

• 试验研究 Experimental Research •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5086

组织不均匀性和几何必需位错对 18Ni 马氏体钢包辛格效应的影响

赵金泽, 钟 宏, 朱嘉锡, 李 博, 李双明
(西北工业大学 凝固技术全国重点实验室 陕西 西安 710072)

摘 要: 马氏体时效钢因其优异的强韧性平衡, 在航空航天和汽车工业等领域中不可或缺。然而, 在服役过程中, 循环加载诱发的包辛格效应会显著改变材料的屈服强度, 进而导致尺寸精度丧失甚至早期疲劳失效, 严重影响服役过程的可靠性。当前研究对微观组织不均匀性如何调控包辛格效应仍缺乏系统认知。通过分析 18Ni(300) 钢在固溶处理(ST) 及固溶+时效处理(STA) 条件下的循环变形行为, 结合电子背散射衍射(EBSD) 与透射电镜(TEM) 表征, 揭示马氏体束尺寸分布不均与几何必需位错(GND) 局部富集的协同作用是加剧包辛格效应的关键机制。研究表明, 通过合理热处理制度均匀化材料组织和 GND 密度是减小包辛格效应的有效途径。

关键词: 18Ni 马氏体钢; 包辛格效应; 几何必需位错; 组织不均匀性

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)10-0995-08

Impact of Microstructural Inhomogeneity and Geometrically Necessary Dislocations on the Bauschinger Effect in 18Ni Maraging Steel

ZHAO Jinze, ZHONG Hong, ZHU Jiayi, LI Bo, LI Shuangming

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Maraging steel is indispensable in aerospace, automotive, and other fields because of its excellent balance of strength and toughness. However, the Bauschinger effect, which is commonly induced by cyclic loading during service, can significantly alter a material's yield strength. This leads to a loss of dimensional accuracy and even premature fatigue failure, thereby compromising service reliability. Current research still lacks a systematic understanding of how microstructural heterogeneity regulates the Bauschinger effect. By analysing the cyclic deformation behavior of 18Ni(300) steel under solution-treated (ST) and solution-treated plus aged (STA) conditions, combined with characterization via electron backscatter diffraction (EBSD) and transmission electron microscopy (TEM), this study reveals that the synergistic effect of nonuniform martensite block size distribution and localized enrichment of geometrically necessary dislocations (GND) is the key mechanism exacerbating the Bauschinger effect. Research has demonstrated that homogenizing a material's microstructure and GND density through appropriate heat treatment protocols is an effective approach to mitigate the Bauschinger effect.

Key words: 18Ni maraging steel; Bauschinger effect; geometrically necessary dislocations (GND); microstructural heterogeneity

包辛格效应(Bauschinger effect)是指材料在塑性预变形后, 受到反向载荷时屈服强度降低的现象^[1-2]。该效应对金属材料在循环载荷、塑性变形和反向

应力条件下的使用可靠性有着重要影响, 直接影响金属材料在循环载荷下的尺寸稳定性与疲劳寿命^[3], 是决定材料能否正常服役的重要因素。

收稿日期: 2025-05-20

基金项目: 凝固技术全国重点实验室(西北工业大学)自主研究课题(2024-TS-05)

作者简介: 赵金泽, 1997 年生, 硕士生。研究方向为高强钢的组织控制与性能优化。Email: zhao.jinze@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 钟 宏, 1983 年生, 博士, 副教授。研究方向为先进结构材料与取向生长。Email: zhonghong123@nwpu.edu.cn

引用格式: 赵金泽, 钟宏, 朱嘉锡, 李博, 李双明. 组织不均匀性和几何必需位错对 18Ni 马氏体钢包辛格效应的影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(10): 995-1002.

ZHAO J Z, ZHONG H, ZHU J X, LI B, LI S M. Impact of microstructural inhomogeneity and geometrically necessary dislocations on the bauschinger effect in 18Ni maraging steel[J]. Foundry Technology, 2025, 46(10): 995-1002.

包辛格效应作为高强度钢中的普遍现象,其显著程度与材料的晶体结构、显微组织^[4]及加工工艺参数^[5]等因素密切相关。马氏体钢因高位错密度、板条结构与析出相的复杂交互作用,其包辛格效应机制尤为特殊;淬火态马氏体初始位错密度高,正向加载时位错增殖并在晶界或相界处堆积,形成背应力^[6-7];高密度位错网络^[8-10]通过应变场之间的协同作用显著增强包辛格效应;几何必须位错(geometrically necessary dislocations, GND)^[11-12]通过位错结构演化与背应力机制调控塑性变形行为;析出相尺寸与分布影响位错运动模式^[13-16],进而影响反向屈服行为。值得注意的是,上述因素均与显微组织的空间不均匀性密切相关。例如,Morsdorf等^[17]发现Fe-0.13C-5Ni合金淬火自回火导致的马氏体板条粗化(组织不均匀性)会显著降低屈服强度。

工艺调控(固溶+时效/回火)通过重构微观组织关系,成为调控包辛格效应的关键策略。郭昊东等^[18]在10CrNi8MoV钢中通过400~600℃热处理促使GND重组与背应力松弛,成功降低包辛格效应。Gan等^[19]证实Al-Ge-Si合金中尺寸>50 nm析出相可减少位错塞积,削弱背应力,从而降低包辛格效应。

