

中国钢结构协会团体标准

建筑结构金属材料强度仪器化压痕法检
测技术规程

Technical specifications for instrumental indentation detection
of strength of metal in building structure

XXXX-X-X 发布

XXXX-X-X 实施

前 言

根据《关于发布中国钢结构协会 2022 年第三批团体标准编制计划的通知》（中钢协[2022]45 号）的要求，编制组经大量调查研究，认真总结实践经验，在广泛征求意见的基础上制定本规程。

本规程于 X 年 X 月 X 日经主管部门批准发布，自 X 年 X 月 X 日起实施。

本规程共 X 章，主要技术内容包括：1 总则；2 术语与符号；3 检测设备与测试原理；4 检测方法；5 数据处理与强度计算；6 记录与报告。

本规程由中国钢结构协会负责管理，由南京工业大学（地址：南京市浦口区浦珠南路 30 号；邮政编码：211816）负责具体技术内容的解释。各单位在执行过程中若有修改意见或建议，请反馈至南京工业大学（地址：南京市浦口区浦珠南路 30 号；邮政编码：211816）。

本规程主编单位、参编单位、参加单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位：南京工业大学

南京工大建设工程技术有限公司

参 编 单 位：南京贺普科技有限公司

上海交通大学

北京春秋阳光科技有限公司

南京市房屋安全服务中心

南京安厦房屋安全鉴定检测事务所有限公司

南通市土木建筑学会

昆山市建设工程质量检测中心有限公司

南京江北新区建设和交通工程质量安全监督站

南京钢铁集团有限公司

主要起草人：彭洋、万里、杨伟、戴洪飞、余征跃、曹旷、许学龙、李进、陈建明、顾盛、于祥、朱萍、杨放、吕德鹏、田收、吴灿伟、谭赛、王炜伦、余日华、孙文、曹沁智、杨慰之、张雷、沈鹤鸣、周桂林、许晓峰、徐燕桥、秦国秀、姚海彬、郭太勇、唐鹏、孙彦平、胡桂宝、熊朝亮、赵睿、李华、冒鹏飞、施悦

主要审查人：

目录

1 总则.....	1
2 术语与符号.....	2
3 检测设备与测试原理.....	4
4 检测方法.....	8
5 数据处理与强度推定.....	17
6 记录与报告.....	20
附录 A 测点强度指标的计算方法	22
附录 B 钢筋芯部强度测试方法.....	25
附录 C 仪器化压痕法检测金属材料强度记录表.....	27

1 总则

1.0.1 为规范仪器化压痕法检测建筑结构金属材料强度的技术方法，保障检测结果的准确性，做到技术先进、数据可靠、评定科学，特制订本规程。

【条文说明】：仪器化压痕法检测建筑结构金属材料强度，不破坏材料完整性；对被测材料尺寸大小和形状无要求，适用性广泛，优势显著；检测前仅需打磨被测材料表面降低粗糙度，检测时可自动连续压痕，整体操作准备简便。压痕尺度在微米或者纳米级，是一种可以现场快速、微损检测建筑结构金属材料强度的技术方法。

1.0.2 本规程适用于建筑结构中金属材料的强度检测。

【条文说明】：本规程中的建筑金属材料是指碳素结构钢、低合金结构钢、铝合金、奥氏体不锈钢和热轧钢筋，但不包括疲劳裂纹尖端塑性区域、火灾后及发生蠕变等力学性能显著变化的金属材料。本规程遵照《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》GB/T 39635 中的方法进行建筑金属材料屈服强度和抗拉强度检测。本规程编制组已完成了 Q235、Q355（原 Q345），6063-T5 和 6063-T6 铝合金，S30408 和 S31603 奥氏体不锈钢，HPB335、HRB400 和 HRB500 热轧钢筋的系统性验证研究，完成了大量工程现场和实验室对比试验，共计完成了 1000 余个压痕试验，100 余个拉伸试验，详细分析验证了仪器化压痕法的测试结果的可靠性和可重复性。

1.0.3 按本规程进行建筑结构金属材料强度检测时，除应遵守本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术 语

2.1.1 仪器化压痕法 instrumented indentation method

通过仪器自动连续记录压头压入被测金属材料表面的压痕载荷和压痕深度来获得金属材料力学性能的测试方法。

2.1.2 载荷-深度曲线 force-depth curve

施加到压头上的载荷和压头在试件表面垂直压入深度之间的关系曲线。

2.1.3 零点 zero point

压头初次接触试件且载荷为零时载荷-深度曲线的参考点。

2.1.4 压痕屈服强度 indentation yield strength

通过仪器化压入试验连续记录金属材料的压入载荷-深度曲线，通过建立应力-应变关系所分析得到的屈服强度。

2.1.5 压痕抗拉强度 indentation tensile strength

通过仪器化压入试验连续记录金属材料的压入载荷-深度曲线，通过建立应力-应变关系所分析得到的抗拉强度。

2.1.6 接触过程 engage process

使压头与被测物表面精密接触且力值与深度值均为零点的过程。

2.1.6 压入比 indentation depth ratio

压入深度与宽度之比。

2.2 符 号

2.2.1 试验参数

s	——	两个任意压痕点接触半径的加载斜率之比；
a^*	——	只考虑弹性变形的接触半径；
a	——	考虑到弹性变形和堆积效应的真实接触半径；
$F_{\max}$	——	最大压痕载荷；
$h_{\max}$	——	最大压痕载荷 $F_{\max}$ 作用下的最大压痕深度；
h_r	——	$F_{\max}$ 处载荷卸载曲线的切线与压痕深度坐标的交叉点（见图 1）；

h_p	——	卸载后的残余压痕深度；
h_{pile}	——	凸起-凹陷的表征量；
h_c	——	在最大压痕载荷 F_{max} 时压头与被测试件的接触深度；
h_c^*	——	最大压痕载荷 F_{max} 作用下，只考虑弹性变形的压痕接触深度；
h_d	——	压痕弹性恢复深度；
A	——	压头与材料接触面的投影面积；
K	——	真应力和真应变关系式的强度系数；
n	——	应变硬化指数；
S	——	F_{max} 处载荷卸载曲线切线的斜率；
Ψ	——	平均接触压力与真应力的比值，塑性约束因子；
θ	——	球形压头和测试件接触时接触角度的 1/2。

