

福堂水电站震后厂房边坡锚索加固及应力监测与分析

李斌, 黄芬

(中国水利水电第十工程局有限公司基础工程分局, 四川 都江堰 611830)

摘要:“5·12”汶川大地震后,震区边坡稳定性受到严重破坏,出现多种破坏形式,如崩塌、滑坡、变形等等。不稳定边坡存在巨大的安全隐患,所以对边坡进行加固势在必行。预应力锚索是高边坡危害防治的主要手段,将大吨位的预应力锚索锚固于边坡体内稳固的岩层中,通过施加预应力,可抵抗边坡体深层破坏和变形。锚索预应力变化监测对于岩土锚固工程具有重要意义,它通过监控施工过程中及工后的预应力状态,检验加固工程是否达到预期效果,根据长期的监测结果对坡体稳定状态做出评价,并决定是否需要采取适当的补救措施。结合福堂水电站震后厂房边坡锚索加固及其应力监测,探讨了压力分散型锚索应力损失及变化规律,对岩土锚固工程设计、施工提供技术支持。

关键词:地震;边坡加固;压力分散型锚索;锚索测力计;应力损失

中图分类号:TV554⁺.13 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)05-0067-05

Slope Anchor Cable Reinforcement of Futang Hydropower Station after Earthquake and the Stress Monitoring Analysis/LI Bin, HUANG Fen (Sinohydro Bureau 10th Co., Ltd., Foundation Engineering Sub-bureau, Dujiangyan Sichuan 611830, China)

Abstract: After 5·12 earthquake in Wenchuan, the slope stability has been severely damaged in earthquake area, many destroyed modes appeared, such as collapse, landslide, deformation, and so on. Pre-stressed anchor cable is the main method of preventing high slope harm, with large tonnage pre-stressed cable anchoring in stable rocks of slope to resist the deep slope failure and deformation by pre-stressing. It is important to monitor the pre-stress variation, through the pre-stressed state monitoring both in and after construction process, the reinforcement effects can be tested and based on the long-term monitoring results to evaluate the slope stability state, whether to take appropriate remedial measures can be decided. According to the slope anchor cable reinforcement of Futang hydropower station after earthquake and the stress monitoring, the paper discusses the stress loss of pressure-dispersive anchor and the variation rule.

Key words: earthquake; slope reinforcement; pressure-dispersive anchor; anchor dynamometer; stress loss

1 概述

1.1 工程概况

福堂水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县境内的岷江干流河段上,为日调节引水式电站。电站装机4台,单机容量90 MW,总装机360 MW。平均年发电量22.7亿kW·h,属II等大型水电工程。

电站工程由首部枢纽、引水隧洞、调压井和地面厂房枢纽等组成。电站主要工程特征:水库正常蓄水位为1268 m,水库容量为297.4万m³,最大引用流量为251 m³/s。

电站厂区位于岷江河左岸,紧邻福堂坝沟口右侧布置,由调压室、压力管道、地面厂房及开关站构成。尾水与已建太平驿水电站闸首库尾衔接。调压

井位于福堂坝沟与1号小沟呈NE向展布的长条形单簿山脊中的黑云母花岗岩体内,为开敞式调压井,断面为圆形,内径27 m,井筒高108 m。

汶川“5·12”地震后,厂区工程边坡局部松动变形和开裂,厂区自然边坡浅表风化、卸荷岩体普遍发生崩塌,现坡面仍残留较多的松动岩体及解体岩块,危及厂房及进厂公路安全(参见图1)。同时由于调压井中上部置于强风化、强卸荷山体内,此次地震造成山外侧中上部岩体多松弛变形,崩塌破坏。

1.2 边坡加固设计

为了保证本工程上部调压井、下部发电厂房等建筑物及运行人员安全运行,需对厂区边坡进行治理和加固。针对该工程特点,设计采用锚杆、预应力锚索、

收稿日期:2014-11-26; 修回日期:2015-04-29

作者简介:李斌,男,汉族,1974年生,工程师,土木工程专业,从事水利水电、房屋建筑深基坑工程等施工与技术管理工作,四川省都江堰市蒲阳路164号;黄芬,女,汉族,1971年生,工程师,给排水工程专业,从事水利水电地基与基础工程、岩土锚固工程的施工与技术管理工作,153327346@qq.com。



