

喷丸对2219铝合金TIG焊接残余应力的影响

郭旭东^{1,3,4}, 吴运新^{1,2,3,4}, 龚海^{1,2,3,4}, 聂林^{2,3,4}, 陈旦^{2,3,4}

(1.中南大学 轻合金研究院, 湖南 长沙 410083; 2.中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;

3.中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083;

4.中南大学 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心, 湖南 长沙 410083)

摘 要 用不同喷丸参数对2219-T8铝合金TIG焊接接头进行强化处理。用X射线衍射仪(XRD)、盲孔应力仪(MTS3000)检测试样喷丸前后残余应力场。结果表明:喷丸处理前,垂直于焊缝的横截面,纵向应力呈不规则“几”字型分布,表现为焊缝附近区域存在较大残余拉应力,远离焊缝的母材区接近零应力状态,随试样厚度增大,残余应力峰值增大;喷丸处理后,垂直于焊缝的横截面表面应力呈不规则“V”型分布,表现为焊缝附近区域产生较大残余压应力。在相同丸径情况下,玻璃丸较钢丸表面压应力更大。喷丸处理后,焊缝内部有限范围内压应力呈不规则“S”型分布。对相同材质弹丸,随弹丸直径增大,压应力层深度逐渐增大。在相同丸径下,钢丸较玻璃丸压应力层和峰值更大,且随钢丸直径增大,残余压应力峰值所在位置逐渐内移,其值逐渐增大。

关键词 2219-T8铝合金;TIG焊接;残余应力场;喷丸

中图分类号 TG404;TG178

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2021)02-0005-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20210107.009

Effect of shot peening on TIG welding residual stress of 2219 aluminum alloy

GUO Xudong^{1,3,4}, WU Yunxin^{1,2,3,4}, GONG Hai^{1,2,3,4}, NIE Lin^{2,3,4}, CHEN Dan^{2,3,4}

(1.Research Institute of Light Alloys, Central South University, Changsha 410083, China; 2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3.State Key Laboratory of High-Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China; 4.Nonferrous Metal Advanced Structural Materials and Manufacturing Collaborative Innovation Center, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract The TIG welded joint of 2219-T8 aluminum alloy was strengthened by shot peening with different process parameters. X-ray diffraction (XRD) and blind hole stress meter (MTS3000) were used to detect and analyze the residual stress field of samples before and after shot peening. The results show that, before shot peening treatment, the longitudinal stress of the cross section perpendicular to the weld shows an irregular "several" shape distribution, which implies that large residual tensile stress exists in the area near the weld, and the base material far away from the weld is closely in zero stress state. The peak value of welding residual stress increases with the increase of welding specimen thickness. After shot peening treatment, the surface stress on the cross section perpendicular to the weld presents an irregular V-shaped distribution, which mainly shows that a large residual compressive stress generates in the area near the weld. The surface compressive stress of glass pellets is greater than that of steel pellets under the same diameter. After shot peening, the compressive stress in the welding seam presents an irregular S-shaped distribution within a limited range. For the pellets of same material, with the increase of the diameter of projectile, compressive stress layer depth gradually increases. Under the condition of the same shot diameter, steel shot produces larger compressive stress layer and compressive stress peak value than glass shot, and with the increase of shot diameter, the position of the residual compressive stress peak value gradually moves inward, and its value increases gradually.

