

桥梁用高强锚杆组件的设计与试验

柳胜, 赵连刚, 梁旭, 王良

(武汉海润工程设备有限公司, 湖北 武汉 430084)

摘要: 对桥梁用高强锚杆组件进行设计研究, 提供了一种高强锚杆组件的结构设计思路及锚固方案, 完成了高强锚杆、球面螺母、球面垫片、止退螺母的结构设计与强度校核; 结合工程应用需求, 完成了设计载荷为 1 500 kN、1 200 kN、800 kN 高强锚杆组件的设计计算, 形成了 M85、M76、M64 等高强锚杆尺寸系列。经分级张拉锚固工艺进行静载试验验证, 所设计的高强锚杆组件满足设计及使用要求。

关键词: 高强锚杆; 结构设计; 强度校核; 静载试验

中图分类号: U441+.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)07-0091-04

0 引言

钢结构桥梁在设计施工过程中, 为承受钢横梁端部的弯矩及抵抗竖向剪力, 主塔钢横梁和混凝土塔柱通常采用锚杆进行预紧连接。锚杆一端锚固在钢横梁端部的锚固牛腿上, 另一端通过螺母锚固于混凝土塔柱内钢结构锚板上。在此工况下, 高强锚杆及其组件将承受较大的工作载荷, 一般可达 1 500 kN 以上^[1]。因此, 高强锚杆及其组件将具有较大的结构尺寸。而此类锚杆组件的设计, 国内外尚无标准可供参考; 此外, 为了便于现场安装及检修, 目前大多采用螺纹连接的方法进行锚固, 但在普遍 1 500 kN 的预紧力以及桥梁长期微小位移与振动的工作状况下, 经常出现螺纹松动及预紧力不足的问题^[2]。基于此, 现开展桥梁用高强锚杆组件的相关研究, 对高强锚杆及其附属组件进行设计, 以提高高强锚杆组件的结构工艺性。

1 高强锚杆组件的设计与校核

1.1 高强锚杆组件基本结构

一般情况下, 高强度锚杆与螺母、垫圈配套使用, 组成锚固系统。根据现场安装需要, 一端为张拉端, 在张拉端必须设置止退螺母, 以提高张拉时锚杆的紧固可靠性; 另一端为锚固端, 在锚固端可不设置止退螺母^[3]。此外, 为了适应桥梁用锚杆组件的偏载工作状态、提高组件的预紧可靠性, 设计采用球面螺

母结构形式, 以增大螺母和垫片的接触面积, 减少应力集中。设计的高强锚杆组件整体结构如图 1 所示。

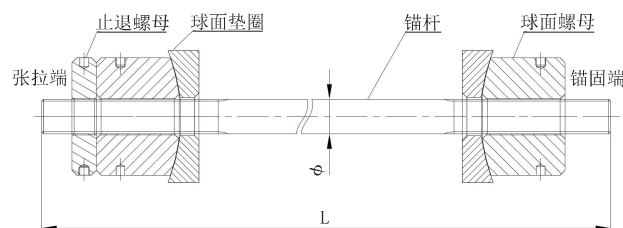


图 1 锚杆组件结构示意图

1.2 高强锚杆的设计与校核

1.2.1 高强锚杆结构设计

高强锚杆是中间为光杆、两端为螺纹的细长杆件。螺纹部分公称直径与光杆部分直径相当。光杆部分长度可根据设计需要进行调整, 螺纹部分长度需结合螺母及垫圈考虑, 安装后螺纹外露长度需大于 5~10 倍螺纹螺距^[4], 便于安装时进行张拉。加工成型的高强锚杆机械性能需达到 10.9 级以上。

锚杆螺纹从加工及性能上考虑通常采用三角形螺纹, 高强锚杆的结构, 如图 2 所示。

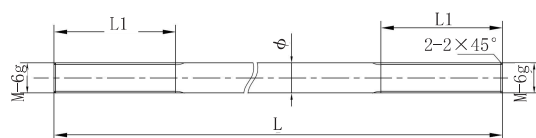


图 2 锚杆结构图

1.2.2 高强锚杆光杆部分强度校核

光杆部分拉力载荷 $F_{m(\text{光杆部分})}$ 为:

$$F_{m(\text{光杆部分})} = \frac{\pi}{4} \varphi^2 \times R_m \quad (1)$$

式中: φ 为高强锚杆光杆直径, mm; R_m 为材料抗拉强度, MPa。

光杆部分保证载荷 $F_{P(\text{光杆部分})}$ 为:

收稿日期: 2020-12-05

作者简介: 柳胜(1987—), 男, 工程师, 工学硕士, 从事桥梁支座及减隔震产品研究工作。

$$F_{P(\text{光杆部分})} = \frac{\pi}{4} \varphi^2 \times R_{eL} \quad (2)$$

式中: R_{eL} 为材料屈服强度, MPa。

考虑安全系数[s], 应该满足:

$$F \leq \frac{F_{m(\text{光杆部分})}}{[s]} \text{ 且 } F \leq \frac{F_{P(\text{光杆部分})}}{[s]} \quad (3)$$

式中: F 为高强锚杆设计载荷, N。

1.2.3 高强锚杆螺纹部分强度校核

锚杆螺纹部分保证载荷 $F_{P(\text{螺纹部分})}$ 为:

$$F_{P(\text{螺纹部分})} = A_{s, \text{公称}} \times S_P \quad (4)$$

式中: $A_{s, \text{公称}}$ 为螺纹公称应力截面积, mm^2 ; S_P 为螺纹保证应力, MPa, 数值可参考 GB/T3098.1。

而三角形螺纹公称应力截面积 $A_{s, \text{公称}}$ 为:

$$A_{s, \text{公称}} = \frac{\pi}{4} \times [(d_2 + d_3)/2]^2 \quad (5)$$

式中: d_2 为外螺纹基本中径, mm; d_3 为外螺纹小径, mm。

拉力载荷 $F_{m(\text{螺纹部分})}$ 为:

$$F_{m(\text{螺纹部分})} = A_{s, \text{公称}} \times R_m \quad (6)$$

考虑安全系数[s], 应满足:

$$F \leq \frac{F_{P(\text{螺纹部分})}}{[s]} \text{ 且 } F \leq \frac{F_{m(\text{螺纹部分})}}{[s]} \quad (7)$$

1.2.4 螺纹部分切应力校核

对内螺纹而言, 其切应力截面积 A_{ts} 为:

$$A_{ts} = 3/4 \times l_t \times \pi \times D_1 \quad (8)$$

式中: l_t 为螺纹旋合部分长度, mm, 可近似取值为螺母厚度; D_1 为内螺纹的基本小径, mm。

对外螺纹而言, 其切应力截面积 A_{res} 为:

$$A_{res} = 7/8 \times l_t \times \pi \times d_1 \quad (9)$$

式中: d_1 为外螺纹的基本小径, mm。

对高强锚杆而言, 设计剪切应力 τ 为:

$$\tau = F / A_{res} \quad (10)$$

若考虑安全系数[s], 应满足:

$$\tau \leq \frac{R_{eL}}{\sqrt{3} \times [s]} \quad (11)$$

1.3 球面螺母的设计与校核

1.3.1 球面螺母结构设计

球面螺母设计成一端球面、一端平面的结构。考虑到偏载工况的需要, 根据经验, 球面球径 SR 一般为螺母外径 dw 的 1.5~2.8 倍^[5]。同时, 为了满足张拉及起吊需求, 在侧面设计了专用螺纹孔, 球面螺母结构形式如图 3 所示。

1.3.2 球面螺母强度校核

球面螺母的保证载荷 $F_{P(\text{螺母})}$ 为:

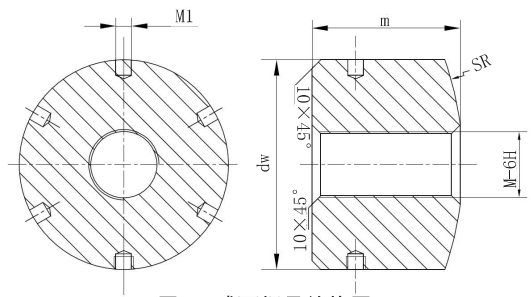


图 3 球面螺母结构图

$$F_{P(\text{螺母})} = A_{s, \text{公称}} \times S_{P(\text{螺母})} \quad (12)$$

式中: $S_{P(\text{螺母})}$ 为螺母保证应力, MPa, 数值可参考 GB/T 3098.2 的规定。

考虑安全系数[s], 应该满足:

$$F \leq \frac{F_{P(\text{螺母})}}{[s]} \quad (13)$$

球面螺母剪切强度 $\tau_{P(\text{螺母})}$ 为:

$$\tau_{P(\text{螺母})} = \frac{S_{P(\text{螺母})}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

螺母螺纹为内螺纹, 螺母剪切应力 $\tau_{(\text{螺母})}$ 为:

$$\tau_{(\text{螺母})} = \frac{F}{A_{ts}} = \frac{F}{\frac{3}{4} \times l_t \times \pi \times D_1} = \frac{F}{\frac{3}{4} \times m \times \pi \times D_1} \quad (15)$$

考虑安全系数[s], 应该满足:

$$\tau_{(\text{螺母})} \leq \frac{\tau_{P(\text{螺母})}}{[s]} \quad (16)$$

球面螺母面压 $\sigma_{(\text{螺母})}$ 为:

$$\sigma_{(\text{螺母})} = \frac{F}{A_{bl}} \quad (17)$$

式中: A_{bl} 为球面部分承压面积, mm^2 。

考虑安全系数[s], 应该满足:

$$\sigma_{(\text{螺母})} \leq \frac{\sigma_{s(\text{螺母})}}{[s]} \quad (18)$$

式中: $\sigma_{s(\text{螺母})}$ 为球面螺母材料的屈服强度, MPa。

1.4 球面垫圈的设计与校核

1.4.1 球面垫圈结构设计

球面垫圈与球面螺母配合, 一端为凹球面, 一端为平面^[6], 结构外形一般如图 4 所示。

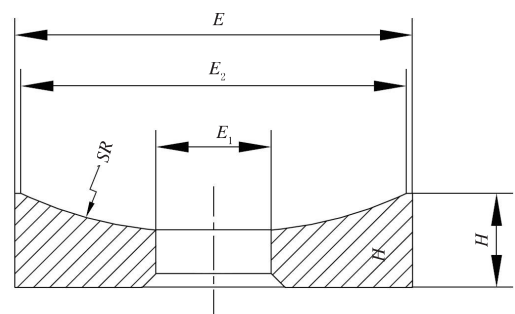


图 4 球面垫圈结构图

图4中, E_1 的尺寸根据选定的螺纹直径尺寸, 参考国标 GB/T 5277 来选定, 一般选择中等装配或者粗装配系列尺寸; SR 尺寸与配合的球面螺母尺寸一致。

$$E_2 = dw + 0.02 \times SR \quad (19)$$

$$E = E_2 + 6 \quad (20)$$

$$H = [SR - \sqrt{SR^2 - E_2^2}] - [SR - \sqrt{SR^2 - E_1^2}] + 20 \quad (21)$$

1.4.2 球面垫圈强度校核

球面垫圈面压 $\sigma_{s(\text{垫圈})}$ 为:

$$\sigma_{s(\text{垫圈})} = \frac{F}{A_{bl}} \quad (22)$$

考虑安全系数 $[s]$, 应该满足:

$$\sigma_{s(\text{垫圈})} \leq \frac{\sigma_{s(\text{垫圈})}}{[s]} \quad (23)$$

式中: $\sigma_{s(\text{垫圈})}$ 为垫圈材料屈服强度, MPa。

1.5 止退螺母的设计与校核

当螺纹规格 $M \leq 64$ 时, 可按 GB/T 6172.1 的尺寸设计。

当螺纹规格 $M > 64$ 时, 厚度 $m_1 = 0.6 \sim 0.8 M$, 其他尺寸按 GB/T 6172.1 设计。螺母侧边需设置吊装及张拉拧紧用螺纹孔。

