应力作用下不锈钢 TIG 焊焊缝的 He^+辐照损伤行为

李鑫[1]，雷玉成[1]，姚奕强[2]，丁祥彬[2]，张伟伟[1]

（1. 江苏大学 材料科学与工程学院，江苏 镇江 212013；
2. 中广核研究院有限公司，广东 深圳 518000）

摘要：目的 结合核材料应用环境，探究应力作用对 304 奥氏体不锈钢、430 铁素体不锈钢和 T91 马氏体不锈钢的 TIG 焊焊缝辐照损伤行为的影响。**方法** 采用剂量（每 cm^2 的离子数量）为 2.1×10^{17}，辐照能量为 150 keV，束流为 60 μA 的 He^+离子束，对 2 种应力状态下 3 种不锈钢的焊缝进行 He^+辐照，并对其辐照前后的微观形貌和显微硬度进行测试分析。**结果** SEM 图像表明，外加拉应力的引入对 304 奥氏体不锈钢焊缝辐照缺陷的密度分布和尺寸大小的影响最大，辐照缺陷的间距在有应力作用时缩小了 61.5%，缺陷的尺寸则增长了 59.2%；纳米压痕数据显示，外加拉应力对 T91 马氏体不锈钢辐照硬化率增长的影响相对较小，仅为 17.9%。**结论** 应力会使辐照缺陷最大尺寸增加，应力会在一定程度上降低材料的抗辐照性能。辐照导致 T91，304，430 这 3 种不锈钢焊缝硬度提高。相同应变条件下，与 430 不锈钢和 304 不锈钢相比，T91 钢焊缝辐照硬化增量最小，T91 焊缝的抗辐照硬化性能相对优异，工程应用中可优先选用 T91 钢。

关键词：不锈钢；焊缝；应力状态；辐照缺陷；辐照硬化

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2021.05.022

中图分类号：TG441.8　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-6457(2021)05-0167-06

Study on He^+ Irradiation Damage Behavior of TIG Welds in Stainless Steel under Stress

LI Xin[1], *LEI Yu-cheng*[1], *YAO Yi-qiang*[2], *DING Xiang-bin*[2], *ZHANG Wei-wei*[1]

(1. Jiangsu University, School of Materials Science and Engineering, Zhenjiang 212013, China;
2. CGN Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

ABSTRACT: This paper aims to investigate the influence of stress on irradiation of TIG welds in 304 austenite stainless steel, 430 ferstenite ferrite stainless steel and T91 Marstenite stainless steel with the combination of the application environment of nuclear materials. In the experiment, the welds in three kinds of stainless steel under two stress states were irradiated by He^+ at dose of 2.1×10^{17}, with the irradiation energy of 150 keV and the beam of 60 μA. The micro-morphology and micro-hardness of the welds were measured and analyzed before and after irradiation. SEM images show that the influence of external tensile force on the density distribution and the size of the irradiated defects of the weld in 304 austenitic stainless steel was the greatest. The spacing of the irradiated defects was reduced by 61.5% and the size of the defects increased by 59.2% when the stress was applied. According to the nano-indentation data, the effect of external stress on the increase of irradiation hardening rate of T91 martensitic stainless steel was only 17.9%. The stress would increase the maximum size of the irradiated defect and reduce the

收稿日期：2021-05-11
基金项目：国家自然科学基金（51875264）
作者简介：李鑫（1996—），男，硕士生，主要研究方向为不锈钢焊缝辐照损伤机制。
通讯作者：雷玉成（1962—），男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为先进材料连接技术和焊接过程控制及模拟。

radiation resistance of the material to a certain extent. Irradiation resulted in the increase of hardness of welds in these three kinds of stainless steels. Under the same strain condition, compared with 430 stainless steel and 304 stainless steel, the radiation hardening increment of the weld in T91 stainless steel was the smallest, and the radiation hardening resistance of the weld in T91 is relatively excellent. In conclusion, T91 stainless steel can be preferred in the engineering application.

