

# 桥梁拉索锚具长效防腐工艺研究

阳余莲<sup>1</sup> 赖祥智<sup>2</sup> 吴东明<sup>3</sup>

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:**设计螺纹组件模型及圆饼、螺杆试件,模拟拉索锚具使用工况,进行相关防腐工艺研究。提出粉末渗锌组合防腐工艺概念,研究分析桥梁拉索锚具长效防腐的工艺方法,对防腐渗锌涂层进行成份及金相分析,设计了粉末渗锌组合防腐工艺。根据工件服役条件,进行工艺试制,验证其防腐性能,研究出不同防腐级别的工艺参数,从而满足桥梁拉索锚具在不同服役环境的防腐需要。

**关键词:**拉索锚具 粉末渗锌 复合涂层 防腐工艺

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.03.002

## 1 前言

随着我国经济建设的高速发展,桥梁、公路、铁路等基础建设大幅增加。已修建的钢桥每隔3~5年即需进行一次防腐涂装维护,10~15年全部涂装一次,美国高速公路管理局1998年统计因腐蚀问题需要维修的桥梁占24.5%,城镇间桥梁腐蚀率达35.4%,钢桥的防腐费占总费用高达10%以上。中国公路桥涵设计规范要求服务期100年,美国、英国钢桥梁设计服务期为75年、100年、120年三种。这对桥梁的耐久性提出了具体要求。因此作为百年大计的桥梁工程,其防腐问题日益突出。对桥梁拉索锚具防腐要求也日益提高,要求50年甚至80年的防腐年限。为了提升拉索锚具的市场竞争力及产品质量水平,研究引进防腐性能更好、适用于拉索锚具的防腐工艺显得十分必要。

目前拉索锚具表面防腐主要采用电镀锌、喷漆、热浸锌的方式。电镀锌其防腐性能较差、存在氢脆现象;而热浸锌镀层厚度不均、与基体结合力不足而容易脱落;喷漆表面附着力差、螺纹部分喷漆容易脱落。上述防腐方式都不能满足桥梁拉索锚具的防腐要求。

粉末渗锌及其组合工艺防腐技术是目前市场可行性好、防腐性比较高的长效防腐技术,可有效解决桥梁拉索锚具长效防腐难题。该防腐工艺绿色环保,具有耐腐蚀性高等特点,是防腐工艺发展的新趋势。

## 2 实验方法

### 2.1 试样制作

实验用圆饼试样,采用 $\phi 75 \times 5$ 的40Cr钢材加工制成。

实验用螺杆试样,采用 $\phi 12 \times 100$ 的40Cr钢材加工制成。

实验用拉索锚具组件模型试样,采用的材料为拉索锚具常用的40Cr钢材制成的。 $\phi 110 \times 107$ 钢材加工成螺母; $\phi 89 \times 22 \times 127$ 钢材加工成支承筒; $\phi 68 \times 16 \times 75$ 钢材加工成密封筒; $\phi 68 \times 15 \times 35$ 钢材加工成压紧环,然后将螺母、支承筒、密封筒、压紧环组合成拉索锚具组件模型。

图1为试验用试样图片:

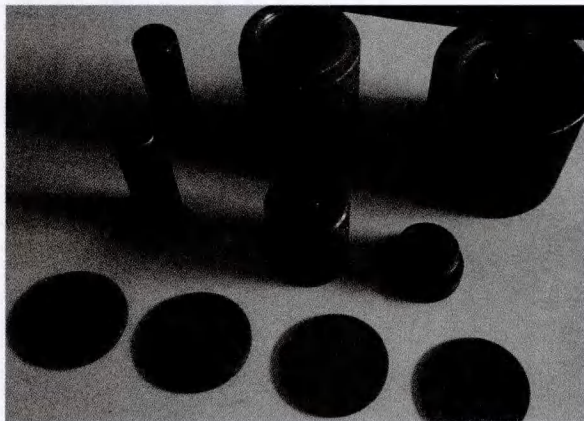


图1 试验用试样

### 2.2 试验工艺

将准备好的试样放入粉末渗锌炉膛,通过将锌粉与助锌剂等混合的粉末渗锌剂包裹在钢铁制件的表面,在滚动条件下进行480℃加热处理,

如图2所示。在钢铁制件表面形成一种锌-铁合金层。



图2 粉末渗锌炉

将渗锌后的钢铁制件用封闭材料对渗锌层进行封闭处理，形成渗锌涂层。根据设计需要，对经过渗锌封闭处理后的钢铁制件，再进行表面涂覆处理。具体工艺流程如图3所示。防腐层有粉末渗锌、粉末渗锌涂层、粉末渗锌复合涂层几种，如图4所示。防腐性由弱变强，可根据不同的服役条件要求，选择使用不同防腐级别的涂层工艺进行防护。

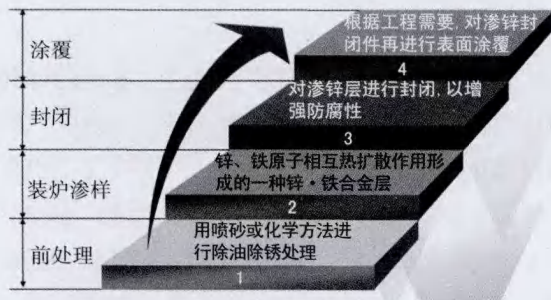


图3 工艺流程图

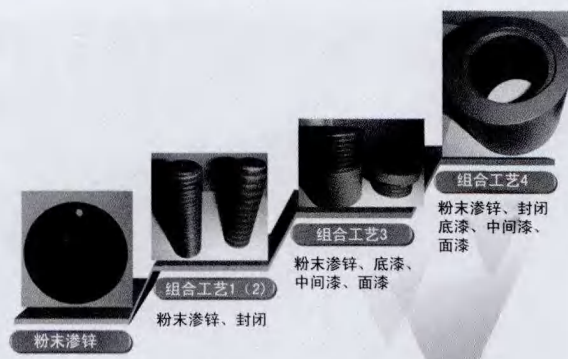


图4 涂层防腐性分级

表1列出了厚度等级中渗层及涂层厚度的最低要求，表2介绍了推荐的使用环境对应的厚度等级类别，通过对其进行组合工艺设计，中性盐雾试验防腐时间达到表3要求，从而可以满足不同服役条件的防腐设计要求。

表1 渗锌复合涂层厚度等级

厚度等级	1	2	3
符号表示	Ct. DiZn30.sF	Ct. DiZn50.sF	Ct. DiZn80.sF
最小渗锌层厚度 $\mu\text{m}$	$\geq 30$	$\geq 50$	$\geq 80$
最小渗锌复合涂层厚度 $\mu\text{m}$	$\geq 50$	$\geq 90$	$\geq 130$

注：Ct-化学处理，Di-扩散，s-封闭，F-复合涂层。

表2 推荐的渗锌复合涂层厚度等级

厚度等级	制件类型或服役期限
1级	室内环境下使用的、要求服役期较短的紧固件
2级	为紧固件或其他制件、要求服役期较长制件
3级	为无配合制件、耐腐蚀寿命更长，在工业、海洋等环境下使用

表3 渗锌复合涂层中性盐雾腐蚀时间

厚度等级	1	2	3
最小渗锌层厚度 $\mu\text{m}$	$\geq 30$	$\geq 50$	$\geq 80$
最小渗锌复合涂层厚度 $\mu\text{m}$	$\geq 50$	$\geq 90$	$\geq 130$
渗锌复合涂层出现红锈的时间h	$\geq 450$	$\geq 650$	$\geq 1000$

## 2.3 试验

### 2.3.1 盐雾试验

本试验用试液采用纯的氯化钠试剂和电导率为 $\leq 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的水进行配制，氯化钠溶液浓度： $50\text{g}/\text{L}$ ，PH值： $6.7 \sim 7.0$ ；盐雾沉降速度： $80\text{cm}^2$ 面积上为 $(1.2 \sim 1.8) \text{ml}/\text{h}$ ；试验箱温度： $(35.3 \sim 36.5)^\circ\text{C}$ ；喷雾方式：连续喷雾；试样放置角度：与垂直方向成 $20^\circ$ ；试验观察：记录出现锈蚀时间。