Keywords 2219-T8 aluminum alloy; TIG welding; residual stress field; shot peening

2219铝合金属于2000系Al-Cu合金,由于其高强度、耐热、低温性能优异、抗应力腐蚀性强、焊接性好等优点,在我国新一代火箭体结构上应用广泛,成为贮箱结构主体材料^[1]。航天飞行器的燃料贮箱等大型构件多用钨极惰性气体保护焊,焊接过程由于温度变化势

必引入残余应力,严重影响焊接件使用寿命和安全性,故对其表征及调控具有重要意义。目前,残余应力测试的无损检测法主要有X射线衍射法、中子衍射法^[2-3],有损检测法主要有盲孔法、压痕法、轮廓法^[4-6]等。对焊后板材残余应力调控主要有焊后热处理、爆

收稿日期:2020-10-20;修回日期:2020-12-04

基金项目:国家自然科学基金(51327902;51405520)

第一作者:郭旭东,男,硕士研究生;研究方向为航空航天铝合金焊接残余应力及焊后应力调控。E-mail:guoxudong@csu.edu.cn。

炸处理、超声波冲击、喷丸等^[7-11]。其中喷丸是本文的研究重点,喷丸处理后,试样表面及内部拉应力转变为压应力,有利于提高焊接接头的抗腐蚀和抗疲劳性能^[12-14]。虽然国内外对喷丸强化进行了大量研究,但对航空航天铝合金焊接结构喷丸的研究鲜少。此外,生产实践中操作人员需根据经验选择喷丸参数,缺乏试验依据和准确的理论指导。作者针对航空航天2219-T8 铝合金,与中车株洲电力机车有限公司和中南大学高性能复杂制造国家重点实验室进行TIG 焊接试验和喷丸强化试验。研究试样的应力分布情况,为操作人员喷丸工艺参数的选取提供试验依据和理论指导。

1 试验材料与方法

1.1 焊接试验

材料为300 mm×300 mm的2219 铝合金板材,焊接工艺参数,如表1所示。其中,玻璃丸、钢丸的直径为0.6、0.8、1.2 mm。2219-T8 铝合金化学成分,见表2。焊接设备为松下YC-300WX4 N型氩弧焊机,直流手动TIG 焊接,开V型坡口,无脉冲电流。冷却用松下YX-09KGC1冷却循环装置,保护气体为氩气,工作气压为12 Pa。工作参数:额定输出电流为300 A;额定输出电压为22 V;焊接工作电流为110 A;焊接工作电压为22.6 V;焊接时间为200 s;电流上升时间为0.5 s;电流下降时间为1 s;提前送气0.3 s;滞后停气10 s;焊丝材料为2325 铝合金。

表1 焊接板材工艺参数

Table 1 Technological parameters of welding plate

编号	板材厚度/mm	表面处理
1	3	—
2	6	—
3	10	玻璃丸
4	10	钢丸

表2 2219 铝合金化学成分

Table 2 2219 aluminum alloy composition

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
Cu	5.8~6.8	Mg	0.02
Mn	0.2~0.4	Zr	0.10~0.25
Si	0.2	Ti	0.02~0.10
Zn	0.1	Al	余量
Fe	0.3		

1.2 焊后残余应力测试

用X射线检测设备(X stress 3000 G2/G2R)测量焊后板材表面残余应力,X射线衍射仪基本参数,见表3。图1为待测截面位置和测试路径。为保证准确测得试

样表面及深度残余应力,用美国制造的PROTO ELEC-TROLYTIC POLISHER 8818-V3 电解抛光设备对材料表面进行抛光,去除表面杂质及油污,如图2所示。

表3 X射线衍射仪测试参数

Table 3 X-ray diffractometer test parameters

工艺参数	设置参数
材料	Al(Cr)
X射线	Cr
曝光时间	10 s
曝光次数	10次/位置
靶材摆动角度	3°
准直管规格	1 mm×2 mm
定峰方法	高斯80%
靶材电压、电流	30.1 kV,6.8 mA
背底电压、电流	11.5 kV,4.0 mA
ψ_0 取值	0°,±20.7°,±30°,±37.8°,±45°

