

# 中国公路建设行业协会标准

## 公路桥梁钢束应力 X 射线衍射检测技术 规程

Technical specification for X-ray diffraction stress  
testing of steel strands in highway bridges

征求意见稿

# 目 次

前 言.....	II
引 言.....	III
1 总则.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和符号.....	1
3.1 术语.....	1
3.2 符号和缩略语.....	2
4 测试仪器.....	3
4.1 仪器结构及参数.....	4
4.2 测试功能.....	4
5 测试准备.....	5
5.1 前期准备.....	5
5.2 测点位置选取及定位.....	5
5.3 混凝土开槽作业.....	6
5.4 钢束表面处理.....	6
5.5 测试位置校准及设备固定.....	6
5.6 光斑尺寸选取.....	7
6 测试.....	7
6.1 测试过程规定.....	7
6.2 数据采集.....	8
6.3 测试结果处理.....	8
7 结构恢复.....	9
7.1 钢束状态恢复.....	9
7.2 混凝土部分恢复.....	9
附录 A X 射线法应力测试原理.....	11
附录 B 中低应力分级修正试验测试流程.....	13
附录 C 公路桥梁预应力钢束 X 射线测试现存应力现场记录表.....	14

# 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本标准根据中国公路建设行业协会《关于下达<装配式公路钢桥桥墩>等32项协会标准的编制通知》(中路建协(2023)107号)的要求制定。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国公路建设行业协会提出并归口。

本文件主要起草单位：交通运输部公路科学研究所。

本文件参与起草单位：中路高科交通检测检验认证有限公司、广东湾区特大桥养护技术中心、邯郸市爱斯特应力技术有限公司、北京公科固桥技术有限公司。

本文件主要起草人：李鹏飞、周旭东、徐同舟、韩旭。

本文件参与起草人：程时美、李毅、魏思聪、毛燕、李鹏飞、刘志东、李春早、董振华、于锦添、杨飞、刘毅、郭磊、吕克茂。

# 引 言

为进一步提升桥梁服役水平，延长结构使用寿命，对桥梁结构钢束进行有效检测尤为重要。X 射线衍射应力测试方法基于布拉格原理，具有理论简明、测试准确、结果稳定等特点，已在金属行业残余应力测试领域得到了大范围的推广应用，然而在服役桥梁同时测试效率高、对结构的创伤小，适合在服役桥梁钢束上开展有效应力现场测试。

本规范结合桥梁的结构特征和现场环境特点，对 X 射线衍射方法进行桥梁钢束有效应力测试的仪器设备要求、详细作业流程、数据采集及分析方法作出了详细规定，包括总则、术语和符号、测试仪器、测试准备、测试、结构恢复等内容，旨在进一步推广 X 射线衍射测试法在服役桥梁应力检测领域的应用，统一 X 射线法的测量流程，提高操作规范性和可行性。

本标准在国家标准《无损检测 X 射线应力测定方法》GB7704-2017 的规定下执行。

# 公路桥梁钢束应力 X 射线衍射检测技术规程

## 1 总则

本标准针对使用 X 射线衍射方法进行桥梁钢束有效预应力测试的详细作业流程做出规定，包括术语和符号、测试仪器、测定准备、测试、结构恢复等内容。

本标准适用于具有足够结晶度，在指定波长 X 射线照射下能得到连续衍射峰位的晶粒细小、无织构的铁素体材料的应力测试，其他材料或场景仅供参考适用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。下列不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7704 无损检测. X 射线应力测定方法