2.2.2 材料力学性能

σ_T	——	真应力；
ε_T	——	真应变；
f_y	——	压痕屈服强度；
ε_y	——	压痕屈服强度值时的真应变；
f_u	——	压痕抗拉强度；
ε_u	——	压痕抗拉强度值时的真应变。

3 检测设备与测试原理

3.1 检测设备

3.1.1 用于建筑结构金属材料力学性能检测的压痕试验机（图 3.1.1）包括驱动电机、力传感器、传力装置、位移传感器、压头柄和压头以及连接计算机接口等组成单元。

【条文说明】：压痕试验机有位移、荷载两种控制方式，该仪器能自动实时测量和记录压入试验周期内作用压头的荷载和位移数据，可检测材料的拉伸性能，维氏硬度，断裂韧性和残余应力等，设备示意图如下。

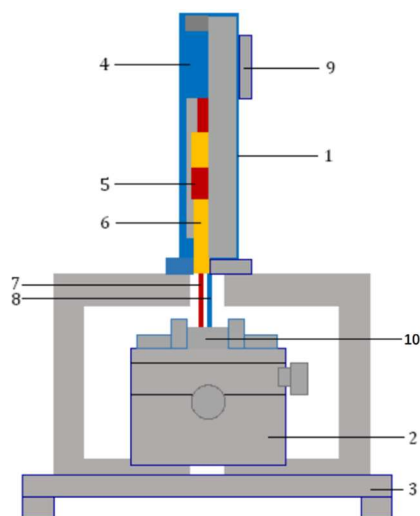


图 3.1.1 压痕试验机各组成单元示意图

1—主机单元；2—试样夹持及移动单元；3—基础试验台；
4—驱动电机；5—力传感器；6—传力装置；7—位移传感器；
8—压头柄和压头；9—连接计算机接口；10—试样

3.1.2 压痕试验机应符合下列要求：

- 1 驱动电机可对试件施加连续载荷。
- 2 载荷误差范围宜在 $\pm 1.0\%$ 以内。
- 3 能够连续采集和存储试验过程中的压痕载荷、压痕深度数据。

【条文说明】：压痕试验机包括载荷传感器和位移传感器，其中载荷传感器的精度范围为 $0.0\text{gf}-10.0\text{gf}$ ，位移传感器的精度范围为 $0.0\mu\text{m}-0.5\mu\text{m}$ 。

3.1.3 球形压头应采用碳化钨硬质合金制作，压头直径可以采用 0.5mm 、 1mm 、 2.5mm 。

3.1.4 压痕试验机的校准应按照现行国家标准《金属材料 硬度和材料参数的仪器化压痕试验 第2部分 试验机的检验和校准》GB/T 21838.2 执行。

3.1.5 检测使用的夹具或工作台应能满足固定压痕试验机的要求。

【条文说明】：检测使用的夹具或工作台，需满足稳固性、水平度、适配性的要求。稳固性指夹具或工作台应能承受工作载荷，保持试验时设备不发生位移。水平度指夹具或工作台应保持水平，避免影响压痕形状与检测结果。适配性指夹具和工作台应适配试验机及不同规格试样。

3.1.6 检测过程中环境温度应相对稳定，温度波动幅度不应大于 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

【条文说明】：检测温度一般在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，检测时避免出现构件内外存在较大温差的情况，如冷库内未有保温层的钢构件，构件室内侧和室外侧存着显著温差。

3.2 测试原理

3.2.1 压头压下时产生载荷-深度曲线，在同一位置，多次加载和卸载能够产生多循环的载荷-深度曲线，如图 3.2.1 所示。图 3.2.2 为最大压痕载荷下球形压头周围的弹性和塑性变形（隆起）。通过表征应力应变法将载荷-深度曲线转化成真应力-应变曲线得到被测金属材料的压痕屈服强度和压痕抗拉强度。通过分析载荷-深度曲线得到金属材料力学性能的方法按照附录 A。

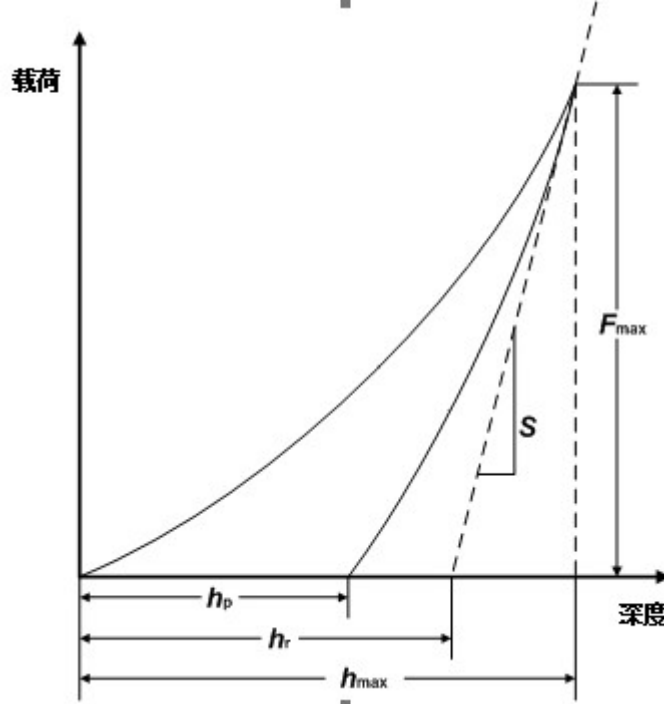


图 3.2.1 载荷-深度曲线

$F_{\max}$ ：最大压痕载荷； h_p ：卸载后的残余压痕深度； h_r ： $F_{\max}$ 处载荷卸载曲线的切线与压痕深度坐标的交叉点； $h_{\max}$ ：最大压痕载荷 $F_{\max}$ 作用下的最大压痕深度； S ： $F_{\max}$ 处载荷卸载曲线切线的斜率。