### 2.3.2 附着力试验

将粉末渗锌圆饼试块进行划格试验，按照GB/T9286-1998标准进行检验判定。

将二组粉末渗锌螺纹组件（1#组件，渗锌后喷底漆，2#组件渗锌后喷封闭剂），模拟工况，反复旋合60次后，测量支承筒表面粉末渗锌组合涂层厚度变化情况。

### 2.3.3 粉末渗锌层成分分析

制作粉末渗锌圆饼试样，对渗层进行电子探针和X射线能谱定量分析。用扫描电子显微镜和能量色散X射线能谱仪分析样品渗层和基材元素成分，采用GB/T17359-1998电子探针和扫描电镜X射线能谱定量分析通则的检测方法进行。

### 2.3.4 渗层金相分析

将粉末渗锌试件，按GB/T6462-2005标准检

验, 观察显微组织形貌。

### 2.3.5 粗糙度检测试验

制作圆饼试样, 进行机加工后粉末渗锌前与粉末渗锌后的粗糙度对比检测。

### 2.3.6 耐候性试验

制作垫片、螺杆、圆饼试块及螺纹组件模型在办公楼屋顶露台进行粉末渗锌、渗锌封闭、渗锌喷漆、热浸锌、电镀锌、电泳、发蓝等表面防腐工艺的防腐性对比试验。

### 2.3.7 螺纹公差带设计参数验证试验

模拟拉索锚具产品设计出螺纹组件模型, 进行工艺试制及检测。根据试制用螺纹组件模型试验及某工程用产品的螺纹组件的测试情况, 摸索预留公差带技术参数信息, 找出螺纹公差带的设计控制范围, 拟定螺纹公差带设计技术文件, 输

出螺纹公差带设计参数供设计人员参考。

## 3 结果与分析

### 3.1 涂(渗)层工艺特性对钢件耐蚀性的影响

图5是39#圆饼试样经过粉末渗锌处理后, 渗层的SEM &EDS结果图, 从该图可看到渗层成分中含有部分铁。由于渗层中存在铁元素, 在环境湿度或冷凝液增加的影响下, 渗层表面可能会出现红色斑块或褐色斑点。这是由于渗层中铁离子释放所引起的。渗层与母材金属的腐蚀产物很难区分开, 测定渗层是否已被腐蚀, 须采用金相显微镜检测法和失重试验法进行检测。防止腐蚀假象出现, 渗锌后必须进行封闭处理, 以避免铁元素的渗出而出现红锈。然后按设计要求进行相应的后处理, 形成复合涂层。

