

## 钢筋— 拉伸试验指南

### 介绍

钢筋的用途是埋在混凝土中提高周围混凝土的整体强度。材料产品标准旨在帮助确保全世界生产的钢筋无论产地，都表现出相同的物理、化学和机械特性。为了确定钢筋是否符合它发布的规格，有必要执行相应的机械试验，确保产品的质量。

钢筋的力学试验要求不尽相同，但通常可归为以下几种基本试验类别：

- 拉伸
- 弯曲
- 压缩
- 疲劳

也可能需要其他相关产品试验，例如机械对接（联轴器）的滑动试验。本文档主要着重阐述十分常用的但有时充满挑战的拉伸试验。

### 拉伸试验和标准

在全球层面上，国际标准组织 (ISO) 下辖的技术委员会负责为全球的钢筋产品制订产品和试验标准。除规定螺纹钢的最小上屈服强度 (ReH)、Rm/ReH 比和伸长率等特性外，ISO 6935-2 等 ISO 产品标准还规定了如何测量它们的拉伸特性。标准中直接阐述了钢筋产品的特殊试验要求，并额外引用了 ISO 15630-1，后者专门重点介绍类似产品的试验方法。ISO 15630-1 在适当的地方进一步引用了更常见的金属拉伸试验标准 ISO 6892-1。

	ISO	ASTM
钢筋产品标准	6935-2	A615
钢筋试验标准	15630-1	A370
金属拉伸试验标准	6892-1	E8

表格 1— 常见钢筋产品和试验标准的例子

在地区层面，许多国家也有地方标准组织，有的甚至可能在全球 ISO 委员会成立之前就已经存在。他们经常维护他们自己的产品和试验标准，也可能在适当的情况下选择采纳全球 ISO 标准。例如在美国，ASTM 很早就为钢筋制订了产品和试验标准。ASTM A615、A706、A955 和 A996 等产品标准提供最基本的产品规范，同时也加入用于确定拉伸特性的特殊试验详情。还可能引用了 ASTM A370 中的额外试验要求。该钢铁试验标准阐述钢铁产品的力学试验。还进一步引用了基本的金属拉伸试验标准 ASTM E8。

无论哪一个管理机构制订，大多数全球和地方标准中提供的信息非常翔实，旨在帮助用户了解以下基本试验要求：

- 所需的设备
- 相关术语和符号
- 试样制备
- 试验过程或方法
- 计算或确定结果

虽然标准提供了全面的详情，但仍可能留下一些可供用户自我解读的空间，这经常引起试验执行方式上的差异。另外，如果实验室依据各种全球或地方标准进行产品试验，那么充分理解和辨别不同标准中的术语和方法之间的细微差别也可能充满挑战。

本文档意在对钢筋产品和试验标准进行补充，将尝试在用户经常误解或曲解的地方提供进一步解释说明。文档内容具有笼统性和总结性，因此无论遵循哪个试验标准都可以运用它。

## 设备考虑因素

### 容纳弯曲试样

根据标准的指示，在拉伸试验前必须拉直钢筋试样。结果许多试样在它们的长度方向上仍可能具有轻微的弯曲或非线性情况。因此，机架和夹具如果能够容纳轻微弯曲的试样最好。



图 2 — 非盘曲的钢筋在长度方向上展现出轻微的弯曲

为保持试样的轴向对中，建议采用夹持中心位置的机械夹具。例如 Instron® DuraSync™ 等液压平推夹具最适用于夹持弯曲试样，因为 2 面之间的机械平衡（同步）使得它们即使在来自弯曲试样的侧载荷抵制夹面闭合时也能够夹持在中心位置。这有助于提高对中度，消除在试验之间对夹具“复位”的必要性。