图1 “5·12”汶川地震后的厂房震后边坡图

挂钢筋网喷混凝土、排水孔及护坡混凝土等手段进行综合支护。

根据设计图纸及技术要求,本项目在调压井下部1230 m 高程以上边坡采用压力分散型预应力锚索支护加固,总共布设122束锚索,深度为30和50 m 两种,锚孔间排距6 m × 6 m,张拉吨位1000 kN。在厂房后坡原支护区新增锚索2排,共计6束,锚索孔间距5 m,另根据边坡清表剥离后揭示出的实际状况增加随机锚索,孔深和数量不定。本工程预应力锚索设计张拉力均为1000 kN,锚索倾角为水平

向下 $12^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。锚索结构形为单孔多锚头压力分散型,每束锚索采用7根 $\Phi 15.24$ mm 钢绞线组成,锚固段长8~10 m,钻孔直径130 mm。

1.3 锚索应力设计

为了长期监测锚索边坡预应力的锚固状态,并同步测量埋设点温度,按照设计要求,在厂房后边坡新增了振弦式锚索测力计14台。

2 压力分散型锚索结构及特点

2.1 结构

压力分散型锚索是近几年来发展起来的新型锚索结构,它是将施加的预应力分散在整个锚固段上,使其应力应变分散减小,进而充分利用锚固段岩体的受力性能,提高其适用性。压力分散型锚索是在同一锚孔中安装几个单元锚索,而每一个锚索又都有自己的锚筋体,自己的锚固段和自由段,而且承受的荷载也是通过各自的张拉千斤顶施加的,并且通过预先的补偿张拉使所有的单元锚索始终承受相同的荷载(参见图2)。

2.2 特点

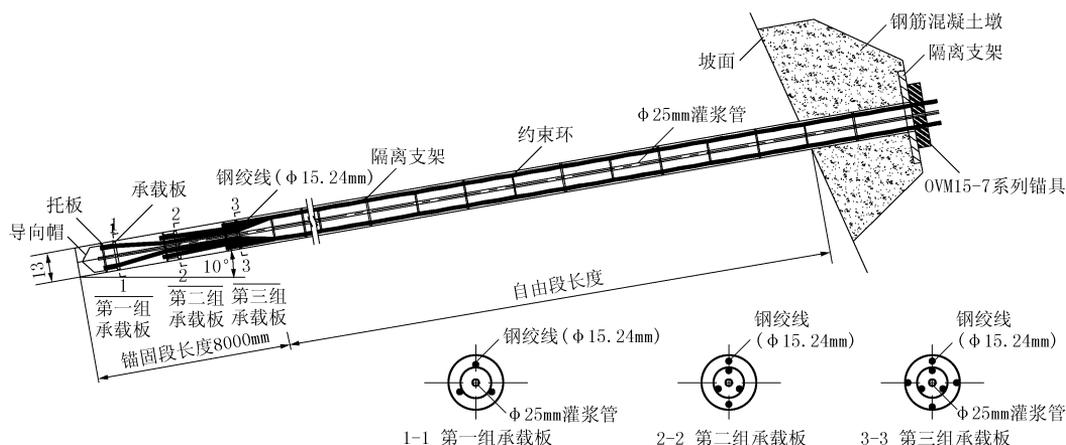


图2 压力分散型锚索结构示意图

由于压力分散型锚索各单元锚索始终承受相同的荷载,使得压力分散型锚索能够最大程度上的调用整个锚固段范围内的地层强度,而不会出现应力过度集中现象。此外,与普通拉力性锚索相比,压力分散型预应力锚索还能够全面提高杆体的防腐蚀能力和耐久性。

3 压力分散型锚索施工

3.1 施工工序

压力分散型锚索施工主要工序如图3所示。

3.2 主要施工方法

本项目锚索施工强度大,工期紧,结合本工程地质特点,采用重庆探矿机械厂生产的XY-2型钻机,配合英格索兰VHP-700E及复盛PES1060电动移动式中风压空压机钻孔。针对钻进过程中频繁发生的漏风或基本不返风、不排渣,因掉块和孔壁坍塌而导致的夹钻、卡钻等钻孔事故,采取常规的水泥砂浆灌注和快硬硫铝酸盐水泥外掺专用早强剂灌注

