

悬索桥新型柔性缠包带主缆防护系统的开发及应用

李成林¹, 方海^{1*}, 崔剑峰², 刘榕², 唐小萍³

(1.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司; 3.柳州市劲新科技有限公司)

摘要: 为克服现有悬索桥主缆防护系统出现的问题,根据湖南省枫溪大桥缆索结构的特点及国内外现有防护体系,研制了主缆防护用新型纤维增强复合材料缠包带。通过多次材料配方试验和结构优化,探明了其力学性能、防腐性能与关键设计参数。结果表明:纤维增强氯磺化聚乙烯橡胶缠包带各项性能及关键参数均满足实际工程要求。基于新型纤维增强复合材料缠包带的特点,开展了缠包带施工工艺的研究,使其在实际工程中大面积应用成为可能。

关键词: 悬索桥; 主缆; 缠包带; 施工工艺

1 引言

在各种桥梁结构形式当中跨越能力最强的当属悬索桥,可达千米级别,其主要由主塔、主缆、锚碇、吊索、鞍座、桥面承载梁及附属结构构成。其中主缆将悬索桥各主要构件连接成了一个完整的系统,并且在悬索桥的传力体系中起到了非常关键的作用。虽然悬索桥的设计使用年限为100年,但由于主缆所采用的主要材料钢材在其所处的恶劣的环境因素的影响下极易腐蚀,导致主缆往往不足20年就出现严重锈蚀情况,说明传统的主缆保护系统不能完全防止腐蚀,仅仅减缓了腐蚀的速率。

国内外各研究人员百余年来对悬索桥主缆的防护做了大量的研究。19世纪40年代,John.A.Reobling提出了主缆腻子涂层钢丝缠绕防护系统,这一创造性的主缆防护方法在大量悬索桥主缆防护中得到应用。20世纪70年代美国研究人员提出了合成护套防护法,即玻璃纤维树脂涂料和橡胶护套涂料防护系统。由于材料工艺问题,这一系统并没有彻底解决表层防护结构的腐蚀、老化问题。20世纪末,日本研究机构开发出了主缆除湿系统,并在明石海峡大桥主缆防护中得以应用。该系统通过给主缆内部吹入相对干燥的空气以破坏主缆钢丝腐蚀所需要的条件来达到主缆防腐的目的。主缆除湿系统的关键是要保证防护系统表

面的密闭,既要阻止水气的进入又要防止干燥空气的大量泄漏。由此可见主缆防护系统的关键在于提高表层防护结构的防腐性以及耐老化性。

该文首先介绍国内外常用的主缆防护措施,基于传统主缆防护体系存在的问题,根据湖南枫溪大桥缆索结构的特点及国内外现有防护体系,研制主缆防护用新型纤维增强复合材料缠包带。通过多次材料配方试验和结构优化,探明其力学性能、防腐性能与关键设计参数,并根据新型缠包带的特点,对纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带施工工艺进行研究。

2 传统悬索桥主缆防腐保护方法

2.1 缠绕钢丝防护体系

为了解决圆钢丝缠绕的缝隙问题,日本将圆形钢丝的贴合结构改造成类似螺纹的结构,在主缆表面形成金属套筒,缠绕后使主缆表面丝丝扣,更为光滑,水分不易渗入,并且增大了空气溢出的阻力,减少了内部空气的泄露。

2.2 腻子涂装防护体系

在缠绕钢丝外防护系统方面,目前中国常用传统的主缆腻子缠丝涂装防护体系(圆钢丝缠绕涂层法),见图1,主要通过涂料涂装层将主缆钢丝与外部环境进行隔绝,以阻止水分、盐和其他腐蚀性物质进入主缆内部来达到主缆防腐的目的。

收稿日期:2018-05-04

基金项目:交通运输部建设科技项目(编号:2013318798320);湖南省交通厅科技项目(编号:201219)

