成压力的时间延长, $b>a$ 。曲线1显示正常压力地层灌浆结束停泵后,泵压很快消退为0。曲线2和曲线3为异常压力地层开泵和停泵时间段的压力变化情况。建立压力的过程一致,但分步替水工艺需要提前停泵,把水泥浆

液保护起来,待压力基本消散结束再开泵,置换剩余的浆液。而一次性替水压力停泵后,压力释放时间比分步替水在时间域上有所延长。

3 灌浆计算与工艺设计

在当钻井遇到卵砾石层、破碎带、大裂隙、溶洞、厚砂层,用泥浆难以护壁堵漏时,一般采用孔内灌注法,利用水泥等固结材料进行护壁堵漏。此时,首先需要停止钻进,提出钻具,向井内灌注水泥浆材,待水泥浆材渗挤、充填到地层空隙中并凝固复杂层段后,重新下入钻具扫孔钻进成孔。

深孔灌注水泥浆技术要求较高,如工艺方法不当很容易出现灌浆中断,甚至把灌浆管固化在钻孔内导致灌注事故。因此,在设计时,考虑深孔条件,水泥浆流动性应能满足长时间流动性的要求。经计算 1165m 以深钻孔,仅替水时间就超过 60min(52L/min 泵量、S75 灌浆管),因此水泥浆流动度应满足长时间灌注要求。一般来说,深孔灌浆通常采用钻杆作为灌浆管,SKZ01 钻孔采用 S75 绳索钻杆作为灌浆管。水灰比也不宜过大,否则,侯凝时间过长,强度过低,因此,设计水灰比为 0.55。为保证流动度,加入减水剂,在水灰比一定条件下能极大提高水泥浆的流动性,此孔采用西藏铁路专用减水剂,减水率达 15% 以上。减水剂的加入采用后掺法。搅拌好的水泥浆在灌注前应注意筛网过滤处理,以保障灌浆泵正常工作。水泥浆全部完成注入后,马上进入替水程序,采用分步替水法完成替水。即把计算好的替水量分两次注入,第一次注入完成后,停泵,并回转灌浆钻杆,使地层中异常高的压力泥浆通过孔口返流,实现泄压;待泵压降低至 0 后,再注入剩下的替水,把水泥浆顶替出灌浆管;嗣后,缓慢回转并提升注浆钻杆完成灌浆过程。侯凝一段时间后透孔,实现钻孔的护壁防塌。灌注水泥浆的有关计算如下:

(1) 水泥浆配比计算:

设计水灰比 0.55(考虑孔深),水泥用量 8 袋,计 400kg,此时,所需水量为:

$0.55 \times 400 = 220(L)$ 。设水泥密度为 $3g/cm^3$,则水泥浆体积为 353L。

(2) 灌浆段长度计算:

设钻孔直径为 77mm,则每米钻孔体积为:

$$V_{孔} = \frac{\pi}{4} D_{孔}^2 \cdot 1m = 0.785 \times 77^2 \times 10^{-6} \times 1 = 4.654L$$

因此,8 袋水泥灌注长度: $h = \frac{V}{V_{孔}} = \frac{353}{4.654} = 75.8m$

(3) 钻杆中空浆液计算:

钻杆内径为 61mm,钻杆中空每米体积:

$$q = \frac{\pi}{4} D_{内}^2 \cdot 1m = 0.785 \times 61^2 \times 10^{-6} \times 1 = 2.92L$$

水泥浆在钻杆内所占的长度: $L = \frac{V}{q} = \frac{353}{2.92} = 121m$

(4) 替水量的计算:

钻孔灌注深度为 1170m,根据替水量计算公式,其替水量计算如下:

$$Q = (H - h_0 - h)q + Q_1$$

其中, Q 为替水量, L ; H 为地面以下灌浆管长度, m ; h_0 为孔内静水位距孔口距离, m ,该孔目前返水,故认为静水位为 0; h 灌浆段总长度, m ; Q_1 为地面管线容积, L ,由于吸水管长而粗,此处以 100L 计算; q 为每米灌浆管容积, L/m 。

经计算替水量为 3295L,现场泵量为 52L/min,则一次性替水所需总时间为 63.4min。

(5) 分步替水量的确定:

