DOI: 10.3901/JME.2015.22.047

焊后热处理对高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响*

李艺君^{1,2} 杜东旭^{1,2} 付瑞东^{1,2}

(1. 燕山大学亚稳材料科学与技术国家重点实验室 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学材料科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 对高氮奥氏体不锈钢进行搅拌摩擦焊接。焊接过程中没有出现氮元素的损失及其他相的生成。对焊接接头进行焊后热处理,以得到具有不同组织差异性的搅拌摩擦焊接头。微观组织分析表明:在焊态的接头中,焊核区晶粒细化且含有大量的小角度晶界,母材区与焊核之间存在明显的组织差异;热处理态接头中,焊核区的晶粒尺寸略小于母材,各种特征晶界的比例分数都与母材基本相当,接头内组织差异性减小。力学性能分析表明:大的组织差异使焊接接头呈现出典型的高匹配特征,屈服强度、抗拉强度明显升高,伸长率有所降低。较小组织差异的接头匹配模式发生变化,进而导致力学性能发生明显改变,屈服强度、抗拉强度降低,伸长率恢复到母材水平。

关键词: 高氮奥氏体不锈钢; 搅拌摩擦焊接; 焊后热处理; 组织差异; 强度匹配

中图分类号: TG453

Effect of Post-welded Heat Treatment on the Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joint of High-nitrogen Austenitic Stainless Steel

LI Yijun^{1,2} DU Dongxu^{1,2} FU Ruidong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Friction stir welding is applied to a high-nitrogen austenitic stainless steel. Loss of nitrogen and other precipitates are not found during the process of friction stir welding. In the as-welded joint, the nugget zone is consisted of fine grains with high fraction of low angle boundaries. Significant differences of microstructure are observed along the transverse direction of as-welded joint. Further, the post-weld heat treatment joint is shown an effectively weaken difference. The differences of microstructure have a significant impact to the mechanical property. In the as-welded, the distribution of different microstructures leads to overmatching characteristic with higher strength but lower ductile. In the post-weld heat treatment joint, the strength matching mode is changed. The elongation of the joint is increased companied with enhanced strength.

Key words: high-nitrogen austenitic stainless steel; friction stir welding; post-weld heat treatment; differences of microstructure; strength matching

0 前言

高氮奥氏体不锈钢由于其高强度、良好的低温塑性以及无磁性等特点,作为一种结构材料在低温环境中具有很大应用潜力^[1-3]。然而,采用传统熔化焊方法焊接高氮钢,焊接接头中容易产生氮元素

损失、气孔、焊缝区热裂纹以及热影响区氮化物析出等冶金问题,进而限制了该类钢的推广应用^[4-6]。搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是1991年由英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)发明的一项全新的固态焊接技术^[7],由于搅拌摩擦焊接过程中,焊缝金属未发生熔化,同时,焊缝金属经历了严重的热塑性变形,导致组织发生显著细化。因此,采用FSW技术有望解决上述高氮钢熔化焊接中出现的冶金问题。

* 河北省自然科学基金资助项目(E2013203370)。20150506 收到初稿, 20150810 收到修改稿

PARK 等^[8]最早对 23Cr-10Ni-6Mn-2Mo-0.5N 钢进行了搅拌摩擦焊接的尝试,证实焊接过程并未造成焊缝区中氮元素的损失。MIYANO 等^[9]研究了焊接热输入对 Fe-23Cr-0Ni-1Mo-1N 钢搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响,发现接头的屈服强度和抗拉强度均高于母材,但伸长率却有较大幅度的下降,各种热输入条件下的拉伸断裂均发生在热影响区。WANG 等^[10]得到高氮钢搅拌摩擦焊接头中也存在类似的结果。DU 等^[11]将这种现象归因于焊接接头内存在大的组织梯度。尽管高氮钢搅拌摩擦焊接头具有优于母材的强度,但是在一些情况下,焊接接头还要经历焊后的塑性变形。因此,这一类接头还应当具有良好的均匀变形能力。

