DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5014

疲劳损伤奥氏体304不锈钢组织与性能的关联性

张孟浩[1,2,3,4],支辉辉[1,2,3,4],王维俊[5,6],罗　皎[1],王海丰[1,2]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072;2. 西北工业大学 先进润滑与密封材料研究中心,陕西 西安 710072;3. 西北工业大学重庆科创中心,重庆 401135;4. 西北工业大学深圳研究院,深圳 518063;5. 中国科学院合肥物质科学研究院,安徽 合肥 230031;6. 合肥综合性国家科学中心能源研究院,安徽 合肥 230031)

摘　要:亚稳态奥氏体304不锈钢在核电领域应用广泛,但易发生疲劳损伤而影响服役寿命,因此通过无损检测手段评估其服役过程中的疲劳损伤至关重要。本文采用X射线衍射、电子背散射衍射、硬度和磁性能测试手段,系统研究了304不锈钢在不同疲劳循环次数下的微观组织与维氏硬度和饱和磁化强度之间的关联性。结果表明,随着疲劳循环次数增加,304不锈钢由奥氏体相转变为马氏体相,且马氏体相含量不断增加;而位错密度在疲劳循环0~1周内增加后基本不变。在疲劳循环0~1周内,304不锈钢的维氏硬度由马氏体含量和位错共同决定;而在后续疲劳循环中,维氏硬度增量仅与马氏体含量增加有关,此时二者呈线性关系。304不锈钢的饱和磁化强度与钢中马氏体含量相关,且二者之间也存在线性关系。

关键词:304不锈钢;疲劳损伤;马氏体相变;维氏硬度;饱和磁化强度

中图分类号:TG142.71; TG113.25+5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)05-0458-06

Correlation between the Microstructure and Properties of Fatigue-damaged Austenitic 304 Stainless Steel

ZHANG Menghao[1,2,3,4], ZHI Huihui[1,2,3,4], WANG Weijun[5,6], LUO Jiao[1], WANG Haifeng[1,2]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Center of Advanced Lubrication and Seal Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China; 4. Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518063, China; 5. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 6. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

Abstract: Metastable austenitic 304 stainless steel is widely used in the field of nuclear power, but it is prone to fatigue damage and affects the service life; thus, it is crucial to assess the fatigue damage during service via nondestructive testing meansmethods. The correlations among the microstructure, Vickers hardness, and saturation magnetization of 304 stainless steel under different fatigue cycles were investigated via X-ray diffraction, electron backscatter diffraction, hardness, and magnetic property testing. The experimental results show that with increasing number of fatigue cycles, 304 stainless steel transforms from the austenite phase to the martensite phase, and the martensite phase content continues to increase; the dislocation density increases rapidly during the fatigue process from 0 to 1 cycle and remains relatively constant thereafter. The martensite content and number of dislocations affect the Vickers hardness of 304 stainless steel during 0 to 1 cycle of the fatigue process; as the number of fatigue cycles further increases, the increase in the Vickers hardness is related to only

收稿日期:2025-01-26

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3707201);国家自然科学基金(52201141);广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110692);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX1189);中国博士后科学基金(2021M702662);中央高校基本科研业务费专项资金(G2024KY05101)

作者简介:张孟浩,2002年生,硕士生.研究方向为高强韧奥氏体不锈钢的开发.Email: zhangmenghao@mail.nwpu.edu.cn

通信作者:支辉辉,1990年生,博士,副教授.研究方向为极端环境服役用特种合金开发.Email: zhh@nwpu.edu.cn
王海丰,1981年生,博士,教授.研究方向为亚稳金属材料相变理论及新型耐磨金属材料开发应用.
Email: haifengw81@nwpu.edu.cn

引用格式:张孟浩,支辉辉,王维俊,罗皎,王海丰.疲劳损伤奥氏体304不锈钢组织与性能的关联性[J].铸造技术,2025,46(5):458-463.
ZHANG M H, ZHI H H, WANG W J, LUO J, WANG H F. Correlation between the microstructure and properties of fatigue-damaged austenitic 304 stainless steel[J]. Foundry Technology, 2025, 46(5): 458-463.

中国知网　https://www.cnki.net

the increase in the martensite content, and a linear relationship exists between them. The saturation magnetization of 304 stainless steel is associated with the martensite content in the steel, and there is also a linear relationship between the two.