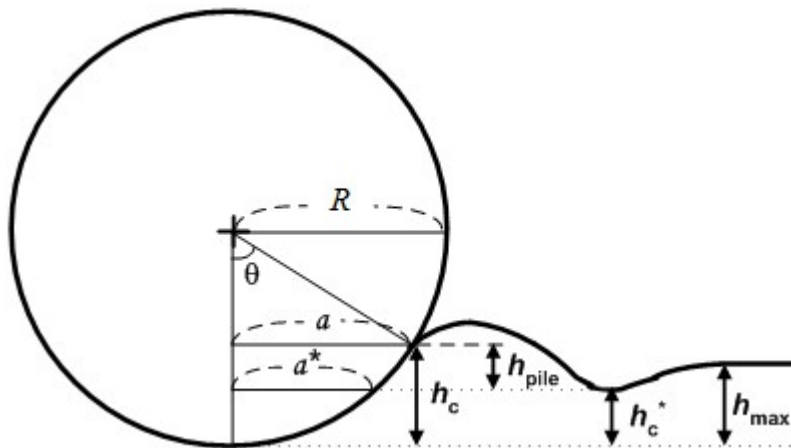


图 3.2.2 最大压痕载荷下球形压头压痕示意图

R ：球形压头半径； a ：考虑到弹性变形和堆积效应的真实接触半径； a^* ：只考虑弹性变形的接触半径； θ ：球形压头和测试件接触时接触角度的 1/2； h_c ：在最大压痕载荷 $F_{\max}$ 时压头与被测试件的接触深度； h_{pile} ：凸起-凹陷的表征量； h_c^* ：最大压痕载荷 $F_{\max}$ 作用下，只考虑弹性变形的压痕接触深度； $h_{\max}$ ：最大压痕载荷 $F_{\max}$ 作用下的最大压痕深度。

【条文说明】：本规程的多次加载和卸载指 15 次加载和卸载。本规程所采用的方法来源于《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》GB/T 39635，该标准详细解释了仪器化压痕法测试材料强度的方法及其理论背景，编制时参考了并部分采用 ISO/TR 29381:2008《Metallic materials — Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test — Indentation tensile properties》中的内容。《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》编制时对标准名称和内容做了修改，增加了残余应力测定的内容，完善了力学性能和残余应力测定体系，给出详细的理论方法和原理，操作性更强，结果更加明确。

4 检测方法

4.1 一般规定

4.1.1 建筑结构金属材料性能检测可分为型材和钢筋检测、原位检测及取样检测。

4.1.2 采用仪器化压痕法检测建筑结构金属材料力学性能时，宜调查收集下列资料：

- 1 建设单位、设计单位、施工单位名称；
- 2 构件名称、数量、截面类型及钢材设计牌号等；
- 3 构件加工及安装日期；
- 4 必要的设计图纸和施工记录；
- 5 检测原因。

4.1.3 型材检测可按单个构件或按批量进行检测，并应符合下列规定：

- 1 单个构件的检测应符合本规程第 4.2 节的规定。

2 对于同一牌号、同一类型、同一质量等级、同一安装条件的金属材料构件，可进行批量检测。按批量进行检测时，应随机抽取构件，抽检数量不宜少于同批构件总数的 5%且不宜少于 3 件。

【条文说明】：在同一批构件中，增加样本的数量，可以提高检测的精度，但由于检测精度与抽样数量平方根成反比，因此，要显著地提高检测精度必须付出较大的人力和财力的代价，况且，对已建成建筑物的检测而言，还不只是代价大小的问题，更多的是技术难度很大，有时为了确保既有结构的安全，甚至无法做到。采用仪器化压痕法可以准确的测得金属材料的强度值。为此，规程从保证检测结果平均值应具有可以接受的最低精度出发，规定了可采用随机取样原理的现场受检构件的最低数量为总数 5%且不少于 3 个(具体取样数由鉴定机构确定)。如果委托方对检测有较严的要求，也可适当增加受检构件的数量，但值得指出的是，现场抽样数量过大，也有不利之处，因为此时将很难保证检测条件前后一致，反而给检测带来新的误差。

4.1.4 进行构件中钢筋检测及取样检测的构件宜选取结构实体中具有代表性的构件，选取时应综合考虑下列因素：

- 1 对结构安全影响较小的部位；
- 2 易于进行检测后修复的部位。

4.1.5 检测过程中应避免或减少不利环境因素的影响，如冲击、振动和电磁干扰等。

4.1.6 当发现检测数据出现异常时，应补充检测或重新检测。

【条文说明】：数据异常指软件中的载荷-位移曲线出现凹凸异常、软件分析得到强度数据离散性大等。

4.2 型材检测

4.2.1 单个型材构件的测点布置应符合下列规定：

- 1 测点数量不宜小于 5 个；
- 2 测点应布置在构件上应力较小的区域；

【条文说明】：南京工业大学依据国家标准《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》GB/T 39635，针对 Q355 低合金高强度结构钢，6063-T5 和 6063-T6 铝合金，S30408 和 S31603 奥氏体不锈钢型材开展了不同载荷工况下的仪器化压痕测试，并且在测试过程中用应变片或应变计获得测区的工作应力。三种型材的试验结果均表明：相较于空载状态，在工作应力作用下的压痕强度测试数据虽有变动，但波动幅度较小。鉴于工作应力会对型材强度测试有一定影响，为确保仪器化压痕法检测型材强度的准确性，在实际工程测试时，应优先选择工作应力较小的区域布置测点，以此来降低工作应力对测试结果的影响。

- 3 型材厚度 B 应为最大压入深度 h 的 10 倍以上或者压头半径的 3 倍以上，弯曲的曲率半径不宜小于 30mm；
- 4 测点应布置在检测时不产生颤振的部位；
- 5 测点宜在构件表面均匀布置，且与相邻测点、构件边缘、螺栓孔洞及焊缝的距离应满足表 4.2.1 的规定。