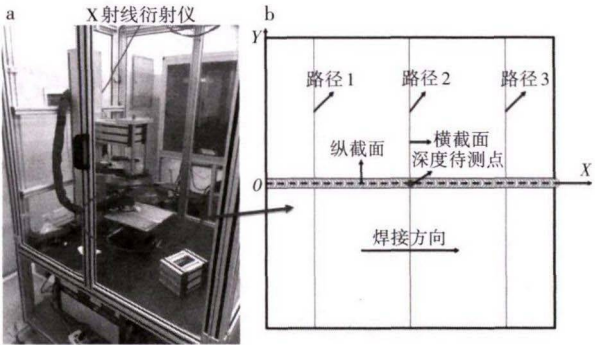


图1 测试截面及各路径分布图

Fig.1 Test section and distribution diagram of each pending path

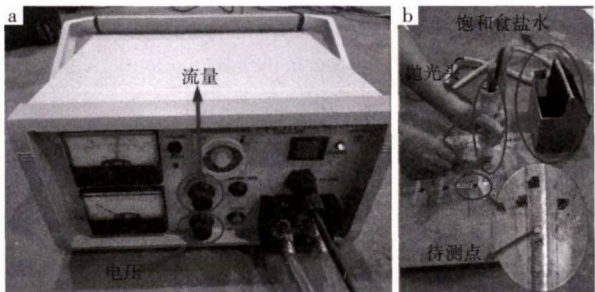


图2 电解抛光原理

Fig.2 Principle of electropolishing

1.3 喷丸试验与应力测试

将2219 铝合金3、4#焊接板材,用不同材质及丸径丸粒对焊接表面喷丸处理,弹丸材料参数,见表4。玻璃丸、钢丸直径为0.6、0.8、1.2 mm。喷丸设备为东莞市常捷自动化设备有限公司生产的CJ-106P 喷丸罐,工作压力为0.3~0.8 MPa,喷嘴直径为12 mm。喷丸过程喷射气压恒定,为0.4 MPa;喷嘴与板材距离为50 mm;喷射时喷嘴与板材表面垂直;喷射时间为1 min;对未喷丸部分遮盖保护。表5为不同喷丸工艺参数。

表4 弹丸材料参数

Table 4 Parameters of projectile materials

弹丸材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	莫氏硬度
玻璃丸	2 700	55	0.25	6.5
钢丸	7 750	206	0.30	5.5

表5 喷丸工艺参数

Table 5 Technological parameters of shot peening

编号	弹丸材料	弹丸直径/mm	入射角度/($^{\circ}$)	喷丸时间/min
1	玻璃丸	0.6	90	1
2	玻璃丸	0.8	90	1
3	玻璃丸	1.2	90	1
4	钢丸	0.6	90	1
5	钢丸	0.8	90	1
6	钢丸	1.2	90	1

用意大利SINT公司MTS3000-Restan盲孔应力仪对喷丸焊缝区沿深度方向的残余应力进行测试,该盲孔仪可精确快速进行ASTM E831—13规定的均匀分布测试。MTS3000钻台高、宽、长为270 mm×150 mm×175 mm;质量为4.6 kg;钻孔进给速度为0.012 m/h;钻头直径为1.8 mm;孔深为2 mm;分10个进给步完成进给。测试原理图,如图3所示。



图3 钻孔原理图

Fig.3 Schematic diagram of drilling

2 结果与讨论

2.1 焊接残余应力分布

2.1.1 焊件表面残余应力分布

图4a为3[#]试样焊缝横截面纵向应力分布曲线。可知,不同横截面纵向应力分布呈不规则“几”字型,表现为距焊缝中心 $y=\pm 20$ mm存在较大残余拉应力,远离焊缝母材区逐渐趋近于零应力状态。位于焊缝中心路径2($x=150$ mm, $y=-120\sim 120$ mm, $z=0$ mm)截面的峰值应力为177.5 MPa,显著大于其它路径的峰值应力,峰值应力点均位于热影响区^[2]。

图4b为3[#]试样焊缝横截面横向应力分布曲线。相较纵向应力,横向应力无明显分布规律,绝对值较小。集中表现为焊缝区应力值较大,远离焊缝区接近零应力状态。可知,焊缝两侧出现应力不对称分布,原

