

表面失效及防护

冷喷涂改善 2219 铝合金熔焊接头残余应力新方法

邹阳帆¹, 王非凡², 鄢东洋², 李文亚¹, 杨夏炜¹, 胡凯玮¹

(1.西北工业大学 a.凝固技术国家重点实验室 b.陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 采用冷喷涂技术改善 2219 铝合金变极性钨极氩弧焊 (VPTIG) 焊接接头残余应力。**方法** 采用冷喷涂技术在 8 mm 厚 2219 铝合金 VPTIG 焊接接头表面进行 Cu 涂层制备, 分析冷喷涂前后接头微观组织、力学性能及残余应力的变化, 探究冷喷涂过程中高速碰撞颗粒的“喷丸效应”与加热气体的“热效应”对接头残余应力的改善作用及内在机制。**结果** 冷喷涂前后, 接头整体的微观组织无明显变化, 但在焊缝表面 (Cu 涂层与焊缝结合面处) 观察到明显的塑性变形。冷喷涂后, 焊缝区上表面显微硬度提高, 作用深度约 2 mm (余高处); 接头抗拉强度表观上稍有降低, 这是由于涂层对焊缝的拉伸应变局部化改变所致, “喷丸效应”与“热效应”单独作用下, 接头抗拉强度无明显变化, 所有拉伸试样均从焊趾处沿着熔合区发生断裂。焊态接头残余应力分布总体呈拉应力状态, 在焊缝处最大, 经过冷喷涂后, 焊缝残余拉应力峰值从约 200 MPa 降到约 24 MPa, 大部分区域从拉应力变为压应力, 且分布均匀性变好。**结论** 冷喷涂技术可以显著改善 VPTIG 焊接接头残余应力分布。冷喷涂粒子的“喷丸效应”对基体残余应力的改善作用显著。高温气流的“热效应”虽未能显著降低残余应力, 但使应力分布变得均匀。

关键词: 2219 铝合金; 变极性钨极氩弧焊; 残余应力; 冷喷涂; 热效应; 喷丸效应

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0240-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.029

New Method to Modify the Residual Stress in Variable Polarity TIG Welded 2219 Aluminum Alloy Joints by Cold Spraying

ZOU Yang-fan¹, WANG Fei-fan², YAN Dong-yang², LI Wen-ya¹, YANG Xia-wei¹, HU Kai-wei¹(1.a.State Key Laboratory of Solidification Processing, b.Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The work aims to modify the residual stress of VPTIG welded 2219 aluminum alloy joints by cold spraying. Cu coating was prepared on the 8 mm thick VPTIG welded 2219 aluminum alloy joint surface by cold spraying (CS) technology. The microstructure, mechanical property and residual stress changes of joints before and after CS were analyzed. The modification effect on the residual stress of joints and its mechanism caused by "shot peening effect" of high-speed colliding

收稿日期: 2019-02-14; 修订日期: 2019-06-04

Received: 2019-02-14; Revised: 2019-06-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51574196, U1637601)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51574196, U1637601)

作者简介: 邹阳帆 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为搅拌摩擦焊接与冷喷涂。

Biography: ZOU Yang-fan (1995—), Female, Master, Research focus: friction stir welding and cold spraying.

通讯作者: 李文亚 (1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为摩擦焊接及冷喷涂。邮箱: Liwy@nwpu.edu.cn

Corresponding author: LI Wen-ya (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: friction welding and cold spraying. E-mail: Liwy@nwpu.edu.cn

particles and "heating effect" of hot gas in CS were explored. There was no significant change in the microstructure of the joint before and after CS. However, the obvious plastic deformation was observed on the joint surface (i. e. the interface between Cu coating and joint fusion zone). After spraying, the microhardness of near-top surface of the weld zone was increased, and the influence depth was about 2 mm (at the weld toe). The tensile strength of the coated joint was slightly reduced, which was caused by the localized change of tensile strain of the joint under the constraint of Cu coating. However, there was no significant change of joint tensile strength after "shot peening effect" or "heating effect" treatment. All specimens fractured along the fusion zone initiating at the weld toe. The distribution of residual stress in welded joints was generally tensile stress, with the maximum at the weld joint. After cold spraying, the residual peak stress of the joint was decreased from about 200 MPa to about 24 MPa, and the stress in most regions of the joint changed from tensile stress to compressive stress, and was distributed more uniformly. Therefore, CS can improve the residual stress of VPTIG welded 2219 joints significantly. The "shot peening effect" of particles can remarkably improve the residual stress of the joint. Although the "heating effect" of high-temperature gas flow cannot significantly reduce the residual stress, the residual stress distribution becomes more uniform.

