

# 深卸荷变形拉裂岩体锚索预应力损失规律研究

张金龙<sup>1, 2</sup>, 徐卫亚<sup>1, 2</sup>, 徐 飞<sup>1, 2</sup>, 蔡德文<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;  
3. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 根据预应力锚索施工过程, 将锚索预应力损失分为张拉损失、锁定损失和随时间的损失, 并分别给出各自定义和计算公式。对锦屏一级水电站左岸边坡锚索监测资料进行统计分析, 得到锚索预应力损失的分布特征。锚索预应力损失的分布特征为预应力张拉损失最大, 预应力随时间的损失其次, 锁定损失最小。将锦屏一级水电站左岸边坡锚索预应力损失规律与其他几个类似工程比较, 得出锦屏一级水电站左岸边坡锚索预应力张拉损失明显偏大。结合锦屏一级水电站左岸边坡地质条件, 分析锚索预应力张拉损失较大的原因, 并提出相应改进措施。最后对锦屏一级水电站左岸边坡锚索现存荷载进行评价分析, 结果表明, 锚索现存荷载基本满足加固设计要求。研究成果可供其他类似工程参考和借鉴。

**关键词:** 边坡工程; 预应力锚索; 预应力损失; 岩质边坡加固; 安全监测; 影响因素; 承载力

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 2 - 3965 - 06

## STUDY ON PRESTRESS LOSS LAW OF ANCHOR CABLES IN DEEP UNLOADING DEFORMED RIPPED BLOCKS

ZHANG Jinlong<sup>1, 2</sup>, XU Weiya<sup>1, 2</sup>, XU Fei<sup>1, 2</sup>, CAI Dewen<sup>3</sup>

(1. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*; 2. *Institute of Geotechnical Research, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*;  
3. *Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610072, China*)

**Abstract:** According to the construction process of prestressed anchor cable, the total prestress loss is divided into three parts, that is, tensioning prestress loss, locking prestress loss and time-dependent prestress loss. The definition and calculation formula of each part are specified. The monitoring data of prestressed anchor cables of left bank excavation slope in Jinping first stage hydropower station are analyzed systematically, and the distribution features of prestress loss are obtained. The analysis result shows that the tensioning prestress loss is the maximum component of total prestress loss of anchor cable, and the time-dependent prestress loss is the intermediate one and the locking prestress loss is the minimum one. A comparison is made between the law of cable prestress loss of left bank excavation slope in Jinping first stage hydropower station and those of some other hydropower engineering slopes. The result shows that the tensioning prestress losses of anchor cables of left bank excavation slope in Jinping first stage hydropower station are greater than those of some other hydropower engineering slopes remarkably. Based on the engineering geology of left bank excavation slope of Jinping first

**收稿日期:** 2009 - 03 - 30; **修回日期:** 2009 - 05 - 16

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50539110); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707)

**作者简介:** 张金龙(1978 -), 男, 2001 年毕业于淮南工业学院采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡稳定性和安全监控理论及应用方面的研究工作。E-mail: jlzhang2001@163.com

stage hydropower station, the factors resulting in large tensioning prestress loss are analyzed, and some measures to reduce the tensioning prestress loss are put forward. At last, the present load of anchor cables is evaluated. It is shown that the present load of anchor cables can meet the requirement of design. This result can provide references to other similar engineering.

**Key words:** slope engineering; prestressed anchor cable; prestress loss; rock slope reinforcement; safety monitoring; influential factors; bearing capacity

## 1 引言

重大岩土工程特别是大型水电工程高边坡,多以预应力锚索作为主要支护加固手段。预应力锚索在一定范围内改善坡体应力状态和岩体物理力学性质,从而提高边坡稳定性。边坡加固效果的好坏主要取决于锚索在长期运行中能否提供足够的锚固力。由于锚索材料松弛、岩土体蠕变以及施工中不合理操作和降雨、开挖爆破等都会造成锚索预应力的损失,因此,弄清锚索预应力损失的原因和变化规律,以及研究合理的补偿措施,对于保证锚固岩体的安全稳定是非常必要的。长期以来,锚索预应力损失问题得到了广泛关注,国内外许多学者对预应力锚固荷载的长期稳定性进行了相关研究,有关锚索预应力影响因素<sup>[1~5]</sup>、预应力变化预测模型<sup>[6~10]</sup>、以及软弱岩体<sup>[11~15]</sup>中锚索预应力变化规律等研究成果都有文献报道,但深卸荷裂隙岩体中大吨位长锚索预应力损失规律鲜有报道。本文在对锦屏一级水电站左岸深卸荷变形拉裂岩体锚索监测资料系统分析的基础上,重点探讨了锚索预应力损失分布的规律及其影响因素,为评价支护效果及评价边坡安全状态提供依据,同时也为其他工程提供经验和参考。

