

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.05.027

2 000 MPa 级多股成品索式锚碇锚固系统研究与应用

苏强, 吴东明, 李旺龙

(柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州 545006)

摘要: 多股成品索式锚碇锚固系统是当前锚固大型悬索桥主缆索股的主要型式。随着悬索桥跨经的不断增大, 为减少主缆重量, 主缆钢丝向超高强度、更大直径方向发展, 目前常用主缆钢丝强度达到了 1 960 MPa, 而强度超过 2 000 MPa、直径超过 6 mm 的钢丝主缆已在工程中得到应用。随着高强度、大直径主缆索股不断升级, 需开发与之匹配的锚碇锚固系统。通过对 2 000 MPa 级钢绞线多股成品索式锚碇锚固系统的设计、试验与工程应用, 结果表明该新型锚固系统具有降低工程建设成本、锚固可靠、耐久性好、结构紧凑等优点, 已成为当今锚碇工程设计的首选。

关键词: 锚碇锚固系统; 成品索; 高强度; 锚固; 防腐应用

中图分类号: U444

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0109-05

0 引言

随着悬索桥跨经的不断增大, 为减少主缆数量和重量, 缩短施工周期, 主缆钢丝向更高强度、更大直径方向发展, 目前常用主缆钢丝强度已达到了 1 960 MPa。母俊莉等^[1]介绍了 1 960 MPa 高强钢丝的开发, 在盘条原材料的设计、索氏化处理、钢丝拉拔技术和钢丝热镀技术等方面进行研究。卢靖宇等^[2]对 1 960 MPa 高强钢丝主缆索股静载性能进行了试验研究。彭春阳等^[3]介绍了大直径高强度钢丝主缆索股的制造技术, 对索股锚具设计、生产工艺、生产线改造以及索股放索质量等提出控制方法。叶觉明等^[4]介绍了 1 960 MPa 级钢丝的加工及其在韩国蔚山大桥的应用。强度为 2 060 MPa、直径为 6 mm 的钢丝主缆也已得到研究与应用, 陈焕勇等^[5]介绍了 $\phi 6$ mm、2 060 MPa 锌铝镁多元合金镀层钢丝索股的研究、索股编制生产线改造、索股制作工艺以及在深中通道伶仃洋大桥中的应用效果。

锚固系统是锚固主缆索股的关键构造, 是主缆能“生根”的关键所在。当前国内锚碇多为预应力锚碇, 最常用的是多股成品索式锚固系统, 如图 1 所示。多股成品索式锚固系统具有锚固可靠、耐久性好、施工简便、全生命周期成本低、可检测、可更换等优点。梅刚等^[6]介绍了该多股成品索式锚固系统在

虎门二桥中的设计, 吴明远和苏强等^[7-8]介绍了该多股成品索式锚固系统的研究情况, 该多股成品索式锚固系统最初都是采用抗拉强度为 1 860 MPa 级的钢绞线为预应力索。

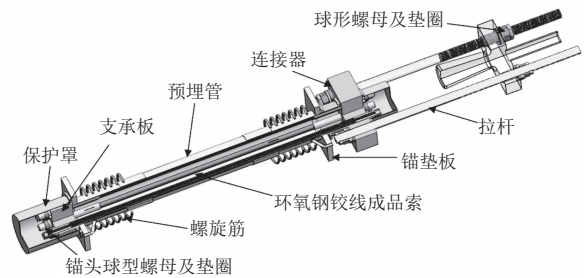


图 1 多股成品索式锚碇锚固系统示意图

随着高强度、大直径主缆索股不断升级, 对锚碇锚固系统提出了更高要求: 一是锚固单元承载力提升; 二是在承载力增加的情况下锚固系统构造尺寸要求紧凑; 三是锚固性能更可靠; 四是防腐性能提升。如继续采用 1 860 MPa 级的多股成品索式锚碇锚固系统, 则锚固系统的规格、尺寸都较大, 锚固系统和锚混凝土体的成本都有较大增加, 为了满足上述要求并控制工程建设成本, 同时为了进一步提升锚固系统的可靠性和耐久性, 开发出了 2 000 MPa 的多股成品索式锚碇锚固系统。

