

文章编号:1001-4888(2018)01-0119-08

钛合金异质自冲铆接头力学性能及失效机理分析^{*}

刘洋, 何晓聪, 邓聪, 邢保英

(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500)

摘要: 对钛合金异质单搭及T型自冲铆接头进行拉伸-剪切实验和剥离实验, 对比接头的静力学性能, 用扫描电子显微镜对接头典型断口进行研究, 分析其微观失效机理。结果表明: TA1-Q215接头的最大失效载荷大于相同搭接类型的TA1-AA5052接头; TA1-AA5052单搭接头因下板断裂失效, 为韧性断裂特征; TA1-Q215单搭接头上板铆钉孔撕裂处为韧窝形貌, 铆钉与下板分离过程中, 下板发生塑性变形并与铆钉产生严重刮擦现象; TA1-AA5052T型接头因铆钉与下板分离失效, 下板出现明显的撕裂棱; 当TA1-Q215T型接头失效形式为铆钉与上板分离时, 上板撕裂处为准解理断裂机制; 当铆钉与下板分离时下板撕裂处为韧性断裂, 铆钉从下板剥离过程中产生刮痕。

关键词: TA1钛合金; 自冲铆接; 静力学性能; 失效机理; 断口分析

中图分类号: TH131.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-217

0 引言

结构轻量化的需求导致大量新轻型材料应用于结构设计制造中, 钛合金作为“崛起的第三代金属”, 因其比强度高、高低温性能优良、抗腐蚀性强和有记忆性等优势, 在航空航天、军工等制造业有广泛的应用前景^[1,2]。自冲铆接作为一种机械冷成型技术, 因其无需预先打孔、连接可靠性高、低能耗、自动化程度高, 对于新轻型合金、复合材料等难焊接薄板材料的连接有着无可替代的地位^[3,4]。

近年来, 国内外学者对自冲铆接技术进行了相关研究。He等^[5]研究了TA1钛合金同质异质单搭自冲铆接头的静力学性能, 研究表明TA1作为上板时接头具有更高的承载力。程强等^[6]对8090铝锂合金T型自冲铆接头的剥离性能进行实验研究, 结果表明Q215-8090组合接头的剥离载荷最大, 其失效模式为铆钉与下板分离。金鑫等^[7]以AA6061-DP590组合自冲铆接头为研究对象, 通过正交实验探究自冲铆接工艺参数对接头性能的影响, 得出铆钉长度是影响底部厚度和底切量的最主要因素; 铆钉长度增加导致底切量增加, 底部厚度减小。Han等^[8]对含有不同镀层的5754铝合金自冲铆接头微动行为进行研究, 结果表明镀层影响自冲铆接头的微动磨损机理, 导致接头疲劳寿命发生改变。Zhang等^[9]研究了退火处理对钛合金自冲铆接头力学性能的影响, 得出退火处理提高了TA1-TA1组合自冲铆接头在短寿命阶段的疲劳性能, 但对其静强度影响不大。邢保英等^[10]对AA5052铝合金单铆钉和多铆钉自冲铆接头的疲劳性能及失效机理进行研究, 发现多铆钉接头疲劳裂纹主要萌生于铆钉管腿与下板接触部位, 微动疲劳损伤由铆钉管腿底部向上蔓延。

目前对钛合金异质自冲铆接头力学性能及其微观失效机理研究相对较少。本文对钛合金异质单搭和T型自冲铆接头进行静力学实验, 研究接头的静力学性能, 通过扫描电子显微镜(SEM)对接头的微

* 收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2016-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51565023, 51565022); 云南省教育厅科学基金重大专项(ZD201504)

通讯作者: 何晓聪(1955—), 男, 教授, 博导。主要研究领域: 薄板材料连接新技术。Email: xiaocong_he@126.com

观失效机理进行分析。

1 试件制备

实验所用材料为钛合金板(TA1)、铝合金板(AA5052)和镀锌钢板(Q215)，材料的力学性能参数如表1所示。采用德国Böllhoff公司生产的自冲铆接设备(RIVSET VARIO-FC(MTF))对试件进行连接，分别制备TA1-AA5052单搭自冲铆接头(DA)、TA1-Q215单搭自冲铆接头(DB)、TA1-AA5052T型自冲铆接头(TA)和TA1-Q215T型自冲铆接头(TB)。试件的结构及尺寸如图1所示。

表1 板材力学性能参数

Tab. 1 Mechanical properties of sheet materials

材料	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
TA1	396.8	98.5	402.5	33
AA5052	211.5	69.5	229.9	12
Q215	337.8	191	365.6	32.7