当替水量为

$(1170 - 121) \times 2.92 + 100L = 3163L$ 时,水泥浆前锋到达孔底。即第一步替水量为 3163L。理论上,当时间为 $t = \frac{3163L}{52L/min} = 60.8min$ 时,停止注入替水,第一次替水过程完成;待孔内泄压完成后,再把剩余替水量 $3295L - 3163L = 132L$ 注入灌浆管中,完成第二次替水。

(6) 灌浆过程压力变化和灌浆效果

在施工试验现场,实施一次替水灌浆工艺和分步替水灌浆,压力建立时间均为 6min,建立压力为 8MPa。一次替水灌浆工艺停泵后压力消散时间为 19min;而分步替水第一次停泵 7min 后,泵压减为 1MPa,第二次停泵后 4min 压力消散。3 次一次替水灌浆工艺均失败,而分步替水则一次取得成功。

4 效果评价与结论

采用分步替水法灌浆能较好解决压力平衡和释放问题,多次应用试验均取得了理想的固孔护壁效果。

随着深部钻探计划的逐步推进,深孔条件下的异常地层压力造成的钻孔失稳问题将凸显。采用常规水泥灌浆工艺往往因为孔内压力异常,造成水泥浆液沿钻孔回顶冒浆现象,水泥浆被稀释的同时,达不到预定的灌浆孔段,使得固孔位置发生偏离,导致灌浆失败。采用分步替水法是根据压力平衡原理,把替水量分两次注入,第一次注入部分替水量,并把水泥浆保存在灌浆管内部,暂时停泵,使地层中异常高压流体通过孔口返流,实现泄压;之后,再注入剩下的替水量,把水泥浆顶替出灌浆管。经过多轮的试验研究表明:分步替水灌浆法,只要计算准确,严

格遵守灌浆工艺,在流体异常压力地层均能适用并能取得理想灌浆效果。

[References]

- Cheng Jian-ji. 1998. Characteristics of mollisol and its consolidation by chemical grouting technique in the zhujiang delta[J]. Geology and Prospecting, (06):49-52 (in Chinese with English abstract)
- Chang Xue-Fang, Bo Yu-Cheng, Xu Jian. 2006. Numerical Simulation for the Flux Coefficient of Gas-guide Hole Using CF Design[J]. Mechanical Engineering & Automation, (6):50-51 (in Chinese with English abstract)
- Du Jun-xia, Xiao Jun-wen. 1993. Air DTH hammer drilling technology in Mali Wells construction[J]. Exploration Engineering, (04):37-38 (in Chinese with English abstract)
- Eaton A M, Smoot L D, Hill S C, Eatough C N. 1999. Components formulations solutions evaluation and application of comprehensive combustion models[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 25:387-436
- Hao Shu-qing. 2007. Research on Simulation Computation and Experiment of Liquid Jet Hammer[D]. Changchun: Jinlin University:18-22 (in Chinese with English abstract)
- Hu Yu-le. 2008. 1000 cases of diamond and diamond Tools Knowledge[M]. Changsha: Central South University Press:120-127 (in Chinese)
- Jin Xin-guang, Guo Lian-hong, Cui Yu-zhen. 2003. Application and analysis of air DTH hammer drilling technology in bedrock[J]. West-China Explor. tion Engineering, 89(10):105-106 (in Chinese)
- Liu Guang-zhi, Tang Feng-lin. 1992. Special drilling technology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House:28-29 (in Chinese)
- Lu Yu-bei. 2007. Handbook of geothermal water resources exploration [M]. Zhengzhou: The Yellow River water conservancy Publishing House:138-141 (in Chinese)
- P. Desevaux, J. P. Prenel, G. Hostache. 1994. An optical analysis of an induced flow ejector using light polarization properties[J]. Experiments in Fluids, (3-4):165-170
- Shi Yong-guan, 2004. The technology problem of core orientation[J], Geology and Prospecting (6):92-95. (in Chinese)
- Tom Brook. , Micro-Bubbles. 1998. New aphron drill- in fluid technique reduces formation damage in horizontal wells [A]. SPE 39589
- Tang Feng-lin, A. F. Jia li-ning, Duan Long-chen. Core drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House:33-44 (in Chinese)
- Wang Da. 2007. Drilling technical papers anthology of Chinese continental scientific drilling project[M]. Beijing: Geological Publishing House: 415-425 (in Chinese)
- Xu Liu-wan. 2004. Development of drilling technology and equipment in hydro water well[J]. Geology and Prospecting, (4): 86-88 (in Chinese)
- Yao Er-cang, Zheng Xiu-hua, Yang Ai-jun. 2008. Application of recyclable foam mud in leaching in-situ sandstone style uranium deposits [J]. Geology and Prospecting (5):87-89 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Chang-fu. 2005. Application prospect of air foam drilling techniques in geological core drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), (8):45-49 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Ji-tian, Xie Wei. 2002. Application of air DTH Hammer drilling in groundwater exploration in east of Tu-Ao zinc ore Mongolian [J]. Exploration Engineering, (04):38 (in Chinese)
- Zhu Yong-yi, Wang Wen-shi. 2008. Coring Drilling technology in Well -1 (main shaft) of Songliao scientific drilling[J]. Prospecting works (9):1-5 (in Chinese)