1 2 000 MPa 级多股成品索式锚固系统的设计

1.1 2 000 MPa 级钢绞线的研究

以往桥梁拉索用钢绞线强度级别一般为 1 860 MPa, 随着钢铁冶金材料和制造技术的发展, 桥梁拉索用钢

收稿日期: 2023-06-01

作者简介: 苏强(1973—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事预应力技术工作。

绞线的强度等级也逐渐提高,国家标准《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014)中1×7系列钢绞线最高强度级别为1 960 MPa,国内外对高强度

的钢绞线研究已积累较多的经验。张正基等^[9]介绍了2 000 MPa级(290级)混凝土用预应力钢绞线的开发应用,其主要性能指标如表1所示。

表1 2 000 MPa级钢绞线技术参数

强度级别	公称强度 / MPa	公称直径 / mm	直径偏差 /mm	公称面积 / mm ²	公称质量 / (g·m ⁻¹)	破断力 / kN	屈服力 / kN	延伸率 / %	松弛率 / %
290	2 000	12.7	-0.15~0.66	98.7	775	≥197.4	≥177.7	≥3.5	≤2.5
290	2 000	15.24	-0.15~0.66	140.0	1 102	≥280.0	≥252.0	≥3.5	≤2.5

徐凯等^[10]介绍了1 960 MPa 1×7-21.6大规格高强钢绞线和盘条,平均强度超2 000 MPa。申请号为CN202110648857.4的发明专利“强度2 100-2 400 MPa预应力钢绞线生产工艺”表明更高强度钢绞线的生产工艺已趋成熟。申请号为CN201911213179.8的发明专利“斜拉索用2 160 MPa高强度镀锌钢绞线的生产方法”表明斜拉索用高强钢绞线的生产技术也已趋成熟。

1.2 2 000 MPa级整束挤压钢绞线拉索的锚固设计

为配套2 000 MPa级钢绞线在后张体系和拉索体系中的应用,国内外对其配套锚具和拉索都进行了较多的研究。于滨等^[11]介绍了2 000 MPa级后张预应力锚具的研究。对于高强整束挤压钢绞线拉索,朱元等^[12]介绍了一种超高强度(2 200 MPa)钢绞线拉索的研究设计和在旧桥(拱桥吊杆)换索中的应用。与原来1 860 MPa级整束挤压钢绞线拉索相比,更高强度等级的整束挤压钢绞线拉索主要通过增加锚固长度、改进锚固套楔形夹具、增加径向挤压力来改进。

经研究对比,拱桥吊杆用挤压索和锚碇工程用挤压索在设计应力、疲劳要求、结构尺寸和施工要求等都所有不同,如表2所示。《挤压锚固钢绞线拉索》(JT/T 850—2013)标准主要适用于斜拉桥拉索和拱桥吊杆,岩锚拉索和建筑结构用拉索可参照使用。该标准挤压拉索疲劳性能应满足上限应力45% f_{pk} 、应力幅200 MPa,循环200万次疲劳性能试验。该标准规定了挤压拉索端部锚具的外径尺寸,但对锚具长度没有规定,所以针对更高强度等级的钢绞线锚固需要,主要通过加长锚具锚固长度的方法增加锚固力。同时拱桥吊杆用挤压拉索一般为直线束设计,无弯曲孔道设计,所以施工工艺较为简单。而对于锚碇工程用挤压索,其应用工况类同体内索,其设计应力一般为0.55~0.60 f_{pk} ,其疲劳性能要求是满足上限应力65% f_{pk} 、应力幅80 MPa,循环200万次疲劳性能试验。为适应有弯曲预应力孔道的锚碇工程需要,挤

压索锚具长度不能过大,长度过大会影响穿索或需增大孔道尺寸。综上所述,对于锚碇用2 000 MPa级挤压拉索,需要在拱桥吊杆用挤压索基础上改进,才能更好满足锚碇工程的需要,主要从以下几个方面改进。