“复位”通常与液压同步的夹具设计有关，当存在试样侧载荷时，液压同步夹具不能夹持在中心位置。在试验之间不对此类夹具复位容易造成上下夹具之间不一致。

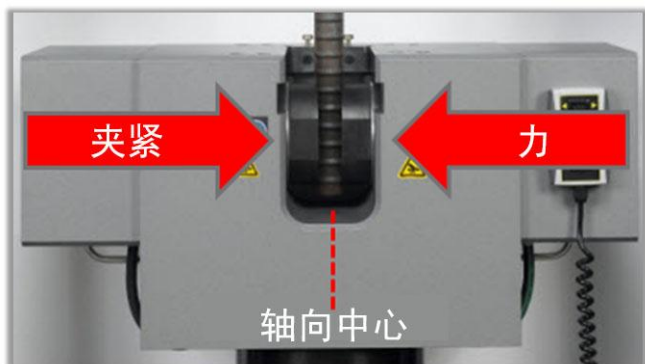


图 3 — DuraSync 平推夹具将钢筋试样夹持在中心位置

### 试样变形和结垢

夹面必须能够容纳钢筋试样表面上常见的变形和鳞垢。夹面锯齿间聚集鳞垢可能导致试样打滑。齿形太具攻击性可能导致试样过早断裂，而且试验后不易取出两半试样。因此夹齿的轮廓应允许鳞垢自然掉落或者在试验之间可以轻松地将它们刷掉。它们还应该降低夹具造成试样断裂的可能性。如果断裂成两半的试样还卡在夹面中，操作人员必须用锤子或其他方式将它们取出。这会降低效率，增加操作人员的疲劳感和挫折感。

还应该为夹具的机械功能提供鳞垢掉落保护。如果鳞垢可以进入活动件之间，它们可能磨损至关重要的表面，造成性能不佳或夹具故障。为了帮助防止不必要的磨损，定期从试验设备清除鳞垢非常重要。



图 4 — 一次试验后下夹具堆积大量鳞垢

## 剧烈的试样断裂

由于钢筋试样在拉伸断裂期间会释放大量的蓄能，因此试验系统必须能够承受试样回弹造成的震动。夹具受到的冲击最大，必须足够坚固，能够吸收这些冲击力，同时仍能牢固夹持已经断裂的两半试样，使它们不会从试验机架上飞出。飞出的试样碎片可能对操作人员构成安全危险，造成设备损坏。基于以上所有理由，建议使用液压作动的（楔形或平推）夹具。



图5—断裂后的 #18 (57 mm) 钢筋分离（弹回）

## 引伸计

在钢筋试验中，并非总是需要引伸计。如果可以看见明显的屈服点（上屈服 —  $R_{eH}$ ），无需引伸计，只要报出此点的应力值就可以确定屈服强度。而断后伸长率（ASTM 和 ISO）和最大力总伸长率（ISO）可在试验后通过试样表面上的标记手动确定。

不过很多时候必须使用引伸计来计算偏置屈服（ $R_{p0.2}$ ）等结果，另外通过自动而不是根据试样标记手动确定伸长率时也需要使用引伸计。在这些情况下，常用的引伸计比机械加工的金属试样所用的引伸计具有更大的标距长度。它们还必须足够坚固，能够承受试验期间掉落在它们上面的鳞垢，而且能够贴附在变形钢筋的不平坦表面上。根据变形，它们可以贴附在变形之间的平坦表面上，也可以贴附在纵向肋条上。

钢筋试验中最常用的引伸计为手动夹持式引伸计，在运行试验前，由操作人员直接安装到钢筋上。如果引伸计不能承受断裂，则必须在屈服发生后试样断裂前由操作人员手动拆除。能够承受试样断裂的手动引伸计在这方面具有优势，不过，如果经常跟踪到断裂，刀口磨损可能加速。



图6—手动夹持式钢筋引伸计

大多数手动引伸计还具有固定的标距长度设计。在使用不同标距长度对多种规格的钢筋进行试验时，必须准备多个具有唯一标距长度的引伸计。市场上有些手动引伸计可以配置多种不同的标距长度，因此一个引伸计可以满足大多数常见需求。这些引伸计需要操作人员在需要不同标距长度的试验之间正确地手动配置引伸计。

