

特种成形

铝合金自冲铆接接头变形特性与疲劳失效机制

张先炼, 张 青, 扶文生, 田茂涛

(长江大学 机械工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 针对同种铝合金自冲铆接接头开展疲劳试验研究, 结合断口分析和疲劳变形分析, 探究接头的高周疲劳失效机制与变形特性。结果表明: 自冲铆接接头在承载过程中, 单搭结构受二次弯曲效应影响, 上板末端出现明显翘曲变形。高周疲劳试验中存在上板断裂和下板断裂两种疲劳失效形式, 上板断口存在多处疲劳源, 裂纹在上板底面萌生, 呈发散状逐渐扩展至顶面; 下板断口的两处疲劳源所处区域对称分布, 以一侧为主扩展源区, 且末端呈现出瞬间断裂特征。阶段中止疲劳试验结果与变形特征表明, 疲劳裂纹萌生寿命显著高于裂纹扩展寿命; 疲劳变形程度随载荷水平的提高越严重, 在疲劳变形曲线的稳定增长阶段, 接头变形量与疲劳寿命之间具有线性特征。

关键词: 自冲铆接; 高周疲劳; 塑性变形; 疲劳变形; 失效机制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.017

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0115-10

Deformation characteristic and fatigue failure mechanism on self-piercing riveting joints for aluminium alloy

Zhang Xianlian, Zhang Qing, Fu Wensheng, Tian Maotao

(School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: The fatigue tests for the self-piercing riveting (SPR) joints of similar aluminium alloy were carried out, and the fracture analysis and fatigue deformation analysis were conducted to explore the high-cycle fatigue failure mechanism and deformation characteristics of joints. The results show that during the load-bearing process of SPR joints, the single lap structure is affected by the secondary bending effect, resulting in significant warping deformation at the end of upper plate. In high-cycle fatigue tests, there are two types of fatigue failure modes, namely, upper plate fracture and lower plate fracture. There are several fatigue sources on the upper plate fracture, and the crack initiates at the bottom of upper plate, gradually extends to the top surface in a divergent manner. The two fatigue sources of the lower plate fracture are symmetrically distributed in the region, with one side as the main extended source area, and the end shows instantaneous fracture characteristics. The results and deformation characteristics of the stage suspension fatigue test indicate that the initiation life of fatigue crack is significantly longer than the propagation life of crack. The degree of fatigue deformation becomes more serious with the increasing of load level. In the stable growth stage of the fatigue deformation curve, there is a linear characteristic between the deformation amount of joint and the fatigue life.

Key words: self-piercing riveting; high-cycle fatigue; plastic deformation; fatigue deformation; failure mechanism

自冲铆接 (Self-piercing Riveting, SPR) 技术是

一种快速机械冷成形连接工艺, 通过冲头推动半空心铆钉刺穿上层板材并部分刺入下层板材, 借助下模具的反作用力形成牢固的机械内锁结构, 以实现有效连接。SPR 诞生于 20 世纪 60 年代, 直到 20 世纪 90 年代, 由于汽车工业对轻量化铝合金结构的迫切需求, 才得以迅速发展并逐步开展相关的科学研究^[1-2]。相

收稿日期: 2024-03-05; 修订日期: 2024-06-10

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2023AFB303); 湖北省
工业互联网智能传感工程技术研究中心开放课题 (KZX202205)

作者简介: 张先炼 (1992-), 男, 博士, 讲师, 硕士研究生导师

E-mail: xlianzhang@yangtzeu.edu.cn

[12] 王胜龙, 秦中环, 周小京, 等. 航天用 6005A 铝合金热变形行为研究 [J]. 航天制造技术, 2021 (6): 5-11, 21.

Wang S L, Qin Z H, Zhou X J, et al. Study on the hot deformation behavior of 6005A aluminum alloy for aerospace applications [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021 (6): 5-11, 21.

[13] 王胜龙, 秦中环, 周小京, 等. 复杂多腔体铝合金型材挤压

模具设计及挤压过程数值模拟研究 [J]. 航天制造技术, 2021 (5): 1-5, 18.

Wang S L, Qin Z H, Zhou X J, et al. Design of extrusion molds for complex multi-cavity aluminum alloy profiles and numerical simulation of extrusion process [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021 (5): 1-5, 18.

较于传统铆接、电阻点焊与结构粘接等技术,自冲铆接具有工艺简单,易于自动化,低能耗,可实现对不同厚度板材的连接、不同材质板材的连接,且无需对被连接板材进行预处理,环境友好型工艺等诸多优势,已经被广泛应用于汽车工业、建筑及家电等行业,以满足日益严苛的节能减排法规以及持续增加的薄壁结构轻量化需求^[3-4]。

近几年,用于实现对铝合金同种或异种薄板组合的有效连接仍是自冲铆接技术的主要且最为重要的应用领域^[5-8]。国内外学者也对此类接头开展了大量的研究工作,尤其对于同种铝合金薄板自冲铆接接头疲劳特性的研究方面。邢保英等^[9]基于疲劳试验研究了铆钉数量对铝合金自冲铆接接头疲劳特性的影响,并指出疲劳性能并不随铆钉数量的增加而呈倍数增长的关系,减缓接头内部的微动磨损现象可以提高接头寿命。Kang S H 等^[10]对比分析了拉剪、剥离及十字这 3 种类型自冲铆接接头的疲劳性能及失效形式,阐述了接头的疲劳裂纹萌生机理,对自冲铆接接头的等效应力强度因子进行了相关论证。Choi D H 等^[11]研究了不同加载角度对自冲铆接接头疲劳强度的影响,指出等效应力强度因子能够对疲劳寿命超过 1×10^5 周次的接头进行有效预测。Moraes J F C 等^[12]采用试验和数值模拟方法系统性地研究了铝合金自冲铆接接头的高周疲劳失效机理,发现疲劳裂纹萌生主要取决于铆接工艺过程和微动磨损机理。Huang L 等^[13-14]集中研究了同种铝合金及异种钢铝自冲铆接接头的疲劳失效行为,并采用有限元方法和中止疲劳试验对试验结论进行验证,指出不同于异种接头,同种铝合金接头的疲劳裂纹萌生寿命明显高于裂纹扩展寿命。Li D Z 等^[15]着重讨论了双铆钉铝合金自冲铆接接头中铆钉至板材边缘的距离对疲劳性能的影响。Zhao L 等^[16]详细分析了板材厚度对铝合金自冲铆接接头疲劳特性的影响,发现随着板材厚度的增加,疲劳失效的部位会发生转移,接头内部的微动行为得到一定程度的减缓,从而提高了疲劳寿命。

