**DOI:** 10.11858/gywlxb.20240702

# 不同应变率下高强钢的拉伸行为及力学性能分析

洛绒邓珠[1], 刘潇如[1], 杨 佳[2], 肖礼康[3], 郭 亮[3], 魏占涛[3],
周章洋[1,2], 易 早[1], 刘 艺[2], 房雷鸣[4], 熊政伟[1,5]

(1. 西南科技大学数理学院极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;
3. 西南应用磁学研究所, 四川 绵阳 621010;
4. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621999;
5. 四川省军民融合研究院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 高强钢因强度高、塑性好、耐腐蚀性优异而得到广泛应用。然而, 高强钢具有显著的应变率敏感性。为此, 针对 2 种高强钢(Ultrafort 401 和 Ferrium S53 钢), 开展了不同应变率下($10^{-4}$～$10^{3}$ $s^{-1}$)的拉伸试验, 获得了屈服强度、抗拉强度、硬化指数等性能参量, 并深入分析了其随应变率变化的规律。不同应变率下, Ferrium S53 钢的拉伸性能始终优于 Ultrafort 401 钢, 但两者却表现出不同的变化趋势。随着应变率的增加, Ultrafort 401 钢的屈服强度和抗拉强度均增大, 而 Ferrium S53 钢的屈服强度增大, 抗拉强度先减小后增大。结合微观结构表征发现, Ferrium S53 钢所具有的较高的屈服强度与其初始晶粒尺寸更小有关, 2 种高强钢的抗拉强度随应变率增加所表现出的不同变化趋势则与应变硬化响应差异有关。随着应变率的升高, Ultrafort 401 钢的韧窝尺寸增大, 而 Ferrium S53 钢的韧窝尺寸先减小后增大, 说明 2 种高强钢的应变硬化水平随着应变率升高而呈现不同的变化趋势。研究结果为高强钢在不同加载条件下的力学性能评估提供了科学依据, 对高强钢的工程应用具有一定的指导意义。

**关键词:** 高强钢; 拉伸性能; 应变率; 断口形貌; 屈服强度; 抗拉强度

**中图分类号:** O344.3 **文献标志码:** A

高强钢是一种不可替代的重要金属材料, 具有优异的强度和塑性、较高的刚度、良好的焊接性和耐腐蚀性等优异性能, 在航空、航天、海洋、核工业等众多领域被广泛应用[1−5]。为了满足高端装备生产对高性能不锈钢的需求, 近些年来, 研究人员致力于提升高强钢的强度, 以提高材料的比强度, 从而实现结构的轻量化设计。自 20 世纪 40 年代, 高强钢的发展经历了第 1 代半奥氏体沉淀硬化不锈钢(如 17-4PH 钢)、第 2 代马氏体沉淀硬化不锈钢(如 Ultrafort 401 钢)以及第 3 代二次硬化型高强度不锈钢(如 Ferrium S53 钢)[6−7]。其中, Ultrafort 401 钢是 20 世纪 70 年代由德国研制的一种通过金属间化合物强化的高强度钢材料[7]。研究表明, 随着应变率由 $3.3\times10^{-3}$ $s^{-1}$ 升高至 $1.0\times10^{4}$ $s^{-1}$, 经 500 ℃ 回火 2 h 的 Ultrafort 401 钢的屈服强度从 1 356 MPa 增大至 1 906 MPa, 表明通过一定的回火工艺可进一步提高材料的压缩性能[8]。Ferrium S53 钢是由美国于 2002 年开发的第 3 代高强钢, 其碳含量达到 0.21%, 通过碳化物的强化作用, 其强度相对于第 2 代高强钢显著提高[9−11]。适当的低温处理不仅可以抑制

* **收稿日期:** 2024-01-02; **修回日期:** 2024-03-01
**基金项目:** 国家自然科学基金(U2230119); 四川省自然科学基金(2022NSFSC0333); 四川省杰出青年基金(22JCQN0005); 2022 年中央引导地方科技发展项目(2022ZYDF073)
**作者简介:** 洛绒邓珠(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属材料的结构分析与性能研究. E-mail: 2926740401@qq.com
**通信作者:** 熊政伟(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事高压物理研究. E-mail: zw-xiong@swust.edu.cn

Ferrium S53 钢内逆转奥氏体的产生，还可以细化马氏体层片结构和 $M_2C$ 沉淀物，进而提升 Ferrium S53 钢的力学性能[12]；合适的固溶处理可以通过溶解次级相来提高 Ferrium S53 钢的拉伸强度和塑性匹配[13]。然而，尽管高强钢的强度已显著提升，但是针对 Ultrafort 401 和 Ferrium S53 钢在不同应变率下的拉伸性能研究仍相对较少，且不同应变率下其力学性能和变形机制的差异尚未明确。

应变率是影响材料性能的重要因素之一。材料在不同应变率下的表现对于其实际应用至关重要，尤其是高强钢这种关键工程结构材料。室温拉伸试验是评估材料强度和塑性的基本手段，可提供屈服强度、抗拉强度和弹性模量等关键材料特性，通过改变拉伸速率，还可以获得不同应变率下材料性能的变化趋势[14−15]。研究表明，随着应变率的升高，大部分材料的强度（包括屈服强度和抗拉强度）会升高[16−18]，但也有材料的强度随之降低[19−23]，说明不同材料在不同应变率下的拉伸性能变化规律存在差异。

本工作将针对 Ultrafort 401 和 Ferrium S53 钢开展不同应变率下的拉伸试验，研究其在不同变形条件下的力学行为，结合断口分析，深入对比 2 种钢的力学性能和组织变化特征，以期揭示不同应变率下 2 种钢材料的拉伸性能及其微观机理。

# 1　实验材料与方法

## 1.1　实验样品

本研究所用的高强钢材料为商用 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢。2 种高强钢均通过真空感应熔炼工艺制造，并在 1 100 ℃ 下进行热锻处理，保温 2 h 后开坯冷却修整，随后继续加热烧透热锻。2 种高强钢材料的成分如表 1 所示。

**表 1　Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的元素组成**

**Table 1　Elemental composition of Ferrium S53 and Ultrafort 401 steels**

| Material | Mass fraction/% | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Cr | Ni | Ti | Mo | Co | Fe |
| Ferrium S53 steel | 0.21 | 9.00 | 4.80 | 0.02 | 1.50 | 13.00 | 71.47 |
| Ultrafort 401 steel | 0.02 | 12.00 | 8.20 | 0.80 | 2.00 | 5.30 | 71.68 |

