

室温拉伸试验速率对钢筋力学性能测试的影响分析

柳福修, 付建村, 李程程*

山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2023年1月3日; 录用日期: 2023年2月7日; 发布日期: 2023年2月15日

摘要

为分析不同拉伸速率对钢筋力学性能测试结果的影响, 采用4种不同速率控制条件下的钢筋室温拉伸试验, 对比下屈服强度、抗拉强度、最大力总延伸率的变化规律。结果表明: 下屈服强度受拉伸试验速率的影响最大, 抗拉强度次之, 最大力总延伸率最小。 $\Phi 22$ 、 $\Phi 25$ 钢筋样品选择 0.002 s^{-1} 应变控制速率时, 结果较标准推荐速率结果分别增加6.47%、3.02%, 影响程度超过试验系统误差的允许范围, 建议采用 0.00025 s^{-1} 应变控制速率; 抗拉强度试验当受测试设备限制按 0.0067 s^{-1} 应变速率控制时, 可优先选择 0.002 s^{-1} 应变速率控制, 能够有效控制试验持续时间和结果偏差波动; 最大力总延伸率对拉伸试验速率的影响敏感性较低, 不同速率选择不会对结果产生明显影响。实验结果可为钢筋拉伸试验力学性能测试的准确性和可靠性提供参考。

关键词

钢筋, 拉伸速率, 力学性能, 下屈服强度, 对比分析

Analysis of the Influence of Room Temperature Tensile Test Rate on the Mechanical Properties of Steel Bars

Fuxiu Liu, Jiancun Fu, Chengcheng Li*

Shandong Transportation Research Institute, Ji'nan Shandong

Received: Jan. 3rd, 2023; accepted: Feb. 7th, 2023; published: Feb. 15th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 柳福修, 付建村, 李程程. 室温拉伸试验速率对钢筋力学性能测试的影响分析[J]. 材料科学, 2023, 13(2): 52-58. DOI: [10.12677/ms.2023.132007](https://doi.org/10.12677/ms.2023.132007)

Abstract

In order to analyze the influence of different tensile rates on the test results of mechanical properties of steel bars, the room temperature tensile tests of steel bars under four different rate control conditions were used to compare the change laws of lower yield strength, tensile strength and total elongation of maximum force. The results show that the lower yield strength is most affected by the tensile test rate, followed by the tensile strength, and the total elongation of the maximum force is the smallest. When 0.002 s^{-1} strain control rate is selected for the $\Phi 22$, $\Phi 25$ reinforcement sample, the results are 6.47% and 3.02% higher than the standard recommended rate, respectively, and the influence degree exceeds the allowable range of test system error, so 0.00025 s^{-1} strain control rate is recommended; when the tensile strength test is controlled by 0.0067 s^{-1} strain rate due to the limitation of test equipment, 0.002 s^{-1} strain rate control can be preferred, which can effectively control the test duration and result deviation fluctuation; the sensitivity of the total elongation of the maximum force to the impact of the tensile test rate is low, and the selection of different rates will not have a significant impact on the results. The experimental results can provide a reference for the accuracy and reliability of the tensile test of steel bars.

Keywords

Steel Bar, Tensile Rate, Mechanical Properties, Lower Yield Strength, Comparative Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋因具有力学稳定性强、工艺性能良好等优点，成为钢筋混凝土中的重要原材料，在现代建筑领域得到了广泛应用。钢筋与混凝土可以形成良好的黏结力，有效结合构成整体结构，通过协调变形、共同受力承受自重及外部荷载的作用。因此，钢筋的力学性能对钢筋混凝土结构承载能力、耐久性能和安全性能起到至关重要的作用。

国内学者对钢筋试验检测的影响因素与问题进行了大量研究与探讨[1][2][3][4]，在环境、设备等因素相对稳定的情况下，试验人为因素对钢筋性能检测结果会产生明显影响。力学性能作为钢筋材料功能与质量的最关键评价指标，直接影响钢筋混凝土结构使用安全性。