表2 两种应用工况的挤压拉索对比

拉索类型	设计应力	疲劳要求	结构尺	施工要求
拱桥吊杆用挤压索	0.4~0.45 f_{pk}	应力幅200 MPa, 200万次	锚头外径小, 长度长	张拉应力低,无弯曲孔道
锚碇用挤压索	0.55~0.60 f_{pk}	应力幅80 MPa, 200万次	锚头外径小, 长度短	张拉应力较高,常有弯曲孔道

(1)在不增加锚具长度情况下增加锚具挤压力,提高锚具锚固力。与1 860 MPa级钢绞线相比,2 000 MPa级钢绞线的承载力增加约7.5%,且钢绞线表面硬度更高,所以关键在于要设法增加锚具对钢绞线的挤压力。

(2)改进锚具后端部楔形夹具,进一步增加锚具后段部分对钢绞线的挤压力和夹持力,进一步提高锚固可靠性。

(3)提高锚具挤压后对钢绞线的咬合摩擦力。

1.3 2 000 MPa级多股成品索式锚固系统的构造设计

2 000 MPa级多股成品索式锚固系统的设计原则、总体结构与1 860 MPa级多股成品索式锚固系统类同,锚固系统由索股锚固连接构造和预应力锚固构造组成。索股锚固连接构造由拉杆组件、连接平板及连接筒组成;预应力锚固构造由管道、2 000 MPa级环氧钢绞线成品索及锚具、锚头防护帽等组成。相对1 860 MPa级多股成品索式锚固系统,2 000 MPa级多股成品索式锚固系统因承载力增加,相应的索股锚固连接构造(拉杆组件、连接平板及连接筒)部份尺寸也有所增加,预应力锚固构造部份尺寸基本相同或稍有增加,这保证锚固单元在锚面排布时的水平向、竖直向间距不变,保证锚混凝土体结构大小不变,这样在承载力增加的情况下锚碇工程的建设成本变化不大。

1.4 2000 MPa 级多股成品索式锚固系统的防腐设计

一般地,钢材使用应力越高,对腐蚀越敏感。为进一步提升多股成品索式锚固系统的防腐性能,针对原有 1 860 MPa 级多股成品索式锚固系统的索体和锚头提出防腐设计改进。

(1)涂蜡护套钢绞线研究

常用挤压成品索索体一般由单根防腐钢绞线(环氧涂层+油脂或蜡+小PE)+高强聚脂带+外包大PE组成。单根防腐钢绞线内的防腐材料应具有良好的化学稳定性,对周围无侵蚀作用。防腐油脂性能应符合规范《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》(JG/T 430—2014)中的规定,一般选用 2 号油脂。蜡技术性能指标应符合《挤压锚固钢绞线拉索》(JT/T 850—2013)中的规定,如表 3 所示。油脂或蜡的用量应足以保证填满钢绞线与护套之间以及各钢丝之间的空隙,应遍布整根钢绞线。国内外以前多采用成本相对低的油脂,但采用蜡的情况已越来越多。蜡与油脂相比,总体更耐久,不易流淌,但成本稍高。通过对现有无粘结 PE 护套钢绞线生产线的改进,生产出了涂蜡的护套钢绞线,用于 2 000 MPa 级挤压索的索体。

表 3 蜡技术性能指标

工作温度 / ℃	密度 / (g·cm ⁻²)	锥入度 / mm	释油率 / %	滴点 / ℃
-40~80	0.85~0.92	11.0~17.0	≤0.5	≥70