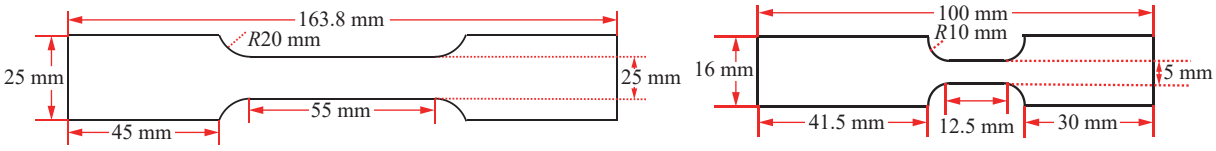
## 1.2　实验方法

在 $10^{-4}$、$10^{-3}$、$10^{-2}$、$7\times10^{-2}$、10、$10^3$ $s^{-1}$ 共 6 种不同的应变率下，采用标准 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》，对 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢进行拉伸性能测试，所有拉伸试验均重复 3 次，然后取平均值。

采用 UTM5202SYXL 万能试验机（三思纵横）进行准静态下（应变率 $\dot{\varepsilon}<10^{-1}$ $s^{-1}$）的拉伸测试。该试验机可施加最高达 200 kN 的轴向力，并配备油压楔形夹具和引伸计，其中引伸计的标距为 50 mm。采用 Instron VHS160/100-20 型高速拉伸试验机进行动态拉伸（$\dot{\varepsilon}$ 为 10 和 $10^3$ $s^{-1}$）测试，其最高轴向力可达 200 kN，最大拉伸速率可达 17 m/s。将 2 种锻造后的钢样品加工为狗骨头状平板试样，2 种试验机对应的拉伸试样尺寸如图 1 所示，其中：准静态和动态拉伸试样的厚度分别为 1.57 和 1.00 mm。

## 1.3　分析方法

采用配备电子背散射衍射（electron back scatter diffraction, EBSD）系统的 Tescan Maia 3 型扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）对 2 种高强钢试样进行拉伸前的微观结构表征。在表征过程中，保持相同的扫描步长（400 nm），使用 AZtec 2.4 软件进行数据采集，并通过 HKL Channel 5 软件分析处理后续数据。采用软件中的 Tango 模块获取试样的晶界分布等信息，并通过 Grain Area Determination 功能测定试样的平均晶粒大小；利用 Mambo 模块中的 Rot.Axes in Crystal 功能，通过特定角度取向差点判断晶界的数量。完成拉伸试验后，选用 Zeiss Ultra 55 型场发射电子显微镜，对试样断口形貌进行分析。




(a) UTM5202SYXL　　(b) Instron VHS160/100-20

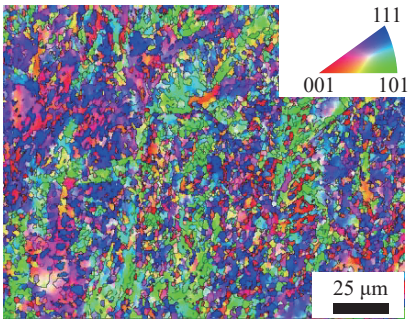
图 1　拉伸试样示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the specimens used for tensile tests

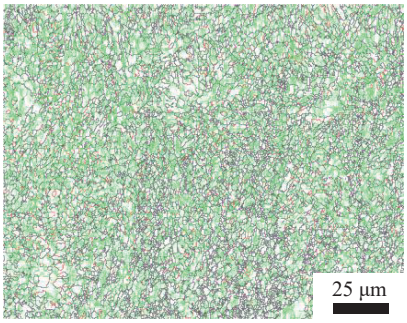
## 2　实验结果与分析

### 2.1　原始微结构

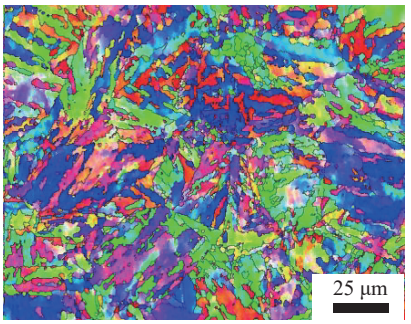
通过 EBSD 表征 2 种高强钢在拉伸前的微观结构，结果如图 2 所示，其中：图 2(a) 和图 2(b) 分别为 Ferrium S53 钢的反极图和晶界图，图 2(c) 和图 2(d) 分别为 Ultrafort 401 钢的反极图和晶界图。可以发



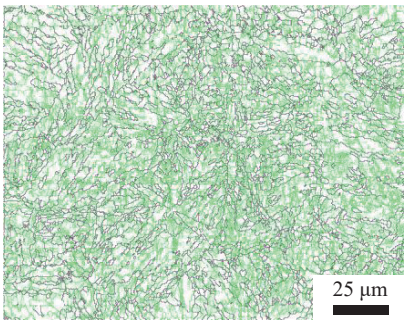

(a) Inverse pole figure of Ferrium S53 steel



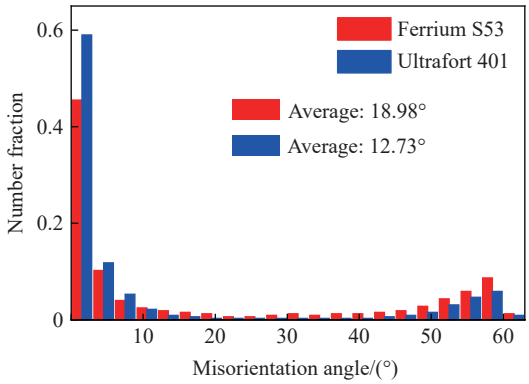

(b) Grain boundary diagram of Ferrium S53 steel



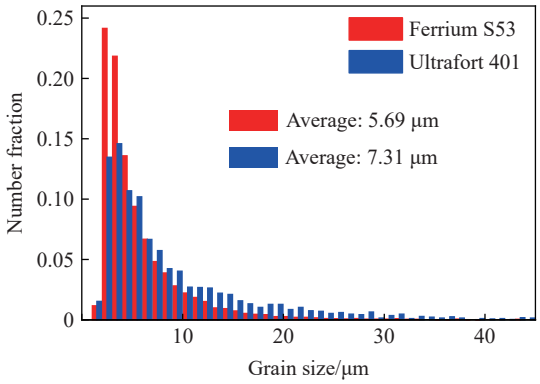

(c) Inverse pole figure of Ultrafort 401 steel




(d) Grain boundary diagram of Ultrafort 401 steel




(e) Distribution of the misorientation angle




(f) Distribution of the grain size

图 2　初始态 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的反极图、晶界图、取向差角直方图和晶粒尺寸直方图

Fig. 2　Inverse pole figure (IPF), grain boundary diagrams, the distribution of misorientation angle and grain size of Ferrium S53 and Ultrafort 401 steel samples before deformation