KEY WORDS: stainless steel; weld; stress state; irradiation defect; irradiation hardening

作为一种清洁能源，核能受到越来越多的关注，核能的安全利用关乎社会效益和经济效益。核反应堆环境苛刻，尤其是中子辐照会对材料造成辐照损伤，影响材料性能。研究材料的抗辐照性能对核材料的正确选用具有重要意义。核反应堆中的常用结构材料之一是不锈钢。核反应堆不锈钢结构部件常常需要焊接[1]成形，焊缝是焊接接头[2—3]的薄弱区域之一，研究辐照条件下不锈钢焊缝的组织结构和性能具有重要意义。

国内外学者针对辐照条件下的不锈钢材料行为已经开展了一些研究工作。Takeuchi 等[4]采用离子辐照模拟中子辐照，研究了离子辐照对奥氏体不锈钢电渣堆焊层微观组织结构以及硬化的影响。Chen 等[5]报道了中子辐照对 430 铁素体不锈钢和 ODS 不锈钢异种焊接接头的影响。H. Fu 等[6]针对 F82H 马氏体钢焊缝的辐照肿胀率进行了研究。这些研究都是针对钢或者焊缝金属开展的辐照行为研究，没有考虑核反应堆中不锈钢结构部件往往是在应力状态下服役的这一客观事实。应力状态下的焊缝辐照行为可能更接近真实服役条件。

国内外学者对核电材料的辐照效应已经开展了一些研究[7—8]，但针对核材料工程应用环境中应力状态下 3 种类型不锈钢焊缝开展的辐照效应研究相对较少。文中将针对核反应堆用 304 奥氏体不锈钢、430 铁素体不锈钢和 T91 马氏体不锈钢这 3 种 TIG 焊接焊缝，开展应力作用下的辐照行为研究。

1 实验

1.1 实验材料及试样制备

选取 3 种核用不锈钢，采用手工 TIG 焊分别对 304 奥氏体不锈钢、430 铁素体不锈钢、T91 马氏体不锈钢板材进行焊接。通过多次实验，选取 3 种不锈钢试样板块对应的最佳焊接工艺，其参数如表 1 所示。焊接完成后，平行于焊缝方向取样，试样分为 2 组，一组施加应力，一组不施加应力。预加拉应力的夹具如图 1 所示，通过拧动夹具两边的螺栓，顶开夹具对试样进行拉伸。文中通过拧动螺栓让试样产生应变来施加拉应力。不施加应力的试样尺寸为 10 mm×10 mm×0.5 mm，施加应力的试样尺寸为 10 mm×30 mm× 0.5 mm。试样表面先用砂纸打磨、抛光，并用酒精擦拭表面，然后进行 He^+离子辐照实验。

表 1 3 种材料的焊接参数

Tab.1 Welding parameters for three materials

材料	母材厚度/mm	填充材料	焊接电流/A	焊接电压/V
304	8	ER304	130	18.1~20.5
430	4	ER430	100	16.5~18.5
T91	5	T91	110	17.1~18.5

图 1 拉伸夹具

Fig.1 Drawing fixture

1.2 外加应力

使用万能拉伸试验机对 3 种不锈钢焊缝进行拉伸试验，根据试验结果来确定外加拉应力的值。304 不锈钢焊缝的应力-应变曲线如图 2 所示。当应变 ε

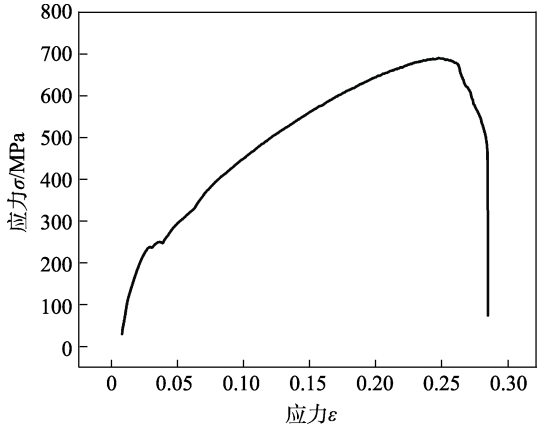


图 2 304 不锈钢焊缝应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of weld in 304 stainless steel