Key words: 304 stainless steel; fatigue damage; martensitic transformation; Vickers hardness; saturation magnetization

奥氏体不锈钢因其优异的耐磨性、耐腐蚀性、高塑性和高韧性，被广泛应用于建筑、汽车、核电、船舶和航空航天等领域[1-2]。其中，304 不锈钢作为奥氏体不锈钢的一种，在核电领域常被用作承压用管道材料，但其容易受到震动载荷的影响，导致疲劳损伤，从而威胁核电安全[3-5]。奥氏体 304 不锈钢发生疲劳损伤会使其基体由面心立方(FCC)奥氏体转变为体心立方(BCC)马氏体[6-9]，且疲劳损伤程度越大，马氏体转变量越多[10]。因此，测量 304 不锈钢中的马氏体相含量可以有效反映其疲劳损伤程度。目前，测量马氏体含量的方法主要包括 X 射线衍射(XRD)、密度测量和电子背散射衍射(EBSD)[11-13]等。这些方法虽然准确高效，但通常需要对材料进行切割和表面处理，且不适用于在役设备及部件的检测。Park 等[14]研究表明，室温下奥氏体 304 不锈钢的磁矩随变形量的增加而上升，认为这是由于马氏体的产生影响了材料的磁性能。因此，通过检测磁性能即可有效反映马氏体相含量的变化情况，从而评估材料的疲劳损伤程度。Vértesy 等[15]研究冷轧奥氏体 304 不锈钢时提出电磁适应性测试可用于马氏体含量的相对变化测量，但无法得到准确值。胡刚等[16]对奥氏体 304 不锈钢在拉伸过程中的研究表明，冷变形产生的马氏体相与磁信号存在关联。目前，针对疲劳加载循环过程中马氏体相变与磁性能定量关联研究仍然匮乏。因此，系统研究这二者的关系，并利用无损检测手段辅助评估材料在服役过程中的疲劳损伤具有重要意义。

本文研究了不同疲劳周次预加载对奥氏体 304 不锈钢样品微观组织、力学性能和物理性能的影响。系统分析了疲劳损伤过程中组织、维氏显微硬度和饱和磁化强度的变化，建立了马氏体含量–维氏硬度及马氏体含量–饱和磁化强度的关联。通过测量维氏硬度或饱和磁化强度，可以推算出材料中马氏体的含量，有助于评估奥氏体 304 不锈钢在服役过程中的疲劳损伤程度。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

以山西太钢不锈钢股份有限公司依据《GB/T 24511-2017，ASME SA-240M-2021》标准生产的 304 不锈钢热轧钢带为实验原材料，其化学成分如表 1 所示。对实验原材料进行精密线切割，制备标距长度、宽度和厚度分别为 50、15 和 8 mm 的狗骨状疲劳试样，如图 1 所示。

表1 304不锈钢成分

Tab. 1 Composition of 304 stainless steel

(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.04	0.47	1.04	0.030	0.001	18.02	8.04	0.03	Bal.

1.2　实验方法

为系统研究奥氏体 304 不锈钢疲劳损伤过程中的微观组织演化及其对应的力学和磁学性能响应，对样品进行不同循环周次疲劳预加载实验。实验仪器为美国 MTS Landmark 810 疲劳试验机，设定峰值应力为 730 MPa，应力比为 0.1，频率为 0.5 Hz。疲劳循环周次分别为 0、1、2054、4108、8217、16435 和 32810 周次，其中 32810 周次发生疲劳断裂。

为表征奥氏体 304 不锈钢材料在不同循环周次中样品的相组成，对样品进行 XRD 测试。所采用的实验仪器为德国 Bruker D8 Focus 型，Cu 靶，扫描范围为 20°~100°，步长为 1 (°)/min。为确定样品的微观组织及分布情况，利用英国牛津 Symmetry S2 EBSD 探头获取图像数据，并采用 AZtecCrystal 软件进行