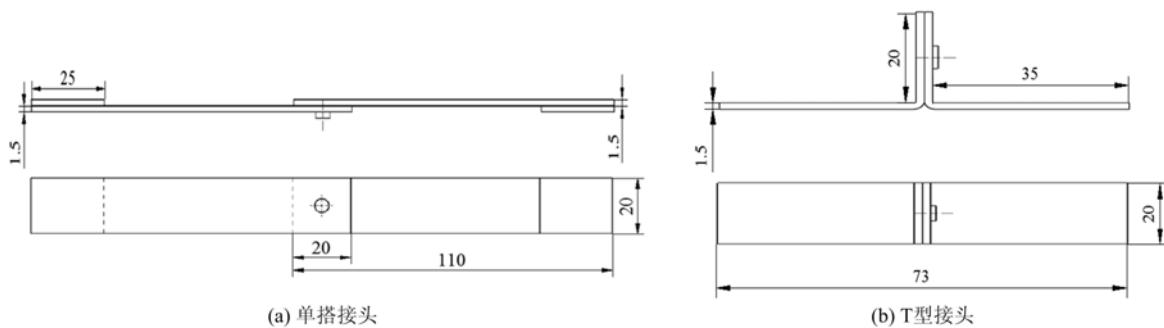


图1 自冲铆接头尺寸

Fig. 1 Dimensions of self-piercing riveted joints

对各组接头进行试铆实验研究，采用剖面直观检测法观察接头成形质量，确定各组接头的最优铆接参数见表2。对各组接头进行批量铆接，通过过程在线监控系统保证铆接质量，每组制备10个试件。

表2 铆接最优工艺参数表

Tab. 2 Optimum parameters for self-piercing riveted

编号	预压紧压强/MPa	刺穿压强/MPa	整形压强/MPa	行程/mm	下模	钉长/mm
DA	5	20	11	131.2	平底模	6
DB	5	19.5	11	131.2	平底模	6
TA	5	20	11	131.2	平底模	6
TB	5	19.5	11	131.2	平底模	6

2 静力学实验

采用MTS landmark100电液伺服材料试验机对4组接头进行静力学实验，DA组和DB组接头在进行拉伸-剪切实验时，为防止因不对中产生的附加扭矩，试件两端需夹持25mm×20mm×1.5mm的垫片。设定拉伸速率为5mm/min，对4组接头分别进行拉伸-剪切实验和剥离实验，获得的载荷-位移曲线如图2所示。

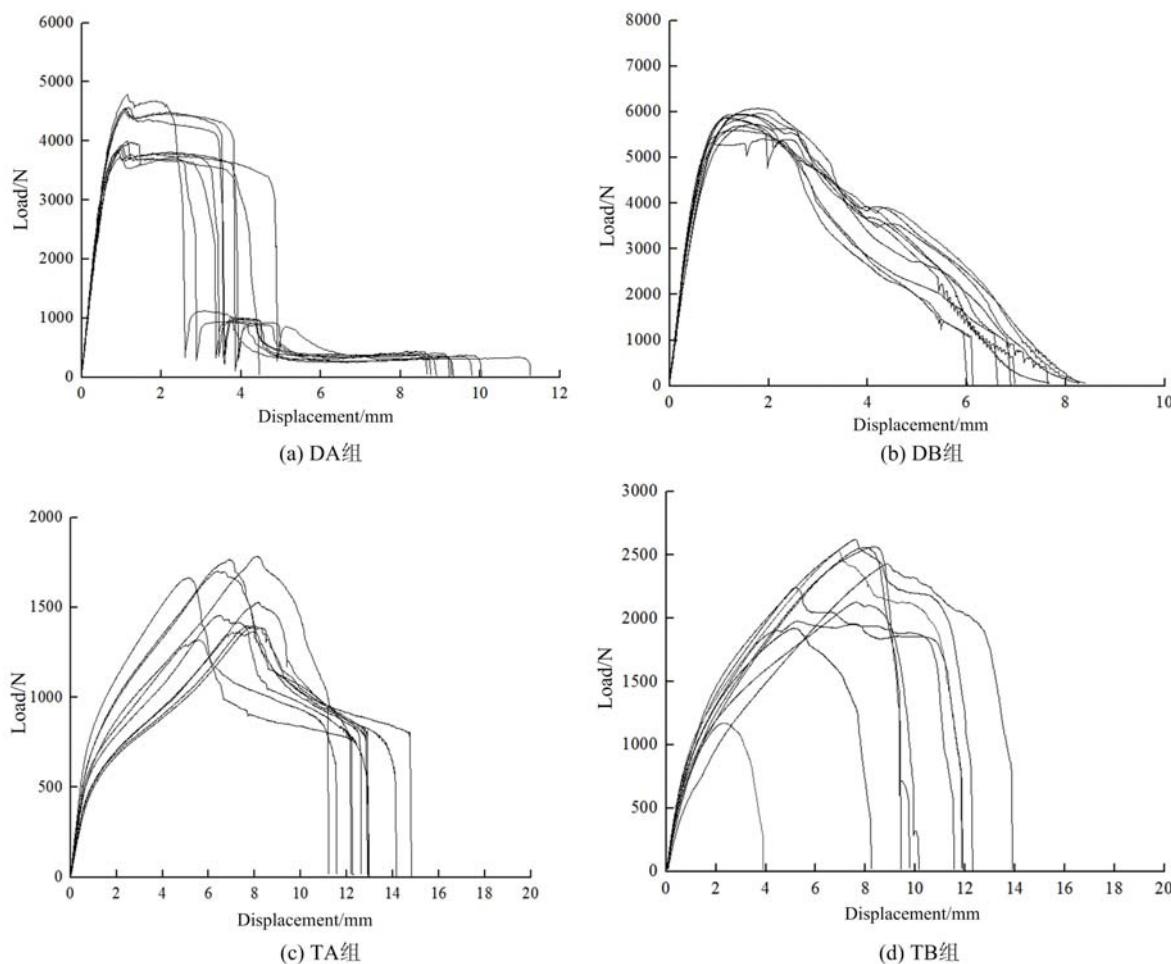


图2 各组接头的载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of different joints

