

材料与成形性能

不同变形量下 304L 抗菌奥氏体不锈钢的加工硬化行为

赵立冬¹, 庞启航¹, 徐 梅², 李维娟¹, 霍 钰¹, 王 冲¹

(1. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 太原钢铁集团有限公司 先进不锈钢国家重点实验室, 山西 太原 030003)

摘要: 通过扫描电镜 (SEM)、电子背散射衍射 (EBSD)、拉伸试验机等研究了不同预拉伸应变 (8%、20%、30% 和 40%) 对 304L 奥氏体不锈钢加工硬化行为的影响。研究表明: 随着应变量的增加, 试验钢有效平均晶粒尺寸由 5.12 μm 细化至 3.85 μm , 晶粒的长宽比逐渐增至 2.8 : 1; 试验钢在应变过程中发生马氏体相变产生形变马氏体, 其体积分数由 0.47% 增长至 3.2%; 试验钢的抗拉强度由 638.06 MPa 提升至 920.51 MPa, 屈服强度由 320.52 MPa 提升至 897.67 MPa。试验钢的加工硬化能力随着应变量的增加而增强, 其主要强化机制为孪晶强化、形变马氏体强化和位错强化, 当应变量为 0%~20% 时, 以孪晶强化为主导, 此时试验钢具有较好的塑性伸长率和强度。

关键词: 奥氏体不锈钢; 晶粒尺寸; 显微组织; 变形量; 加工硬化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.030

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0245-08

Work hardening behavior of 304L antibacterial austenitic stainless steel under different deformation amounts

Zhao Lidong¹, Pang Qihang¹, Xu Mei², Li Weijuan¹, Huo Yu¹, Wang Chong¹

(1. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel, Taiyuan Iron and Steel Group Company Limited, Taiyuan 030003, China)

Abstract: The influences of different pre-tensile strain amounts (8%, 20%, 30% and 40%) on the work hardening behavior of 304L austenitic stainless steel was systematically investigated by scanning electron microscopy (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD) and tensile testing. The results indicate that as the strain increases, the effective average grain size of test steel decreases from 5.12 μm to 3.85 μm , and the aspect ratio of grain gradually increases to 2.8 : 1. Strain-induced martensitic transformation occurred during deformation, with the volume fraction of deformation martensitic increasing from 0.47% to 3.2%. The tensile strength of test steel increases from 638.06 MPa to 920.51 MPa, the yield strength increases from 320.52 MPa to 897.67 MPa. The work hardening ability of test steel increases with the increasing of strain, its main strengthening mechanisms are twinning strengthening, deformation martensite strengthening and dislocation strengthening. When the strain is 0%~20%, twinning strengthening is dominant, and the test steel has good plastic elongation and strength.

Key words: austenitic stainless steel; grain size; microstructure; deformation amount; work hardening

加快发展新质生产力带动新材料发展, 对餐饮、医疗器械等民生领域的抗菌材料制造提出了新的要求。304L 抗菌奥氏体不锈钢作为其中的重要一员, 兼具了 304L 不锈钢的优良特性和抗菌功能, 成为了研究和应用的热点。304L 抗菌奥氏体不锈钢不仅保持

了传统 304L 不锈钢的低碳含量、优良的耐腐蚀性和良好的焊接性能, 还通过添加特定的抗菌元素 (如 Cu、Ag 等), 使其表面具备持久的抗菌效果, 从而能够有效抑制细菌的生长, 提升使用环境的卫生水平^[1-3]。

预变形处理可以减少 304L 抗菌奥氏体不锈钢在后续加工过程中的变形抗力, 改善其加工性能。这对复杂形状零件的制造和成形具有积极作用^[4]。申勇峰等^[5]通过单向拉伸试验研究了不同变形量 (0%、20%、40% 和 57%) 对 304 奥氏体不锈钢中马氏体含量和力学性能的影响, 随着塑性变形量逐渐增加, 奥氏体向马氏体转变的趋势增强, 马氏体

收稿日期: 2024-05-25; 修订日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52004122)

作者简介: 赵立冬 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 864609566@qq.com

通信作者: 庞启航 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: qihang25@163.com

的硬化效应增大。龚娜等^[6]研究了不同冷变形量(20%、40%、60%和80%)对304奥氏体不锈钢力学性能的影响,发现304奥氏体不锈钢的强度取决于马氏体含量,且加工硬化是应变诱发马氏体或形变孪晶与位错塞积的结果。周翠兰等^[7]研究了不同冷变形量(10%、20%、28%、36%、40%和52%)对304奥氏体不锈钢力学性能的影响,发现形变诱发马氏体相变是导致304奥氏体不锈钢冷变形时产生加工硬化的主要原因。控制塑性变形量在适宜范围,可以有效改善304L奥氏体不锈钢的力学性能,因此,研究304L抗菌奥氏体不锈钢的加工硬化行为,进而可突破高性能新型抗菌材料生产制造技术难题。

本文量化研究了不同变形量条件下304L抗菌奥氏体不锈钢显微组织(马氏体相变、形变孪晶、晶粒尺寸)与加工硬化行为之间的关系,揭示了304L抗菌奥氏体不锈钢预变形处理的加工硬化规律和机制。