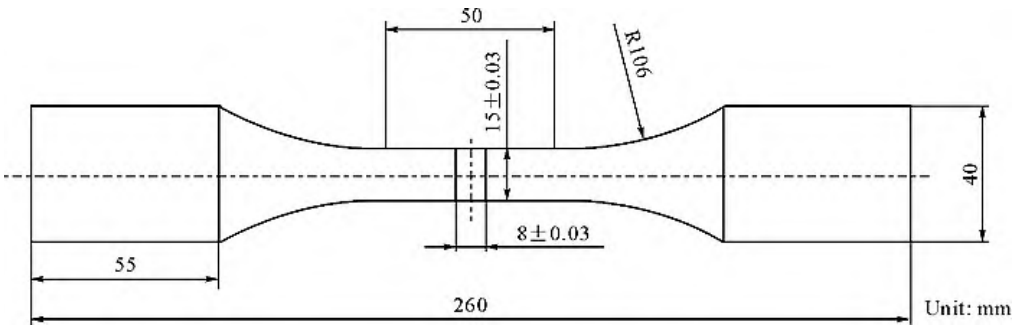

图 1　304 不锈钢疲劳试样

Fig.1　Fatigue specimen of 304 stainless steel

中国知网　https://www.cnki.net

数据分析[18]。XRD 和 EBSD 样品的制备过程如下：采用 500、1000、2000、3000 目砂纸对样品进行逐级打磨直至上一道划痕完全消失，然后室温下使用体积比为 1:9 的高氯酸和无水乙醇混合液进行电解抛光，电压设定为 40 V，时间为 40 s。

为测量疲劳循环过程中材料力学性能的变化，使用上海恒一精密仪器有限公司 MH-5L 型显微硬度仪对抛光后的样品进行维氏硬度测试，压力设置为 500 gf，保压时间为 15 s。为了保证结果的可靠性，对每个样品进行 20 次硬度测试后取平均值。同时，采用美国 Quantum Design 的综合物性测量系统(PPMS)仪器，在 3 T 外加磁场下对尺寸为 2 mm×2 mm×2 mm 的块状试样进行磁学性能测量，绘制磁化强度随外加磁场强度变化的磁滞回线(*M-H* 曲线)，以获取其饱和磁化强度值。为了保证实验的可重复性，每个疲劳周次测试 4 组样品。

2 实验结果及讨论

2.1 疲劳损伤相组成

对不同疲劳循环周次下的亚稳态奥氏体 304 不锈钢样品进行 XRD 测试，得到 XRD 谱，如图 2 所示。结果表明，原始态(0 周)样品中只呈现出 FCC 奥氏体特征峰$(111)_{FCC}$、$(200)_{FCC}$、$(220)_{FCC}$、$(311)_{FCC}$ 和$(222)_{FCC}$；经疲劳循环后，样品中微观组织发生变化，基体由 FCC 奥氏体部分转变为 BCC α′马氏体[17]，在 XRD 谱中呈现出 BCC 马氏体的特征峰$(110)_{BCC}$ 和$(211)_{BCC}$，且随着疲劳循环周次的增加，马氏体特征峰的强度逐渐增大。这说明疲劳循环导致了材料内部组织由基体的奥氏体相部分转变为马氏体相，且马氏体相含量随疲劳循环周次的增加而增加。

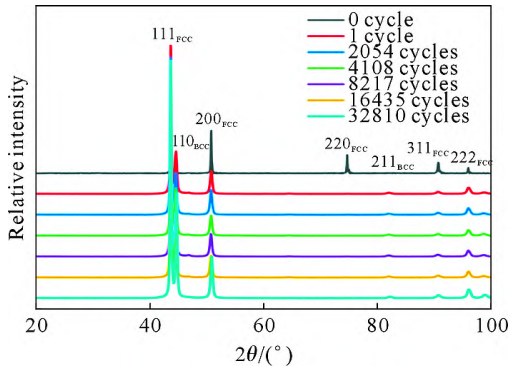

图 2 304 不锈钢在不同疲劳周次下的 XRD 谱
Fig.2 XRD patterns of 304 stainless steel at different fatigue cycles

2.2 疲劳损伤微观组织

利用 EBSD 表征不同疲劳循环周次下 304 不锈钢的微观组织，如图 3 所示。图 3a~g 展示了 EBSD 反极图(EBSD-IPF)，原始态样品的晶粒尺寸、形状和取向分布清晰可见，而经疲劳循环后的样品晶粒边界较难辨认。图 3h~n 为不同疲劳循环周次样品的相分布，其中红色部分表示 BCC 相，绿色部分表示 FCC 相。结果显示，随着疲劳循环次数的增加，马氏体相的含量逐渐增加，并呈现条带状分布。图 3o~u 为不同疲劳循环周次样品的几何必须位错(GND)分布。结果显示，在疲劳循环起始过程即 0~1 周时，材料位错密度发生显著增加；而随着疲劳循环周数的继续增加，位错密度基本保持不变。