KEY WORDS: 2219 aluminum alloy; variable polarity tungsten inert gas welding; residual stress; cold spraying; heating effect; shot peening effect

2219 铝合金是一种典型的可热处理强化高强铝合金，具有焊接性好、耐腐蚀、低温韧性好等优点，被广泛应用于航天领域（如火箭贮箱）^[1]。2219 铝合金的主要强化元素有 Cu、Mn、Ti，当其处于-250~+250 ℃时，各项性能可以得到极大发挥^[2]。目前，运载火箭贮箱的环焊缝和角焊缝连接主要采用变极性氩弧焊（VPTIG）方法^[3-5]。在焊接过程中，不均匀的加热和冷却会在焊缝中心产生残余拉应力，残余拉应力会促使裂纹缺陷处发生脆性断裂，并降低材料的耐腐蚀性。因此，在实际生产中常需要有效地减少焊接残余应力。

目前，常用的降低焊后残余应力的方法有喷丸法、反变形法、冷拉伸法、振动法、激光冲击法、超声冲击处理等。盛湘飞等^[6]基于 Abaqus 有限元模拟软件，分析了不同喷丸条件下 7075 铝合金基板残余应力的分布规律。结果显示，当喷射角度固定时，弹丸撞击的动能消耗率及应变能转化率较高，表面覆盖率大，构件表面所获压应力较大。张超等^[7]采用脉冲 Nd:YAG 激光器，对 WC-Co 硬质合金表面进行冲击强化处理，结果表明，当激光能量大于 10 J 时，冲击强化区域的晶粒细化，组织致密，孔洞和凹陷基本消失，残余压应力提高 77%。马国等^[8]利用超声冲击法对 Q345 对接接头热影响区进行降应力处理，结果显示，超声冲击处理可以使表面拉应力转变为压应力，消除率可达 88%~130%。但这些方法存在一定局限性，如反变形法仅适用于薄壁结构，对于厚大构件的操作难度较大，成本较高；振动法不适合用在防止断

裂和应力腐蚀失效的构件上^[9]。
冷喷涂是一种高速粒子碰撞的涂层制备技术，喷涂颗粒经特殊设计的 Laval 喷嘴加速后以 300~1200 m/s 的速度在完全固态下撞击基体，产生较大的塑性变形而沉积于基体表面^[10-11]，目前主要应用于制备防腐蚀、耐高温、耐磨等各类涂层^[12]，以及表面修复^[13]和增材制造^[14]领域。课题组^[15-17]在利用冷喷涂技术改善搅拌摩擦焊接接头的强韧性时，发现冷喷涂态接头的残余应力有所改善，并通过剥离喷涂过程中的“热效应”和“喷丸效应”，探索了改善搅拌摩擦焊接头残余应力分布的内在机理。鉴于上，课题组提出了冷喷涂改善接头残余应力的新方法，就是利用冷喷涂过程中具有一定温度的高速粒子流撞击焊缝区及其附近，通过在接头表面产生压应力，改善应力分布，同时不会降低接头力学性能，而且还能提高接头疲劳强度及使用寿命。

基于以上研究成果，本文提出是否冷喷涂也可以改善熔焊接头的残余应力呢？因此，对 8 mm 厚的 2219 铝合金 VPTIG 焊接接头进行冷喷涂 Cu 涂层制备，旨在研究冷喷涂过程对熔焊接头残余应力的改善效果及机理。

1 试验

试验材料为 8 mm 厚的 2219 铝合金板，其名义化学成分及力学性能如表 1 所示。VPTIG 焊接工艺参数如表 2 所示。利用盲孔法测完焊接接头残余应力

表 1 2219 铝合金的主要化学成分和力学性能
Tab.1 Chemical compositions and mechanical properties of 2219 aluminum alloy

Chemical compositions/wt%								Mechanical properties		
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%
0.3	0.3	6.5	0.6	0.05	0.10	0.15	Bal.	275	375	8

表 2 2219 铝合金 VPTIG 焊接工艺参数

Tab.2 VPTIG welding parameters of 2219 aluminum alloy

	U/V	I/A	V/ (mm·min ⁻¹)	Gas flow/ (L·min ⁻¹)	Feeding speed/ (mm·min ⁻¹)
Backing	16	190	0.150	1Ar+11He	
Filling	17	265	0.102	12He	
Cosmetic	18	310	0.045	11Ar+0.5He	1300

后,对焊缝及部分母材区表面进行冷喷涂,粉末为 15~45 μm 的球形铜粉,喷涂气体为氮气,喷涂区域完全覆盖焊接接头并适当覆盖部分母材(统一设置为 75 mm),喷涂方向和区域如图 1 所示,具体冷喷涂工艺参数见表 3,第一组为冷喷涂实验;第二组实验

