

# 焊接残余应力对 2219 铝合金熔焊接头承载能力的影响

许欣欣<sup>1,2</sup>, 梁晓光<sup>3</sup>, 杨瑞生<sup>3</sup>, 鄢东洋<sup>3</sup>, 周利<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 哈尔滨工业大学(威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海, 264209; 3. 北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 为了研究 2219 铝合金焊接残余应力对接头承载能力的具体影响以及作用机理, 通过对比试验的方法测试了两种焊接接头的力学性能. 建立焊接过程有限元模型, 获得标准试样和大尺寸试样的残余应力分布, 模拟结果表明标准试样制备过程中, 焊接残余应力基本上完全释放. 分别对含残余应力和不含残余应力试样进行力学拉伸和接头表征测试试验, 试验结果表明焊接残余应力的存在不会对焊接接头的力学性能、断裂形式及断口特征产生明显影响. 基于细观损伤的断裂力学理论, 对焊接残余应力在接头拉伸过程中损伤产生及积累过程的影响机制进行详细分析及讨论. 结果表明, 焊接接头形成后的应力释放并不影响接头的承载能力, 但是诸如随焊和焊后残余应力控制措施会导致接头产生额外塑性应变, 可能会对接头承载能力产生影响.

**关键词:** 残余应力; 铝合金; 力学性能; 细观损伤

**中图分类号:** TG 457.14      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200403004

## 0 序言

2219 铝合金属于 Al-Cu-Mn 系高强可热处理强化铝合金, 因其良好的焊接性和高低温力学性能以及抗应力腐蚀性能成为大型运载火箭以及新型运载型号低温贮箱结构制造的理想材料<sup>[1]</sup>, 在近几十年成为国内航空航天领域中新一代应用材料, 广泛应用于火箭贮箱以及飞机蒙皮、氧化剂槽等结构当中<sup>[2-3]</sup>.

大型火箭贮箱不能够一次成形, 需要多次焊接进行连接才能完成. 2219 铝合金的焊接主要采用变极性惰性气体钨极保护焊 (variable polarity tungsten inert gas, VPTIG) 焊接方式<sup>[4]</sup>, 这种焊接方式具有良好的阴极清理作用, 还具有工艺灵活性好、焊接质量较高、焊缝处气孔以及夹杂形成概率低的特点. 值得注意的是, 在焊接过程中, 焊接热源高度集中会产生不均匀的温度分布、焊缝金属热胀冷缩现象以及相变的产生. 这些现象均会导致其焊后残余应力不可避免的存在. 残余应力的存在直接影响铝合金焊接结构件的力学性能、疲劳强度、抗应力腐

蚀能力、尺寸稳定性与使用寿命<sup>[5]</sup>, 严重时还会造成结构脆性破坏, 因此减小焊后残余应力成为许多学者研究的方向.

目前消除残余应力的方法主要有三类<sup>[6]</sup>: 第一类是焊后热处理, 这种方法是通过对试样整体进行加热, 适用于中小型焊件, 但是处理后焊件会发生软化现象同时力学性能发生降低; 第二类是力学形变法, 包括振动时效<sup>[7]</sup>、反变形法、超声冲击处理法<sup>[8]</sup>和捶击法等<sup>[9]</sup>; 第三类就是局部热处理法, 主要包括高频感应加热<sup>[10]</sup>和火焰加热等<sup>[11]</sup>.

已有文献对焊件残余应力、构件的疲劳强度以及使用寿命进行详细的研究<sup>[12-13]</sup>, 但是残余应力对焊接接头承载能力, 如抗拉强度的影响目前为止仍未有过详细研究. 文中以 2219 铝合金的熔焊接头为研究对象, 通过有限元数值模拟与试验相结合的方法, 研究焊接残余应力对熔焊接头承载能力的影响, 以期对实际生产应用提供一定的借鉴.

## 1 试验材料及方法

试验用母材为 2219-T87 铝合金板材, 其化学成分如表 1 所示. 试验材料焊接端面无须开坡口, 焊丝表面均光亮化处理. 试验采用“定位 + 打底 + 盖面”的 VPTIG 自动焊工艺, 定位焊的效果是预先

收稿日期: 2020-04-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国航天科技集团公司航天先进制造技术研究联合基金. 航天大型 2219 铝合金环件形性精准协调制造的科学基础 (U1637601).