现，2 种材料均具有高密度的小角度晶界（low angle grain boundaries, LAGBs, 对应图 2(b) 和图 2(d) 中的绿线）和高角度晶界（high angle grain boundaries, HAGBs, 对应图 2(b) 和图 2(d) 中的黑线）。经统计，Ferrium S53 钢内的晶界（取向差大于 2°）像素点数为 133 049，而 Ultrafort 401 钢仅有 109 103，说明两者的晶界密度存在差异。根据图 2(e) 所示的晶界取向差角分布，Ferrium S53 钢中 HAGBs 的占比为 54.85%，而 Ultrafort 401 钢的 HAGBs 占比明显小于 Ferrium S53 钢，仅为 39.43%。此外，Ferrium S53 钢的平均取向差角也显著小于 Ultrafort 401 钢。由于更高的平均取向差角反映材料内部含有更多的 HAGBs，因此，Ferrium S53 钢内具有密度更高的 HAGBs[24−26]。2 种高强钢的晶粒尺寸分布如图 2(f) 所示。Ferrium S53 钢和 Ultrafort 401 钢的平均晶粒尺寸分别为 5.69 和 7.31 μm，进一步说明 Ferrium S53 钢的初始微结构具有更小的晶粒尺寸和更高的 HAGBs 含量。

## 2.2　拉伸性能分析

通过拉伸试验得到 2 种高强钢的工程应力-应变曲线，如图 3 所示。在不同的应变率下，2 种高强钢的应力-应变曲线均发生了变化。随着应变率的升高，两者的强度表现出不同的变化趋势：Ferrium S53 钢的抗拉强度先减小后增大，而 Ultrafort 401 钢的抗拉强度则一直增大。

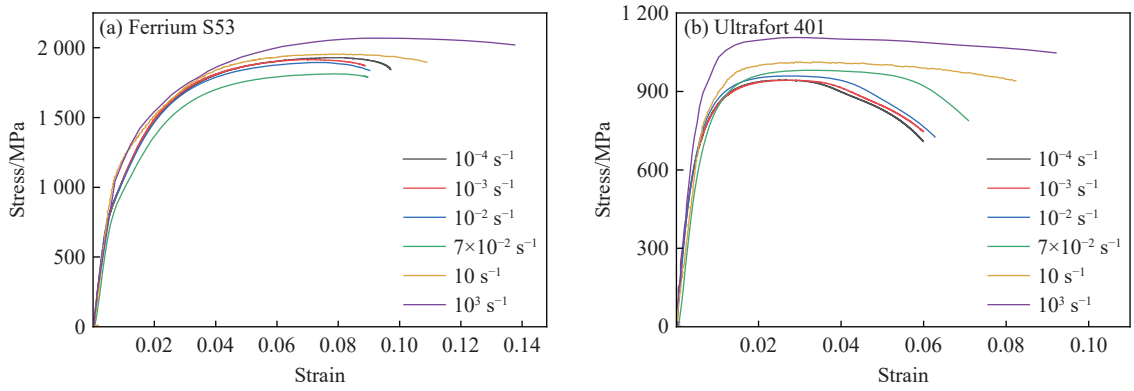



图 3　不同应变率下 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的工程应力-应变曲线

Fig. 3　Engineering stress-strain curves at different strain rates for Ferrium S53 and Ultrafort 401 steels

为了进一步确认应变率对 2 种高强钢力学性能的影响，统计了不同应变率下材料的抗拉强度、屈服强度、均匀延伸率、屈强比、应变硬化指数（$n$），如表 2 所示。

首先，分析抗拉强度和屈服强度随应变率的变化，如图 4 所示。从图 4 可以看出，2 种高强钢的屈服强度均随着应变率的升高而增大，这与高应变率下位错运动机制的改变有关：随着应变率的增大，位错运动速度提高，相应的阻力也随之增大，致使位错更难发生移动，进而导致屈服强度增大[27]。然而，抗拉强度却表现出不同的变化趋势。当应变率从 $10^{-4}$ s$^{-1}$ 提高至 $7\times10^{-2}$ s$^{-1}$ 时，Ferrium S53 钢的抗拉强度由 1 920.58 MPa 减小至 1 821.34 MPa；进一步提高应变率后，抗拉强度反而增大；当应变率为 $10^{3}$ s$^{-1}$ 时，抗拉强度达到 2 069.75 MPa。Ultrafort 401 钢的抗拉强度则随着应变率的升高始终增大，由 $10^{-4}$ s$^{-1}$ 时的 944.68 MPa 持续增大至 $10^{3}$ s$^{-1}$ 时的1 106.12 MPa，抗拉强度与应变率正相关[28]。由于抗拉强度发生在材料屈服之后，且抗拉强度不仅与材料的强化过程有关，还显著依赖于屈服后的应变硬化水平[19, 29]，因此，其变化过程更为复杂，后面将结合硬化程度做进一步分析。

2 种高强钢的均匀延伸率和屈强比随应变率的变化如图 5 所示。可以看出，应变率对 2 种高强钢的均匀延伸率的影响并不明显，其中，Ferrium S53 钢的均匀延伸率随应变率的升高而有所增大。对比发现，Ferrium S53 钢的均匀延伸率明显高于 Ultrafort 401 钢，而屈强比低于 Ultrafort 401 钢。由于屈强比越小，材料的塑性越好，成型能力越强[30]，因此，在不同应变率下，Ferrium S53 钢具有比 Ultrafort 401 钢更优异的塑性变形能力。

**表 2　Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢在不同应变率下的力学性能参量**

**Table 2　Mechanical parameters of Ferrium S53 and Ultrafort 401 steels at different strain rates**

| Material | $\dot{\varepsilon}$/s$^{-1}$ | Tensile strength/MPa | Yield strength/MPa | Uniform elongation/% | Yield ratio | Hardening index |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ferrium S53 steel | $10^{-4}$ | 1 920.58 | 900.75 | 7.43 | 0.47 | 0.38 |
| | $10^{-3}$ | 1 907.41 | 908.91 | 7.25 | 0.48 | 0.33 |
| | $10^{-2}$ | 1 895.57 | 910.44 | 7.36 | 0.48 | 0.30 |
| | $7\times10^{-2}$ | 1 821.34 | 918.18 | 7.64 | 0.50 | 0.25 |
| | 10 | 1 956.13 | 1 145.16 | 8.13 | 0.59 | 0.41 |
| | $10^{3}$ | 2 069.75 | 1 333.62 | 9.47 | 0.64 | 0.46 |
| Ultrafort 401 steel | $10^{-4}$ | 944.68 | 711.59 | 2.78 | 0.75 | 0.13 |
| | $10^{-3}$ | 945.57 | 724.65 | 2.74 | 0.77 | 0.14 |
| | $10^{-2}$ | 953.93 | 759.52 | 2.81 | 0.80 | 0.15 |
| | $7\times10^{-2}$ | 967.97 | 777.67 | 3.24 | 0.80 | 0.17 |
| | 10 | 1 013.09 | 853.76 | 2.99 | 0.84 | 0.25 |
| | $10^{3}$ | 1 106.12 | 958.74 | 2.93 | 0.87 | 0.35 |