钢筋力学性能主要包括屈服强度、抗拉强度、伸长率等，从室温拉伸试验指标上则主要分为屈服强度、抗拉强度和断后伸长率或最大力总延伸率。室温条件下拉伸试验是评价钢筋力学性能的重要测试方法，现行测试标准中推荐了基于应变速率和应力速率控制的两种试验方法，推荐试验速率范围的可选择性较大。

本文在室温条件下开展不同直径、不同试验速率的钢筋拉伸试验，分析试验速率对不同直径钢筋屈服强度、抗拉强度、最大力总延伸率的变化规律，并对比分析对各指标测试结果的影响程度，为钢筋力学性能的拉伸试验准确性与可靠性提供参考与借鉴。

2. 材料与实验

2.1. 钢筋基本性质

钢筋是一种钢制的条状物，按化学成分可分为碳素钢和合金钢，按加工方法可分为热轧钢筋、冷拉

钢筋、冷拔钢筋和冷轧钢筋，按外观形状可分为光圆钢筋、带肋钢筋、钢线、冷轧扭钢筋等。热轧带肋钢筋(Hot rolled Ribbed Bars, HRB)是应该最为广泛的钢筋种类之一，根据《钢筋混凝土用钢第二部分：热轧带肋钢筋》(GB 1499.2)可分为 HRB335、HRB400、HRB500 三个牌号[5]。其中，牌号中的数值代表其屈服强度特征值。

钢筋的主要成分以 Fe、C、Si、Mn 等元素为主，其中 C 元素对钢筋的力学性能起主要影响作用。随成分中 C 含量的增加，钢筋的强度和硬度均得到提高，但塑性、韧性及冲击性能会发生降低。另外，Mn 元素对钢筋中奥氏体的稳定作用明显，增加含量可提高钢筋的韧性、强度和硬度，Cr、Ni 等元素也对钢筋的性能也有显著改良效果。

本文采用 HRB400 钢筋作为试验样品，其主要化学成分如表 1 所示。

Table 1. Chemical composition of HRB400 reinforcement samples (mass fraction, %)

表 1. HRB400 钢筋样品的化学成分(质量分数, %)

样品名称	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	P	S
HRB400	97.35	0.26	0.42	1.58	0.004	0.031	0.019	0.013

2.2. 标准方法分析

《金属材料 拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1-2021)已于 2022 年 7 月 1 日实施。标准对拉伸试验速率给出了两种方法：方法 A 基于应变速率的试验速率和方法 B 基于应力速率的试验速率[6]。

1) 方法 A

方法 A 中测定上屈服强度 R_{eH} 、下屈服强度 R_{eL} 都推荐了控制应变速率 0.00025 s^{-1} (相对偏差 $\pm 20\%$)，而测定抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A、最大力总延伸率 A_{gt} 、最大力下的塑性延伸率 A_g 和断面收缩率 Z 则推荐了控制应变速率 0.0067 s^{-1} (0.4 min^{-1} ，相对偏差 $\pm 20\%$)，以上两个控制速率比值达到 26.8 倍。

2) 方法 B

方法 B 中测定下屈服强度 R_{eL} 推荐了屈服期间应变速率控制在 $0.00025\text{ s}^{-1}\sim 0.0025\text{ s}^{-1}$ 之间，而测定抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A、最大力总延伸率 A_{gt} 、最大力下的塑性延伸率 A_g 和断面收缩率 Z 的试验应变控制速率可增加 0.008 s^{-1} 。其中，下屈服强度测试速率范围比值达到 10 倍，而抗拉强度阶段与屈服强度阶段的试验速率的最大比值达到了 32 倍。