作者简介:李成林,男,硕士研究生.E-mail:642522814@qq.com

*通信作者:方海,男,博士,教授.E-mail:fanghaijut@163.com

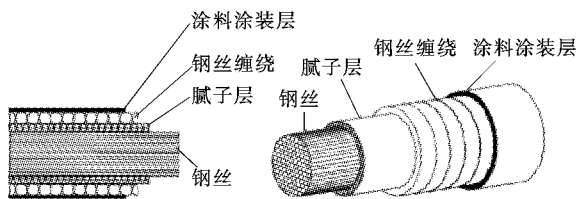


图 1 主缆腻子缠丝涂装防护结构示意图

主缆腻子涂装防护体系存在的问题:

- (1) 由于主缆防护系统施工周期较长,大型悬索桥主缆从架设到防护系统完工大约需要 1 年时间,在此期间,主缆内部集聚了大量雨水,造成主缆腐蚀。
- (2) 传统的防护腻子、嵌缝材料用于填嵌缠绕钢丝之间的缝隙,但由于外层油漆的老化、开裂使防护腻子大量暴露在空气表面,并且由于水分的渗入,防护腻子产生物理、化学反应,使其失去防护作用。

3 纤维增强柔性缠包带的开发

3.1 材质

氯磺化聚乙烯橡胶(CSM)是由高密度聚乙烯经氯化、氯磺化后制成的一种合成橡胶。氯磺化聚乙烯橡胶硫含量为 1%~2%,氯含量为 25%~45%。CSM具有较好的耐候性,耐热性,耐紫外线性能,抗

氧化、腐蚀、风蚀、油等。该防护系统采用高韧性及高强度的纤维增强氯磺化聚乙烯橡胶缠包于主缆表面形成高分子套筒,阻止水分的进入,同时增加空气阻力,减少内部空气的泄露,有效保护主缆。新型缠包带系统复合防护体系如图 2 所示。

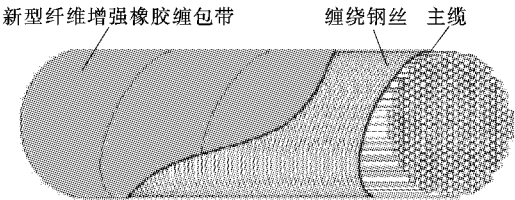


图 2 新型缠包带系统复合防护体系示意图

3.2 缠包带力学性能

将新型纤维增强氯磺化聚乙烯橡胶缠包带及氯磺化聚乙烯橡胶胶片进行力学性能试验,测量其拉伸强度、伸长率、撕裂强度等性能。在厚度基本相同的情况下,测试结果见表 1,拉伸强度方面,前者比后者提高 42.2%;拉断伸长率前者比后者降低将近 8 倍,能对主缆变形起到更好的约束作用;径向撕裂强度前者比后者提高 119.9%。经过多次配方改良之后,新型纤维增强橡胶缠包带多项力学性能均优于氯磺化聚乙烯橡胶胶片,较纯橡胶缠包带更有优势,且均能满足工程实际要求。

表 1 纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带和氯磺化聚乙烯胶片力学性能对比

检验项目	单位	检验方法	纤维增强氯磺化 聚乙烯缠包带	氯磺化聚 乙烯胶片
拉伸强度(径向)	MPa	HG/T 2580—2008	14.50	10.20
伸长率(径向)	%		72.40	885.00
撕裂强度(裤形)(径向)	N/mm	HG/T 2581.1—2009	162.75	74.00
厚度	mm	HG/T 3060.3—2001	1.10	1.15

3.3 缠包带耐腐蚀性能

在含有金属氧化物的情况下,氯磺化聚乙烯橡胶分子链上的亚磺酰基裂解,通过游离基与酸碱发生化学反应,从而对氯磺化聚乙烯腐蚀。纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带耐 3%NaOH 腐蚀和耐 5% H_2SO_4 腐蚀性能如图 3 所示。缠包带在 3%NaOH 溶液中浸泡腐蚀后进行拉伸试验,伸长率和拉应力呈线性增长,达 6.13 MPa,相较于图 4(a)常温拉伸试验结果最大拉应力(4.78 MPa)增长了 28.24%,可见材料在 3%NaOH 溶液中浸泡后拉伸性能大幅度增长,构件耐碱性能较好。缠包带在 5% H_2SO_4 浸泡腐蚀后进行拉伸试验,试