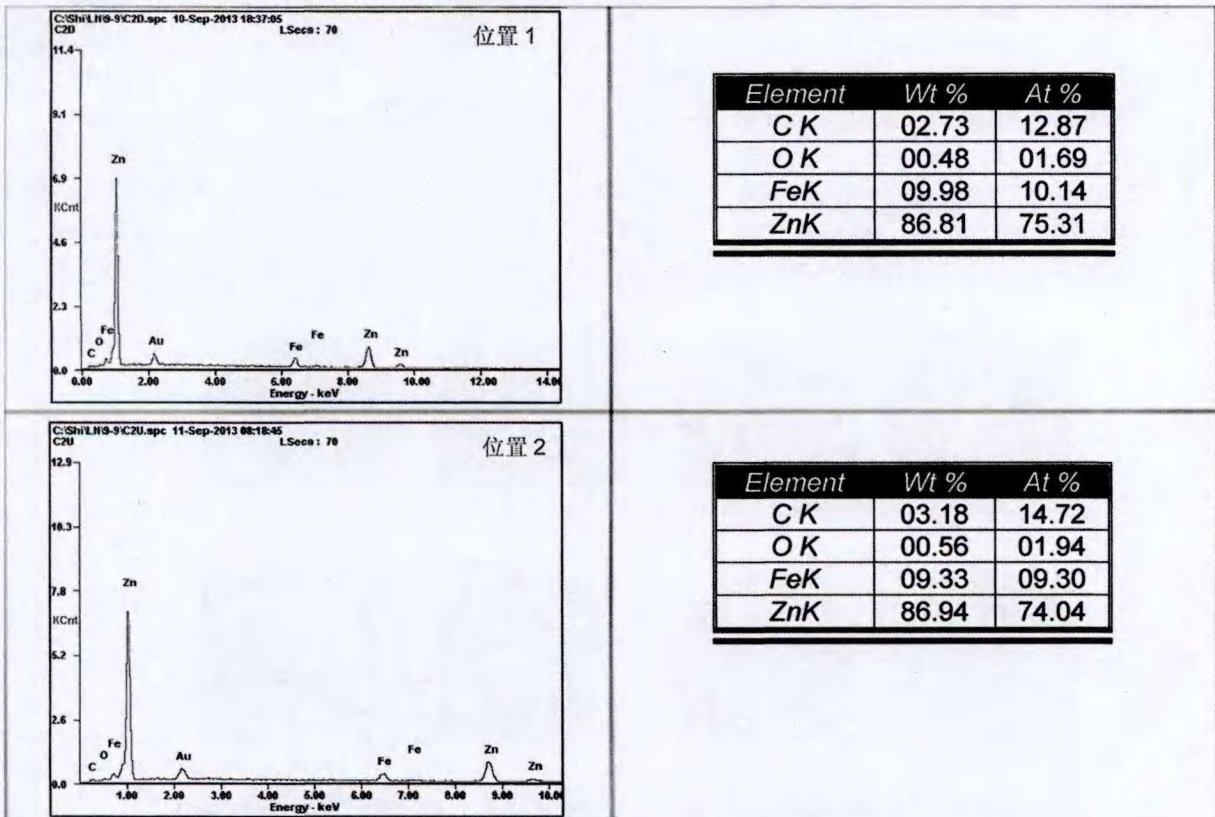


图5 渗层的SEM &EDS结果(位置1渗层表面, 位置2渗层与钢件基体临近点)

图6是粉末渗锌显微组织形貌。为了更好地满足不同工程的需要, 提高其防护性能, 对渗层进行后处理(包括封闭、涂覆等处理), 可更好地提高其涂层的防腐效果。表4为几种防腐工

艺, 盐雾试验情况汇总数据, 表5为几种防腐工艺涂层的耐候性试验情况汇总数据。图7为部份试件盐雾试验前后的对比图片。从表4、表5列出的出现锈蚀的时间和图7所示的腐蚀图片不难看出

出：发蓝—电泳—镀锌—热浸锌—粉末渗锌—粉末渗锌组合工艺1—粉末渗锌组合工艺3—粉末渗锌组合工艺4所对应的涂层耐蚀性由弱变强。

粉末渗锌工艺多应用在螺栓、螺母、弹簧、垫圈等紧固件等中小件的加工。而对于拉索锚具

尺寸大，质量重，支承筒、密封筒等较长工件两端、内孔渗锌层厚度相对要小，采用粉末渗锌组合工艺可很好地进行控制，对于大件产品，但同一个制件的渗锌复合层厚度偏差不应大于该件渗锌复合层平均厚度的20%。

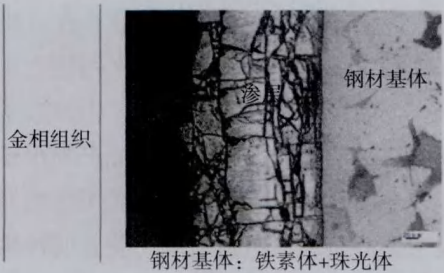


图6 粉末渗锌试样的金相组织形貌

表4 不同防腐工艺试件的盐雾试验对比

编号	防腐工艺	涂层厚度 $\mu\text{m}$	出现锈蚀时间 (h)
04	镀锌	30	100
06	热浸锌	60	210
41	粉末渗锌	40	210
15	粉末渗锌组合工艺1	渗锌40, 封闭20	456
03	粉末渗锌组合工艺3	渗锌50, 漆膜50	1000
27	粉末渗锌组合工艺4	渗锌50, 封闭及漆膜60	1000

