

斜拉桥索塔锚固区预应力精轧螺纹钢断裂 试验研究及失效分析

马冰^{1,2}, 高立强^{1,2}, 王康宁^{1,2}

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 湖北 武汉 430034; 2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘要: 针对斜拉桥索塔锚固区预应力精轧螺纹钢突发断裂的问题, 通过构建足尺“Ⅱ”字型张拉试验台座, 对28根直径32 mm的精轧螺纹钢开展多因素耦合下为期1年的长期监测试验, 以弥补现有研究多基于实验室标准试件、缺乏大尺度工程工况长期数据的不足。结果表明: 螺纹钢张拉锚固后瞬时预应力损失约为4.4%, 前3个月增长迅速, 长期累计损失趋于30%的稳定水平; 1根PSB1200级钢筋在锚固4个月后发生断裂。经失效分析, 钢筋断裂模式为脆性过载, 裂纹始于螺纹牙底, 呈沿晶断裂形貌, 揭示了高张拉应力、螺纹牙底应力集中与材料脆性三者耦合作用下的延迟断裂机理。分析结果可为既有桥梁预应力精轧螺纹钢断裂的预防和处置提供试验支撑和参考。

关键词: 精轧螺纹钢; 脆性断裂; 预应力损失; 试验研究; 失效分析

中图分类号: U446.1; TG115

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0202-06

Experimental Study and Failure Analysis on Fracture of Prestressed Fine-Rolled Threaded Steel Bars in Anchoring Zone of Cable-stayed Bridge Pylons

MA Bing^{1,2}, GAO Liqiang^{1,2}, WANG Kangning^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway Bridge Science Research Institute, Co., Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: To address the issue of sudden fracture of prestressed fine-rolled threaded steel bars in the anchorage zone of cable-stayed bridge pylons, a full-scale “Ⅱ”-shaped tensioning test rig is constructed to conduct a one-year long-term monitoring test on 28 prestressed fine-rolled threaded steel bars with a diameter of 32 mm under multi-factor coupling conditions in order to address the shortcomings of existing research, which is largely based on laboratory standard specimens and lacks long-term data on large-scale engineering conditions. Results show that the instantaneous prestress loss after tensioning and anchoring of the threaded steel bars is approximately 4.4%, increasing rapidly in the first three months, and then stabilizing at a cumulative loss of 30% over the long term. One PSB1200 grade steel bar fractured after being anchored for four months. Failure analysis reveals that the fracture mode of steel bar is a brittle overload one, with cracks originating at the thread root and exhibiting an intergranular fracture morphology. The analysis result reveals the delayed fracture mechanism under the coupled effects of high tensile stress, thread root stress concentration, and material brittleness, providing experimental support and reference for the prevention and treatment of prestressed fine-rolled threaded steel bar fracture in existing bridges.

Keywords: fine-rolled threaded steel bar; brittle fracture; prestress loss; experimental study; failure analysis

0 引言

斜拉桥索塔锚固区作为承担索力传递的核心部

位,其受力状态极其复杂^[1-2]。为平衡斜拉索产生的水平推力,工程中普遍通过精轧螺纹钢施加横向预应力,具有施工简便和力学性能优异等优点^[3-5]。然而,国内外多起工程实践表明,这类高强度螺纹钢在长期服役或施工后期常会发生毫无征兆的脆性断裂事故^[6]。例如2024年德国德累斯顿卡罗拉桥(Carola Bridge)的倒塌事件^[7-8],初步调查指出,预应力筋在腐蚀与应力耦合作用下的脆性断裂是导致结

收稿日期: 2026-03-25

基金项目: 中铁大桥局集团有限公司科学技术研究与开发课题(2023-52-重点)

作者简介: 马冰(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁新材料和新结构研究工作。

构连续失效的主因。此类病害具有极大的突发性和隐蔽性,断裂前往往无明显的几何变形或裂缝预警,因而会对周边行人、车辆及桥梁附属结构构成极大威胁^[9]。运营期内预应力钢筋的突发断裂已成为危及桥梁安全的重大隐患。