表 4.2.1 测点布置的距离要求

位置要求	球形压头	维氏压头
相邻测点的几何中心距离	$\geq 5d$	$\geq 3d$
测点中心到试件边缘的距离	$\geq 3d$	$\geq 2.5d$
测点中心到焊缝边缘的距离	$\geq 0.5B$	$\geq 0.5B$
测点中心到螺栓孔边缘的距离	$\geq d_0$	$\geq d_0$
注： d 为球形压头直径或维氏压头对角线长度； B 为型材厚度； d_0 为螺栓孔直径。		

【条文说明】：测点距离遵照现行国家标准《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》GB/T 39635 和电力行业标准《电站金属材料力学性能仪器化压痕法检测技术规程》DL/T 2220 的建议。南京工业大学研究螺栓孔边金属力学性能的非均匀性，结果表明当测点离螺栓孔边缘一倍螺栓孔直径时，金属力学性能均匀。

4.2.2 检测前应对测点表面进行处理，处理过程应符合下列规定：

- 1 采用打磨设备去除测点表面污渍、涂层、锈蚀及氧化层，露出金属层，单个测点的打磨尺寸不宜小于 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ ；
- 2 打磨完成后应采用砂纸进行细致抛光，使金属面呈现金属光泽，抛光完成的金属面粗糙度 Ra 不应大于 $0.5\mu\text{m}$ ，表面粗糙度采用粗糙度仪进行测量，单个测试区域应测量 5 次，每次读数精确至 $0.01\mu\text{m}$ ，取 5 次测量值的平均值。

【条文说明】：现行国家标准《金属材料 压入试验方法 强度、硬度和应力-应变关系的测定》GB/T 37782 的规定，试样表面应确保能够精确测量压入深度，为满足该要求，检测前试样表面宜抛光处理，其表面粗糙度 Ra 应优于 $0.8\mu\text{m}$ 。此外，按照现行国家标准《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》GB/T 39635 的要求，试样表面与压头接触部位不得有氧化物、异物或润滑剂。打磨后再细致抛光，能有效地降低材料表面缺陷对试验结果的影响，从而确保测量精度。现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 中推荐里氏硬度测试时，钢材表面粗糙度不大于 $1.6\mu\text{m}$ 。规程编制组结合建筑行业的操作流程和施工方法特点，系统性研究了打磨工艺和表面粗糙度对仪器化压痕法测试结果可靠性的影响，经过实验室和现场试验，结果表明采用 60#，100#，240#和 400#砂纸打磨后，被测材料构件表面粗糙度 Ra 不大于 $0.5\mu\text{m}$ ，测试结果重复性好，结论可靠，工作强度适中，耗材消耗合理。

3 测点表面处理过程中应采取措施避免对型材硬度的影响。

【条文说明】：具体措施为打磨时用力均匀适中，速度不宜过快，避免过度打磨产生热量导致材料应力变化。如条件允许，可优先选择低温环境，打磨使用冷却装置对打磨区域降温，抑制因摩擦热导致的硬度变化。

4.2.3 单个测点的压痕法检测应符合下列规定：

1 加载前，手动调节试验机使压头缓慢接近测点表面，并同时观察压头与测点表面的距离，当该距离处于 $2\text{mm}\sim 5\text{mm}$ 之间时，停止移动压头。

2 开启试验机的接触流程，使压头处于接触零点位置，并确认接触零点的偏差小于最大压入深度的 1%。

3 宜采用深度控制的加载方法。最大的压入比为 0.6，压痕深度增加和减少速率不大于 $5\mu\text{m/s}$ ，在每级压痕深度持荷时间不小于 0.5s，载荷卸载率应为 50%，加卸载循环次数为 15 次。

4 加载过程中应实时注意荷载-深度曲线的变化，曲线应连续、平滑，如出现曲线畸形、陡变等异常情况，应中止加载，检查试验机及测点。

【条文说明】：出现异常情况时，应检查压头尖端是否钝化，压头与试件表面是否垂直，仪器测试参数设置是否正确，测点表面是否打磨光滑平整。

5 单次试验结束后，应确保压头收缩完毕，再拆除试验装置。

4.2.4 在特殊情况下可采取取样检测，在型材上进行取样作业时，应符合下列规定：

- 1 取样位置应具有代表性，避开切割、焊接及可能出现塑性变形的部位。
- 2 取样大小应满足试件加工要求。
- 3 不宜采用焰切作业。

4 取样作业后应立即采取措施对型材进行修复。

【条文说明】：特殊情况指检测时需要进行理化表征，如进行硬度、金相和化学成分试验，此时试样尺寸不满足室温拉伸试验对试件的要求，无需获得金属材料强度。此时，可以采取仪器化压痕法在硬度、金相和化学成分试样上进行试验，获得金属材料的强度。取样时选取加工方法和工具等应满足现行《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 和《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》GB/T 2975 的要求。南京工业大学研究表明，焰切作业时试样热影响区面积大且难以控制，热影响区受温度剧烈变化的影响，试样容易局部力学性能分布不均匀，造成仪器化压痕法强度测试结果存在系统性偏差，故不推荐采用。

4.2.5 试样的制备与加工应符合下列规定：

1 型材试样宜加工成片状矩形，短边尺寸不宜小于 20mm，钢材型材厚度不宜小于 5mm，铝合金及不锈钢型材厚度不宜小于 2mm。

2 试样的制备与加工过程中应采取措施减免对试样硬度的影响。

【条文说明】：取样时加工余量等应满足现行《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 和《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》GB/T 2975 的要求。

4.2.6 对试样进行检测的试验台应具有足够的刚度，并放置在刚性体上。试验台夹具应满足稳固加持试样的要求。

4.3 构件中钢筋检测

4.3.1 进行构件中钢筋检测时，检测位置及被检测钢筋宜符合下列规定：

1 检测构件被测试位置的短边尺寸宜大于 250mm，保护层厚度不宜大于 35mm。

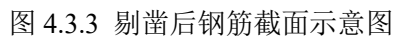
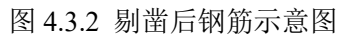
2 被检测的钢筋公称直径不宜小于 10mm。