达到 5%时，3 种材料均已达到塑性变形阶段；当应变 ε 为 5%时，304 奥氏体不锈钢、430 铁素体不锈钢和 T91 马氏体不锈钢的焊缝应力值分别为 294，268.4，445.6 MPa。通过拧动夹具来控制 3 种材料达到 5%应变。

2　结果与分析

2.1　辐照损伤计算

选取的辐照剂量(每 cm^2 的离子数量)为 2.1×10^{17}，He^+的辐照能量为 150 keV，离子束束流为 60 μA。通过 SRIM（The stopping and range of ions in matter）模拟软件计算出 3 种材料的辐照损伤量和入射离子随深度变化的函数关系。SRIM 软件可以模拟出入射的 He^+与靶材原子之间的相互作用，并采用蒙特卡罗统计试验法（Monte carlo method，MC）[9]计算因此产生的反冲原子和靶材原子之间的随机碰撞，因此，通过 SRIM 软件模拟出入射离子轰击靶材后的运动过程并进行计算，就可以得到各个物理量的估值[10]。式（1—2）为计算 He^+离子数和损伤量（Displacements per atom，dpa）的计算公式[11]。

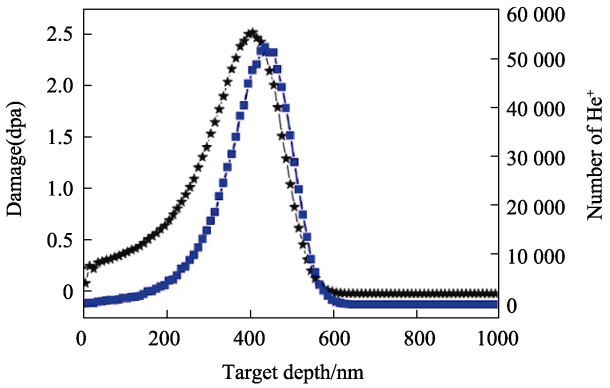
$$D_{\mathrm{dpa}}=\frac{V\Phi\times10^{8}}{\rho} \tag{1}$$

式中：D_{dpa} 为辐照损伤量；V 为 SRIM 软件计算得到的试样中产生的空位数；Φ 为辐照剂量；ρ 为试样的原子数密度，304 奥氏体不锈钢、430 铁素体不锈钢和 T91 马氏体不锈钢的焊缝的原子数密度（每 cm^3 的原子数量）分别为 8.405×10^{22}，8.373×10^{22}，8.488×10^{22}。

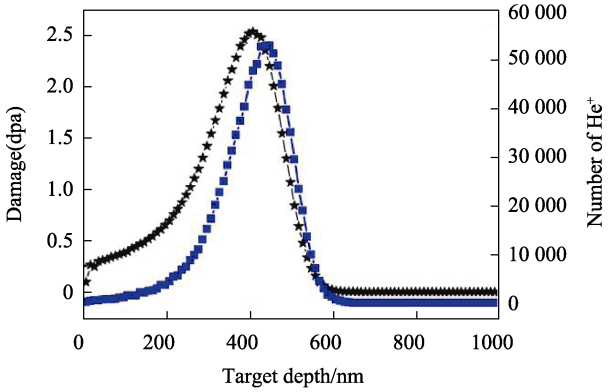
$$C=\frac{R\Phi}{\rho} \tag{2}$$

式中：C 为单位体积中 He^+的个数；R 为 SRIM 软件计算得到的注入元素在试样中的浓度。不同深度下的总离位数是变化的，以固体靶材深度为横坐标，以对应的总离位数为纵坐标，可以获得 dpa 随深度变化的分布曲线。以固体靶材的深度为横坐标，以 He^+离子数为纵坐标就可以获得注入的 He^+离子数随固体靶材深度的分布曲线。SRIM 软件模拟计算得出 3 种材料损伤量随深度变化的函数以及 He^+离子数随深度变化的函数如图 2 所示。