GB/T 39520 弹簧残余应力的 X 射线衍射测试方法

JB/T 9394 无损检测仪器. X 射线应力测定仪技术条件

JB/T 12615 硬质合金刀具残余应力检测方法

SL 547 水工金属结构残余应力测试方法. X 射线衍射法

QJ 2916 铝合金表面残余应力的测试方法. X 射线衍射法

HB 20116 航空发动机叶片表面残余应力的测定 X 射线衍射法

## 3 术语和符号

下列术语和定义、符号适用于本文件。

### 3.1 术语

#### 3.1.1 残余应力 residual stress

构件在没有外力作用的条件下、材料内部存在并保持平衡的第一类内应力。

#### 3.1.2 衍射晶面 Diffraction crystal plane

X 射线发生衍射时抵达的晶格表面。

### 3.1.3 衍射角 Diffraction angle

X 射线入射线的延长线与衍射线之夹角、也称为衍射峰位角。

### 3.1.4 衍射峰 Diffraction peak

在满足布拉格定律的条件下 X 射线衍射强度沿衍射角的分布曲线。

### 3.1.5 衍射晶面方位角 Azimuth angle of diffraction crystal plane

又称  $\psi$  角，衍射晶面法线与试样表面法线之夹角。

### 3.1.6 应力方向平面 Stress direction plane

在应力测定中衍射晶面方位角所在的平面。

### 3.1.7 扫描平面 Scanning plane

又称  $2\theta$  平面，入射 X 射线与被探测器接收的衍射线所组成的平面。

### 3.1.8 衍射背底 Diffraction background

与布拉格衍射无关的衍射信息。

### 3.1.9 同倾法 Iso-inclination method

$2\theta$  扫描平面与  $\Psi$  平面（应力方向平面）相重合的测量方法。

### 3.1.10 侧倾法 Sid-inclination method

$2\theta$  平面与  $\Psi$  平面（应力方向平面）相互垂直的测量方法。

### 3.1.11 摆动法 Swing method

在探测器接收衍射线的过程中，以每一个设定的  $\psi$  角（或  $\psi_0$  角）为中心，使 X 射线管和探测器在  $\psi$  平面内左右回摆一定的角度的应力测定方法。

### 3.1.12 衍射峰半高宽 Full width at half maximum

衍射峰去除与衍射背底之后最大强度处 1/2 的宽度。

## 3.2 符号和缩略语

$\theta$  —— 布拉格角；

$2\theta$  —— 衍射角；

$\psi_0$  —— X 射线入射角；

$\psi$  —— 衍射晶面方位角；

$\phi$  —— 衍射晶面法线在试样平面的投影与试样平面上某一指定方向之夹角；

$\lambda$  —— X 射线波长；



## 4.1 仪器结构及参数

**4.1.1** X 射线衍射法应力测试仪器（以下简称“仪器”）的基本测试原理为 X 射线的衍射原理中的布拉格方程，详见附录 A 所示。仪器应具备测角仪、测角仪支架、电气控制箱以及应力分析软件四部分模块内容，并配备零应力粉末标样和观察 X 射线光斑的荧光屏。测角仪重量不大于 3.5Kg，仪器应为便携手持式结构，方便现场桥梁预应力检测。

**4.1.2** 仪器测试时应使用 Cr 靶 X 射线管，X 射线管应采用低功率低功耗低辐射型，X 射线管功率不应大于 4W；额定管电压和电流应连续可调。

**4.1.3** X 射线探测器宜采用微型面探二维固态探测器，探测器矩阵通道数不应少于 256×256 通道，像素尺寸不应小于 55×55 $\mu\text{m}$ 。

**4.1.4** X 射线管应提供不同规格的准直管，标配  $\text{Ø}1\text{mm}$ ；备选  $\text{Ø}0.5\text{mm}$ 、 $\text{Ø}1.5\text{mm}$ 、 $\text{Ø}2\text{mm}$ 、 $\text{Ø}3\text{mm}$ 、 $\text{Ø}4\text{mm}$ 。以满足不同测试场景和衍射几何需求。