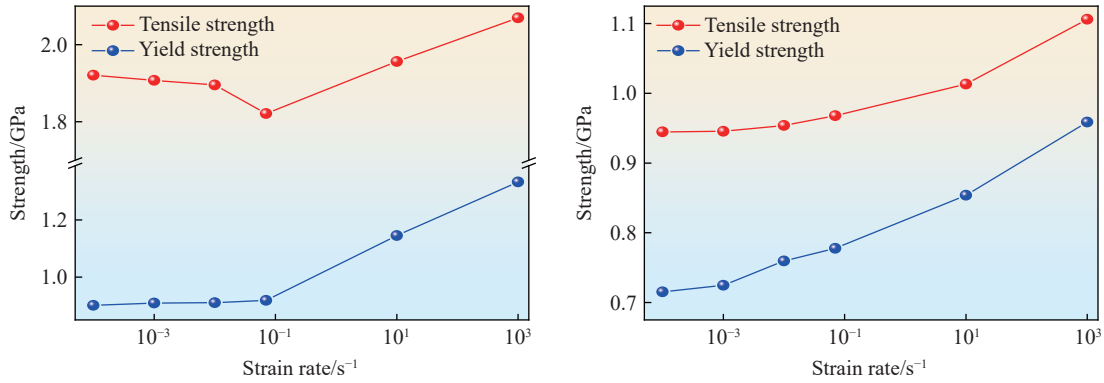



图 4　不同应变率下 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的屈服强度和抗拉强度

Fig. 4　Tensile and yield strength curves at different strain rates for Ferrium S53 and Ultrafort 401 steels

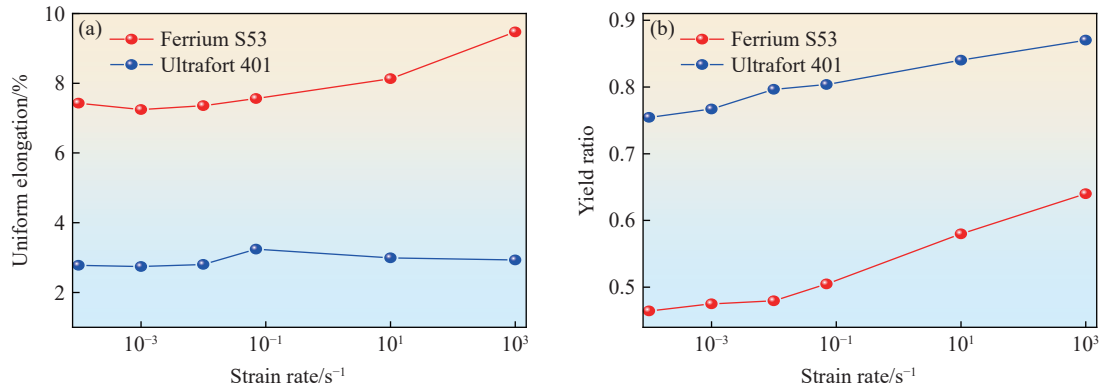



图 5　不同应变率下 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的均匀延伸率和屈强比

Fig. 5　Uniform elongation and yield ratio curves at different strain rates for Ferrium S53 and Ultrafort 401 steels

材料经过屈服点后进入塑性变形阶段，在此过程中会出现位错纠缠、位错与晶界相互作用等使材料发生应变硬化现象[31]。采用 Hollomon 方程对 2 种高强钢材料在高应变区的硬化变形行为进行描述，具体公式[32] 如下

$$\sigma_r = K\varepsilon_r^n \tag{1}$$

式中：$\sigma_r$ 和 $\varepsilon_r$ 分别为真实应力和真实应变；$n$ 为应变硬化指数，是评估材料应变硬化能力的重要参数；$K$ 为常数。

对 2 种高强钢材料在高应变段的塑性变形进行拟合，结果如图 6 所示。随着应变率的升高，Ferrium S53 钢的硬化指数先明显下降后回升并持续增长，而 Ultrafort 401 钢的硬化指数则始终单调增大。由此可知，在准静态下，随着应变率升高，Ferrium S53 钢的应变硬化能力减弱；在更高的应变率下，硬化能力又得到增强。Ultrafort 401 钢的加工硬化能力则始终呈增强趋势。因此，在准静态下（$\dot{\varepsilon}$<$10^{-1}$ $s^{-1}$），随着应变率升高，Ferrium S53 钢屈服后强度增量减小，导致抗拉强度降低，而 Ultrafort 401 钢则相反；当应变率进一步上升后，两者的抗拉强度均增大。该结论与图 4(a) 所示结果一致。对比之下，Ferrium S53 钢的硬化指数整体上依然高于 Ultrafort 401 钢，说明在不同的应变率下，Ferrium S53 钢仍然具有优于 Ultrafort 401 钢的应变硬化能力。

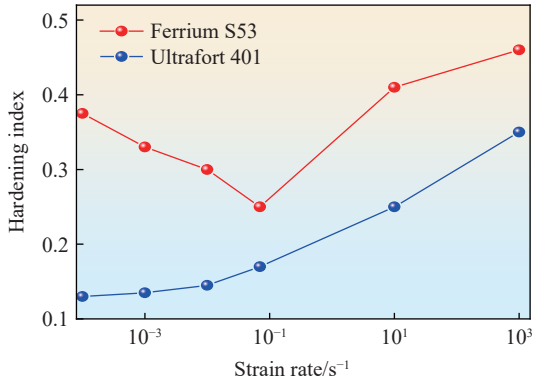



图 6　不同应变率下 Ferrium S53 钢和 Ultrafort 401 钢的硬化指数

Fig. 6　Hardening indexes of Ferrium S53 and Ultrafort 401 steels at different strain rates

## 2.3　断口形貌分析

通过 SEM 对 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢在不同应变率下的断口特征进行分析。如图 7 和图 8 所示，在不同的应变率下，Ferrium S53 钢的断口处存在大量微米级韧窝，表现出明显的韧性断裂；而 Ultrafort 401 钢的断口处则呈现拉长的韧窝特征，且分布明显不均，韧窝分布密度也相对较小。由于断口上韧窝的尺寸及密度与断裂吸收能呈正相关，因此，韧窝的尺寸和密度会显著依赖材料的应变硬化能力[33]。采用线性截距法对所有样品的韧窝进行统计，通过正态分布拟合，得到样品韧窝的平均尺寸（$\bar{d}$），其具体公式[34] 为

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{\left(x-\bar{d}\right)^2}{2s^2}\right] \tag{2}$$