自冲铆接接头疲劳失效问题一直是该领域的研究热点,针对性的研究对于自冲铆接接头的损伤容限设计至关重要,但现有研究较少关注自冲铆接接头在承载过程中的变形失效特性。本文以同种 5083 铝合金薄板自冲铆接接头为研究对象,开展拉伸试验、全寿命高周疲劳试验与阶段中止疲劳试验研究,利用电子扫描显微镜对疲劳断口进行观察,对接头的承载变形特性进行分析和总结,探究自冲铆接接

头的变形特性与失效行为的关联机制。以期为针对自冲铆接接头的抗疲劳设计及疲劳寿命预测的相关研究和应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为厚度为 1.5 mm 的 AA5083 铝合金薄板,将板材沿轧制方向裁剪为尺寸为 100 mm×25 mm×1.5 mm 的薄板试样,其力学性能参数如表 1 所示。

表 1 AA5083 铝合金薄板的力学性能
Table 1 Mechanical properties of AA5083 aluminium alloy plate

参数	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/%
数值	70	300	168	24

自冲铆接试验采用伺服电缸自冲铆接设备,试验过程基于剖面直观检测法对比分析同种 AA5083 铝合金薄板组合的接头成形质量。最终确定的试验接头半剖面如图 1 所示,其钉头高度为 0.14 mm,钉脚张开度为 0.83 mm,残余底厚为 0.28 mm。采用的铆钉及下模的主要尺寸如图 2 所示,铆钉材质为 36MnB4 钢,铆钉硬度为 (44 ± 2) HRC。参照该接头截面,制备若干同种 AA5083 铝合金薄板单搭自冲铆接接头试样,搭接长度为 25 mm。

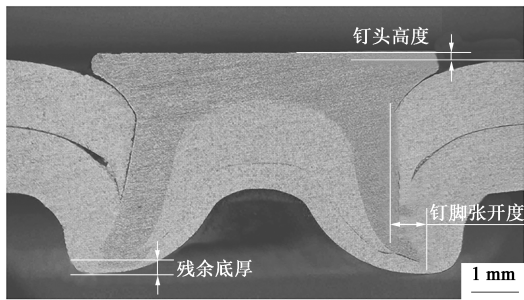


图 1 AA5083 铝合金自冲铆接接头成形截面
Fig. 1 Formed cross-section of SPR joints for AA5083 aluminium alloy

AA5083 铝合金自冲铆接接头性能测试采用美国 MTS Landmark 100 型电液伺服材料试验机,在常温大气环境下进行。为尽量降低附加弯矩的影响,测试过程均在接头试样两端加持 20 mm×25 mm×1.5 mm 的垫片,试样安装如图 3 所示。以拉伸速率 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 进行 5 次重复性单向拉伸-剪切试验,获取接头的静载失效特性。在此基础上,基于成组试验法,采用 4 级载荷水平开展高周疲劳试验,每

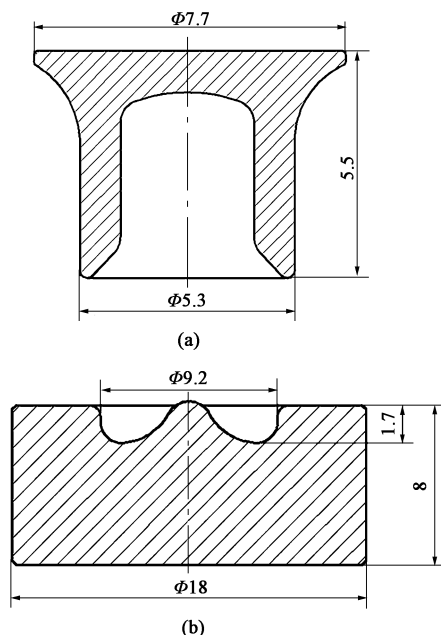


图 2 铆接工具截面尺寸示意图

(a) 自冲铆钉 (b) 下模具

Fig. 2 Schematic diagrams of cross-section sizes for riveting tools

(a) Self-piercing rivet (b) Lower die

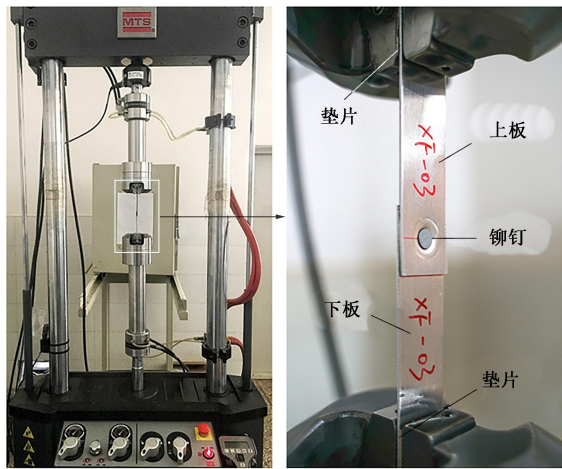


图 3 疲劳试验试样安装实物图

Fig. 3 Installation physical map of fatigue test specimen

级载荷水平下测试 4 个有效试样, 载荷比为 0.1, 试验频率为 30 Hz, 以拉-拉加载模式施加正弦波形循环载荷, 以接头试样出现裂纹或完全断裂为失效判据, 测定接头的疲劳性能。此外, 为观测宏观裂纹扩展特征, 还开展了阶段中止疲劳试验。疲劳试验过程中利用力传感器和位移传感器记录试样在疲劳循环载荷作用下的实时变形量; 利用光学显微镜及 JSM-IT300 电子扫描显微镜观察接头疲劳裂纹特征及微观断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 静载失效特性

通过拉伸-剪切试验获得 AA5083 铝合金自冲铆接接头的平均失效载荷为 4.741 kN。其典型载荷-位移曲线如图 4 所示, 呈现出 3 个典型阶段特征: a 点之前为弹性阶段, ad 段为屈服阶段, d 点之后为快速失效阶段。载荷-位移曲线中各特征转折点所对应的接头变形特征如图 5 所示, 可见上层板材在承受拉剪载荷 F 过程中尾端存在明显翘曲变形特征, 上板尾端与下板之间的翘曲夹角 δ 逐渐增大, 直至铆钉完全从下板中被拉出, 导致接头出现铆钉拉脱失效特征。