固定两块平板,其焊接热输入相对后两道非常少;VPTIG 打底焊时主要采用氦气保护,氦弧相对集中的热输入可一次将中厚度的铝板熔透;盖面焊时主

要采用氩气保护,此时 VPTIG 电源提供合适的铝板熔焊热量及表面的清理作用,其接头示意图如图 1 所示. 试验的焊接工艺参数如表 2 所示.

表 1 2219-T87 铝合金化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of 2219-T87 aluminum alloy

Cu	Mn	Fe	Si	V	Ti	Zn	Zr	Al
6.03	0.31	0.17	0.10	0.08	0.03	0.01	0.18	余量

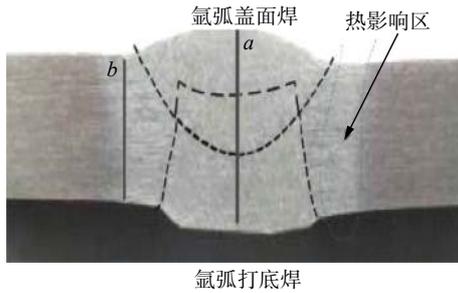


图 1 接头示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of joint

1.1 试验方法

为研究焊接残余应力对铝合金焊接接头承载

能力的影响,制备两种拉伸试样,即试样 A-不含焊接残余应力,试样 B-含焊接残余应力. 试样 A 为标准试样,尺寸参照标准 GB/T 2651—2008 以及 GB/T 228—2002 设计. 其制备过程为:按照上述工艺对焊接板 (300 mm × 100 mm × 8 mm) 进行焊接,后制备成标准试样,试样尺寸见图 2 所示. 试样 B 为非标试样,其焊缝长度远大于标准试样,综合考虑试验机的承载能力,设计试样尺寸如图 3 所示. 制备(焊接)试样 B 时,在其两侧使用引弧板和收弧板以保证焊接接头成形良好.

表 2 铝合金对接焊接工艺参数  
Table 2 Butt welding process parameters of aluminum alloy

位置	温度 $T/^\circ\text{C}$	湿度	电流 $I/\text{A}$	电压 $U/\text{V}$	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	气流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_s/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
定位	21.3	25.5%	190	16	400	1Ar + 11He	-
打底	21.4	24.9%	260	17	267	12He	-
盖面	24.4	21.7%	310	18	117	0.5He + 11Ar	1100

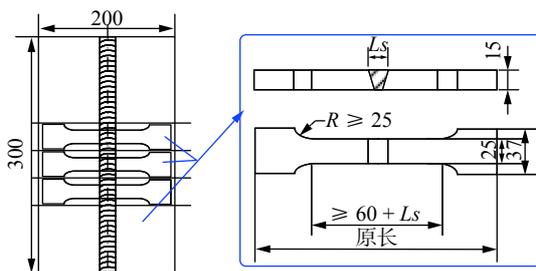


图 2 试样 A 尺寸示意图 (mm)  
Fig. 2 Schematic size diagram of sample A

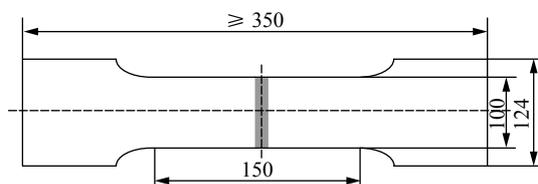


图 3 试样 B 尺寸示意图 (mm)  
Fig. 3 Schematic size diagram of sample B

1.2 数值模拟方法

1.2.1 几何模型

参考图 2 和图 3 中实际焊接接头几何形状及尺寸,并考虑到平试样的几何对称性及热源的对称性,在保证有限元计算精度的条件下,采用差值误差小的 8 节点六面体单元对几何体进行划分. 焊缝及近缝区采用细网格,远离焊缝的区域网格较为粗大,由此建立了如图 4 所示的有限元模型,并对其残余应力分布特征进行预测模拟.