止退螺母结构尺寸如图5所示。

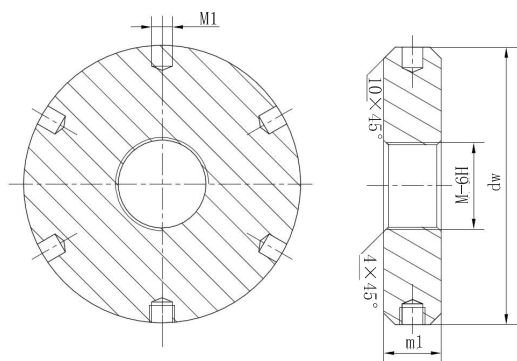


图5 止退螺母结构图

止退螺母按球面螺母方式进行保证载荷及剪切强度校核即可。

2 高强锚杆组件工程算例

根据某斜拉桥工程设计方案, 为实现钢横梁和塔柱的连接, 需要工作载荷分别为 1 500 kN、1 200 kN、800 kN 的锚杆系列组件, 根据前文设计思路, 进行高强锚杆的工程实例设计, 高强锚杆组件的材料及相关强度数据如表1所列。

当设计载荷为 1 500 kN 时, 其各项设计计算如下:

2.1 高强锚杆设计计算

根据式(3), 可得锚杆光杆部分直径 φ 为:

表1 高强锚杆组件材料及强度数据表

类别	高强锚杆	球面螺母	球面垫圈	止退螺母
设计载荷	1 500 kN/1 200 kN/800 kN			
材料	40CrNiMoA	35CrMo	35CrMo	35CrMo
屈服强度	940 MPa	835 MPa	835 MPa	835 MPa
抗拉强度	1 040 MPa	980 MPa	980 MPa	980 MPa
螺纹保证应力	830 MPa	1 040 MPa	1 040 MPa	1 040 MPa
安全系数	3			

$$\varphi \geq \sqrt{\frac{4F \times [s]}{\pi \times R_{cl}}} = \sqrt{\frac{4 \times 150000 \times 3}{\pi \times 940}} = 78(\text{mm})$$

根据式(7), 对锚杆螺纹部分计算可得:

$$\frac{d_2 + d_3}{2} \geq \sqrt{\frac{4F \times [s]}{\pi \times S_p}} = \sqrt{\frac{4 \times 150000 \times 3}{\pi \times 830}} = 83.1(\text{mm})$$

根据普通三角形螺纹的尺寸关系, 螺纹基本中径和螺纹小径可通过螺纹基本大径和螺距来表示, 一般基本尺寸大于 60 mm 时取螺距 P 为 6 mm, 那么经过变换后锚杆螺纹部分的尺寸 M 为:

$$M \geq 83.1 \text{ mm} + 0.938P = 88.7(\text{mm})$$

由于锚杆光杆部分和螺纹部分的尺寸应当一致, 参考螺纹尺寸系列, 综合考虑后选定锚杆光杆部分直径 φ 为 85 mm, 螺纹尺寸 M 为 85 mm, 外螺纹基本小径 d_1 为 78.5 mm。

为确定螺纹旋合长度, 根据式(11)可得:

$$l_i \geq \frac{3 \times \sqrt{3} \times F}{\frac{7}{8} \times \pi \times d_1 \times R_{cl}} = \frac{3 \times \sqrt{3} \times 1500000}{\frac{7}{8} \times 3.14 \times 78.5 \times 940} = 38.4(\text{mm})$$

因此, 螺纹部分旋合长度至少需达到 38.4 mm, 锚杆光杆部分长度可根据工程需要及安装尺寸调整, 螺纹部分长度 L_1 可根据螺母及垫圈尺寸再次修正。

2.2 球面螺母设计计算

球面螺母需与锚杆螺纹部分配合, 因此其 M 为 85 mm, 内螺纹基本小径 D_1 为 78.5 mm, 保证应力校核后满足设计要求。根据式(16)可得:

$$m \geq \frac{\sqrt{3} \times [s] \times F}{\frac{3}{4} \times \pi \times D_1 \times S_{p(\text{螺母})}} = \frac{\sqrt{3} \times 3 \times 1500000}{0.75 \times 3.14 \times 78.5 \times 1040} = 40.5$$

