

基于X射线衍射的桥梁有效预应力测试及修正

张亮¹,周旭东²,李彦兵²,李毅²,李鹏飞³,韩旭^{3*}

(1.广东虎门大桥有限公司,广东广州 510180;2.广东省公路建设有限公司湾区特大桥养护技术中心,广东广州 510199;3.交通运输部公路科学研究院,北京市 100088)

摘要:为进一步提升桥梁服役状态并延长结构使用寿命,对桥梁结构钢束的预应力进行有效检测具有重要意义。既有常规检测方法在实际工程测试中存在局限性,且检测结果离散性较大。X射线衍射法从金属材料微观尺度出发,通过晶格间距变化反推宏观应力分布,具有理论明确、测试过程稳定的优势。该文创新性地将X射线衍射法应用于桥梁有效预应力检测中,通过室内张拉对比试验,研究了表面处理工艺优化方法并对桥梁有效应力进行修正。结果表明:X射线衍射法的桥梁预应力测试结果稳定,具有场景适用性强、结果离散性小、测量精度高等优点;采用硬质砂轮片打磨,结合15V铅酸溶液电解2min的表面处理工艺最佳;提出了线性和指数型两种有效应力分级修正公式。研究成果可为X射线衍射法在桥梁应力的测试应用提供参考。

关键词:X射线衍射法;表面处理工艺;修正分析;有效预应力;服役桥梁

中图分类号:U446

文献标志码:A

Test and Correction of Effective Prestress in Bridges Based on X-Ray Diffraction

ZHANG Liang¹, ZHOU Xudong², LI Yanbing², LI Yi², LI Pengfei³, HAN Xu^{3*}

(1. Humen Bridge Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510180, China; 2. Bay Area Super Major Bridge Maintenance Technology Center of Guangdong Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510199, China; 3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To further enhance the service performance of bridges and prolong structural service life, it is of critical importance to effectively detect the prestress of structural steel strands in bridges. Conventional detection methods have limitations in practical engineering applications, showing substantial variabilities in test results. The X-ray diffraction (XRD) method, based on the microscopic scale analysis of metallic materials, derives macroscopic stress distribution through lattice spacing variations, demonstrating theoretical clarity and testing stability. This study pioneered the application of XRD in the field of effective bridge prestress detection. Comparative laboratory tension tests were conducted to investigate surface treatment process optimization and correct effective stress. The results demonstrate that the XRD method exhibits remarkable stability in prestress detection, with advantages including diverse application scenarios, low result variabilities, and high detection accuracy. Optimal surface treatment is achieved through grinding with hard abrasive wheels in combination with two-minute electrolysis in a 15 V lead-acid solution. Both linear and exponential correction formulas for effective stress grading are proposed. The research outcomes provide references for implementing XRD technology in bridge prestress detection.

Keywords: X-ray diffraction method; surface treatment process; correction analysis; effective prestress; bridge in service

0 引言

随着中国桥梁数量的日益增多,交通网建设持

续完善,中国桥梁已由“以建为主”转入“建养并举”时代。然而,早期建设的桥梁随着服役年限的增长,不可避免地产生预应力损失,导致结构耐久性下降、

收稿日期:2025-03-28(修改稿)

基金项目:广东省交通集团科技项目(编号:JT2023YB07)

作者简介:张亮,男,硕士,高级工程师。E-mail:915527702@qq.com

*通信作者:韩旭,男,博士,助理研究员。E-mail:han.xu@rioh.cn

挠度增加,进而危害桥梁正常运营,甚至造成严重后果^[1]。为提升桥梁服役性能并延长结构使用寿命,对预应力结构永存应力进行定期检测尤为重要。针对这一需求,研究者们基于不同基础理论模型,提出了相应有效应力的检测方法,如反拉法^[2-4]、应力释放法^[5-7]、振动法^[8-9]、声发射检测法^[10-11]及电磁效应检测法^[12]等。然而,目前提出的预应力结构的有效测试方法均存在一定的应用局限性,且测量结果离散性较大,无法准确把握结构的真实应力状态,难以指导后续的结构服役性能评估及维护措施的制定。

除预应力筋外,锚头状态和管道压浆质量等作为预应力体系的重要组成部分,其指标性能变化也会改变结构的应力场分布,进一步影响结构预应力的数值^[13]。而埋入式有黏结锚下有效预应力检测一直是困扰工程界的难题。研究表明:长期运营状态下的管道注浆质量离散性普遍较大^[14],导致黏结应力沿全桥分布呈现明显的非线性特点。现有测试方法大多无法考虑沿程的有效预应力幅值差异,致使测试结果与真实应力分布差异较大,得出不保守的测试结果。此外,目前有效预应力检测技术^[15-17]的研究仍存在技术限制,测试结果的离散性、准确性和可靠性等方面仍然需要完善,以满足实际工程的测试需求。

根据实际工程检测需求,本文将X射线衍射测试法应用到桥梁有效应力的检测场景,系统介绍其理论测试原理,总结适用性条件,提出表面处理工艺优化方法和应力分级修正公式,为X射线的进一步现场应用提供技术基础。

1 基于X射线衍射法的应力检测方法

1.1 X射线衍射法测试原理

X射线(又称为伦琴射线),具有频率高、波长短、能量大的特点。当X射线照射在物质上时,仅少部分被吸收,大部分经由原子间隙透过,即对绝大多数材料表现出一定的穿透特性。X射线的本质是高能电磁波,当遇到障碍物时,除了穿透物质外,电磁波也会发生衍射现象。1913年,布拉格父子发现在特定的波长及入射角时,晶体反射出来的辐射会形成集中的波峰,并提出了著名的布拉格定律以描述这一现象^[18],即为:

$$2d \sin \theta = n\lambda (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中: d 为被测晶体的晶格面间距; θ 为布拉格角,定义为入射光线和对应晶面之间的水平夹角; n 为衍射级数(取正整数); λ 为入射光线的波长。