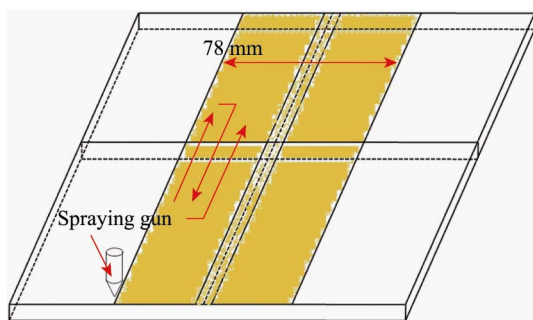
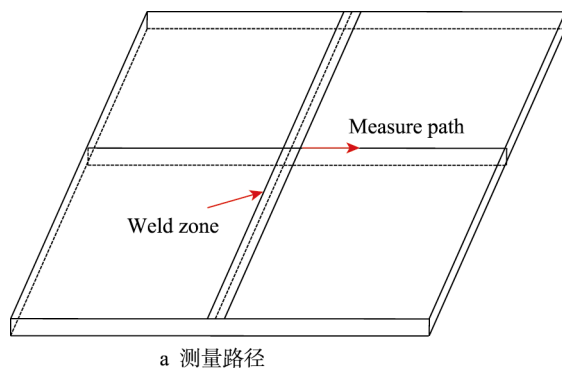
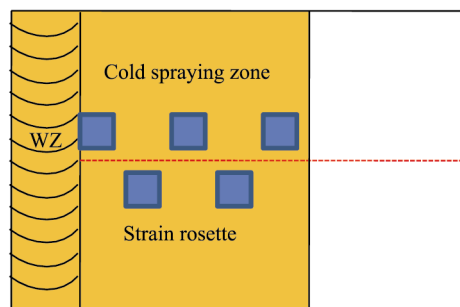


图 1 冷喷涂喷枪行走路径

Fig.1 Path of cold spraying gun



a 测量路径



b 测点位置

图 2 应变花布局

Fig.2 Layout of the rosettes: (a) measurement path; (b) measurement location

2 结果与分析

2.1 焊态及喷涂态接头的微观组织

2219 铝合金 VPTIG 后,所获焊缝成形美观,无飞边、毛刺等表面缺陷。图 3 为焊接接头的横截面微观组织,可以将整个焊接接头分为四个区域:焊缝区(WZ)、熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)及母材区(BM)。从图 3b 可以看出,焊缝区晶粒细小、均匀,为凝固形成的等轴晶。

采用 300 $^{\circ}\text{C}$ 气体温度冷喷涂 Cu 涂层后,喷涂态接头各个区域的微观组织如图 4 所示。从图 4a 可以

表 3 冷喷涂工艺参数

Tab.3 Cold spraying process parameters

Effect	Substrate/ Powder	Pressure/ MPa	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Distance/ mm	Spraying speed/ (mm·s ⁻¹)
Cold spraying	2219/Cu	2.6	300	30	50
Shot peening	2219/Cu	2.6	25	30	50
Heating	2219	2.6	300	30	50

不加热,仅有“喷丸效应”;第三组实验不送粉,仅有“热效应”。

将焊态及喷涂态接头沿着轧制方向进行切割,并用砂纸对其打磨,再进行抛光、腐蚀(腐蚀液为 1.0%HF+1.5%HCl+2.5%HNO₃+95.0%H₂O 的混合酸)。在光学显微镜下观察冷喷涂前后接头的表面形貌及微观组织。用显微硬度计测量接头的硬度分布,载荷 200 g,时间 15 s;再对焊接接头进行室温拉伸实验,拉伸速率为 1 mm/min,Cu 涂层厚度不计入接头厚度,最后利用扫描电镜对拉伸断口进行观察。残余应力采用盲孔法进行测量,其原理是在待测表面粘贴应变花,通过在应变花中心打孔,被测点处应力得到释放而产生应变,应变仪根据测点所释放的应变计算得到该点的残余应力^[18]。本文使用的应变仪为 HPMK-4 型盲孔残余应力测试仪,孔径为 1.5 mm,孔深为 2 mm。测试路径及应变花粘贴位置如图 2 所示。

看出,Cu 涂层厚度约为 300 μm 。通过对比焊缝显微组织发现,焊态接头和喷涂态接头的微观组织无明显区别,但在涂层与基体的结合界面处可以看到晶粒发生明显塑性变形,如图 5 所示。基体上表面在高速粒子流的撞击下发生塑性变形,部分残余拉应力可以得到释放。李文亚等^[16]对 2024 铝合金的搅拌摩擦焊接头进行冷喷涂处理。结果显示,喷涂态接头的拉伸强度和硬度均上升,这是由于冷喷涂过程中的“热效应”和“喷丸效应”使得搅拌区中大角度晶界所占比例相比于焊态接头有所提高(67.2%,57.4%),而大角度晶界能够阻碍位错运动,提高焊接接头的应变硬化能力,从而提高接头的性能。