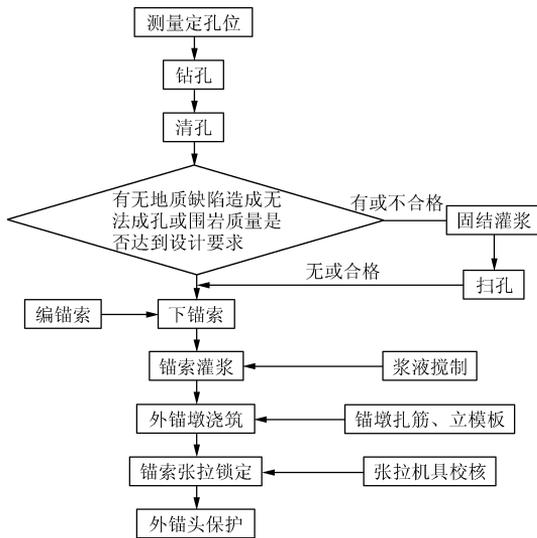


图 3 压力分散型锚索施工工序图

2 种方法进行固壁处理。针对部分地质情况糟糕的孔,在全孔钻孔完成后,再进行一次孔内固结灌浆护壁。

锚索制作完成,经检验合格后,按要求进行孔内下放,通过与锚索捆绑在一起的 $\varnothing 20\text{mm}$ PVC 灌浆管,采用自制的特殊锚索注浆器进行全孔一次注浆。待锚固灌浆达到 30 MPa 和锚墩混凝土抗压强度达到规定值后,对锚索进行张拉。压力分散型锚索使用 ZB4 - 500S 型电动油泵和 YDC240Q 型单根千斤顶进行单根钢绞线对称预紧张拉后,再使用 ZB4 - 500S 型电动油泵和 YCW - 150B 型千斤顶分别对 1000 kN 级级锚索进行整束张拉。

锚索张拉锁定应力稳定后,浇筑混凝土对外锚具及钢绞线做永久防护。

4 锚索应力监测及成果

4.1 锚索测力计安装

根据设计要求,本项目锚索测力计安装如图 4 所示。

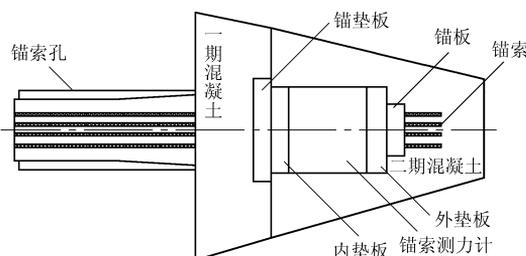


图 4 锚索测力计安装示意图

4.2 设计要求监测频率

锚索应力的监测在工后应继续进行,该电站所有监测任务由电厂运行单位委托具有监测资质的单位进行数据收集、整理和分析。厂房后边坡新增的 14 台锚索测力计现场安装工作从 2011 年 1 月 26 日开始到 2011 年 3 月 25 日,用于监测厂房后边坡支护锚索轴向荷载及施工期、运行期荷载的变化情况。安装完成初期考虑到应力损失可能较大,按照 10 ~ 20 天监测一次锁定吨位,逐渐趋于稳定后按照每个月测读一次的原则进行锚固应力监测。

4.3 监测成果分析

4.3.1 锁定初期应力损失情况

福堂电站震后厂房后边坡增加布置了 14 台锚索测力计,编号从 PR6 至 PR20,设有测力计的预应力锚索张拉时间从 2011 年 2 月底至 3 月底,历时 1 个月,设计张拉吨位均为 1000 kN,测力计监测到的锁定吨位和 1 个月之内监测吨位统计见表 1。