表5 不同防腐工艺试件的耐候性能对比

编号	试件名称	工艺	观察日期 (试验时间2013.4.28)				
			2013.5.27	2013.9.30	2013.10.31	2014.1.10	2014.7.10
3	组件模型	粉末渗锌组合工艺	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀
D4	垫片	粉末渗锌	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀
L	螺杆	渗锌、封闭	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀
L <sub>1</sub>	螺杆1	渗锌、喷漆	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀	无锈蚀
09	圆饼试块	热浸锌	无锈蚀	镀层变暗	镀层发暗	镀层发暗加重	镀层发暗明显
05	圆饼试块	电镀锌	无锈蚀	镀层发暗	镀层发暗加重	镀层发暗严重	镀层发白, 钝化层脱落
12	圆饼试块	电泳	镀层变暗	出现锈蚀	锈蚀加重	锈蚀加重	锈蚀加重
48	圆饼试块	发蓝	出现锈蚀	锈蚀严重	锈蚀很严重	锈蚀很严重	锈蚀很严重

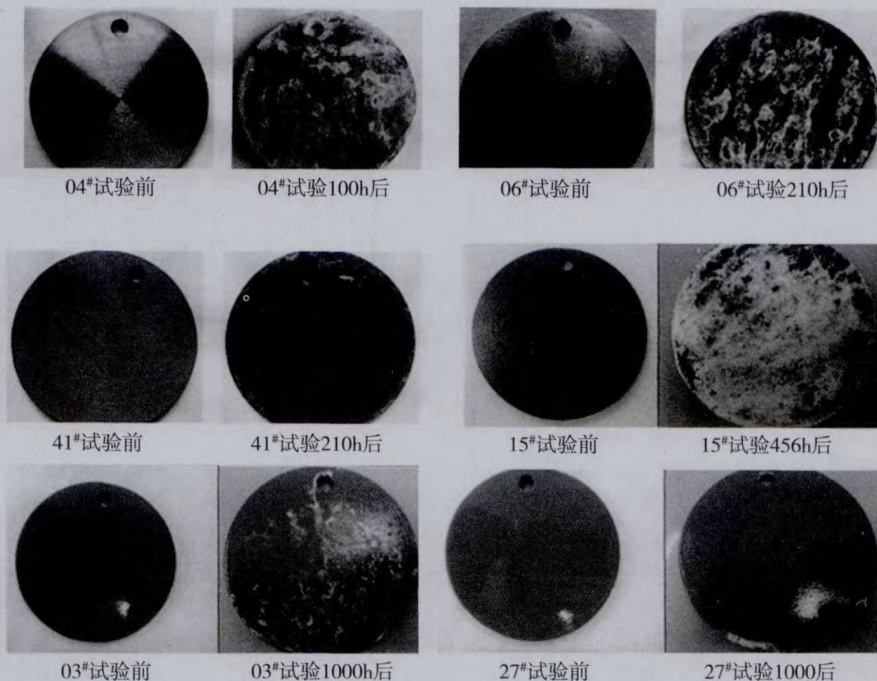


图7 几种防腐工艺试样盐雾试验照片

粉末渗锌层为锌铁合金，其防腐性高于纯锌层。根据相关标准对锌的腐蚀速率参考数据，可以通过锌防腐年限作比较，来推算粉末渗锌涂层的防腐年限。

锌层在大气中的消耗是非常缓慢的，约为钢铁腐蚀速率的1/17至1/18，且是可预估的。镀层寿命在某一特定的环境下，主要视镀层厚度而定。锌的腐蚀速率可参考表6（参考标准ISO 12944色漆和清漆防护漆体系对钢结构的腐蚀防护、GB/T 19355-2003钢铁结构耐腐蚀防护锌和铝覆盖层 指南）