18Ni(300)马氏体时效钢作为航空航天关键结构材料^[20-21],虽具备优异强韧性,却面临严峻挑战:加工中多层次相变易诱发马氏体板条团/块尺寸梯度、GND富集区、析出相偏聚等不均匀组织^[22];上述不均匀性通过位错动力学失衡、局部应力集中及变形协调失效,可显著放大循环载荷下的包辛格效应^[23]。目前对18Ni钢中组织不均匀性如何调控包辛格效应的内在机制尚未深入揭示。

本研究通过表征18Ni(300)钢马氏体片层团特征尺度及分布、GND在界面处的富集特征和析出相的空间分布特征,结合单向/循环变形行为分析,揭示组织不均匀性与GND分布的协调作用对包辛格效应的影响规律,为高可靠性马氏体钢设计提供理

论支撑。

1 实验材料与方法

研究使用固溶态18Ni(300)马氏体钢轧制棒料为原料,其化学成分如表1所示。

表1 18Ni(300)马氏体时效钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 18Ni(300) martensite aging steel

(mass fraction/%)							
Element	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Mn	Fe
Content	18.34	9.12	4.78	0.65	0.14	0.04	Bal.

从实验用钢切取长度为100 mm的试样作为热处理试样,热处理实验在KSL-1200X型马弗炉中进行。通过一步固溶处理以及两步“固溶+时效”处理获得不同尺寸的马氏体束和片层团组织,典型的18Ni(300)马氏体钢热处理制度为:固溶温度820℃,时效温度480℃,保温3~6 h^[21,24],为获得不同尺寸的马氏体组织,采用800、850和900℃保温1 h,随后空冷(AC)的固溶制度,记为800℃ 1 h/AC, 900℃ 1 h/AC和1 000℃ 1 h/AC;为保证析出相一致,时效工艺统一采用480℃保温3 h随后空冷,记为480℃ 3 h/AC。

合金经固溶及时效处理后,依据GB/T 7314-2017《金属材料室温压缩试验方法》和GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》制备压缩和拉伸试样,使用Instron-3382电子万能材料试验机开展室温单向压缩和拉伸试验,位移速率分别为0.48和0.9 mm/min。室温拉伸-压缩循环加载试验在INSTRON 8802疲劳试验机上进行,试样尺寸见图1,采用应变控制模式(恒定应变速率 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$),循环加载应变量设置为1.25%和1.5%。每组实验重复3次,数据以均值±标准差呈现。

试样经线切割、机械研磨及抛光处理后,采用TESCAN-AMBER聚焦离子电子双束电镜观察微观组织形貌。为进一步表征马氏体的精细组织结构,对

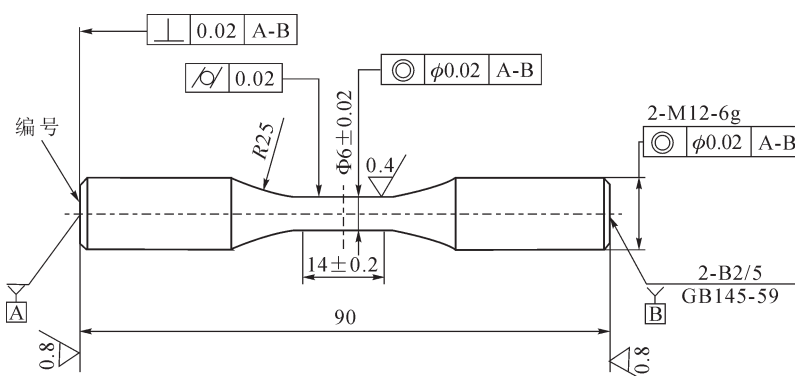


图1 循环加载试样尺寸

Fig.1 Size of the cyclic loading sample

试样进行电子背散射衍射(EBSD)分析,机械抛光后使用 10%高氯酸-乙醇溶液(体积分数)在 20 V 电压下电解抛光 60 s,以消除形变层。在 Oxford Aztec HKL 系统中采集菊池衍射花样(测试条件:加速电压 20 kV,扫描步长 0.5 μm),并通过 Aztec Crystal 软件获得马氏体束尺寸分布、晶体学取向信息以及 GND 分布图。马氏体束尺寸通过截距法进行统计。

利用 Talos F200X 场发射高分辨透射电子显微镜观察析出相的分布,通过衍射花样确定析出相组成,并采用 Velox 软件分析析出相的化学成分。

2 实验结果与讨论

2.1 马氏体组织对单向拉伸力学性能的影响

马氏体的组织结构特征是决定马氏体钢力学性能的重要因素。18Ni 马氏体钢的基体为板条马氏体,显示出典型的多层次组织特征,包括原奥晶粒(prior austenite grain)、具有特定晶体学取向的马氏体领域(packet)、马氏体束(block)和马氏体板条(martensite lath)如图 2 所示^[25]。

图 3 为不同热处理制度下合金马氏体组织的 EBSD 图,图 4 呈现了马氏体束平均宽度的统计结果及不同热处理制度下合金的单向拉伸屈服强度值。由图可知,随着固溶处理温度的增加,马氏体束的宽