自动接触式引伸计，如 Instron® AutoX750，相对于手动引伸计具有多项优势。自动移除和夹持，操作人员不用进入试验空间，消除了与试样断裂相关的所有风险。自动根据软件输入设定标距长度，并且在引伸计的整个行程上可以无限调节，这样一台引伸计可以满足所有试样需求。需要时，还可以跟踪到断裂。自动引伸计可能是需要自动记录伸长率测量值的最佳解决方案。结论部分将对此进行进一步讨论。





图7—1500KPX 上的 AutoX750 11 号 (36 mm) 钢筋试验

## 试验速度与控制

遵循试验标准颇具挑战性的方面之一是确定如何正确高效地执行拉伸试验。虽然标准对试验不同阶段的允许试验速度和控制模式进行了具体详细的说明，但正确地执行试验仍可能非常困难。这可能与标准解释起来困难和试验设备存在限制二者有关。

可以看到，影响试验控制和速度的详细说明分散在试验标准的各种部分。而且还可能必须参考多个标准才能获得所有必需的试验设置信息。因此充分理解试验顺序的所有方面，以及如何运用于既定试验系统非常困难。

对于钢筋拉伸试验，将拉伸试验分解成多个独立的试验阶段很有用。无论遵循哪一种试验标准，这种方法都适用。

5个基本区域是：

- 试验前准备
- 预加载
- 弹性区
- 屈服
- 塑性区

## 试验前准备

在试验前准备阶段，让机器做好试验准备。安装正确的夹具，调整试验开口。在安装试样前，应将力（载荷）测量值调零。一旦将试样装入系统，不能对力再做进一步的调零，因为这将影响到试验结果。如果使用手动引伸计测量应变，应将手动引伸计连接到试样上，确保将刀口正确地设置在引伸计的标距长度上。然后在安装试样前，应将应变测量设置为零。

## 预加载

预加载阶段用于在试验前对试样施加最低的预载荷（小于5%的预期屈服强度），以将它正确地设置在夹具中，同时帮助拉直试样。应力或力相对于横梁或作动缸位移的曲线通常表明，由于夹具和加载链拉直（收缩系统柔度），载荷的微小增加会引起位移的大幅上升。如果不进行预加载就使用引伸计，许多钢筋试样将在试验开始时随着试样拉直而表现出负应变。由于这一原因和/或系统柔性，应力应变曲线上经常会忽略或不记录试验预加载期间的数据。

在伺服控制系统上，通常缓慢进行预加载，并使用横梁或作动缸位移反馈来控制试验速度。不建议根据载荷、变力或应变反馈来控制预加载，因为这可能导致加速过快，造成试样在夹具中被迅速拉直，引起不良的后果。

根据预加载期间收缩（减少）的系统柔度或松垂量，可能有必要或者最好在预加载结束时将应变测量置零。不过必须谨防对总应变测量产生不利影响。无论哪一种情况，都应调整依靠引伸计应变获得的试验结果，这样试验曲线初始的任何非线性行为就不会对任何试验结果产生不利影响。本文档下文结果部分的[线性斜率](#)一节将对此进行阐述。

## 弹性区（屈服前）

应力应变曲线上可见的试验弹性区或直线部分经常因为钢筋试样进一步拉直而在开始时表现出某种非线性行为。如果使用引伸计，在试验开始时可能出现微负应变，对于钢筋，这一般被认为是正常的。

根据遵循的标准，在弹性区和屈服发生前允许存在各种试验控制和目标速度。使用的控制和相关速率可能取决于设备限制或被测的具体产品。

在伺服控制系统上运行试验时，记住以下场景非常重要。如果使用横梁或作动缸位移控制，一般可以在试验的弹性和屈服部分使用相同的控制和速度，这是大家可以接受的。不过，如果使用应力或应变反馈控制，试验必须在屈服正好发生前或开始时切换到横梁或作动缸位移控制。