X射线衍射法测量残余应力的原理基于布拉格方程。如图1所示,当两束同波长、同相位的X射线照射固态晶体时,会被内部对应的两个原子散射出来。下侧的射线被散射后,相较于上侧的射线产生了 $2d \sin \theta$ 的相位差。根据方程,当相邻射线束的距离等于辐射波长的倍数时,散射后的两束辐射波就会产生相长干涉,在 2θ 角位置接收到的X射线反射强度最大,最大位置称之为衍射峰。

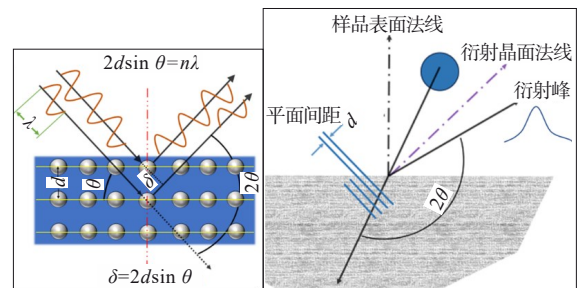


图1 X射线衍射法测试原理

Figure 1 Testing principle of XRD method

在材料内部有应力存在时,晶体内部晶格会发生畸变,平行于应力方向的晶面之间的间距会发生变化,由方程(1)可知:被测晶体晶格面间距变化可通过布拉格角度变化确定。由此可以建立外部应力-应变与布拉格衍射角度的关系。

通过衍射角度 θ 和X射线波长 λ 可以计算材料晶面间距 d 。在材料内部应力变化时,晶面间距变化为 d_i ,联立布拉格方程和材料的应变关系,有:

$$\begin{cases} d_i = \frac{n\lambda}{2\sin \theta_i} \\ \epsilon_i = \frac{d_i - d_0}{d_0} \end{cases} \quad (2)$$

通常取衍射级数 $n=1$,联立上述方程可得布拉格衍射角变化后的应变变化情况。由于钢绞线为各向同性材料,根据弹性力学理论,其应变可以由3个方向的应力表示,如式(3)所示。计算可得钢绞线中的永存应力值。

$$\epsilon = \frac{1}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 为主应力分量。

对于大多数材料来说,X射线的穿透深度一般较

短,通常可以近似认为 $\sigma_{33}=0$ 。

1.2 X射线衍射测试

依据布拉格定律,测试时应根据现有试样材料的晶体结构合理确定辐射和衍射晶面,力求得到孤立、完整、峰高(强度)、峰背比较好的衍射峰。针对工程常用的钢绞线多为铁素体钢及铸铁材料,晶体结构为体心立方结构,根据《无损检测 X射线测定方法》(GB/T 232—2018)^[19]有关规定,选定辐射靶标为 $\text{CrK}\alpha$,将衍射线角度调整为 156° ,可确保获取高质量的衍射峰图像。由于辐射剂量限制,X射线衍射深度仅为 $5\ \mu\text{m}$ 左右,测试前需进行打磨和电解,充分消除氧化层、镀锌层和锈蚀产物对测试结果的干扰。参考《无损检测 X射线应力测定方法》(GB/T 7704—2017)^[19]标准化测试流程,根据测试需求,拟定了以下标定方法及测试步骤:

(1) 测试开始前应在实验室条件下完成应力测试结果标定。如图2(a)、(b)所示,应力测试标定时,应使用 $\text{CrK}\alpha$ 辐射和(211)晶面,仪器连续测试不少于5次,X射线测试设备测定的应力平均值和试验实际施加的张拉应力值之差不应大于 $14\ \text{MPa}$,最大测量标准差不应大于 $16\ \text{MPa}$ 。

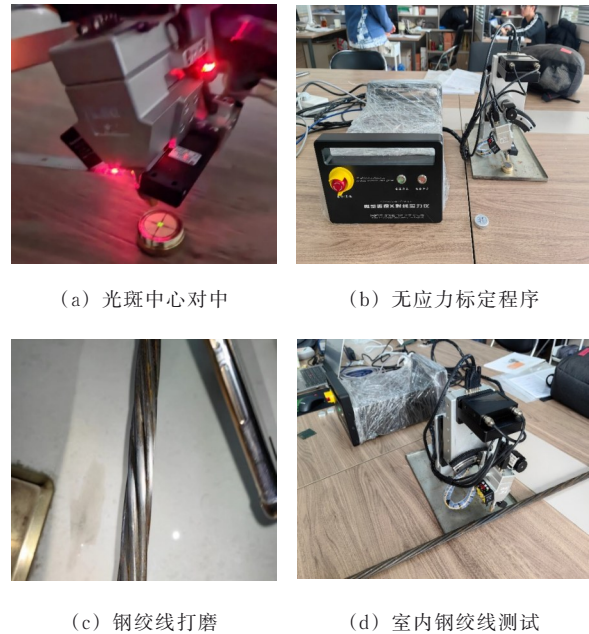
(2) 测试前将衍射角 2θ 设置为 156° ,扫描步距建议设置为 0.1° ,线阵探测器曝光时间的选择以能够得到计数足够高、起伏波动相对较小的衍射峰,而又不至于过分消耗测试时间为目标,建议取值为 $1.0\ \text{s}$ 。

(3) 针对体内预应力钢束,对测试钢绞线位置的混凝土板进行小范围开槽处理,露出被测试段的预应力筋。混凝土开槽前,应对开槽部分的混凝土板对结构的影响进行详细验算和评定,确保开槽后结构的受力安全不受影响。

(4) 对测试位置的钢绞线进行打磨,直至露出金属光泽,如图2(c)所示,并对测试表面进行电解抛光以消除附加应力的影响,电解作业流程应严格按照《金属试样的电解抛光方法》(YB/T 4377—2014)^[20]执行,最大化减小表面处理工艺误差对测试结果的影响。

(5) 将应力测试仪放入槽口内,置于被测点位上方,并进行测试点定位,如图2(d)所示。测试点的中心应准确置于仪器指示的测试点中心、X射线光斑中心、测角仪回转中心三者相重合的位置,试样待测应力方向应平行于仪器的应力方向平面。