表6 不同使用环境类别下锌的腐蚀速度

腐蚀类别	锌的腐蚀速率		温性气候下的环境
	质量损失 g/年	厚度损失 um/年	
C2低	0.7~5	0.1~0.7	大气污染较低，大部分是乡村地带
C3中	5~15	0.7~2.1	城市和工业大气，中等的二氧化硫污染，低盐度沿海区域
C4高	15~30	2.1~4.2	高盐度的工业区和沿海区域

根据锌涂层的耐久性与使用环境之间的直接关系，假定锌皮膜在10%残留量时开始生锈（JISH-8641日本工业标准），可计算出大气中锌涂层的耐用年限，其计算公式为：

$$\text{耐用年限} = \text{锌附着量} / \text{腐蚀速率} \times 0.9$$

以安徽某大桥为例，其位于长江下游，年平均降水1052.4mm，年平均气温16.8℃，气候温暖湿润，再加上该地区属于工业城市，有工业废气及有害粉尘等不利影响。所以，按上表定义该大桥的腐蚀类别为：C3中，腐蚀速率取值1.5um/年，以耐用年限30年、50年为目标，通过计算可知：

30年使用年限需锌层附着量=耐用年限×腐蚀速率/0.9=30×1.5/0.9=50um。

50年使用年限需锌层附着量=耐用年限×腐蚀速率/0.9=50×1.5/0.9=83um。

根据公式计算，可得出锌层厚度与耐用年限的关系如表7所示。

表7 锌层厚度与涂层耐用年限的关系

锌层耐用年限	锌层厚度um	温性气候下的环境	典型
20	33.3	城市和工业大气，中等的二氧化硫污染，低盐度沿海区域	铜陵大桥
30	50		
35	58.3		
40	66.4		
50	83		

粉末渗锌涂层防腐高于纯锌层，另对比参考盐雾试验情况，可推算出：钢件经过粉末渗锌组合工艺1（渗层为50um~60um，再进行封闭）处理后，涂层耐用年限可达到50年，经过粉末渗锌组合工艺3或4（渗层为50um~60um，再进行涂覆）处理后，涂层耐用年限可达到80年以上。

图8为31#圆饼试块（粉末渗锌复合涂层）、42#圆饼试块（粉末渗锌涂层）涂层进行附着力划格试验，评定结果均达到1级。涂层附着力良好，工程应用中不会因磕碰等造成防腐性能的下落。

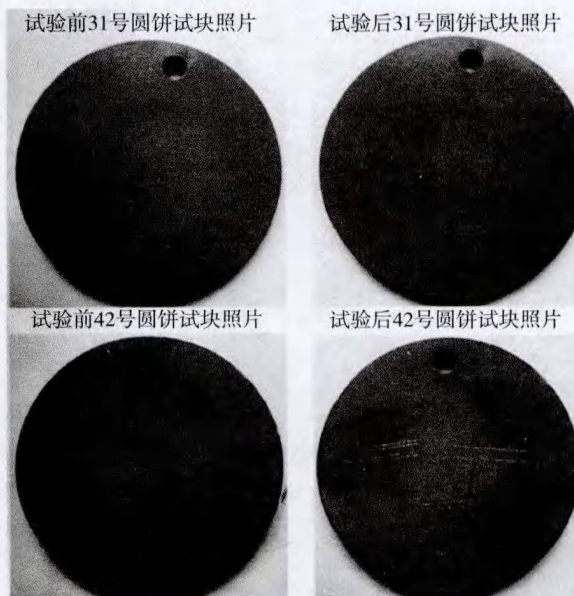
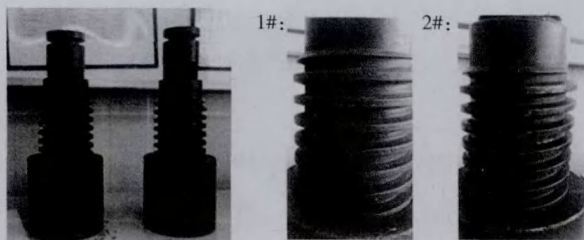