国内外针对高强钢筋断裂机理开展了广泛研究。Yokobori 等^[10-12]通过数值分析得出:在弹塑性局部应力场下,氢原子将向凹口裂纹尖端的最大三轴向拉应力(静水拉应力)扩散和聚集,而由于氢原子的聚集,高强度钢中极易产生微裂纹,从而导致钢材的脆性断裂。氢脆断裂多为生产工艺、使用环境等因素导致材料内部氢含量过高所致。周宏戈^[13]对某桥梁施工中精轧螺纹钢脆断现象的分析结果表明,螺纹钢表面及内部存在夹渣会导致缺陷处产生应力集中而萌生裂纹,并迅速扩展断裂。张莹等^[14]、王晓东等^[15]、杨文玲等^[16]分别对 PSB930、PSB1080 级螺纹钢的断裂进行了失效分析,发现表面缺陷、材料韧性不足等是钢筋断裂的重要诱因。朱万旭等^[17]对港珠澳大桥桥墩拼接用大直径螺纹钢进行了应力腐蚀断裂试验研究,揭示了大直径高强螺纹钢应力腐蚀规律。李宇欢^[18]研究了应力集中对大直径冷滚压螺纹钢疲劳性能的影响,给出了实际工程应用中预应力张拉控制值。尹亚豪等^[19]对某快速路悬臂结构的多根预应力精轧螺纹钢在张拉锚固完成后出现的断裂现象进行分析,发现钢筋近表面处的组织为回火马氏体,使钢筋表面对应力腐蚀较为敏感,且在安装钢筋后未对其采取有效保护措施,导致钢筋表面出现腐蚀坑,在拉应力和剪切应力的作用下,最终导致钢筋断裂。

综上,现有研究已初步明确了高强螺纹钢断

裂的主要影响因素,包括氢脆和应力腐蚀、材料缺陷和组织不均、应力集中和高张拉应力等,但这些研究多基于实验室小尺寸标准试件或现场案例开展,缺乏在大尺度台座上模拟复杂施工工况的长期监测数据,对 PSB1200 级超高强螺纹钢的延迟断裂机理的研究也不够深入。

基于此,本研究旨在通过足尺张拉锚固试验,还原工程实际病害环境,探究多因素耦合下的钢筋受力演变机理,揭示其脆性断裂的微观机制,为既有桥梁的病害处治及预防提供详实的试验支撑。

1 试验方案

1.1 试验设计

从长期受力的角度,根据影响预应力螺纹钢断裂的因素,开展预应力张拉试验。选取直径为 32 mm、等级分别为 PSB930 和 PSB1200 的精轧螺纹钢共 28 根,均采购自同一生产厂家的相同生产批次产品。根据工程病害调查结果,设计了以下 4 类对比变量组:

(1)应力水平组。对比张拉控制应力不同时的受力差异,部分试件设置 105% 超张拉工艺。

(2)端部状态组。通过调整千斤顶张拉角度,模拟施工安装误差导致的端部不平整工况。

(3)防护环境组。设置裸露空气、铁皮套管防护、套管内注浆密实 3 种工况,模拟不同的防腐性能及应力腐蚀环境。

(4)锚具差异组。采用球头锚具与非球头锚具,评估锚具匹配性对螺纹钢锚固性能的影响。

上述每种参数设置 3 至 4 个试件,具体张拉参数见表 1。

表 1 张拉参数表

序号	螺纹钢等级	张拉控制应力	锚具类型	端部是否齐平	腐蚀环境	试件数量
1	PSB930	0.90(超张拉工艺)	非球头锚具	是	铁皮管	3
2	PSB930	0.95	非球头锚具	是	铁皮管	3
3	PSB930	0.90	球头锚具	是	铁皮管	3
4	PSB930	0.90	非球头锚具	是	铁皮管+灌浆	3
5	PSB930	0.90	非球头锚具	是	暴露空气中	4
6	PSB930	0.90	非球头锚具	否	铁皮管	4
7	PSB1200	0.90	非球头锚具	是	铁皮管	4
8	PSB930	0.75	非球头锚具	是	铁皮管	4