1 试验材料及试验方法

本文所选用的304L抗菌奥氏体不锈钢的化学成

分(质量分数,%)为:0.03 C, 0.66 Si, 2.00 Mn, 18.77 Cr, 9.36 Ni, 3.98 Cu, Fe余量。将试样加热至1050℃后保温150 min,随后在常温水中进行水淬,再在260℃下进行时效热处理以消除残余应力,时效时间为12 h,时效处理后试样随炉冷却至室温。采用线切割加工拉伸试样,试样尺寸如图1所示,其中,TD为垂直于轧制方向, RD为轧制方向。使用UTM-5305型万能拉伸试验机在室温下以 $1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的应变速率进行单轴预拉伸试验,并进行不同程度(8%、20%、30%和40%)的预拉伸变形,图2a为预拉伸变形过程中的工程应力-工程应变曲线。在不同应变量试验钢的标距长度内沿着平行截面切取金相试样,试样经机械研磨后,采用15%高氯酸+85%乙醇(体积分数)电解液进行电解抛光,抛光参数为:电压为15 V,电流为0.8 A,电解时间为15 s,然后在配备Ox-ford EBSD探头的Zeiss 300型扫描电镜上进行晶粒取向观察,测试条件为:加速电压为20 kV,步长为 $0.08\text{ }\mu\text{m}$ 。同时,使用S-3400型电子显微镜观察不同应变量试验钢的断口形貌。

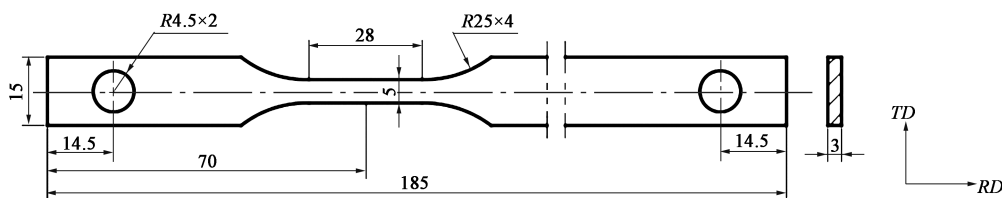


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 显微组织演变

图3为不同预拉伸应变量下试验钢的反极图(Inverse Pole Figure, IPF)、根据晶粒菊池线衬度(Band Contrast, BC)信息重构出的取向成像图以及相分布图。观察图3中显微组织的边界形态BC图可以看出,试验钢的原始显微组织主要为多边形的奥氏体,其平均有效晶粒尺寸为 $5.12\text{ }\mu\text{m}$ 。随着应变量的增加,奥氏体晶粒逐步细化,且晶粒内部的位错密度增加并产生应力集中效应,从而诱发相变形成形变马氏体。形变马氏体是通过塑性变形在特定条件下由奥氏体相变生成的一种马氏体组织,具有较高的硬度和强度^[8]。由图3b可以看出,应变量为8%时,试验钢奥氏体基体中出现少量黑色的

弥散分布的形变马氏体。应变量增加至20%时,等轴状的奥氏体发生不同程度的变形,并且形变马氏体的分布密集。此时,“硬相”形变马氏体在变形过程中几乎不发生变形,同时观察到少量剪切带和板条状形变孪晶的存在;试验钢的平均有效晶粒尺寸细化至 $4.43\text{ }\mu\text{m}$,如图3c所示。由于拉伸变形严重,30%应变量的试验钢已经无法清晰地看到原奥氏体晶界,仅存在形变孪晶及剪切带,如图3d所示。40%应变量试验钢的奥氏体晶粒沿拉伸变形方向拉长变形,试验钢的平均有效晶粒尺寸为 $3.85\text{ }\mu\text{m}$,晶粒尺寸相比原始组织减小了 $1.27\text{ }\mu\text{m}$ 。材料在外力作用下发生的塑性变形,在晶体的某一部分相对于另一部分按照特定的对称关系发生镜像变形,形成孪晶^[9]。剪切带通常表现为材料内部或表面的条纹状结构,其主要特征是高密度的位错和剧烈的局部变形^[10]。

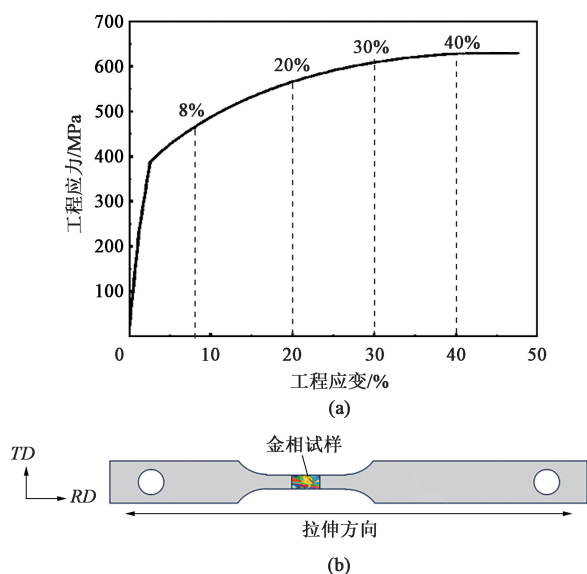


图2 304L 抗菌奥氏体不锈钢的工程应力-工程应变曲线 (a) 和金相试样切取位置示意图 (b)