(6) 每个单点位置的应力测试次数不应小于3



(a) 光斑中心对中

(b) 无应力标定程序

(c) 钢绞线打磨

(d) 室内钢绞线测试

图2 X射线衍射法应力测试流程

Figure 2 Stress test process by XRD

次,最终测量值可取为若干次测试数据的平均值。若单点3次测试结果的标准差超过 $50\ \text{MPa}$,此时应增加被测点位的测试次数,保证该点的测试次数不少于5次。

1.3 X射线衍射标定

为验证X射线衍射法预应力测试精度,在实验室对同批次钢绞线进行拉力-应力值校准试验。采用万能试验机对 $2.0\ \text{m}$ 长钢绞线进行分级张拉,如图3所示。选取5根钢绞线进行测试,每根钢绞线采用千斤顶分7级进行张拉,X射线测试位置位于钢绞线中部以消除边界条件的影响。每级持荷 $10\ \text{s}$ 后,记录压力环读数和X射线应力测试仪应力读数。



图3 X射线法测试钢绞线应力室内标定试验

Figure 3 Laboratory calibration for steel strand stress test via XRD

应力测试标定结果及对比情况分别如表1和图4所示。

表1 应力测试结果
Table 1 Stress test results

| 荷载/ kN | 拉力机测 试值/MPa | X射线法测试钢绞线应力/MPa | | | | | 标准差 |
|-----------|----------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|------|
| | | 钢绞线1 | 钢绞线2 | 钢绞线3 | 钢绞线4 | 钢绞线5 | |
| 0 | 0.0 | 180.5 | 204.0 | 102.5 | 155.5 | 211.3 | — |
| 20 | 142.9 | 322.5 | 356.0 | 299.5 | 302.0 | 348.0 | — |
| 40 | 285.7 | 284.0 | 288.5 | 275.5 | 285.0 | 302.5 | 9.8 |
| 60 | 428.6 | 421.0 | 427.5 | 435.5 | 437.5 | 441.0 | 8.1 |
| 80 | 571.4 | 558.0 | 566.0 | 559.0 | 581.5 | 566.5 | 9.4 |
| 100 | 714.3 | 705.5 | 712.0 | 707.5 | 722.0 | 728.0 | 9.7 |
| 120 | 857.1 | 840.5 | 842.5 | 852.0 | 869.0 | 856.5 | 11.5 |
| 150 | 1 071.4 | 1 044.5 | 1 079.5 | 1 052.5 | 1 056.0 | 1 068.5 | 13.8 |
| 偏差百分比/% | | 1.7 | 0.8 | 1.8 | 1.8 | 2.0 | — |

注:为消除初始残余应力影响,偏差百分比不计入40 kN以下测试数据。

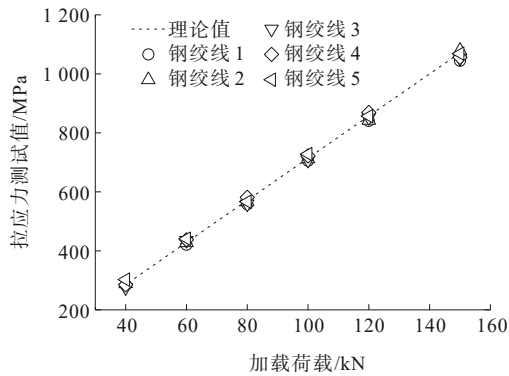


图4 标定应力结果分析

Figure 4 Analysis of calibration results of stress test

由表1、图4可知:①加载荷载为0 kN时,X射线法测试得到的钢绞线应力并不为0,表明钢绞线内部存在初始残余应力,一般可通过张拉钢绞线予以消除;②当荷载大于40 kN时,钢绞线内部应力数值较上一加载等级明显降低,表明此时钢绞线残余应力大部分已消除;③张拉射线测试设备测定的应力平均值和试验实际施加的张拉应力值之差最大为11.2 MPa,最大测试标准差为13.8 MPa,满足实验室标定要求,可用于现场预应力测试。

为确保测试过程中的放射性物质不会对检测人员造成危害,研究团队邀请了具备辐射检测资质的评估机构对使用的设备在应力测试过程中的实时辐射强度进行了全方位测试,测试结果表明:手持式敞束型射线装置正常工作时,除有用线束范围外任意位置的周围辐射剂量当量率不大于 $1 \mu\text{Sv/h}$,满足《低能射线装置放射防护标准》(GBZ 115—2023)^[21]的辐射剂量规定。测试时要求测试人员距离被测位置1.5 m

以上,以确保辐射作业对人体的伤害降到最低。

1.4 适用性分析

基于布拉格晶体衍射原理,X射线法通过精确测定材料晶格常数变化来反演宏观应力状态。即测试结果仅与材料晶体性质有关,可以有效测量局部范围的钢绞线永存应力值,监测桥梁沿程预应力分布状况。此外X射线测试法属于非接触、无损伤的检测方法,测量过程不受温度、湿度、电磁场等现场环境干扰。该方法不仅可以用于多种材料残余应力的测量,还能用于涂层和薄膜残余应力的测量,应用场景广泛。

表2对比了X射线衍射法和目前常用的检测方法的适用局限性。由表2可以看出:既有检测方法均存在一定局限性,应力释放法测试结果一般认为较为可信,但由于其需要切断钢绞线,并不适用于大范围的服役桥梁检测。而振动法、横张法、电磁效应法等无损检测方法均从理论假设出发推导反算的结果,受边界条件不明确、环境干扰等因素的影响较大。而反拉法虽然测试结果准确,但仅适用于施工阶段的预应力测试,局限性较强。

对比可知,传统方法均基于宏观力学参数间接推算应力,而本文介绍的X射线法从金属材料理论出发,通过金属晶格间距变化的微观层面进行宏观应变的推导,理论明晰,应用时局限性较小,且不受周边检测条件的限制,可用于不同现场状况的永存应力检测。