根据式(18)可得:

$$A_{bl} \geq \frac{3F}{\sigma_{s(\text{螺母})}} = \frac{3 \times 1500000}{835} = 5389.2(\text{mm}^2)$$

在此基础上, 可进行螺母尺寸设计, 最终螺母厚度 m 为 200 mm, 螺母外圆 dw 为 240 mm, 球径 SR

为 360 mm(取外圆直径的 1.5 倍),螺母侧面张拉及吊装螺纹孔 M_1 为 18 mm。

2.3 球面垫圈设计计算

根据 GB/T5277,选择中等装配,则与 M 配合的垫圈尺寸 E_1 为 91 mm,球面尺寸 SR 与球面螺母一致,根据式(19),可得 E_2 为:

$$E_2 = dw + 0.02 \times SR = 240 + 0.02 \times 360 = 247.2(\text{mm})$$

则 E 为:

$$E = E_2 + 6 = 253.5(\text{mm})$$

取整后 E 为 255 mm。

球面垫圈厚度 H 为:

$$H = \sqrt{360^2 - 91^2} - \sqrt{360^2 - 247.2^2} + 20 \approx 106(\text{mm})$$

球面垫圈与球面螺母选择相同的材料,校核后强度满足要求。

2.4 止退螺母设计计算

止退螺母外形尺寸 dw 与球面螺母一致,螺母厚度 m_1 取 0.6 倍 M ,取整后尺寸为:

$$m_1 = 0.6 \times 85 \approx 50(\text{mm})$$

止退螺母保证应力及面压与球面螺母一致,而螺母旋合长度 $m_1 > 40.5$ mm,因此止退螺母强度满足设计要求。

考虑球面螺母、球面垫圈、止退螺母的厚度尺寸,保证装配后螺纹外露 5~10 倍螺纹螺距,则锚杆螺纹部分尺寸 L_1 为 380 mm。

按同样的计算步骤,可以完成设计载荷为 1 200 kN、800 kN 系列高强锚杆组件的设计计算,在此不再赘述,共完成 M85、M76、M64 三种尺寸系列的高强锚杆设计,详细尺寸数据见表 2 所列。

表 2 高强锚杆组件尺寸系列表

		单位:mm		
尺寸系列		M85	M76	M64
高强锚杆	φ	85	76	64
	L_1	380	360	320
	L	6 690	6 180	2 760
球面螺母	m	200	170	150
	dw	240	240	220
球面垫圈	SR	360	360	340
	E_1	91	82	70
	E	255	255	235
	H	106	109	100
止退螺母	m_1	50	45	38

3 高强锚杆组件试验验证

现场安装高强锚杆组件时,为了填补锚杆由于

混凝土缩变及锚杆张拉等所产生的预应力损失,锚杆采用分级张拉锚固工艺进行张拉^[7]。为验证锚杆组件的设计可靠性并满足现场施工要求,每种规格型号的锚杆组件制造出厂前,必须抽取实物进行静载试验。试验必须采用专用工装,沿螺母轴线施加载荷。首先张拉到设计载荷的 10%,然后分级加载至设计载荷的 50%、75%、100%、150%。每级加载后保压 3 min,卸载锚固^[8]。分别测量记录伸长量,满足以下条件即为合格:

(1)试验前后试件无明显变形,高强锚杆总长度允许存在 12.5 μm 的测量误差;

(2)螺母、高强锚杆可顺利旋合;

(3)高强锚杆、螺母、球面垫圈按照 JB/T 4730 要求进行磁粉探伤,II 级验收合格。

图 6 为锚杆静载试验工装图。主夹具及辅助垫板使用混凝土浇筑固定,中间设置支撑板以支撑高强锚杆,可换垫板设置有不同的内径尺寸以安装高强锚杆,将高强锚杆及球面螺母、垫片安装拧紧后,采用液压拉伸器逐级施加试验载荷,并记录试验数据。