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curve of 304L antimicrobial austenitic stainless steel (a) and schematic diagram of cutting location for metallographic specimen (b)

观察图3中试验钢在不同应变变量下的BCC和FCC相的分布及演变过程可以看出:预变形试验钢的初始显微组织均为奥氏体;形变马氏体组织多为块状结构,主要分布在原奥氏体晶粒的晶界处,这也说明了形变马氏体更倾向于在奥氏体晶界处形核和长大^[11-12]。随着应变量的增加,形变马氏体组织逐渐增多,当试验钢应变变量分别为8%、20%、30%和40%时,形变马氏体的体积分数分别为0.47%、0.56%、1.02%和3.2%。

2.2 力学性能

图4为不同预拉伸应变变量下试验钢的工程应力-工程应变曲线以及屈服强度、抗拉强度和伸长率变化规律。从图4中可以看出:随着预拉伸应变变量增加,抗拉强度由638.06 MPa逐渐提升至920.51 MPa,屈服强度由320.52 MPa逐渐提升至897.67 MPa;屈强比接近1;断后伸长率随着应变量的增加呈降低趋势。不同预拉伸应变变量下试验钢的伸长率随预应变的增加而减小,但其总伸长率均在60%~62%之间,这表明不同预拉伸变形过程对试验钢再次拉伸时的总伸长率影响不大。试验钢拉伸变形过程中拉应力与屈服应力水平相近时,需经过较大的均匀变形才能达到抗拉强度。再次拉伸预变形试验钢时,屈服强度的增速相比抗拉强度更快,拉伸时试验钢的颈缩变形减小,均匀塑性变形减小。

2.3 加工硬化行为

图5为不同预拉伸应变变量下试验钢的真应力-真应变曲线和加工硬化曲线图。不同应变变量下试验钢的加工硬化曲线的变化规律相似,呈现出3个阶段:在初始拉伸变形阶段均具有较高的加工硬化率,随着应变变量增加,加工硬化率在小范围内平稳波动,之后迅速下降。在应变过程中,试验钢始终处于持续且均匀的变形状态,加工硬化能力开始降低,当应变变量达到3%左右时,加工硬化率逐渐平稳,曲线呈现一段平稳期,随后试验钢的变形过程进入颈缩阶段,加工硬化率再次下降,直至试验钢断裂。对此,需要详细分析试验钢加工硬化行为的影响因素。

2.4 拉伸断口形貌特征

选择预拉伸应变变量为0%、20%和40%的3种应变变量差异较大的试验钢观察其断口扫描电镜(Scanning Electron Microscopic, SEM)形貌,如图6所示。观察试验钢的宏观断口形貌,断面表现出明显的颈缩现象,说明试验钢具有良好的塑性,断裂形貌为韧性断裂。观察试验钢的低倍断口形貌,发现不同应变变量下试验钢断口表面均存在大量等轴状韧窝,说明为韧性断裂。断面分布着由韧窝连接而形成的条纹,随着应变量的增加,这种平行条纹在断口面上的分布增加。观察试验钢断裂后的韧窝结构SEM图像,发现随应变量的增加,断口面的韧窝形貌发生了明显变化。0%应变变量时,韧窝大而深;20%应变变量时,韧窝小而密;40%应变变量时,试验钢的韧窝较为平整,平行条纹上出现了更细小的韧窝,即韧性较差^[13]。随着应变量的增加,平行条纹数量的增多可能是孪生诱发塑性(Twinning Induced Plasticity, TWIP)效应导致的^[14]。

3 分析与讨论

图7分别为不同预拉伸应变变量下试验钢的抗拉强度与晶粒尺寸、形变马氏体含量的变化曲线。基于试验钢的显微组织特征分析,试验钢在拉伸变形过程中产生了大量的变形孪晶,变形孪晶之间的相互作用在相交区域形成二次变形孪晶,这些变形孪晶将原奥氏体晶粒分割,即变形孪晶的形成客观上细化了奥氏体晶粒。根据Hall-Petch理论^[15]:

$$R_{\text{el}} = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: R_{el} 为屈服强度; σ_0 为原始屈服强度; k 为常数; d 为晶粒尺寸。