表 1 设有测力计的锚索张拉和监测情况

测力计 编号	安装时间	设计吨 位/kN	锁定后吨 位/kN	锁定损失 率/%	首次监测 吨位/kN	监测损 失率/%
PR6	2011.02.21	1000	924.4	7.56	908.1	9.19
PR7	2011.03.07	1000	906.9	9.31	897.3	10.27
PR8	2011.02.13	1000	959.5	4.05	945.5	5.45
PR10	2011.03.06	1000	918.4	8.16	898.1	10.19
PR11	2011.03.24	1000	965.2	3.48	950.2	4.98
PR12	2011.02.15	1000	922.7	7.73	900.6	9.94
PR13	2011.02.26	1000	888.2	11.18	871.6	12.84
PR14	2011.01.28	1000	908.6	9.14	897.1	10.29
PR15	2011.01.27	1000	935.1	6.49	925.2	7.48
PR16	2011.03.22	1000	1003.1	0.00	1006.5	0.00
PR17	2011.03.19	1000	968.0	3.2	965.7	3.43
PR18	2011.03.19	1000	938.6	6.14	935.7	6.43
PR19	2011.03.14	1000	992.1	0.79	974.4	2.56
PR20	2011.03.09	1000	907.9	9.21	896.2	10.38

从表 1 可以看出,锚索设计张拉力为 1000 kN,施工过程中还按照要求对部分锚索进行了超张拉,但锁定后的吨位多数都存在应力损失,只有极少数基本保持设计张拉吨位。测力计监测到的锁定后应力最大损失 11.2%,平均损失 6.2%。而张拉后 1 个月内监测应力损失最大为 12.8%,平均达到 7.4%。