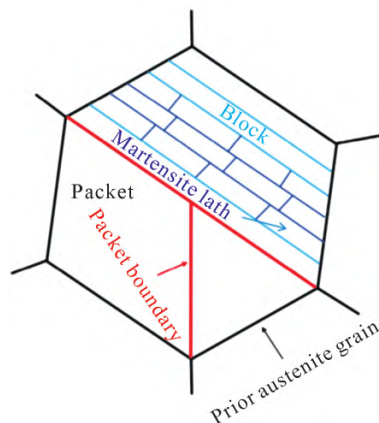


图 2 板条马氏体分级结构示意图^[25]

Fig.2 Schematic diagram of the hierarchical structure of martensite^[25]

度略有增加(6.2 μm →8.3 μm →9.5 μm),时效处理对马氏体束的尺寸几乎无显著影响。经进一步固溶处理后,800 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC 样品的屈服强度(797 MPa)相较于 850 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC(722 MPa)和 900 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC(717 MPa)有小幅度的提升,这归因于 800 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC 试样的马氏体束尺寸最小,产生了细晶强化作用。

马氏体时效钢的强化机制主要包括固溶强化、细晶强化和第二相强化。经 480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC 时效处理后,马氏体束宽度基本不变(宽度变化不超过 1.5 μm),但合金屈服强度显著提高,达 1 903~1 954 MPa。图 5

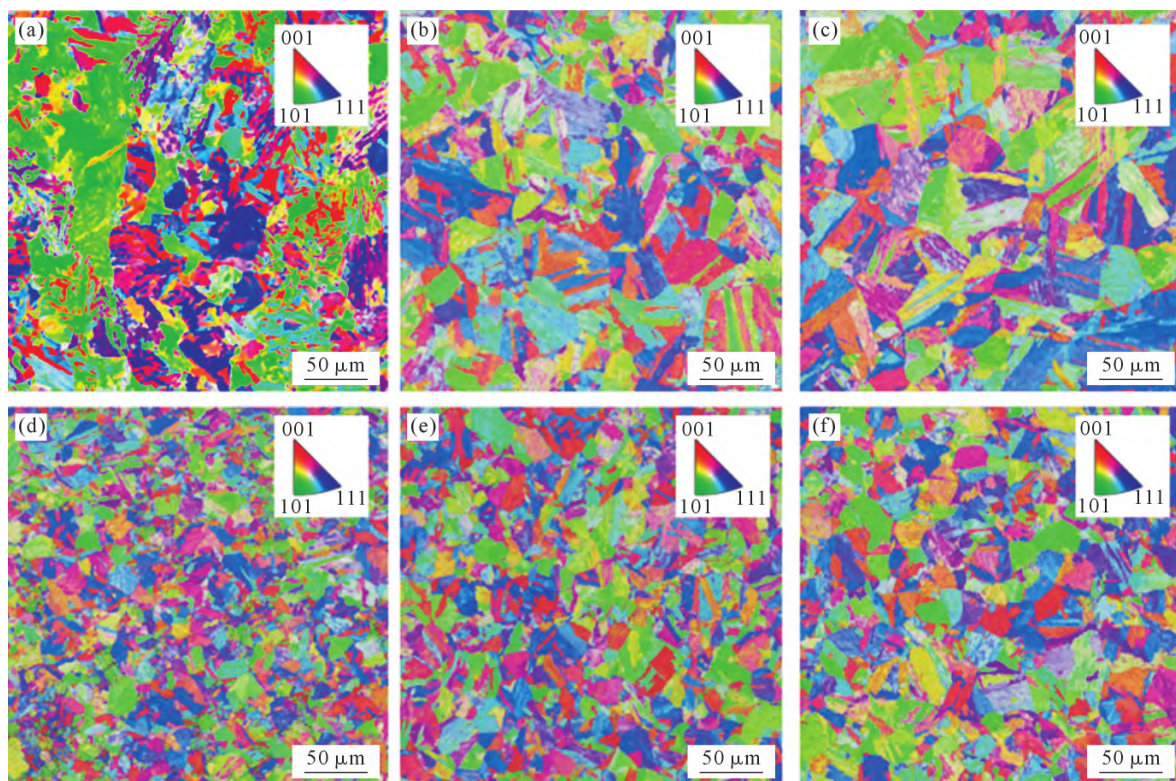


图 3 18Ni(300)钢固溶试样与固溶+时效试样 EBSD 组织图:(a) 800 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC; (b) 850 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC; (c) 900 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC; (d) 800 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC+480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC; (e) 850 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC+480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC; (f) 900 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC+480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC

Fig.3 EBSD maps of the ST and STA samples of 18Ni(300) maraging steel: (a) 800 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC; (b) 850 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC; (c) 900 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC; (d) 800 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC+480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC; (e) 850 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC+480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC; (f) 900 $^{\circ}\text{C}$ 1 h/AC+480 $^{\circ}\text{C}$ 3 h/AC