式中：$s$ 为标准差。为进一步比较不同拉伸应变率下的断裂形貌，定量计算非均匀因子（$f_h$），以评估韧窝的均匀性，具体计算公式[35] 为

$$f_h = \frac{\sum_{i=1}^{N_g}\left|d_i-\bar{d}\right|}{N_g\bar{d}} \tag{3}$$

式中：$N_g$ 为韧窝的数量，$d_i$ 为不同韧窝的尺寸。若 $f_h$ 越小，则表明韧窝尺寸分布越均匀。图 7 给出了 Ferrium S53 钢的形貌、韧窝尺寸及均匀性计算结果。可见，不同应变率下，Ferrium S53 钢拉伸试样均呈现出韧性断裂模式，但韧窝尺寸却表现出明显差异。在低应变率（$10^{-4}$ $s^{-1}$）下，Ferrium S53 钢的拉伸试样断口具有尺寸均匀且较大的韧窝（见图 7(a)），韧窝平均尺寸达到 2.13 μm；随着应变率的升高，韧窝尺寸逐渐减小；当应变率为 $7\times10^{-2}$ $s^{-1}$ 时，韧窝平均尺寸仅为 0.68 μm，且韧窝尺寸分布更不均匀，见图 7(d)；然而，随着应变率进一步升高至 10～$10^3$ $s^{-1}$，拉伸试样断口的韧窝尺寸迅速增长，平均韧窝尺寸最终达到 7.54 μm，如图 7(f) 所示。这说明：准静态拉伸时，随着应变率的升高，Ferrium S53 钢的塑性功消耗下降，致使应变硬化逐渐降低，表现为韧窝尺寸减小；而随着应变率进一步升高，韧窝尺寸明显增大，应变硬化增大。

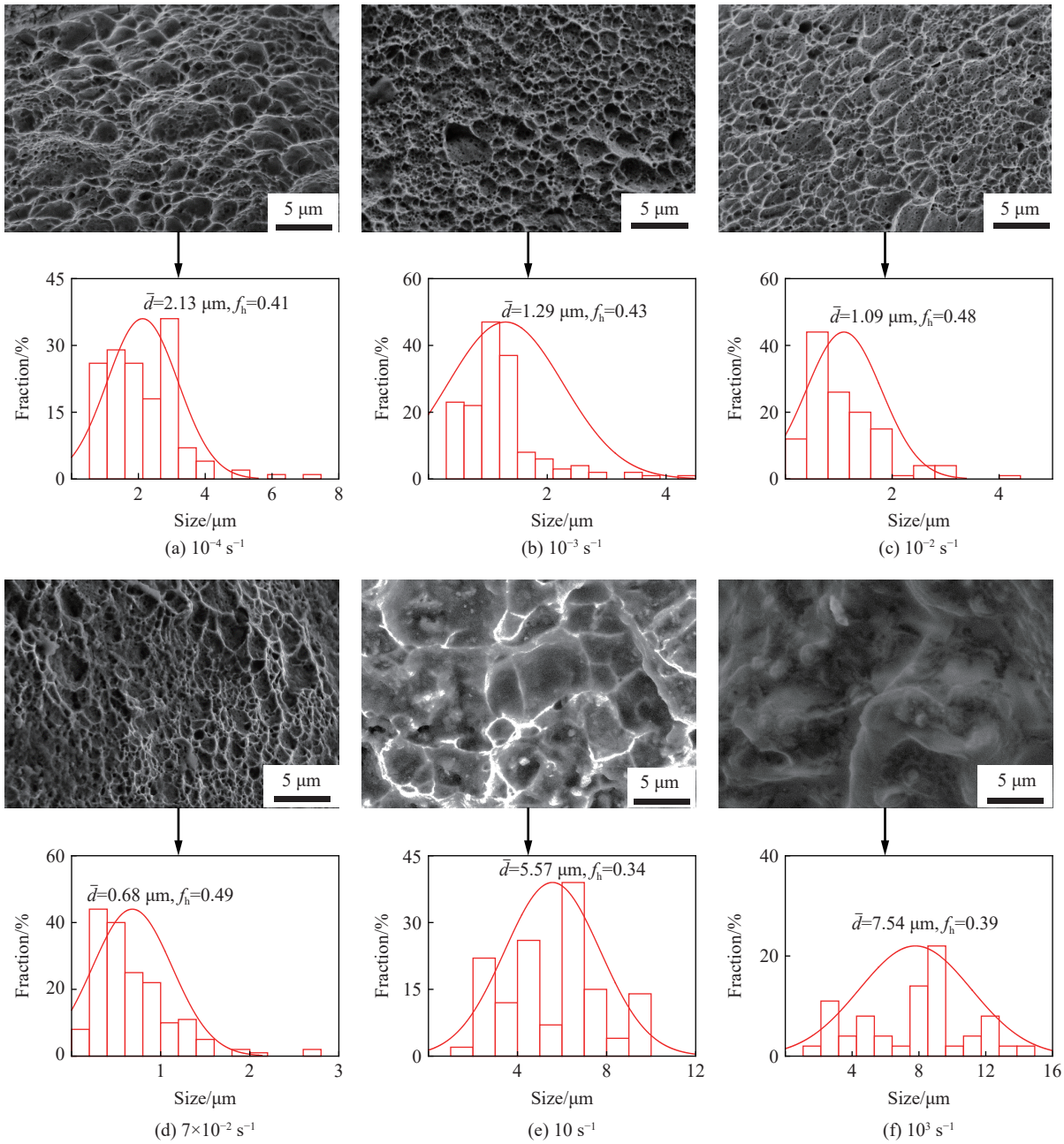



图 7　不同应变率下 Ferrium S53 钢的断口形貌及对应的韧窝尺寸分布

Fig. 7　Fracture morphology and distribution of corresponding dimple size at different strain rates for Ferrium S53 steel

图 8 显示了 Ultrafort 401 钢在不同应变率下的韧窝特征变化情况。从图 8 可以看出，当应变率由 $10^{-4}$ $s^{-1}$ 提升至 $10^{3}$ $s^{-1}$ 时，Ultrafort 401 钢的平均韧窝尺寸由 3.22 μm 增大到 14.56 μm。然而，韧窝均匀性的变化却与平均韧窝尺寸存在较大的差异。准静态拉伸下，随着应变率的增大，Ultrafort 401 钢的韧窝均匀性逐渐提高，如图 8(a)～图 8(d) 所示；当应变率进一步升高时，韧窝的整体均匀性反而下降，韧窝尺寸出现较大的差异。由此可见，随着应变率的升高，Ultrafort 401 钢的应变硬化能力增强，导致其塑性变形能量消耗逐渐升高，该结果与屈强比（见图 5(b)）及应变硬化指数（见图 6）随应变率增加的变化规律一致。

