

预应变对高强度低合金钢性能和组织的影响

孔玉强, 李 伟, 段 朋

(郑州科技学院 机械工程学院, 河南 郑州 450064)

摘要: 以高强度低合金钢 HC340LA 为研究对象, 对其微观组织及力学性能进行了分析; 对 3 个方向的单向拉伸试样分别施加 0%、5%、10%、15% 的预应变, 卸载后进行二次拉伸至试样断裂, 获取应力-应变曲线, 并提取力学性能、加工硬化等关键参数, 获取预应变的影响规律; 对均匀变形区域的微观组织进行观察, 获取预应变对组织的影响。结果表明: 材料存在屈服平台和明显的吕德斯带; 强度随着预应变的增加而增大; 断后伸长率在 5% 预应变时有所下降, 但随着预应变的继续增加则开始增大; 瞬时加工硬化值随着预应变量的增大迅速降低, 并且存在明显的变化差异; 铁素体晶粒随预应变量的增加发生尺寸变化, 而珠光体的尺寸并未发生明显变化, 但随着铁素体的变形, 其排布方向出现了变化。

关键词: 高强度低合金钢; 预应变; 力学性能; 加工硬化; 组织

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.029

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0219-07

Influence of pre-strain on properties and microstructure for high strength low alloy steel

Kong Yuqiang, Li Wei, Duan Peng

(College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: For HC340LA high strength low alloy steel, its microstructure and mechanical properties were analyzed, and 0%, 5%, 10% and 15% pre-strains were applied to the uniaxial tensile samples in three directions, respectively. Then, after unloading, the samples were subjected to secondary stretching until the fracture of samples, and the stress-strain curves were obtained. Furthermore, the key parameters such as mechanical properties and work hardening were extracted to obtain the influence laws of pre-strain, and the microstructure of uniform deformation zone was observed to obtain the influence of pre-strain on the microstructure. The results show that there is a yield platform and obvious Lüders band. The strength of material increases with the increasing of pre-strain. The elongation after fracture decreases at the pre-strain of 5%, but it increases with the continued in creasing of pre-strain. The instantaneous work hardening value rapidly decreases with the increasing of pre-strain, and there is a significant difference in variation amount. The size of ferrite grains changes with the increasing of pre-strain amount. The size of pearlite does not show significant changes, but its arrangement direction changes with the deformation of ferrite.

Key words: high strength low alloy steel; pre-strain; mechanical properties; work hardening; microstructure

高强度低合金钢因兼具高强度和高塑性, 同时具有良好的焊接性能而被各行业广泛应用, 也是汽车车身重要的加强件和结构件用材之一^[1], 此类零件需要考虑空间布局 and 连接等的影响因素较多, 使得零件的造型一般比较复杂, 具有多种特征, 并非简单的一次成形。需要根据零件造型特点, 经过复杂的拉伸、折弯、翻边、整形、冲孔等多个工序完

成。每一道工序的施加, 均会使得材料发生一定的变形, 对于后道工序而言, 前道工序的变形作用即对材料施加了一定的预应变。预应变的施加会对材料的微观组织、力学性能及成形性能等产生重要影响, 这使得后道工序更容易发生开裂、起皱等。因此, 研究预应变对材料性能和微观组织的影响, 对零件设计及解决成形问题具有重要意义。

学者们一方面重点研究了组织和工艺对性能的影响。例如, Zhang X Y 等^[2]在传统高强度低合金 (High Strength Low Alloy, HSLA) 钢的合金成分中引入 Al 以开发 NiAl 沉淀强化 HSLA 钢, 获得了一种具有优异的屈服强度 (1234 MPa) 和伸长率 (13.3%) 组合的新型 HSLA 钢; Wang F 等^[3]研究了钨 Zr 对调质高强度低合金钢的组织、夹杂物、维

收稿日期: 2023-09-17; 修订日期: 2023-12-23

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目 (2023GGJS186); 河南省高等学校重点科研项目 (23B460010)

作者简介: 孔玉强 (1989-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: sxymtxy@163.com

通信作者: 李 伟 (1983-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 249584256@qq.com