[附中文参考文献]

- 程鉴基. 1998. 珠江三角洲软土特性及化学灌浆加固初探[J]. 地质与勘探, (06):49-52
- 常学芳, 薄玉成, 徐健. 2006. 基于 CFD 设计的导气孔流量系数的数值仿真[J]. 机械工程与自动化, (6):50-51
- 杜俊霞, 肖俊文. 1993. 鄯用空气潜孔锤钻进技术施工马里水井[J]. 探矿工程, (04):37-38
- 郝树青. 2007. 贯通式浅孔锤钻循环取心(取样)钻进孔底流场模拟与实验研究[D]. 长春: 吉林大学:18-22
- 胡郁乐. 2008. 金刚石与金刚石工具知识问答 1000 例[M]. 长沙: 中南大学出版社:120-127
- 金鑫光, 郭连红, 崔玉珍. 2003. 空气潜孔锤钻进工艺在基岩钻进中的应用分析[J]. 西部探矿工程, 89(10):105-106
- 刘广志, 汤凤林. 1992. 特种钻探工艺学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社:28-29
- 卢予北. 2008. 钻探技术研究与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社:56-62
- 石永泉. 2004. 岩心定向技术问题[J]. 地质与勘探, (6):92-95
- 汤凤林, A. F. 加里宁, 段隆臣. 2009. 岩心钻探学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社:33-44
- 王达. 2007. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文选集[M]. 北京: 地质出版社:415-425
- 许刘万. 2004. 水文水井钻探工艺及设备发展情况[J]. 地质与勘探, (4):86-88
- 要二仓, 郑秀华, 杨爱军. 2008. 可循环微泡沫泥浆在地浸砂岩铀矿中的应用[J]. 地质与勘探, (5):87-89
- 赵长福. 2005. 空气泡沫钻进技术在地质岩心钻探中的应用前景[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), (8):45-49
- 郑继天, 解伟. 2002. 空气潜孔锤钻进在蒙古国图敖锌矿东部水源地勘探中的应用[J]. 探矿工程, (04):38
- 朱永宜, 王稳石. 2008. 松科一井(主井)取心钻进工艺[J]. 探矿工程, (9):1-5

Application of the Grouting Cement Method with Two-Step Filling Water to Collapsed Formation of the Scientific Drilling Borehole in Tibet

HU Yu-le¹, ZHANG Xiao-xi¹, CHEN Shi-xun², ZHONG Chong-long², ZHANG Heng-chun¹

(1. China university of geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074;

2. Third Geological Brigade of Yantai in Shandong Province, Yantai, Shandong 264005)

Abstract: The scientific drilling hole at Luobusha in Tibet lies in very complicated strata, where the conventional cement-grouting method for protecting the hole wall cannot work well. There was a kind of phenomena that cement grouted deviated from the target hole section and back to the top, because of the abnormal pressure and collapsed formation. Application of the two-step replacing water method has solved this problem, which uses the pressure balance principle in the hole, preventing cement slurry deviated from the objective section. This paper presents the principle and technique of the grouting cement method with two-step replacing water. In combination with the actual project, it has explained the cause of abnormal grouting pressure and the process of step by step for water control, providing a new technology for grouting strata with abnormal pressure.

Key words: scientific drilling, grouting cement method with two-step filling water, abnormal pressure, collapsed formation, Tibet