

新型无粘结预应力锚索灌浆工艺优化研究

郭晓刚^{1,2} 徐年丰² 程少荣²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071 2. 长江水利委员会设计院 武汉 430010)

摘要: 针对水布垭工程马崖高边坡岩体结构特征和锚索构造特点, 研究和优化了无粘结预应力锚索灌浆工艺, 实现了真正的全长一次灌浆, 对确保锚索施工质量, 提高锚索防腐性能 and 耐久性, 以及在强岩溶裂隙化灰岩地层中进行锚索施工具有较好的推广价值。

关键词: 水布垭工程 无粘结预应力锚索 灌浆工艺 优化

1. 概述

随着工程实践的不断增多, 人们对预应力锚固体系的耐久性及防腐技术问题越来越重视。为防止锚索因地下水的侵蚀而发生断裂失效, 岩土锚固工程中逐渐开始使用一次灌浆自由式锚索, 即无粘结预应力锚索。这种锚索结构较之传统的两次灌浆全长粘结式结构, 具有多层防腐保护, 灌浆工艺简单可靠, 可多次补偿张拉等特点, 已成功应用于二滩、小浪底等大型水利工程。鉴于马崖高边坡在清江水布垭工程中所处的重要地位和岩溶裂隙性灰岩地层的复杂力学特性, 马崖高边坡加固工程中使用的预应力锚索采用了具有多层防腐保护的结构型式, 即新型无粘结预应力锚索^[1]。

灌浆是预应力锚索施工的重要环节, 灌浆工艺是否设计合理, 直接关系到锚索施工质量, 对锚索防腐性能和耐久性具有重要影响^{[2][3]}。本文针对水布垭工程马崖高边坡岩体结构特征和锚索构造特点, 研究和优化了无粘结预应力锚索灌浆工艺, 实现了真正的全长一次灌浆, 对确保锚索施工质量, 提高锚索防腐性能和耐久性, 以及在强岩溶裂隙化灰岩地层中进行锚索施工提供了较好的经验。

2. 锚索结构设计

(1) 钢绞线强度利用系数

预应力锚索采用国产高强度、低松弛钢绞线制作。由于在复杂的岩土介质中, 锚索中多股钢绞线同步张拉时, 受力很难保证均匀一致, 存在应力分布不均匀性, 为保证有一定的安全储备,

国内外岩土锚固工程锚索的设计强度一般取值为材料强度的55%~65%。考虑到马崖高边坡在清江水布垭工程中所处的重要地位, 钢绞线强度利用系数取为0.56。按此强度利用系数进行计算, 需14根钢绞线。主要指标见表1。

表1 水布垭工程2000kN预应力锚索主要指标

设计锚固力 (kN)	设计张拉力 (kN)	钢绞线				设计应力强度系数	超拉应力强度系数
		使用标准	级别 MPa	公称直径 (mm)	根数		
2000	2000	GB/T5224-95	1860	15.20	14	0.56	0.63

(2) 锚索型式及其特点

近年来, 具有双层保护的无粘结锚索已成为国际上最常用的锚索结构型式之一。二滩和小浪底两个国际招标工程的国外承包商直接购买德国产品成功应用了带波纹管的单层防护无粘结锚索, 而三峡工程中使用的主要是全长粘结预应力锚索或不带波纹管的无粘结锚索结构型式, 仅在现场岩锚试验中专门立项进行了少量双层防护无粘结锚索的现场试验。

通过广泛的调研和研究, 综合考虑马崖高边坡在水布垭工程中所处的重要地位和岩溶裂隙性灰岩地层的复杂力学特性, 确定马崖高边坡加固工程采用具有多层防腐保护的新型预应力锚索结构型式。较之传统的两次灌浆全长粘结式结构, 该锚索结构具有如下特点:

① 防腐能力强。多层保护预应力锚索内锚段去皮洗油钢绞线由封闭的HDPE (高密度聚乙烯) 波纹管及其内外两层水泥结石保护, 而自由张拉段钢绞线由钢绞线上涂油脂、PE塑料包裹和

HDPE波纹管及其内外两层水泥结石保护, 增强了锚索的防腐能力。

② 可重复张拉。由于张拉段钢绞线外裹PE护套, 套内充填防锈油, 相对于周围凝固体来说是自由的, 在锚索张拉锁定后, 必要时可重复张拉, 以保证锚固效果。

③ 灌浆工艺简单。因为张拉段钢绞线套有PE护套, 内锚固段和张拉段可采用一次灌浆工艺, 待浆液凝固达到设计强度后张拉锁定, 相对于全长粘结式锚索的二次灌浆法, 则其工艺明显简化。

④ 可监测边坡变形。由于张拉段是自由的, 可以在外锚头上安装测力计监测应力变化情况, 获得边坡变形的信息。

⑤ 在张拉段, 锚索受力均匀, 能较好地适应岩体变形。

(3) 内锚段长度确定

多层保护无粘结锚索内锚段长度的确定, 必须保证波纹管外灌浆水泥结石体不沿孔壁滑移,

波纹管与其内外水泥结石体不剪开, 同时钢绞线与周围水泥结石体不脱开。根据现有规程规范GB50086-2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》, 考虑水布垭工程溶蚀裂隙性岩体强度特性, 并参照其它大型水利水电工程实践经验, 确定2000kN无粘结预应力锚索内锚固段长度一般为6.0m。对围岩特性较差部位, 应加深锚索至完整岩体或根据实际情况适当加长内锚固段长度。

(4) 外锚头防腐保护

有关研究资料表明, 无粘结预应力锚索结构腐蚀破坏的最薄弱环节在于外锚头部位。因此在水布垭工程锚索设计中, 特别强调对外锚头作永久防锈处理。二期混凝土浇筑之前, 应将锚具、钢绞线外露头、钢垫板表面水泥浆及锈蚀等清理干净, 并将一、二期混凝土结合面凿毛, 涂刷一道环氧基液, 然后浇筑二期混凝土。