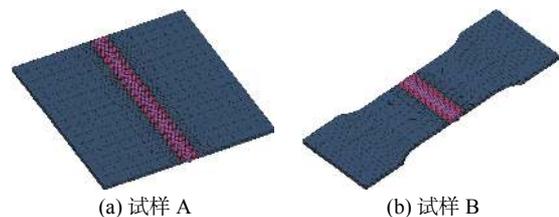


图 4 有限元模型  
Fig. 4 Finite element model. (a) sample A; (b) sample B

### 1.2.2 热源模型

由于该试验采用 VPTIG 填丝焊, 根据实际焊接过程特点, 为了更好的模拟电弧穿透作用以及提高计算效率, 焊接热源采用双椭球热源来近似代替. 这种模型将焊接熔池分为前后两个 1/4 椭球. 前半部分椭球模型定义为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_f}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-v\cdot t)^2}{c_1^2}\right)} \quad (1)$$

后半部分椭球模型定义为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_r}{abc_2\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-v\cdot t)^2}{c_2^2}\right)} \quad (2)$$

式中:  $a, b$  分别是椭球的  $x, y$  半轴长度;  $c_1, c_2$  分别是前后椭球体  $z$  半轴长度;  $f_f, f_r$  是前后椭球的热源集中系数:  $f_f + f_r = 2$ ;  $Q$  是热输入量:  $Q = \eta UI$  ( $\eta$ : 热效率);  $v$  是焊接速度. 通过实际焊接的焊缝形貌校核热源形状参数, 获得与试验结果吻合的熔池形状, 如图 5 所示.

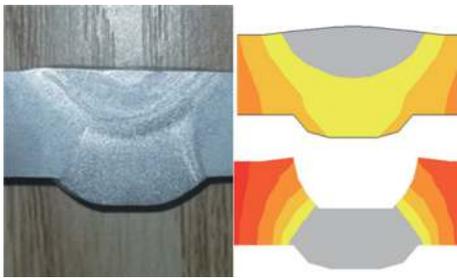


图 5 焊接热源校核结果

Fig. 5 Results of welding heat source check

### 1.2.3 材料性能参数

材料的热物理性能和力学性能参数均会随着焊接过程温度的变化而发生改变, 如图 6 所示.

### 1.2.4 初始条件与边界条件

在力学计算模型中, 焊接过程依据装配卡具与试样的接触位置, 对试板定义相应的力学边界条件, 实现卡具对焊接试板的拘束效果. 焊接结束冷却至室温时, 对试样采用“3-2-1”装卡方式, 即试样四角取其三, 各自定义  $xyz, yz$  和  $z$  方向位移约束, 限制试样的 6 个自由度的约束, 同时又不限制试样内部残余应力的调整, 达到在工装卡具去除的同时又能实现拘束应力的释放和焊接变形的显现.

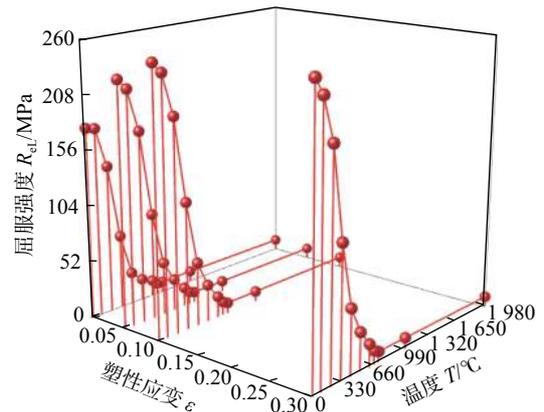
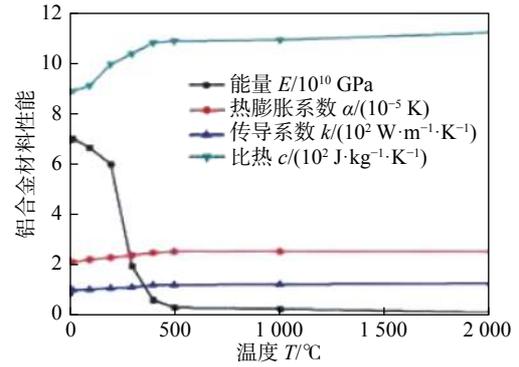