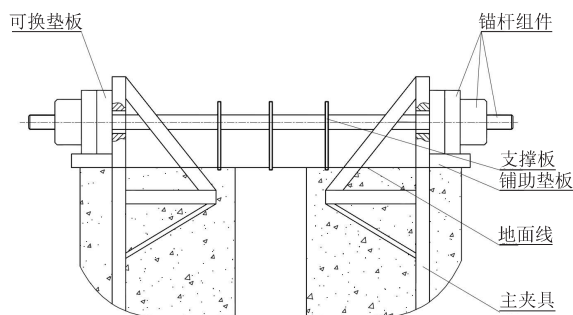


图 6 锚杆静载试验工装示意图

锚杆实物经静载试验后,螺母、高强锚杆可顺利旋合拆卸。试验前后高强锚杆长度测量差值均在 12.5 μm 之内,经过磁粉探伤,满足 II 级验收标准。通过静载试验验证,所设计的高强锚杆组件满足设计要求,可在工程实际中进行应用。

4 结 论

通过对桥梁用高强锚杆组件进行试验研究,完成了高强锚杆、球面螺母、球面垫片、止退螺母的结构设计与强度校核,从而提供了一种可靠的高强锚杆组件设计方案。结合国内某斜拉桥工程施工的需要,经过计算分析,完成了螺纹规格 M85、设计载荷 1 500 kN,螺纹规格 M76、设计载荷 1 200 kN,螺纹规格 M64、设计载荷 800 kN 等三种尺寸系列的高强锚杆组件

- [3] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [4] 李嘉, 董亮, 张坚, 等. UHPC- 沥青薄面层环氧界面剂黏结性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020(1):49-57.
- [5] 王万鹏. UHPC- 上面层层间黏结性能研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2018.
- [6] 冀振龙. UHPC 超高性能混凝土钢桥面复合铺装体系的优化和应用[J]. 粉煤灰, 2020, 4(2):54-56.
- [7] 朱忠. 板肋超高性能混凝土轻型组合桥面研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2018.
- [8] 夏杨嘉玲. 超高性能轻型组合桥面 UHPC-SMA 层间黏结性能研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2019.
- [9] 李嘉, 夏杨嘉玲, 王万鹏, 等. 超高性能轻型组合桥面 UHPC- 沥青薄面层间黏结性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5):16-25.
- [10] 朱忠, 徐发生, 周燕强, 等. 带板肋的钢-UHPC 轻型组合桥面疲劳性能理论与试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6):97-102.
- [11] 郑晗. 钢-UHPC 轻型组合桥面全过程及空间受力性能研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.
- [12] 张瀚文. 钢-超薄 UHPC 组合桥面板短钢筋连接件研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.
- [13] ACI 548.8-07, Specification for Type EM (Epoxy Multi-Layer) Polymer Overlay for Bridge and Parking Garage Decks[S].
- [14] 李嘉, 李杰, 邵旭东, 等. 钢板-超薄 UHPC-TPO 组合桥面静力和疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11):98-106.
- [15] 李杰. 钢桥面-超薄 UHPC-TPO 组合铺装抗弯疲劳试验研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2016.
- [16] 张瀚文, 邵旭东, 曹君辉, 等. 具有短钢筋连接件的超薄轻型组合桥面结构抗剪性能初探[J]. 公路工程, 2019, 44(2):11-16, 38.
- [17] 李文光. 轻型组合桥面 UHPC 层的弯拉静力及疲劳性能试验研究[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2015.

(上接第 94 页)

的设计计算。经过分级张拉锚固工艺进行静载试验验证,所设计的高强锚杆组件满足设计及使用要求,并在国内某斜拉桥项目得到工程应用。

参考文献:

- [1] 黄跃江.斜拉桥施工控制技术特点研究[J].工程建设和设计,2020(8):84-85.
- [2] 梅应华,胡可,朱大勇.芜湖长江公路二桥桥塔锚索系统性能研究[J].世界桥梁,2017,45(6):39-44.
- [7] 杜仕朝,刘仲洋,康春霞,陈伟.基于无应力状态法的斜拉桥大范围调索技术研究[J].公路,2017,62(12):128-133.
- [8] 刘钊,孟少平,吕志涛.两座大型斜拉桥索塔锚固区模型试验及对比研究[J].中国工程科学,2003(12):48-54+95.