## 屈服

屈服一旦开始，许多等级的钢筋将呈现出确定的屈服点，这在应力应变试验曲线上显示为急转弯。然后在作用力微增或者无增加的情况下出现一段试样伸长率。为此，必须使用横梁或作动缸位移反馈控制伺服控制系统，以在整个屈服过程中保持恒定的速度。记住下面一点非常重要，在屈服期间使用应力控制将导致试验过度加速，这直接违反了标准的规定。而且还可能导致屈服点（上屈服）被掩盖或抹平，造成屈服强度结果高出预期。同样，引伸计的应变控制在屈服期间还可能变得不稳定，因此在钢筋试验时建议不要使用。

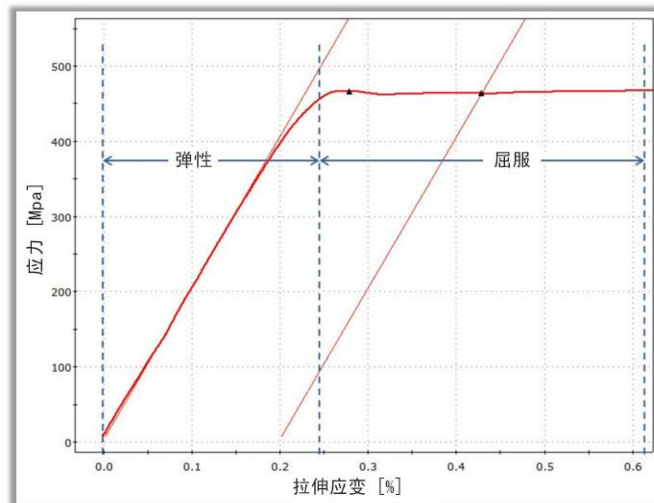


图 8—钢筋应力应变曲线的弹性和屈服区

## 塑性区（屈服后）

如标准明确规定的那样，在完成屈服后增加试验速度是可以接受的。对于伺服控制的机器，在这一末端区域控制试验的最好办法是利用横梁或作动缸位移控制（与屈服一样）。不过可以按照所遵循的标准来提高速度。从而在更短的时间内完成试验，同时仍可获得可以接受的、可再现的结果。

	ISO 6892-1:2009	ASTM A370-14
弹性区（横梁分离速率）	0.00025/s * Lc	0.0625 in/m * GL
弹性区（应变速率）	0.00025/s	未指定
弹性区（应力速率）	6 – 60 MPa/s	10-100 ksi/m
屈服（横梁分离速率）	0.00025/s * Lc	0.0625 in/m * GL
塑性区（横梁分离速率）	0.0067/s * Lc	12.70 mm/m * GL

表 2—钢筋试验区域的目标试验速率

## 结果：术语

试验标准包含一系列术语、结果名称和符号来正确标识在试验期间收集到的关键信息。为确保符合标准和正确地报告结果，充分理解这些信息非常重要。如果依据多个标准进行试验，还必须理解它们之间的异同点。在某些情况下，标准组织可能采用不同的术语或结果名称来表示同一个特性。下表所示为 ISO 和 ASTM 标准中发现的几个常见结果示例。从表格中可以看出它们的相同点，以及不同点。

	ISO	ASTM
屈服点（不同）	上屈服强度 (ReH)	屈服点 (梁落下或指针停止)
屈服强度（偏置方法）	规定非比例延伸强度 0.2% (R <sub>p0.2</sub> )	屈服强度 (0.2% 偏置)
最大应力	抗拉强度 (R <sub>m</sub> )	抗拉强度
抗拉强度/屈服强度比	R <sub>m</sub> /ReH	不需要
最大力应变	最大力总伸长率 (A <sub>gt</sub> )	不需要
断裂后伸长	断裂后伸长率 (A 或 A <sub>s</sub> )	伸长百分比

表 3—ISO 和 ASTM 的常见钢筋拉伸试验结果

## 结果：无引伸计

对于呈现明显屈服点的低等级钢筋，不使用引伸计也可以执行整个试验。从应力-位移试验曲线上可以确定屈服点，方法是找到位移继续增加时应力下降的第一个点。在旧试验系统上，通过观察载荷指针的瞬时下降，以及利用此载荷值和钢筋标称横截面积计算应力，可以手动确定屈服点。