图 6 材料性能随温度变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of material properties varying with temperature

## 2 试验结果

### 2.1 残余应力结果

按照图 2 以及图 3 中的试样尺寸, 采用相同的装卡方式, 焊接工艺参数保持不变, 分别进行焊接试验. 焊缝起弧收弧位置谨慎焊接, 以防有弧坑、烧穿或者塌陷等缺陷存在. 按照相同的规范对两种试样进行焊接过程数值模拟. 其中试样 A 通过先对焊接试板焊接过程进行模拟, 再删除试样 A 宽度以外材料的方式获得的试样 A 的残余应力分布. 不同试样的残余应力对比位置分别标记在图 7a 和图 7b 中的虚线位置, 此外采用盲孔法测量的焊接试板残余应力分布的结果也予以对比, 见图 8.

通过模拟结果可知, 焊接残余高应力区域集中于接头位置, 纵向应力峰值超过材料的屈服强度. 试样 A 的焊接残余应力分布在较小的应力水平区间内, 说明标准试样制备过程中, 焊接试样的较高的焊接残余应力水平会释放掉, 即试样 A 可以作为不含焊接残余应力的试样进行力学性能测试. 试样 B 的残余应力分布特征与焊接试板 (制备试样 A 用) 的残余应力分布特征一致, 分布趋势、高

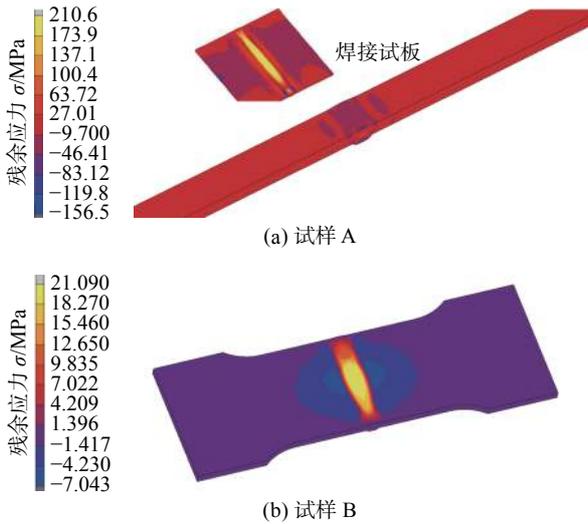


图 7 焊接残余应力测试位置

Fig. 7 Welding residual stress test location

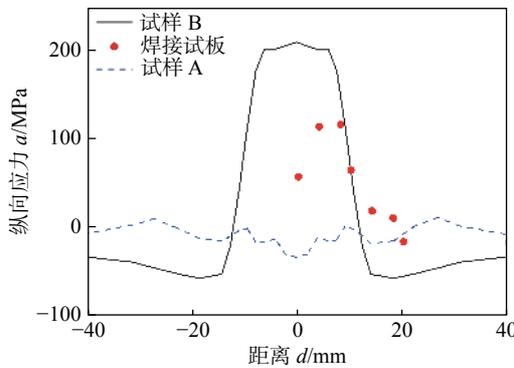


图 8 焊接残余应力分布结果

Fig. 8 Results of welding residual stress distribution

应力区域、应力峰值等相差不大,即试样 B 可作为含焊接残余应力的试样进行力学性能检测. 焊接试板焊接纵向残余应力分布的试验结果与模拟结果吻合良好,呈现焊接接头位置为较高拉应力,两侧为压应力的分布趋势,但是试验结果在焊缝区及近缝热影响区的应力峰值小于模拟结果,这是由铝合金材料在受焊接热循环后发生材料软化所造成的,而模拟过程并未考虑该因素. 需要指出,数值模拟结果主要用于描述两种试样的残余应力分布情况,即试样 A 经焊接试板加工成标准试样尺寸后焊接残余应力基本释放,而试样 B 尺寸大小的试板能够体现出实际接头残余应力分布特征. 两种试样力学性能的对比,能够反映出有无焊接残余应力情况下接头的承载能力.