由于焊接接头各区域组织结构不同,导致各区域间存在强度差异,形成了不同强度匹配形式的接头。焊接接头强度匹配是焊接结构完整性和可靠性研究领域的热点。对于高氮不锈钢,由于只由单一奥氏体构成,因此焊接接头的强度匹配形式主要与组织差异相关。然而目前为止,对于高氮钢搅拌摩擦焊接头组织差异与力学性能方面的研究比较少。因此,本文拟通过焊后热处理(Post-weld heat treatment, PWHT),来获得焊态和热处理态两种组织差异形式的接头,引入强度匹配和内部拘束的概念,讨论搅拌摩擦焊接接头力学性能随组织差异的变化规律。

1 试验方法

本试验所用材料为无镍高氮的 Fe-Mn-Cr 系奥氏体不锈钢,其化学成分如表 1 所示。在搅拌摩擦焊前,试板被热轧至 3 mm 的厚度,并在 1 100 °C 固溶 90 min 后水冷,以消除可能存在的化合物,得到单一的奥氏体组织。搅拌摩擦焊使用的搅拌头材质为钨钼合金,轴肩直径为 16 mm,搅拌针为锥台形无螺纹结构,根部直径 6 mm,顶部直径 3 mm,长 2.7 mm。焊接参数如下:搅拌头转速为 800 r/min,焊接速度为 50 mm/min,搅拌头倾角为 2°。为了避免焊接接头的氧化,在整个搅拌摩擦焊过程中,都使用氩气对焊接位置进行保护。为了降低焊接接头的组织梯度,对接头在 1 100 °C 保温 90 min 后进行水韧处理。

表 1 高氮奥氏体不锈钢化学成分(质量分数) %

元素	Fe	Cr	Mn	Mo	N	C	Cu	Si
质量分数	62.69	18.24	15.71	2.26	0.86	0.02	0.02	0.28

对焊态接头及焊后热处理接头垂直于焊接方

向横向取样,经过磨制、机械抛光、电化学抛光以及化学腐蚀后分别在光学显微镜及扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)上进行电子背散射衍射(Electron back-scattered diffraction, EBSD)分析。采用 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析 FSW 接头各区域的相组成。并采用 GB/T 20124-2006 惰性气体熔融热导法测量 FSW 焊接接头的氮元素分布。维氏硬度测试沿接头横截面中心线位置,每隔 0.5 mm,以 2 N 载荷,保压时间 10 s 打一个硬度点。室温拉伸试样沿焊缝横向加工,平行段长为 32 mm,宽度为 10 mm,应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。拉伸试验后,断口在 SEM 上进行分析。

2 试验结果及分析

2.1 接头组织分析

2.1.1 接头氮质量分数及相组成分析

图 1 为高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接头横截面的氮元素分布。如图所示,焊核区底部的氮质量分数与母材基本一致,焊核区中上部的氮质量分数在 0.80% 左右,仅略低于母材(0.86%)。其原因可能是在搅拌摩擦焊接过程中,由于轴肩与试板摩擦产热,焊核区表层温度高于底层,因此焊缝中上部分的氮元素更易扩散损失;此外,焊核区内刷金属的塑性流动可能也是加速氮元素发生扩散损失的原因之一。然而尽管如此,高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接头内氮元素损失量远远小于传统熔化焊接头。

图 1 焊态 FSW 接头氮元素分布图

图 2 为高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接头不同区域的 X 射线衍射分析。如图 2 所示,在焊接接头中只观察到奥氏体相的衍射峰,并没有其他相的生成。