氏硬度、冲击韧性和拉伸性能的影响, Zr 的加入有利于 HSLA 钢晶粒尺寸的细化; 陈刚等^[4]研究了轧制加热温度对高强度低合金钢相变组织及 -40 ℃ 冲击性能的影响, 马氏体和残余奥氏体 (M/A 岛) 的尺寸随着轧制加热温度的升高而增大。同时, 学者们也对外部加工工艺, 如预应变等的影响开展了一定的研究。例如魏星等^[5]研究了预应变对深冲无间隙原子钢 (Interstitial-free Steel, IF 钢) 性能的影响, 通过不同预应变的测试结果对比发现, 材料的断后伸长率和加工硬化指数逐渐降低, 而强度则逐渐增强, 对零件成形的影响较大; 余立等^[6]研究了 DP780 双相钢在典型应变状态下的断裂失效行为和微观机理, 发现应变状态对 DP780 双相钢的断裂特性和失效具有重要影响, 平面应变状态加速了微孔洞的萌生和生长, 相对于单轴拉伸更容易产生厚向裂纹而发生撕裂; 刘立现^[7]以冷轧退火的 HC440/780DHD+Z (DH780) 高强钢为研究对象, 分析了预应变对性能和微观组织的影响, 发现预应变促进残余奥氏体的转变, 使得材料的强度增强、断后伸长率增加; 郝硕等^[8]研究了一种 TRIP 型双相不锈钢的拉伸变形行为及其预应变敏感性, 预拉伸不会改变材料的 TRIP 效应, 但是会改变相变转化进而对加工硬化产生影响, 使得材料的性能发生变化; 邝春福^[9]研究了预应变对低碳钢和双相钢微观组织演变和烘烤硬化性能的影响, 对于低碳钢和双相钢, 不同的预应变会增加材料的布氏硬度 (BH) 值, 但是存在一定的数值差异, 预应变为 1% 时, BH 值达到最大, 为 79 MPa。由于基体组织的差异性, 施加不同的预应变, 材料的组织和性能具有不同的变化规律。

以高强度低合金钢 HC340LA 为研究对象, 对材料的微观组织及力学性能进行分析; 基于单向拉伸试验测试, 对 3 个方向的试样分别施加 0%、5%、10% 和 15% 的预应变, 卸载后进行二次拉伸至试样断裂, 获取整个过程中的应力-应变曲线, 并提取力学性能、加工硬化等关键参数, 获取预应变的影响规律; 对拉伸后试样平行段均匀变形区域的微观组织进行观察, 获取预应变对材料组织的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

高强度低合金钢通过在低碳钢中添加一定量的微合金元素, 如 Nb、Ti、V 等, 一方面可以细化晶粒, 另外一方面在晶界内外形成析出物, 因此, 此

类材料通过固溶强化和细晶强化提高强度, 通常在汽车车身中用于结构件和加强件。材料基体中的主要化学成分含量如表 1 所示。

表 1 材料的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of material (% , mass fraction)

元素	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
含量	0.0635	0.02	0.63	0.017	0.0085	0.0370	0.0035

本文所研究的高强低合金钢 HC300LA 的基体组织以铁素体和珠光体为主, 晶粒呈等轴状, 平均晶粒尺寸为 8.6 μm, 珠光体呈弥散分布。材料的化学成分除了 C、Si、Mn 等常规元素外, 还添加了一定量的 Ti 元素, 用以细化晶粒, 获得较高的强度。

1.2 力学性能

根据 GB/T 228.1—2021^[10], 选取厚度为 1.2 mm 的材料, 加工硬度为 A50 的力学拉伸试样, 尺寸如图 1 所示。

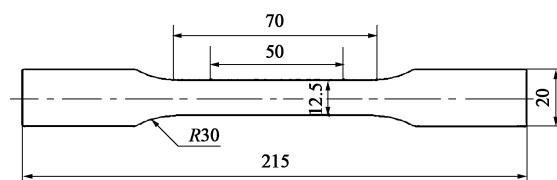


图 1 试样尺寸

Fig. 1 Sample sizes

采用万能拉伸试验机, 开展室温下的材料力学性能测试, 获得材料的力学性能曲线, 并提取关键性能参数, 结果如图 2 和表 2 所示。由于材料在轧制方向 (0° 方向)、垂直于轧制方向 (90° 方向)、与轧制方向呈 45° 方向 (45° 方向) 的性能存在一定差异, 因此, 测试时, 对 3 个方向的性能分别进行测试, 每个方向重复测试 3 次。