件偏差较大,偏差最大的两组试件之间,拉伸强度相差 47.5%,伸长率相差 41.9%,耐酸性能较好,但不稳定。

3.4 缠包带耐热老化性能

悬索桥长期暴露在日照环境下,测试其耐高温老化性能(图 4),热空气老化 168 h 后除试件 1 外,其余 4 组试件拉伸强度降低 3.7%~3.9%,伸长率降低 21.2%~22.6%,拉伸强度和伸长率保持率较高,老化后拉伸性能下降缓慢,说明在此温度下氯磺化聚乙烯性能稳定,不会脱氯,分子键稳定,耐高温老化性能良好。

3.5 缠包带耐人工气候老化性能

根据相应标准对纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带进

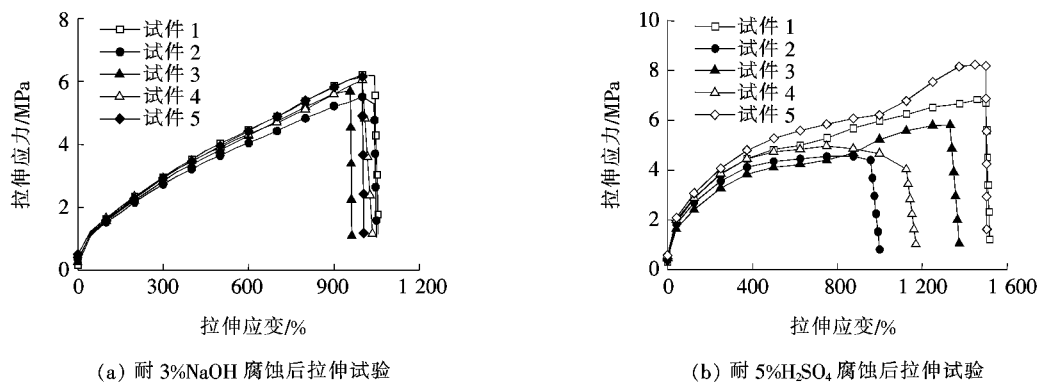


图 3 缠包带抗酸碱腐蚀性能

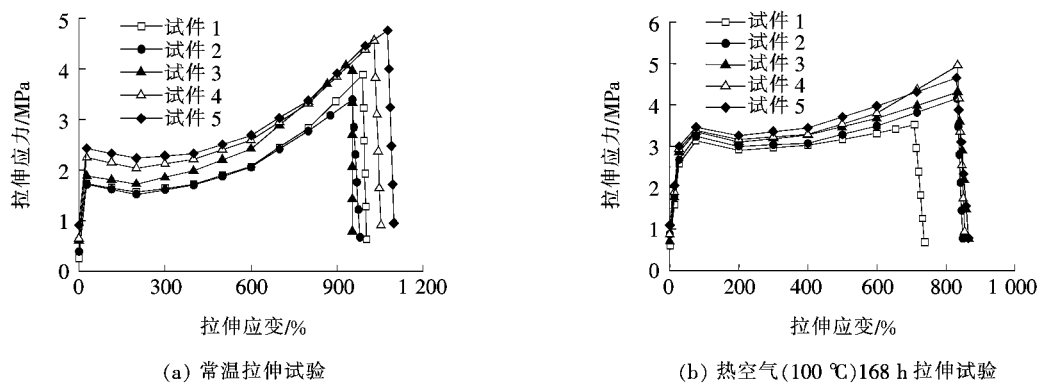


图 4 缠包带耐高温老化性能

行人工气候老化试验,试验包括模拟高温高湿、降水、干燥及高强度辐射等情况,总试验时长 250 h 后,材料的拉伸强度保持率、拉断伸长率保持率、表面情况和灰卡评级等性能见表 2。