2 X射线衍射法预应力钢绞线测试表面处理工艺优化

对于实际桥梁结构中的预应力钢筋、普通钢筋、

表 2 常用有效预应力检测方法适用性对比

Table 2 Applicability comparison of commonly used effective prestress detection methods

| 测试方法 | 适用条件 | 影响精度因素 | 是否无损 | 是否非接触 | 是否不受环境干扰 | 是否可测试沿程应力变化 | 是否适用于服役桥梁 |
|--------|-----------------|-------------|------|-------|----------|-------------|-----------|
| 应力释放法 | 需破坏混凝土层,并切断预应力束 | 切割速度/切割瞬时温度 | 否 | 否 | 否 | 否 | 是 |
| 振动法 | 体外束需去除保护层 | 边界条件/激振方式 | 是 | 否 | 否 | 否 | 是 |
| 横张法 | 无明显适用局限性 | 开槽尺寸/横张仪刚度 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 |
| 电磁感应法 | 无电磁干扰环境 | 电磁干扰 | 是 | 是 | 否 | 是 | 是 |
| 反拉法 | 锚头端钢绞线需外露 | 锚头夹片咬合力 | 是 | 否 | 是 | 否 | 否 |
| 光纤光栅法 | 需在施工中埋设 | 温度 | 是 | 是 | 否 | 是 | 否 |
| X射线衍射法 | 无明显适用局限性 | 表面电解深度 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |

拉吊索高强钢丝等被测构件,其材料成分及力学性能存在较大差异,被测构件在服役过程中会受到不同程度因素影响;同时,X射线透射深度十分有限,被测工件表面的处理方式对检测结果有决定性的影响,但受现场测试环境制约,被测表面处理工艺与实验室内存在一定差别,这些因素都会对测试结果的准确性产生影响。因此,针对不同荷载等级作用下X射线衍射方法的影响因素进行敏感性分析,并提出兼具效率和测试精度的表面最优处理工艺非常必要。

2.1 试验设计

为全面模拟预应力筋在实际结构中的服役特点,本文制作了2根T形截面拼装梁的缩尺模型,并在缩尺模型上进行分级张拉试验,验证X射线测试数据与理论计算值的吻合度。第一根试验梁主要用于表面处理工艺优化分析,在张拉至控制应力时,主要考虑金属表面电解液类型、打磨工具类型、电解时间等因素对测试结果的影响,提出打磨工艺、电解工艺等参数的优化措施,提高X射线衍射法应用于实际工程中的测试效率及精度;第二根梁主要是用于提出应力分级修正方法,通过使用最佳的表面处理方法,

与X射线法测试结果对比,得到X射线法测试结果与实际应力状态的误差,分析误差规律,提出不同测试条件及被测对象的X射线法修正系数。

试验梁由3个节段组成。横截面为T形截面,长度为3.0 m(有效跨度为2.8 m),梁高0.4 m,顶宽0.5 m,腹板厚度0.1 m,翼缘宽度0.08 m。试验梁几何构型如图5所示。体外预应力束为双折线,而体内预应力束为直线布置,预应力钢绞线型号采用抗拉强度标准值1 860 MPa,体内体外预应力束的控制张拉应力均为 $0.5 f_{pk}=930$ MPa。纵向体内和体外预应力筋均采用单束 $1 \times 7 \phi^{s} 15.2$ 钢绞线,采用单孔夹片锚具进行张拉。试验梁由S1、S2和S3共3个节段组成。

2.2 工况设置

为避免不同批次的预应力材料差异的影响,本次试验中所有钢绞线均选用同一厂家、同一批次的新出厂产品。试验考虑的工况为3种打磨工艺、3种电解液类型、9种电解电压和电解时间耦合工况、2种不打磨直接电解工况,详细工况设置如表3所示。每根钢绞线上分别布置17个X射线测点。通过试验得到被测材料测试面最优处理工艺及高强钢绞线X射线应力测试修正系数。

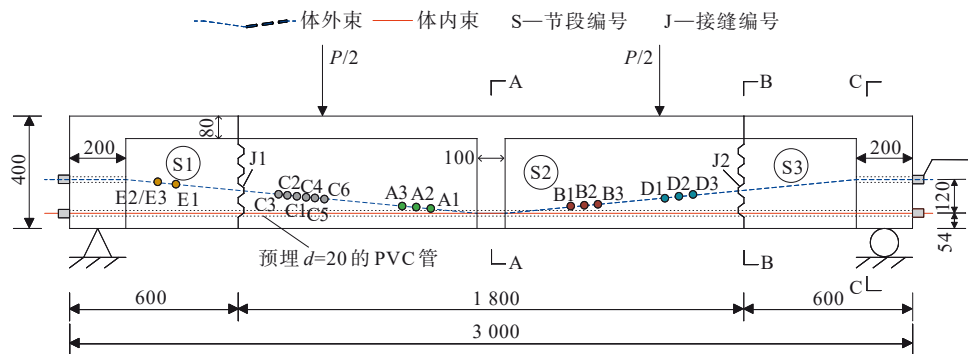


图 5 试验梁设计(单位:mm)

Figure 5 Test beam design (unit: mm)