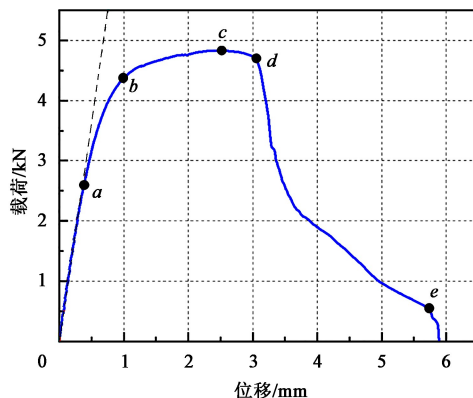


图 4 典型载荷-位移曲线

Fig. 4 Typical load-displacement curve

拉剪载荷作用下, 接头的翘曲变形主要源于单搭接接头的二次弯曲效应, 载荷作用导致铆钉整体承受剪切力, 使得上板受到铆钉头的挤压作用而出现弯曲变形; 这一特征与最终静载失效形式关系密切。然而, 在承载过程中难以实时测量翘曲夹角 δ 的变化, 常借助纵向位移参数反映接头的变形程度, 由图 4 所示横向位移参数可初步判断接头所处的承载变形阶段。

2.2 疲劳失效行为

疲劳试验结果如表 2 所示。在载荷水平为 60% 时, 接头的疲劳寿命 N 处于 10^4 数量级; 在较低载荷水平 40% 情况下, 疲劳寿命超过 5×10^5 ; 在载荷水平为 35% 时, 开始出现疲劳寿命超过 10^6 数量级的试样, 疲劳寿命随着载荷水平的降低呈现增长趋势, 疲劳寿命分级明显, 且在各级载荷水平下疲劳寿命未出现越级情况, 符合自冲铆接接头的疲劳寿命特征, 在一定程度上说明了试验的有效性。采用最小二乘法线性拟合获取接头的 $F-N$ 曲线拟合方程, $F-N$ 曲线如图 6 所示, 相关系数 $r = -0.9830$,

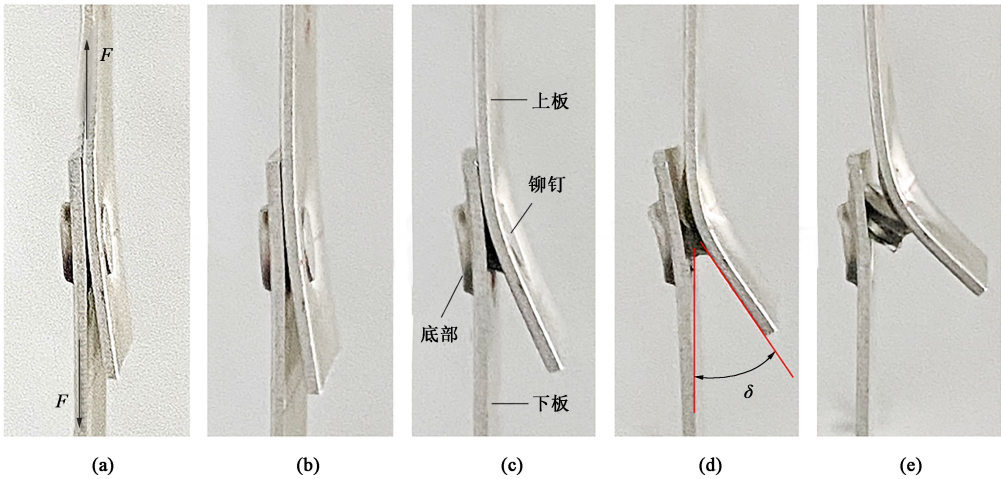


图 5 拉伸-剪切试验接头失效过程

(a) a 点 (b) b 点 (c) c 点 (d) d 点 (e) e 点

Fig. 5 Failure process of joint during tensile-shear test

(a) Point a (b) Point b (c) Point c (d) Point d (e) Point e

可见疲劳载荷幅值与对数寿命之间呈高度线性相关。

表 2 AA5083 铝合金自冲铆接头疲劳试验结果
Table 2 Fatigue test results of SPR joints for AA5083
aluminium alloy

载荷水平	试样编号	疲劳寿命/次	失效形式
60% (2.845 kN)	01	69481	下板断裂
	02	83026	下板断裂
	03	70232	下板断裂
	04	77110	下板断裂
50% (2.371 kN)	05	132929	下板断裂
	06	255175	上板断裂
	07	200551	上板断裂
	08	171631	下板断裂
40% (1.900 kN)	09	607351	上板断裂
	10	612631	下板断裂
	11	653701	下板断裂
	12	646219	下板断裂
35% (1.659 kN)	13	1155751	上板断裂
	14	950728	上板断裂
	15	821903	上板断裂
	16	778552	上板断裂
	17	900000	未失效

疲劳载荷作用下, AA5083 铝合金自冲铆接头具有上板断裂和下板断裂两种疲劳失效形式, 且在高载荷下以下板断裂失效为主, 低载荷下主要为上板断裂失效。由图 7 可见, 两种失效试样的铆钉均未遭到破坏, 被连接板材均沿板宽方向发生断裂, 且板材断

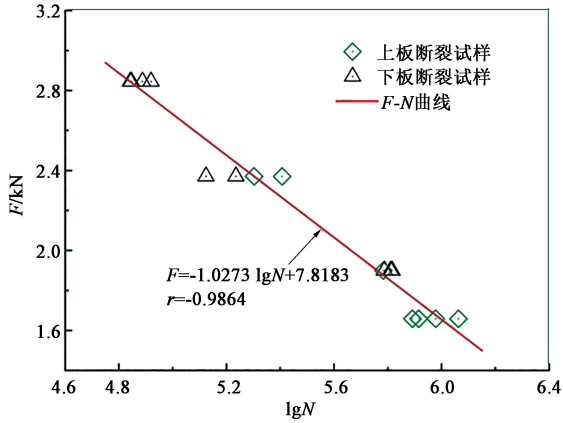


图 6 AA5083 铝合金自冲铆接头 $F-N$ 曲线

Fig. 6 $F-N$ curve of SPR joints for AA5083 aluminium alloy

口两侧末端均可见明显的塑性变形特征, 是疲劳瞬断区的主要特征。如图 7a 所示, 上板断裂路径紧靠铆钉头部, 且与铆钉无直接接触, 整个机械内锁结构依然完整, 属于上板沿孔断裂; 如图 7b 所示, 下板断裂路径穿过接头底部, 铆钉尾部因接头底部破坏而外露, 机械内锁结构已经失效, 属于下板穿底断裂。