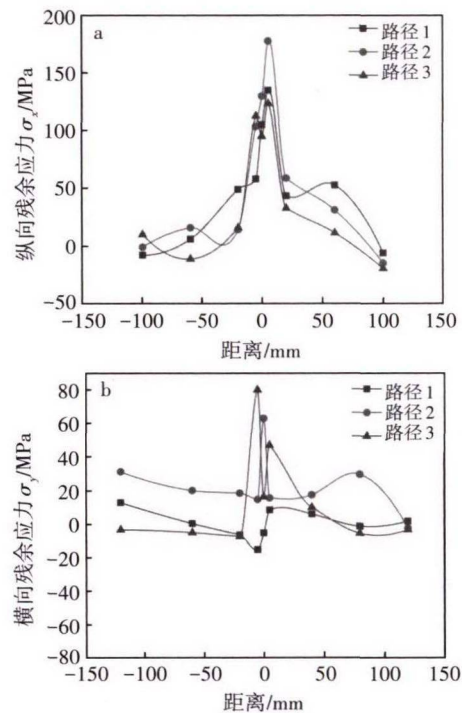


图4 表面残余应力分布

Fig.4 Surface residual stress distribution

因可能是手动TIG焊接时,焊接速度和焊丝填充速度不均匀,导致焊缝局部区域热膨胀不均匀,产生应力不对称分布。综上所述,焊接残余应力主要集中在焊缝区,以拉应力为主,应力峰值位于焊缝热影响区,远离焊缝母材边缘趋近于零应力状态。焊缝中心截面较其它截面产生更大残余应力峰值。焊后表面残余应力以纵向应力为主,故在之后的分析中以纵向残余应力为主要研究对象。

2.1.2 厚度对焊接残余应力分布的影响

图5为1、2、3[#]TIG焊接试样沿路径2纵向残余应力分布曲线。可知,1[#]试样最大拉应力为119.2 MPa,2[#]试样最大值为159.0 MPa,3[#]试样最大值为177.5 MPa,拉应力峰值均位于焊缝热影响区。随板材厚度增大,焊接残余拉应力峰值逐渐增大。1、2、3[#]试样在母材边缘区,最小应力值分别为30.3、-9.0、-1.1 MPa,可见在

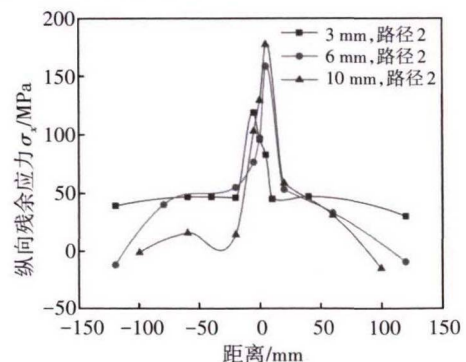


图5 板材厚度对残余应力的影响

Fig.5 Influence of plate thickness on residual stress

焊接边缘,即远离焊缝的母材区,较厚试样应力值较小。

2.2 喷丸处理后残余应力分布

2.2.1 表层应力分布

为达到理想喷丸效果,对焊缝($y=-30\sim 30$ mm)区喷丸,对未喷丸表面遮盖。3、4#焊接试样分别用玻璃丸、钢丸进行喷丸强化。图6为不同丸径的玻璃丸与钢丸喷丸处理后试样表面纵向残余应力与横向残余应