3) 方法 A 与方法 B 的比较

以常规热轧带肋钢筋 HRB400E 为例，其抗拉强度一般可达到 600 MPa 左右，若采用最大速率测试，则一根钢筋从开始试验到拉断用时 10 s 左右，显然不符合实际情况，若采用最小速率 $2\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ，则用时 300 s 左右。方法 B 中在测定上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 时要求试样平行长度的屈服间应变速率应在 $0.00025\text{ s}^{-1}\sim 0.0025\text{ s}^{-1}$ 之间，同样采用应变速率来控制，可见应变速率在钢筋拉伸试验中对于测定上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 是非常重要的。目前，最常用的 HRB400E 型号热轧带肋钢筋，力学性能指标一般要求进行下屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 和最大力总延伸率 A_{gt} 等项目测试。因此，综合考虑试验速率的规定及影响，实际试验过程中优先选用方法 A。

2.3. 实验方案设计

室温 20°C 条件下，选用 $\Phi 22$ 、 $\Phi 25$ 不同直径的热轧带肋钢筋作为实验样品，牌号均为 HRB400E。样品长度为 500 mm，两端各夹持 85 mm，平行长度 330 mm。实验根据标准中对拉伸试验速率的要求[6]，当采用下屈服强度推荐速率范围 2 时，拉伸速率为 $0.00025\text{ s}^{-1} \times 330\text{ mm} \times 60\text{ s} = 4.95\text{ mm/min}$ ；当采用下

屈服强度推荐速率范围 3 时, 拉伸速率为 $0.002 \text{ s}^{-1} \times 330 \text{ mm} \times 60 \text{ s} = 39.6 \text{ mm/min}$; 当采用抗拉强度推荐速率范围 4 时, 拉伸速率为 $0.0067 \text{ s}^{-1} \times 330 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} = 132.7 \text{ mm/min}$ 。一般情况下, 拉力试验机的加载速率不超过 100 mm/min , 此时如果仍采用推荐速率范围 4 进行试验, 只能采取减小平行长度进行速率调整, 但样品平行长度过小, 会影响拉伸试验平行长度要求及测试结果测量、计算的准确性。因此, 实验选择 5 mm/min 、 10 mm/min 、 20 mm/min 、 50 mm/min 四种速率进行对比分析, 具体实验方案见表 2。

Table 2. Comparison experiment scheme
表 2. 对比实验方案

样品规格	实验项目	实验速率
Φ22	下屈服强度 R_{eL} 抗拉强度 R_m 最大力总延伸率 A_{gt}	5 mm/min
		10 mm/min
		20 mm/min
		40 mm/min
Φ25	下屈服强度 R_{eL} 抗拉强度 R_m 最大力总延伸率 A_{gt}	5 mm/min
		10 mm/min
		20 mm/min
		40 mm/min

3. 结果与分析

下屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 和最大力总延伸率 A_{gt} 是钢筋力学性能重要测试参数, 根据上述实验方案进行了试验测试, 分析拉伸试验速率对钢筋力学性能典型指标的敏感性规律及影响程度。

3.1. 下屈服强度 R_{eL}

当钢筋拉应力超过弹性极限后, 变形会产出较快增长。此时除了产生弹性变形外, 还产生部分塑性变形。当应力达到初始瞬时效应后, 塑性应变会急剧增加, 变形曲线出现一个波动的小平台, 这种现象称为屈服。这一阶段的最大、最小应力分别称为上屈服点和下屈服点。由于下屈服点的数值较为稳定, 因此将它作为材料抗力的指标。