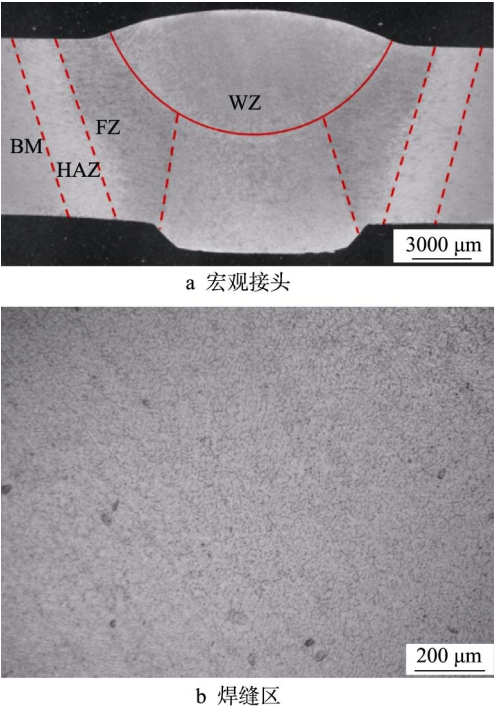


图 3 焊接接头微观组织
Fig.3 Microstructures of the as-welded joint:
(a) whole joint; (b) WN

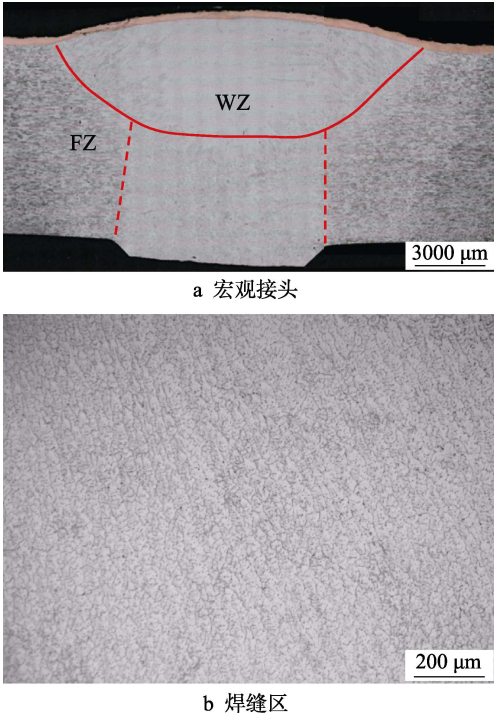


图 4 喷涂态接头微观组织
Fig.4 Microstructures of the coated joint:
(a) whole joint; (b) WN

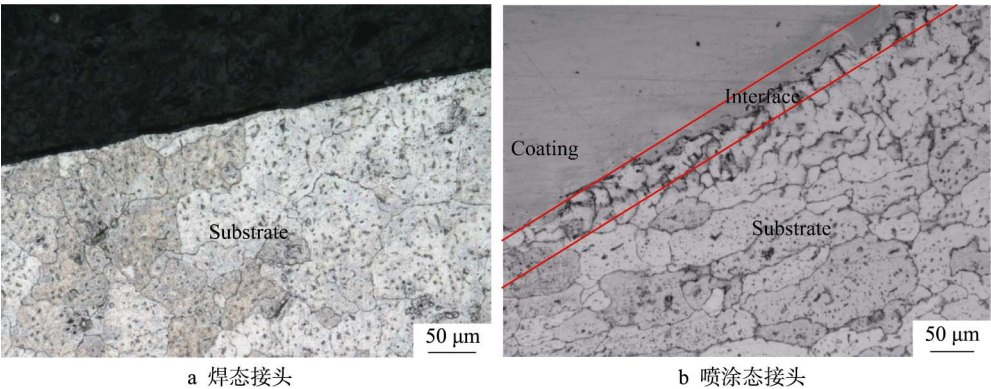


图 5 界面微观组织
Fig.5 Microstructure of the interface: (a) as-welded joint; (b) coated joint

2.2 焊接接头的力学性能

从力学性能测试结果可以看出，VPTIG 焊接接头的力学性能比传统的 TIG 焊接接头有大幅度提高^[19]，抗拉强度为 310 MPa。图 6 为喷涂前后焊缝的力学性能测试结果，可以看出，喷涂态接头的拉伸性能相比焊态接头稍有降低，而“喷丸效应”及“热效应”处理下所获得的接头的力学性能和焊态接头基本一致。通过分析得知，喷涂后接头强度的降低，是因为喷涂过程对焊缝近上表面产生加工硬化作用，在拉伸过程中，熔合区因焊缝的局部强化而变“弱”，过早应变局部化，从而使接头抗拉强度稍有降低。而“喷丸效应”及“热效应”对接头的加工硬化作用较弱，所以接头抗拉强度无明显变化。