### 2.2 拉伸试验结果

在 25T Instron 拉伸试验机上测试两种试样的力学性能,采用相同的测试规范获得载荷位移曲

线. 对比测试结果,获得不同焊接接头尺寸以及焊接残余应力综合条件下的抗拉强度以及断后伸长率. 试验结果如表 3 所示. 通过试验结果可知,两种试样的抗拉强度以及断后伸长率相差不大. 由于试样 B 的尺寸效应,其抗拉强度略小于试样 A. 试样 B 的残余应力集中程度远大于试样 A,但是从力学性能测试结果来看,试样 B 的力学性能指标并没有发生明显变化,这说明,焊接残余应力的存在并不能明显引起焊接接头承载能力的变化.

表 3 焊接接头力学性能测试结果

Table 3 Test results of mechanical properties of welded joints

编号	试样类型	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ (%)
A	不含残余应力	279.9 274.0 288.5	4.1 4.1 4.4
B	含残余应力	255.6 260.6 233.5	3.9 4.1 4.2

### 2.3 断口特征

图 9 为两种试样拉伸断口的扫描电镜结果. 由图可知,在不同尺度层面,两种焊接接头的拉伸断口微观形貌均由大量的撕裂韧窝和少量的沿晶断裂构成. 未发现较大解理面或者准解理特征形貌,接头表现出良好的塑性,均属于韧性断裂,说明焊接接头韧性性能良好. 对比结果证明,焊接残余应力的存在并不能改变焊接接头拉伸断口的微观断裂特征.

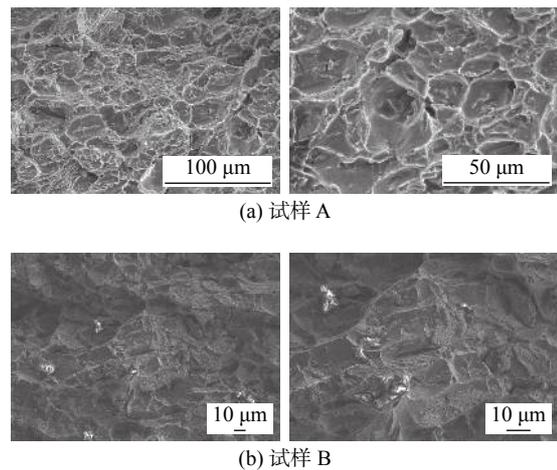


图 9 断口扫描电镜结果

Fig. 9 Results of scanning electron microscope on fracture surface. (a) sample A; (b) sample B

## 3 分析与讨论

从断口断裂特征可知,两种试样均属于韧性断

裂. 基于韧性断裂的细观机理<sup>[14]</sup>, 金属材料的断裂通常是一个多步失效且包含多个并发和交互作用过程. 受载过程中, 随着外载荷的持续增大, 首先材料内部微观缺陷 (如位错滑移、增生等) 逐渐积累, 在夹杂物或者第二相粒子等位置导致微孔洞形核; 其次在局部塑性变形积累的过程中, 材料的损伤逐渐积累, 具体表现为微孔洞长大; 最后, 微孔洞之间产生局部塑性流动, 微孔洞在长大到一定程度之后发生交互作用, 导致聚合, 形成微观裂纹乃至宏观裂纹, 最终导致材料的断裂.