## 2 工程概况

锦屏一级水电站位于雅砻江水能资源最富集的中下游河段,电站左岸边坡出露基岩岩性为中上三叠统杂谷脑组第三段砂板岩,边坡坡体内小断层、深部裂缝及卸荷裂隙发育,在勘 II~V 线范围内深部砂板岩岩体松弛拉裂、倾倒拉裂、滑移压致拉裂等变形迹象明显,尤其是深部裂缝发育段结构面多松弛张开,岩体呈板裂~碎裂结构,抗变形能力差,形成左岸坝头变形拉裂岩体。根据深部裂缝发育段岩体的工程特性,III, IV 级裂缝发育段划为 IV2 级岩体; I, II 级裂缝发育段划为 V2 级岩体。同时,

左岸岸坡岩体风化卸荷强烈,强卸荷下限水平深度一般为 50~90 m,弱卸荷下限水平深度一般为 100~160 m,最深可达 200 m 左右,深卸荷下限最大水平深度可达 300~330 m。左岸边坡岩体主要力学参数参考值见表 1。左岸边坡开挖后组合坡高达 530 m,边坡稳定性问题特别突出,为此,对左岸高边坡采取了预应力锚索加固的处理措施。左岸边坡主要采用压力分散型自由式单孔多锚头预应力锚索作为系统锚索,锚索长 40, 60 和 80 m(局部为 120 m 超长锚索),吨位分 1 000, 2 000 和 3 000 kN 三种。在深卸荷变形拉裂岩体条件下,大吨位长锚索的受力状态和预应力变化将直接关系到边坡稳定与运行安全。工程按 5% 的比例安装了锚索测力计,其中,1 885 m 坝顶高程以上边坡已布置锚索测力计 130 多台,锚索测力计为 GMS 系列钢弦式锚索测力计。最早安装的测力计从 2006 年 1 月开始监测,至 2008 年 12 月,历时近 2 a,为了解锚索工作状况、评价岩锚施工质量及锚固效果积累了大量的预应力监测资料。

表 1 左岸边坡岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of left bank rock mass

岩体等级	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$c/\text{MPa}$	$f$
II	26.00	0.225	2.00	1.35
III1	11.00	0.250	1.50	1.07
III2	6.00	0.275	0.90	1.02
IV1	3.00	0.300	0.60	0.70
IV2	2.00	0.300	0.40	0.60
V1	0.45	0.350	0.02	0.30
V2	0.30	0.350	0.02	0.25

## 3 锚索预应力损失分布特征

锚索安装施工过程,预应力损失可分为张拉过程中的损失、锁定时损失和锁定后预应力随时间的损失,狭义的预应力损失是指锚索张拉锁定后预应力随时间的损失,广义的锚索预应力损失包括三者

之和, 可表示如下:

$$\eta = \eta_z + \eta_s + \eta_t \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为总预应力损失率,  $\eta_z$  为张拉损失率,  $\eta_s$  为锁定损失率,  $\eta_t$  为预应力随时间的损失率。

### 3.1 预应力张拉损失

大量工程监测结果表明, 锚索在张拉过程中千斤顶出力值与测力计受力值常不一致, 即千斤顶油压与锚索测力计读数存在一差值。锚索一般是以控制千斤顶油压表进行张拉的, 故应考虑张拉时引起的预应力损失量。张拉损失率  $\eta_z$  可表示为

$$\eta_z = \frac{\text{测力计荷载} - \text{千斤顶荷载}}{\text{千斤顶荷载}} \times 100\% \quad (2)$$