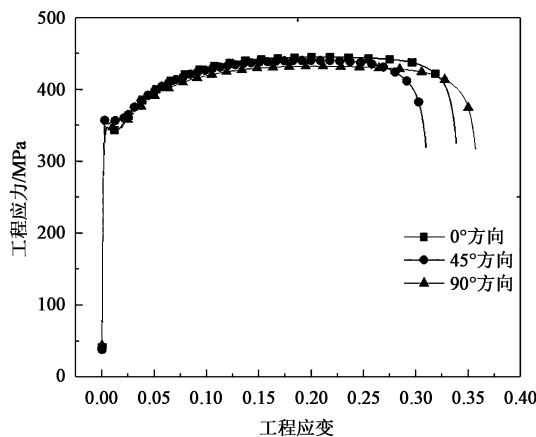


图 2 材料的工程应力-工程应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves of material

表 2 材料的力学性能参数

Table 2 Mechanical performance parameters of material						
轧制 方向	屈服 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	断后伸 长率/ %	加工硬 化指数 n	屈强 比	强塑积/ (GPa·%)
0°	342.4	445.5	32.1	0.16	0.77	14.3
90°	353.7	440.8	31.1	0.15	0.80	13.7
45°	348.2	432.6	36.2	0.15	0.80	15.7
平均值	348.1	439.6	33.1	0.15	0.79	14.6

由测试结果可知，所研究的高强度低合金钢 HC340LA 的强度较低，其屈服强度为 348 MPa 左右，抗拉强度为 440 MPa 左右，整体强塑积较低，为 15.7 GPa·%；材料的延展性较好，断后伸长率的平均值达到了 33.1%；所测试的 3 个方向均呈现出明显的屈服平台，存在明显的吕德斯带；材料的屈强比为 0.8 左右，加工硬化指数 n 为 0.15 左右；高强度低合金钢 HC340LA 的 3 个方向试样的力学性能相差不大，各向异性不太明显，其中垂直于轧制

方向的断后伸长率相比其他两个方向较低。

2 预应变对材料性能及组织的影响

2.1 预应变对材料力学性能的影响

材料成形过程中，不同区域承受不同的应变作用，成形后各区域材料的力学性能存在一定的差异^[11-12]，通过施加一定的预应变，模拟材料的成形过程，进一步拉伸获取成形后材料的力学性能，以分析不同的成形条件对性能的影响规律。

测试时，仍然采用硬度为 A50 的试样和万能拉伸试验机，按照静态材料测试方式，分别施加 5%、10%和 15%的预应变，预拉伸后卸载，进而开展二次拉伸测试直至试样断裂。图 3 分别为高强度低合金钢 HC340LA 在 3 个方向施加 0%、5%、10%和 15%预应变后拉伸至失效的工程应力-工程应变曲线。