图 2 焊态 FSW 接头各区域 X 射线衍射图谱

2.1.2 热处理前后接头组织特征及分析

图 3 所示为无缺陷的高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊焊态及热处理态接头的宏观形貌。焊态及热处理态接头母材和焊核区的 EBSD 晶粒取向图 (Orientation imaging microscopy, OIM) 如图 3 所示。此外, 在 OIM 图中还加入了晶界特征的分布, 其中白色实线代表晶界角低于 15° 的小角度晶界 (Low angle boundaries, LABs), 灰色实线代表孪晶界 (Twin boundaries, TBs), 黑色实线代表晶界角大于 15° 的非孪晶关系的大角度晶界 (Random high angle

boundaries, R-HABs)。两种状态下接头不同区域的晶粒尺寸及晶界信息统计如表 2 所示。此外, 为了讨论焊态和热处理态搅拌摩擦焊接接头的显微组织特征及差异性分布, 将图 3 中 OIM 图的晶界分布信息统计如图 4 所示。图 4a 用比晶界长度来对晶界信息进行统计, 其含义为单位面积上的晶界长度 (其数值等于特定晶界的长度除以 EBSD 图片面积), 这种度量方法可以更直接客观地对比不同区域的晶界信息。图 4b 为图 3c~3f 中各个区域不同类型晶界的比例分数。

图 3 FSW 接头的横截面组织相片

表 2 焊态及焊后热处理态接头不同区域晶粒尺寸及晶界信息统计

参数	焊态 FSW 接头		焊后热处理态 FSW 接头	
	母材	焊核区	母材	焊核区
平均晶粒尺寸/ μm	54.65	7.05	49.72	40.34
LABs 所占比例分数(%)	3.26	31.05	1.73	1.61
R-HABs 所占比例分数(%)	39.75	49.26	39.85	46.86
TBs 所占比例分数(%)	56.99	19.69	58.42	51.52

如图 3 所示, 由于搅拌摩擦焊接过程剧烈热塑性变形的作用, 使得焊核区发生动态再结晶, 晶粒尺寸明显细化。然而, 从宏观拼图中并不能明显地区别热影响区和母材, 热影响区和母材的晶粒没有

明显差别, 晶粒尺寸大小几乎一致。从表 2 可知, 在母材区和焊核区之间形成了明显的晶粒尺寸差异。从焊态接头 OIM 图以及图 4 中可以看出, 母材和焊核区除了晶粒尺寸上的差异外, 在显微结构上也有明显的差别。由于母材在焊前经历了 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 条件下 $90\ \text{min}$ 的固溶处理, 因此主要由大角度晶界和孪晶构成, 小角度晶界的比例非常小。而焊核区由于动态再结晶的作用, 尽管仍然保留较多的孪晶 (图 4a), 但是其比例分数 (如图 4b 及表 2 所示) 明显减少。焊核区的晶界以再结晶形核的大角度晶界为主。此外, 从图 4a 中还可以看到, 焊核区大角度晶界的分布不是一个从小角度区域向大角度区域渐进增多的特征, 而是在 45° 左右位置形成一个较宽泛的峰。这种特征意味着焊核区的再结晶机制不是连续动态再结晶 (亚晶持续累积位错, 从而使得晶界角

图 4 FSW 接头各区域晶界信息统计

逐渐增大, 因此在晶界分布上应表现出从小角区域向大角区域渐进增加^[12-14], 而是以不连续动态再结晶为主。然而, 与铝合金搅拌摩擦焊接接头不同的是, 高氮钢搅拌摩擦焊焊核区小角度晶界的比例很高, 约占 31%。对于铝合金来说, 试验用高氮奥氏体钢为低层错能材料。在高层错能材料中, 局部位错容易发生重组和攀移, 进而重排在亚晶界处发生动态回复和动态再结晶。因此在热变形条件下容易发生完全的再结晶。相反, 对于低层错能材料, 完全的再结晶较难发生。由以上的分析可以得知, 在高氮奥氏体不锈钢 FSW 接头中, 存在着明显的组织差异。在焊后热处理的过程中, 组织演变主要表现为两方面: 一方面, 对比焊态及 PWHT 态 OIM 图, 可以看到母材的晶粒没有长大。这主要是因为焊后热处理的温度仍为 1 100 °C, 与母材焊前热处理的温度一样, 因此晶粒已达到稳定状态, 缺少进一步长大的驱动力。而在焊核区, 由于晶粒细小, 晶粒长大需要的驱动力相对变低, 因此在焊后热处理过程中晶粒发生明显长大(表 2)。另一方面, 从图 3 和图 4 中可以看到, 焊核区的晶粒在热处理的过程