2.3 疲劳断口形貌

AA5083 铝合金自冲铆接头的宏观疲劳断口特征显著, 呈现出疲劳裂纹源区、疲劳裂纹扩展区和疲劳瞬断区 3 个典型特征; 其中裂纹扩展区的断口表面整体较为平整, 属疲劳脆性断裂, 瞬断区的断口表面比较粗糙, 具有典型的塑性断裂特征。

图 8 为 AA5083 铝合金自冲铆接接头的典型上板断口的 SEM 图像, 图 8a~图 8d 为上板断口表面由左至右的局部放大图。图 8b 为疲劳裂纹源区的断

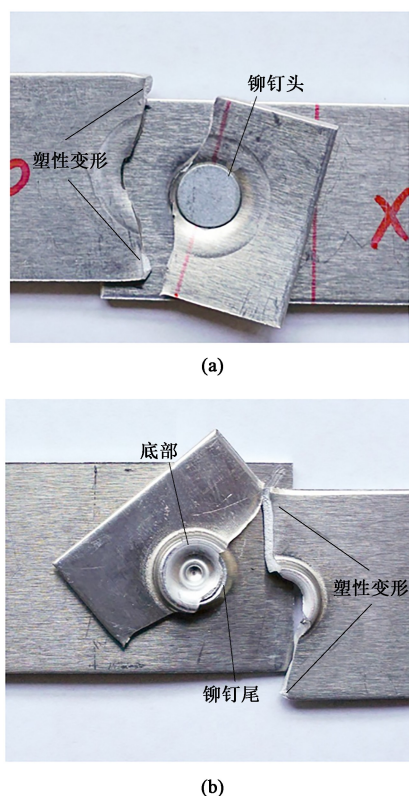


图7 AA5083 铝合金自冲铆接头疲劳失效试样

(a) 上板沿孔断裂 (b) 下板穿底断裂

Fig.7 Fatigue failure specimens of SPR joints for AA5083 aluminium alloy

(a) Fracture along hole of upper plate

(b) Fracture through bottom of lower plate

口区域,处于整个上板断口的中间部位,其疲劳源不止一处,从上板底面萌生,逐渐扩展至顶面。局部区域呈现出较多的台阶状特征,存在许多断裂小平面,这也说明断口疲劳源不止一处;随着裂纹的扩展,台阶相互汇合形成短而弯曲的河流花样,这表明该区域为准解理断裂。图8a和8c为疲劳裂纹稳态扩展区的断口,可以清晰地观察到扩展区与瞬断区之间的分界线,扩展区内断口表面纹理呈现出发散状,表明疲劳裂纹扩展方向由疲劳源指向左侧或右侧斜上方。在图8a和图8c的放大图中均可观察到大量的疲劳条带与一定数量的孔洞,这些孔洞处在裂纹扩展路径上,通常是第二相颗粒在疲劳循环载荷作用下剥落所致,使得裂纹绕过孔洞继续扩展,导致部分疲劳条带之间存在一定夹角,但仍大致与裂纹扩展方向垂直。当裂纹扩展至板材剩余结构不足以承受疲劳载荷时,出现疲劳瞬断区,如图8d所示,断口具有明显的紧缩特征,微观形貌可见大量韧窝。

图9为典型下板断口SEM图像。通过局部放大

图可以发现,下板断口同样不止一处疲劳源,如图9b和图9c所示,两处疲劳源所处的部位基本对称。如图9b所示,左侧疲劳源区的面积更大,表面平整,其微观形貌中存在一定数量的孔洞和二次裂纹,孔洞的形成对二次裂纹的产生起到促进作用,同时随着疲劳裂纹扩展速率的增大,容易生成二次裂纹。随着裂纹继续向右侧扩展,可以观察到图9a和图9b中裂纹扩展初期与裂纹稳态扩展区的分界线,后者的断口表面更加粗糙,表明疲劳裂纹扩展速率是逐渐增大的趋势。如图9a放大图所示,该区域的微观形貌与上板断口类似,存在明显的疲劳条带和一定数量的孔洞。如图9c所示,右侧疲劳源区域的面积小,呈现出放射状扩展特征,但裂纹扩展路径被周围出现的瞬断区阻断,局部区域存在大量的韧窝。如图9d所示,且其右侧断口区域同样以韧窝形貌为主。这说明下板断裂主要是由左侧的疲劳源所致,左侧疲劳裂纹扩展速率相较于右侧更快,且速率不断增大,使得裂纹迅速扩展至左侧断口末端,而后以瞬间断裂特征阻断了右侧裂纹的继续扩展,导致右侧断口以塑性断裂为主。

2.4 疲劳变形特性

在高周疲劳试验中,接头承受拉-拉疲劳载荷,载荷水平为60%,略高于图4中a点,处于屈服阶段;其余载荷水平均低于a点,处于弹性阶段。接头在各级疲劳载荷幅值作用下的疲劳变形特征如图10所示;与拉伸-剪切试验类似,上板末端同样存在不同程度的翘曲变形,载荷水平为60%、50%和40%时的翘曲角度依次为 5.58° 、 4.52° 和 2.33° ;可见载荷水平越高,上板翘曲夹角越大,变形程度越严重,这与图5所示拉伸-剪切试验过程的变形特征一致。因此,考虑通过记录接头在疲劳载荷作用下的位移参数以探究接头的疲劳变形特性,即在各级疲劳载荷幅值的作用下,依据疲劳寿命 N 等间隔提取各接头的相对位移参数,记为接头变形量 D 。

图11为AA5083铝合金自冲铆接头在疲劳载荷幅值为2.845和2.371 kN下的疲劳变形曲线($D-N$ 曲线)。可见,接头变形量 D 随疲劳寿命 N 呈现出稳定增长的特点,曲线整体具有线性相关特征;但在曲线末端,接头变形量呈快速上涨趋势,直至接头失效。图12为接头在疲劳载荷幅值为1.900和1.659 kN下的 $D-N$ 曲线。随着载荷水平的降低,曲线趋势与图11存在明显差异:曲线前期变形量的上涨趋势逐渐放缓,需经过约 1×10^5 次循环(图11中点划线A)逐渐进入稳定增长阶段,而后与图11中