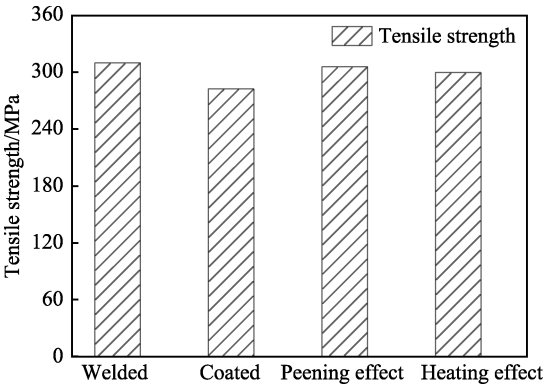


图 6 焊态、喷涂态、喷丸效应及热效应
处理后试样的抗拉强度
Fig.6 Joint tensile properties in as-welded, coated,
peening effect and heating effect states

从图 7 可以看出,焊态及喷涂态接头均从焊趾处沿着熔合区发生断裂。对于焊态接头来说,一方面是由于焊趾的存在,使得该区域应力集中比较严重;另一方面,该区域是焊缝金属向热影响区过渡的区域,晶粒粗大,化学成分和组织成分很不均匀,故熔合区成为焊态接头的薄弱区。对于喷涂态接头来说,虽然

拉应力值降低,应力集中情况得到缓解,但是由于喷涂过程对焊缝区的强化作用,接头过早发生应变局部化,从熔合区发生断裂。图 8 和图 9 分布为焊态及喷涂态接头断裂的微观形貌,从图中可以看出,断口存在大量的韧窝和撕裂棱,并且韧窝内含有第二相粒子,成分分析表明该粒子是 CuAl_2 。

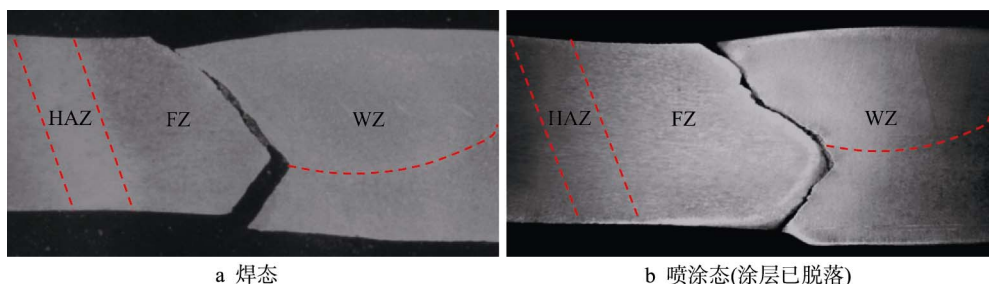


图 7 接头拉伸试样断裂形貌

Fig.7 Optical micrographs of joint tensile fracture: (a) welded joint;(b) coated joint (coating has fallen off)

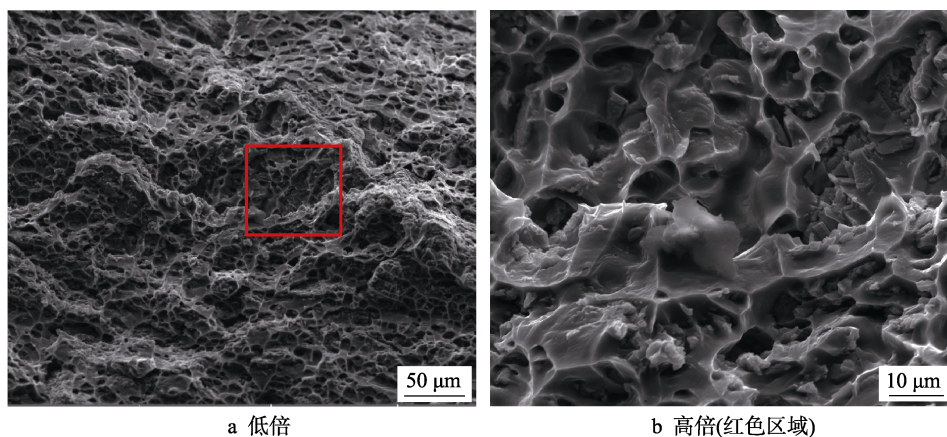


图 8 焊态接头拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology of the welded joint: (a) low magnification; (b) high magnification (red rectangle)

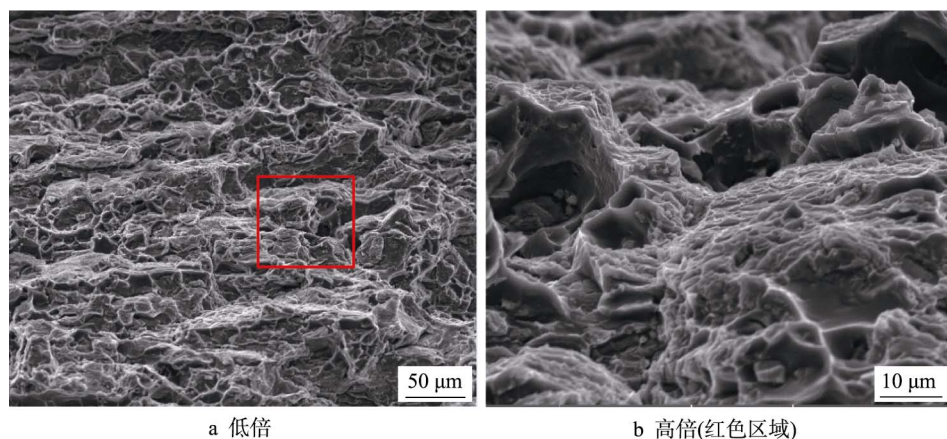


图 9 喷涂态接头拉伸断口形貌

Fig.9 Tensile fracture morphology of the coated joint: (a) low magnification; (b) high magnification (red rectangle)