4.3.2 锁定后 10 个月内应力损失变化情况

根据本工程锚索监测技术要求,结合实际情况,锁定后第一年内按照 1 个月采集一次锚索测力计读数,根据监测到的实际吨位绘制的应力损失过程曲线见图 5 ~ 7。

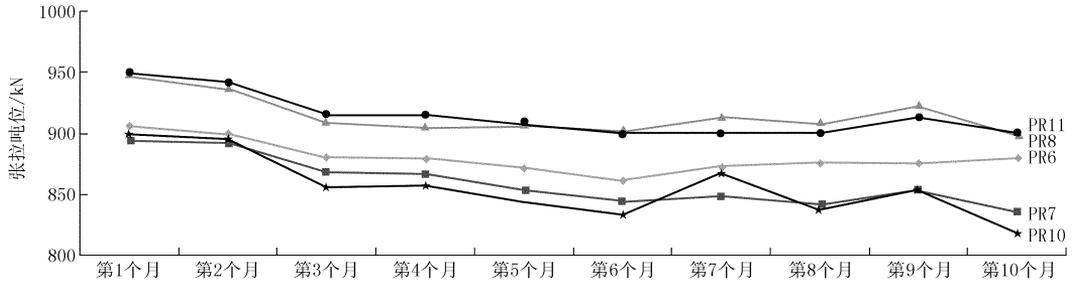


图5 锚索测力计 PR6、PR7、PR8、PR10、PR11 应力监测损失过程曲线

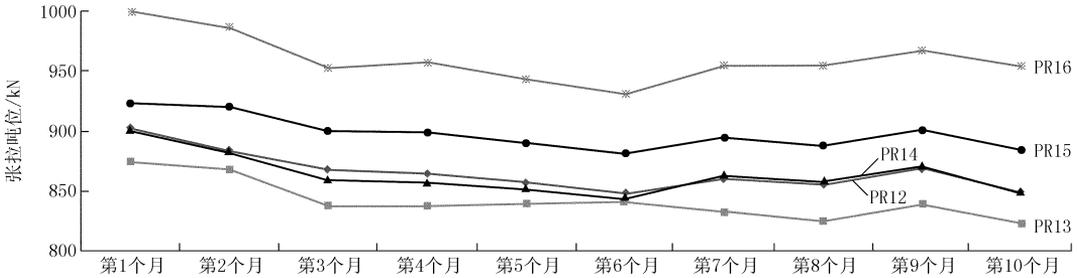


图6 锚索测力计 PR12、PR13、PR14、PR15、PR16 应力监测损失过程曲线

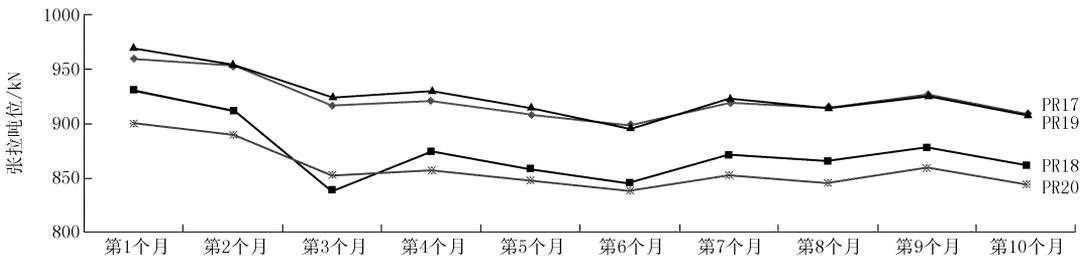


图7 锚索测力计 PR17、PR18、PR19、PR20 应力监测损失过程曲线

从安装完成后到2011年底共计10个月期间,对每支锚索测力计每月读数1次,监测数据显示,锚索应力损失最大为18.12%(PR10,2011年12月27日监测),平均11.1%。这期间每支锚索测力计读数总体上呈现逐渐下降的趋势,这符合锚索应力损失变化的一般规律,但在前几个月,数据有一些反弹,呈现出时大时小的情况,这与张拉完成后锚索预应力损失还没有达到最大值,应力变化还没有趋于稳定有关系。

4.3.3 长时期监测应力损失变化情况

为便于掌握福堂水电站震后厂房后边坡采用预应力锚索加固的效果,以便对整个厂房后边坡稳定性进行全方位系统分析、评估,我们对福堂水电站安全监测数据中的厂房后边坡新增加的14台锚索测力计监测数据从施工完成后一直进行了收集、整理,截至2014年9月底,采取到连续43个月的监测数据,部分时期内的应力损失过程曲线见图8~10。