基于细观损伤的断裂力学<sup>[15-18]</sup>认为影响材料断裂的影响因素分为三方面: ①微孔洞形核; ②微孔洞产生及长大过程中的孔洞体积分数; ③考虑微孔洞之间交互作用影响的非均匀应力场. 含残余应力试样和不含残余应力试样的母材、焊接材料、焊接工艺以及焊接工况等一致, 所以可认为两种试样焊后除残余应力分布之外, 其它特征如焊接接头微观组织结构、材料特性等差异较小. 下面分析焊接残余应力对上述三要素的影响, 进而推断焊接残余应力对焊接接头力学性能的影响. 首先, 材料内部微孔洞的形核是有一定触发条件的. 材料受载过程中晶体缺陷产生运动和积累 (如位错), 聚集至形核位置才可形成微观损伤. 就细观尺度而言, 只有形核位置的外载所致平均应变 (主要是塑性应变) 达到一定程度, 同时该区域材料的微孔洞体积分数达到一定值时, 微孔洞才能形核. 研究表明, 触发形核的塑性应变较大 (0.1 ~ 0.3). 含残余应力试样在接头受载之前呈弹性不均匀分布状态, 受载中局部应力集中位置迅速产生塑性变形; 不含残余应力试样在接头受载时先产生弹性变形, 后产生塑性变形. 两种试样在焊接接头形成过程中的塑性应变相同, 在受载过程中的应变差异集中于弹性变形. 然而, 该弹性应变 (对于所研究铝合金, 约为 0.003) 远小于触发形核所需的应变. 此外, 微孔洞形核后, 接头仍需再经过较大程度的塑性变形以产生微孔洞的长大、聚合, 直至断裂. 因此, 相对于受载过程焊接接头产生的塑性应变, 焊接残余应力对损伤产生以及积累所起的作用较小. 其次, 微孔洞长大过程的损伤, 即孔洞体积分数包含三方面, 即材料的初始孔洞体积分数、微孔洞长大至发生聚合时的临界体积分数和断裂时的临界体积分数. 材料以及焊接接头的这 3 个参量与材料本身性质有关. 两种试样的焊接接头微观组织分布、组织状态一致, 因而

拉伸过程中, 材料的损伤积累过程一致, 因此两者断面的断裂特征一致. 焊接残余应力与微孔洞体积分数基本无关联性, 从而不会影响到接头受载过程损伤的产生及积累. 最后, 微孔洞发生交互作用时的非均匀应力场与材料类型、微观组织等因素相关. 微孔洞发生交互作用时, 材料内部损伤已经积累到一定程度, 接头也经过了大量的塑性变形, 而最初焊接残余应力的分布经过大量塑性变形后作用消失.

综上所述, 焊接残余应力对焊接接头受载的损伤过程作用不大. 焊接过程形成的塑性应变对接头拉伸过程损伤积累的影响程度仍需进一步研究. 文中的无残余应力试样仅是试样尺寸效应使残余应力释放, 焊接过程的塑性应变予以保留, 可以排除该塑性应变的干扰, 然而, 现有的焊接残余应力控制手段 (随焊或焊后处理措施) 会额外产生塑性应变, 势必会影响到损伤积累过程的三要素, 但是影响程度及机理, 有待于进一步探索.

## 4 结论

(1) 采用有限元数值模拟对标准试样 A 和较大尺寸试样 B 的焊接及制备过程进行分析. 结果表明, 试样 B 焊接残余应力分布与焊接试板一致, 标准试样 A 的焊接残余应力基本释放 (可看作不含残余应力试样).

(2) 分别对两种试样进行力学性能测试和断口微观形貌标准测试. 结果表明, 焊接残余应力的存在对焊接接头抗拉强度、断后伸长率、接头断裂形式、断面微观断裂特征等影响较小.

(3) 基于细观损伤的断裂力学理论, 从损伤积累过程三要素角度分析了焊接残余应力在接头拉伸过程中损伤产生及积累过程的影响机制. 结果表明, 焊接接头形成后的残余应力释放并不会对焊接接头的承载能力产生明显影响, 而随焊或焊后残余应力控制手段, 会使焊接接头产生明显的塑性变形, 会明显影响到损伤积累过程的三要素, 可能会改变接头的承载能力, 但是该影响作用及机理仍需进一步研究.