程中发生静态再结晶, 小角度晶界消失, 重新形成无畸变的新晶粒。此外, 如表 2 及图 4b 所示, 热处理后焊核区的孪晶比例也明显增加, 各种特征晶界的比例关系与母材也基本相当。因此, 通过焊后热处理获得了具有较小组织差异的高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接接头。

2.2 焊后热处理对接头力学性能的影响

2.2.1 焊后热处理对接头硬度分布的影响

图 5 显示的是焊态和焊后热处理态的搅拌摩擦焊接接头的硬度分布。如图所示, 对于焊态接头来说, 由于焊核区的晶粒明显细化, 该区域的硬度值很高, 可达到 380 HV 左右, 远远高于母材的硬度。因此, 焊核区和母材区之间的组织梯度导致接头中存在明显的硬度梯度分布。在较小组织差异的热处理态接头中, 焊核区的硬度明显降低, 仅略高于母材(10 HV 左右), 硬度梯度显著降低。

图 5 焊态和 PWHT 态 FSW 接头横截面硬度分布

2.2.2 焊后热处理对接头拉伸性能及变形断裂过程的影响

图 6 所示为焊态及焊后热处理态高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接接头的拉伸性能曲线。接头的屈服强度、抗拉强度以及伸长率的具体数值如表 3 所示。从图 6 及表 3 中可以看出, 焊态接头的屈服强度和抗拉强度显著增加, 分别提高了大约 170 MPa 和 113 MPa。此外, 接头的伸长率降低, 仅为母材的 79%。经过焊后热处理, 接头的屈服强度和抗拉强度仍略高于母材, 但同热处理前相比, 屈服强度大幅下降, 降低约 160 MPa, 而抗拉强度仅下降约 59 MPa。此外, 热处理态接头的伸长率恢复到了与母材基本相当的水平。

图 7 所示为拉伸试样断裂后的宏观相片。从中可以看出, 无论是焊态还是热处理态的接头, 其断裂位置都是远离焊核的母材区。焊态接头中焊核区和母材区在拉伸的过程中变形不均匀, 出现了明显

的“鼓肚”现象，拉伸变形主要集中在母材区；而热处理后的接头试样各区域变形相对均匀。

图6 焊态及PWHT态FSW接头的工程应力应变曲线

表3 焊接接头的拉伸性能

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)
焊态接头	680.5	987.68	46.7
焊后热处理态接头	520.7	928.9	57.8
母材	510.5	874.9	59.3

图7 焊态及PWHT态FSW接头的断裂试样宏观相片

图8所示是高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接头拉伸试样断口扫描电镜图。从图中可以看出，焊态和热处理态试样断口附近均有明显的缩颈特征，且都呈现出韧窝形貌，为典型的韧性断裂特征。虽然两种状态的拉伸试样均断裂在相似位置的母材区，但对于具有较大组织差异的焊态接头来说，由于拉伸过程中焊核区对母材的拘束作用，导致母材区应力状态较为复杂，断面比较平整。小组织梯度的热处理态接头拉伸时发生较均匀的变形，断面收缩率略大于焊态接头。由图3及前文的分析可知，在焊态接头中存在明显的组织差异，这种组织差异导致了接头各区域力学性能的差异。焊核区相比于母材发生了明显的晶粒细化，细晶强化作用使得焊核区的屈服强度高于母材区。因此在大组织差异的焊态接头上，形成了典型的以高匹配为特征的强度