**4.1.5** 测角仪衍射角  $2\theta$  范围宜设置为  $147^\circ\sim 165^\circ$ 。 $2\theta$  角度分辨率不应大于  $0.02^\circ$

**4.1.6** 仪器  $\psi$  角设置范围应至少包含  $0^\circ\sim 45^\circ$  测试区间。

**4.1.7** 仪器应配备激光测距定位器，以便测试点定位校准。

**4.1.8** 仪器应配备气泡水平仪和垂直验具。

**4.1.9** 控制箱应控制箱包含低压电源、高压电源的控制模组、高压工作提示灯和急停/复位按钮。

## 4.2 测试功能

**4.2.1** 测角仪工装须具备适应现场不同测试位置的复杂地面状况的作业需求。

**4.2.2** 测试模块应能实现同倾固定  $\psi_0$  法，或兼容多种方法，并满足相关的角度范围要求和整机测试精度。

**4.2.3** 仪器定峰方法应至少包括半高宽法、抛物线法、重心法、交相关法及高斯、柯西、皮尔逊 VII 函数拟合法中的两种方法。

**4.2.4** 测角仪应具有自动捕获衍射曲线及衍射峰位、计算应力值的功能。

**4.2.5** 测试软件应具备自动升起 X 射线管高压，自动完成测量全过程，实时进行数据处理的功能，测试完毕后应自动关闭 X 射线管高压，必要时可以辅以人工操作。



**4.2.6** 测试过程中应保证 X 射线管电压和电流的稳定性，并应保证 X 射线光路畅通。

**4.2.7** 仪器测试过程中的  $\psi$  角度选取定位应在程序设置完毕后自动完成，测试完毕后测角仪应自动还原至初始测试状态。

**4.2.8** X 射线应力测试设备应具有背底自动校正与强度因子自动校正的功能。

**4.2.9** 仪器的配套测试软件应具备自动转换并输出、记录当前测试应力值的功能。

## 5 测试准备

对于埋置于在混凝土结构内部的钢束，其应力测量前的测试准备工作应遵循下述条款规定；对于暴露于自然环境中的钢束，其应力测试前的准备工作应遵循条款 5.1、条款 5.4、条款 5.5 和条款 5.6 的规定。

### 5.1 前期准备

**5.1.1** 测试开始前应在试验室内对设备进行无应力标定，试样采用无应力铁粉试样。对于无应力铁粉的仪器连续测试次数不得少于 5 次，所得应力平均值应在  $\pm 14\text{MPa}$  以内，其标准差宜不大于  $7\text{MPa}$ ；否则应校准仪器或测量参数。

**5.1.2** 对预估应力水平小于  $400\text{MPa}$  的钢束，测试设备在投入现场使用前，应首先在试验室内完成 X 射线应力分级修正试验，并填写修正因子表，分级修正试验流程和修正因子表见附录 B。修正后的测试应力和试验实际施加的张拉换算应力值之差的平均值不应大于  $14\text{MPa}$ ，且标准差不宜大于  $7\text{MPa}$ 。

**5.1.3** 对于预估应力水平大于  $400\text{MPa}$  的钢束，测试设备在投入现场使用前，应进行试验室张拉测试校准，测试应力和试验实际施加的张拉换算应力值之差的平均值不应大于  $14\text{MPa}$ ，且标准差不宜大于  $10\text{MPa}$ 。

**5.1.4** 依据检测目的和调查结果合理选定测试钢束位置和数量，编制详尽的检测方案。

### 5.2 测点位置选取及定位

**5.2.1** 在测试作业开始前，应先确定待测埋置钢束的详细位置信息，选取时应避开锚头附近区域和结构受力薄弱区域，最大化降低开槽作业对结构造成的影响。

**5.2.2** 测试区域应避免无关的磕碰划伤区域和钢束的平弯和竖弯区段，选择钢束直线区域布设测点。

**5.2.3** 现场宜使用钢束定位设备确定待测钢束位置信息，现场无实测条件时，可根据设计和施工图纸进行钢束定位。

### **5.3 混凝土开槽作业**

**5.3.1** 混凝土开槽前，应仔细评估混凝土板开槽对结构的影响。开槽尺寸应满足仪器的最小作业要求，并预留打磨和电解腐蚀操作空间，混凝土槽口的最大开槽面积不应大于 40cm×25cm。

**5.3.2** 开槽前应仔细核对仪器测试点位和被测钢束的相对位置信息，并在开槽表面绘出待开槽口的基本形状。

**5.3.3** 开槽时应参考图纸和使用的波纹管尺寸，首先用电镐或开槽机开出测试槽的基本形状，在开槽深度即将到达波纹管表面时，采用角磨机缓慢切割波纹管外层，而后使用凿子人工开凿至预应力钢束暴露。

### **5.4 钢束表面处理**

**5.4.1** 开槽完毕后应采用砂布砂纸或电动砂轮对测试位置的钢束进行清洁和打磨。初始打磨时宜采用砂纸目数不高于 300 目的干磨砂纸进行粗磨去皮修型，粗磨后再使用高于 1000 目的细砂纸进行精磨，直至露出金属光泽。打磨后钢筋表面应保持光滑平整，无毛刺、凹孔、沙眼现象。