根据上述实验方案, Φ22、Φ25 钢筋在不同拉伸试验速率下的下屈服强度的变化规律如图 1 所示。

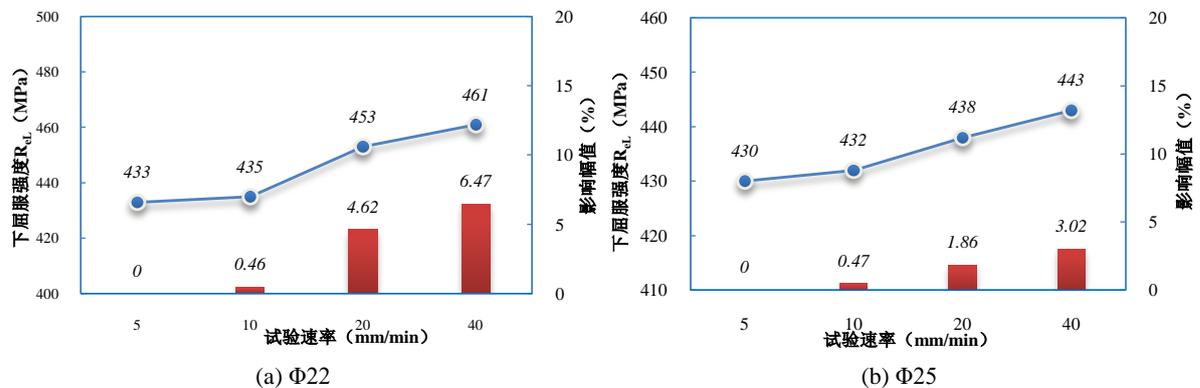


Figure 1. Results of lower yield strength results at different tensile rates
图 1. 不同拉伸速率的下屈服强度结果

从图 1 中可以看出, 钢筋的下屈服强度随拉伸试验速率的增加呈增长的趋势。图 1(a)中, 对于 $\Phi 22$ 钢筋样品, 与 5 mm/min 试验速率相比, 10 mm/min、20 mm/min、40 mm/min 试验速率条件下其下屈服强度的影响幅值分别为 0.46%、4.62%、6.47%。图 1(b)中, 对于 $\Phi 25$ 钢筋样品, 与 5 mm/min 试验速率相比, 10 mm/min、20 mm/min、40 mm/min 试验速率条件下其下屈服强度的影响幅值分别为 0.47%、2.82%、3.02%。

标准中对测定下屈服强度提供了 0.00025 s^{-1} 和 0.002 s^{-1} 两种应变控制速率(推荐采用 0.00025 s^{-1}), 即本实验方案中的 5 mm/min 和 40 mm/min。从图 1 中可知, 当试验速率大于 10 mm/min 时, 对下屈服强度结果的影响高于 1%, 已超过试验设备系统误差对试验结果的影响。另外, 相同牌号(强度)的钢筋, 直径越小则所承受的屈服力值越低, 因试验速率增加所产生的力学敏感性影响则越大。因此, 在钢筋拉伸试验过程中, 选择标准推荐的 0.00025 s^{-1} 应变控制速率其测试结果误差较小。而对于小直径的钢筋样品, 更应按照标准中推荐的最低拉伸速率进行试验操作控制。

3.2. 抗拉强度 R_m

当钢筋屈服到一定程度后, 由于内部晶粒重新排列, 其抵抗变形能力又重新提高, 变形随着应力的提高而提高, 直至应力达最大值, 即抗拉强度。此后钢筋的抵抗变形能力将明显降低, 并在最薄弱处发生较大的塑性变形, 截面迅速缩小并出现颈缩, 直至断裂破坏。抗拉强度是钢筋由均匀形塑性变向局部集中塑性变形过渡的临界值, 也是钢筋在静拉伸条件下的最大承载能力。

从图 2 中可以看出, 钢筋的抗拉强度随拉伸试验速率的增加同样呈增长的趋势。图 2(a)中, 对于 $\Phi 22$ 钢筋样品, 与 40 mm/min 试验速率相比, 5 mm/min、10 mm/min、20 mm/min 试验速率条件下其抗拉强度的影响幅值分别为 -1.88%、-1.57%、-0.78%。图 2(b)中, 对于 $\Phi 25$ 钢筋样品, 与 40 mm/min 试验速率相比, 5 mm/min、10 mm/min、20 mm/min 试验速率条件下其抗拉强度的影响幅值分别为 -1.29%、-1.13%、-0.64%。