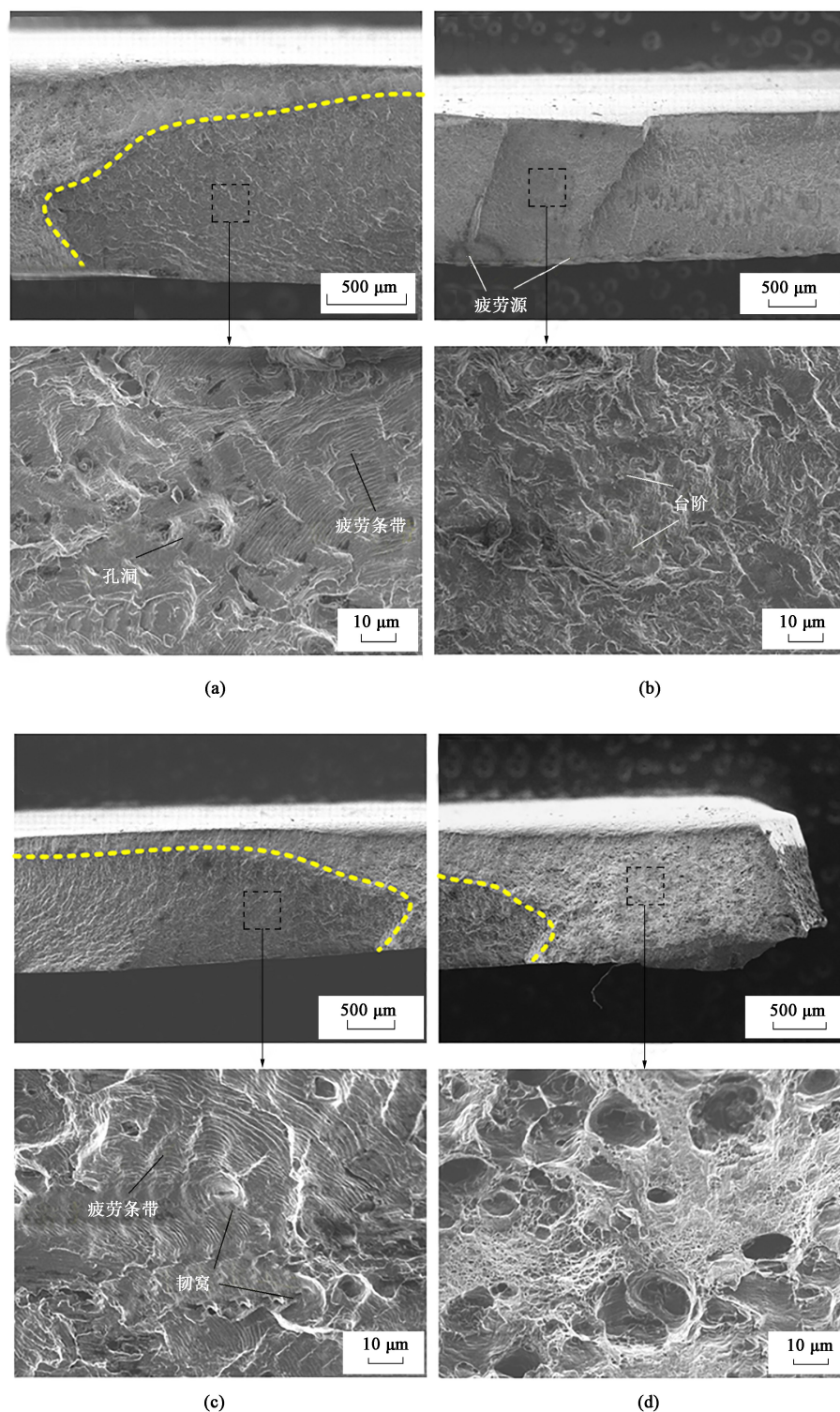


图 8 AA5083 铝合金自冲铆接接头上板疲劳断口形貌

(a) 左侧扩展区 (b) 疲劳源区 (c) 右侧扩展区 (d) 瞬断区

Fig. 8 Fatigue fracture morphologies of upper plate for SPR joints of AA5083 aluminium alloy

(a) Propagation region on left (b) Fatigue source region (c) Propagation region on right (d) Instant fracture region