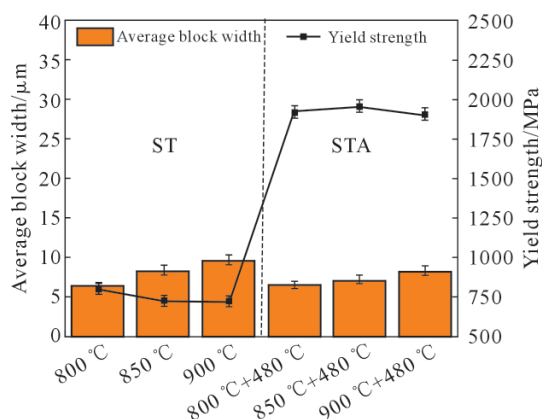


图4 18Ni(300)钢不同热处理制度试样的马氏体束宽度与拉伸屈服强度

Fig.4 Average block width and yield strength of heat-treated 18Ni(300) alloys

为对 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 样品进行 TEM 表征的结果,经时效处理后合金中出现了 Ni_3Mo 相,主要分布于马氏体束及马氏体板条边界处。由于析出相对马氏体板条界的钉扎作用,导致位错的运动变得困难,因此,材料的屈服强度相较固溶样品有了显著提升,提升的屈服强度值超过 1 000 MPa, 18Ni(300)钢的主要强化方式为第二相强化。

2.2 循环加载中的包辛格效应

包辛格效应的表征参数主要包括^[26-27]:包辛

格系数 B , 包辛格应力系数 BSP(Bauschinger stress parameter), 包辛格能量系数 BEP(Bauschinger energy parameter), 其中,应力参数 BSP 与试样变形过程中的流变应力相关,能够有效反映出包辛格效应产生的程度,是评价包辛格效应的重要参数指标,包辛格应力系数 BSP 值越大,代表材料包辛格效应越明显,本文选用包辛格应力系数 BSP 作为反应材料包辛格效应程度的指标,其表达式为:

$$\text{BSP} = \frac{\sigma_{r,i} + \sigma_{s,i}}{\sigma_{r,i}} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{r,i}$ 表示第 i 次循环中加载转变点强度值, $\sigma_{s,i}$ 表示第 i 次循环中屈服强度值。

图 6 为循环加载曲线的示意图^[27],对材料进行拉伸-压缩循环加载试验时,将试样拉伸至应力超过 $\sigma_{s,0}$ (屈服应力)使其产生塑性变形。继续加载至所设应变值后卸载,此时应力为 $\sigma_{r,1}$,然后反向加载,直至材料再次出现屈服,此时屈服应力记为 $\sigma_{s,1}$ 。

对 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC、850 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC、900 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 3 个热处理制度的样品进行 1.25% 预应变量的压缩-拉伸循环加载(5 个循环),得到其力学性能参数及包辛格应力系数 BSP 如表 2 所示。第 1 次循环的拉压转变点应力值与包辛格应力系数为 5 个循环中的最大值,

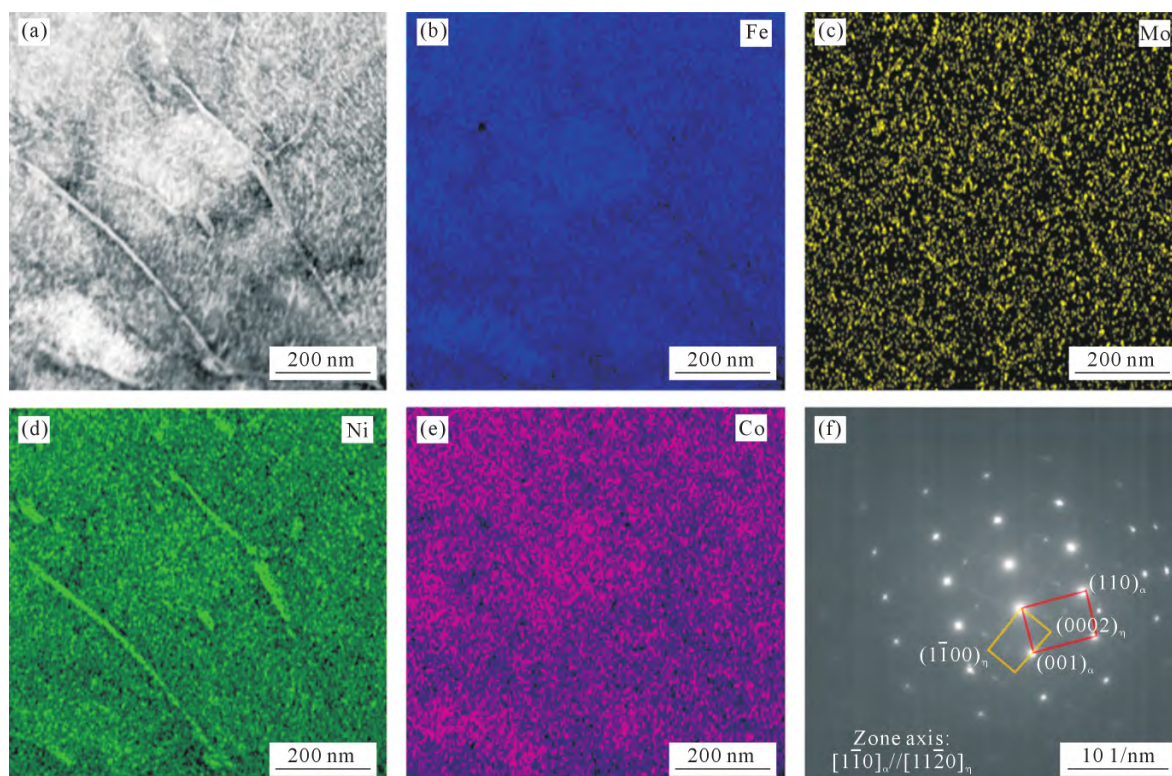


图5 18Ni(300)钢 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 试样 TEM 图像与成分分布特征:(a) 明场像;(b~e) Fe、Mo、Ni、Co 元素 EDS 面扫图;(f) 选区电子衍射花样