图8 圆饼试样涂层划格试验照片

图9为进行粉末渗锌及涂覆处理后的拉索锚具螺纹组件模型模拟工况，进行螺纹部份涂层附着力试验的图片（左边为1#组件，渗锌后喷底漆，右边为2#组件渗锌后喷封闭剂）。将支承筒与螺母旋合60次后，1#试件涂层厚度余量为0.019mm，

2#试件涂层厚度余量为0.0155mm。二种工艺的螺纹组件的防腐层都未完全磨损掉,仍有余量,试件的螺纹渗锌组合涂层仍有较好的附着力。



旋合前螺纹组件                      旋合60次后的支承筒螺纹

图9 螺纹组件涂层附着力试验

### 3.2 涂层对钢件基体粗糙度的影响

表8为圆饼试块经机加工后,进行粉末渗锌前后粗糙度对比情况,从表8可看出:虽然渗锌前圆饼试件机加工后的粗糙度在1.3~6.3之间,相关较大,但经过粉末渗锌后的粗糙度却集中在2.5~4之间。因此,可以得出,试件粉末渗锌前的表面光洁度状况对渗层的粗糙度影响不大,粉末渗锌层自身的粗糙度影响在一定范围体现。

表8 圆饼试块渗锌前后粗糙度对比表

工件编号	渗锌前粗糙度 (Ra)		渗锌后粗糙度 (Ra)	
	正面	反面	正面	反面
A1	6.30	4.06	4.60	3.419
A2	6.30	6.00	3.465	3.262
A5	1.98	1.31	2.853	3.00
A6	2.55	1.74	3.315	2.72
A7	2.63	1.83	3.719	3.034
A8	1.61	1.90	2.53	3.08

### 3.3 涂层对钢件螺纹配合的影响

图10是按拉索锚具组件设计的螺纹组件模型,通过试验方案设计、试件加工、工艺试制及检测。综合试制用螺纹组件模型试验及该桥产品的螺纹组件的测试情况,找出了螺纹公差带的设计控制范围,摸索出使用粉末渗锌防腐工艺需预留的公差带技术参数信息,供设计参考,具体见表9、表10。拟定了螺纹公差带设计技术文件,有效解决粉末渗锌产品螺纹配合间隙问题。



图10 拉索锚具螺纹组件照片

表9 标准螺纹渗锌加工预留间隙速查表 单位为mm

渗锌层厚度 $\delta$	预留间隙 $\Delta$	
	普通螺纹	梯形螺纹
0.015	0.360	0.380
0.020	0.380	0.460
0.025	0.400	0.540
0.030	0.420	0.610
0.035	0.440	0.690
0.040	0.460	0.770
0.045	0.480	0.840
0.050	0.500	0.920
0.055	0.520	1.000
0.060	0.540	1.080
0.065	0.560	1.150
0.070	0.580	1.230
0.075	0.600	1.310
0.080	0.620	1.380

表10 不同规格标准螺纹渗锌加工  
预留间隙速查表

单位为mm

渗锌层厚度 $\delta$	$\leq M10$ ( $\Delta$ )	M12~18 ( $\Delta$ )	M20~27 ( $\Delta$ )	$\geq M30$ ( $\Delta$ )
0.015	0.210	0.260	0.310	0.360
0.020	0.230	0.280	0.330	0.380
0.025	0.250	0.300	0.350	0.400
0.030	0.270	0.320	0.370	0.420
0.035	0.290	0.340	0.390	0.440
0.040	0.310	0.360	0.410	0.460
0.045	0.330	0.380	0.430	0.480
0.050	0.350	0.400	0.450	0.500
0.055	0.370	0.420	0.470	0.520
0.060	0.390	0.440	0.490	0.540
0.065	0.410	0.460	0.510	0.560
0.070	0.430	0.480	0.530	0.580
0.075	0.450	0.500	0.550	0.600
0.080	0.470	0.520	0.570	0.620

(下转第18页)