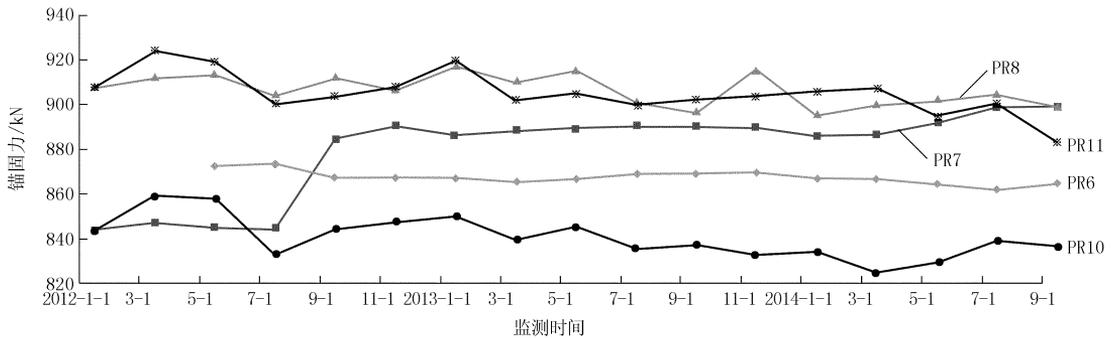


图8 锚索测力计 PR6、PR7、PR8、PR10、PR11 应力监测损失过程曲线

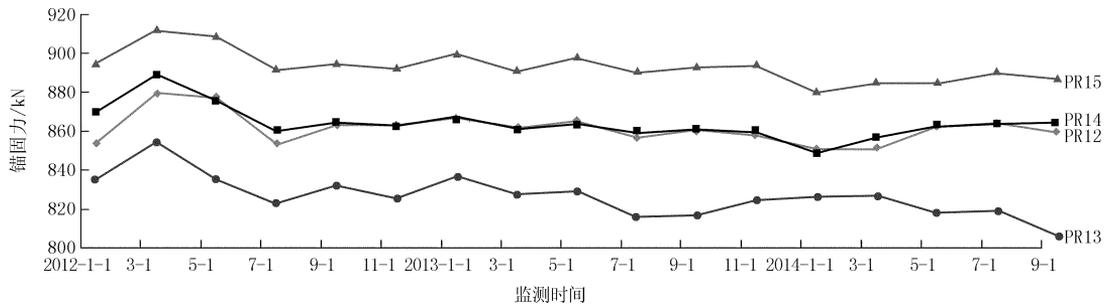


图 9 锚索测力计 PR12、PR13、PR14、PR15 应力监测损失过程曲线

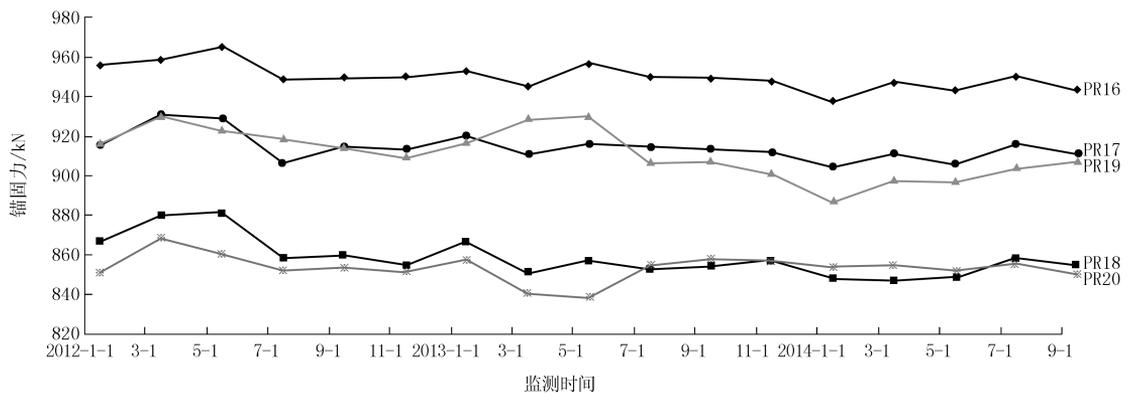


图 10 锚索测力计 PR16、PR17、PR18、PR19、PR20 应力监测损失过程曲线

截至 2014 年 9 月 30 日,福堂水电站厂房后边坡锚索施工已经完成 43 个月,通过埋设在边坡上的 14 台锚索测力计连续监测,各测点锚固力变化不大,与 2012 年 1 月监测到的锚固力相比较,锚固力变化最大为 2.6%,最小为 0.2%,平均变化 0.96%,锚固力在 900 kN 以内,从过程线反应各测点锚固力呈平缓趋势。由此说明经过较长时期的监测,锚索锚固力已经趋于稳定,变化幅度很小。根据监测数据统计分析,稳定后锚索测力计监测到的锚固力平均损失约为 12%,比锁定后前 10 个月内只下降了 1%。

5 结语

(1) 水利水电工程中边坡问题较凸出,锚索支护工程量巨大,但锚索支护区域地质条件往往较为复杂,不同工程的地质条件差异较大,需结合工程实际选用适宜的锚索施工工艺。四川福堂电站震后高边坡地质条件极为复杂,厂房 1230 m 高程以上边坡断层、挤压破碎带和构造裂缝(隙)发育,加上特大地震带来的影响,该部位岩体卸荷、松弛,安全隐患巨大。本项目厂房边坡采用压力分散型预应力锚索施工加固后,取得了良好的效果,边坡稳定,保证了

电站的正常运行。

(2) 在复杂地层中进行锚索施工,锚索成孔质量及效率成为影响锚索施工进度及经济效益的重要因素,根据孔壁坍塌、岩体破碎情况,采取套管或灌浆等方法护壁,并辅以合适的灌浆材料及施工方法等,在本项目锚索施工中取得了满意的效果。

(3) 四川福堂水电站厂房后边坡震后 1230 m 高程以上采用了大量的压力分散型锚索进行加固,从锚索施工完成后就一直进行锚固力的监测,截至 2014 年 9 月 30 日,监测成果表明:压力分散型锚索锚固力趋于稳定,锚索测力计 14 个点设计张拉荷载 1000 kN,平均锁定后荷载 938 kN,张拉完成 10 个月后平均锚固力 890 kN,施工完成 43 个月后平均锚固力 880 kN。从锁定后前几个月内荷载损失相对较快,随后趋于稳定,后期监测到应力损失只降低了 1% 左右(与前 10 个月相比较),由此说明压力分散型锚索后期应力损失非常小,利于加固边坡的稳定。

(4) 压力分散型锚索与其他结构形式锚索一样,应力损失主要发生在张拉过后 3~10 个月之内,在此期间,应力损失变化过程较为复杂,不一定按规律衰减,甚至个别还出现锚固力增长的趋势,但是

(下转第 76 页)