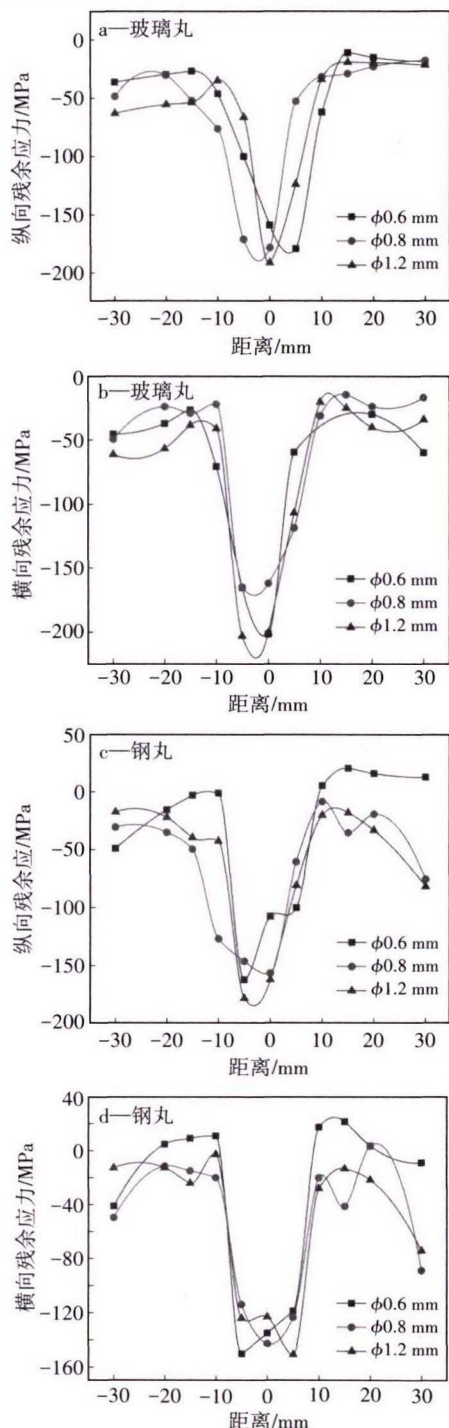


图6 喷丸处理后板材表面两向应力分布曲线

Fig.6 Two-direction stress distribution curve of plate surface after shot peening treatment

力的分布曲线。可知,试样表层残余应力呈不规则“V”型分布。原因是喷丸后表面应力由初始应力场与喷丸引入的压应力场相互叠加造成,焊缝中心区较两端热影响区残余拉应力小,TIG焊缝熔池区较附近母材区呈凸起状态,故在喷丸后焊缝中心区较周边区域产生更大的残余压应力,表面最大残余压应力集中分布在焊缝中心 $y=\pm 10$ mm。

图6a、b为玻璃丸喷丸后表面应力分布曲线。对纵向应力而言,0.6、0.8、1.2 mm玻璃丸喷丸后表面最大压应力为-179.3、-178.4、-191.4 MPa;对横向应力而言,0.6、0.8、1.2 mm玻璃丸喷丸后表面最大压应力为-201.6、-164.9、-202.9 MPa。

图6c、d为钢丸喷丸后表面应力分布曲线。对纵向应力而言,0.6、0.8、1.2 mm钢丸喷丸后表面最大压应力分别为-162.1、-156.4、-178.0 MPa;对横向应力而言,0.6、0.8、1.2 mm钢丸喷丸后表面最大压应力分别为-150.1、-142.5、-150.6 MPa。可见,随弹丸直径增大,表面应力无显著变化。试样表面纵向与横向应力分布规律一致,最大压应力出现在焊缝中心区。

综上所述,在弹丸材料相同情况下,随弹丸直径增大表面应力无显著变化。在相同丸径情况下,玻璃丸较钢丸引入更大的表面压应力,其最大值约为钢丸的1.3倍。原因是玻璃丸比钢丸硬度大、强度小,玻璃丸为脆性材料,当用玻璃丸喷丸时,由于与工件发生冲击破碎,冲击能量由于丸粒破碎将损失掉一部分,但工件表面依然受到能量冲击,工件产生变形主要集中在表层,对更深处材料影响较小,这也导致其应力主要集中在表层。喷丸处理后焊缝表面两向应力分布规律一致,在焊缝中心 $y=\pm 10$ mm形成较大的残余压应力。