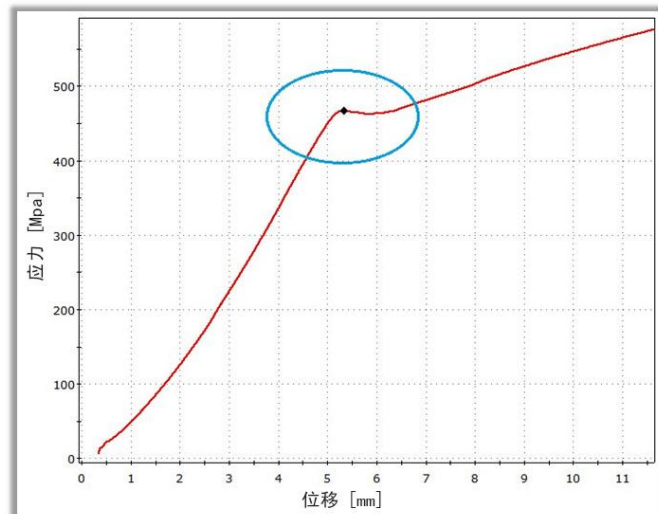


图 9—应力-位移曲线上的明显屈服点

在上文讨论试验控制的部分已指出，机器作动缸或横梁不应在屈服期间加速。这会导致屈服点在试验曲线上被“隐藏”，因为加速将导致数据趋于平滑。如果使用的是伺服控制系统，应确保在屈服过程中根据作动缸或横梁位移执行试验控制。如果使用的是手动控制系统，应确保在屈服过程中保持恒定的横梁分离速率。如果没有看到期望的指定屈服点，应从检查所用的试验控制入手。

如果没有使用引伸计，则必须根据试验前刻在试样上的标记手动确定伸长结果，例如上一表格中的伸长结果。如标准所述，试验后将断裂的两半试样重新放在一起，然后从试样断裂处两侧找到的标记进行手动测量。如果伸长结果出现冲突，通常需要使用手动方法解决这些冲突。

总之，手动试验方法相对简单，但严重依赖操作人员正确记录屈服点和手动测量伸长。在此过程中，每增加一个手动步骤就可能降低操作人员和系统之间结果的可重复性和再现性。这将把结果置于具有争议的风险，可能需要更多频繁的重复试验。

## 结果：使用引伸计

许多高级钢筋不会呈现明显的屈服点。在这种情况下，通常必须使用偏置方法确定屈服强度。这要求使用引伸计测量应变，并绘制应力-应变曲线，然后可以再确定 0.2% 偏置屈服强度 ( $R_{p0.2}$ )。

最现代的试验系统能够自动生成屈服强度。不过，确认和验证试验方法设置对于确保获得一致、准确的屈服强度结果非常重要。应特别注意以下方面。

### 线性斜率

试验标准描述将直线拟合到试验曲线的线性部分的各种方法。此线代表曲线弹性区的斜率，由于夹具夹紧和加载链拉直（如上文[预加载](#)部分所述），它可能在某个位置与应变轴相交而不是原点。由于屈服强度取决于此线的斜率及其 X 轴截距，正确进行设置至关重要。下图（图 10）所示为适当定义的线性斜率和相应的偏置屈服强度 ( $R_{p0.2}$ )。

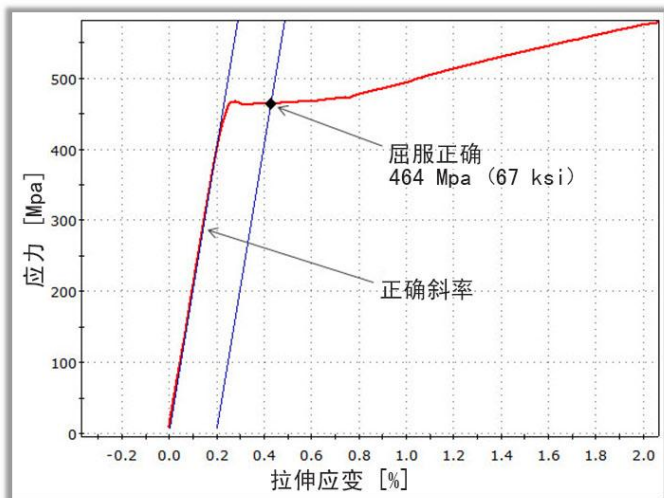


图 10 — 正确的线性斜率线和获得的偏置屈服 ( $R_{p0.2}$ )