由图 3 可以看出，在不同的拉伸预应变条件下，材料的屈服强度和抗拉强度均有所增强。断后伸长率的变化则较为复杂，5%预应变下的断后伸长率和

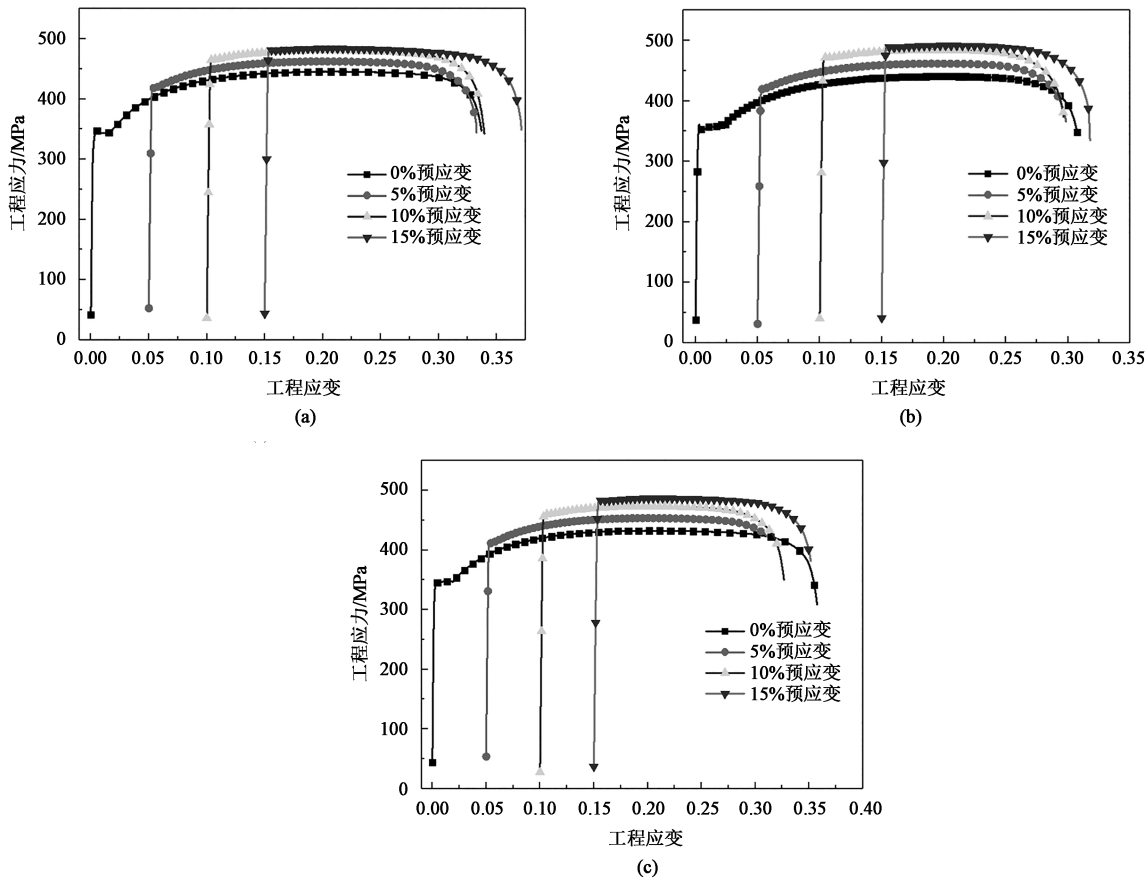


图 3 不同预应变下不同方向的工程应力-工程应变曲线
(a) 0° (b) 90° (c) 45°

Fig. 3 Engineering stress-engineering strain curves in different directions under different pre-strains

无预应变相比反而有所下降,随着预应变增加至 10%和 15%后,断后伸长率逐渐增大,直至大于无预应变下的断后伸长率。还有一个明显的现象,即屈服平台在预应变为 5%时就已经消失,因为 5%的预应变已经超过吕德斯带的应变范围,在预应变过程中位错滑动摆脱合金元素溶质原子的钉扎,使原先的柯氏气团消失,再继续拉伸,吕德斯效应消失,不再有屈服平台出现。同时,对比 0°、90°和 45°方

向试样的工程应力-工程应变曲线可以看到,后两个方向试样的断后伸长率变化不明显,而 0°方向试样的伸长率则随着预应变量的增加持续增大;同时 90°方向试样的伸长率明显低于 0°和 45°方向试样,这与轧制过程中造成的晶粒取向有关。

获取 3 个方向的关键性能参数变化,结果对比如表 3 所示,根据表 3 中的平均值绘制变化曲线,如图 4 所示。

表 3 预应变拉伸材料力学性能
Table 3 Mechanical properties of pre-strain tensile materials

轧制方向	预应变	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	加工硬化指数 n	屈强比	强塑积/ (GPa · %)
0°	5%	418.3	462.6	34.1	0.080	0.904	15.8
90°		420.0	460.0	30.8	0.079	0.913	14.2
45°		411.7	453.7	34.2	0.080	0.907	15.5
平均值	—	416.7	458.8	33.0	0.080	0.908	15.2
0°	10%	466.2	480.8	34.2	0.050	0.970	16.4
90°		470.0	485.0	31.6	0.043	0.969	15.3
45°		460.2	473.3	35.1	0.050	0.972	16.6
平均值	—	465.5	479.7	33.6	0.048	0.970	16.1
0°	15%	481.5	483.8	37.8	0.020	0.995	18.3
90°		489.2	491.5	31.9	0.020	0.995	15.7
45°		482.9	484.7	35.8	0.030	0.996	17.4
平均值	—	484.5	486.7	35.2	0.023	0.996	17.1