**5.4.2** 打磨面积不宜过大，满足点位测试要求即可。

**5.4.3** 打磨完毕后应对打磨表面进行电解抛光处理。表面打磨痕迹被完全消除时即可停止电解流程，电解后测试点的粗糙度  $R_a$  不应大于 10 $\mu$ m。

**5.4.4** 应力沿层深分布的函数关系可通过若干次交替进行电解（或化学）剥层和应力测定的办法求得，测试前可参考试验室标定结果选取最优电解深度，确保应力测试效果。

### **5.5 测试位置校准及设备固定**

**5.5.1** 仪器在测试过程中应保证位置固定，测试点定位时应符合下列规定：

—— 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。

—— 借助于垂直验具、水平气泡仪等，调整测角仪主轴线与测试点表面法线的重合度，应保证实际的  $\psi$  角或  $\psi_0$  角的准确度。

**5.5.2** 针对顶底板、腹板、小箱梁、T 梁等不同测试场景，可选用螺栓锚固或锚固钢板磁吸等适宜于现场环境的方式固定仪器。固定后进行至少 3 次应力测试，保证最大测试误差不超过 10MPa。

**5.5.3** 测试过程中应充分核验仪器测试摆动作业过程中的最大尺寸，确保仪器全程满足槽口的作业面积要求，防止仪器刮蹭槽壁。

## 5.6 光斑尺寸选取

**5.6.1** 照射面(X 射线光斑)的面积大小可通过选用不同直径的准直管作调整。

选择 X 射线光斑的原则如下：

—— 根据测试目的和要求的应力分布分辨率确定光斑尺寸。

—— 对于表面应力分布梯度较为平缓且曲率半径较大的试样，可选择适当的较大照射面积；如果在某一方向上应力分布梯度较大，则应缩小该方向上的光斑尺寸。

—— 光斑直径宜不大于测试点曲率半径的 0.4 倍。

**5.6.2** 在固定  $\psi$  角或  $\psi_0$  角的条件下，任意改变几次 X 射线照射位置，所得衍射线形不宜有明显差异，其净峰强度之差宜不超过 20%。

## 6 测试

### 6.1 测试过程规定

**6.1.1** 设备首次投入使用前，应请有资质的机构对仪器工作状态下的最大辐射剂量进行测试，并出具测试报告。根据其辐射剂量的大小，仪器应配备合适的 X 射线防护设施。

**6.1.2** 衍射角  $2\theta$  扫描步距建议设置为  $\leq 0.02^\circ$ ，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 3.0s。

**6.1.3** 测试采集前应将确保仪器的测角仪处于初始标定位置。

**6.1.4** 在导轨测试角度范围内设置的测试入射角度不应少于 6 个，选择若干个  $\psi$  角的数值时宜使  $\sin^2\psi$  值等分法布置。如前后两次的测试均值误差大于 20MPa，应在测试范围内增加  $\psi$  角的个数重新测量是否满足上述测试重复性要求。

**6.1.5** 每个单点位置的应力测试次数不应小于 3 次，最终测量值可取为若干次测试数据的平均值。若单点三次测试结果的标准差超过 20MPa，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。

**6.1.6** 应力测试过程中测试人员应远离测试装置 1.5m 以上。

**6.1.7** 测试过程中测角仪的动作不可受到干涉。

**6.1.8** 在测量过程中发生值得警惕的任何异常情况，应在第一时间启动急停/复位按钮，并终止一切操作流程。

## 6.2 数据采集

**6.2.1** 测试过程中设备配套测试软件自动转换并记录当前测试的应力值，现场测试人员根据屏显数值直接读取应力即可。

**6.2.2** 采集过程中应详细记录采集过程信息，并形成现场记录表，记录表可参照附录 C 执行。

**6.2.3** 每根钢束的测试点位数量不宜少于 3 个，且至少包含 2 根钢丝，并取测试的最低数值作为该根钢束的最终应力测试结果。

**6.2.4** 采集过程因各种原因导致测试中断，应重新启动数据采集流程，并剔除本次测量的所有测试数据。

## 6.3 测试结果处理

**6.3.1** 在衍射曲线上的计数较低、衍射峰宽化、峰背比较差的情况下，衍射峰的随机起伏波动会比较显著，由随机效应引入的不确定度分量就会比较大。此时应选用以下措施，并重新进行测量：

- 延长计数时间（曝光时间），增大计数；
- 提高入射 X 射线的管压和管流值；
- 在测试要求和条件允许的前提下适当增大照射面积；
- 缩小扫描步距，增加参与曲线拟合和定峰的数据点数。