2.2.2 内部应力分布

图7为焊件内部两向应力分布曲线。可知,经玻璃丸与钢丸喷丸后,焊缝中心沿深度方向两向应力分布规律基本相似,均表现为压应力随深度增大逐渐增大,到达一定深度后压应力开始减小,逐渐出现拉应力。拉应力数值随深度增大逐渐增大,由于喷丸影响深度有限,到达某一深度后随深度增加,喷丸应力影响减少,工件内部应力开始以焊后残余应力为主。喷丸处理后沿深度方向的残余应力呈不规则“S”型分布^[11]。

图7a、b为在相同的弹丸材料下,用不同丸径玻璃丸对焊缝及附近区域进行喷丸处理。对纵向残余应力而言,0.6、0.8、1.2 mm玻璃丸在0.094、0.100、0.219 mm处达到最大值,为-255.9、-212.1、-224.5 MPa;对横向残余应力而言,0.6、0.8、1.2 mm玻璃丸在0.1、0.1、0.2 mm处达到最大值,为-210.0、-213.0、-209.3 MPa。随

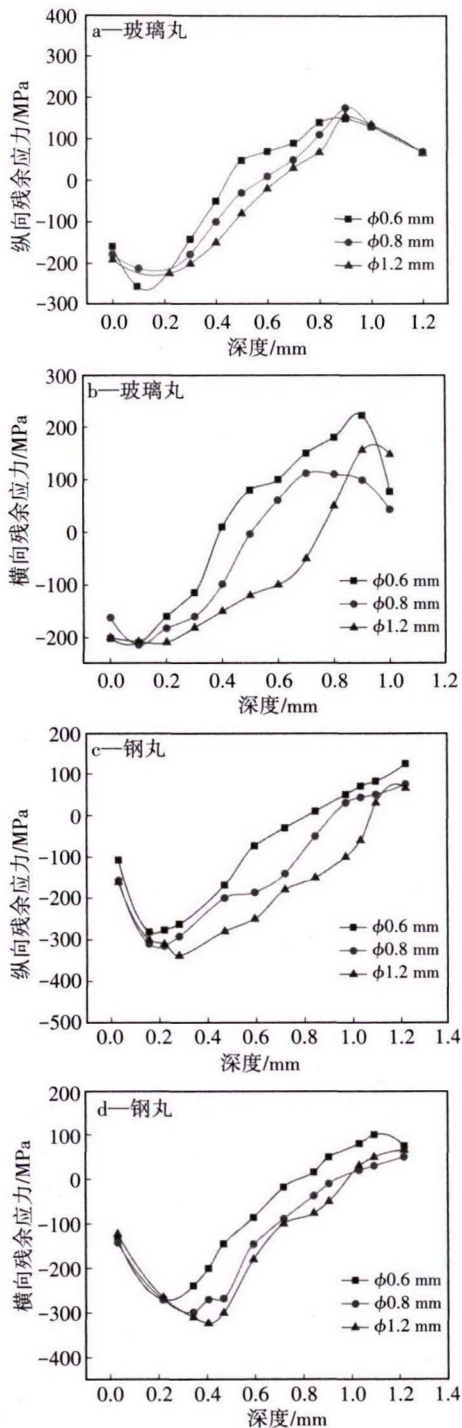


图7 焊件内部两向应力分布曲线

Fig.7 Two-direction stress distribution curve in welding parts

玻璃丸直径增大,纵向与横向残余应力影响层深度逐渐增大,最大值为0.64、0.75 mm,但随玻璃丸直径增大,残余压应力峰值所在位置无明显变化。

图7c、d为在相同弹丸材料下,用不同丸径钢丸对焊缝及附近区域进行喷丸处理。对纵向残余应力而言,0.6、0.8、1.2 mm钢丸在0.15、0.21、0.28 mm处达最大值,为-281、-315、-338 MPa;对横向残余应力而言,0.6、0.8、1.2 mm钢丸在0.21、0.34、0.40 mm处达最大