表 2 纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带人工气候老化试验结果

检验项目	单位	检验结果	检验方法
拉伸强度保持率	%	105	GB/T 18173.1
拉断伸长率保持率	%	43.9	—2012 复合片, 硫化橡胶类 FL
表面情况	无粉化,无龟裂		GB/T 3511 —
颜色(灰卡评级)	级	3.79	2008

从试验结果看,除拉断伸长率保持率外材料的耐人工气候老化性能较好,人工气候老化后材料拉断伸长率为 31.8%,拉断伸长率保持率为 43.9%。由于受温度、震动等因素影响主缆多为轴向伸缩变形,横截面变形较小,因此材料拉断伸长率这一数据能满足工程实际需要。

4 新型纤维增强柔性缠包带施工工艺

4.1 工程背景

依托工程为湖南省枫溪大桥,枫溪大桥为自锚式

悬索桥,跨度 300 m,单根主缆长度 546.5 m,其中需要防护的主缆长度 474 m,主缆直径 320 mm(紧缆后,索夹间的主缆直径 $\phi 312.5$ mm,缠 S 形钢丝后,主缆索夹间的直径 $\phi 321.2$ mm),全桥共计 2 根主缆。

4.2 施工设备

施工工艺通过缠包机将纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带直接缠绕于主缆缠绕钢丝表面,后采用加热装置热熔固化的方式形成完整的主缆护套结构。主缆缠包带缠绕过程中前后两层搭接宽度需达缠包带宽度一半以上,最终形成厚度均匀的两层缠包物。每一层之间的缝隙通过密封带密封,防止渗水。通过控制电控箱,根据温度感应器,使用加热毯对缠包带进行现场加热。该施工方式简便,可大幅节约原有现场油漆涂装的时间,且特种氯磺化聚乙烯橡胶材料天然具有耐老化等优良特性,即使出现破损现象维修更换也十分方便。

4.3 缠绕

(1) 圆柱螺旋线

假定一个动点沿直径为 $2R$ 的圆柱体周围螺旋上升,动点旋转一周沿轴上升的距离即为导程,用 S 表示。根据螺旋线旋转方向的不同,螺旋线又可分为右螺旋线和左螺旋线。当螺旋线沿圆柱体螺旋上升的

轨迹符合右手螺旋定则(右手四指指向与螺旋线走向相同,拇指指向动点上升方向)时即为右螺旋线,如图 5(a)所示;同理当螺旋线沿圆柱体螺旋上升的轨迹符合左手螺旋定则时,即为左螺旋线,如图 5(b)所示。动点绕圆柱体旋转 $2\pi/n$ 角度时,沿轴上升的距离为 S/n 。螺旋线的旋转方向称旋向。

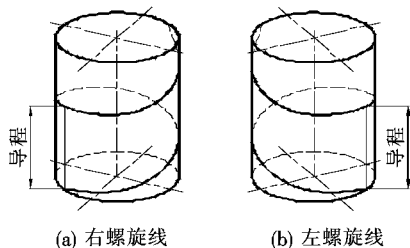


图 5 两种螺旋线

螺旋线上每一点的切线,对圆柱正截面的倾角都相等,这一角度称为圆柱螺旋线的升角。它的余角称为螺旋角。螺旋线展开时为一直线,它是以圆柱正截面圆周长为底边,导程为高的直角三角形的斜边,如图 6 所示。螺旋线是圆柱面上不在同一素线上的两点之间的最短距离。

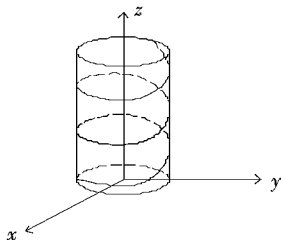


图 6 圆柱螺旋线

(2) 参数方程

圆柱螺旋线参数方程为:

$$\begin{cases} x = a \cos \theta \\ y = a \sin \theta \\ z = \pm b \theta = \pm \frac{S}{2\pi} \theta = \pm a \theta \cot \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta = \omega t$, ω 为角速度; S 称为螺距; β 为螺旋角,式中对右螺旋线取正号,对左螺旋线取负号。如果以弧长 L 为参数,则其方程为:

$$\begin{cases} x = a \cos \left(\frac{L}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \\ y = a \sin \left(\frac{L}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \\ z = \pm \frac{bL}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 主缆缠包带计算方法