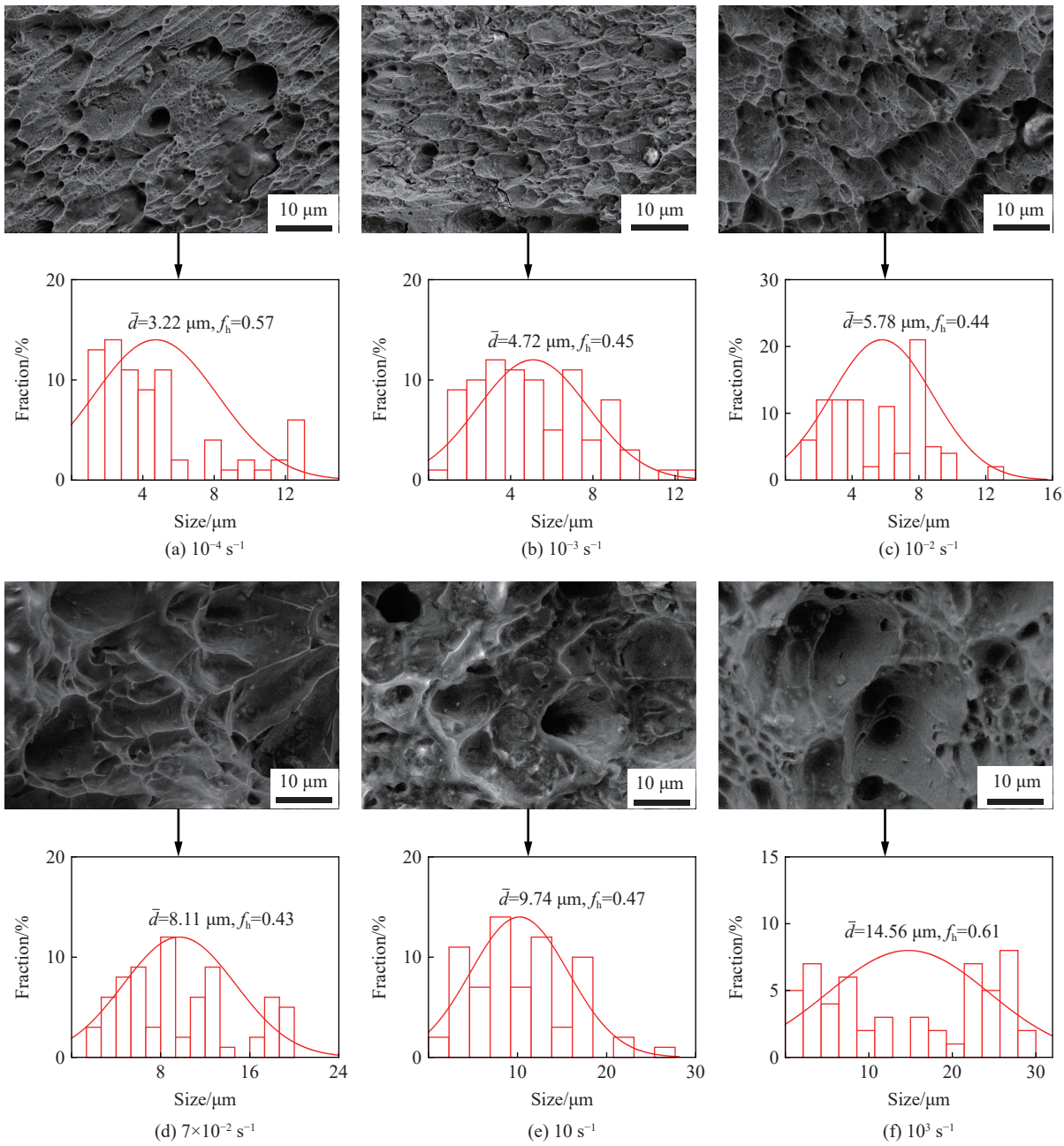



图 8　不同应变率下 Ultrafort 401 钢的断口形貌及对应的韧窝尺寸分布

Fig. 8　Fracture morphology and distribution of corresponding dimple size at different strain rates for Ultrafort 401 steels

## 2.4　对比分析

为了系统评估不同应变率下高强钢材料的性能，图 9 汇总了 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的屈服强度和均匀延伸率随应变率的变化。经过不同应变率的拉伸后，Ferrium S53 钢的屈服强度和均匀延伸率始终高于 Ultrafort 401 钢，说明不同应变率下 Ferrium S53 钢均具有更优异的强塑性性能。

高强钢的微观结构对其力学性能具有重要影响。微观结构分析表明，晶粒尺寸越小，材料强度越高。由于变形前 Ferrium S53 钢的晶粒尺寸更小，晶界密度更高，因此，位错移动产生的阻碍更大[36−40]，受力时更难发生位错滑移，从而表现出较高的屈服强度。相比之下，Ultrafort 401 钢的晶粒尺寸较大，晶界密度相对较低，位错更易滑移，因此，同一应变率下，Ferrium S53 钢的屈服强度更高。随着应变率升高，2 种高强钢中的位错运动速度均增大，相应的位错移动阻力增大，致使屈服强度均增大。

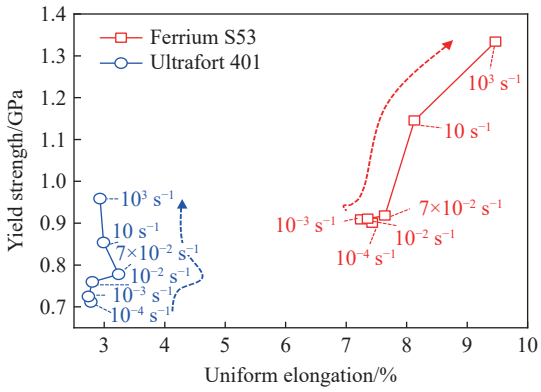



图 9　不同应变率下 2 种高强钢的强塑性关系
（虚线箭头表示应变率增大方向）

Fig. 9　Relationships of strength-plasticity behavior of two high-strength steels at varying strain rates (The dashed arrows show the direction of increased strain rate)

Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的抗拉强度变化趋势却不尽相同，这与塑性变形过程中的应变硬化水平有关。随着应变率的升高，Ferrium S53 钢的抗拉强度先减小后增大。断口分析表明，在低应变率下，断口上的韧窝尺寸不断减小，变形过程中消耗的塑性功降低，导致应变硬化程度下降。在 $7\times10^{-2}$ $s^{-1}$ 的应变率加载下，Ferrium S53 钢具有最低的硬化指数（$n$=0.25）。随着应变率的进一步升高，韧窝尺寸不断增大，应变硬化指数增大，硬化能力的提升进一步改善了材料在高应变率下的力学性能。Ferrium S53 钢这种强度随应变率升高而非单调变化趋势与 TWIP 钢[41] 类似，不同应变率下的微观硬化转变机制有待进一步研究。对于 Ultrafort 401 钢，其抗拉强度呈现正应变率依赖性，表明其在高应变率下保持了较强的应变硬化能力。应变硬化指数和断口形貌分析表明，相对于 Ultrafort 401 钢，尽管 Ferrium S53 钢的应变硬化指数表现出先减后增的变化规律，但始终具有更优异的应变硬化能力，在不同应变率下表现出更理想的强塑性。