值,为-269、-298、-323 MPa。随弹丸直径增大,残余压应力峰值位置逐渐内移,其值也逐渐增大,纵向和横向残余应力影响层深度也逐渐增大,最大值为1.07、0.98 mm。

综上所述,随弹丸直径增大所产生的压应力层深度逐渐增大,这与多名学者所得结论一致^[15-16]。在丸径相同情况下钢丸较玻璃丸产生更大压应力层和压应力峰值。原因是钢丸强度和密度更大,喷丸时钢丸所附带的能量更大,对更深处材料造成的冲击作用也越明显,具体表现为钢丸引入的压应力层更深。对钢丸而言,随弹丸直径增大,残余压应力峰值位置逐渐内移,其值逐渐增大,而玻璃丸压应力峰值随弹丸直径增大无明显变化。

3 结论

1) 喷丸处理前,垂直于焊缝不同横截面纵向残余应力呈不规则“几”字型分布。位于焊缝中心的横截面较其它截面,残余应力峰值较大,为177.5 MPa,最大值位于焊缝热影响区。横向残余应力较纵向无明显分布规律且绝对值较小。

2) 对3~10 mm厚的TIG焊接试样,随试样厚度增大,焊接残余应力峰值增大,且远离焊缝的母材区更趋近于零应力。

3) 喷丸处理后,垂直于焊缝横截面表面应力呈不规则“V”型分布。在相同喷丸强度和丸径情况下,玻璃丸较钢丸能引入更大的表面压应力,其最大值约为钢丸的1.3倍;在相同喷丸强度和材料情况下,弹丸直径对表面应力分布无显著影响。

4) 喷丸处理后,焊缝内部有限范围内,应力呈不规则“S”型分布。在相同喷丸强度和材料情况下,随弹丸直径增大产生的压应力层深度逐渐增大;在相同的喷丸强度和丸径情况下,钢丸较玻璃丸产生更大压应力层和压应力峰值,且随钢丸直径增大残余压应力峰值位置逐渐内移,其值也逐渐增大。

4 参考文献

- [1] 钟掘,何振波. 航空航天用铝合金的研究及发展方向[C]. 中国新材料产业发展报告(2006)——航空航天材料专辑,昆明:中国材料研究学会,2006:19-30.
ZHONG Jue, HE Zhenbo. Research and development direction of aluminum alloy used in aerospace[C]. China New Materials Industry Development Report (2006)——Aerospace Materials Album, Kunming: Chinese Society for Materials Research, 2006, 19-30. (in Chinese)
- [2] 李庆庆,宋建岭,彭江涛,等. 2219铝合金TIG焊接头残余应