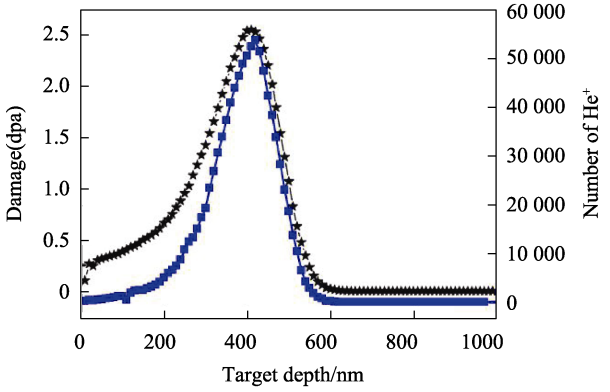
3 种材料损伤量、He^+离子数对应的峰值以及 He^+辐照最大深度如表 2 所示。对比 3 种材料的模拟计算结果，损伤量的大小和 He^+离子数规律一致，其分布规律符合高斯方程，都随着深度先增大后减小，He^+辐照影响的最大深度均在 650 nm 左右；辐照损伤的峰值均出现在 410 nm 附近，损伤量的峰值大小略有差别，均在 2.5 附近，其中在 T91 的略大于 430 和 304 不锈钢，He^+离子数的峰值则出现在 440 nm 附近。



a 304



b 430



c T91

图 2　损伤量、He^+离子数随深度变化函数

Fig.2 Function of damage variation and the variation function of helium ion number with depth

表 2　3 种材料的 SRIM 模拟计算数据

Tab.2 Data of three materials simulated by SRIM

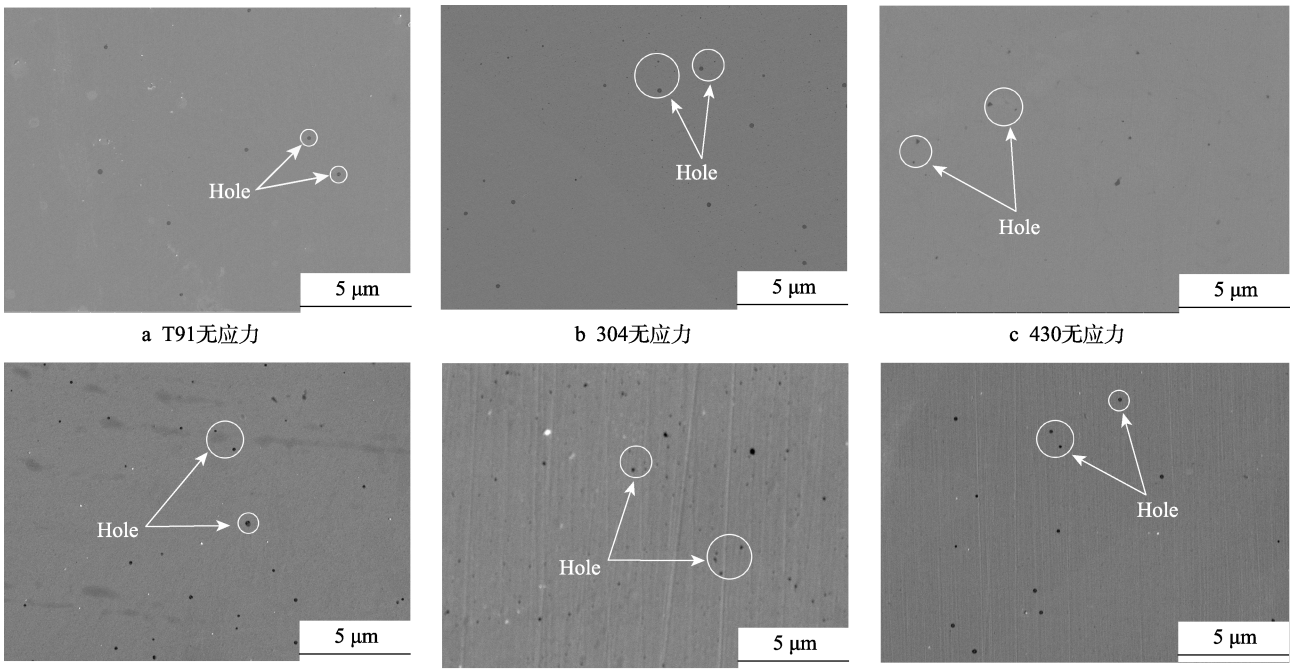
材料	损伤量	He^+分布峰值	最大深度/nm
304	2.515	52 100	670
430	2.517	52 200	670
T91	2.533	53 100	650