表3 工况设置

Table 3 Working condition setting

| 序号 | 试件编号 | 测试点位 | 内容描述 |
|----|----------------------------|-------------|------------------------------------|
| 1 | SL-NaCl-15-2 | A1\B1\D1\E1 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长2 min |
| 2 | SZ-NaCl-15-2 | A2 | 高目数砂纸打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长2 min |
| 3 | DM-NaCl-15-2 | A3 | 微型电磨头打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长2 min |
| 4 | SL-HClO ₄ -15-2 | B2 | 硬质砂轮片打磨、次氯酸乙醇溶液、电解电压15 V,电解时长2 min |
| 5 | SL-PbSO ₄ -15-2 | B3 | 硬质砂轮片打磨、铅酸溶液、电解电压15 V,电解时长2 min |
| 6 | SL-NaCl-10-1 | C1 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压10 V,电解时长1 min |
| 7 | SL-NaCl-10-2 | C2 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压10 V,电解时长2 min |
| 8 | SL-NaCl-10-3 | C4 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压10 V,电解时长3 min |
| 9 | SL-NaCl-25-1 | C5 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压25 V,电解时长1 min |
| 10 | SL-NaCl-25-2 | C3 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压25 V,电解时长2 min |
| 11 | SL-NaCl-25-3 | C6 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压25 V,电解时长3 min |
| 12 | SL-NaCl-15-1 | D2 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长1 min |
| 13 | SL-NaCl-15-3 | D3 | 硬质砂轮片打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长3 min |
| 14 | NaCl-15-2 | E2 | 不打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长2 min |
| 15 | NaCl-15-4 | E3 | 不打磨、饱和氯化钠溶液、电解电压15 V,电解时长4 min |

本次试验在结构实验室内进行,实测温度21℃,湿度39%。为尽量缩小沿程应力分布差异对分析结果的影响,同一对比测试工况的测试间距尽可能缩小,根据上述原则,确定不同工况的测点布置如图5所示。同时,为考虑沿程预应力分布的差异性,分别在梁端、四分点位置和跨中位置增设了钢筋应变片进行对比,应变片粘贴情况如图6所示。

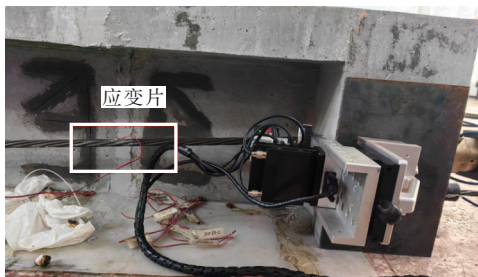


图6 端部应变片粘贴情况

Figure 6 Adhesion of end strain gauges

2.3 表面处理工艺敏感性分析

根据上述试验思路,分别对上述不同点位和工况进行测试,一次性张拉预应力至目标应力,分别分析打磨工艺、抛光电压、通电时间、电解液类型对测试结果的影响,旨在提出最佳表面处理工艺。试样编号规则采用“打磨方式-电解质-抛光电压(V)-通电时间(min)”进行。

2.3.1 打磨工艺分析

试验选取了砂轮、砂纸和电磨机三种不同的打

磨工艺进行分析,对应的工况编号分别为SL-NaCl-15-2、SZ-NaCl-15-2和DM-NaCl-15-2,其测试结果汇总于表4。由于测力计换算应力为整束平均值,事实上由于体外预应力筋并不是直线分布,其体内应力场分布并不均匀,尤其在转向块位置的应力与整束平均值并不一致,因此仅取测力计等效应力作为参考,分析过程中取应变片位置的应力数据作为对比值,以此分析X射线法的最优打磨效果。

表4 打磨工艺对比试验结果

Table 4 Grinding process comparison test results

| 工况号 | 布设点位 | 测力计等效应力结果/MPa | 应变片测试结果/MPa | X射线测试结果/MPa |
|--------------|------|---------------|-------------|-------------|
| SL-NaCl-15-2 | A1 | | | 819.7 |
| SZ-NaCl-15-2 | A2 | 987.1 | 886.1 | 744.8 |
| DM-NaCl-15-2 | A3 | | | 779.9 |

由表4可知:采用3种打磨工具,其测试结果从大到小依次为硬质砂轮片、微型电磨头、砂纸。而硬质砂轮片的测试结果最接近于应变片测试应力值,故在测试时,选取硬质砂轮片作为钢绞线表面处理工具为宜。

2.3.2 电解抛光电压和通电时间耦合分析

电解抛光电压与通电时间作为关键工艺参数存在交互效应,需通过耦合分析优化参数组合。本试验选取参数为:电压参数:10 V、15 V、25 V;时间参

数:1 min、2 min、3 min。

通过对两因素三水平的正交试验设计,推荐试验数量为9次,使用L9(3⁴)正交表完成。其测试结果汇总于表5。分析过程中取应变片位置的应力数据作为对比值,以此分析X射线法的最优电解电压。

表5 抛光电压和通电时间耦合对比试验结果

Table 5 Coupling comparative test results of polishing voltage and energization time

| 工况号 | 点位 | 测力计应力 结果/MPa | 应变片测试 结果/MPa | X射线测试 结果/MPa | 测试精 度/% |
|--------------|----|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
| SL-NaCl-10-1 | C1 | 987.1 | 854.0 | 655.9 | 76.80 |
| SL-NaCl-10-2 | C2 | 987.1 | 854.0 | 701.0 | 82.08 |
| SL-NaCl-10-3 | C4 | 987.1 | 854.0 | 713.3 | 83.52 |
| SL-NaCl-15-1 | D2 | 987.1 | 899.8 | 724.6 | 80.53 |
| SL-NaCl-15-2 | D1 | 987.1 | 899.8 | 774.3 | 86.05 |
| SL-NaCl-15-3 | D3 | 987.1 | 899.8 | 779.1 | 86.59 |
| SL-NaCl-25-1 | C5 | 987.1 | 854.0 | 766.1 | 89.71 |
| SL-NaCl-25-2 | C3 | 987.1 | 854.0 | 541.7 | 63.43 |
| SL-NaCl-25-3 | C6 | 987.1 | 854.0 | 208.7 | 24.44 |

由表5可知:

(1) 无论何种通电时间,15 V抛光电压下应变片测试结果的测试精度均高于10 V抛光电压,结果表明采用10 V电压电解功率偏低,电解时长一定的条件下电解效率不足,电解程度不完全,其表面仍存在打磨附着应力,导致测试结果差异。而25 V抛光电压下,虽然SL-NaCl-25-1的测试精度在全部正交试验中最高,但该电压下通电时间下的分布数据高度离散,同时试验过程中发现,在抛光作业时出现了“吡吡”的电流声,伴随着白烟出现,测试结果迅速下降。结合现象分析该结果是电解强度过大后导致表面堆积了解腐蚀产物,从而导致X射线无法穿透腐蚀产物到达钢绞线表面的结果,测试结果可信程度较差。综合上述考虑,15 V抛光电压的应力测试结果最接近应变片测试应力值。