## 3　结　论

通过 EBSD 对 Ferrium S53 和 Ultrafort 401 钢的初始微观结构进行了表征和分析，利用万能试验机和高速拉伸试验机，对 2 种高强钢开展了不同应变率下的拉伸试验，结合断口形貌分析，得到如下主要结论。

(1) 随着应变率的升高，Ultrafort 401 和 Ferrium S53 钢的屈服强度均逐渐增大，与高应变率下位错运动阻力的增加有关。因为 Ferrium S53 钢的初始晶粒尺寸更小，晶界密度更高，所以其屈服强度整体更高。

(2) 随着应变率的升高，Ultrafort 401 钢的抗拉强度和应变硬化指数均逐渐增大，而 Ferrium S53 钢的抗拉强度和应变硬化指数先减小后增大。断口分析表明，随着应变率的升高，Ultrafort 401 钢的韧窝尺寸增大，而 Ferrium S53 钢的韧窝尺寸则先缓慢减小后迅速增大，两者具有不同的应变硬化变化趋势。

(3) 相较于 Ultrafort 401 钢，Ferrium S53 钢在不同应变率下均表现出更高的强度和塑性，与其具有更高的应变硬化能力有关。不同应变率下，Ferrium S53 钢均具有更高的应变硬化指数以及更显著的韧性断裂特征。

本研究基于应变率效应，探讨了 2 种高强钢的力学性能演化规律，证明了在不同应变率下第 3 代高强钢 Ferrium S53 比 Ultrafort 401 钢具有更优异的拉伸性能。然而，Ferrium S53 钢的应变硬化随着应变率的升高呈非单调变化趋势。针对不同应变率下的硬化差异，还需进一步聚焦微观机理，深入探究 2 种高强钢在考虑应变率效应时的微观结构演化，以指导实际工程应用。

## 参考文献：


[1] JIAO Z B, LUAN J H, MILLER M K, et al. Precipitate transformation from NiAl-type to $Ni_2AlMn$-type and its influence on the mechanical properties of high-strength steels [J]. Acta Materialia, 2016, 110: 31–43.

[2] YAN S, LIANG T S, CHEN J Q, et al. A novel Cu-Ni added medium Mn steel: precipitation of Cu-rich particles and austenite reversed transformation occurring simultaneously during ART annealing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 746: 73–81.

[3] ZHOU B C, YANG T, ZHOU G, et al. Mechanisms for suppressing discontinuous precipitation and improving mechanical properties of NiAl-strengthened steels through nanoscale Cu partitioning [J]. Acta Materialia, 2021, 205: 116561.

[4] LIU Z B, YANG Z, WANG X H, et al. Enhanced strength-ductility synergy in a new 2.2 GPa grade ultra-high strength stainless steel with balanced fracture toughness: elucidating the role of duplex aging treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 928: 167135.

[5] WANG X, XU Y B, WANG Y, et al. Combined effect of Cu partitioning and nano-size precipitates on improving strength-ductility balance of Cu bearing Q&P steel [J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112441.

[6] 刘振宝, 梁剑雄, 杨哲, 等. 高强度不锈钢应用及研究进展 [J]. 中国冶金, 2022, 32(6): 42–53.
LIU Z B, LIANG J X, YANG Z, et al. Progress of application and research on high strength stainless steel [J]. China Metallurgy, 2022, 32(6): 42–53.

[7] 张超, 苏杰, 梁剑雄, 等. 超高强度不锈钢沉淀行为研究进展 [J]. 钢铁, 2018, 53(4): 48–61.
ZHANG C, SU J, LIANG J X, et al. Research development of precipitation behavior of ultra high strength stainless steels [J]. Iron & Steel, 2018, 53(4): 48–61.

[8] 吴昊. 2 种合金钢动态性能与圆筒爆轰加载条件下破片特征关系研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WU H. Study on the relations between the dynamic properties of two alloy steels and the fragmentation characteristics of exploded cylinders [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[9] 刘振宝, 梁剑雄, 苏杰, 等. 高强度不锈钢的研究及发展现状 [J]. 金属学报, 2020, 56(4): 549–557.
LIU Z B, LIANG J X, SU J, et al. Research and application progress in ultra-high strength stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 549–557.

[10] SEO J Y, PARK S K, KWON H, et al. Influence of carbide modifications on the mechanical properties of ultra-high-strength stainless steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(10): 4477–4485.

[11] PIOSZAK G L, GANGLOFF R P. Hydrogen environment assisted cracking of modern ultra-high strength martensitic steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(9): 4025–4045.

[12] YANG Z, LIU Z B, LIANG J X, et al. Elucidating the role of secondary cryogenic treatment on mechanical properties of a martensitic ultra-high strength stainless steel [J]. Materials Characterization, 2021, 178: 111277.

[13] ZHANG Y P, ZHAN D P, QI X W, et al. Effect of solid-solution temperature on the microstructure and properties of ultra-high-strength Ferrium S53® steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 730: 41–49.

[14] 苟曼曼, 白瑞敏, 孟利军. 应变速率对钛合金室温拉伸性能的影响 [J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1): 52–54, 80.
GOU M M, BAI R M, MENG L J. Effect of strain rate on tensile properties of titanium alloy at room temperature [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(1): 52–54, 80.

[15] BACIU F, RUSU-CASANDRA A, PASTRAMĂ Ş D. Low strain rate testing of tensile properties of steel [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 32(2): 128–132.

[16] MANJOINE M J. Influence of rate of strain and temperature on yield stresses of mild steel [J]. Journal of Applied Mechanics, 1944, 2(1): A211–A218.

[17] ZHANG H, LI P D, GONG X F, et al. Tensile properties, strain rate sensitivity and failure mechanism of single crystal superalloys CMSX-4 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 782: 139105.

[18] OGUNDARE O D, MOMOH I M, AKINRIBIDE O J, et al. Effect of strain rates on mild steel under tensile loading [J]. International Journal of Science and Technology, 2013, 2(8): 588–594.

[19] MA X K, LI F G, CAO J, et al. Strain rate effects on tensile deformation behaviors of Ti-10V-2Fe-3Al alloy undergoing stress-induced martensitic transformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 710: 1–9.

[20] YANG H K, ZHANG Z J, TIAN Y Z, et al. Negative to positive transition of strain rate sensitivity in Fe-22Mn-0.6C-*x*(Al)

twinning-induced plasticity steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 690: 146–157.