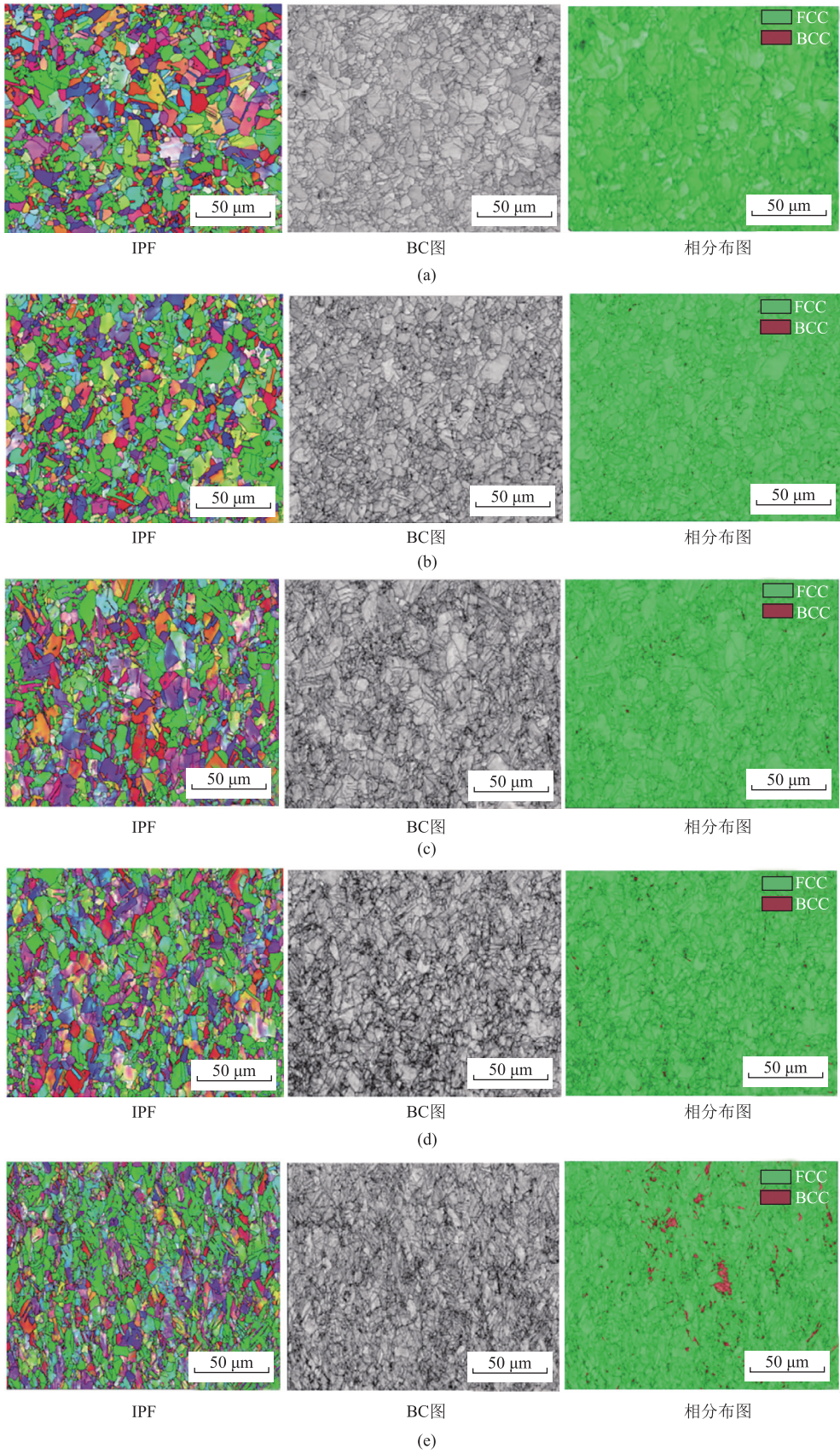


图 3 不同预拉伸应变变量下试验钢的 IPF、BC 图和相分布图
(a) 0% (b) 8% (c) 20% (d) 30% (e) 40%

Fig. 3 IPF, BC and phase distribution maps of test steel with different pre-tension strain amounts

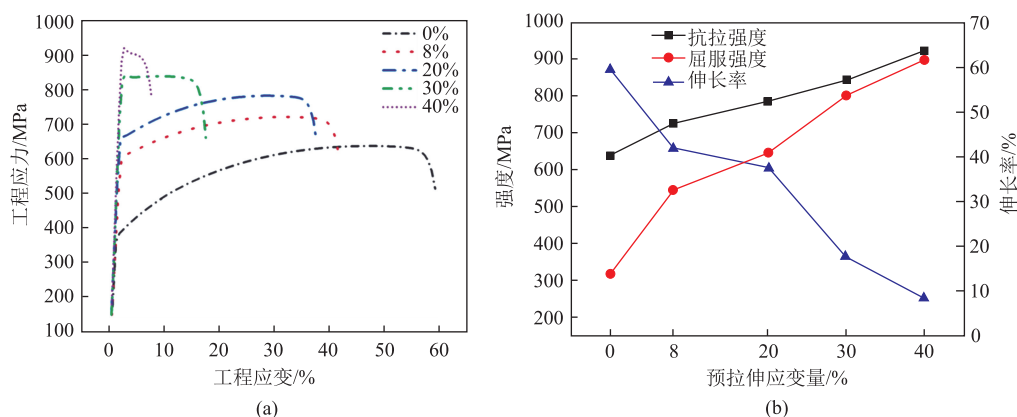


图4 不同预拉伸应变变量下试验钢的工程应力-工程应变曲线 (a) 和力学性能变化曲线 (b)

Fig. 4 Engineering stress-engineering strain curves (a) and change curves of mechanical properties (b) for test steel with different pre-tension strain amounts