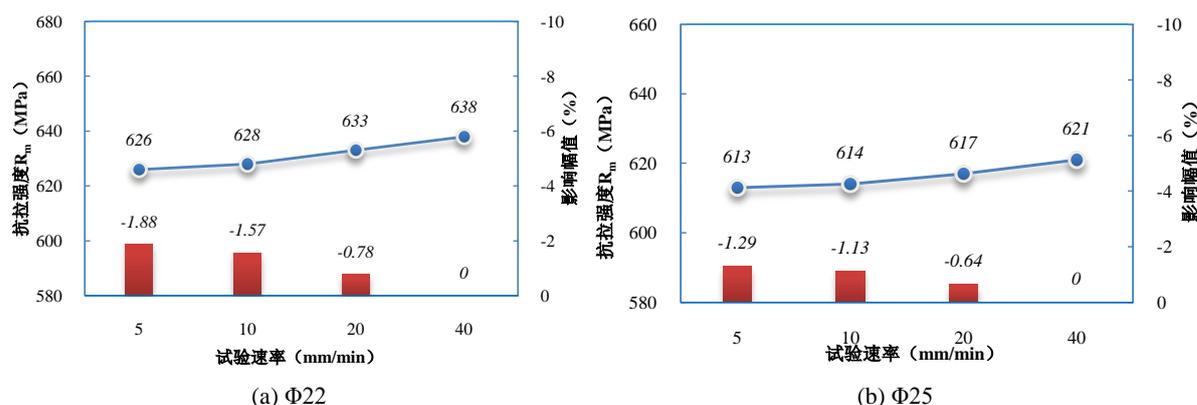


Figure 2. Results of tensile strength results at different tensile rates

图 2. 不同拉伸速率的抗拉强度结果

标准中对测定抗拉强度提供了 0.00025 s^{-1} 、 0.002 s^{-1} 和 0.0067 s^{-1} 三种应变控制速率, 即本实验方案中的 5 mm/min、40 mm/min 和 133 mm/min。一般情况下, 拉力试验机的加载速率不超过 100 mm/min, 因此实验未选择 133 mm/min。而采用 40 mm/min 速率作为标准时, 在 20 mm/min 速率条件下抗拉强度影响幅值低于 $\pm 1\%$ 范围, 而在 5 mm/min、10 mm/min 速率条件下影响幅值则超过 $\pm 1\%$ 范围。

与下屈服强度指标相比, 试验速率对抗拉强度试验结果影响程度较低, 标准中虽然推荐了 0.0067 s^{-1}

试验速率,但考虑受限于试验设备等硬件条件限制,实践中优先选择 0.002 s^{-1} 试验速率,可以有效控制试验持续时间和试验结果偏差波动。

3.3. 最大力总延伸率 A_{gt}

最大力总延伸率是衡量钢筋塑性性能的指标,总延伸率大的钢筋塑性性能好,拉断前有明显的预兆。而延伸率小的钢筋塑性性能差,其破坏会突然发生,呈脆性特征。

从图3中可以看出,钢筋的最大力总延伸率受拉伸试验速率的影响较小。图3(a)中,对于 $\Phi 22$ 钢筋样品,与 5 mm/min 试验速率相比, 10 mm/min 、 20 mm/min 、 40 mm/min 试验速率条件下其最大力总延伸率的影响幅值分别为 0% 、 0.63% 、 0.63% 。图3(b)中,对于 $\Phi 25$ 钢筋样品,与 5 mm/min 试验速率相比, 10 mm/min 、 20 mm/min 、 40 mm/min 试验速率条件下其最大力总延伸率的影响幅值分别为 0.62% 、 0% 、 0.62% 。