对比焊态接头与喷涂态接头的硬度值(如图 10)可以看出:冷喷涂处理后,接头近表面焊缝区域的硬度稍有提高(约 4.8 HV)。这是由于冷喷涂过程中,粒子撞击基体,对基体表面起到加工硬化的作用,从

而使得硬度值稍有提高。通过观察试样厚度方向硬度值可以看出,喷涂仅改变试样近上表面的硬度值,作用深度大约为 2 mm(含余高)。

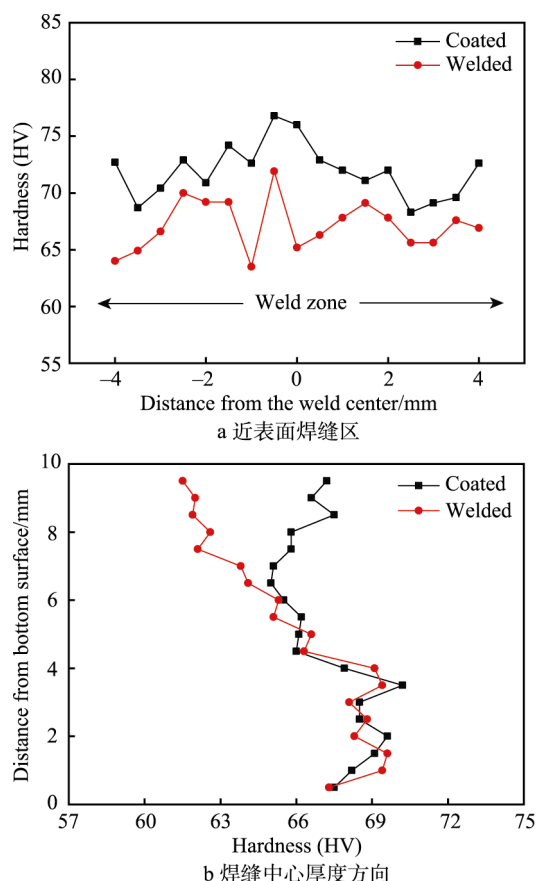


图 10 焊态及喷涂态接头硬度分布

Fig.10 Microhardness profiles of welded and coated joints:

(a) weld zone near the top surface;

(b) along the thickness in the center of weld zone

2.3 2219 铝合金 VPTIG 焊接接头残余应力分布

如图 11 所示,可以看出接头应力以拉应力为主,焊缝处拉应力最大,越靠近母材区域,应力值越小。这是由于在焊接过程中,焊缝区以远高于周围区域的速度被急剧加热,并发生局部熔化,该区域材料受热而膨胀,热膨胀又受到周围较冷区域的约束,造成热应力,受热区温度升高后屈服极限下降,热应力可部分超过该屈服极限,结果焊缝区形成了塑性的热压

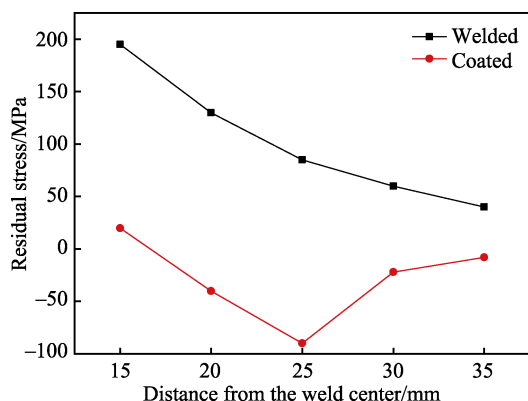


图 11 焊态及喷涂态接头残余应力分布

Fig.11 Residual stress distribution of welded and coated joints

缩;冷却过程中,该区域相比于周围区域变窄,因此该区域就呈现拉伸残余应力,周围区域则承受压缩残余应力。拉应力的存在对接头强度、疲劳性能、耐腐蚀性能、尺寸稳定性等都有不利影响,需要有效降低焊后残余应力。尹何迟等^[20]采用振动时效法对钢结构焊接件进行处理,以消除拼焊处残余应力,提高焊接件的尺寸精度。结果显示,经过振动时效处理后的焊接件焊缝最大主应力下降 31%。