表 3 和图 4 中的不同预应变下高强度低合金钢 HC340LA 的力学性能参数显示,拉伸预应变对高强度低合金钢 HC340LA 的性能具有显著影响。强度呈现明显的正相关,预应变值较小时强度增加更明显,屈服强度从无预应变时的 348.1 MPa 上升至 484.5 MPa,抗拉强度则是缓慢增大,由 439.6 MPa 上升至 486.7 MPa,最终屈服强度在 15%的预应变下和抗拉强度接近,屈强比达到了 0.996,而屈强比越大,结构零件的可靠性和稳定性越高。断后伸长率在 5%预应变时有所下降,但是随着预应变的继续增加则开始增大,断后伸长率由 33.0%增大至 35.2%,强塑积则随着预应变的增大而增大,整体强塑性性能提高。从 n 值的变化曲线可以看出,随着预应变时的增大迅速降低, n 值从无预应变时的 0.15 降低至 15%预应变时的 0.023,在预应变值较大时,拉伸过程中几乎无加工硬化现象,这也是屈服强度随着预应变的增加而逐渐接近抗拉强度的原因。

2.2 预应变对材料加工硬化的影响

在单向拉伸测试中,材料的真实应力-真实应变曲线可以采用指数表示为 Hollomon 方程^[13]:

$$\sigma = k \varepsilon^n \tag{1}$$

式中: σ 为真实应力; ε 为真实应变; k 为拟合系数。

根据式 (1),对测试的应力-应变曲线进行分析,获得瞬时加工硬化指数 n_i ^[14-15],可表示为:

$$n_i = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \varepsilon)} \tag{2}$$

通过拉伸试验得到的工程应力-工程应变曲线计算得出真实应力-真实应变曲线,根据式 (2) 计算得出 n_i 。轧制方向试样在不同预应变下在拉伸过程中根据式 (1) 得到的 n_i 曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出,高强度低合金钢 HC340LA 在不同预应变的影响下, n_i 值有着明显的变化。未经过预应变的高强度低合金钢 HC340LA 试样表现出较强的加工硬化行为, n_i 值在拉伸开始时达到一个最