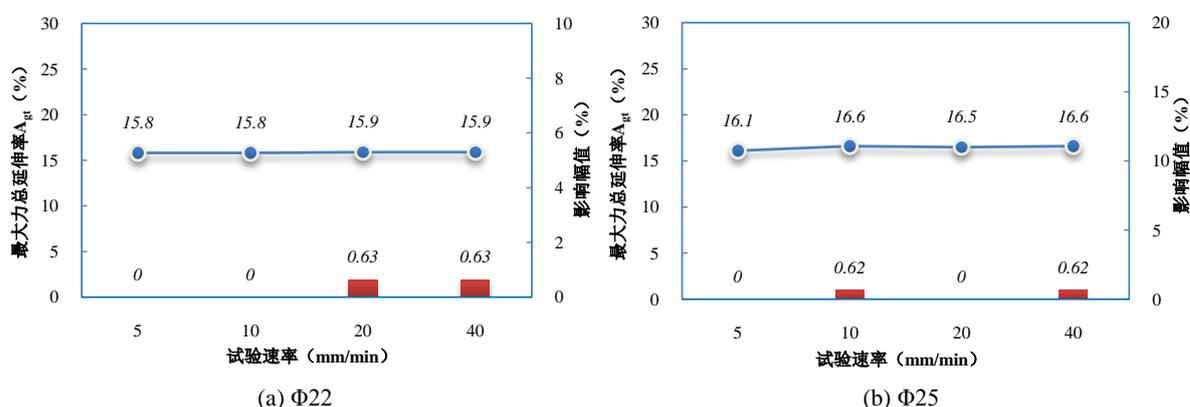


Figure 3. Results of maximum force total elongation at different stretching rates

图3. 不同拉伸速率的最大力总延伸率结果

选择标准中不同的应变控制速率对钢筋最大力总延伸率结果影响均在 $\pm 1\%$ 范围,说明试验速率对该指标的敏感性影响较低,且未超过试验设备系统误差的允许范围限制。

综上所述,室温拉伸试验速率对钢筋力学性能测试具有一定影响,下屈服强度影响敏感性最大,抗拉强度影响敏感性次之,而对最大力总延伸率影响非常小。实践中,下屈服强度测试阶段应优先 0.00025 s^{-1} 应变控制速率,抗拉强度测试阶段应优先 0.002 s^{-1} 应变控制速率。同时,钢筋直径越小,其屈服阶段所承受荷载越低,拉伸速率对下屈服强度敏感性影响也越大。

4. 结语

本文针对室温拉伸试验速率对钢筋下屈服强度、抗拉强度、最大力总延伸率等关键力学性能指标测试结果的影响问题进行实验分析。通过采用 $\Phi 22$ 、 $\Phi 25$ 两种不同直径钢筋和 5 mm/min 、 10 mm/min 、 20 mm/min 、 40 mm/min 四种不同拉伸速率进行对比试验,总结试验速率对下屈服强度、抗拉强度、最大力总延伸率结果敏感性的影响程度,并推荐各指标测试时所试验速率的选择方案。得到结论如下:

- 1) 室温拉伸试验速率对钢筋力学性能测试结果具有一定影响,其中,对下屈服强度影响最大,抗拉强度影响次之,最大力总延伸率影响最小。
- 2) 采用 $\Phi 22$ 、 $\Phi 25$ 钢筋样品选择 0.002 s^{-1} 应变控制速率时,结果较标准推荐速率结果分别增加 6.47% 、 3.02% ,影响程度超过试验系统误差允许范围,建议采用 0.00025 s^{-1} 应变控制速率进行下屈服强度测试。
- 3) 根据抗拉强度试验结果,当受测试设备硬件条件无法按 0.0067 s^{-1} 应变速率进行控制时,可优先

选择 0.002 s^{-1} 应变速率控制，能够有效控制试验持续时间和结果偏差波动。

参考文献

- [1] 张仕辉. 钢筋拉伸试验中的相关问题研究[J]. 冶金与材料, 2022, 42(5): 56-57, 60.
- [2] 夏滔, 赵伟, 彭文翔, 等. 拉伸速率对钢筋力学性能测定结果的影响分析[J]. 化工管理, 2018(23): 243.
- [3] 陈丙辉, 缪飞. 拉伸速率对热轧钢筋力学性能的影响[J]. 江苏建筑, 2014(3): 92-93.
- [4] 刘峰. 建筑工程中钢筋性能检测问题与完善[J]. 河南建材, 2021(7): 17-18.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢筋混凝土用钢 第2部分: 热轧带肋钢筋: GB/T 1499.2-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [6] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.