在冷喷涂过程中,被高速气流加速的粒子与基体发生碰撞,从而使基体局部接触区发生强烈塑性变形,基体表层在颗粒不断撞击下产生残余压应力。同时,为保证喷涂粉末的沉积效率和涂层质量,通常加速气体要预热到较高温度,高速加热气体将对基体产生热冲击作用,可以使基体应力分布均匀化。对比焊态和喷涂态接头的残余应力分布,可以明显看出,经过喷涂处理后的接头,残余应力大幅度降低(应力峰值从约 200 MPa 降低到约 24 MPa,约 88%),相比其他焊接方法应力降低效果更为显著。这是由于在喷涂过程中,高速粒子撞击基体表面,使表面发生塑性变形,应力得到释放,其原理类似于“喷丸效应”;此外,受到热的作用,粒子和基板极易发生塑性变形,其原理类似于“热效应”。“喷丸效应”的存在可以产生压应力以抵消部分残余拉应力(应力峰值从约 180 MPa 降低到约 93 MPa,约 48%),而“热效应”的存在使得接头残余应力分布更加均匀(应力极差从约 120 MPa 降低到约 72 MPa)^[21-22],如图 12 所示。因此两种效应的结合不仅可以降低接头残余拉应力,同时可以减小接头各区域应力差,使接头更加均匀、一致。

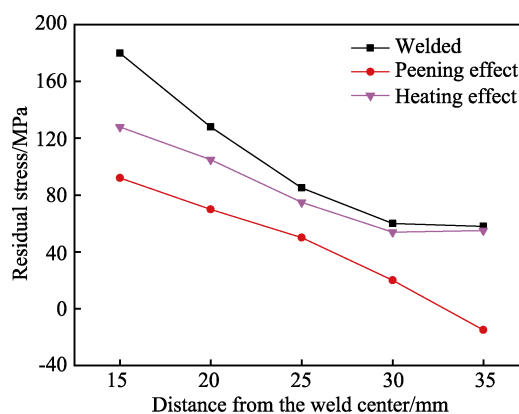


图 12 喷丸效应及热效应作用下接头残余应力分布

Fig.12 Residual stress distribution of the joint after "peening effect" and "heating effect"

3 结论

1) 焊态接头和喷涂态接头的微观组织无明显区别,但在涂层与基体的结合界面处可以看到晶粒发生明显塑性变形。

2) 冷喷涂处理后,焊缝区显微硬度明显提高;从焊缝厚度方向硬度分布可以看出,喷涂过程对 2219

铝合金接头的硬化深度约为 2 mm。

3) 冷喷涂 Cu 涂层后, VPTIG 焊接接头拉伸性能表观上稍有降低, 而“喷丸效应”与“热效应”单独作用下, 接头抗拉强度无明显变化。

4) 经过冷喷涂处理后, 2219 铝合金 VPTIG 焊接接头应力峰值从约 200 MPa 降低到约 24 MPa, 且分布更加均匀。

5) 冷喷涂粒子的“喷丸效应”对基体残余应力有显著改善作用(应力峰值从约 180 MPa 降低到约 93 MPa); 高温气流的“热效应”虽未能显著降低残余应力, 但使应力分布变得均匀(接头应力极差从约 120 MPa 降低到约 72 MPa)。

参考文献:

- [1] SASABE S. Weld cracking and joint strength of 2219 by MIG welding[J]. *Welding international*, 2012(26): 672-682.
- [2] LU Ya-lin, WANG Jian, LI Xing-cheng, et al. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys[J]. *Materials science and engineering: A*, 2018, 723: 204-211.
- [3] 柴丽华, 常志龙, 刘德博, 等. 焊接方法对 2219 板材组织和力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2019(01): 35-38+42. CHAI Li-hua, CHANG Zhi-long, LIU De-bo, et al. Effect of welding method on microstructure and mechanical properties of 2219 plates[J]. *Hot working technology*, 2019(1): 35-38.
- [4] 张忠科, 廖蕴博, 王希靖, 等. 铝合金 FSW 和 EBW 焊接接头组织性能对比研究[J]. *热加工工艺*, 2016(45): 66-68+72. ZHANG Zhong-ke, LIAO Wen-bo, WANG Xi-jing, et al. Comparative study on microstructure and properties of Al alloy FSW and EBW welded joints[J]. *Hot working technology*, 2016(45): 66-68.
- [5] 王金辉, 李积元. 2219-O 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能与组织[J]. *热加工工艺*, 2018(47): 73-76. WANG Jin-hui, LI Ji-yuan. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded joint of 2219-O aluminum alloy[J]. *Hot working technology*, 2018(47): 73-76.
- [6] 盛湘飞, 李智, 赵科宇, 等. 喷丸方法对不规则构件表面残余应力分布规律的影响[J]. *表面技术*, 2018(47): 99-104. SHENG Xiang-fei, LI Zhi, ZHAO Ke-yu, et al. Influence of shot peening method on the distribution rule of surface residual stress for the irregular component[J]. *Surface technology*, 2018(47): 99-104.
- [7] 张超, 花银群, 帅文文, 等. 激光冲击对 WC-Co 硬质合金微观结构和残余应力的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(4): 230-235. ZHANG Chao, HUA Yin-qun, SHUAI Wen-wen, et al. Effect of laser shot peening on microstructure and residual stress of WC-Co cemented carbide[J]. *Surface technology*, 2018, 47(4): 230-235.
- [8] 马国, 张立平, 刘夕, 等. 超声冲击处理工艺对 Q345 焊接热影响区残余应力的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(7): 208-212. MA Guo, ZHANG Li-ping, LIU Xi, et al. Effect of ultrasonic impact treatment technology on residual stress of Q345 HAZ[J]. *Surface technology*, 2017, 46(7): 208-212.
- [9] HENSEL J, NITSCHKE-PAGEL T, TCHOFFONGOULA D, et al. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength[J]. *Engineering fracture mechanics*, 2018, 198: 123-141.
- [10] 赵国锋, 王莹莹, 张海龙, 等. 冷喷涂设备及冷喷涂技术应用研究进展[J]. *表面技术*, 2017, 46(11): 198-205. ZHAO Guo-feng, WANG Ying-ying, ZHANG Hai-long, et al. Application of cold spraying equipment and cold spraying technology[J]. *Surface technology*, 2017, 46(11): 198-205.
- [11] ASSADI H, KREYE H, GÄRTNER F, et al. Cold Spraying-A materials perspective[J]. *Acta materialia*, 2016(116): 382-407.
- [12] 虞思琦, 杨夏炜, 王非凡, 等. 镁合金表面冷喷涂层防护研究进展[J]. *表面技术*, 2018, 47(5): 43-56. YU Si-qi, YANG Xia-wei, WANG Fei-fan, et al. Protection for cold sprayed coatings on magnesium alloy[J]. *Surface technology*, 2018, 47(5): 43-56.
- [13] 李文亚, 余敏. 冷喷涂技术的最新研究现状[J]. *表面技术*, 2010, 39(5): 95-99. LI Wen-ya, YU Min. The latest development state of the cold spraying technique[J]. *Surface technology*, 2010, 39(5): 95-99.
- [14] 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂技术在增材制造和修复再制造领域的应用研究现状[J]. *焊接*, 2016(4): 2-8. LI Wen-ya, ZHANG Dong-dong, HUANG Chun-jie, et al. State of the art of cold spraying additive manufacturing and remanufacturing[J]. *Welding*, 2016(4): 2-8.
- [15] LI Wen-ya, JIANG Ruo-rong, HUANG Chun-jie, et al. Effect of cold sprayed Al coating on mechanical property and corrosion behavior of friction stir welded 2024-T351 joint[J]. *Materials & design*, 2015(65): 757-761.
- [16] LI Wen-ya, LI Na, YANG Xia-wei, et al. Impact of cold spraying on microstructure and mechanical properties of optimized friction stir welded AA2024-T3 joint[J]. *Materials science and engineering A*, 2017(702): 73-80.
- [17] LI Na, LI Wen-ya, YANG Xia-wei, et al. An investigation into the mechanism for enhanced mechanical properties in friction stir welded AA2024-T3 joints coated with cold spraying[J]. *Applied surface science*, 2018(439): 623-631.
- [18] 马国, 张立平, 刘夕, 等. 超声冲击处理工艺对 Q345 焊接热影响区残余应力的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(7): 208-212.
- [19] MA Guo, ZHANG Li-ping, LIU Xi, et al. Effect of ultrasonic impact treatment technology on residual stress of Q345 HAZ[J]. *Surface technology*, 2017, 46(7): 208-212.
- [20] 颜旭, 马核, 熊林玉, 等. 2219 铝合金 TIG 焊接头断裂性能研究[J]. *航天制造技术*, 2017(4): 16-20. YAN Xu, MA He, XIONG Lin-yu, et al. Fracture property of 2219 aluminum alloy joint by TIG welding[J]. *Aerospace manufacturing technology*, 2017(4): 16-20.
- [21] 尹何迟, 张光业, 颜焕元. 降低钢结构焊接件残余应力的振动时效法[J]. *工程力学*, 2009, 26(7): 188-191. YIN He-chi, ZHANG Guang-ye, YAN Huan-yuan. Relieving residual stresses of the welding workpiece in the steel structure by vibratory stress relief[J]. *Engineering mechanics*, 2009, 26(7): 188-191.
- [22] LI Wen-ya, YIN Shuo, GUOXue-ping, et al. An investigation on temperature distribution within the substrate and nozzle wall in cold spraying by numerical and experimental methods[J]. *Journal thermal spray technology*, 2012(21): 41-48.
- [23] SPENCER K, LUZIN V, MATTHEWS N, et al. Residual stresses in cold spray Al coatings: The effect of alloying and of process parameters[J]. *Surface and coatings technology*, 2012(206): 4249-4255.