图 4a 为上述 EBSD 图中 304 不锈钢不同循环周次的马氏体转变量统计。结果显示，随着疲劳循环周次的增加，马氏体相体积分数由未疲劳时的 1%

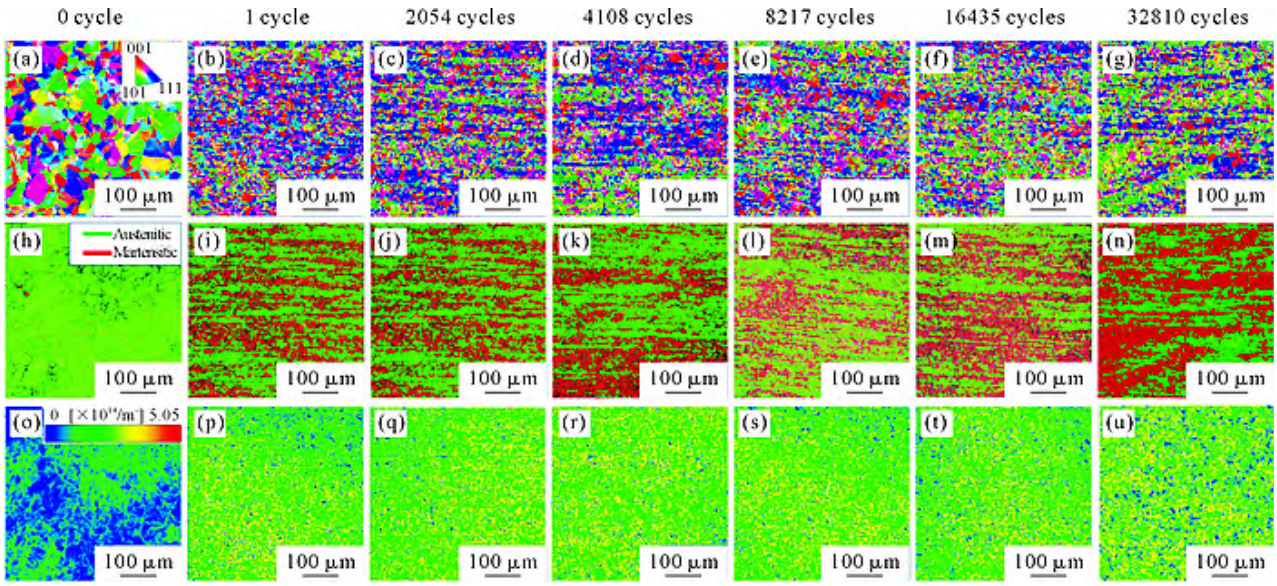

图 3 304 不锈钢在 730 MPa 峰值应力下不同循环周次 EBSD 分析：(a~g) IPF 图；(h~n) 相图；(o~u) GND 分布
Fig.3 EBSD analysis of 304 stainless steel at the 730 MPa peak stress for different numbers of cycles: (a~g) IPF maps; (h~n) phase maps; (o~u) GND maps

中国知网 https://www.cnki.net

迅速上升至疲劳循环 1 周的 31.2%。随后，马氏体相含量缓慢上升，最终在疲劳断裂时达到 56.9%。未疲劳时的 1%马氏体含量主要源于热轧等生产工艺过程，而疲劳循环加载后产生的马氏体则是由材料疲劳损伤引发。