1.2 试验装置

考虑到螺纹钢张拉数量较多,且需要与外界环境接触来模拟螺纹钢锈蚀,因此设计“Ⅱ”字型张拉台座,螺纹钢沿支撑墙对称布置。张拉台座及螺纹钢布置见图 1。

预应力螺纹钢直径 32 mm,混凝土台座开孔直径 45 mm,且预应力螺纹钢需要配置锚下螺旋筋,螺旋筋自身直径不小于 12 mm,外径 120 mm,层数不小于 6 层,层间距 45 mm。混凝土台座全长 9 000 mm,采用 C50 混凝土,钢筋采用 HRB400;所有纵向钢筋直

应力损失情况见图3。

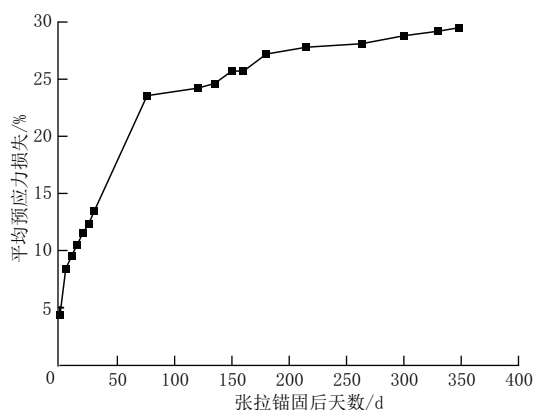


图3 螺纹钢平均预应力损失

长期监测结果显示,螺纹钢的预应力损失分为2个阶段:前3个月为第1阶段,该阶段预应力损失增加迅速,达到约25%;3个月后为第2阶段,该阶段预应力损失曲线逐渐趋于平稳,损失增长率显著降低。截至监测结束,螺纹钢的总预应力损失稳定在30%以内。

螺纹钢张拉锚固完成时,全部钢筋均正常工作,无断裂、无损伤;张拉锚固完成4个月后,其中1根PSB1200级螺纹钢发生断裂,其外观如图4所示。



图4 断裂钢筋试样外观

3 失效分析

为探究PSB1200级螺纹钢断裂的原因,对该失效钢筋断口进行了宏观、金相和化学成分等分析。

3.1 断口分析

失效钢筋断口的宏观形貌见图5。该断口位于螺纹段,从中可见平坦区和陡峭区;平坦区存在棱线特征并有一定收敛性,收敛处即为起裂区,即起裂区位于螺纹牙底位置附近;陡峭区可见剪切唇特征,应是最终断裂区域。

将断口适当清洗后,利用扫描电镜对断口分区的微观形貌进行观察,结果见图6。

由图6可见:位于断口边缘区域的A区可见沿晶形貌;B、C、D区域均可见沿晶+韧窝混合断口形貌;E区则可见韧窝形貌。

由此可见,裂纹起裂区位于断口边缘,裂纹起源

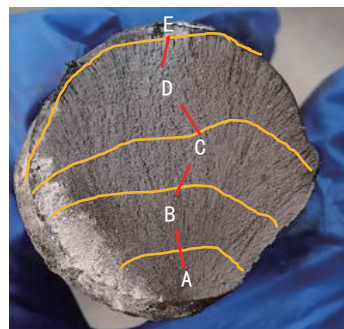
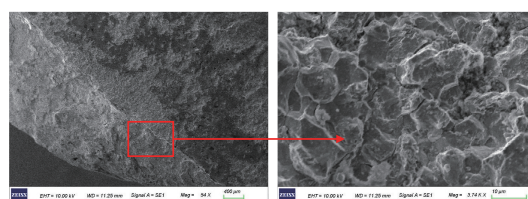
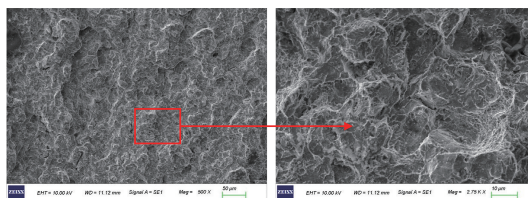