(a) 焊态FSW接头

(b) 焊态FSW接头

(c) PWHT态FSW接头

(d) PWHT态FSW接头

图8 焊接接头拉伸试样断口扫描电镜图

匹配形式。在拉伸试验过程中，由于母材区屈服强度低于焊核，拉伸变形首先发生在焊接接头的母材区，直到整个接头的外载应力值达到焊核区的屈服强度时，焊核才参与变形。不同于均质材料的拉伸变形行为，在高匹配接头中，屈服强度较高的焊核区会对母材区产生拘束效应。当应变集中在母材区

时, 由于高屈服强度的焊核区变形程度较低, 因此会阻碍母材区发生垂直于拉伸方向的塑性变形。此时母材区的应力状态会从单一轴向应力状态变位多向应力状态, 母材区要继续塑性变形需要更大的外载拉伸应力。基于以上原因, 高匹配特征的焊态接头具有明显高于母材的屈服强度。随后, 当拉伸试样的外载应力达到焊核屈服强度后, 焊核区开始发生塑性变形。但由于焊核区发生细晶强化的作用, 该区域的应变硬化率也较母材有所升高。因此在焊核区和母材区共同发生塑性变形的过程中, 焊核区更易发生加工硬化, 使其强度升高。进而, 拉伸变形依旧集中发生在母材区。由此可知, 当拉伸试样达到母材抗拉强度发生断裂前, 焊核区很难参与变形。在拉伸试样标距范围内, 应变只集中发生在母材区, 焊核区并未发生明显应变(如图 7 中“鼓肚”现象)。因此, 相对于整个标距范围内发生均匀变形的母材拉伸试样, 焊态接头试样的伸长率明显降低。由此可见, 大组织差异的焊接接头拉伸变形过程呈现出典型的高匹配特征。

在较小组织差异的搅拌摩擦焊接接头中, 由于焊后热处理使焊核区晶粒长大, 焊核区屈服强度降低。高匹配接头导致的拘束效应减弱, 从而导致接头整体的屈服强度相应下降。此外, 由于接头组织梯度降低, 焊核区的应变硬化率也有所降低。因此焊核区在拉伸过程中也参与变形, 标距范围内拉伸试样各区域变形相对均匀, 从而使得伸长率有所升高, 基本恢复到母材水平。基于以上分析可知, 组织差异性对搅拌摩擦焊接接头的力学性能及变形行为有显著的影响。

3 结论

(1) 高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接的过程中没有发生氮的损失。焊接接头各个区域都是由单一的奥氏体相组成, 没有其他相的析出。

(2) 在焊态的接头中, 焊核区细化且含有大量的小角度晶界。母材区与焊核之间存在明显的组织差异; 热处理态接头中, 焊核区的晶粒尺寸略小于母材, 各种特征晶界的比例分数都与母材基本相当, 接头内组织差异较小。

(3) 搅拌摩擦焊接接头中的组织差异性对力学性能有显著的影响。较大的组织差异使接头呈现出典型的高匹配特征, 屈服强度、抗拉强度明显升高, 伸长率有所降低。组织差异性较小的接头匹配模式