2.2　微观形貌观察

3 种不锈钢焊缝在无应力和有应力状态下辐照后

的 SEM 形貌如图 3 所示。可以看出，3 种焊缝在无应力状态下和有应力状态下，焊缝表面均分布着黑色点状缺陷；对于同一种焊缝，在有外加应力的状态下，焊缝表面黑色点状缺陷的分布密度明显增加，缺陷之间的距离明显变小，部分缺陷的尺寸也有所增大。据分析这些小黑点是一些纳米小孔洞和小凸起，万浩等[12]解释了这些纳米小孔洞和小凸起是辐照缺陷在热力学梯度下向不锈钢焊缝表面扩散、聚集形成的。

3 种不锈钢焊缝的金相组织如图 4 所示。从图 4a 可以看出，304 奥氏体不锈钢焊缝由树枝晶和柱状晶组成。从图 4b 可以看出，430 不锈钢的焊缝组织为铁素体组织，并伴有少量残余奥氏体；图 4c 为 T91 马氏体不锈钢焊缝组织，焊缝主要由板条状马氏体组成。比较 3 种不锈钢焊缝组织，发现 304 奥氏体不锈钢的焊缝晶粒细长且晶界较为密集。

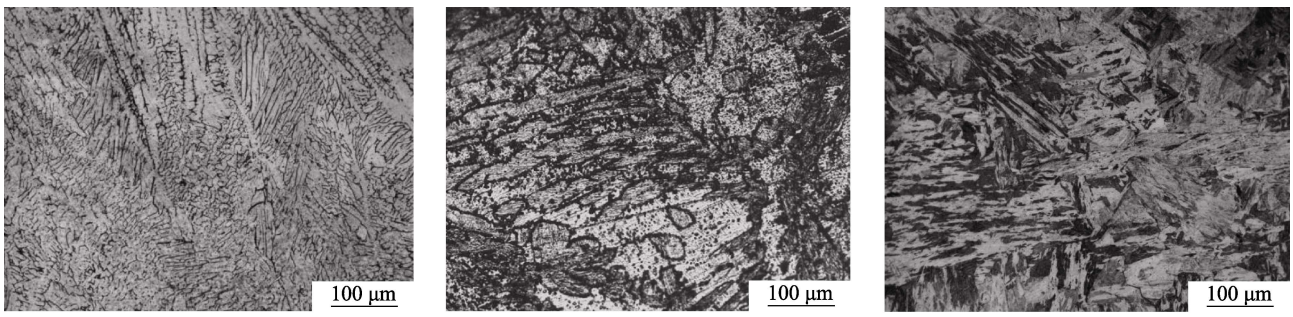


a T91无应力　b 304无应力　c 430无应力

d T91有应力　e 304有应力　f 430有应力

图 3　焊缝 He^+离子辐照后的 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology of the welds after He^+ ion irradiation