(2)挤压索锚头防腐改进

在钢绞线索锚头挤压成形并车削螺纹后,因索体长度长,且索体已与锚头固结,采用需加热镀层作为防腐层的方法难以实施,所以常采用表面涂漆的方法进行临时表面防腐处理。但涂漆后,索体在运输、安装过程中不可避免出现磕碰,表面的漆层易脱落,且张拉锚固时,螺母在锚头旋合时也易导致表面的漆层脱落,所以在施工期间涂漆的锚头易出现锈蚀情况,如图 2 所示。为提高挤压锚头的临时防腐性能,开发了涂刷油性缓蚀剂的方法,该方法生产环保,且在运输、安装过程中不会因为磕碰或螺母旋合出现涂层脱落现象,如图 3,有效解决了锚头在施工期间临时防腐的问题。锚索张拉后在安装保护罩前,还需要按设计要求在锚头表面再涂上油性蜡或进行 OTC(氧化聚合包覆防腐)处理。

2 2 000 MPa 级挤压索试验研究

为检验新型锚固系统的各项性能,进行连接器-拉杆组件静载、拉杆组件疲劳、2 000 MPa 挤压索静



图 2 涂漆锚头



图 3 涂缓蚀剂锚头

载与疲劳等各项试验研究。以下是 2 000 MPa 挤压索的静载试验和疲劳试验。

2.1 2 000 MPa 级挤压索静载试验

试验按《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370—2015)中的规定进行,选取 GJ15-3、GJ15-4、GJ15-7 三种规格的 2 000 MPa 级钢绞线挤压拉索进行了静载试验,试验结果都满足标准要求,其中锚具效率系数都在 1.0 左右,如表 4 所示。钢绞线破断情况如图 4 至图 6 所示,钢绞线断口全为颈缩破断,没有出现钢绞线从锚具中滑脱情况,也没有出现钢绞线剪切破断跟况,这表明了针对 2 000 MPa 钢绞线的挤压锚固设计与工艺改进,达到了很好的锚固效果,索静载试验与钢绞线母材试验结果相当。

2.2 2 000 MPa 级挤压索疲劳试验

锚碇用挤拉索的疲劳性能不同于斜拉索,更类似于体内索,因此按《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370—2015)要求进行疲劳试验研究。选取单索股锚用 GJ15-4 挤压索和双索股锚用 GJ15-7

表4 2000 MPa 挤压索静载试验结果

拉索规格	锚具效率系数 η_a	总伸长率 ε_{iu}	标准要求	结论	破断情
GJ15-3	0.995	3.0%		合格	钢绞线颈缩1丝
GJ15-3	0.987	3.0%		合格	钢绞线颈缩1丝
GJ15-3	0.992	3.3%		合格	钢绞线颈缩1丝
GJ15-4	1.00	2.5%	$\eta_a \geq 0.95$	合格	钢绞线颈缩1丝
GJ15-4	1.02	3.2%	$\varepsilon_{iu} \geq 2.0\%$	合格	钢绞线颈缩2丝
GJ15-4	1.01	2.8%		合格	钢绞线颈缩1丝
GJ15-7	1.02	3.1%		合格	钢绞线颈缩2丝
GJ15-7	1.03	3.4%		合格	钢绞线颈缩2丝
GJ15-7	1.02	3.5%		合格	钢绞线颈缩1丝



图6 GJ15-7 拉索钢丝断口

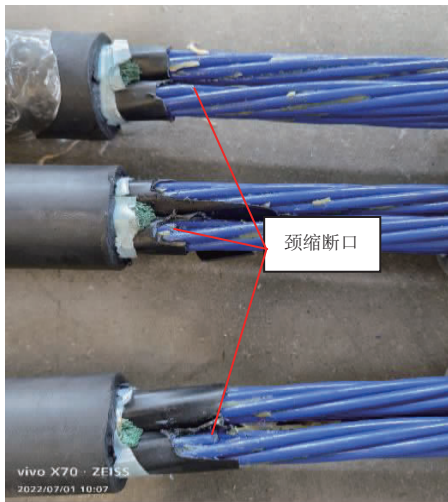


图4 GJ15-3 拉索钢丝断口



图5 GJ15-4拉索钢丝断口

挤压索各三组试样,按上限应力 $65\% f_{pk}$ 、应力幅度 80 MPa、循环次数 200 万次进行了疲劳试验,试验后样品完好,锚具不失效,没有发生断丝或滑丝,满足了标准要求,如表 6 所示。