3 对于柱、墙类构件，宜选择轴压比较小的构件进行检测；对于梁、板类构件，底部钢筋的检测位置宜布置在支座 1/4 跨范围内，顶部钢筋的检测位置宜布置在跨中。

【条文说明】：依据现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784，混凝土中的钢筋宜采用原位实测法进行检测。原位实测法指在不破坏构件整体结构的前提下，直接于构件实际位置开展检测，且检测位置应选在应力较小处。该方法既能避免对结构造成损伤，又能更精准地反映构件实际状态与性能。被检测的钢筋应力不宜过大，过大应力可能会导致钢筋变形甚至损坏，进而影响检测的准确性和安全性。

4.3.2 进行构件中钢筋检测前，应剔凿检测位置周边的混凝土保护层，剔凿过程

4 在初步剔凿的基础上,采用锤、钎手工作业的方法剔凿出被测钢筋。剔凿长度不宜小于 120mm,任一截面钢筋外露长度应超过其总周长的 1/2。



3 打磨完成后应采用砂纸进行细致抛光,使金属面呈现金属光泽,抛光完成的金属面粗糙度 Ra 不应大于 $0.5\mu\text{m}$,表面粗糙度采用粗糙度仪进行测量,单个

测试区域应测量 5 次，每次读数精确至 0.01 μm ，取 5 次测量结果的平均值。

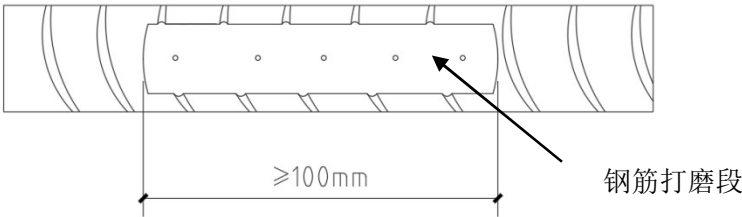


图 4.3.4 带肋钢筋打磨抛光示意图

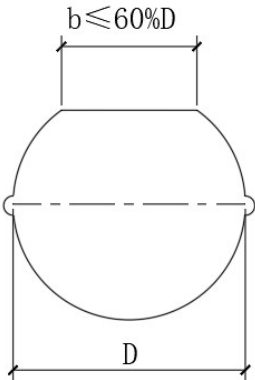


图 4.3.5 带肋钢筋打磨宽度示意图

注：D 为钢筋公称直径；b 为钢筋打磨宽度。

4.3.4 应以处理后的钢筋外露段作为 1 个测区。测区内的压痕法检测应符合下列规定：

- 1 测区内应布置不少于 5 个测点，测点应沿钢筋中轴“一”字型均匀布置，相邻测点间距不宜大于 10mm，不应小于 5mm。
- 2 单个测点的压痕法检测流程应符合本标准第 4.2.4 条的规定。
- 3 数据异常时，应重新进行检测。

【条文说明】：数据异常的原因见 4.1.6 条条文明。除此之外，热轧钢筋数据异常也可能是钢筋并非热轧钢筋。现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分 热轧带肋钢筋》GB 1499.2 中对不符合规定的钢筋，需按照附录 B 进行宏观金相、微观组织和硬度试验，根据试验结果进行判定。由于仪器化压痕法测试局部微小区域的金属材料强度，南京工业大学研究时曾出现不符合热轧钢筋要求的试样，试验结果表明，仪器化压痕法测试钢筋打磨后近表面和芯部的强度存在显著差异，同批试样的原状试件和狗骨试件拉伸试验证实了仪器化压痕法测试结果的准确性，表明仪器化压痕法具有检测非热轧钢筋的能力，本规程附录 B 给出了测试方法。

4.3.5 在特殊情况下可采取取样检测，在构件上进行取样作业时，应符合下列规定：

- 1 取样位置应具有代表性，避开切割、焊接及可能出现塑性变形的位罝。
- 2 取样大小应满足试件加工要求。
- 3 不宜采用焰切作业。
- 4 取样作业后应立即采取措施对构件进行修复。

【条文说明】：特殊情况指检测时需要进行理化表征，如进行硬度、金相和化学成分试验，此时试样尺寸不满足拉伸试验对试件的要求，无需获得金属材料强度。此时，可以采取仪器化压痕法在硬度、金相和化学成分试样上进行试验，获得钢筋的强度。取样时选取加工方法和工具等应满足现行《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784 和《混凝土中钢筋检测技术标准》JGJ/T 152 的要求。

4.3.6 试样的制备与加工应符合下列规定：

- 1 钢筋试样的长度不宜小于 100mm。
- 2 试样的制备与加工过程中应采取措施减免对试样硬度的影响。

4.3.7 对试样进行检测的试验台应具有足够的刚度，并放置在刚性体上。试验台夹具应满足稳固加持试样的要求。

4.3.8 完成检测的构件应及时修补。

【条文说明】：混凝土构件剔凿后，为保证结构的安全，减小进一步损伤，应对完成检测的构件进行及时修补。

4.4 工装固定

4.4.1 型材或圆形管材可采用磁吸或链式工装固定压痕试验机。试验机安装过程中应注意保护压头柄及压头，避免压头接触测点表面。安装完成后应检查是否牢靠并确保压入方向与测点表面垂直。

【条文说明】：磁吸工装用于将压痕试验机固定在非圆形截面构件的被测板件上，其应用方式如图 4.4.1-1 所示；链式工装则用于将压痕试验机固定在圆形截面构件的被测表面，使用方法参照图 4.4.1-2。