发生变化, 进而导致力学性能发生明显改变, 屈服强度、抗拉强度降低, 伸长率恢复到母材水平。

参 考 文 献

- [1] YUAN Z Z, DAI Q X, ZHANG Q, et al. Effects of temperature cycling and nitrogen on the stability of microstructures in austenitic stainless steels[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(1): 18-22.
- [2] TOMOTA Y, NAKANO J, XIA Y, et al. Unusual strain rate dependence of low temperature fracture behavior in high nitrogen bearing austenitic steels[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(9): 3099-3108.
- [3] LEE T, OH C, LEE C G, et al. Precipitation of σ -phase in high-nitrogen austenitic 18Cr-18Mn-2Mo-0.9N stainless steel during isothermal aging[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(10): 1325-1328.
- [4] WOO I, KIKUCHI Y. Weldability of high nitrogen stainless steel[J]. *Journal of High Temperature Society*, 2002, 31: 1334-1343.
- [5] NISHIMOTO K, MORI H. Hot cracking susceptibility in laser weld metal of high nitrogen stainless steels[J]. *Science & Technology of Advanced Materials*, 2004, 5: 231-240.
- [6] KAWAHITO Y, MIZUTANI M, KATAYAMA S. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fibre laser[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2009, 14(4): 288-294.
- [7] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir butt welding: Great Britain Patent Application, 9125978.8[P]. 1991-12-08.
- [8] PARK S H C, SATO Y S, KOKAWA H, et al. Microstructure of friction-stir-welded high-nitrogen stainless steel[J]. *Mater. Sci. Forum.*, 2007, 539-543: 3757-3762.
- [9] MIYANO Y, FUJII H, SUN Y, et al. Mechanical properties of friction stir butt welds of high nitrogen-containing austenitic stainless steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(6): 2917-2921.
- [10] WANG D, NI D R, XIAO B L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of friction stir welded joint of Fe-Cr-Mn-Mo-N austenite stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2014, 64(9): 355-359.
- [11] DU D, FU R, LI Y, et al. Gradient characteristics and strength matching in friction stir welded joints of Fe-18Cr-16Mn-2Mo-0.85N austenitic stainless steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 616: 246-251.
- [12] SATO Y S, NAGAHAMA Y, MIRONOV S, et al.

Microstructural studies of friction stir welded Zircaloy-4[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(3): 241-244.

- [13] MIRONOV S, SATO Y S, KOKAWA H. Microstructural evolution during friction stir welding of Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(29): 7498-7504.
- [14] LI Y J, FU R D, DU D X, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded joints of Zr-Ti alloy[J]. Science & Technology of Welding &

Joining, 2014, 19: 588-594.

作者简介: 李艺君, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高熔点金属搅拌摩擦焊接及加工。

E-mail: liyijun1987@126.com

杜东旭, 男, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为高氮钢搅拌摩擦焊接及加工。

E-mail: 327321026@qq.com

付瑞东(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为搅拌摩擦焊接及加工, 金属热塑性变形和金属强化。

E-mail: rdfu@ysu.edu.cn

(上接第 46 页)

- [14] 李海祥, 孙明先, 李相波, 等. 冷喷涂 65%Zn-Al 复合涂层的沉积特性[J]. 中国有色金属报, 2010, 20(7): 1354-1359.
- LI Haixiang, SUN Mingxian, LI Xiangbo, et al. Depositing characteristic of 65% Zn-Al coating produced by cold gas dynamic spray[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7): 1354-1359.
- [15] SPENCER K, FABIJANIC D M, ZHANG M X. The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(3): 336-344.
- [16] 郑修麟, 王泓, 鄢君辉, 等. 材料疲劳理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHENG Xiulin, WANG Hong, YAN Junhui, et al. Materials fatigue theory and engineering applications[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [17] LIU H J, FUJII H, MAEDA M, et al. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 692-696.

- [18] AYDIN H, BAYRAM A, UĞUZ A, et al. Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state[J]. Materials and Design, 2009, 30(6): 2211-2221.

- [19] ZHANG Z, XIAO B L, MA Z Y. Hardness recovery mechanism in the heat-affected zone during long-term natural aging and its influence on the mechanical properties and fracture behavior of friction stir welded 2024al-t351 joints[J]. Acta Materialia, 2014, 73: 227-239.

- [20] LI W Y, YIN S, GUO X, et al. An investigation on temperature distribution within the substrate and nozzle wall in cold spraying by numerical and experimental methods[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(1): 41-48.

作者简介: 张志函, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为搅拌摩擦焊。

E-mail: hanhizi@163.com

李文亚(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 材料学院副院长。主要研究方向为摩擦焊与冷喷涂。

E-mail: liwy@nwpu.edu.cn