计算设定条件:① 主缆半径 R , 直径 $D = 2R$; ② 导程 S , 也称为螺距, 为缠绕主缆时缠绕带中心线间距; ③ 螺旋角 β , 也为缠绕带与主缆的纵向角度。缠绕带与主缆的横向角度 α 为升角, 则有 $\alpha = 90^\circ - \beta$; ④ 圆弧长 L , 也为缠绕带缠绕主缆一圈的中心线长度。

缠绕带计算方法如下:

$$S = 2\pi R \cot \beta \quad (3)$$

$$L = \sqrt{(2\pi R)^2 + S^2} \quad (4)$$

因为是双层, 所以缠绕带的实际长度为 $2L$ 。按以上主缆缠包带计算方法计算可知, 主缆半径 $R = 160$ mm, 缠包带宽度为 150 mm, 当搭接 52% (78 mm) 时螺旋角 $\beta = 85.9^\circ$, 导程 $S = 72$ mm, 圆弧长 $L = 1\,006.6$ mm, 两根主缆所需缠包带长度为 26 507.1 m。

(4) 新型防护系统施工工序

枫溪大桥主缆采用 S 形缠绕钢丝和纤维增强复合材料缠绕带综合防护。该文所研制的柔性主缆防护系统施工工序为, 首先将 S 形缠绕钢丝缠绕在主缆镀锌钢丝外表面, 然后将 150 mm 宽的纤维增强复合材料缠包带使用缠包机现场搭接缠绕在 S 形主缆缠绕钢丝表面。缠绕方向的选择, 由低向高顺时针或逆时针缠绕, 搭接宽度 $\geq 52\%$ (≥ 78 mm), 搭接口有 3 层搭接, 如图 7 所示。缠绕后热熔黏接, 热熔温度 $130 \sim 135$ $^\circ\text{C}$, 热熔时间 4~5 min, 充气气压 0.035~0.045 MPa, 缠包带表面张力 ≥ 343 N。

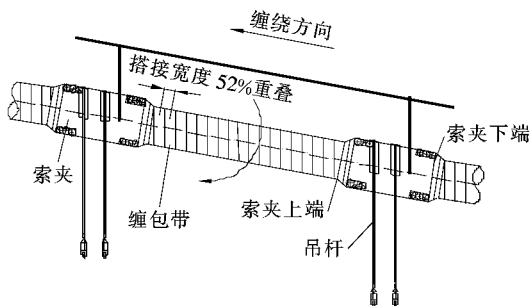


图 7 主缆缠绕安装图

4.4 热熔黏结

缠绕完成后, 要求在 24 h 内进行热熔黏接, 加热温度根据施工时的环境温度确定, 一般为 $125 \sim 135$ $^\circ\text{C}$, 加热毯的一个节段长度所需时间为 (5+5) min 一个循环, 气压 ≥ 0.035 MPa。热熔温度不能大于 150 $^\circ\text{C}$ 。

4.5 索夹环缝密封装置安装

缠包带每层之间间隙容易开裂、老化, 引起水分的

进入。因此在缠包带缠绕完毕后,在两端需要进行密封带安装,以防止水分的进入。

5 结论

介绍了国内外常用的主缆防护措施,分析了其自身存在的问题。根据湖南枫溪大桥缆索结构的特点及国内外现有防护体系,研制了主缆防护用新型纤维增强复合材料缠包带。通过多次材料配方试验和结构优化,探明了其力学性能、防腐性能与关键设计参数,并根据国产缠包带的特点,对相应施工工艺进行了研究。所得结论如下:

(1) 试验研究表明:氯磺化聚乙烯橡胶具有较好的耐候性、耐热性、耐紫外线性,抗氧化、腐蚀、风蚀性能好,可用作悬索桥主缆钢丝缠包带材料,阻止水分的进入,增加空气阻力,减少内部干燥空气的泄露,有效地保护主缆。

(2) 经对多次配方改良,对比新型纤维增强氯磺化聚乙烯橡胶缠包带及氯磺化聚乙烯胶片多项力学性能,前者均优于后者,较纯橡胶缠包带更有优势,且均能满足工程实际要求。

(3) 纤维增强氯磺化聚乙烯缠包带耐碱性能好,试件偏差较小。耐5% H_2SO_4 后,试件偏差较大,耐酸性能不稳定。缠包带热空气老化168 h后拉伸强度降低3.7%~3.9%,伸长率降低21.2%~22.6%,拉伸强度和伸长率保持率较高,老化后拉伸性能下降缓慢,耐高温老化性能良好。人工气候老化后,拉伸强度保持率为105%,拉断伸长率保持率为43.9%,试件表面无粉化无龟裂,灰卡评级3.79,缠包带人工气候老化性能良好。

(4) 该文针对研制的纤维增强氯磺化聚乙烯橡胶缠包带制定了缠绕、现场搭接等关键工序,相较于传统的主缆腻子涂装防护系统,该防护系统具有工序简单、施工周期短、综合成本较低等优势。最后对枫溪大桥主缆防护系统的张拉力、搭接宽度、搭接角度以及所需缠包带长度等工程技术参数进行了计算。

参考文献:

- [1] 叶觉明,李荣庆.现代悬索桥主缆防护现状与展望[J].桥梁建设,2009(6).
- [2] 施瞬杰,方海,刘榕,等.大跨径悬索桥主缆防腐保护问题剖析与建议[J].湖南交通科技,2016(4).
- [3] 李运生,张彦玲.明石海峡大桥的检测[J].世界桥梁,2002(3).
- [4] Hamilton III H R, Breen J E, Frank K H. Investigation of Corrosion Protection Systems for Bridge Stay Cables[R]. Austin: The University of Texas at Austin, 1995.
- [5] Shi Y W, Deodatis G, Betti R. Cable Strength Evaluation for Suspension Bridges Using a Random Field Approach [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12): 1 690—1 699.
- [6] Bloomstine M L, Sorensen O. Prevention of Main Cable Corrosion by Dehumidification[C]. The 5th International Cable — Supported Bridge Operators Conference, New York, 2006.
- [7] Christodoulou C, Bulmer M, Cocksedge C, et al. Humber Bridge: Suppressing Main Cable Corrosion by Means of Dehumidification[C]. Proceedings of the 18th International Corrosion Congress, 2011.
- [8] 王敬民.大跨径悬索桥的主缆防护[J].公路,2000(3).
- [9] 商汉章,白华栋,刘伟,等.悬索桥主缆防护新技术及发展趋势[J].电镀与涂饰,2012(9).
- [10] 袁彬彬.高性能氯磺化聚乙烯(CSM)橡胶复合材料的研究[D].北京大学硕士学位论文,2011.
- [11] 蔡国宏.悬索桥主缆锈蚀机理和防护方法[J].国外公路,2000(6).
- [12] 缪长青,孙传智,陈亮.大跨桥梁缆索构件环境腐蚀当量关系研究[J].水利与建筑工程学报,2010(6).
- [13] 温文峰,张宇峰,马爱斌,等.悬索桥主缆的腐蚀与防护[J].腐蚀与防护,2007(11).
- [14] Betti R, West A C, Vermaas G W, Cao Y. Corrosion and Embrittlement in High-Strength Wires of Suspension Bridge Cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 151—162.
- [15] GB/T 3511—2008 硫化橡胶或热塑性橡胶耐候性[S].
- [16] 高金莲.工程图学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [17] 王程霖.双螺旋轴混凝土搅拌机参数优化研究[D].山东大学硕士学位论文,2015.