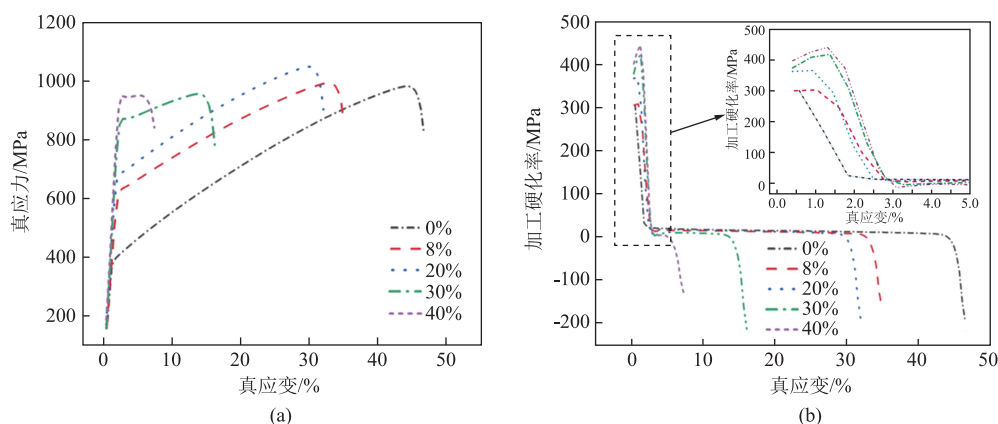


图5 不同预拉伸应变变量下试验钢的真应力-真应变曲线 (a) 和加工硬化曲线 (b)

Fig. 5 True stress-true strain curves (a) and work hardening curves (b) of test steel with different pre-tension strain amounts

式 (1) 可以说明材料的强度值随晶粒尺寸的减小而增大。

从图7中不同预拉伸应变变量下试验钢的抗拉强度与平均晶粒尺寸的变化曲线可以看出, 试验钢抗拉强度的提升和平均晶粒尺寸的变化趋势相反, 但变形速率相一致, 说明晶粒细化即孪晶强化对应变后试验钢强度的提升起主要强化作用。尽管孪生变形机制导致的晶粒细化可以强化试验钢的塑性变形能力, 但预拉伸应变量的增加导致试验钢内部引入大量位错形成位错塞积以及产生应变集中现象, 使得试验钢的伸长率从61.13%逐渐降低至12.12% (图4a)。显微组织的变化是不同应变变量下试验钢在拉伸变形初期呈现较高加工硬化能力的主要原因, 位错的形核和增殖增强了试验钢抵抗变形的能力, 同时少量变形孪晶和形变马氏体的生成阻碍了位错滑移运动^[16-17]。因此, 试验钢的加工硬化能力随应变量的增加呈增强趋势, 应变变量越大, 试验钢的真应变平滑曲线区间越长 (图5b)。

由于试验钢的显微组织构成主要为奥氏体, 在拉伸过程中发生马氏体相变, 生成形变马氏体, 使试验钢的强度有所提升, 因此, 也可证明形变马氏体相相比于奥氏体相具有更高的强度和硬度。从图7中不同预拉伸应变变量下试验钢的抗拉强度与形变马氏体含量的变化曲线可以看出, 试验钢的抗拉强度与形变马氏体含量均随着预拉伸应变量的增加而增强或增多, 但变化速率并不一致。这可能是应变过程中形变马氏体相的生成量较少, 对试验钢强度变化的影响较小, 对试验钢强度的提升起到辅助强化作用。此外, 在拉伸变形过程中, 试验钢内部位错密度的增加导致位错塞积, 使位错的滑移受到阻碍, 产生了强化效应, 试验钢抵抗塑性变形的能力增强, 从而提高了试验钢的强度。由以上理论可知, 本次试验中试验钢强度的变化受位错滑移增殖、孪晶强化叠加等因素影响, 使得试验钢产生加工硬化行为。