(5) 锚索结构构造

水布垭工程2000kN无粘结预应力锚索结构构造见图1。

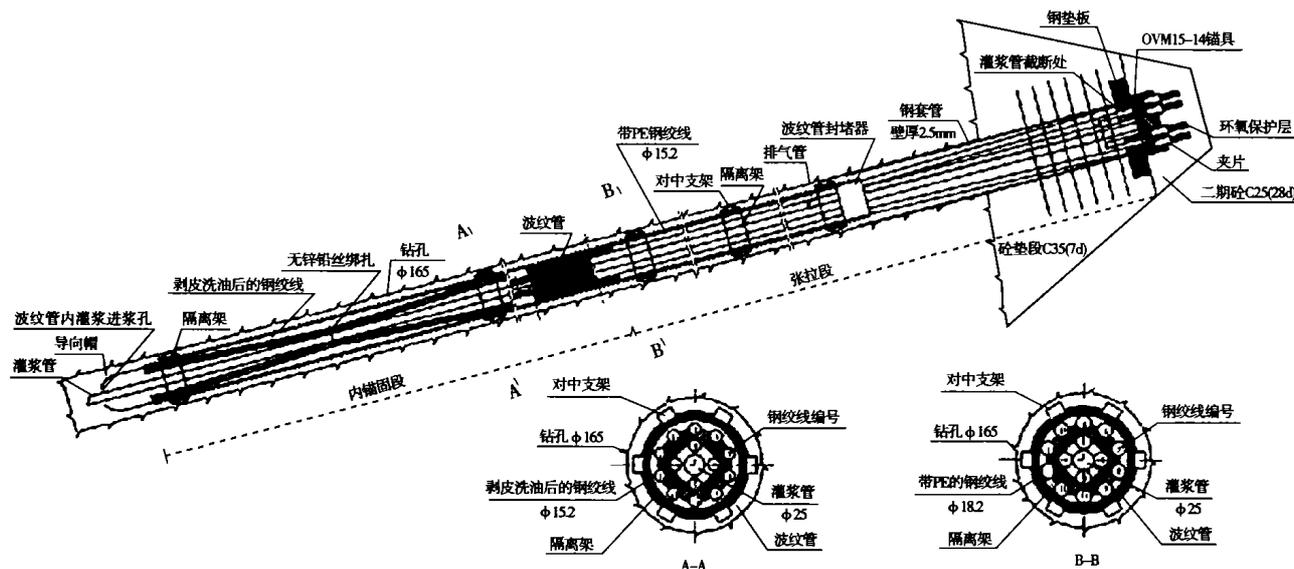


图1 水布垭工程2000kN无粘结预应力锚索结构图

3. 灌浆工艺优化与研究

3.1 优化灌浆工艺的重要性

清江水布垭水利枢纽位于灰岩岩溶地区, 马崖高边坡岩体主要为二叠系下统茅口组和栖霞组灰岩, 其中茅口组地层岩溶发育, 属强岩溶化地层, 栖霞组灰岩和炭泥质灰岩相间分布, 属强岩

溶化与弱岩溶化岩组互层, 层间发育多层泥化剪切带。同时, NNE-NE向裂隙、岸边卸荷裂隙均较发育。从地下水渗流角度看, 水布垭工程锚索施工所处的地层为含溶洞、溶隙、裂隙、孔隙等多重介质的复杂渗流系统。在这样的地层中进行锚索施工, 一方面, 施工过程中灌浆量大, 漏浆

严重；另一方面，若灌浆工艺设计不合理，则灌浆质量难以满足设计要求，浆体结石密实度差，致使地下水极易沿渗流通道流动，与钢绞线接触，使高应力状态下的钢绞线发生电化学腐蚀、化学腐蚀、应力腐蚀、氢脆等不同机理的腐蚀，在很短的时间里产生破坏^[3]。

调研资料显示，从小浪底等工程中的应用情况看，尽管无粘结预应力锚索灌浆工艺相对于全

长粘结式锚索的二次灌浆法有一定的简化，但锚索张拉锁定后，对孔口一定范围内留存的空余段尚需进行二次补浆或灌油^[3]。例如，为进行二次补浆，三峡工程研制的3000kN级双层保护无粘结端头锚索结构专门设计了二次灌浆系统，即二次灌浆管、回浆管（排气管）等，增加了锚索灌浆的复杂性（见图2），使无粘结预应力锚索灌浆工艺简单的特点大打折扣。

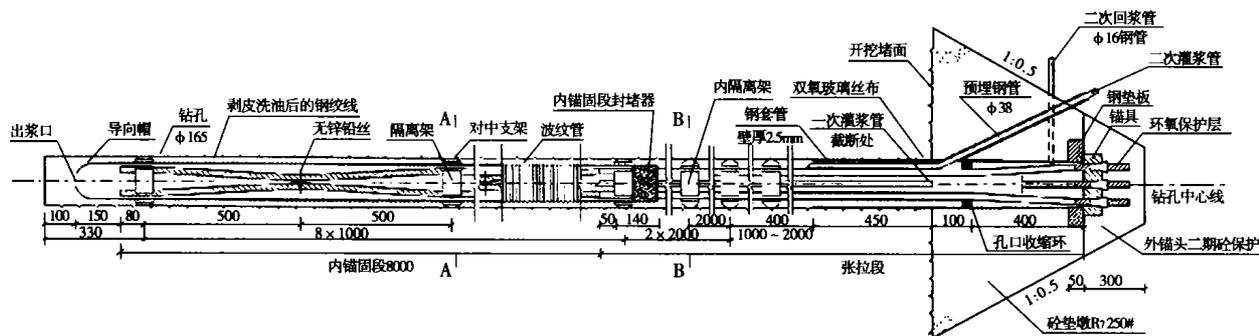


图2 三峡工程3000kN级双层保护无粘结端头锚索结构图

因此，针对多层保护无粘结预应力锚索结构型式，优化锚索灌浆工艺，突出多层保护无粘结预应力锚索的结构优点，对确保锚索施工质量，提高锚索防腐性能和耐久性，探索强岩溶裂隙化灰岩地层中锚索施工技术，有着积极的意义。