的曲线特征类似。这种差异与疲劳载荷水平存在直接关联，在较高载荷下，接头的变形特征较为明显，能够快速进入稳定增长阶段，试验发现这一过程不

超过 100 次循环。然而，在较低载荷下，如图 10c 所示，接头的变形程度较小，变形量需逐渐累积至一定程度才会转变为稳定增长，这一过程所需的循

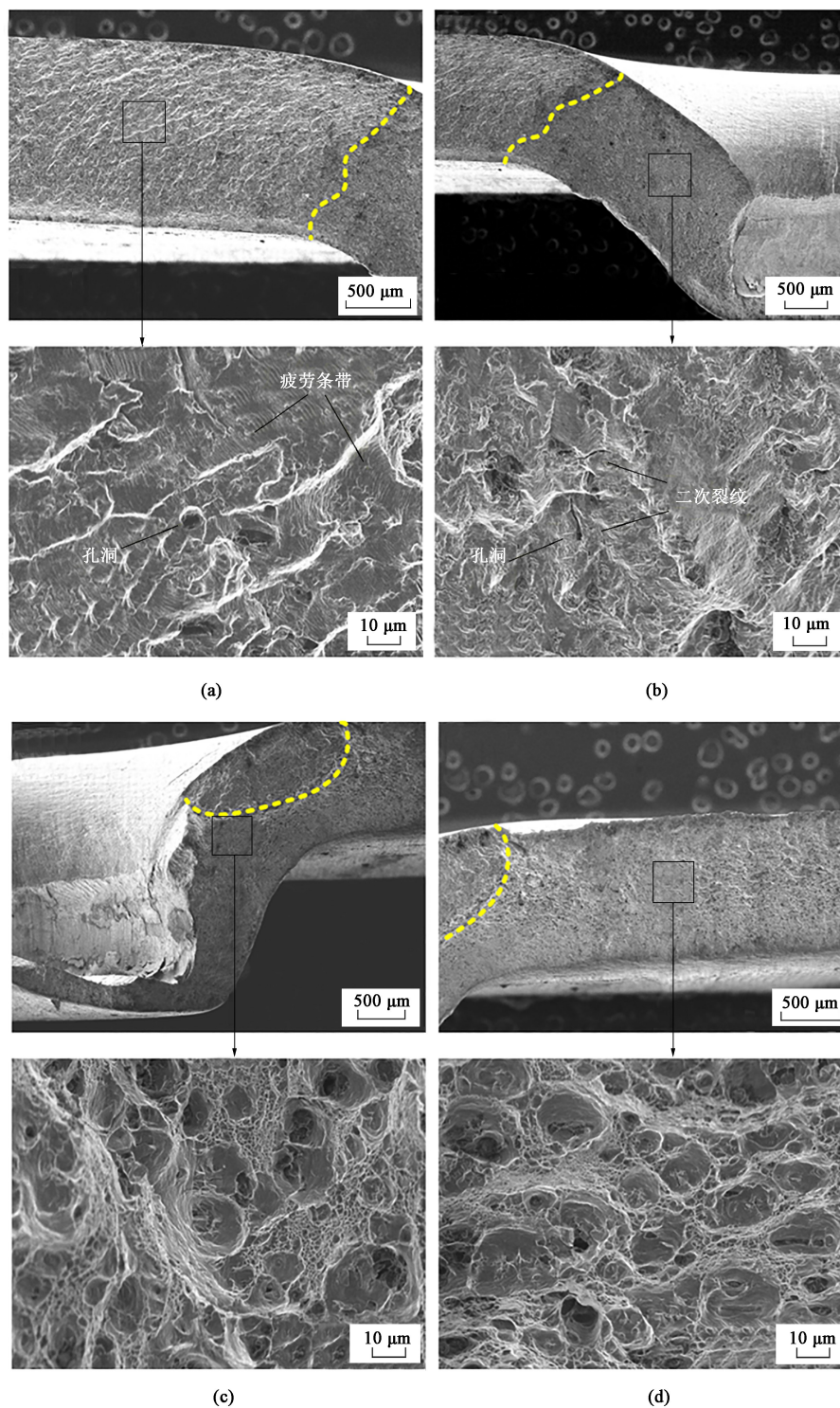


图 9 AA5083 铝合金自冲铆接头下板疲劳断口形貌

(a) 左侧扩展区 (b) 左侧疲劳源区 (c) 右侧疲劳源区 (d) 瞬断区

Fig. 9 Fatigue fracture morphologies of lower plate for SPR joints of AA5083 aluminium alloy

(a) Propagation region on left (b) Fatigue source region on left (c) Fatigue source region on right (d) Instant fracture region

环次数显著增加。此外，在较低载荷水平下，接头变形量在稳定增长阶段存在波动，部分数据点呈降低趋势，试样 11 和试样 13 更为突出。这表明在低载荷作用下，接头以弹性变形为主，塑性变形的累积过

程极为缓慢；其机械内锁结构在循环载荷作用下，内部界面接触特征发生了变化，导致接头整体塑变特征不稳定；这种不稳定特征在一定程度上有助于延缓疲劳裂纹的萌生，同时延长了接头的疲劳寿命。

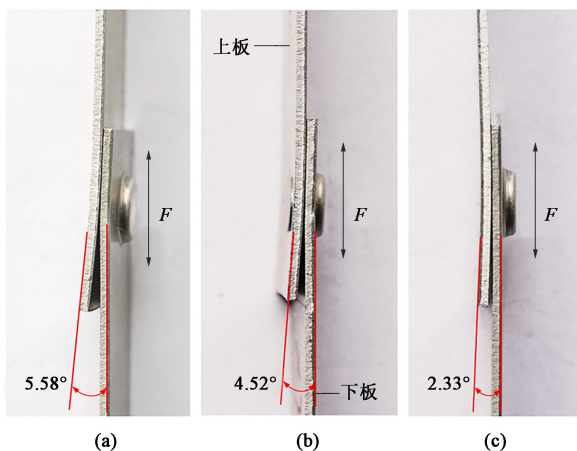


图 10 疲劳载荷作用下接头变形特征

(a) 载荷水平为 60% (b) 载荷水平为 50% (c) 载荷水平为 40%

Fig. 10 Joint deformation characteristics under fatigue load

(a) Load level of 60% (b) Load level of 50% (c) Load level of 40%

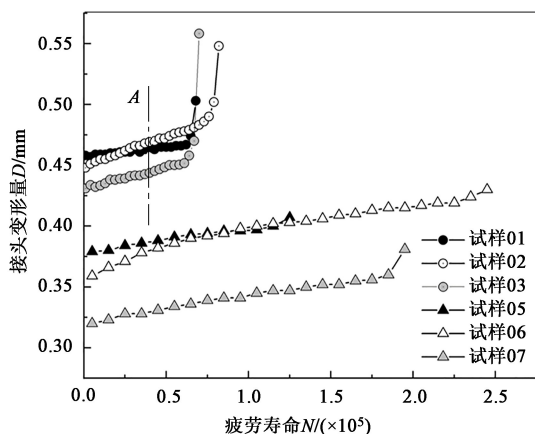


图 11 较高疲劳载荷幅值作用下的 $D-N$ 曲线

Fig. 11 $D-N$ curves under higher fatigue load amplitudes

2.5 宏观疲劳裂纹分析

依据接头变形量-疲劳寿命 ($D-N$) 曲线特征,并结合各级载荷水平下的中值疲劳寿命,设计中止疲劳试验的疲劳寿命中止阶段。在载荷水平为 60% 时, $D-N$ 曲线的线性相关性比较明显,因此,设定疲劳寿命达到 50% 左右为中止阶段,试验中实际疲劳寿命达到 3.8 万次时停止试验,如图 11 中点划线 A 处所示。在载荷水平为 40% 和 35% 时, $D-N$ 曲线前期接头变形增量逐渐降低并趋于稳定,后期增量逐渐提升直至失效;考虑到裂纹萌生可能出现在各转折点区域,因此,设定疲劳寿命达到对应转折点附近时中止试验,试验中实际疲劳寿命分别达到 3×10^5 和 9×10^5 次,如图 12 中点划线 B 和点划线 C 处所示。