由维氏硬度受马氏体转变和位错密度的共同影响，统计了疲劳循环中材料位错密度的变化情况。图 4b 为上述 EBSD 图中 304 不锈钢不同循环周次的 GND 统计。结果显示，在未疲劳至疲劳循环 1 周时，奥氏体相、马氏体相和体相平均位错密度显著上升，分别从 $1.00\times10^{14}/m^2$、$1.46\times10^{14}/m^2$、$1.00\times10^{14}/m^2$ 升至 $3.22\times10^{14}/m^2$、$3.89\times10^{14}/m^2$、$3.43\times10^{14}/m^2$。随着疲劳循环次数的增加，这些值稳定在 $3.28\times10^{14}/m^2$、$4.06\times10^{14}/m^2$ 和 $3.72\times10^{14}/m^2$ 附近。这是由于疲劳加载初期(0~1 周)，材料内部晶粒晶界取向受到严重破坏，导致位错大量产生。在这一阶段，施加的疲劳循环应力较大，使得位错数量迅速增加接近饱和值。随后，随着疲劳循环周次的增加，材料中主要发生马氏体相变，位错数目略有增加，更加趋近于饱和值[18-20]。

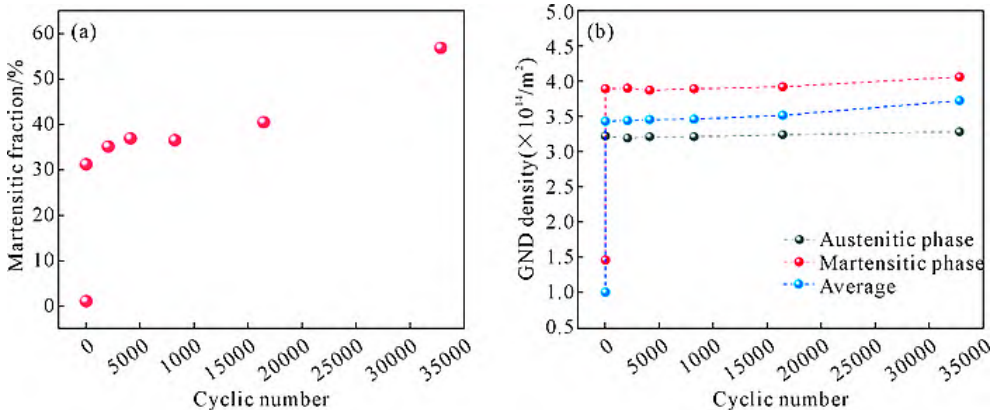

图 4 304 不锈钢不同循环周次的马氏体转变量和 GND 统计：(a) 马氏体转变量统计；(b) GND 统计

Fig.4 Statistics of martensitic transformation and GNDs of 304 stainless steel after different numbers of cycles: (a) martensite transformation statistics; (b) GND statistics

2.3 力学性能

为了研究不同疲劳循环次数对 304 不锈钢材料力学性能的影响，进行了维氏硬度测试，如图 5 所示。结果显示，硬度随疲劳循环次数的增加而增大。从未疲劳加载时的 279.98 HV 迅速上升至疲劳循环 1 周时的 367.71 HV，随后缓慢上升，并在疲劳加载 32 810 周次时达到 420.60 HV。硬度变化趋势与材料中马氏体转变一致，即随着疲劳循环次数的增加，硬度先快速提升，然后逐渐增加。

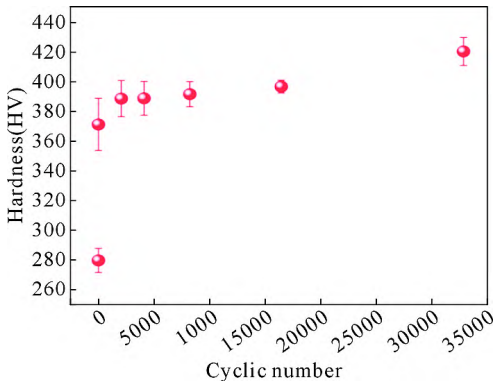

图 5 304 不锈钢不同循环周次的维氏硬度变化

Fig.5 Variation in the Vickers hardness of 304 stainless steel after different numbers of cycles

2.4 物理性能

为了研究不同疲劳循环次数对 304 不锈钢磁学性能的影响，本部分测量了磁化强度随外加磁场强度变化的磁滞回线(图 6)。结果表明，从疲劳循环 0~1 周，饱和磁化强度迅速增加，随着疲劳循环次数的增加，饱和磁化强度继续缓慢上升。由图 6 可知，304 不锈钢表现出典型的软磁材料特征，具有窄磁滞回线、大磁导率及较小的矫顽力和剩余磁化强度。