(2) 对同一抛光电压下的通电时间进行分析,考虑上述原因,不再采用25 V测试电压的测试结果。由表5可知,相同抛光电压下,测试精度从大到小依次为电解3 min、电解2 min、电解1 min,即测试精度均随着电解时间的增加而增加。而电解时间由2 min增加到3 min,其测试精度提升非常有限,故在测试时,建议选取电解时间2 min即可兼顾测试效率和测试精度要求。

2.3.3 电解液类型分析

试验选取了3种不同的电解液类型进行分析,分别为饱和氯化钠溶液、次氯酸乙醇饱和溶液、蓄电池铅酸电解液,对应的工况编号分别为SL-NaCl-15-2、SL-HClO₄-15-2和SL-H₂SO₄-15-2。既有研究表明^[22]:环境温度条件下,密度为1.10~1.28 g/cm³时,蓄电池电解液电阻率存在最小值,当在该密度范围外时,溶液的电阻率会显著增加,进而影响电阻效率。综上,本试验中使用的铅酸溶液配比为V_{硫酸原液}:V_水=1.28:1。

电解时长均为2 min,电解电压均为15 V,测试结果汇总于表6。分析过程中取应变片位置的应力数据作为对比值,以此分析X射线法的最优电解液类型。

表6 电解液类型对比试验结果

Table 6 Electrolyte type comparison test results

| 工况号 | 布设 点位 | 测力计等效应 力结果/MPa | 应变片测试 结果/MPa | X射线测试 结果/MPa |
|---|----------|-------------------|-----------------|-----------------|
| SL-NaCl-15-2 | B1 | | | 788.8 |
| SL-HClO ₄ -15-2 | B2 | 987.1 | 854.2 | 861.1 |
| SL-H ₂ SO ₄ -15-2 | B3 | | | 830.9 |

由表6可知:采用饱和氯化钠溶液、蓄电池铅酸电解液、次氯酸乙醇饱和溶液3种电解液,其测试结果从大到小依次为HClO₄乙醇溶液、H₂SO₄铅酸溶液、NaCl溶液。HClO₄乙醇溶液的测试结果最接近于应变片测试应力值,考虑到HClO₄乙醇溶液配置比较困难,购买成本较高,且运输过程中不易携带等特点,仅在实验室内采用是合适的,而铅酸溶液相对购买容易,同时成本较低且测试误差可接受,故在测试时,选取铅酸溶液作为电解液为宜,可兼顾测试精度和测试成本,适用性高。

2.3.4 处理工艺分析

试验研究了是否进行打磨工艺处理进行电解作业的测试结果精度情况,设置了对应的工况,编号分别为SL-NaCl-15-2、NaCl-15-2和NaCl-15-4。电解电压均为15 V,电解时间分别为2 min、4 min,分别在E1、E2、E3点进行测试读数,测试结果汇总于表7。分析取应变片位置的应力数据作为对比值,以此分析X射线法的最优处理工艺。

由表7可知:采用不打磨只电解的方式测试结果普遍低于应变片测试结果,但测试结果随着电解时间增加精度增加。可以预见的是,若继续增加电解

表7 处理工艺对比试验结果

Table 7 Treatment process comparison test results

| 工况号 | 布设 点位 | 测力计等效应 力结果/MPa | 应变片测试 结果/MPa | X射线测试 结果/MPa |
|--------------|----------|-------------------|-----------------|-----------------|
| SL-NaCl-15-2 | E1 | | | 822.1 |
| NaCl-15-2 | E2 | 987.1 | 876.0 | 585.8 |
| NaCl-15-4 | E3 | | | 779.2 |

时间,其最终测试效果将与工况 SL-NaCl-15-2 的结果接近。综合上述结果,可以发现只电解不打磨虽然最终可以满足测试精度要求,但其需要的电解时间大大增加,从而降低了单点的测试效率,因此,除必要的情况下,建议在电解之前仍然进行打磨作业以消除表面涂层,从而缩短后续电解作业时间,提升作业效率。

2.3.5 最优表面处理工艺分析

分析了不同的打磨工艺、电解液类型(3种)、电解电压、电解时间和是否打磨进行电解工况的X射线测试应力结果,通过试验比选、原因分析,综合考虑测试精度、测试作业效率、运输成本、原材料成本等因素,最终确定X射线衍射法测试桥梁工程用1860级预应力钢绞线的最优表面处理工艺为:

测试时采用先打磨后电解的测试工序进行。打磨时打磨工具宜选用硬质砂轮片打磨,测点露出金属光泽即可进行电解作业。电解时电解液宜采用蓄电池铅酸溶液($V_{\text{硫酸原液}}:V_{\text{水}}=1.28:1$),电解电压为15V,电解时间为2min,电解完毕后用酒精棉轻轻擦去表面电解腐蚀产物。

3 X射线衍射法应力分级修正

表7的测试结果已经表明,钢绞线在低应力状态下的测试受钢绞线出厂残余应力的影响,测试结果需要进行应力修正。为了提高在桥梁结构中应用X射线法进行应力测试的精度,便于这一技术在桥梁结构领域的推广,通过对桥梁结构中典型材料及试件开展室内对比拉伸试验的方法,对被测构件分多级进行加载,同时在每级稳定持荷状态下对被测构件的不同测试区域开展X射线应力测量,通过两者的对比对X射线法的测试结果误差进行标定,提出X射线法测试预应力钢绞线绝对应力值修正公式。