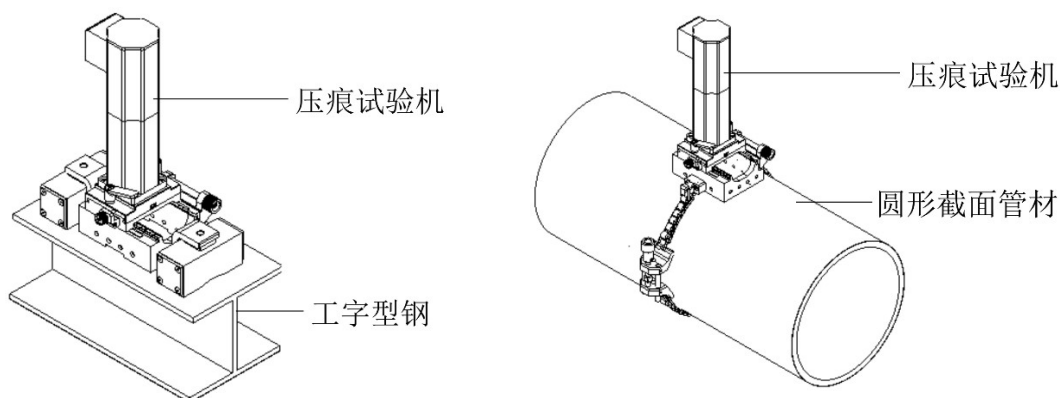


图 4.4.1-1 磁吸工装

图 4.4.1-2 链式工装

4.4.2 混凝土构件中的钢筋可采用平板工装固定压痕试验机，试验机安装过程中应注意保护压头柄及压头，避免压头接触测点表面。安装完成后应检查是否牢靠并确保压入方向与测点表面垂直。

【条文说明】：磁吸工装仅适用于具有磁性的构件，混凝土构件无磁性，故无法使用磁吸工装。针对混凝土构件，可采用由固定平板、连接件、坐标滑块及膨胀螺栓构成的平板工装。施工时，将膨胀螺栓固定在混凝土构件中，以此确保压痕试验机能够稳定运行，使用方法参照图 4.4.2。

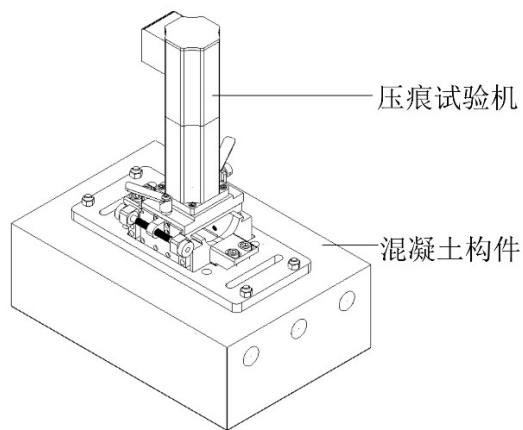


图 4.4.2 平板工装

5 数据处理与强度推定

5.1 数据处理

5.1.1 根据第3章的相关要求得到测点的压入载荷-深度曲线,对数据进行分析,得到各测点的压痕抗拉强度及压痕屈服强度,测点强度计算方法可参照本规程附录A的相关规定。

5.1.2 各测点的压痕抗拉强度及压痕屈服强度的异常数据可根据《数据的统计处理 and 解释 正态样本离群值的判断和处理》GB/T 4883 规定的方法进行判断和处理。

5.2 强度计算

5.2.1 构件的强度平均值应根据各测点的压痕强度值计算。当测点数为5个及以上时,应计算强度标准差。平均值及标准差应按下列公式计算:

$$m_{f_y^c} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{y,i}^c}{n} \quad (5.2.1-1)$$

$$S_{f_y^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{y,i}^c)^2 - n(m_{f_y^c})^2}{n-1}} \quad (5.2.1-2)$$

$$m_{f_u^c} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{u,i}^c}{n} \quad (5.2.1-3)$$

$$S_{f_u^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{u,i}^c)^2 - n(m_{f_u^c})^2}{n-1}} \quad (5.2.1-4)$$

式中: $f_{y,i}^c$ —— 测点压痕屈服强度值 (MPa), 精确至 0.1 MPa;

$f_{u,i}^c$ —— 测点压痕抗拉强度值 (MPa), 精确至 0.1 MPa;

$m_{f_y^c}$ —— 结构或构件测点压痕屈服强度的平均值 (MPa), 精确至 0.1 MPa;

$m_{f_u^c}$ —— 结构或构件测点压痕抗拉强度的平均值 (MPa), 精确至 0.1 MPa;

$S_{f_y^c}$ —— 结构或构件测点压痕屈服强度的标准差 (MPa), 精确至 0.01 MPa;

$S_{f_u^c}$ —— 结构或构件测点压痕抗拉强度的标准差 (MPa), 精确至 0.01 MPa;

n —— 对于单个检测的构件,取该构件的测点数;对批量检测的构件,取所有被抽检构件测点数之和。

5.2.2 构件的强度推定应符合下列规定：

- 1 当构件的测点数少于 5 个时，应按下式计算：

$$f_y = f_{y,min}^c \quad (5.2.2-1)$$

$$f_u = f_{u,min}^c \quad (5.2.2-2)$$

- 2 当构件的测点数不少于 5 个时，应按下式计算：

$$f_y = m_{f_y^c} - k \cdot S_{f_y^c} \quad (5.2.2-3)$$

$$f_u = m_{f_u^c} - k \cdot S_{f_u^c} \quad (5.2.2-4)$$

式中： f_y —— 屈服强度推定值（MPa），精确至 0.1 MPa；

f_u —— 抗拉强度值推定（MPa），精确至 0.1 MPa；

$f_{y,min}^c$ —— 构件中最小的测点压痕屈服强度值（MPa），精确至 0.1 MPa；

$f_{u,min}^c$ —— 构件中最小的测点压痕抗拉强度值（MPa），精确至 0.1 MPa。

k —— 与概率分布下分位数 α 、检测所取置信水平 γ 、构件数量 n 有关的金属材料标准强度计算系数， $\alpha=0.05$ ， $\gamma=0.90$ ， k 按照现行 GB 50292 《民用建筑可靠性鉴定标准》附录 L 查表得到。