锦屏一级水电站左岸边坡锚索采用 5 级荷载张拉, 为使钢绞线受力均匀, 先对单索预紧张拉, 然后进行分级张拉和超张拉。设锚索设计工作荷载为  $\sigma$ , 则预应力锚索张拉过程为  $0 \rightarrow 0.20\sigma$ (预紧)  $\rightarrow 0.25\sigma \rightarrow 0.50\sigma \rightarrow 0.75\sigma \rightarrow 1.00\sigma \rightarrow 1.10\sigma$ 。通过向张拉千斤顶油缸加油使油表指针读数升至张拉系统标定曲线上预应力指示的相应油表压力值来控制张拉吨位, 每级加荷都比较钢绞线的实际伸长量与理论伸长量, 以校核锚索张拉荷载。每级加荷后稳压 3 min, 油压表调整到和测力计同步后再进入下一级张拉, 最后一级超张拉稳压 10~20 min 后锁定。

左岸 1 885 m 高程以上边坡锚索张拉预应力损失统计如表 2 所示, 锚索预应力张拉损失最小为 0.81%, 最大为 17.06%, 平均为 7.36%。表 3 是几个水电工程边坡锚索预应力张拉损失比较, 对比可知, 锦屏一级左岸边坡锚索预应力张拉损失明显偏大。

表 2 锚索预应力张拉损失

Table 2 Tensioning prestress loss of anchor cables

长度/m	吨位/kN	数量/束	张拉损失率/%		
			最大	最小	平均
40	1 000	5	-15.93	-3.26	-9.83
	2 000	8	-16.64	-4.41	-7.59
	1 000	8	-10.22	-3.85	-6.74
60	2 000	42	-14.95	-1.15	-6.90
	3 000	12	-17.06	-2.28	-8.32
80	2 000	20	-16.13	-4.07	-7.84
	3 000	19	-13.37	-0.81	-6.78

### 3.2 预应力锁定损失

预应力锚索荷载锁定是靠钢绞线与锚具夹片的摩阻力来维持的, 当锚索张拉完成后, 即进行荷载锁定并拆卸千斤顶加荷装置, 在千斤顶回油的瞬间,

表 3 几个水电工程边坡锚索预应力张拉损失比较  
Table 3 Comparison of tensioning prestress loss of several hydropower projects

工程名称	张拉损失率/%	
	变化范围	平均
三峡永久船闸边坡	-19.21~12.96	-2.51
清江隔河岩升船机边坡	-5.29~-1.57	-3.52
水布垭台子上挡土墙	-0.26~-1.22	-
锦屏一级水电站左岸边坡	-0.80~-17.10	-7.36

钢绞线不可避免地向坡内回缩, 从而引起锚索预应力损失。锁定时锚索预应力损失率就是荷载锁定后即时实测荷载与最大张拉锁定前实测荷载的相差率, 锚索锁定损失率  $\eta_s$  可表示为

$$\eta_s = \frac{\text{锁定荷载} - \text{超张拉荷载}}{\text{超张拉荷载}} \times 100\% \quad (3)$$

锚索预应力锁定损失与锚索回缩量有关, 回缩量大小决定了预应力损失的大小。回缩量与锚具夹片有关, 由于锚具材质加工及安装质量不同, 造成预应力损失也不同。不同锚具夹片其标称回缩量不同, 有的为 6 mm, 有的为 8~10 mm。锚索锁定时预应力损失还与张拉施工人员操作有关。张拉施工人员在操作千斤顶回油卸荷时, 卸荷快慢对锚索锁定影响明显: 卸荷太慢, 测力计实测锁定损失率较大; 卸荷太快则有可能产生瞬间动荷载损伤夹片和钢绞线, 或夹片夹紧不及时而产生较大锁定损失。

锦屏一级水电站左岸边坡采用 ESM 系列锚具夹片, 表 4 为锚索锁定时预应力损失统计结果。表 5 是几个水电工程边坡锚索预应力锁定损失比较, 由表 5 可知, 锦屏一级水电站左岸边坡锚索在锁定过程中预应力损失相对较小, ESM 系列锚具夹片性能稳定, 只要操作方式得当, 其锁定损失很小。

表 4 锚索预应力锁定损失

Table 4 Locking prestress loss of anchor cables

长度/m	吨位/kN	数量/束	锁定损失率/%		
			最大	最小	平均
40	1 000	3	-0.72	-0.49	-0.57
	2 000	7	-0.62	-0.12	-0.34
	1 000	7	-1.35	0.00	-0.43
60	2 000	30	-1.21	-0.03	-0.53
	3 000	6	-0.73	-0.14	-0.41
80	2 000	14	-2.17	-0.17	-0.80
	3 000	15	-1.68	-0.23	-0.77