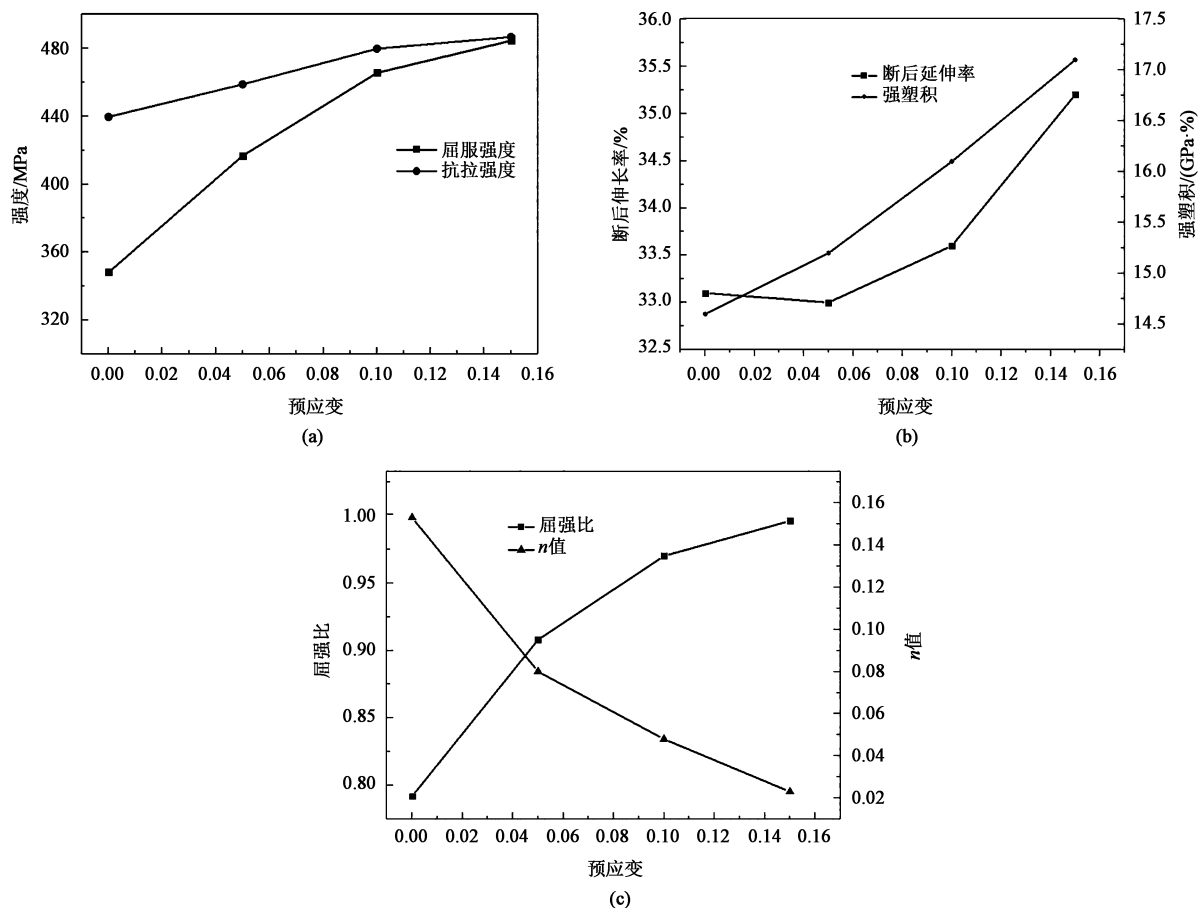


图4 不同预应变作用下力学性能参数变化曲线

(a) 强度 (b) 断后伸长率和强塑积 (c) 屈服比和 n 值

Fig. 4 Variation curves of mechanical property parameters under different pre-strains

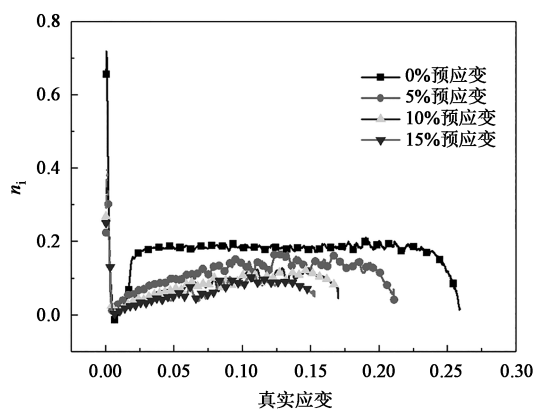
(a) Strength (b) Elongation after fracture and product of strength and plasticity (c) Yield ratio and n value

图5 拉伸过程中的加工硬化曲线

Fig. 5 Work hardening curves during tensile process

大值, 后迅速降低, 继续拉伸过程中 n_i 值则迅速增大, 之后随着拉伸的继续, n_i 值保持基本稳定。5%、10%和 15% 预应变的试样拉伸过程中, 最初始阶段与未经过预拉伸的试样的行为一致, 但是 n_i 值在最低点后增大缓慢, 说明试样在拉伸过程

中其加工硬化指数缓慢增大, 但是仍小于未经过预应变的试样, 这和拉伸得到的 n 值的大小变化规律一致。

2.3 预应变对材料显微组织的影响

选取不同预应变测试后, 对拉伸试样平行段均匀变形区域进行显微组织分析, 采用体积分数为 4% 的硝酸酒精进行侵蚀, 在金相显微镜上进行观察, 获取不同拉伸试样的显微组织, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 高强度低合金钢 HC340LA 的原始基体组织中以铁素体和珠光体为主, 前者呈现出等轴状, 后者则细小弥漫分布, 随着预应变增加, 基体组织的晶粒尺寸逐渐降低, 由 $8.6 \mu\text{m}$ 降低至 $4.9 \mu\text{m}$ 。由材料的化学成分可知, 基体中的碳含量为 0.0635%, 基体组织中主要为铁素体, 通过其他元素和微合金元素的作用, 实现晶粒细化, 同时在铁素体晶界内外产生了一定量的析出物, 这两者共同实现了材料的强化。分析不同预应变作用后的组织变化可以发现, 平行于拉伸方向的样品