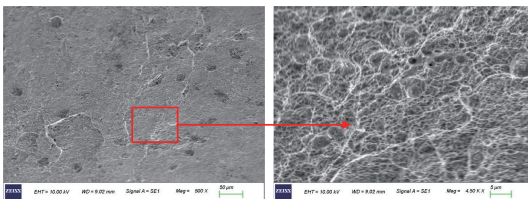
图5 失效钢筋断口分区示意图



(a) 断口A区



(b) 断口B、C、D区



(c) 断口E区

图6 失效钢筋断口分区的典型微观形貌

后呈发散扩展,扩展路径大致如图5中箭头所示。断面未见疏松、夹渣、气孔等冶金缺陷。

3.2 金相检查

将失效钢筋镶样、磨样、抛光,然后观察其断口截面的金相显微形貌,结果见图7。

由图7可知:在抛光态下失效钢筋断口未见夹杂、气孔等缺陷;腐蚀后,断口表面局部区域可见脱碳情况,未见完全脱碳层;断口表面凹凸不平,未见《预应力混凝土用螺纹钢》(GB/T 20065—2016)中不允许存在的裂纹、折叠缺陷。

根据《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》(GB/T 10561—2023)中A法判定,送检钢筋基体非金属夹杂物检测结果为:A类(细系)0.5级,D类(细系)1级,符合上述标准要求。

3.3 机械性能

根据《预应力混凝土用螺纹钢》,对失效钢筋进行拉伸试验和芯部硬度试验,结果见表3。

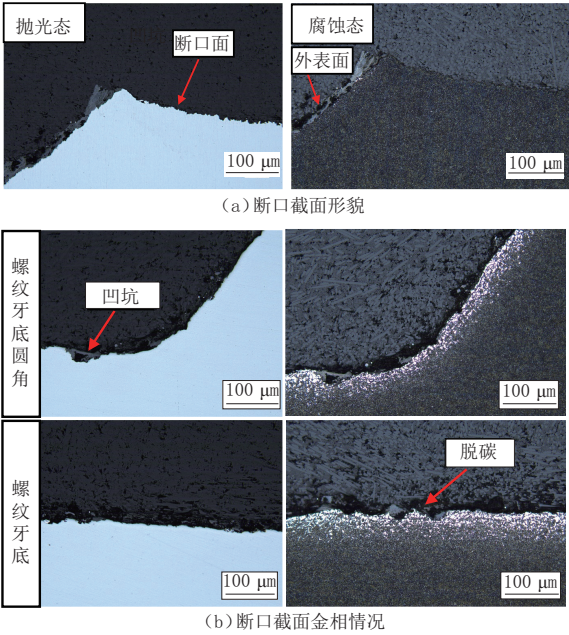


图7 失效钢筋断口截面的金相显微形貌

表3 失效钢筋机械性能试验结果

测试项目	实测值	标准要求
抗拉强度/MPa	1 450	≥1 330
屈服强度/MPa	1 280	≥1 200
断后伸长率/%	6.0	≥6.0
最大力总伸长率/%	3.4	≥3.5
芯部硬度/HV	470/472/478	

由表3可见,失效钢筋的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率均符合上述标准要求,最大力总伸长率则低于上述标准要求。