a 304　b 430　c T91

图 4　3 种不锈钢焊缝金相组织

Fig.4 Metallographic Structure of welds in three stainless steel

不锈钢焊缝中的辐照缺陷通常会在密集的晶界处聚集，形成尺寸较小的点缺陷弥散分布在不锈钢焊缝的表面。304 不锈钢焊缝的晶粒细长且晶界密集，辐照缺陷更容易在 304 奥氏体不锈钢焊缝中形成。这些聚集在晶界处的缺陷相互吸引并合并长大，形成较大尺寸的纳米孔洞和凸起，导致辐照对 304 奥氏体不锈钢焊缝的影响较大。

2 种应力状态下，3 种不锈钢焊缝辐照后的平均缺陷间距和最大缺陷直径的具体数值如表 3 所示。304 不锈钢焊缝在有应力状态下的平均缺陷间距比无应力状态下的平均缺陷间距缩小了 58.1%，有应力状态下的最大缺陷直径增长了 18.1%；430 不锈钢焊缝在有应力状态下的平均缺陷间距缩小了 61.5%，有应力状态下的最大缺陷直径增长了 59.2%；T91 不锈钢

表 3　焊缝辐照缺陷平均间距和最大尺寸

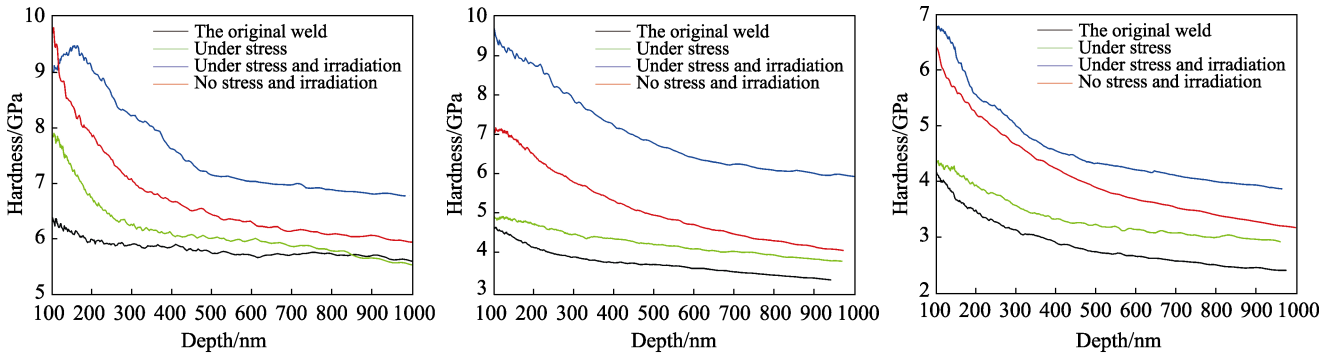
Tab.3 Average spacing and maximum dimensions of irradiated defects in welds　　nm

材料	平均间距		最大缺陷直径	
	有应力	无应力	有应力	无应力
T91	1263	3015	268	227
304	870	2258	320	201
430	1135	2755	246	224

焊缝在有应力状态下的平均缺陷间距缩小了 58.8%，有应力状态下的最大缺陷直径增长了 9.8%。通过对比分析 304 奥氏体不锈钢焊缝、430 铁素体不锈钢焊缝、T91 马氏体不锈钢焊缝的平均缺陷间距和最大缺陷直径，发现外加拉应力的引入对 304 奥氏体不锈钢焊缝的辐照缺陷影响最大。