使用上述提出的最佳表面处理工艺对钢绞线表面进行打磨、电解处理,而后对钢绞线进行分级张拉,从而提出与最佳表面处理工艺条件相匹配的应

力分级修正分析公式。表8展示了不同加载等级下X射线测试结果及对比情况。取应变片位置的应力数据作为对比值,以此分析X射线法的应力测试结果。

表8 不同应力等级的X射线测试结果及对比

Table 8 XRD test results and comparison for different stress levels

| 加载 级别/ 级 | 测力计 数显值/ kN | 测力计 换算应 力/MPa | 应变片 数值/ MPa | X射线 测试结 果/MPa | 线性拟合 百分比 误差/% | 指数拟合 百分比 误差/% |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 8.6 | 61.3 | 94.6 | 189.6 | -18.31 | 0.11 |
| 2 | 20.1 | 143.9 | 165.4 | 271.1 | -13.15 | -1.19 |
| 3 | 33.8 | 241.7 | 287.2 | 440.2 | -5.51 | 0.07 |
| 4 | 44.8 | 320.1 | 360.7 | 479.7 | -3.15 | -0.48 |
| 5 | 60.9 | 434.8 | 488.7 | 520.0 | 2.95 | 1.04 |
| 6 | 73.0 | 521.2 | 561.8 | 580.2 | 3.36 | -0.42 |
| 7 | 93.5 | 668.0 | 688.4 | 684.1 | -0.62 | -0.62 |
| 8 | 103.6 | 739.8 | 741.7 | 720.9 | -2.80 | -2.80 |
| 9 | 117.9 | 841.9 | 810.7 | 785.7 | -3.08 | -3.08 |
| 10 | 127.3 | 909.2 | 851.8 | 822.3 | -3.46 | -3.46 |
| 11 | 135.1 | 965.1 | 892.3 | 849.7 | -4.77 | -4.77 |
| 无应力 | 0 | 0 | 0 | 217.1 | - | - |

将应力对比情况绘制于图7。从图7可以发现,仅在无应力状态下,预应力筋体内存在217.1MPa初始应力,且随着加载级别提高,初始应力的影响越来越小,当应力水平达到600MPa附近时,初始残余应力的影响可以忽略不计。因此,仅对600MPa以下的应力进行修正即可满足工程测试要求。

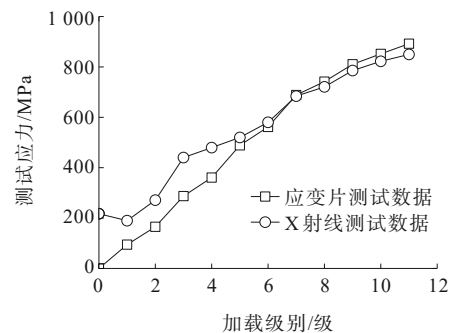


图7 应力分级测试对比

Figure 7 Comparison of stress grading tests

取600MPa以下的应力情况进行分析。记当前X射线法的测试应力为 σ_x ,根据前期多次测试试验结果,对于1860MPa强度的钢绞线,其初始残余应力一般为200MPa左右,因此选取200MPa为此强度的

初始残余应力具有统计意义。分级公式分别采用线性、多项式和指数函数进行拟合,得到拟合方程分别为:

$$\sigma_1 = 773.29 \left(\frac{\sigma_x}{600} \right) - 167.08 \text{ MPa} \quad (4)$$

($\sigma_x < 600 \text{ MPa}$)

$$R^2 = 0.87。$$

$$\sigma_1 = -203.56 \left(\frac{\sigma_x}{600} \right)^2 + 975.69 \left(\frac{\sigma_x}{600} \right) - 197.91 \quad (5)$$

($\sigma_x < 600 \text{ MPa}$)

$$R^2 = 0.99。$$

$$\sigma_1 = \sigma_x - 198.47 e^{-2.335 \left(\frac{\sigma_x}{600} \right)} \quad (\sigma_x < 600 \text{ MPa}) \quad (6)$$

$$R^2 = 0.99。$$

可以发现:指数函数和二次多项式拟合优度均较高,但二次多项式相较于指数形式计算更为复杂。选取指数函数计算效率优于二次多项式,表9中最后两列列出了选取线性拟合和指数拟合方式的修正计算结果,可以看出:当应力大于300 MPa时,线性拟合方程和指数方程均可较好地预测应力值(误差小于5%),但对于小于300 MPa的情况,线性拟合方程不适用。也就是说,如果不用于低应力数值的预应力值测试,则线性拟合的精度是完全足够的。反之,则建议使用指数拟合方程形式。

需要指明的是,分析时应充分考虑适用对象的影响,本文研究对象为新出厂的钢绞线,分析中未考虑局部塑性变形、腐蚀程度、异形结构或微观裂纹对衍射峰的影响,使用时应充分考虑拟合公式的局限性。

4 结论

为准确把握既有预应力结构桥梁的应力状态,根据实际工程检测需求,本研究将X射线衍射测试法应用于桥梁有效预应力检测,系统介绍了其理论原理,提出了X射线衍射法的标定方法和测试流程,并建立了表面处理工艺优化方法和应力分级修正公式。得到以下结论:

(1) 为验证X射线法预应力测试的有效性,开展了室内试验标定、室外检测校准,并同步进行了室内拉力机双盲测试。结果表明:X射线法测试预应力与拉力机数值相差在5%以内,且测试结果稳定,具有适用场景广泛、结果离散性小、精度高等优势。验证了X射线衍射方法在服役桥梁钢绞线体外有效预应

力测试方面的可行性。

(2) 研究设计了室内试验,对比了不同打磨工艺、不同电解液类型、不同电解电压、不同电解时长对测试结果的影响。试验结果表明:采用硬质砂轮片打磨,结合电解电压15 V的铅酸溶液($V_{\text{硫酸原液}}:V_{\text{水}}=1.28:1$)电解2 min,可达到最佳表面处理效果。

(3) 研究给出了最优处理工艺下不同应力等级的分级修正公式。当应力大于300 MPa时,线性拟合方程和指数方程均可较好预测应力值(误差小于5%);当应力小于300 MPa时,建议使用指数形式的修正公式。