综上所述, 试验钢加工硬化的强化机制为孪晶

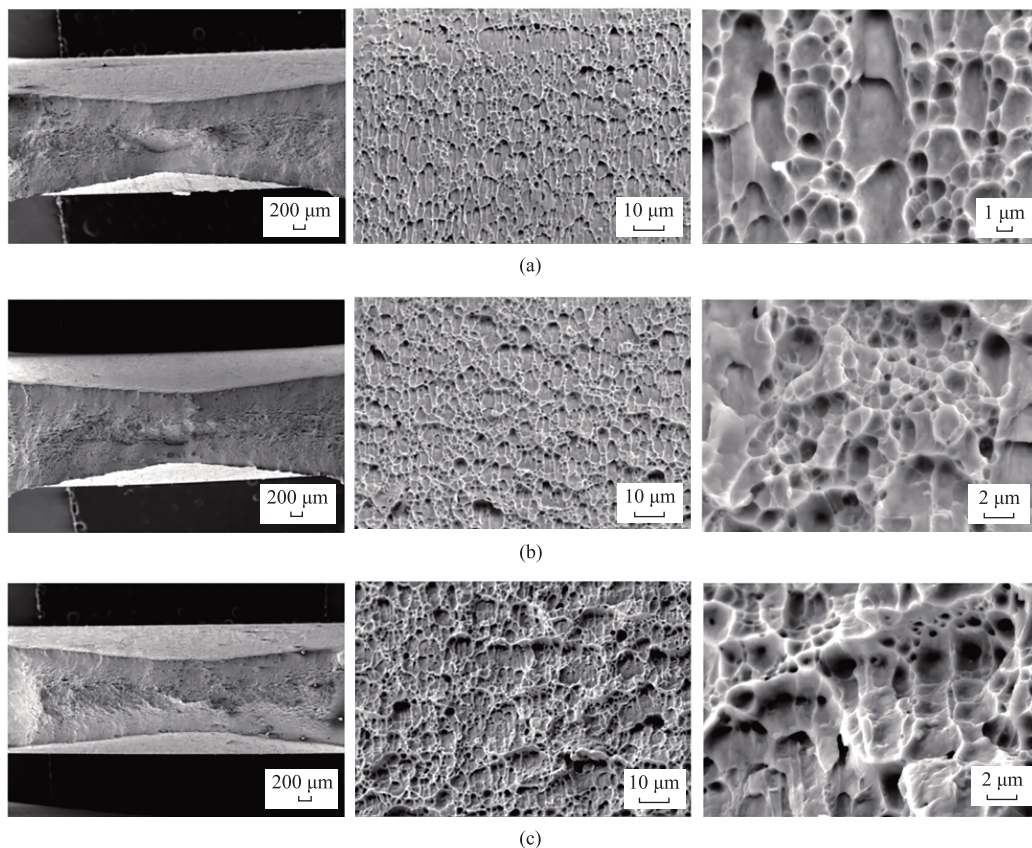


图 6 不同预拉伸应变变量下试验钢断口的 SEM 形貌图

(a) 0% (b) 20% (c) 40%

Fig. 6 SEM morphologies of fractures for test steel with different pre-tension strain amounts

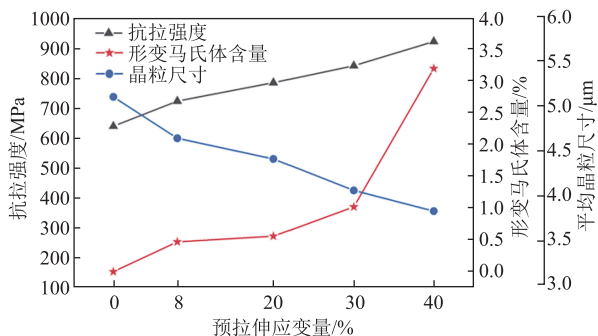


图 7 不同预拉伸应变变量试验钢抗拉强度、晶粒尺寸和形变马氏体含量的变化曲线

Fig. 7 Change curves of tensile strength, grain size and deformation martensite content for test steel with different pre-tensile strain amounts

强化、形变马氏体强化和位错强化的综合作用。当应变变量范围为 0%~20%、试验钢弹性变形时,晶格结构受到轻微的拉伸或压缩;进入塑性变形阶段时,晶体内部的位错开始移动,等轴状的奥氏体产生不同程度变形。当试验钢在变形过程中形成少量马氏体、剪切带和板条状变形孪晶时,孪晶强化机制得以实现。当试验钢应变变量范围为 0%~20%时,强度和塑性平衡的原因主要为孪晶强化^[18]。当应变变量范

围为 30%~40%时,随着变形的进行,一方面,位错在晶体内部不断增殖且相互交互,其累积和缠结会导致试验钢产生应变硬化,即试验钢强度随变形增加而提高;另一方面,试验钢变形过程中产生形变马氏体,其体积分数提升为 3.2%。位错强化和形变马氏体强化是应变变量范围为 30%~40%条件下性能提升的原因^[19-20]。由于 0%~20%应变变量范围内,试验钢强度的提升较为明显,塑性伸长率损失比例相较于 30%~40%应变变量范围内更小,为了提高试验钢的强度且减小塑性损失,所以,单次应变变量不宜超过 20%。

4 结论

(1) 随着预拉伸应变量的增加,奥氏体晶粒发生显著塑性变形并细化,晶粒长宽比增至 2.8:1,平均晶粒尺寸从 5.12 μm 减小至 3.85 μm ,同时形成变形孪晶和形变马氏体。形变马氏体含量随应变量的增加从 0.47% 提升至 3.2%,并优先在奥氏体晶界处形核。

(2) 随着预拉伸应变量增加, 试验钢的抗拉强度从 638.06 MPa 提升至 920.51 MPa, 屈服强度由 320.52 MPa 增加至 897.67 MPa。且应变量越大, 试验钢的加工硬化能力越强。

(3) 试验钢单次应变量宜控制在 20% 以内。在 0%~20% 应变量范围内, 孪晶强化主导的加工硬化机制使试验钢保持良好的强塑性平衡, 塑性伸长率损失较小。当应变量增至 30%~40% 时, 虽然抗拉强度提高, 但位错强化和形变马氏体强化的增强会导致塑性伸长率显著下降。

参考文献:

- [1] 徐鸣悦, 王丛, 李运刚, 等. 抗菌不锈钢的研究进展 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (6): 1085-1089.
Xu M Y, Wang C, Li Y G, et al. Research progress of antimicrobial stainless steel [J]. Foundry Technology, 2016, 37 (6): 1085-1089.
- [2] 叶丽芳, 陈惠波, 林照亮, 等. 不锈钢抗菌技术研究进展 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (20): 10-14.
Ye L F, Chen H B, Lin Z L, et al. Research progress in antimicrobial stainless steel [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (20): 10-14.
- [3] 杨柯, 任玲, 于亚川, 等. 医用含铜抗菌金属——从研究走上应用 [J]. 集成技术, 2021, 10 (3): 69-77.
Yang K, Ren L, Yu Y C, et al. Cu-bearing antimicrobial medical metals—from research to application [J]. Journal of Integrated Technology, 2021, 10 (3): 69-77.
- [4] 飞尚才. SUS304 奥氏体不锈钢冷轧及退火工艺对组织和性能的影响 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
Fei S C. Effect of Cold Rolling and Annealing Process on the Organization and Properties of SUS304 Austenitic Stainless Steel [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [5] 申勇峰, 李晓旭, 薛文颖, 等. 304 不锈钢拉伸变形过程中的马氏体相变 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 33 (8): 1125-1128.
Shen Y F, Li X X, Xue W Y, et al. Changes in martensitic fraction of 304SS in tensile deformation [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33 (8): 1125-1128.
- [6] 龚娜, 武会宾, 曹嘉明, 等. 冷变形对 304 奥氏体不锈钢组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (4): 62-66.
Gong N, Wu H B, Cao J M, et al. Effect of cold deformation on structure and properties of 304 austenitic stainless steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (4): 62-66.
- [7] 周翠兰, 刘红梅, 白晋钢, 等. 冷轧变形量对 304 不锈钢力学性能的影响 [J]. 钢铁, 2012, 47 (10): 70-75.
Zhou C L, Liu H M, Bai J G, et al. Effect of the cold-rolled reduction on the mechanical properties of 304 austenitic stainless steel sheets [J]. Steel, 2012, 47 (10): 70-75.
- [8] 吴海林, 阮志勇, 王碧, 等. 节镍型奥氏体不锈钢组织性能及控制机理研究 [J]. 轧钢, 2022, 39 (3): 17-22.
Wu H L, Ruan Z Y, W B, et al. Study on microstructure, mechanical properties and control mechanism of low-nickel austenitic stainless steel [J]. Steel Rolling, 2022, 39 (3): 17-22.
- [9] 师雨晴, 段国升, 宋令慧, 等. 循环加载频率对镁合金棘轮应变的影响 [J]. 航空学报, 2024, 45 (24): 273-286.
Shi Y Q, Duan G S, Song L H, et al. Study on the effect of cyclic loading frequency on the strain of magnesium alloy ratchet [J]. Journal of Aeronautics, 2024, 45 (24): 273-286.
- [10] 潘向南. S38C 车轴冲击损伤疲劳性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Pan X N. Research on Fatigue Performance of S38C Axle Impact Damage [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [11] 杨卓越, 王建, 陈嘉砚, 等. 304 奥氏体不锈钢热诱发马氏体相变研究 [J]. 材料热处理学报, 2008, 29 (1): 98-101.
Yang Z Y, Wang J, Chen J Y, et al. Thermal-induced martensite transformation in 304 austenitic stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29 (1): 98-101.
- [12] 杨建国, 陈双建, 黄楠, 等. 304 不锈钢形变诱导马氏体相变的影响因素分析 [J]. 焊接学报, 2012, 33 (12): 89-92, 117.
Yang J G, Chen S J, Huang N, et al. Factors affecting deformation induced martensitic transformation of SUS304 stainless steel [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2012, 33 (12): 89-92, 117.
- [13] 王磊, 刘梦雅, 刘杨, 等. 镍基高温合金表面冲击强化机制及应用研究进展 [J]. 金属学报, 2023, 59 (9): 1173-1189.
Wang L, Liu M Y, Liu Y, et al. Research progress on surface impact strengthening mechanisms and application of nickel-based superalloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59 (9): 1173-1189.
- [14] 秦小梅. Fe-Mn-Al-C 系 TWIP 钢的塑性变形机制及组织性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
Qin X M. Research on Plastic Deformation Mechanism and Organizational Properties of Fe-Mn-Al-C System TWIP Steel [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [15] 邹章雄, 项金钟, 许思勇, 等. Hall-Petch 关系的理论推导及其适用范围讨论 [J]. 物理测试, 2012, 30 (6): 13-17.
Zou Z X, Xiang J Z, Xu S Y. Theoretical derivation of the Hall-Petch relationship and discussion of its applicable range [J]. Physical Examination and Testing, 2012, 30 (6): 13-17.
- [16] 司广全, 李芳草, 田晓, 等. 晶粒拉长形态对 S30432 不锈钢管组织与性能的影响 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (8): 214-223.
Si G Q, Li F C, Tian X, et al. Effect of grain elongation morphology on microstructure and properties of S30432 stainless steel tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (8): 214-223.
- [17] Dong H, Li Z C, Somani M C, et al. The significance of phase reversion-induced nanograined/ultrafine-grained (NG/UFG) structure on the strain hardening behavior and deformation mechanism in copper-bearing antimicrobial austenitic stainless steel [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 119:

104489.