表5 几个水电工程边坡锚索预应力锁定损失比较  
Table 5 Comparison of locking prestress loss of several hydropower projects

工程名称	锁定损失率/%	
	变化范围	平均
三峡永久船闸边坡	-6.42~-0.01	-2.46
清江隔河岩升船机边坡	-2.46~-1.04	-1.73
水布垭台子上挡土墙	-7.67~-4.29	-5.55
锦屏一级水电站左岸边坡	-2.17~0.00	-0.59

3.3 预应力随时间的损失

时间引起的预应力损失是指锚索锁定后的应力到建立稳定有效预应力这一过程中所出现的预应力减少,其主要影响因素有钢绞线松弛、岩体压缩变形、岩体流变、施工振动、降雨以及群锚效应等。预应力随时间的损失率 $\eta_t$ 可表示为

$$\eta_t = \frac{\text{测定荷载} - \text{锁定荷载}}{\text{锁定荷载}} \times 100\% \quad (4)$$

许多文献对锚索预应力随时间的损失变化规律进行了报道,一般认为锚索预应力随时间的损失可以分为3个阶段<sup>[3, 7, 14]</sup>:第1阶段为预应力快速损失阶段,第2阶段为预应力缓慢损失阶段(或波动变化阶段),第3阶段为预应力平稳变化阶段。不同工程由于地质条件的差异,其锚索预应力损失的3个阶段历时长短也不同。图1为锦屏一级水电站左岸边坡锚索预应力随时间变化的典型曲线。

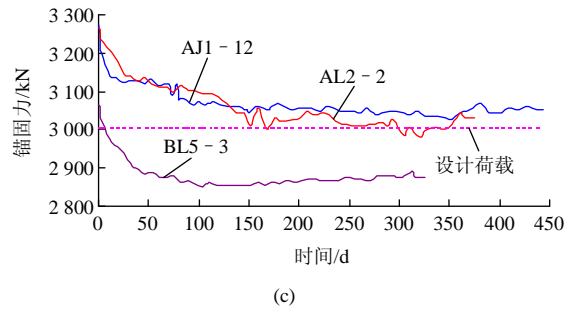


图1 典型预应力锚索荷载变化曲线

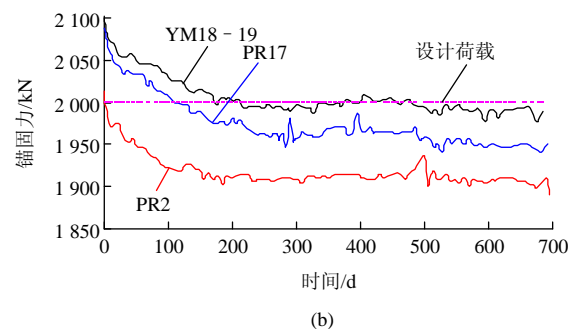
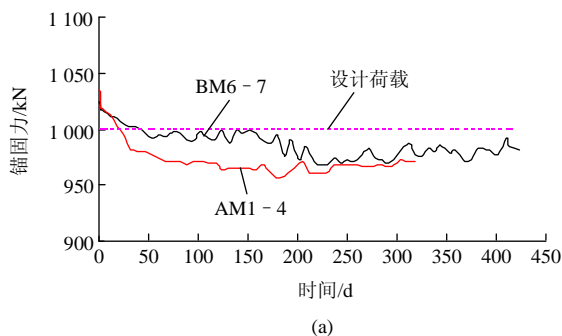
Fig.1 Typical load-time curves of prestress anchor cables

对锦屏一级水电站左岸1885 m高程以上边坡锚索预应力随时间的损失特征统计见表6。由表6可知,截止到2008年12月,左岸1885 m高程以上边坡锚索预应力损失率为3.45%~6.51%。锚索在锁定后初期损失较快,锁定30 d后预应力损失率为1.59%~4.39%,占总损失量的33.74%~67.47%,平均为49.62%;锁定90 d后预应力损失率为1.85%~4.96%,占总损失量的39.2%~83.1%,平均为71.7%;锁定180 d后预应力损失率为2.74%~5.40%,占总损失量的76.4%~96.0%,平均为87.6%,180 d以后预应力基本进入稳定变化阶段,变化幅度较小,只有个别锚索仍呈小幅下降。根据锚索预应力的变化特征将预应力随时间的损失划分为以下3个阶段:第1阶段为快速损失阶段,约锁定后30 d以内;第2阶段为波动变化损失阶段,约锁定后30~180 d;第3阶段为稳定变化阶段,约锁定180 d以后。