(6)并不是所有冠部轮廓曲线能够满足本论文上提出的设计思路。例如,对有些外锥高度接近钻头直径的65%~75%的冠部轮廓,随着靠近钻头外向部位不能实现本文的设计思想。这部位一般认为钻头上切削齿的磨损最严重的地方,如果发生这样的情况,应按照提高耐磨性的方法而进行布齿,避免过快的磨损,或者改变冠部轮廓曲线的因数,使得满足本文的设计思想。

3.2 新 PDC 钻头布齿设计的优点

(1)通过单切削齿实验,针对不同的地层已经确认最适合的切削参数的前提下,使钻头上布齿的所有切削齿都可以保持着最合理的切削参数进行切削;

(2)在切削齿布齿阶段中可以充分考虑切削先后顺序;

(3)可以避免 PDC 钻头切削齿基体井底干涉现象;

(4)给设计者探索合理的钻头冠部曲线提供可能;

(5)为 PDC 钻头动力学计算提供更正确的理论基础。

值得强调的是并不是所有冠部轮廓曲线能够满足本文提出的设计思路,笔者认为这意味着有些冠部曲线组合对提高 PDC 钻头的钻进效率不够适应。

4 结语

(1)通过单切削齿实验针对不同的地层已经确认最适合的切削参数的前提下,依据新 PDC 钻头布齿办法的实现,钻头上布齿的所有切削齿都可以保持着最合理的切削参数进行切削。

(2)新 PDC 钻头布齿办法可以同时满足井底覆盖、内疏外密的要求。

参考文献:

- [1] 杨庆理.复杂地层 PDC 钻头个性化设计及应用研究[D].山东东营:中国石油大学(华东),2007.
- [2] 邓敏凯,伍开松,胡伟. PDC 钻头切削齿破岩仿真与试验分析[J].石油机械,2014,(1):10-13.
- [3] 张绍和,谢晓红,王佳亮.复合片斜镶角对钻头钻进性能的影响[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,(1):171-175.
- [4] 蔡环. PDC 钻头关键设计参数优化研究[D].山东东营:中国石油大学(华东),2008.
- [5] 姜鑫,邹德永,王家骏,等. PDC 切削齿冲击载荷预测模型的试验研究[J].石油机械,2014,(4):1-3.
- [6] 王家骏,邹德永,杨光,等. PDC 切削齿与岩石相互作用模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,(4):104-109.
- [7] 田丰,杨迎新,任海涛,等. PDC 钻头切削齿工作区域及切削量的分析理论和计算方法[J].钻采工艺,2009,(2):51-53.
- [8] 王福修. PDC 钻头双圆弧冠部轮廓曲线研究[J].河南石油,2005,(2):61-63.

(上接第 71 页)

超过 3~10 个月后,锚固力逐渐趋于稳定,总体上呈现出递减的趋势,监测数据显示本工程锚索锚固力稳定时间在 6 个月左右,长时期监测表明,稳定后压力分散型锚索应力损失变化幅度很小。

(5)锚索应力监测作为一种信息化施工辅助手段可以用于指导边坡工程的施工,确保工程措施及时合理,保证边坡的安全稳定。同时通过监测边坡内部应力的调整变化,为判断边坡长期变形及稳定提供有效的依据。

参考文献:

- [1] 邓树密.压力分散型锚索在震后高边坡加固中的应用[J].四

川水力发电,2011,(5):101-105.

- [2] 谭建国,祁志强,曹继军.三峡库区地质灾害治理中预应力锚索施工的技术难点与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):184-186.
- [3] 王清标,路林海,王立华.压力分散型预应力锚索在高边坡滑坡处理施工技术[J].预应力技术,2006,(6):20-24.
- [4] 巩玉志,武换娥,袁志国,等.深基坑桩锚支护结构锚索轴力监测分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):66-68.
- [5] 王虎法.压力分散型锚索现场抗拔试验测试与分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,(6):47-49.
- [6] 陈宾杰,张有为.高速公路边坡工程预应力损失探讨[J].西部探矿工程,2007,(10):197-199.
- [7] 袁培进,吴铭江,陆遐龄,等.长江三峡永久船闸高边坡预应力锚索监测[J].岩土力学,2003,24(S1):198-201.
- [8] 韩侃.公路高边坡预应力锚索加固监测及分析[J].西部探矿工程,2008,(11):46-49.