- [18] 郑步云, 陈鑫, 雷剑波, 等. 热处理对激光熔化沉积 18Ni300 马氏体时效钢微观组织和力学性能的影响 [J]. 表面技术, 2023, 52 (3): 388-398.
- Zheng B Y, Chen X, Lei J B, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 18Ni300 maraging steel prepared by laser melting deposition [J]. Surface Technology, 2023, 52 (3): 388-398.
- [19] 宋仁伯, 项建英, 侯东坡, 等. 316L 不锈钢热加工硬化行为及机制 [J]. 金属学报, 2010, 46 (1): 57-61.
- Song R B, Xiang J Y, Hou D P, et al. Behavior and mechanism of hot workhardening for 316L stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46 (1): 57-61.
- [20] 程旺军, 崔栋栋, 孙耀宁, 等. 奥氏体不锈钢超低温变形诱导强化机制的研究进展 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (12): 208-216.
- Cheng W J, Cui D D, Sun Y N, et al. Ultra-low temperature deformation-inducing strengthening mechanism of austenitic stainless steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (12): 208-216.

(上接第 103 页)

参考文献:

- [1] 王振. 汽车覆盖件模面智能化设计方法研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Wang Z. Research and Application on Intelligent Design Method for Die Face of Automobile Covering Panels [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [2] Schenk O, Hillmann M. Optimal design of metal forming die surfaces with evolution strategies [J]. Computers & structures, 2004, 82 (20-21): 1695-1705.
- [3] 兰质纯. 汽车覆盖件拉伸模具型面设计技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- Lan Z C. Research and Design of Technical Drawing Die Surface of Automobile Panel [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [4] 王远峰, 卫炜, 孙建华, 等. 模具型面设计中曲面快速延拓技术研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43 (4): 25-31.
- Wang Y F, Wei W, Sun J H, et al. Research on the surface rapid extension technology in mold surface design [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43 (4): 25-31.
- [5] 王玉国, 卫原平, 沈启埃, 等. 覆盖件拉深模工艺补充部分和压料面设计 [J]. 上海交通大学学报, 1999, 33 (2): 184-187.
- Wang Y G, Wei Y P, Shen Q A, et al. Addendum and binder surface design for automotive panel drawing die [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33 (2): 184-187.
- [6] 王义林, 胡贤罡, 张启丰. 基于模板的汽车覆盖件拉伸模具结构参数化设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2009, 44 (5): 98-101.
- Wang Y L, Hu X G, Zhang Q F. Parameterized design of the drawing dies structure for automobile panel on the basis of the template [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2009, 44 (5): 98-101.
- [7] 段彦宾, 王冀军. 汽车覆盖件压料面设计与分析 [J]. 模具制造, 2018, 18 (12): 29-32.
- Duan Y B, Wang J J. Research on the design and analysis for the binder surface in automobile panel [J]. Die & Mould Manufacturing, 2018, 18 (12): 29-32.
- [8] 张峻. 汽车覆盖件成形过程数值模拟与优化技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- Zhang J. Study on Numerical Simulation and Optimization Techniques for Auto Panel Forming Processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [9] 曹婷, 施沃兹·约瑟夫. 直纹的曲面之美——光滑复合双曲面结构的原理与设计运用 [J]. 建筑学报, 2021 (11): 104-109.
- Cao T, Schwartz J. The beauty of hyperbolic paraboloids theories and applications of smooth poly-hypar surface structure [J]. Architectural Journal, 2021 (11): 104-109.
- [10] 鄂大辛, 水野高爾. 非回转对称拉深成形中压料面上摩擦的研究 [J]. 机械工程学报, 2004 (7): 191-194.
- E D X, Mizuno G. Study on friction of blankholder face in a non-rotationalsymmetry drawing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004 (7): 191-194.
- [11] 闫飞昊, 崔令江, 刘大海. 下凹曲面压料面对拉深件材料流动变形影响的有限元分析 [J]. 锻压装备与制造技术, 2008, 43 (6): 69-71.
- Yan F H, Cui L J, Liu D H. FEM analysis of material flowing deformation in stamping process with concave blank-hold surface [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2008, 43 (6): 69-71.
- [12] Arora S, Singh S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization [J]. Soft Computing, 2019, 23 (3): 715-734.
- [13] Arora S, Singh S. An improved butterfly optimization algorithm with chaos [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 32 (1): 1079-1088.
- [14] 张达敏, 徐航, 王依柔, 等. 嵌入 Circle 映射和逐维小孔成像反向学习的鲸鱼优化算法 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (5): 1173-1180.
- Zhang D M, Xu H, Wang Y R, et al. Whale optimization algorithm for embedded Circle mapping and onedimensional oppositional learning based small hole imaging [J]. Control and Decision, 2021, 36 (5): 1173-1180.
- [15] Zhao X D, Fang Y M, Ma S D, et al. Multi-swarm improved moth-flame optimization algorithm with chaotic grouping and Gaussian mutation for solving engineering optimization problems [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 204: 117562.