[21] QIAN L H, GUO P C, MENG J Y, et al. Unusual grain-size and strain-rate effects on the serrated flow in FeMnC twin-induced plasticity steels [J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(4): 1669–1674.

[22] MOHAPATRA S, KUMAR S, DAS S, et al. Effect of strain rate on the microstructure evolution and tensile behavior of medium manganese steel [J]. Materials Letters, 2023, 330: 133243.

[23] SHEN T, FAN C H, HU Z Y, et al. Effect of strain rate on microstructure and mechanical properties of spray-formed Al-Cu-Mg alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(4): 1096–1104.

[24] ZHONG X T, HUANG L K, LIU F. Discontinuous dynamic recrystallization mechanism and twinning evolution during hot deformation of incoloy 825 [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(9): 6155–6169.

[25] ZHANG W W, YANG Y, TAN Y B, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanisms of MP159 superalloy during room temperature rolling and cryorolling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 908: 164667.

[26] CAI Y Q, TAN Y B, WANG L X, et al. Multiple strengthening mechanisms induced by nanotwins and stacking faults in CoNiCr-superalloy MP159 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 853: 143793.

[27] 李春光, 张伟, 刘立现, 等. 不同应变速率双相高强钢动态力学行为微观机理分析 [J]. 锻压技术, 2018, 43(6): 166–171.
LI C G, ZHANG W, LIU L X, et al. Analysis on micro-mechanism of dynamic mechanical behavior for high-strength steel with dual-phase under different strain rates [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(6): 166–171.

[28] WIESNER C S, MACGILLIVRAY H. Loading rate effects on tensile properties and fracture toughness of steel [M]//HIRSCH P B. Fracture, Plastic Flow and Structural Integrity in the Nuclear Industry. London: CRC Press, 2000.

[29] ZHANG J Y, JIANG P, ZHU Z L, et al. Tensile properties and strain hardening mechanism of Cr-Mn-Si-Ni alloyed ultra-strength steel at different temperatures and strain rates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 842: 155856.

[30] JIANG Z H, LIAN J S, BAUDELET B. A dislocation density approximation for the flow stress-grain size relation of polycrystals [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(9): 3349–3360.

[31] 孙伶俐. 拉伸应变速率对 316 不锈钢微观组织演变及力学性能的影响 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
SUN L L. Microstructure evolution and mechanical properties of 316 stainless steel: strain rate effect [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.

[32] 汪志福, 孔韦海. 应变速率对 304 奥氏体不锈钢应变硬化行为的影响 [J]. 压力容器, 2013, 30(7): 6–11.
WANG Z F, KONG W H. Effect of strain rate on 304 austenitic stainless steel strain hardening behavior [J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(7): 6–11.

[33] 刘海娜, 梅运东, 刘领兵. 应变速率对低合金高强钢性能的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48(6): 253–257.
LIU H N, MEI Y D, LIU L B. Influence of strain rate on properties for low alloy high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(6): 253–257.

[34] 胡泳. 正态分布 [J]. 商务周刊, 2009(24): 94.
HU Y. Normal distribution [J]. Business Watch Magazine, 2009(24): 94.

[35] CHEN M S, ZOU Z H, LIN Y C, et al. Microstructural evolution and grain refinement mechanisms of a Ni-based superalloy during a two-stage annealing treatment [J]. Materials Characterization, 2019, 151: 445–456.

[36] VAN SWYGENHOVEN H. Grain boundaries and dislocations [J]. Science, 2002, 296(5565): 66–67.

[37] LIU Q, XIONG Z W, YANG J, et al. Deformation induced phase transition in brass under shock compression [J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106224.

[38] VALIEV R. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties [J]. Nature Materials, 2004, 3(8): 511–516.

[39] LIU Q, FANG L M, XIONG Z W, et al. The response of dislocations, low angle grain boundaries and high angle grain boundaries at high strain rates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 822: 141704.

[40] VAUGHAN M W, SAMIMI P, GIBBONS S L, et al. Exploring performance limits of a new martensitic high strength steel by ausforming via equal channel angular pressing [J]. Scripta Materialia, 2020, 184: 63–69.

[41] FENG X C, LIU X Y, BAI S X, et al. Mechanical properties and deformation behaviour of TWIP steel at different strain rates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 879: 145182.

# Tensile Behavior and Mechanical Performance Analysis of High-Strength Steels at Varying Strain Rates

LUORONG Dengzhu[1], LIU Xiaoru[1], YANG Jia[2], XIAO Likang[3], GUO Liang[3], WEI Zhantao[3], ZHOU Zhangyang[1,2], YI Zao[1], LIU Yi[2], FANG Leiming[4], XIONG Zhengwei[1,5]

（1. *Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties*, *School of Mathematics and Physics*, *Southwest University of Science and Technology*, *Mianyang* 621010, *Sichuan*, *China*;
2. *Institute of Fluid Physics*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*;
3. *Southwest Institute of Applied Magnetism*, *Mianyang* 621010, *Sichuan*, *China*;
4. *Institute of Nuclear Physics and Chemistry*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang* 621999, *Sichuan*, *China*;
5. *Sichuan Civil-Military Integration Institute*, *Mianyang* 621010, *Sichuan*, *China*）

**Abstract:** High-strength steels are widely employed due to their excellent combination of high strength, good ductility, and corrosion resistance. However, they often exhibit significant strain rate sensitivity. In this study, two types of high-strength steels, Ultrafort 401 and Ferrium S53 steels, were investigated. Tensile tests were conducted at varying strain rates ($10^{-4}$–$10^{3}$ $s^{-1}$), to obtain the yield strength, the tensile strength, the uniform elongation, the hardening index and other performance parameters. The variations of these parameters with strain rate were thoroughly analyzed. It was observed that under different strain rates, Ferrium S53 steel consistently outperformed Ultrafort 401 steel in terms of tensile properties, while they exhibited different trends. As the strain rate increased, both of the yield strength and the tensile strength of Ultrafort 401 steels increased, while for Ferrium S53 steels the yield strength of increased, and the tensile strength decreased and then increased. Combined with the microstructure analysis, it is found that the higher yield strength of Ferrium S53 steel was related to the smaller grain sizes, while the different tensile strength trends of the two high-strength steels with the increase of strain rate were associated with differences in strain hardening response. With the increase of strain rate, the dimple size of Ultrafort 401 steels increases, whereas it decreases and then increases for Ferrium S53 steels. This indicates a different pattern of change in the strain hardening level of the two high-strength steels with increasing strain rate. The findings in this work provide a scientific basis for assessing the mechanical performance of high-strength steels under various loading conditions and hold significant implications for their engineering applications.

**Keywords:** high-strength steel; tensile properties; strain rate; fracture morphology; yield strength; tensile strength