**6.3.2** 应针对测量数据进行应力等级的分级修正，对于不同测试应力的情况，应查阅分级修正因子表对测试数据进行折减，以消除初始应力对测量值的影响，应力折减计算公式为：

$$\sigma_{test} = \alpha \sigma_{measured}$$

其中  $\sigma_{measured}$  为测量值， $\alpha$  为应力等级修正因子，其取值可参考附录 B， $\sigma_{test}$  为修正值。

**6.3.3** 将测试结果绘制于横轴为  $\sin^2\psi$ ，纵坐标为  $2\theta$  的笛卡尔直角坐标系内，如果测试结果 1-2 个  $\psi$  角的测试点位明显偏离其余点位的一次拟合线，则应剔除上述  $\psi$  角的测试点重新进行线形拟合分析，并记录修正后的应力测试值。

**6.3.4** 若测试结果的整体线形拟合程度较差，则应将测试方法更换为摆动法重新测试。摆动法测量时不受计数时间的影响，摆角  $\Delta\psi$  或  $\Delta\psi_0$  不宜超过  $6^\circ$ 。

## 7 结构恢复

对于埋置于在混凝土结构内部的钢束，其结构恢复应遵循下述条款规定；对于暴露于自然环境中的钢束，其结构恢复应遵循条款 7.1 的有关规定。

### 7.1 钢束状态恢复

**7.1.1** 测试完毕后，应使用低浓度的氢氧化钾溶液或同类碱性清洁剂清洗已测钢束表面，充分中和并消除打磨和电解过程中的污垢和残留物。

**7.1.2** 在被测点位置采用环氧树脂、聚氨酯等密封涂层进行防水密封，恢复其表面强度。

**7.1.3** 在外侧涂装聚氨酯耐磨涂层、陶瓷涂层等，恢复钢束的耐久性和抗磨损性能。

### 7.2 混凝土部分恢复

**7.2.1** 清理工作区，将开槽区域周围的杂物和碎片清除干净，手工清理开槽区域，确保表面干净、平整。

**7.2.2** 若开槽时切断普通钢筋，应采用点焊焊接方式将钢筋网架恢复完整。

**7.2.3** 在开槽范围内浇筑高强度水泥砂浆,并用振捣棒振捣,直至槽口被填满,并用镏刀或刮板将其表面处理平整。

**7.2.4** 完成混凝土开槽修补后,应进一步使用聚氨酯填缝剂、丙烯酸填缝剂、水泥基填缝剂等对浇筑缝隙进行修补,并确保开槽表面的平整度和密封性。

## 附录 A X 射线法应力测试原理

X 射线应力测定原理是基于 X 射线衍射理论。应力的存在是通过应变来进行测试的，对于多晶体材料而言，残余应力所对应的应变被认为是相应区域里晶格应变的统计结果，因此依据 X 射线衍射原理测定晶格应变。

材料的残余应力与宏观应变相对应，宏观应变被认为等同于晶格应变，晶格应变即是晶面间距的相对变化，而晶面间距的变化可以通过衍射装置依据布拉格定律求出——这便是 X 射线应力测定的完整思路。

一束具有一定波长的 X 射线照射到多晶体上时，会在一定的角度  $2\theta$  上接收到反射的 X 射线强度极大值，即所谓的衍射峰。X 射线的波长、晶面间距和衍射角度之间遵从布拉格定律：

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

其中， $d$  为发生衍射的材料的晶面间距， $\theta$  为布拉格角， $\lambda$  为 X 射线的波长。

在已知 X 射线波长  $\lambda$  的条件下，布拉格定律把宏观上可以测量的衍射角  $2\theta$  与微观的晶面间距  $d$  建立起确定的关系。

对于晶粒细小、无织构的多晶材料而言，在一束 X 射线照射范围里会有许许多多晶粒，它们的结晶学方向是充分紊乱的，所选定的  $\{h\ k\ l\}$  晶面处于空间任何方向的机会均等；但是在材料中存在应力的情况下，处于不同方向的  $\{h\ k\ l\}$  晶面，其晶面间距  $d$  会有所变化；如果在不同方向上作衍射分析，按照布拉格定律，所得的衍射角  $2\theta$  也会随之而变。X 射线应力分析的基本思路是，把残余应力  $\sigma$  所对应的宏观应变  $\varepsilon$  当作是相应区域里晶格应变  $\varepsilon^j$  的统计结果。因此依据 X 射线衍射原理测定晶格应变，即所选晶面族  $\{h\ k\ l\}$  晶面间距  $d$  的应变，便可以计算残余应力。