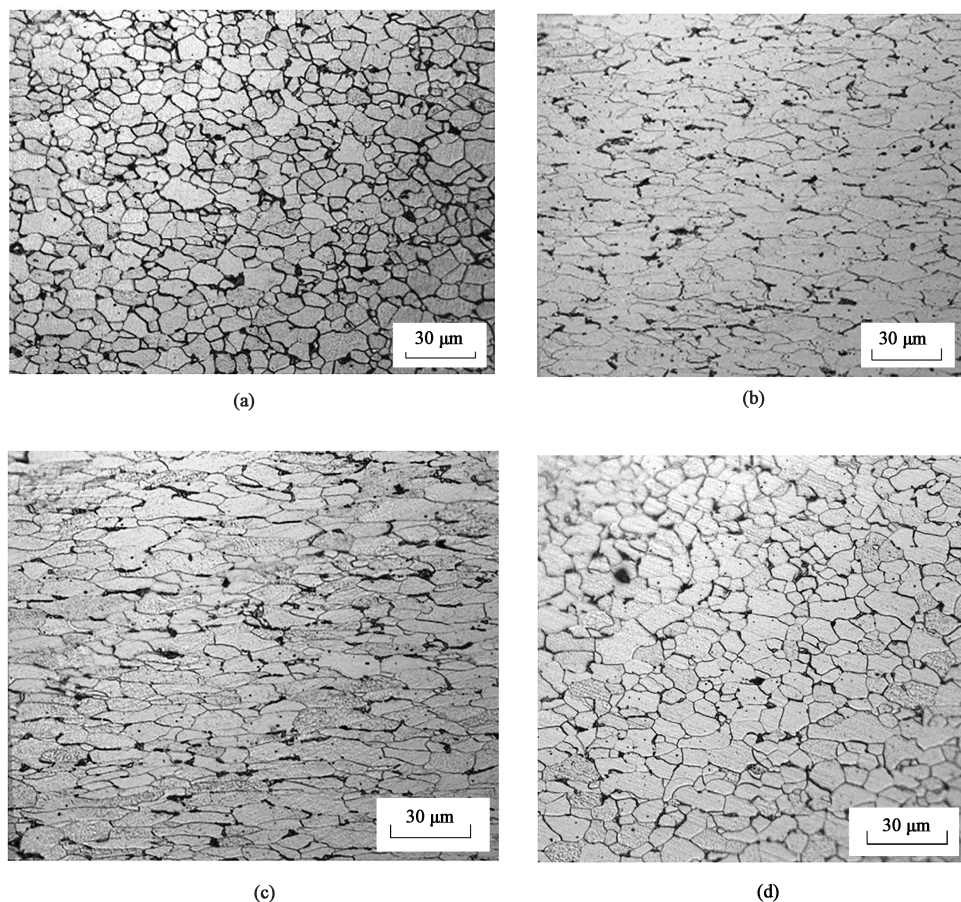


图 6 不同预应变后的试样组织

(a) 0% (b) 5% (c) 10% (d) 15%

Fig. 6 Microstructure of samples after different pre-strains

表面的显微组织依然以铁素体和珠光体为主，其中软相铁素体晶粒随着应变的增加发生了尺寸变化，而其中弥漫分布的珠光体由于强度较高，并未发生明显变化，但随着铁素体的变形，其排布方向则出现了变化。

图 6a 为未施加预应变的组织，铁素体的晶粒呈等轴状，随着预应变增加，形状发生改变，变形量也逐渐增加。如图 6d 所示，当预应变为 15% 时，铁素体晶粒的长宽比为 2.9 : 1，同时可以发现，铁素体发生了变形，内部的位错密度增加，晶粒发生了一定程度的细化。

3 结论

(1) 高强度低合金钢 HC340LA 在 3 个方向的力学性能相差不大，各向异性不明显，但均呈现出屈服平台，存在明显的吕德斯带。

(2) 拉伸预应变对高强度低合金钢 HC340LA

的性能具有显著影响，屈服强度和抗拉强度均随着预应变值的增加而增大，而且在较小预应变范围内，屈服强度增大更明显；断后伸长率在 5% 预应变时有所下降，但是随着预应变的继续增加则开始增大；加工硬化指数 n 值随着预应变的增大而迅速降低。

(3) 不同预应变的影响下瞬时加工硬化指数 n_i 有着明显的变化，预应变试样在最初阶段与未经过预拉伸的试样的行为一致，之后缓慢增大，但是仍小于未经过预应变的试样，这和拉伸得到的 n 值的变化规律一致。