此斜率线设置不当可能导致屈服强度结果不准确而错误地造成材料不合格或合格！图 11 中的图表包括图 10 中的相同图表。不过定义线性斜率的直线没有正确地拟合到试验曲线上，因此相应的偏移屈服强度 ( $R_{p0.2}$ ) 高于应有值。

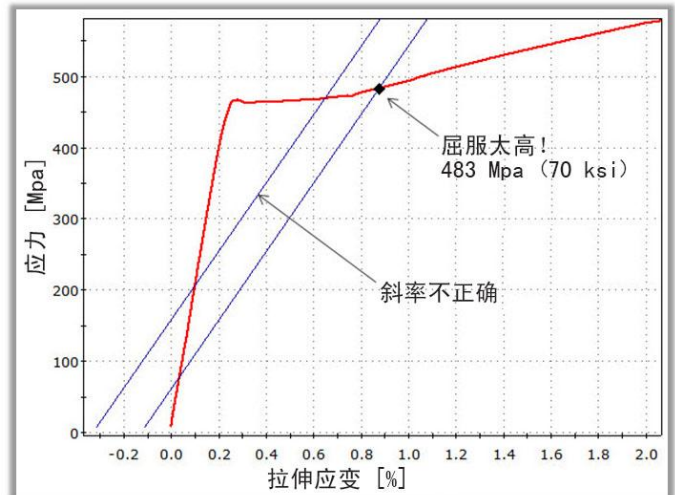


图 11 — 不正确的线性斜率线和获得的偏移屈服 ( $R_{p0.2}$ )

利用线性斜率线的 X 轴截距以及应力-应变曲线的应变轴而不是原点计算（或调整）所有伸长测量也很重要。这将提高试验结果的可重复性，还可在预加载结束时根据情况对应变调零。

### 屈服强度 — 偏置方法 ( $R_{p0.2}$ )

用于确定钢筋屈服强度的最常用偏移量是 0.2%。如标准所阐述，偏移线平行于代表曲线线性或弹性区的直线，并从此线的 X 轴截距偏移。为了确保正确偏移，必须在屈服过程中一直准确地测量应变。对应变读数造成不利影响的任何情况 — 例如不当的引伸计设置或试验期间滑动 — 可能直接影响屈服强度结果。

屈服期间不当的试验控制可能造成屈服强度过高。如前面所述，屈服期间加速违反试验标准。更重要的是，加速或试验速度超过标准允许的范围可能引起屈服强度值虚高。这点在通常不产生明显屈服点的钢筋等级上不太明显，容易造成原本不合格的材料被错误地测定为合格。应通过确认采取了正确的试验控制来避免此类风险。



## 载荷下伸长 (EUL) 屈服

ASTM 钢筋标准的早期版本要求获得额外的屈服强度结果，报告出 0.35% 位移时的应力。不显示明显屈服点的所有钢筋产品需要此结果，其目的是使 ASTM 标准与美国混凝土协会 (ACI) 建筑规范保持一致。对于这一要求，ASTM 和 ACI 之间达成了进一步的协调。自 2014 年起，ASTM 钢筋标准和 ACI 建筑规范不再要求获得这一额外的 0.35% 载荷位移 (EUL) 屈服强度结果。

## 伸长 — 自动方法

使用引伸计时，可以直接从应变测量中记录伸长结果，例如  $A_{gt}$  或断裂后伸长百分率 ( $A_g$ )。这有助于自动记录伸长结果，从而无需标记试样并在试验后手动测量。