Fig.5 TEM images and elemental distributions of the 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC sample: (a) bright-field image; (b~e) EDS maps of Fe, Mo, Ni, Co; (f) SAED patterns

表 2 固溶+时效试样拉压转变点应力与包辛格应力系数 BSP 值
Tab.2 BSP values for quenched and tempered samples at the reversal point

Loading method	Prestrain	Cycle	800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC		850 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC		900 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC	
			Reversal point/MPa	BSP	Reversal point/MPa	BSP	Reversal point/MPa	BSP
Compression-Stretching	1.25 pct	1	2 093.52	0.615	2 030.27	0.563	2 122.24	0.326
		2	2 011.46	0.610	1 977.92	0.518	2 061.40	0.288
		3	1 982.60	0.604	1 958.72	0.454	2 030.27	0.257
		4	1 961.96	0.587	1 943.97	0.445	2 010.46	0.250
		5	1 945.93	0.571	1 935.48	0.438	1 932.93	0.252

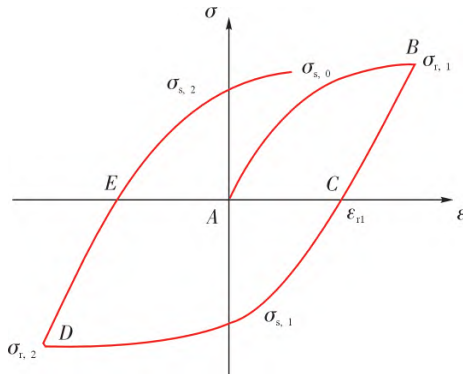


图 6 材料的循环加载曲线^[27]

Fig.6 Cyclic loading curves of the materials^[27]

随着加载次数的增加,拉压转变点应力值与包辛格应力系数呈下降趋势,发现第一次拉-压循环 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 样品 BSP 值(0.615)在 3 个样品中最高,高出 900 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 样品 BSP 值(0.326)约 88.6%。

图 7 为马氏体组织 EBSD 分析图,其中图 7a 中存在马氏体束不均匀的部分区域,如图中虚线框标记区域所示,该区域内马氏体束尺寸显著小于图 7a 中其他区域,这种组织不均匀性在 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 样品中表现更明显是由于固溶温度较低,奥氏体化的不完全,导致空冷完成后马氏体束界处仍有细晶存在^[28]。此类组织不均匀性使得细晶处出现应力场,正向加载时,该应力场阻碍位错

运动,进而形成与加载方向相反的反应力。当载荷卸载并转为反向加载时,这些背应力会与反向加载方向一致,促进位错运动,导致材料在反向屈服时表现出强度降低的现象。该微观机制的宏观表现为 BSP 的显著增大。

2.3 GND 分布对包辛格效应的影响

对 800 °C 1 h/AC、850 °C 1 h/AC 和 900 °C 1 h/AC 3 个热处理制度的试样进行 1%预应变量的拉伸-压缩循环加载(5 个循环),测得其力学性能参量及包辛格应力系数 BSP 如表 3 所示。结果显示,第 1 次循环的拉压转变点应力值与包辛格应力系数为 5 个循环中的最低值,第 2 次循环开始,拉压转变点应力值与包辛格应力系数均显著提升。可以看到,第 1 次拉-压循环 800 °C 1 h/AC 样品的 BSP 值(0.132)显著高于 850 °C 1 h/AC 与 900 °C 1 h/AC 试样,分别高出 88.5%、67.1%。结合图 8 样品的显微组织与 GND 分布图可知,800 °C 1 h/AC 样品的 GND 分布出现明显不均匀性,根据图 8 中 GND 分布结果,通过 Aztec crystal 软件计算获得了 3 个样品的 GND 密度分布图如图 9 所示,由图 9 可见,3 个试样 GND 密度平均值在 $5.0 \times 10^{14} \sim 5.5 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 范围内波动,差异较小;但 800 °C 1 h/AC 试样中高密度 GND (密度 $> 7.5 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$) 占比总计约占 14%,显著高于 850 °C 1 h/AC 的 7%与 900 °C 1 h/AC 样品的 5%,

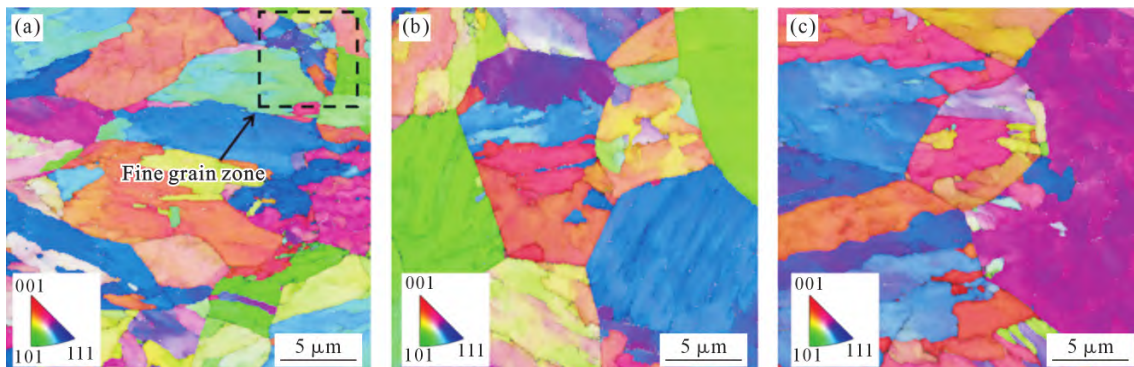


图 7 18Ni(300)钢马氏体组织的 EBSD 分析:(a) 800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC; (b) 850 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC; (c) 900 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC

Fig.7 EBSD analysis of the martensite structure of 18Ni(300) alloy: (a) 800 °C h/AC+480 °C 3 h/AC; (b) 850 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC; (c) 900 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC

表3 固溶试样拉压转变点强度与包辛格应力系数BSP值
Tab.3 BSP values for quenching samples at the reversal point

Prestrain	Cycle	800 °C 1 h/AC		850 °C 1 h/AC		900 °C 1 h/AC	
		Reversal point/MPa	BSP	Reversal point/MPa	BSP	Reversal point/MPa	BSP
1 pct	1	904.56	0.132	896.15	0.070	902.16	0.079
	2	968.30	0.277	973.12	0.225	969.51	0.262
	3	951.47	0.313	956.28	0.258	958.68	0.271
	4	939.44	0.301	943.05	0.252	941.85	0.288
	5	929.82	0.297	931.02	0.273	934.63	0.285

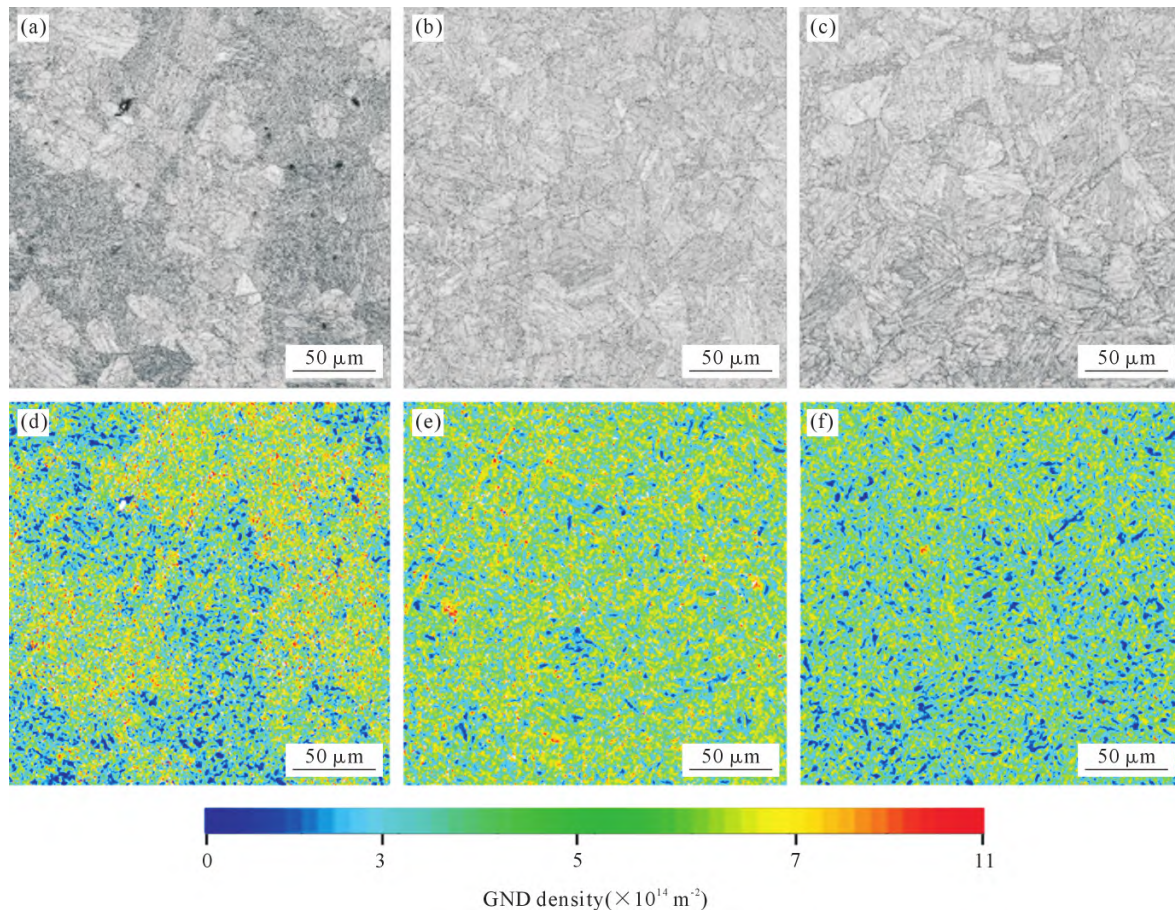


图8 固溶试样显微组织与 GND 分布:(a, d) 800 °C 1 h/AC; (b, e) 850 °C 1 h/AC; (c, f) 900 °C 1 h/AC
Fig.8 Microstructure of solid solution samples and distribution of GND: (a, d) 800 °C 1 h/AC; (b, e) 850 °C 1 h/AC; (c, f) 900 °C 1 h/AC