表6 锚索预应力随时间的损失

Table 6 Time-dependent prestress loss of anchor cables

长度/m	吨位/kN	数量/束	平均损失率/%				
			7 d	30 d	90 d	180 d	>180 d
40	1 000	3	-0.85	-1.83	-4.04	-4.56	-4.99
	2 000	6	-0.62	-1.66	-2.61	-2.74	-3.58
60	1 000	3	-0.95	-2.00	-2.78	-2.88	-3.45
	2 000	26	-0.94	-1.82	-3.01	-3.78	-4.35
80	3 000	3	-2.41	-4.39	-4.96	-5.40	-6.51
	2 000	11	-0.64	-1.59	-1.85	-3.65	-4.71
	3 000	8	-1.91	-3.28	-4.29	-4.97	-5.17



4 预应力张拉损失原因分析

统计分析结果表明,锦屏一级水电站左岸1885 m高程以上边坡锚索预应力损失以张拉损失贡献最大,且张拉损失较其他工程边坡锚索张拉损失明显偏大,预应力随时间的损失其次,锁定损失

最小, 为减小锚索预应力损失, 提高锚固力, 必须对锚索张拉过程中的预应力损失进行具体分析。

锚索张拉过程中预应力损失的影响因素主要有以下几点:

(1) 张拉系统的摩阻损失。锚索张拉系统包括油泵、油表、油管 and 千斤顶, 厂家一般未提供相应的预应力损失参数, 这部分预应力损失主要根据工程经验确定。相关研究<sup>[16]</sup>表明, 张拉系统的摩擦阻力引起的预应力损失占 2%~4%。

(2) 预应力锚索同孔壁的摩阻损失。锚索在张拉过程中均会受到孔壁摩擦阻力作用。锚索造孔一般采用潜孔钻施工, 左岸边坡岩体风化卸荷强烈, 坡体内小断层、深部裂缝及卸荷裂隙发育, 长锚索深孔成孔时遇破碎带几率增大, 成孔过程中遇破碎带掉快钻现象严重。由于岩体破碎, 成孔后局部孔壁粗糙, 当锚索张拉时自由段与孔壁间可能存在多个接触点, 这种接触点的存在, 将产生摩擦力, 孔越深接触点也越多, 摩擦阻力也越大, 这必定造成锚索在张拉过程中预应力沿程损失加大。

(3) 孔斜率的影响。锚索孔大多数是水平孔(或小倾角), 钻头受自重影响下沉, 钻孔一般会向下偏曲呈弯曲状态, 孔越深越明显。锦屏一级水电站左岸边坡采用长 40~80 m、吨位 1 000~3 000 kN 的大吨位长锚索作为系统锚索, 大吨位锚索孔钻头直径大、钻具总重大, 钻孔更易弯曲, 同时长锚索深钻孔也使得孔斜几率加大。孔斜使得锚索在张拉时自由段与孔壁接触而产生预应力的沿程损失。研究表明, 孔斜率越大, 预应力损失越大, 孔斜率相同时, 锚索张拉荷载越大, 预应力损失也越大。锚固力损失值与孔斜率及张拉荷载  $P$  的统计关系<sup>[2]</sup>为

$$\Delta P = P(0.21e^{1.406n} + 0.634e^{0.0006P}) \quad (5)$$

式中:  $\Delta P$  为预应力损失值(kN),  $P$  为锚索张拉荷载(kN),  $n$  为孔斜率。孔深 35 m, 孔斜率为 2% 时, 摩阻损失最大可达锚索张拉荷载的 11.5%<sup>[7]</sup>。

针对锦屏一级水电站左岸边坡地质条件特点, 为减小锚索预应力损失, 提高锚固力, 保证工程安全, 应采用以下技术措施:

- (1) 严格控制锚索钻孔质量, 保证钻孔的准直度和孔壁光滑度;
- (2) 增加锚索分级张拉时的稳压时间, 使岩体充分压密后在进入下一级张拉;
- (3) 对已经锁定的锚索根据实际锚固力大小,