在自动确定  $A_{gt}$  时，引伸计必须在通过最大力时保持连接状态。然后由系统试验软件自动报出最大应力点处的总应变。它还可以自动适应线性斜率线的 X 轴截距。不过，如果引伸计是需要在断裂后拆除的手动设备，要求操作人员在最大力发生后拆除它极其危险。许多等级的钢筋在达到最大力后很快会发生猛烈的断裂。自动引伸计还提供在试验期间任何时间点自动拆除的另一大优势。这在保护操作人员乃至引伸计的同时，仍可自动捕获  $A_{gt}$ 。

在自动确定断裂后伸长百分率时，引伸计通常必须经历断裂过程。然后记录试验结束时确定的断裂点处的应变。试验软件还必须能够减除应变的弹性部分，使结果更能与手动方法媲美。这取决于所遵循的标准。如果断裂位置离刀口太近，伸长结果将低于预期值，并造成不合格。

或者，如果系统能够自动根据作动缸行程（横梁位移）获得应变，并在拆除引伸计后获得试样标距长度，则可在达到最大力后拆除引伸计。这是因为一旦达到最大力后，系统柔度（拉伸）就不会再引起系统位移。而认为此点后发生的任何作动缸或横梁行程完全是试样伸长造成的。试验软件必须能够切换引伸计拆除点处的应变源，并将应变测量标准化，然后才有用。关于断裂位置，还有另一个好处。由于在最大力后拆除引伸计，因此无论断裂发生在什么位置（假设在夹具中没有断裂），根据作动缸或横梁行程测得的伸长将可以获得试样伸长。相对于让引伸计经历断裂过程，这将得到更加一致的伸长结果，需要更少的重新试验。

记住，在某些情况下仍可能需要手动伸长方法，结果不可直接与自动方法互换。在结果存在争议的情况下，通常需要采用手动方法。



## 总结和结论

全球和地方钢筋产品及试验标准阐明了钢筋规格和力学试验要求。它们致力于确保全世界生产的钢筋具有一致的质量。

确保遵循必需的标准，而且遵循的是最新标准对于任何拉伸试验计划来说都极为重要。为了进一步降低错误地将产品归为合格或不合格的风险，定期评估试验过程的所有方面并采取必要的纠正措施也很必要。评估应包括：

- 设备（机器、夹具、引伸计）
- 试样制备
- 设置（软件和硬件）
- 试验控制（自动或手动）
- 计算结果（自动或手动）
- 图表分析

请相信您的试验计划正高效执行，只有高品质的产品才会被供应或用于现场应用。

## 参考资料

ASTM A370-14: 钢产品机械测试的试验方法及定义

ASTM A615/A615M-14: 变形和普通钢筋混凝土碳钢钢筋的标准规范

ASTM A706/A706M-14: 变形和普通钢筋混凝土低合金钢筋的标准规范

ASTM A955/A955M-14: 变形和普通钢筋混凝土不锈钢钢筋的标准规范

ASTM A996/A996M-14a: 混凝土配筋用轨钢和轴钢异形钢筋标准规范

ASTM A1034/A1034M-10a: 钢筋用机械接头试验的标准试验方法

ASTM A1035/A1035M-14: 混凝土加筋用异型和光面低碳铬钢筋的标准规范

ASTM E8/E8M-13a: 金属材料拉伸试验的标准试验方法

ISO 6935-2:2007 混凝土加固用钢第 2 部分：螺纹钢

ISO 15630-1:2010 混凝土的加筋和预应力用钢 — 试验方法 — 第 1 部分：钢筋、盘条和钢丝

ISO 6892-1:2009 金属材料 — 拉伸试验 — 第 1 部分：室温试验方法

BS 4449:2005+A2:2009 混凝土用加强钢筋 — 可焊钢筋 — 棒材、卷材和拆卷产品 — 规范

BS EN 10080:2005 混凝土用加强钢筋。可焊钢筋。常规

AC133 – 2010: 钢筋机械接头系统的验收标准

AS/NZS 4671:2001 钢筋材料

JIS G 3112:2010 钢筋混凝土用钢筋

GB 1499:1998 钢筋混凝土用热轧螺纹钢

ACI 318-14 混凝土结构建筑规范