针对上述阶段中止疲劳试样进行研究,经表面和拆解观测后均未发现裂纹。考虑到各级载荷水平

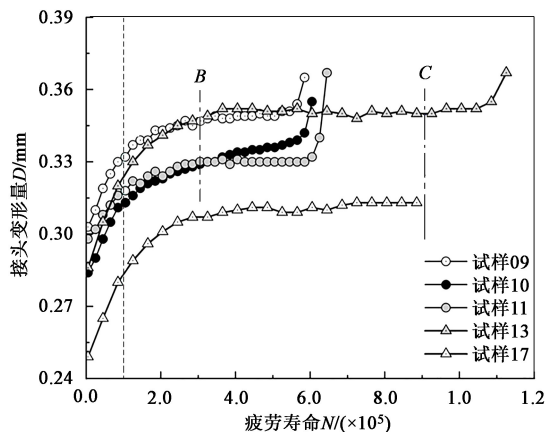


图 12 较低疲劳载荷幅值作用下的 $D-N$ 曲线

Fig. 12 $D-N$ curves under lower fatigue load amplitudes

下接头疲劳寿命存在一定的分散性,难以通过阶段中止疲劳试验直接观察到裂纹萌生的初期特征。基于此,继续提升中止阶段至疲劳寿命的 90% 以上,接头逐渐呈现出清晰的裂纹特征。图 13a 为上板疲劳裂纹特征,裂纹绕过铆钉头呈现出向两侧对称扩展的特点,这与图 8 中的断口形貌特征一致;图 13b 为下板疲劳裂纹特征,裂纹仅出现在接头底部左侧,说明裂纹优先向下板左侧扩展,这与图 9 所示断口形貌的分析结论一致。可见,疲劳裂纹已经从疲劳裂纹源区及扩展区生长至疲劳瞬间断裂区,板材虽未完全断裂,但剩余结构以疲劳瞬断区为主,通常仅能承受几千次循环载荷。

对存在裂纹的中止疲劳试样进行拆解,可观察到上板断裂试样在板厚方向上的断裂路径,如图 13c 所示,这与断口形貌的分析结果一致。上板底面的裂纹特征如图 13d 所示,相较于图 13a 的上板顶面裂纹,底面裂纹更长,这一特征与图 8c 所示的断口纹理特征一致,说明上板裂纹由裂纹源向两侧斜上方逐步扩展。图 13e 方框处为下板顶面的裂纹特征,可见,此刻疲劳裂纹已经完成了下板一侧的扩展,下板截面上未出现裂纹特征,说明下板裂纹从裂纹源出发先扩展至裂纹源一侧的板端,而后继续沿接头底部扩展至另一侧,这一现象与图 9 所示的断口形貌分析结论一致,且裂纹源处于两板间接触界面,并靠近下板与铆钉的接触区域。

阶段中止疲劳试验结果虽不能直接判定疲劳裂纹的确切萌生阶段,但进一步验证了疲劳断口形貌分析的部分结论,同时也说明 AA5083 铝合金自冲铆接接头的疲劳裂纹萌生寿命显著高于裂纹扩展寿命,裂纹萌生寿命占全寿命的比例甚至可达 90% 以上,而裂纹扩展寿命占比较低。

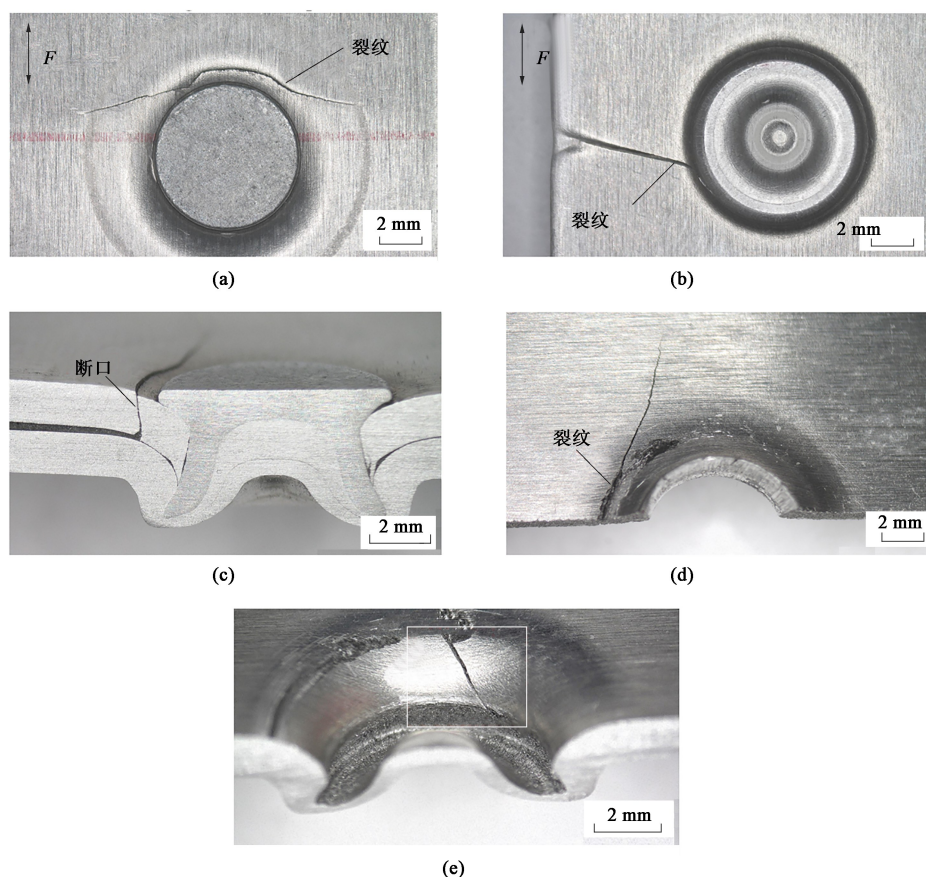


图 13 阶段中止疲劳试验试样疲劳裂纹特征

(a) 上板裂纹 (b) 下板底面裂纹 (c) 接头截面断口 (d) 上板底面裂纹 (e) 下板顶面裂纹

Fig. 13 Fatigue crack characteristics of specimens in stage suspension fatigue test

(a) Crack on upper plate (b) Crack on bottom of lower plate (c) Fracture of joint cross-section (d) Crack on bottom of upper plate (e) Crack on top surface of lower plate

3 结论

(1) AA5083 铝合金自冲铆接接头在拉伸试验过程中存在明显的塑性变形现象, 失效形式为铆钉拉脱; 高周疲劳试验中寿命随着载荷水平的降低而增长, 表现出上板断裂和下板断裂两种疲劳失效形式。

(2) 上板疲劳裂纹的疲劳源不止一处, 在上板底面萌生, 呈发散状逐渐扩展至顶面; 疲劳源区有准解理断裂特点。下板断口的两处疲劳源对称分布, 裂纹扩展至左侧断口末端后, 以瞬间断裂特征阻断右侧裂纹扩展。

(3) AA5083 铝合金自冲铆接接头的疲劳变形特征随载荷水平的提高而更加严重。在较高疲劳载荷幅值下, 接头变形量随疲劳寿命呈稳定增长的特点, 具有线性相关特征。随着载荷水平的降低, 接头以弹性变形为主, 塑性变形的累积过程极为缓慢, 呈现出塑变不稳定性, 有助于延缓疲劳裂纹萌生。