3.2 锚索灌浆工艺设计

(1) 钻孔固结灌浆

由于水布垭工程锚索施工所处的地层为含溶洞、溶隙、裂隙、孔隙等多重介质的复杂渗流系统，在这样的地层中进行锚索施工，灌浆量大，漏浆十分严重。如果不对锚索孔进行一定的处理，贸然进行锚索灌浆，一旦遇到大漏浆段，无从保证一次锚索灌浆成功，将致使已下至孔底的锚索体报废，造成较大的经济损失。

因此，锚孔钻进过程中如遇岩溶洞穴、塌孔或掉钻影响进一步钻进时，应先进行固结灌浆处理，而后继续钻进。如果在灌浆过程中发现严重串孔、冒浆、岩溶洞穴漏浆不起压，应根据具体情况采取嵌缝、低压、浓浆、间歇灌浆、灌水泥砂浆、灌注细骨料混凝土、加速凝剂、使用模袋灌浆等方法进行处理。同时，钻孔中发现内锚段为较大的岩溶洞穴或断层破碎带时，应加深至较完整的岩体内，以保证锚固效果。

(2) 锚索灌浆工艺特点

经过固结灌浆，锚索孔壁大的漏浆通道被封闭，此时可下索和进行锚索灌浆。由于锚索孔均为下倾孔，采用孔底进浆、孔口出浆的有压循环锚索灌浆工艺，可充分保证水泥浆结石体密实性。考虑到波纹管内、外空隙差别较大，行浆速度不同，为避免波纹管口处回浆闭气，波纹管内、外实施全分离式灌浆，即采用同一灌浆管进浆，伸至孔底，从孔底向孔口赶气、赶水、赶浆，外部浆液沿孔壁与波纹管壁间空隙运移，内部浆液沿波纹管内钢绞线间空隙运移，孔口设置灌浆筒（见图3），内外浆液沿不同的回浆管流出。为实现波纹管内、外全分离式灌浆，波纹管端头设置封堵器，内部排气管仅伸入封堵器3~5cm，可保证完全排气。波纹管封堵器装置示意图见图4。

从马崖高边坡加固工程预应力锚索实际施工情况看，实际锚索灌浆过程中波纹管内、外“排气→排水→稀浆→浓浆”过程独立发生，且由于波纹管内部空隙小，波纹管内部灌浆过程先于外部灌浆过程完成，排气、排水效果良好。