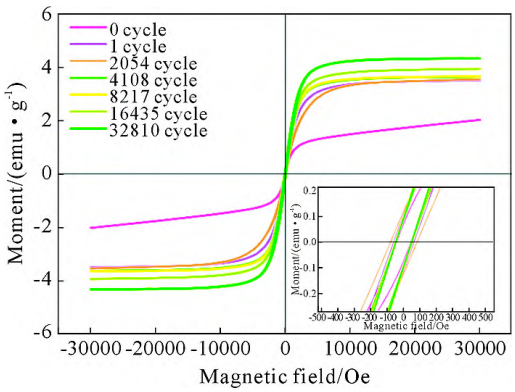

图 6 304 不锈钢不同循环周次的磁滞回线

Fig.6 Magnetic hysteresis loops of 304 stainless steel after different numbers of cycles

对上述磁滞回线中的相关数据进行分析，结果显示 304 不锈钢的饱和磁化强度变化明显，且其变化仅与材料的晶体结构和化学成分相关[21]，因此统计了饱和磁化强度的变化，如图 7 所示。在疲劳循

中国知网　https://www.cnki.net

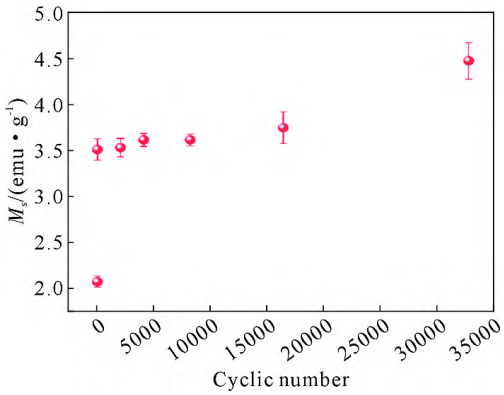

图 7 304 不锈钢不同循环周次饱和磁化强度变化

Fig.7 Variation in the saturation magnetization of 304 stainless steel after different numbers of cycles

环 0~1 周时，饱和磁化强度迅速从 2.07 emu/g 增加到 3.52 emu/g；随着疲劳循环次数的继续增加，饱和磁化强度呈继续上升趋势，最终在疲劳加载 32 810 周次时达到 4.48 emu/g。结果表明，饱和磁化强度随疲劳循环次数的增加先快速上升，随后增速减缓，这一变化趋势与马氏体含量的变化一致。

2.5 微观组织与性能关联

在疲劳服役环境下，材料的损伤行为表现出不可逆性，因此了解材料的疲劳损伤情况对于评估服役行为和预测服役寿命至关重要。实验研究了 304 不锈钢在疲劳损伤过程中微观组织的变化，以及相应的力学和磁学性能变化。结果表明，304 不锈钢在疲劳损伤过程中经历形变，原始的亚稳奥氏体组织因冷变形诱发马氏体相变，形成具有铁磁性的体心立方马氏体。这种马氏体的高硬度和铁磁性导致材料的力学性能(如硬度)和磁学性能(如饱和磁化强度)发生明显变化。因此，建立了马氏体相转变量与力学性能和磁学性能之间的关系，以达到无损检测目的。

该部分旨在建立马氏体转变量与维氏硬度之间的关系。如图 8 所示，虚线部分代表在疲劳循环开始阶段(0~1 周)，硬度主要由马氏体和位错共同作用影响；实线部分为疲劳循环后续阶段，位错密度基本保持不变，对硬度的贡献也基本不变[19]。研究表明，如图 8 实线部分所示，马氏体转变量 f_{BCC} 与维氏硬度之间呈线性关系，其中最大拟合误差为 3.86%，304 不锈钢维氏硬度通过下式计算获得：

$$H=333.382\ 3+1.555\ 4f_{BCC}\quad (31.2\leqslant f_{BCC}\leqslant 56.9) \tag{1}$$