(4) 针对体内预应力筋的检测,由于X射线衍射穿透深度有限,需在混凝土表面进行小范围开槽处理,以露出内部钢绞线。然而,由于开槽操作可能损伤结构且增加检测成本,所以这种测试方法存在局限性。

参考文献:

References:

- [1] 卢发亮. 预应力混凝土箱梁体外索应力损失监测研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 115-119.
LU Faliang. Research on stress loss monitoring of external cables in prestressed concrete box girders[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 115-119.
- [2] 杜永军, 王正. 反拉法锚下预应力检测技术研究[J]. 交通建设与管理, 2022(6): 164-166.
DU Yongjun, WANG Zheng. Research on prestress detection technology under reverse tension anchor[J]. Transport Construction & Management, 2022(6): 164-166.
- [3] 宁怡豪. 考虑夹片影响的反拉法锚下有效预应力检测技术研究[J]. 西部交通科技, 2024(10): 1-3, 94.
NING Yihao. Research on detection technology of effective prestress under reverse tension anchor considering the influence of clip[J]. Western China Communications Science & Technology, 2024(10): 1-3, 94.
- [4] 吴益林, 唐波, 高科. 基于反拉法的锚下有效预应力检测系统校准技术研究[J]. 广东公路交通, 2022, 48(2): 44-48.
WU Yilin, TANG Bo, GAO Ke. Research on calibration technology of effective prestressing detection system under anchor by back-tension method[J]. Guangdong Highway Communications, 2022, 48(2): 44-48.
- [5] 尚仁杰, 曾滨, 荣华, 等. 应力释放法检测混凝土应力的标准化方法研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(11): 151-156.
SHANG Renjie, ZENG Bin, RONG Hua, et al. Research on standardized method of stress release method for measuring the stress of concrete[J]. Industrial Construction, 2022, 52(11): 151-156.

- [6] 金鹏,李喜德.残余应力分析方法比较:X射线衍射法与应力释放法[J].实验力学,2017,32(5):645-651.
JIN Peng,LI Xide.Comparison of residual stress analysis methods:X-ray diffraction method vs stress release method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5): 645-651.
- [7] 李思霖.预应力混凝土桥梁检测与加固技术研究[J].交通世界,2021(26):123-124.
LI Silin. Research on detection and reinforcement technology of prestressed concrete bridge[J]. TranspoWorld, 2021(26):123-124.
- [8] ALOISIO A. Aspects of vibration-based methods for the prestressing estimate in concrete beams with internal bonded or unbonded tendons[J]. Infrastructures, 2021, 6(6):83.
- [9] 况中华.基于振动法的拉索索力测试研究[J].建筑施工,2021,43(7):1401-1404.
KUANG Zhonghua.Research on cable force measurement based on vibration method[J].Building Construction,2021, 43(7):1401-1404.
- [10] CHAKI S, BOURSE G. Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect[J]. Experimental Mechanics,2009,49(5):673-681.
- [11] FARHADI S,CORRADO M,BORLA O,et al.Prestressing wire breakage monitoring using sound event detection[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024,39(2):186-202.
- [12] XIA J F, ZHANG S H, LIAO L, et al. Working stress measurement of prestressed rebars using the magnetic resonance method[J].Buildings,2023,13(6):1416.
- [13] 李炎,蒋云锋,赖苑林,等.变宽连续梁桥腹板预应力锚头混凝土破裂影响[J].工程建设,2022,54(9):48-53.
LI Yan,JIANG Yunfeng,LAI Yuanlin,et al.Influence of concrete rupture on web prestressed anchor head of widened continuous girder bridge[J]. Engineering Construction,2022,54(9):48-53.
- [14] YE Y S,WU W Q,WANG Q S,et al.Experimental study on grouting quality detection in prestressed pipeline based on scattered wave method[J].Buildings,2024,14(5):1402.
- [15] 朱建朝,董昊,顾俊钢,等.预应力混凝土梁锚下张拉力整孔检测技术研究[J/OL].中外公路,1-10[2024-05-18].
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240518.2122.004.html>.
- ZHU Jianzhao,DONG Hao,GU Jungang,et al.Study on whole hole detection technology of prestressed concrete beam anchor under tension[J/OL].Journal of China & Foreign Highway, 1-10[2024-05-18].
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240518.2122.004.html>.
- [16] NIU N N,ZHAO Y S,LIU Z F,et al.Research on ultrasonic testing method for tangential contact stress based on equivalent medium theory[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025,112:107150.
- [17] 张志国,吴冀桥,张彩亮,等.基于盲孔法的钢绞线有效预应力检测识别技术[J].铁道学报,2023,45(8):166-175.
ZHANG Zhiguo, WU Jiqiao, ZHANG Cailiang, et al. Identification of effective prestress of steel strand based on blind-hole method[J]. Journal of the China Railway Society,2023,45(8):166-175.
- [18] MYERS H P. Introductory solid state physics[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.无损检测 X 射线应力测定方法:GB/T 7704—2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Non-destructive testing: Practice for residual stress measurement by X-ray: GB/T 7704—2017[S]. Beijing:Standards Press of China,2017.
- [20] SAC/TC 183.金属试样的电解抛光方法:YB/T 4377—2014[S].北京:SAC/TC 183,2014.
SAC/TC 183. Electrolytic polishing method of metallic specimens: YB/T 4377—2014[S]. Beijing: SAC/TC 183, 2014.
- [21] 国家卫生健康委员会.低能射线装置放射防护标准:GBZ 115—2023[S].北京:国家卫生健康委员会,2023.
National Health Commission (NHC). Standard for radiological protection in low-energy radiation generating devices: GBZ 115—2023[S]. Beijing: National Health Commission(NHC),2023.
- [22] 呼梦娟,马逸飞,涂启贵,等.电解液密度对启动铅酸蓄电池性能的影响[J].蓄电池,2023,60(3):117-120.
HU Mengjuan, MA Yifei, TU Qigui, et al. Effect of the electrolyte density on lead-acid starter batteries[J]. Chinese LABAT Man,2023,60(3):117-120.