适时进行 1 次或多次补偿张拉, 本工程采用的无黏结压力分散型自由式单孔多锚头预应力锚索可以进行多次补偿张拉, 补偿张拉后锚索荷载变化见图 2。

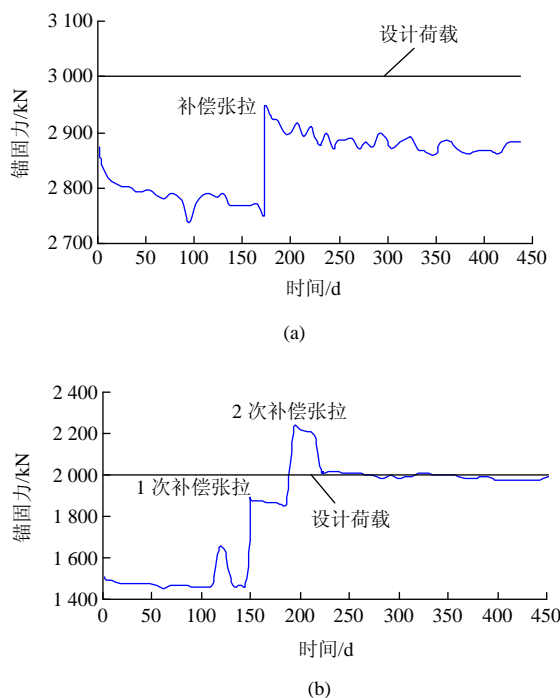


图 2 锚索补偿张拉后荷载变化曲线  
Fig.2 Load-time curves of prestressed anchor cables after compensate tension

本文对锦屏一级水电站左岸 1 885 m 高程以上边坡锚索现存荷载进行统计, 结果如表 7 所示(部分锚索进行了 1 次或 2 次补偿张拉)。

表 7 锚索现存荷载统计  
Table 7 Statistics of present load of anchor cables

吨位/kN	统计数量/束	现存荷载/kN		现存荷载 / 设计荷载 / %
		范围	平均	
1 000	14	924.8~1 064.6	1 001.5	100.2
2 000	77	1 755.7~2 140.7	1 963.6	98.2
3 000	31	2 761.3~3 252.2	2 967.4	98.9

截止到 2008 年 12 月, 对 122 台锚索测力计统计结果表明, 锚索现存荷载高于设计荷载的有 35 台, 占 28.7%; 低于设计荷载的有 87 台, 占 71.3%; 现存锚固预应力达到设计锚固预应力值 95% 以上的有 104 台, 占 85.2%; 95% 以下的有 18 台, 占 14.8%, 说明锚索锚固力相对设计荷载其富裕系数不大, 但绝大部分锚索都能提供足够的支护力, 锚固效果基

本达到设计要求。

## 5 结 论

(1) 按照锚索施工过程, 将锚索预应力损失分为张拉过程损失、锁定时损失和随时间的损失。

(2) 对锦屏一级水电站左岸 1 885 m 高程以上边坡锚索预应力损失监测资料进行了统计分析, 得到了其预应力损失的分布规律, 其中预应力张拉损失对总损失贡献最大, 预应力随时间的损失其次, 锁定时损失很小。

(3) 锦屏一级水电站左岸边坡岩体卸荷水平深度大、断层裂隙和深部裂缝发育、岩体松散破碎、锚索孔壁局部粗糙, 造成锚索与孔壁间摩擦阻力大, 同时, 大吨位长锚索钻孔易发生孔斜, 从而导致沿程损失增大也是边坡锚索预应力张拉损失较大的原因。