3.4 化学成分分析

使用直读光谱仪对失效钢筋断口进行化学成分分析,结果见表4。

表4 失效钢筋断口的化学成分含量

测试项目	实测值	标准要求
C	0.41	
Si	0.82	
Mn	1.44	
S	0.005	≤0.035
P	0.028	≤0.035

由表4可见,失效钢筋断口的材质符合《预应力混凝土用螺纹钢筋》中关于S、P元素的要求。

3.5 综合分析

对失效断裂的PSB1200级预应力螺纹钢筋断口进行宏观和微观检查,发现其表面凹凸不平。而该缺陷容易形成应力集中,加剧应力分布不均,促进裂纹萌生。

断裂钢筋属第7组,该钢筋端部安装齐平,无偏心受力现象,且其瞬时预应力损失水平与同组其他

试件一致,排除了因端部不齐平导致的额外应力集中影响;采用非球头锚具,在试验中其安装精度控制良好,未出现明显偏心受力,锚具匹配性未对钢筋断裂产生显著影响。断裂的螺纹钢筋张拉应力为1 080 MPa,接近钢筋屈服强度(1 200 MPa),当其受到较大载荷时(如振动、冲击等),就易在应力较大区域发生断裂,这是导致钢筋发生失效的外因。而影响钢筋脆性的主要因素包括:S、P有害元素含量,冶金缺陷,显微组织,强度,硬度,应力分布情况等。

送检螺纹钢筋微观检查结果显示:钢筋基体非金属夹杂物正常,断口源区未见夹杂(渣)、气孔等缺陷;断口的化学成分符合标准规定。故基本可以排除冶金缺陷、有害元素含量的原因。

硬度检测结果表明:钢筋的平均芯部硬度在473 HV左右。较高的硬度能提升材料部分力学性能,但也会增加材料脆性,失效钢筋的最大力总伸长率低于标准要求即从侧面印证了螺纹钢筋的脆性较高。由于螺纹钢筋强度本身较高,加之安装时应力较大,也会增加材料的脆性断裂风险。

综合上述分析可知,在高张拉控制应力下,在失效钢筋断口螺纹牙底几何不连续处的微观凹凸不平引发了局部应力集中;同时,材料实测芯部硬度偏高且最大力总伸长率低于标准要求,也显著提升了材料对缺口和过载的敏感性。在4个月的持续高应力作用下,微裂纹于螺纹牙底应力峰处萌生并沿晶界扩展,最终导致钢筋无预兆瞬时断裂。该过程未见明显塑性变形,其断裂模式为脆性过载断裂。

4 结 语

(1)预应力螺纹钢筋锚固完成后张拉损失可控,平均损失率约4.4%;锚固后前3个月为损失快速增长期,长期累计预应力损失在30%以内。

(2)张拉时端部不齐平的钢筋,其瞬时预应力损失平均值比齐平组高出约6%,说明偏心会导致锚具内螺纹受力不均,局部滑动量增大。

(3)PSB1200级螺纹钢筋在高张拉应力下发生了无预兆断裂,失效分析证实钢筋在高应力状态下发生的断裂属于延迟脆性过载断裂。断口分析未发现制备缺陷,断裂源于螺纹牙底几何应力集中区,呈现沿晶脆性形貌,材料本身的高硬度与安装后的应力集中是导致其对缺口敏感、发生脆断的内在原因。

(4)建议在既有桥梁处治及新桥设计中,优先选用屈强比较低的钢筋级别,或在采用高强钢筋时参

照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)的要求,将张拉应力严格控制在不超过0.85。

参考文献:

- [1] 彭军安,薛锐,张鹤,等.斜拉桥索塔锚固区环向预应力筋优化方法研究[J].桥梁建设,2024,54(2):57-63.
- [2] 杨万理,杨成发,李谏,等.预应力钢棒体系索塔锚固区力学特性研究[J].世界桥梁,2023,51(4):63-69.
- [3] 夏亚明.某斜拉桥索塔锚固区预应力体系研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [4] 赵丹,冯煜.斜拉桥索塔锚固区应力及优化分析[J].交通科技与管理,2023,4(24):128-130;127.
- [5] 王全利.精轧螺纹钢关键轧制技术的开发和应用[J].河北冶金,2014(8):39-41.
- [6] 王军,李桂芹,王洁,等.高强度螺纹钢断裂分析[J].理化检验-物理分册,2013,49(增刊2):154-157.
- [7] Marx S, Scheerer S, Schacht G, et al. Einsturz der Carola brücke in Dresden Teil 1: Vom ambitionierten Entwurf bis zum tragischen Teileinsturz[J]. Beton-und Stahlbetonbau (S0005-9900), 2025, 120(7): 526-536.
- [8] Schacht G, Marx S, Scheerer S, et al. Einsturz der Carola brücke in Dresden Teil 2: Untersuchungen zu den Einsturzsachen und die Folgen[J]. Beton-und Stahlbetonbau (S0005-9900), 2025, 120(10): 837-846.
- [9] 李鸥,潘中明,侍刚,等.斜拉桥索塔锚固区预应力钢筋断裂及防

护试验研究[J].桥梁建设,2019,49(3):11-16.