3 工程应用与结论

2000 MPa 级多股成品索式锚碇锚固系统已成

表6 2000 MPa 挤压索疲劳试验结果

锚具规格	疲劳破坏截面积 / %	疲劳次数 / 万次	标准要求	结论
GJ15-4	0	200		合格
GJ15-4	0	200	疲劳破坏	合格
GJ15-4	0	200	截面积 $\leq 5\%$	合格
GJ15-7	0	200	锚具不失效	合格
GJ15-7	0	200	不滑丝	合格
GJ15-7	0	200		合格

功开发并已在深中通道伶仃洋大桥锚碇工程、广西龙门大桥锚碇工程中成功应用。伶仃洋大桥锚碇工程共使用 172 套单索股锚固单元和 312 套双索股锚固单元,如图 7 所示。广西龙门大桥锚碇工程共使用 42 套单索股锚固单元和 240 套双索股锚固单元,如图 8 所示。锚固系统在施工中锚固性能可靠、方便快捷,很好地满足了工程设计和施工要求。另外,填充蜡的索体防腐技术和采用油性缓蚀剂的锚头防腐技术,已在四川宜攀高速卡哈洛金沙江特大桥、贵州纳晴高速公路牂牁江特大桥、四川宁攀高速公路黑水河特大桥、四川金宁高速公路川滇金沙江特大桥、贵州六安高速花江峡谷大桥、重庆安来高速白帝城长江大桥等锚碇工程上成功应用。



图7 伶仃洋大桥锚固系统应用



图8 龙门大桥锚固系统应用

通过设计研究、试验与应用表明:2 000 MPa 级多股成品索式锚碇锚固系统具有降低工程建设成本、锚固可靠、耐久性好、结构紧凑等的优点,已成为当今锚碇工程设计的首选。

参考文献:

- [1] 母俊莉,张军,江晨鸣.1 960 MPa 悬索桥主缆用高强钢丝开发[J].金属制品,2018,44(5):17-21.
- [2] 卢靖宇,蔡依花,薛花娟,等.1 960 MPa 超高强锌铝合金镀层钢丝主缆索股静载性能试验研究[J].金属制品,2017,43(3):37-43.
- [3] 彭春阳,李启富,莫仁俊,等.大直径高强度钢丝主缆索股制造技术[J].天津建设科技,2022,32(1):25-28.
- [4] 叶觉明,张太科,鲜荣,等.1 960 MPa 级钢丝加工及其在悬索桥主缆上的应用[J].金属制品,2015,41(2):1-6.
- [5] 陈焕勇,宋神友,张海良,等.伶仃洋大桥 2 060 MPa 锌铝镁多元合金镀层钢丝索股制作关键技术[J].桥梁建设,2022,52(5):21-27.
- [6] 梅刚,陈占力,吴明远,等.虎门二桥锚固系统设计[J].广西科技大学学报,2016,27(增刊1):228-233.
- [7] 吴明远,梅刚,陈占力.多股成品索式预应力锚固系统研究[C].//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2015 年全国桥梁学术会议论文集.北京:中国公路学会 2015:727-731.
- [8] 苏强,吴东明,谢正元.多股成品索锚碇锚固系统关键技术研究[J].中外公路,2018(4):197-200.
- [9] 张正基,周鸣涛,张伟君.2 000 MPa 混凝土用预应力钢绞线的开发应用[J].金属制品,2004,30(6):9-10.
- [10] 徐凯,陈殿清,郝文权,等.1 960 MPa 级 $1 \times 7-21.6$ 大规格高强度钢绞线和盘条试制[J].金属制品,2022,48(5):4-6.
- [11] 于滨,冯大斌,聂永明,等.2 000 MPa 级钢绞线锚具—QM V 新型锚具的研究与应用[C].//第十一届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会议论文集.北京:中国建筑科学研究院,2001:215-224.
- [12] 朱元,李翔,韦耀林,等.超高强度钢绞线拉在旧桥换索中的设计应用[J].城市道桥与防洪,2018(3):211-218.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com