【条文说明】：现行国家标准《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》GB/T 39635 和电力行业标准《电站金属材料力学性能仪器化压痕法检测技术规程》DL/T 2220 中并未推荐金属材料强度标准值的推定方法。编制组详细研究了仪器化压痕法金属材料强度推定方法，研究表明现行国家标准《金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力》的强度测试结果的准确度与现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第 1 部分 室温试验方法》相当。采用仪器化压痕法和拉伸试验法对张家港某钢桁架结构 Q235 角钢样品进行了测试，拉伸试验测得的屈服强度均值为 256.8MPa，标准差为 1.9MPa，抗拉强度均值为 425.2MPa，标准差为 2.2MPa，仪器化压痕法测得的屈服强度均值为 266.9MPa，标准差为 2.7MPa，抗拉强度均值为 422.6MPa，标准差为 4.1MPa。分别采用仪器化压痕法和拉伸试验法对南通某钢筋混凝土结构 HRB400 热轧钢筋样品进行了测试，拉伸试验测得的屈服强度均值为 405MPa，抗拉强度均值为 632.5MPa，仪器化压痕法测得的屈服强度均值为 431.2MPa，标准差为 6.0MPa，抗拉强度均值为 654.6MPa，标准差为 3.9MPa，上述数据表明工程现场采用仪器化压痕法进行强度测试，测试准确度与拉伸试验相当。因此可以采用拉伸试验强度推定方法作为仪器化压痕法的强度推定方法，当测点少于 5 个时，按照现行国家标准《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 的推荐做法，金属材料强度标准值取测试结果的最小值；当测点不少于 5 个时，按照现行国家标准《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 的推荐做法，金属材料强度标准值取测试结果均值与 k 倍标准差的差值。

5.2.3 当批量检测时，强度推定应按下式计算：

$$f_y = m_{f_y^c} - kS_{f_y^c} \quad (5.2.3-1)$$

$$f_u = m_{f_u^c} - kS_{f_u^c} \quad (5.2.3-2)$$

式中： k —— 推定系数，宜取 1.645。当需要进行强度区间推定时，可按现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的有关规定取值。

5.2.4 对按批量检测的构件，当该批构件强度标准差大于平均值的 10% 时，该批构件应全部按单个构件进行强度推定。

6 记录与报告

6.0.1 试验记录应给出试验的详细信息，包括但不限于：

- 1 执行标准；
- 2 试件名称、材质、规格、热处理状态、运行时间等；
- 3 仪器、压头类型及规格等；
- 4 试验循环控制方法；
- 5 最大压痕深度或最大压痕载荷；
- 6 压痕深度增加/减少速率；
- 7 加载、卸载次数；
- 8 载荷卸载率；
- 9 载荷-深度曲线；
- 10 测试点部位（附图）；
- 11 测试数据及结论；
- 12 试验、校对人员；
- 13 试验温度；
- 14 测试、报告日期。

试验记录可参照本规程附录 C 使用。

6.0.2 试验报告应包括下列内容：

- 1 委托单位名称；
- 2 工程概况，包括工程名称、结构类型、规模等；
- 3 设计单位、施工单位及监理单位名称等；
- 4 检测目的、内容、范围、依据标准、抽样方法和抽样数量；
- 5 检测仪器，包括设备仪器名称、型号等；
- 6 检测日期及时间、检测时环境温度；
- 7 结构图纸标示的检测位置和所测构件的检测具体部位；
- 8 检测结果；
- 9 实验中是否存在异常情况异常情况描述；
- 10 结论及建议。

附录 A 测点强度指标的计算方法

A.0.1 接触半径 a 和接触面积 A 可根据下列要求计算：

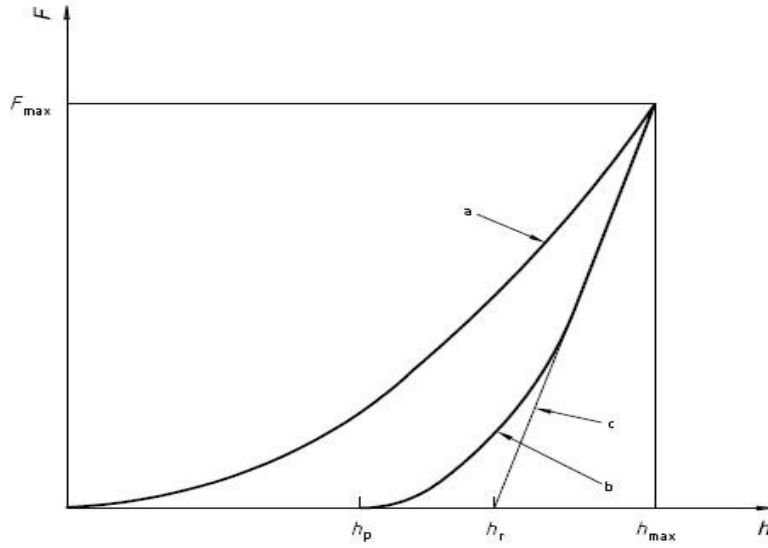


图 A.1 载荷-深度曲线

采用应变硬化指数 n 的初值，根据载荷-深度曲线的深度值与卸载曲线的斜率，使用式 (A.1) 计算接触深度 h_c^* 。

接触半径 a 与接触深度 h_c 是直接相关的。对于球形压头来说，根据几何关系可以得到未考虑堆积/沉降影响的接触半径 a^* 和接触深度 h_c^* 的关系。

$$a^{*2} = 2Rh_c^* - h_c^{*2} \quad (\text{A.1})$$

采用卸载曲线计算接触深度。即

$$h_c^* = h_{\max} - h_d \quad (\text{A.2})$$

式中 h_c^* 是未考虑堆积/沉降影响的接触深度， $h_{\max}$ 是最大压深， h_d 是压痕弹性恢复深度，采用公式 (A.3) 计算弹性压深。

$$h_d = \omega(h_{\max} - h_r) \quad (\text{A.3})$$

h_r 是卸载曲线的切线与深度轴的交点（见图1）， ω 是压头形状系数，考虑了卸载时接触面积的变化。对于平面压头 $\omega = 1$ ，对于锥形压头 $\omega = 0.72$ ，对于抛物线形压头 $\omega = 0.75$ 。

在计算真实接触半径和接触面积时，采用公式 (A.3)，考虑材料堆积/沉降的修正办法，即：

$$c^2 = \frac{a^2}{a^{*2}} = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} \quad (\text{A.4})$$

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (\text{A.5})$$

式中 n 为材料的应变硬化指数； R 是压头半径， a 是真实接触面积的半径； a^* 是未经修正的接触半径。

A.0.2 表征应力和表征应变可根据下列要求计算：

根据公式 (A.6) 计算表征应变 ε_r 。

$$\varepsilon_r = \alpha \frac{1}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} = \alpha \tan \gamma \quad (\text{A.6})$$