(4) AA5083 铝合金自冲铆接接头的疲劳裂纹萌生寿命显著高于裂纹扩展寿命, 裂纹萌生寿命占全寿命的比例可达 90% 以上, 而裂纹扩展寿命占比较低。

参考文献:

- [1] He X C, Pearson I, Young K. Self-pierce riveting for sheet materials; State of the art [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199 (1-3): 27-36.
- [2] Li D Z, Chrysanthou A, Patel I, et al. Self-piercing riveting-A review [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 1777-1824.
- [3] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化薄壁结构点连接技术研究进展 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (6): 125-146.
- [4] Li Y B, Ma Y W, Lou M, et al. Advances in spot joining technologies of lightweight thin-walled structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (6): 125-146.
- [4] 谢志强, 张爱林, 闫维明, 等. 冷弯薄壁型钢自冲铆接受拉性能及设计方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41 (10): 150-159.
- Xie Z Q, Zhang A L, Yan W M, et al. Study on tension properties

- and design method for self-pierce riveting in cold-formed thin-walled steel [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41 (10): 150-159.
- [5] 刘洋, 庄蔚敏, 施宏达. 自冲铆接头疲劳性能影响因素研究进展 [J]. *材料导报*, 2019, 33 (6): 1825-1830.
- Liu Y, Zhuang W M, Shi H D. Influencing factors on fatigue performance of self-piercing riveted joints: A review [J]. *Materials Reports*, 2019, 33 (6): 1825-1830.
- [6] 魏文杰, 何晓聪, 张先炼, 等. DP780/AA6061 薄板自冲铆接头微动损伤特性 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56 (6): 169-175.
- Wei W J, He X C, Zhang X L, et al. Characteristics of fretting damage in hybrid DP780/AA6061 self-piercing riveted joints [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56 (6): 169-175.
- [7] 张永超, 黄志超, 贾颖莲. B1500HS 高强度钢与 AA5052 铝合金自冲铆接成形与力学性能分析 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (10): 122-129.
- Zhang Y C, Huang Z C, Jia Y L. Forming and mechanical properties analysis of self-piercing riveted joints of B1500HS high strength steel and AA5052 aluminum alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (10): 122-129.
- [8] 毛晓东, 刘庆永, 李利, 等. 5182-O 铝合金板材自冲铆接工艺参数对接头组织和性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (5): 1239-1252.
- Mao X D, Liu Q Y, Li L, et al. Effect of technological parameters on microstructure and properties of self-piercing riveting joints of 5182-O aluminum alloy sheets [J]. *The Chinese Journal of Non-ferrous Metals*, 2021, 31 (5): 1239-1252.
- [9] 邢保英, 何晓聪, 王玉奇, 等. 铝合金自冲铆接头疲劳性能及失效机理 [J]. *焊接学报*, 2016, 37 (6): 50-54, 131.
- Xing B Y, He X C, Wang Y Q, et al. Fatigue properties and failure mechanisms of self-piercing riveted joints in aluminium alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37 (6): 50-54, 131.
- [10] Kang S H, Kim H K. Fatigue strength evaluation of self-piercing riveted Al-5052 joints under different specimen configurations [J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 80: 58-68.
- [11] Choi D H, Han D W, Kim H K. Fatigue life estimation of self-piercing riveted aluminum joints under mixed-mode loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 97: 20-28.
- [12] Moraes J F C, Rao H M, Jordon J B, et al. High cycle fatigue mechanisms of aluminum self-piercing riveted joints [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2018, 41: 57-70.
- [13] Huang L, Shi Y D, Guo H D, et al. Fatigue behavior and life prediction of self-piercing riveted joint [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 88: 96-110.
- [14] Huang L, Guo H D, Shi Y D, et al. Fatigue behavior and modeling of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 6111 [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 100: 274-284.
- [15] Li D Z, Han L, Thornton M, et al. Influence of rivet to sheet edge distance on fatigue strength of self-piercing riveted aluminium joints [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 558: 242-252.
- [16] Zhao L, He X C, Xing B Y, et al. Influence of sheet thickness on fatigue behavior and fretting of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5052 [J]. *Materials and Design*, 2015, 87: 1010-1017.

(上接第 93 页)

- Jiao N N. Effect of Zn on Mechanical Properties and Microstructure of Al-Mg-Si Alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [10] 周维, 张至柔, 赵仕林, 等. Cr、Mn 质量比对 Al-Mg-Si 合金组织和力学性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32 (8): 2185-2197.
- Zhou W, Zhang Z R, Zhao S L, et al. Effect of Cr-Mn mass ratio on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32 (8): 2185-2197.
- [11] 王飞, 祖立成, 黄大为, 等. 终轧温度对 6061 铝合金板力学性能均匀性的影响 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51 (9): 43-51.
- Wang F, Zu L C, Huang D W, et al. Effect of final rolling temperature on uniformity of mechanical properties of 6061 aluminum alloy plate [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51 (9): 43-51.
- [12] GB/T 16865—2023, 变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样及方法 [S].
- GB/T 16865—2023, Test pieces and methods for tensile test for wrought aluminium, magnesium and their alloy products [S].
- [13] 赵紫研. Cr 对 6xxx 系铝合金组织性能及弥散相的影响 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- Zhao Z Y. Effect of Cr Content on Microstructure, Mechanical Properties and Dispersions of 6xxx Aluminum Alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [14] 张新明, 周志乐, 唐建国, 等. Cr 元素对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金组织与性能的影响 [J]. *材料工程*, 2013 (12): 49-53, 58.
- Zhang X M, Zhou Z L, Tang J G, et al. Effects of Cr on microstructure and properties of Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013 (12): 49-53, 58.
- [15] Bjurenstedt A, Casari D, Seifeddine S, et al. In-situ study of morphology and growth of primary α -Al (FeMnCr) Si intermetallics in an Al-Si alloy [J]. *Acta Materialia*, 2017, 130 (15): 1-9.
- [16] 徐义, 牛魁, 钟剑, 等. Mn 和 Cr 对 6xxx 铝合金再结晶行为的影响 [J]. *金属热处理*, 2019, 44 (9): 27-31.
- Xu Y, Niu K, Zhong J, et al. Effects of Mn and Cr on recrystallization behavior of 6xxx aluminum alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44 (9): 27-31.