灌浆工艺设计特点如下：

① 采用孔底进浆，孔口出浆的有压循环灌浆工艺，增强水泥浆体结石密实度。

② 波纹管内外全分离式灌浆，同一灌浆管进浆，但设置不同的回浆管，排气、排水效果好。

③ 孔口设置灌浆筒，对灌浆孔上部产生干缩空余部分具有补偿作用，一般不需要二次补浆。

④ 灌浆按设计规定标准结束后，维持原水泥浆的浓度在相同的压力下继续循环灌注一定时间，即保持一定的屏浆时间，有利于灌入裂隙内浆液和孔内浆液的排水初凝。

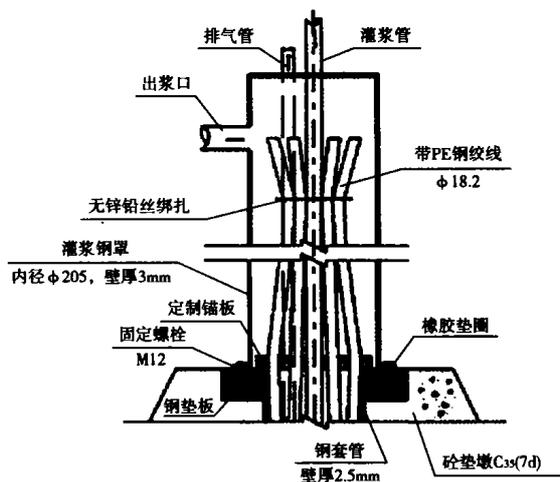


图3 锚索灌浆孔口装置构造图

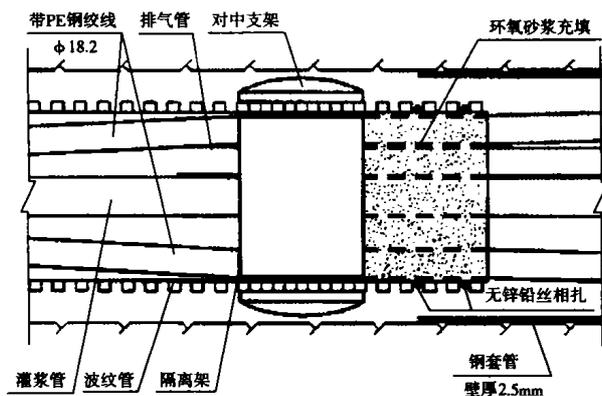


图4 波纹管封堵器装置示意图

4. 结语

(1) 在强岩溶裂隙性灰岩地层中，可利用锚孔进行围岩固结灌浆，通过一次或多次固结灌浆可以大大降低锚孔的漏浆程度，对于保证锚索灌浆一次成功具有重要的意义，而且对边坡坡面和结构围岩整体稳定有利。

(2) 锚索灌浆注重排气管的设置，使波纹管内外灌浆完全分离，排气、排水效果好，可

充分保证水泥浆结石体密实性。同时，孔口设置灌浆筒，对灌浆孔上部产生干缩空余部分具有补偿作用，一般不需要二次补浆。

(3) 通过优化锚索灌浆工艺，水布垭工程马崖高边坡2000kN无粘结预应力锚索结构设计实现了真正的全长一次灌浆，对确保锚索施工质量，提高锚索防腐性能和耐久性，探索强岩溶裂隙化灰岩地层中锚索施工经验，有着积极的意义。该锚索结构先进，灌浆工艺设计合理，值得推广。

参考文献

- 1 郭晓刚，叶伟峰，宋伟.水布垭水电站无粘结预应力锚索设计与施工，水力发电[J].2002，(10):66-68
- 2 程良奎，中国岩土锚固技术的应用与发展，岩土锚固工程技术的应用与发展[M]，北京：万国学术出版社，1996
- 3 高大水，三峡船闸高边坡锚固及新型无粘结锚索开发，水力发电[J].2003，(01):36-40

(上接第23页)

范的要求。

采用两种预应力钢束时索塔水平面应力结果比较如表2：

表2 索塔锚固区水平面混凝土应力（拉正压负，MPa）

应力	最大主拉	最大主压	长边应力	短边应力	备注
配 ϕ^{15-15}	2.52	-13.5	-2.31	-4.17	
配 ϕ^{15-9}	1.84	-9.33	-1.17	-3.0	

注：所有应力均取距表面6cm处和中面处的平均值，但中面的主拉应力由于预应力管道通过，存在应力集中而失真，故忽略该值。

4. 结论

综上所述，为满足规范 $\sigma_{\perp} \leq 0.8R_b^1 = 0.8 \times 2.6 = 2.08\text{MPa}$ (40号砼，组合I)，使索塔储备一定的压应力和适当的主压应力，在每对索的锚固区内配3+3对“U”形 ϕ^{15-9} 预应力束是合适的。

参考文献

- [1] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的应用[J].西安：西北工业大学出版社，1999