令衍射晶面法线与试样表面法线之夹角为  $\psi$ ，根据弹性理论，在平面应力状态下可以导出

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{\frac{1}{2}S_2} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}^{\{hkl\}}}{\partial \sin^2\psi}$$

式中  $\sigma_\varphi$  ——用  $\varphi$  确定的方向上的应力；

$\varepsilon_{\varphi\psi}^{\{hkl\}}$ ——法线在  $\varphi$  角和  $\psi$  角规定的方向上的  $\{h k l\}$  晶面间距  $d_{\{hk\}}$  的应变；

$\frac{1}{2}S_2$ ——X 射线弹性常数。

上式表明应力与应变相对于  $\sin^2\psi$  的变化斜率  $\frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}^{\{hkl\}}}{\partial \sin^2\psi}$  成正比，把这种应力测定方法称作  $\sin^2\psi$  法。

利用 X 射线衍射装置测得衍射角  $2\theta_{\varphi\psi}$ ，根据布拉格定律求得与之对应的晶面间距为  $d_{\varphi\psi}$ ，则晶格应变  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  可用晶面间距，进一步用布拉格角来表示：

$$\varepsilon_{\varphi\psi}^{\{hkl\}} = \ln\left(\frac{d_{\varphi\psi}}{d_0}\right) = \ln\left(\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta_{\varphi\psi}}\right)$$

使用测得的一系列对应不同  $\psi$  角的  $\varepsilon_{\varphi\psi}^{\{hkl\}}$ ，采用最小二乘法求得斜率  $\frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}^{\{hk\}}}{\partial \sin^2\psi}$ ，即可求得计算应力  $\sigma_{\varphi}$ 。



## 附录 B 中低应力分级修正试验测试流程

应力分级修正试验应在室内拉力试验机上进行，试件宜与工程中待测的钢束构造、批次、截面面积等相一致。

测试试样状态测试分为低应力状态测试和中应力状态测试两部分。低应力状态主要是针对拉应力小于 200MPa 的情况，中应力状态主要是针对拉应力大于 200MPa 小于 400MPa 的情况。低应力加载时每 10MPa 一个梯度进行逐步加载，中应力加载时每 20MPa 一个梯度进行逐步加载。定义应力修正因子  $\alpha$  为：

$$\alpha = \frac{\sigma_{\text{X射线}}}{\bar{\sigma}_{\text{拉力机}}}$$

其中  $\sigma_{\text{X射线}}$  为 X 射线测试应力， $\bar{\sigma}_{\text{拉力机}}$  为拉力机换算应力，即拉力机数显数值除以截面面积。按下表记录各梯度加载的应力修正因子  $\alpha$ ，各梯度间的应力值对应的应力修正因子通过线性内插方法确定。

表 应力分级修正因子表

拉力机换算应力 /MPa	应力修正因子 $\alpha$	应力 /MPa	应力修正因子 $\alpha$	应力 /MPa	应力修正因子
<b>低应力状态</b>					
10		80		150	
20		90		160	
30		100		170	
40		110		180	
50		120		190	
60		130		200	
70		140			
<b>中应力状态</b>					
拉力机换算应力 /MPa	应力修正因子 $\alpha$	拉力机换算应力 /MPa	应力修正因子 $\alpha$	拉力机换算应力 /MPa	应力修正因子
220		300		380	
240		320		400	
260		340			
280		360			

## 附录 C 公路桥梁预应力钢束 X 射线测试现存应力现场记录表

记录表应包括检测日期、测试设备型号、测试桥梁名称、测试钢束编号、工况号、测试应力值等内容，测试过程中的记录可参照下表填写。

记录编号：

第 页 共 页

工程名称				结构形式				
委托单位				施工单位				
检测单位				检测日期				
设备名称 (型号)				检测依据				
桥梁名称				检测位置				
钢束(束) 编号	钢束 规格	钢丝 编号	测试工况 号	测试应力值 (MPa)				备注
				1	2	3	平均值/标 准差	
检测部位示 意图								

检测人：

记录人：

复核人：