2.3　显微硬度

3 种不锈钢焊缝在不同应力状态下的纳米压痕测试硬度位移曲线如图 5 所示。3 种焊缝在 4 种状态下的硬度变化趋势是一致的。对于同一种焊缝，有拉应力作用和有辐照作用时硬度都有所增加，拉应力和辐照同时作用下硬度最大。



a T91　　b 304　　c 430

图 5　3 种材料纳米压痕硬度-位移曲线

Fig.5 Nano-indentation hardness-displacement curves of the three materials

3 种不锈钢焊缝不同应力状态下的硬度均值如表 4 所示。辐照后，没有拉应力作用时 T91，304，430 这 3 种不锈钢焊缝的硬度分别增长了 39.6%，47.8%，37.3%；有拉应力作用时 T91，304，430 这 3 种不锈钢焊缝的硬度分别增长了 45.8%，57.1%，52.3%。2 种应力状态下 304 奥氏体不锈钢焊缝的辐照硬化率均最高。

表 4　2 种状态辐照前后硬度值

Tab.4 Hardness values before and after irradiation in the two states　　GPa

材料	有应力状态		无应力状态	
	辐照	未辐照	辐照	未辐照
T91	9.2	6.31	8.64	6.19
304	7.47	4.754	6.761	4.572
430	6.761	4.444	5.81	4.232

辐照后 2 种应力状态下 3 种不锈钢焊缝的硬度增量ΔH 如图 6 所示，有拉应力状态下 3 种不锈钢焊缝的硬度增长均更加明显，T91，304，430 的硬度增值分别为 17.9%，24.1%，46.8%。综合比较这 3 种材料在有无外加应力联合作用下，T91 马氏体不锈钢焊缝的抗辐照硬化性能相对优异。

根据辐照硬化理论[13]，在未辐照的焊缝中，影响材料硬度的是位错开动所需要克服的应力，即费兰克-

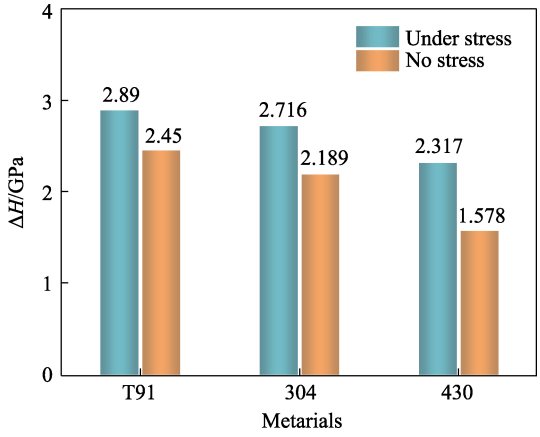


图 6　3 种材料不同状态硬度增量

Fig.6 Hardness changes of the three materials in different states

瑞德位错源[14]的去钉扎应力。对于辐照后的焊缝，辐照产生的诱发点缺陷及其演化形成的微观形貌上的变化，导致变形过程中位错开动且运动阻力加大。辐照产生的缺陷通过源硬化[15]和摩擦硬化[16]这 2 种方式使材料产生辐照硬化效应。这也对应了 2.2 节中辐照后外加应力的引入对焊缝表面形貌影响的结果。

3　结论

结合工程应用环境，对 3 种不锈钢焊缝在应力作用下的辐照损伤研究得出以下结论。

1）应力会使辐照缺陷最大尺寸增加，应力在一定程度上会降低材料的抗辐照性能。

2）与 430 不锈钢、T91 钢相比，应力对 304 奥氏体不锈钢的辐照缺陷演变影响最大。与无外加应力焊缝相比，有外加应力的 304 不锈钢焊缝的辐照缺陷尺寸增长最明显，辐照缺陷尺寸增长 59.2%。

3）辐照导致 T91，304，430 这 3 种不锈钢焊缝硬度提高，其中 304 的辐照硬化率最高。

4）相同外加应力作用下，与 430 不锈钢、304 不锈钢相比，T91 钢焊缝辐照硬化增量最小。应力作用下 T91 的焊缝抗辐照硬化性能相对优异，工程应用中应优先选用 T91 钢。

参考文献：

[1] 胡金亮, 曾才有, 余陈, 等. 厚板钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接技术发展现状[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 10—20.
HU Jin-liang, ZENG Cai-you, YU Chen, et al. Progress in Magnetically-Controlled Narrow-Gap TIG Welding of Thick-Plate Titanium Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(4): 10—20.