- 力分布[J]. 焊接, 2016, 1: 54-57.
- LI Qingqing, SONG Jianling, PENG Jiangtao, et al. Distribution of residual stress in TIG welding joint of 2219 aluminum alloy[J]. Welding, 2016, 1: 54-57. (in Chinese)
- [3] 陈星雨, 刘晓龙, 吴运新, 等. 2219铝合金搅拌摩擦焊和钨极保护焊焊接件残余应力的中子衍射研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(11): 2289-2294.
- CHEN Xingyu, LIU Xiaolong, WU Yunxin, et al. Neutron diffraction study on residual stress of aluminum alloy friction stir welding and tungsten electrode protection welding[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(11): 2289-2294. (in Chinese)
- [4] 黄超群, 李桓, 罗传光, 等. 盲孔法与压痕法测量2219铝合金熔焊焊缝残余应力的对比分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 54-58.
- HUANG Chaoqun, LI Huan, LUO Chuanguang, et al. Comparative analysis of blind hole method and indentation method for measuring the residual stress of 2219 aluminum alloy welding seam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 54-58. (in Chinese)
- [5] 胡秋实, 宋永伦, 黄举近. 高强铝合金焊接残余应力的测量[J]. 电焊机, 2015, 45(8): 7-10.
- HU Qiushi, SONG Yonglun, HUANG Jujin. Measurement of welding residual stress of high strength aluminum alloys[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(8): 7-10. (in Chinese)
- [6] 谢国贞, 吴运新, 龚海, 等. 轮廓法测试残余应力中的数据处理[J]. 中国机械工程, 2017, 28(15): 1778-1783.
- XIE Guozhen, WU Yunxin, GONG Hai, et al. The contour method measures data processing in residual stress[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(15): 1778-1783. (in Chinese)
- [7] 徐野, 杨蔚, 朱平, 等. 热时效对A7N01铝合金焊后残余应力及性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(4): 61-64.
- XU Ye, YANG Wei, ZHU Ping, et al. Effect of thermal aging on residual stress and properties of A7N01 aluminum alloy after welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(4): 61-64. (in Chinese)
- [8] 何柏林, 雷思涌. 超声冲击对焊接残余应力影响的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(2): 120-123.
- HE Bailin, LEI Siyong. Research progress of ultrasonic impact on welding residual stress[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(2): 120-123. (in Chinese)
- [9] 侯海量, 朱锡, 刘润泉. 爆炸消除921A钢焊接残余应力试验[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 119-123.
- HOU Hailiang, ZHU Xi, LIU Runquan. Explosion relief test for welding residual stress of 921A steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 119-123. (in Chinese)
- [10] 赵艳丽, 王强, 杨庆祥, 等. 喷丸工艺参数对A-100高强度钢残余应力场的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 10-14.
- ZHAO Yanli, WANG Qiang, YANG Qingxiang, et al. Effect of shot peening process parameters on the residual stress field of A-100 high strength steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(8): 10-14. (in Chinese)
- [11] NIE Lin, WU Yunxin, GONG Hai, et al. Effect of shot peening on redistribution of residual stress field in friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Materials, 2020, 13: 3169.
- [12] 任超, 罗军明, 陈宇海, 等. 喷丸对TC4合金微弧氧化涂层磨损和腐蚀行为的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 18081-18085.
- REN Chao, LUO Junming, CHEN Yuhai, et al. Effect of shot peening on wear and corrosion behavior of micro-arc oxidation coating on TC4 alloy[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 18081-18085. (in Chinese)
- [13] 张丹峰, 谭晓明, 钱昂, 等. 喷丸强化对超高强度钢耐腐蚀性能的影响[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 81-85.
- ZHANG Danfeng, TAN Xiaoming, QIAN Ang, et al. Effect of shot peening strengthening on corrosion resistance of ultra high strength steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 81-85. (in Chinese)
- [14] 秦海迪, 张亚龙, 刘海鹏, 等. 喷丸对25CrNi2MoV钢滚动接触疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 222-229.
- QIN Haidi, ZHANG Yalong, LIU Haipeng, et al. Effect of shot peening on rolling contact fatigue performance of 25CrNi2MoV steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 222-229. (in Chinese)
- [15] 寇佩佩, 冯瑞成, 李海燕, 等. 喷丸参数对 γ -TiAl合金残余应力分布的影响[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(9): 87-94.
- KOU Peipei, FENG Ruicheng, LI Haiyan, et al. Effects of shot peening parameters on residual stress distribution of γ -TiAl alloy[J]. Mechanical Design & Manufacture, 2020, 49(9): 87-94. (in Chinese)
- [16] 郭胜华, 郑海忠, 程世平, 等. 喷丸尺寸对GH4169表层湿喷丸组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(6): 674-677.
- GUO Shenghua, ZHENG Haizhong, CHENG Shiping, et al. Effect of shot peening size on microstructure and properties of surface layer of GH4169[J]. Special-cast and Non-ferrous Alloys, 2018, 38(6): 674-677. (in Chinese)