式中： $\tan \gamma$ 为接触边缘的剪切应变； α 为与材料无关的常数，推荐 $\alpha = 0.14$ 。

在完全塑性变形的情况下，根据公式 (A.7) 计算表征应力 σ_r 。

$$\sigma_r = \frac{1}{\Psi} \frac{F}{A} = \frac{1}{\Psi} \frac{F}{\pi a^2} \quad (\text{A.7})$$

式中： Ψ 为塑性约束因子，与塑性区的扩展程度，即与材料屈服应变及应变硬化指数有关。通过大量的工作，塑性约束因子 Ψ 已确定，建议 $\Psi=3$ 。

A.0.3 材料弹塑性曲线可根据下列要求计算：

根据 A.2 所得的表征应力和表征应变的点，按照公式 (A.8) 拟合得到材料的弹塑性曲线。如果所得的应变硬化指数 n 与初值不同，则用所得的 n 值重复第一步至第三步的计算直至两者相同为止。

$$f_y = E \varepsilon_y = K \varepsilon_y^n \quad (\text{A.8})$$

式中： σ_y 为材料的屈服强度； ε_y 为材料屈服时对应的应变。

A.0.4 材料弹性模量可根据下列要求计算：

采用压痕法进行测试时，金属材料的弹性模量与弹性接触刚度之间存在如下所示的关系式

$$S = \frac{dF}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (\text{A.10})$$

式中： S 为弹性接触刚度，也就是卸载曲线最初的斜率； F 为施加在压头上的载荷； h 为压头压入的深度； A 为压头与材料接触面的投影面积； E_r 为折算的弹性模量； E ， ν 和 E_i ， ν_i 分别为材料和压头的弹性模量与泊松比。

A.0.5 材料的压痕屈服强度和压痕抗拉强度可根据下列要求计算：

材料弹塑性曲线确定之后，在应变 0.2% 处以弹性模量 E 为斜率作一条直线，该直线与材料的弹塑性曲线的交点确定了材料的屈服强度。而材料的抗拉强度则由拉伸曲线不稳定条件给出。

$$f_y = K\varepsilon_y^n = E(\varepsilon_y - 0.002) \quad (\text{A.11})$$

抗拉强度出现在在颈缩发生前的最大应力处，即抗拉强度是工程应力-应变曲线中的最大值。因此对工程应力求导为零时，所对应的工程应力为抗拉强度，此时真应变 $\varepsilon = n$ ，抗拉强度 σ_u 计算公式如式（A.12）所示。

$$f_u = K\left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (\text{A.12})$$

式中：e 为自然对数的底， $e = 2.71828$ 。

由于采用了多次循环加载卸载，测点的应力应变水平已经接近或超过抗拉强度，因此，表征应力应变法可准确测得抗拉强度值。根据这些应力应变点拟合可准确得到应变硬化指数 n 的数值。

附录 B 钢筋芯部强度测试方法

- B.0.1** 钢筋芯部强度可采用仪器化压痕法测定。
- B.0.2** 用仪器化压痕法检测构件中钢筋芯部强度时，打磨深度取 50%钢筋公称直径，见图 B.1。

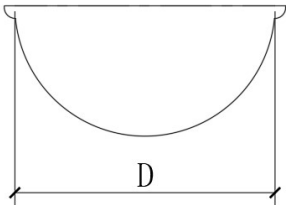


图 B.1 带肋钢筋打磨宽度示意图

- B.0.2** 本次钢筋强度测试采用 AIS 3000 Compact 压痕仪，被测材料是 14mm 直径的 HRB335、HRB500 钢筋。
- B.0.3** 依据现行《金属材料拉伸试验 第 1 部分 室温试验方法》（GB/T 228.1）把同批钢筋制备成圆状带肋钢筋试件、芯材哑铃状试件和钢筋段试件。根据第 4 章的检测方法分别对试件进行检测。
- B.0.4** 钢筋试样压痕试验结果见下表。由表 B.1 可知，HRB500 钢筋三种试件的屈服强度、抗拉强度结果都较为一致。由表 B.2 可知，HRB335 钢筋中原状带肋钢筋试件的屈服强度、抗拉强度均远大于哑铃状钢筋芯材和钢筋段表面的强度，屈服强度最大差异为 268MPa，抗拉强度最大差异为 222MPa。由检测结果可知 HRB335 钢筋表面强度远大于钢筋芯部强度，钢筋强度分布不均匀。
- B.0.5** 按照现行《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB/T 1499.2）对 HRB335 进行检测，判定 HRB335 钢筋为不合格钢筋。

表 B.1 14mm HRB500 钢筋仪器化压痕试验数据

试件编号	直径 / 牌号	试样种类	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa
YZ-H-2-1	14mm/HRB500	原状带肋钢筋	559.2	783.8
YZ-H-2-2			529.9	741.9
YL-H-2-1			544.7	782.9
YL-H-2-2		哑铃状芯材	541.0	775.1
YL-H-2-3			545.7	767.9
GD-H-2-1			537.1	768.0
GD-H-2-2		钢筋段	531.1	763.9

表 B.2 14mm HRB335 钢筋仪器化压痕试验数据

试件编号	直径 / 牌号	试件种类	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa
YZ-H-1-1	14mm/HRB335	原状带肋钢筋	595.4	740.2
YZ-H-1-2			596.7	742.8
YL-H-1-1			345.6	561.2
YL-H-1-2		哑铃状芯材	355.1	578.0
YL-H-1-3			362.2	590.4
GD-H-1-1			328.7	520.5
GD-H-1-2		钢筋段	335.9	536.3

附录 C 仪器化压痕法检测金属材料强度记录表

检测人员：

检测日期： 年 月 日

工程名称					
建设单位				设计单位	
施工单位				监理单位	
检测依据					
检测仪器：（仪器型号、压头规格、最大压痕深度或最大压痕荷载、加载速率、加载卸载次数、）					
构件名称				构件外观描述	
测点部位				测试温度	
构件编号	测点	屈服强度	平均值	抗拉强度	平均值
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
备注					