(4) 不同预应变作用后，铁素体晶粒随着应变的增加发生了尺寸变化，而其中弥漫分布的珠光体并未发生明显变化，但随铁素体的变形，其排布方向出现了变化。

参考文献：

[1] 赵征志，陈伟健，高鹏飞，等. 先进高强度汽车用钢研究进

- 展及展望 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32 (12): 1059-1076.
- Zhao Z Z, Chen W J, Gao P F, et al. Progress and perspective of advanced high strength automotive steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32 (12): 1059-1076.
- [2] Zhang X Y, Wang J L, Liu S Y, et al. Developing NiAl-strengthened HSLA steels by controlling nanoscale precipitation and high-angle boundaries [J]. Materials Science & Engineering A, 2022, 861: 144355.
- [3] Wang F, Zheng X P, Long J. Effects of zirconium on the structure and mechanical properties of high-strength low-alloy steels under quenched or tempered conditions [J]. Steel Research International, 2022, 93 (11): 1-13.
- [4] 陈刚, 罗小兵, 柴锋, 等. 轧制加热温度对高强度低合金钢组织及冲击性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (4): 116-121.
- Chen G, Luo X B, Cai F, et al. Influence of rolling heating temperature on microstructure and impact property of a high strength low alloy steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (4): 116-121.
- [5] 魏星, 刘昱, 张志建. 深冲汽车车身用 IF 钢预应变拉伸实验 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (1): 109-111.
- Wei X, Liu Y, Zhang Z J. Study on tensile test of deep drawing if steel with pre-strain for automobile body [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (1): 109-111.
- [6] 余立, 刘静, 葛锐, 等. DP780 双相钢在不同应变状态下的断裂特性及机理 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 48-55.
- Yu L, Liu J, Ge R, et al. Fracture characteristics and mechanism on DP780 dual-phase steel under different strain states [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 48-55.
- [7] 刘立现. 预应变对高强钢 DH780 微观组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (7): 97-101.
- Liu L X. Effect of pre-strain on microstructure and mechanical properties of high strength steel DH780 [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (7): 97-101.
- [8] 郝硕, 李志国, 张鑫, 等. 预应变对 TRIP 型双相不锈钢拉伸变形行为的影响 [J]. 钢铁, 2022, 57 (4): 105-113.
- Hao S, Li Z G, Zhang X, et al. Influence of pre-strain on tensile deformation behavior of TRIP-assisted duplex stainless steel [J]. Iron and Steel, 2022, 57 (4): 105-113.
- [9] 邝春福. 预应变与烘烤温度对低碳钢和双相钢组织性能的影响 [J]. 钢铁钒钛, 2020, 41 (4): 150-156.
- Kuang C F. Effects of pre-strain and baking temperature on the microstructure and bake-hardening behavior of mild steel and dual phase steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41 (4): 150-156.
- [10] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature test [S].
- [11] 胡汉江, 赵爱民, 印珠凯, 等. 预应变对 TRIP 钢力学性能及硬化行为的影响 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37 (5): 128-132.
- Hu H J, Zhao A M, Yin Z K, et al. Effect of pre-strain on mechanical properties and hardening behavior of TRIP steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37 (5): 128-132.
- [12] 刘坡, 杨莉, 孙晓寒, 等. 预应变对 H300LA 低合金高强钢板冲压成形性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (15): 100-103, 106.
- Liu P, Yang L, Sun X H, et al. Effect of pre-strain on stamping ability of H300LA HSLA steel sheet [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (15): 100-103, 106.
- [13] 李凯尚, 彭剑, 彭健. 预应变对奥氏体不锈钢力学行为的影响及本构模型的构建 [J]. 材料工程, 2018, 46 (11): 148-154.
- Li K S, Peng J, Peng J. Influence of pre-strain on mechanical behavior of austenitic stainless steel and construction of constitutive models [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46 (11): 148-154.
- [14] Li Z, Misra R, Ding H, et al. The significant impact of pre-strain on the structure-mechanical properties relationship in cold-rolled medium manganese TRIP steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 712: 206-213.
- [15] 李志红, 任家宽, 霍建生, 等. 冷轧低合金高强钢再结晶和析出行为研究 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2019, 40 (3): 339-344.
- Li Z H, Ren J K, Huo J S, et al. Study on recrystallization and precipitation behavior of cold-rolled low-alloy high strength steel [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2019, 40 (3): 339-344.