经水质分析,通过右坝肩渗流排泄到排水廊道的地下水对混凝土有分解类溶出型( $\text{HCO}_3$ )弱~中等腐蚀,无一般酸性(pH)、硫酸镁型侵蚀,个别有分解类碳酸型中~强腐蚀。对混凝土主要为硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )强腐蚀,部分环境水对抗硫酸盐水泥有弱~中等腐蚀,右坝肩地下水中的Cl对钢筋有中等腐蚀。

根据该项目的特点,预应力锚索采用了具有优良抗腐蚀性能的OVM环氧喷涂钢绞线无粘钢筋,以及新型OVM.YJMI5-6XJA让压分散型锚索共计180束左右,最长索长51m/束。设计张拉力为1000kN。

经过现场拉拔试验和工程批量应用,OVM.YJMI5让压分散型锚索的配套机具和施工工法得到了成功验证,极大提高了预应力锚索锚固的可靠性和简化了张拉施工操作。

## 5 结语

本文通过介绍新型让压锚具技术,提出其恒定的让压力输出特性在不增加抗拉构件强度的情况下,具有满足结构足够变形的能力。通过分析

(上接第14页)

## 4 结论

(1) 粉末渗锌组合工艺显著提高拉索锚具的防腐性能,根据工程应用的环境及设计要求,选用不同的组合防腐工艺进行防护,保证桥梁的使用寿命。

(2) 对有热处理要求的产品,热处理温度保持在500度以上,可满足待渗件材料的力学性能,在经历渗锌加热过程后仍然能达到原设计指标的要求。

(3) 粉末渗锌层由锌铁合金组成,涂层的防腐性优于纯锌层。粉末渗锌处理后进行封闭处理或涂覆处理后,其防腐性大大加强。

(4) 不同粗糙度的工件经粉末渗锌处理后,其粗糙度保持在一定范围内,粗糙度影响不明显。

(5) 用磁性测厚仪测量涂层厚度,有一定

压力分散型锚索的结构特点及缺陷,应用新型让压锚具技术对锚索结构形式进行了改进研究,并提出了让压分散型锚索的结构原理,经过工程应用验证了该新型锚索的结构合理,张拉锚固简便,希望本文在新型预应力锚索结构上的研究成果能在岩土锚固工程中进一步推广应用。

## 参考文献

- [1] 程良奎,范景伦等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 闫莫明,徐祯祥,苏自约. 岩土锚固技术的新进展[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [3] 田裕甲. 压力分散型锚索与拉力型锚索的比较[J]. 岩土锚固工程, 2002(3).
- [4] 刘宁,高大水等. 岩土预应力锚固技术应用及研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
- [5] 闫莫明,徐祯祥,苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 刘玉堂,袁培中,白彦光. 压力分散型锚索不宜作为永久性锚索[J]. 岩土锚固工程, 2008(2).
- [7] 郑静,朱本珍. 荷载分散型锚索差异补偿荷载的广义确定[J]. 铁道工程学报, 2008(1).
- [8] 何炳银,张土环,尹建国. 高地压巷道锚索让压支护技术的探讨[J]. 煤炭工程, 2005(9).
- [9] 董涛,谢友友,祝华林. 让压与锚注法在软岩巷道中的研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1).

的误差,根据需要可采用金相检验方法作为仲裁依据。

(6) 选用粉末渗锌组合工艺,预留防腐层螺纹公差,有效解决螺纹件的防腐难题。

## 参考文献

- [1] 刘自明. 桥梁工程养护与维修手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 章曾焕等. 跨海桥梁防腐要求[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 李民等. 粉末渗锌工艺探讨[J]. 材料保护, 2008, 41(9).
- [4] 闫云友等. OVM250钢绞线斜拉索防腐性能研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. JT/T722-2008 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [6] 国际标准化组织. ISO 12944. 色漆和清漆防护漆体系对钢结构的腐蚀防护[S]. 2007
- [7] 中国机械工业联合会. GB/T 19355-2003 钢铁结构耐蚀防护锌和铝覆盖层[S]. 指南. 2003
- [8] 日本工业标准. JISH-8641 钢铁上的熔融镀锌层[S]. 2007
- [9] ASTM B695. 钢铁上锌机械沉积层标准规范[S]. 2004