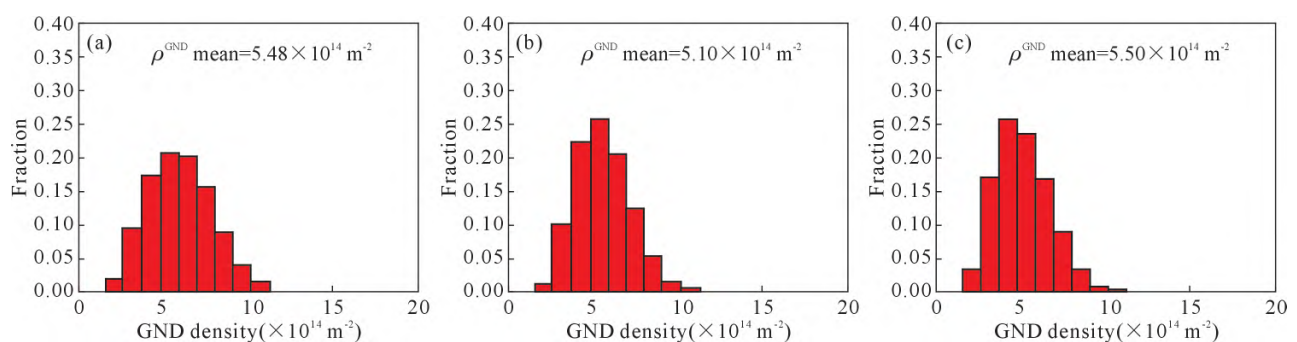


图9 固溶试样 GND 密度分布图与样品 GND 密度平均值:(a) 800 °C 1 h/AC; (b)850 °C 1 h/AC; (c) 900 °C 1 h/AC
Fig.9 Histogram of the GND density distribution calculated from the results in Fig. 8 with the mean GND density labelled in each histogram: (a) 800 °C 1 h/AC; (b) 850 °C 1 h/AC; (c) 900 °C 1 h/AC

800 °C 1 h/AC 样品出现了明显的几何必需位错的聚集。在正向加载过程中,聚集的 GND 会产生长程内应力场,阻碍位错运动,进而形成与加载方向相反的反向应力^[29]。当卸载并转为反向加载时,这些反向应力会与反向加载方向一致,促进位错运动,导致材料在反向屈服时表现出强度降低的现象。该微观机制的宏观表现为 BSP 值显著增大。

综上,马氏体束组织的不均匀与 GND 分布的不均匀在循环加载过程中加剧了包辛格效应。因此,在热处理过程中,应合理控制固溶处理和时效处理的温度和时间,调控显微组织均匀性并促进 GND 的均匀分布,从而有效降低包辛格效应,进一步提升材料在循环加载下的力学性能。

3 结论

(1)固溶处理(800 °C 1 h/AC、850 °C 1 h/AC 与 900 °C 1 h/AC)试样中,马氏体束宽度随固溶温度升高略有增加(6.2 μm→8.3 μm→9.5 μm),合金屈服强度略有下降(797 MPa→722 MPa→717 MPa)。

(2)固溶试样经过时效(480 °C 3 h/AC)处理后,马氏体束宽度变化不明显,马氏体板条边界出现大量 Ni₃Mo 析出相,时效处理(480 °C 3 h/AC)后的合金的屈服强度相比未经过时效处理的合金的屈服强度提升超过 1 000 MPa。

(3)800 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 试样中,由于固溶温度较低造成马氏体束组织尺寸不均匀,包辛格效应增大,相比 900 °C 1 h/AC+480 °C 3 h/AC 试样,第一次拉-压循环包辛格应力系数增加 88.6%。

(4)800 °C 1 h/AC 样品中,GND 分布不均匀,造成包辛格效应显著增大,相比850 °C 1 h/AC 与 900 °C 1 h/AC 试样,第一次拉-压循环包辛格应力系数分别增加 88.5%、67.1%。

参考文献:

- [1] TORIBIO J, KHARIN V, AYASO F J, LORENZO M, GONZÁLEZ B, MATOS J C, AGUADO L. Analysis of the Bauschinger effect in cold drawn pearlitic steels[J]. *Metals*, 2020, 10(1): 114.
- [2] ADIGAMOV R R, ANDREEV V A, ROGACHEV S O, FEDOTOV E S. Bauschinger effect in alternating deformation[J]. *Steel in Translation*, 2022, 52(7): 639-647.
- [3] LI F, ZHAO X D, ZHANG H Y, HE W W, CHEN H Q, GUO H G. Bauschinger effect of Mn18Cr18N austenitic stainless steel [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2020, 35(2): 399-406.
- [4] HAN S Y, SOHN S S, SHIN S Y, BAE J H, KIM H S, LEE S. Effects of microstructure and yield ratio on strain hardening and Bauschinger effect in two API X80 linepipe steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 551: 192-199.
- [5] SONG L H, WU B L, ZHANG L, DU X H, WANG Y N, ESLING C, PHILIPPE M J. Detwinning-related Bauschinger effect of an extruded magnesium alloy AZ31B [J]. *Materials Characterization*, 2019, 148: 63-70.
- [6] HE W L, MENG B, YE H L, WAN M. Influence of pre-strain and size effect on Bauschinger effect of superalloy ultrathin sheet during microscale cyclic deformation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 922: 174615.
- [7] GAO S, YOSHINO K, TERADA D, KANEKO Y, TSUJI N. Significant Bauschinger effect and back stress strengthening in an ultrafine grained pure aluminum fabricated by severe plastic deformation process[J]. *Scripta Materialia*, 2022, 211: 114503.
- [8] GURUPRASAD P J, CARTER W J, BENZERGA A A. A discrete dislocation analysis of the Bauschinger effect in microcrystals[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(19): 5477-5491.
- [9] CHEN W F, KITAMURA T, WANG X G, FENG M L. Size effect on cyclic torsion of micro-polycrystalline copper considering geometrically necessary dislocation and strain gradient[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 117: 292-298.
- [10] ZHU L Y, ZHANG X Q, JIAN W R, XIE Z C, YAO X H. Plastic deformation mechanism and defect patterning under nanoindentation in medium entropy alloy CoCrNi [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 968: 171734.
- [11] TOTH L S, GU C F, BEAUSIR B, FUNDENBERGER J J, HOFFMAN M. Geometrically necessary dislocations favor the Taylor uniform deformation mode in ultra-fine-grained polycrystals [J]. *Acta Materialia*, 2016, 117: 35-42.
- [12] CHEN J C, LI N, XIA P, QIN H L, ZHAO F, LIU Q C. Effect of deformation heterogeneity on development of geometrically necessary dislocation density in heterogeneous-structured CrMnFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Materials Letters*, 2024, 358: 135834.
- [13] KOSTRYZHEV A G, STRANGWOOD M, DAVIS C L. Bauschinger effect in Nb and V alloyed line-pipe steels[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2013, 36(3): 186-192.
- [14] TANG Y C, KANG Y L, YUE L J, JIAO X L. Mechanical properties optimization of a Cu-Be-Co-Ni alloy by precipitation design [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 613-625.
- [15] FRIBOURG G, BRÉCHET Y, DESCHAMPS A, SIMAR A. Microstructure-based modelling of isotropic and kinematic strain hardening in a precipitation-hardened aluminium alloy[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(9): 3621-3635.
- [16] DESCHAMPS A, DECREUS B, DE GEUSER F, DORIN T, WEYLAND M. The influence of precipitation on plastic deformation of Al-Cu-Li alloys[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(11): 4010-4021.
- [17] MORSDORF L, JEANNIN O, BARBIER D, MITSUHASHI M, RAABE D, TASAN C C. Multiple mechanisms of lath martensite plasticity[J]. *Acta Materialia*, 2016, 121: 202-214.
- [18] 郭昊东,杨超飞,孙磊,张玉祥,黄冬,全智远. 10CrNi8MoV 钢的包申格效应及恢复热处理[J]. *金属热处理*, 2024, 49(8): 119-123.
- [19] GUO H D, YANG C F, SUN L, ZHANG Y X, HUANG D, TONG Z Y. Bauschinger effect and recovery heat treatment of 10CrNi8MoV steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(8): 119-123.
- [19] GAN W, BONG H J, LIM H, BOGER R K, BARLAT F, WAG-

- ONER R H. Mechanism of the Bauschinger effect in Al-Ge-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 353-372.
- [20] HAN S, LI X Y, LIU Y, GEN R M, LEI S M, LI Y, WANG C X. Effect of aging treatment on the microstructure and properties of 2.2 GPa tungsten-containing maraging steel[J]. Materials, 2023, 16 (14): 4918.
- [21] 方明敏. 18Ni(350)马氏体时效钢力学性能及强韧化机制的研究[D]. 扬州:扬州大学,2014.
- FANG M. Research on mechanical properties and strengthening-toughening mechanisms of 18Ni(350) maraging steel[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [22] MEI X Y, YAN Y, FU H D, GAO X D, HUANG S Y, QIAO L J. Effect of aging temperature on microstructure evolution and strengthening behavior of L-PBF 18Ni(300) maraging steel[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103071.
- [23] ZHU X H, YANG X S, HUANG W J, LIU M F, WANG X, LI M D. Modeling Bauschinger effect through the reversibility of dislocation slip in an Al-Cu-Li alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 902: 146574.
- [24] 王瑞安,高义民,王怡然,施庆峰,高尚君,李明刚. 钴含量对马氏体时效钢时效组织的影响研究[J]. 铸造技术,2023, 44(12): 1094-1099.
- WANG R A, GAO Y M, WANG Y R, SHI Q F, GAO S J, LI M G. Study on the effect of cobalt content on aging microstructure of maraging steel[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1094-1099.
- [25] 徐祖耀. 条状马氏体形态对钢力学性质的影响[J]. 热处理,2009, 24(3): 1-6.
- XU Z Y. Effect of lath martensite morphology on mechanical properties of steel[J]. Heat Treatment, 2009, 24(3): 1-6.
- [26] CHABOCHE J L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(10): 1642-1693.
- [27] 李鹏. 冲压用高强钢板循环加载力学性能的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
- LI P. Study on the mechanical properties of high-strength steel sheets for stamping under cyclic loading[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [28] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, SAININ, THAKRE J G, KUMAR P. Grain refinement of P91 steel using double austenitization treatment[J]. Materials Performance and Characterization, 2018, 7(1): 445-455.
- [29] HU X Z, JIN S B, ZHOU H, YIN Z, YANG J, GONG Y L, ZHU Y T, SHA G, ZHU X K. Bauschinger effect and back stress in gradient Cu-Ge alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(9): 3943-3950.

(责任编辑:宫文婧)