## 参考文献

[1] 薛彩军, 许江波, 梁珩, 等. 2219 铝合金焊缝组织及其对力学性

- 能的影响[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(1): 145 – 149.
- Xue Caijun, Xu Jiangbo, Liang Heng, *et al.* Microstructure of 2219 aluminum alloy weld and its effect on mechanical properties[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(1): 145 – 149.
- [2] Gayle F W, Goodway M. Precipitation hardening in the first aerospace aluminum alloy: the wright flyer crankcase[J]. Science, 1994, 266(5187): 1015 – 1017.
- [3] Jr E A S, Williams J C. Progress in structural materials for aerospace systems1[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775 – 5799.
- [4] 李权. 2219 铝合金熔化焊接头力学性能薄弱区研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Li Quan. Study on weak zone of mechanical properties of 2219 aluminum alloy melting welded joint [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [5] Withers P J, Bhadeshia H K D H. Residual stress. Part 1-measurement techniques[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(4): 355 – 365.
- [6] 张书奎, 罗植廷. 浅析焊接残余应力及其消除方法 [J]. 冶金动力, 1996(6): 38 – 41.
- Zang Shukui, Luo Zhiting. Analysis of welding residual stress and its elimination method[J]. Metallurgical Power, 1996(6): 38 – 41.
- [7] 李栋. 正面随焊超声波冲击对焊接残余应力与变形的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- Li Dong. Effect of ultrasonic impact on welding residual stress and deformation [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [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 Bolin, Lei Siyong. Research progress on the effect of ultrasonic impact on welding residual stress[J]. Weapons Materials Science and Engineering, 2015, 38(2): 120 – 123.
- [9] 王志杰. 锤击法消除铸铁焊接应力的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- Wen Zhi Jie. Study on eliminating welding stress of cast iron by hammering method [D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [10] 王斌, 刘含伟, 李庆庆, 等. 高频感应加热处理对 2219 铝合金 FSW 焊接接头残余应力的影响 [J]. 电焊机, 2019, 49(5): 59 – 63.
- Wang Bin, Liu Hanwei, Li Qinqin, *et al.* Effect of high frequency induction heating on residual stress of 2219 aluminum alloy FSW welded joint[J]. Welding Machine, 2019, 49(5): 59 – 63.
- [11] 但楚臣. 焊后火焰加热对 06Cr19Ni10 焊接接头组织与性能的影响研究 [J]. 金属加工(热加工), 2019(7): 87 – 90.
- Dan Chuchen. Effect of flame heating after welding on microstructure and properties of 06Cr19Ni10 welded joints[J]. Metal Processing (Hot Working), 2019(7): 87 – 90.
- [12] 陈长俊. 钢桥面板横向焊接残余应力分布及其对疲劳寿命的影响 [J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(3): 26 – 30.
- Chen Changjun. Residual stress distribution in transverse welding of steel bridge deck and its effect on fatigue life[J]. Journal of Henan Institute of Urban Construction, 2019, 28(3): 26 – 30.
- [13] 苟磊, 马玉娥, 杜永, 等. 7050 凹槽铝板激光冲击强化残余应力分布与疲劳寿命 [J]. 航空学报, 2019, 40(12): 244 – 254.
- Gou Lei, Ma Yu'e, Du Yong, *et al.* Laser shock strengthening residual stress distribution and fatigue life of 7050 groove aluminum plate[J]. Journal of Aeronautics, 2019, 40(12): 244 – 254.
- [14] Das A. Fracture complexity of pressure vessel steels[J]. Philosophical Magazine, 2017, 97(33): 3084 – 3141.
- [15] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 157 – 169.
- [16] Chhibber R, Biswas P, Arora N, *et al.* Micromechanical modeling of weldments using GTN model[J]. International Journal of Fracture, 2010, 167(1): 71 – 82.
- [17] Benseddiq N, Imad A. A ductile fracture analysis using a local damage model[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 219 – 227.
- [18] Tu H, Schmauder S, Weber U. Numerical study of electron beam welded butt joints with the GTN model[J]. Computational Mechanics, 2012, 50(2): 245 – 255.

第一作者简介: 许欣欣, 1995 年出生, 硕士研究生; 主要从事轻质合金搅拌摩擦焊及材料表面改性研究; Email: [18852852994@163.com](mailto:18852852994@163.com).

通信作者简介: 周利, 副教授, 博士研究生导师; Email: [zhou.li@hit.edu.cn](mailto:zhou.li@hit.edu.cn).

(编辑: 杨婉春)