[2] 杨成刚, 任泽良, 宋友民, 等. 奥氏体不锈钢 A-TIG 焊工艺研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(5): 50—54.
YANG Cheng-gang, REN Ze-liang, SONG You-min, et al. A-TIG Welding Technology of Austenitic Stainless Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(5): 50—54.

[3] 任泽良, 杨成刚, 宋友民. 活性剂增加不锈钢 A-TIG 焊熔深机理研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 64—67.
REN Ze-liang, YANG Cheng-gang, SONG You-min. Mechanism of Increasing Penetration of Stainless Steel A-TIG Welding by Active Flux[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 64—67.

[4] TAKEUCHI T, KAKUBO Y, MATSUKAWA Y, et al. Effect of Neutron Irradiation on the Microstructure of the Stainless Steel Electroslag Weld Overlay Cladding of Nuclear Reactor Pressure Vessels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 443(1/2/3): 266—273.

[5] CHEN C L, RICHTER A, KOGLER R, et al. Ion-Irradiation Effects on Dissimilar Friction Stir Welded Joints between ODS Alloy and Ferritic Stainless Steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 448—453.

[6] FU H Y, NAGASAKA T, KOMETANI N, et al. Effect of Post-Weld Heat Treatment and Neutron Irradiation on a Dissimilar-Metal Joint between F82H Steel and 316L Stainless Steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 98/99: 1968—1972.

[7] YOSHIIE T. Factors that Influence Cascade-Induced Defect Growth in Pure Metals and Model Alloys[J]. Materials Transactions, 2005, 46(3): 425—432.

[8] JIN H H, KWON J, SHIN C. Evolution of Radiation Defect and Radiation Hardening in Heat Treated SA508 Gr3 Steel[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014, 319: 24—28.

[9] 李福贵. 316L 不锈钢焊接接头抗辐照损伤机制的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
LI Fu-gui. Study on the Mechanism of Radiation Damage Resistance of 316L Stainless Steel Welding Joint[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.

[10] KUMAR N, LI C, LEONARD K J, et al. Microstructural Stability and Mechanical Behavior of FeNiMnCr High Entropy Alloy under Ion Irradiation[J]. Acta Materialia, 2016, 113(2): 230—244.

[11] JAMES F, ZIEGLER M D, ZIEGLER J P, et al. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter (2010)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2010, 268(11): 1818—1823.

[12] 万浩, 丁展, 赵振江, 等. He^+离子辐照 Inconel 718 合金表面形貌改变及机理研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(3): 442—449.
WAN Hao, DING Zhan, ZHAO Zhen-jiang, et al. Surface Morphology Alteration and Mechanism Study of Inconel718 Alloy Irradiated by He^+ Ions[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(3): 442—449.

[13] 李福贵, 雷玉成, 李天庆, 等. 奥氏体不锈钢焊接接头辐照偏析和辐照硬化的研究[J]. 材料导报, 2020, 34(4): 4098—4102.
LI Fu-gui, LEI Yu-cheng, LI Tian-qing, et, al. Study on Radiation Segregation and Irradiation Hardening of Austenitic Stainless Steel Weld Joints[J]. Materials Reports, 2020, 34(4): 4098—4102.

[14] VOYIADJIS G Z, PETERS R. Size Effects in Nanoindentation: an Experimental and Analytical Study[J]. Acta Mechanica, 2010, 211(2): 131—153.

[15] ASHBY M F. Results and Consequences of a Recalculation of the Frank-Read and the Orowan Stress[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(5): 679—681.

[16] JIAO Z, WAS G S. The Role of Irradiated Microstructure in the Localized Deformation of Austenitic Stainless Steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 407(1): 34—43.