式中，f_{BCC} 为 304 不锈钢中马氏体转变量，%。

该部分拟建立马氏体转变量与饱和磁化强度之间的关系，如图 9 所示。研究表明，马氏体转变量 f_{BCC} 与饱和磁化强度 M_s 之间存在线性关系，其中拟合最大误差为 3.66 %，结果如下式所示：

$$M_s=2.0383+0.0433f_{BCC}\quad (1\leqslant f_{BCC}\leqslant 56.9) \tag{2}$$

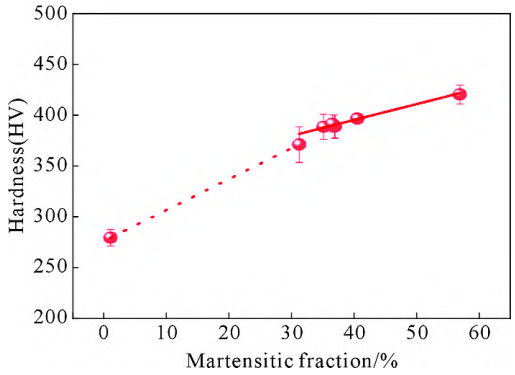

图 8 马氏体相含量与维氏硬度的关系

Fig.8 Relationship between martensitic phase content and Vickers hardness

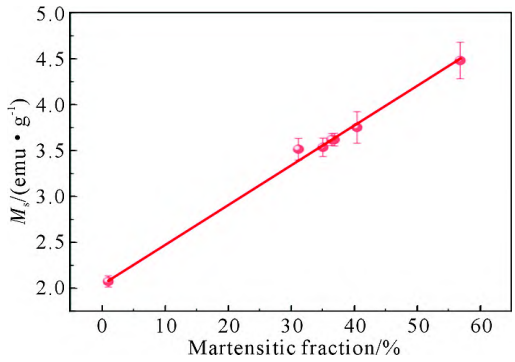

图 9 马氏体相含量与饱和磁化强度的关系

Fig.9 Relationship between the martensitic phase content and saturation magnetization

3 结论

(1)通过对奥氏体 304 不锈钢在不同疲劳加载循环周次的微观组织分析表明，在疲劳循环初始阶段(0~1 周)，马氏体相转变量迅速增加，位错密度也快速上升接近饱和值；随着疲劳循环周次的继续增加，马氏体相含量增加减缓，而位错密度趋于饱和值，基本保持不变。

(2)在疲劳加载的初始阶段(0~1 周)，奥氏体 304 不锈钢的维氏硬度快速增加，主要受到马氏体含量与位错共同作用的影响。随着疲劳循环周次的继续增加，维氏硬度缓慢上升，其主要与马氏体含量的变化相关，拟合发现在此阶段二者之间存在近似线性关系。

(3)在疲劳加载初始阶段(0~1 周)，奥氏体 304 不锈钢的饱和磁化强度快速增加；随着疲劳循环周次的继续增加，饱和磁化强度缓慢上升。在整个疲劳阶段，饱和磁化强度的变化趋势与马氏体含量变化一致，拟合发现二者之间存在线性关系。

参考文献：

[1] YU D J, YU W W, CHEN G, JIN F M, CHEN X. Role of dynamic strain aging in the tensile property cyclic deformation and fatigue

中国知网 https://www.cnki.net

behavior of Z2CND18.12N stainless steel between 293K and 723K [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 558: 30-736.

[2] 郭宇,贾攀,丁涛涛,朱武军. Q460 疲劳损伤的非线性导波检测及寿命预测[J]. 振动.测试与诊断,2024, 44(5): 987-992, 1042.
GUO Y, JIA P, DING T T, ZHU W J. Nonlinear guided wave detection and life prediction of Q460 fatigue damage[J]. Vibration, Test and Diagnosis, 2024, 44(5): 987-992, 1042.

[3] LIU K P, ZHAO Z H, ZHANG Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI 321 stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21 (8): 1772-1776.

[4] VÉRTESY G, MÉSZÁROS I, TOMÁ I. Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic minor hysteresis loops measurement[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 285(3): 335-342.

[5] PAFFUMI E, NILSSON K F, TAYLOR N G. Simulation of thermal fatigue damage in a 316L model pipe component [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(11): 798-813.

[6] 宋光雄,张晓庆,常彦衍,张峥,钟群鹏. 压力设备腐蚀失效案例统计分析[J] . 材料工程,2024, 32(2): 6-9.
SONG G X, ZHANG X Q, CHANG Y Y, ZHANG Z, ZHONG Q P. Statistical analysis of corrosion failure cases of pressure equipment[J]. Materials Engineering, 2024, 32(2): 6-9.