(4) 锦屏一级水电站左岸边坡锚索现存锚固力相对设计荷载富裕系数不大, 但大部分锚索都能提供足够的支护力, 锚固效果基本上达到了设计要求。

## 参考文献(References):

- [1] 苏学贵, 李彦斌, 孟秀生. 锚索预应力损失影响因素分析[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(增): 87 - 90.(SU Xuegui, LI Yanbin, MENG Xiusheng. Analysis of the factors affecting prestress-losing in prestressed cable anchor[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19(Supp.): 87 - 90.(in Chinese))
- [2] 张发明, 刘 宁, 陈祖煜, 等. 影响大吨位预应力长锚索锚固力损失的因素分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 194 - 197.(ZHANG Faming, LIU Ning, CHEN Zuyu, et al. Analysis of factors affecting load losses of high capacity and long rock anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 194 - 197.(in Chinese))
- [3] 朱晗迓, 孙红月, 汪会帮, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 756 - 2 760.(ZHU Hanyu, SUN Hongyue, WANG Huibang, et al. Analysis of prestress state of cable applied to rock slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 756 - 2 760.(in Chinese))
- [4] 张宏博, 黄茂松, 宋修广, 等. 预应力锚索在滑坡体加固中的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 324 - 326.(ZHANG Hongbo, HUANG Maosong, SONG Xiuguang, et al. Analysis of influencing factors of prestressed cables in reinforcing landslide-mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 324 - 326.(in Chinese))
- [5] 韩 光, 朱训国, 王大国. 锚索预应力损失的影响因素分析及其补偿措施[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(2): 176 - 179.(HAN Guang, ZHU Xunguo, WANG Daguo. Analysis of factors affecting prestressing loss in prestressed cable anchor and compensative measures[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(2): 176 - 179.(in Chinese))
- [6] 丁多文, 白世伟, 罗国煜. 预应力锚索加固岩体的应力损失分析[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 65 - 69.(DING Duowen, BAI Shiwei, LUO Guoyu. Analysis of load losses of prestressed rock cable bolts[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1): 65 - 69.(in Chinese))
- [7] 张发明, 赵维炳, 刘 宁, 等. 预应力锚索锚固荷载的变化规律及预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 39 - 43.(ZHANG Faming, ZHAO Weibing, LIU Ning, et al. Long-term performance and load prediction model of prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 39 - 43.(in Chinese))
- [8] 朱晗迓, 高岳全, 陆锡铭, 等. 锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 464 - 467.(ZHU Hanyu, SHANG Yuequan, LU Ximing, et al. Coupling analysis of long-term prestress loss and slope creep[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 464 - 467.(in Chinese))
- [9] 景 锋, 余美万, 边智华, 等. 预应力锚索预应力损失特征及模型研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 52 - 55.(JING Feng, YU Meiwang, BIAN Zhihua, et al. Study on prestress loss characteristic and model of prestressed cable[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(5): 52 - 55.(in Chinese))
- [10] 李英勇, 王梦恕, 张顶立, 等. 锚索预应力变化影响因素及模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 3 140 - 3 146.(LI Yingyong, WANG Mengshu, ZHANG Dingli, et al. Study on influential factors and model for variation of anchor cable prestress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 3 140 - 3 146.(in Chinese))
- [11] 陈安敏, 顾金才, 沈 俊, 等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 251 - 256.(CHEN Anmin, GU Jincai, SHEN Jun, et al. Model testing research on variation of tension force of anchor cable with time in reinforcement of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 251 - 256.(in Chinese))
- [12] 张电吉, 汤 平, 白世伟. 节理裂隙岩质边坡预应力锚索锚固监测与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 276 - 1 280.(ZHANG Dianji, TANG Ping, BAI Shiwei. Monitoring and research on the effect of prestressed cable on reinforcement for jointed rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 276 - 1 280.(in Chinese))
- [13] 阮 波, 方理刚. 煤系地层中锚索预应力监测分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 315 - 318.(RUAN Bo, FANG Ligang. Analysis of monitoring prestressed anchors in coal stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 315 - 318.(in Chinese))
- [14] 张永安, 李 峰, 蒋 鸥. 泥岩高边坡锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1 888 - 1 892.(ZHANG Yong'an, LI Feng, JIANG Ou. Analysis of prestress variation of cable in mudstone high slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 888 - 1 892.(in Chinese))
- [15] 景 锋, 朱杰兵, 边智华, 等. 软岩边坡锚索预应力变化特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 820 - 824.(JING Feng, ZHU Jiebing, BIAN Zhihua, et al. Analysis of the prestress variation characteristics of prestressed cable in soft rock slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(5): 820 - 824.(in Chinese))
- [16] 周永江, 何思明, 杨雪莲. 预应力锚索的预应力损失机制研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 353 - 1 356.(ZHOU Yongjiang, HE Siming, YANG Xuelian. Study on prestress loss of anchor cables under long-term loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 353 - 1 356.(in Chinese))