- [10] Yokobori A T, Nemoto T, Satoh K, et al. Numerical analysis on hydrogen diffusion and concentration in solid with emission around the crack tip[J]. Engineering Fracture Mechanics (S0013-7944), 1996, 55(1): 47-60.
- [11] 李晓峰.贝氏体和贝氏体/马氏体复相螺纹钢氢脆性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2024.
- [12] 李云玲,钟振前.PSB1080螺纹钢氢脆断裂分析[C]//第195场中国工程科技论坛——中国科学仪器设备与试验技术发展高峰论坛、第四届中国能力验证与标准样品论坛暨国际冶金及材料分析测试学术报告会论文集.北京:中国金属学会,2014:410-410.
- [13] 周宏戈.某预应力斜拉桥用精轧螺纹钢失效分析[J].上海建设科技,2025(5):74-77.
- [14] 张莹,林春来,陶然,等.预应力混凝土用螺纹钢失效分析[J].热加工工艺,2017,46(10):259-261.
- [15] 王晓东,王全利,王立军,等.PSB930预应力钢筋疲劳断裂失效分析[J].河北冶金,2014(8):61-63.
- [16] 杨文玲,张汉山.PB1080螺纹钢的断裂失效分析[J].热加工工艺,2018,47(15):258-260.
- [17] 朱万旭,李明霞,付委.港珠澳大桥桥墩拼接用大直径螺纹钢应力腐蚀断裂试验研究[J].公路,2020,65(10):112-117.
- [18] 李宇欢.应力集中对大直径冷滚压螺纹钢疲劳性能的影响[D].成都:西南交通大学,2023.
- [19] 尹亚豪,郭磊,陈晓东,等.预应力精轧螺纹钢断裂原因[J].理化检验-物理分册,2023,59(9):23-26.

(上接第173页)

- 部交通科技,2024(6):25-28.
- [5] 金涛.山西省胶粉改性沥青与泡沫沥青关键技术研究[J].四川建材,2023(12):21-22;48.
- [6] 冯蕾,杨鑫,常俊鹏.温拌胶粉改性沥青砂浆在冻融作用下的低温性能研究[J].中外公路,2023(5):188-193.
- [7] 李彦,余储琪,钟宏锐.废旧轮胎胶粉改性沥青资源循环利用项目CCER方法学研究——以海泰环保为例[J].中国投资(中英文),2024(增刊5):75-76.
- [8] 廖海燕.基于AHP的胶粉改性沥青路用性能评价方法[J].西部交通科技,2025(1):65-66;99.
- [9] 高英力,李昀博,田维伟,等.胶粉改性沥青预处理技术研究进展[J].材料导报,2025(9):78-87.

- [10] 韩育刚,贺良,龚磊,等.生物油/胶粉改性沥青性能研究[J].北方交通,2024(5):39-42.
- [11] 李中赫.基于层间力学特性的胶粉改性沥青桥面铺装材料与结构设计研究[D].保定:河北大学,2023.
- [12] 吕磊,赵辰,李蕊,等.烯烃复分解催化胶粉改性沥青制备工艺与性能评价[J].中国公路学报,2023(12):143-154.
- [13] 欧阳旻奇,范萌萌,柯卉,等.基于响应曲面法的胶粉改性沥青生产工艺优化研究[J].湖南交通科技,2023(3):64-69.
- [14] 薛玉萍.不同掺量胶粉改性沥青微观机理研究[J].交通世界,2023(27):7-9.
- [15] 甄少华,啜二勇,刘路,等.脱硫胶粉改性沥青的性能研究[J].橡胶工业,2023(10):796-802.