[7] 方智,吴荫顺,曹备,朱日彰. 奥氏体 304 不锈钢在活化态下的应力腐蚀与马氏体相变[J]. 中国腐蚀与防护学报,1994, 14(4): 277-282.
FANG Z, WU Y S, CAO B, ZHU R Z. Stress corrosion and martensitic phase transformation of austenitic 304 stainless steel in the activated state[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1994, 14(4): 277-282.

[8] 刘伟,李志斌,王翔,邹骅,王立新. 应变速率对奥氏体不锈钢应变诱发 α'- 马氏体转变和力学行为的影响[J]. 金属学报,2009, 45(3): 285-291.
LIU W, LI Z B, WANG X, ZOU H, WANG L X. Effect of strain rate on strain-induced α'-martensitic transformation and mechanical behavior of austenitic stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(3): 285-291.

[9] 徐杨,宋仁伯,刘政东. 304 奥氏体不锈钢冷拔过程中局部磁性形成机理[J]. 金属热处理,2015, 40(9): 92-97.
XU Y, SONG R B, LIU Z D. Mechanism of localized magnetic formation during cold drawing of 304 austenitic stainless steel[J]. Metal Heat Treatment, 2015, 40(9): 92-97.

[10] 胡刚. 奥氏体 304 不锈钢马氏体相变与孔蚀敏感性的相关性研究[D]. 北京:北京化工大学,2002.
HU G. Correlation study between martensitic phase transformation and pore corrosion susceptibility of austenitic 304 stainless steel [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2002.

[11] 李树棠. 金属 X- 射线衍射与分析技术[M]. 北京: 冶金工业出版社,1980.
LI S T. Metal X-ray diffraction and analytical techniques [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980.

[12] 史金涛,侯陇刚,左锦荣,卢林,崔华,张济山. 304 奥氏体不锈钢超低温轧制变形诱发马氏体转变的定量分析及组织表征[J]. 金属学报,2016, 52(8): 945-955.
SHI J T, HOU L G, ZUO J R, LU LIN, CUI H, ZHANG J S. Quantitative analysis and organization characterization of martensitic transformation induced by ultra-low-temperature rolling deformation of 304 austenitic stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 945-955.

[13] 刘锦润. 304 亚稳奥氏体不锈钢组织性能及其影响因素研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2024.
LIU J R. Research on the organizational properties of 304 substable austenitic stainless steel and its influencing factors [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024.

[14] PARK D G, D. W. K. C. Measurement of the magnetic moment in a cold worked 304 stainless steel using HTS SQUID[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320: 571-574.

[15] VÉRTESY G, TOMÁŠ I, MÉSZÁROS I. Non-destructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 310: 76-82.

[16] 胡钢,许淳淳,袁俊刚. 奥氏体 304 不锈钢形变诱发马氏体相变与磁记忆效应[J]. 无损检测,2008(4): 216-219.
HU G, XU C C, YUAN J G. Deformation induced martensitic transformation and magnetic memory effect of austenitic 304 stainless steel[J]. Nondestructive Testing, 2008(4): 216-219.

[17] PEGUES J W, SHAO S, SHAMSAEI N, SCHNEIDER J A, MOSER R D. Cyclic strain rate effect on martensitic transformation and fatigue behaviour of an austenitic stainless steel [J]. Fatigue & Fracture of Enginineering Materieds & Structures, 2017, 40 (12): 2080-2091.

[18] SHINTANI T, MURATA Y. Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction [J]. Acta Materialia, 2011, 59(12): 4314-4322.

[19] 高乐,张宇,叶一璇,彭兰,叶畅. 超声纳米晶体表面改性对 304 不锈钢显微组织和性能的影响[J]. 材料工程,2024, 52(8): 142-149.
GAO L, ZHANG Y, YE Y X, PENG L, YE C. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on microstructure and properties of 304 stainless steel [J]. Materials Engineering, 2024, 52(8): 142-149.

[20] 焦传继. 表面滚压强化 304 不锈钢组织与性能的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2023.
JIAO C J. Study of the microstructure and properties of surface rolling strengthened 304 stainless steel [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.

[21] 郑儒嘉. 饱和磁化强度 Ms 及其测量[J]. 上海工程技术大学学报,1994(3): 42-46.
ZHENG R J. Saturated magnetization intensity Ms and its measurement [J]. Journal of Shanghai University of Engineering and Technology, 1994(3): 42-46.

(责任编辑:李亚敏)

中国知网 https://www.cnki.net