3 实验结果与分析

3.1 失效机理分析

DA组因下板断裂失效;DB组失效形式为铆钉与下板分离,铆钉几乎从上板脱落,且下板发生脱层现象;TA组因铆钉与下板分离失效,接头机械内锁遭到破坏;TB组中有5个接头因铆钉与上板分离失效,上板出现较长的撕裂棱,其余5个接头失效形式为铆钉与下板分离。为了研究接头的微观失效机理,选取各组接头断口在捷克TESCAN公司生产的VEGA3 SCAN型高真空电子扫描显微镜下进行微观断口观测。图3为DA组下板断口形貌图。图3(a)为下板断口的宏观图像,从宏观上看断口较粗糙,色泽灰暗且呈纤维状,断口边缘与板材平面呈45°角的剪切唇;从图3(b)可见,A区域的断口形貌为大小不同的等轴韧窝,韧窝深度较浅且尺寸较小,表明此处材料的塑性变形程度较小;图3(c)和图3(d)为撕裂韧窝形貌,韧窝多为伸长的或抛物线形状;由于撕裂韧窝的方向指向裂纹源并向反方向扩展,可知下板在拉伸过程中从右侧一端断裂,沿着板宽向铆扣区域撕裂,图3(c)和图3(d)的韧窝深度较深,表明在撕裂过程中材料塑性变形程度较大^[11]。可以判断,DA组接头下板为韧性断裂机制,下板先从一端断裂,沿着板宽方向向铆扣处撕裂,随后下板另一侧在持续拉伸过程中逐渐被拉断。

DB组失效断口形貌图如图4所示。图4(a)为接头失效宏观形貌图,可以看出铆钉从上板拉出过程中,上板翘曲程度严重且出现明显撕裂棱;图4(b)为撕裂棱根部断口形貌,出现大量拉长的撕裂韧窝,从韧窝方向可以判断撕裂棱从上向下撕裂,与铆钉被拉出的方向一致;从图4(c)可以观察到微孔洞和碎屑,损伤痕迹出现明显分层现象且局部呈现准解理特征,这是由于铆钉被拉出过程中铆钉头与上板铆孔边缘发生剧烈刮擦,导致此区域受损;图4(d)呈现大小不等的等轴韧窝,小韧窝包围着大韧窝,图

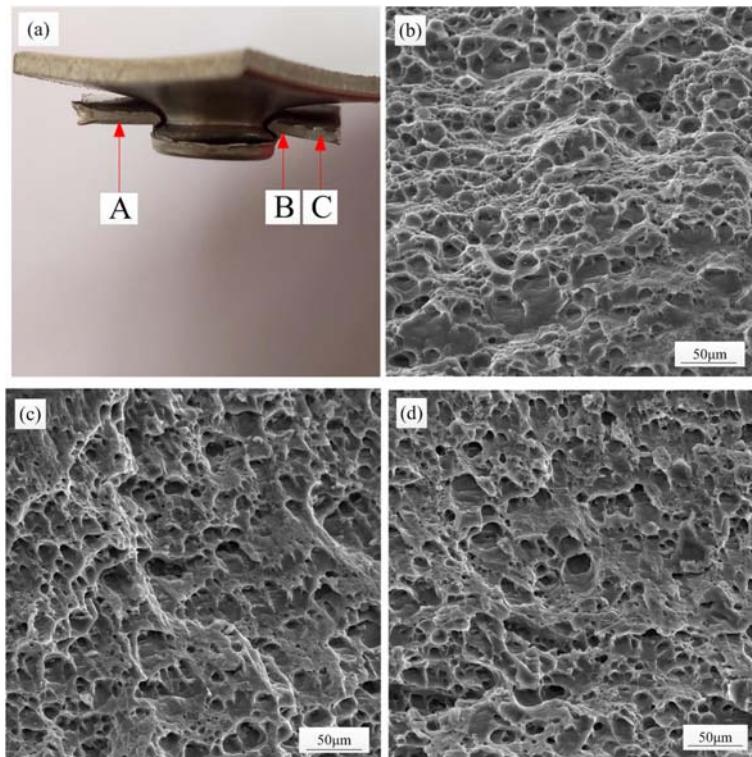


图3 DA组断口形貌 (a)宏观断口; (b)A区SEM图; (c)B区SEM图; (d)C区SEM图

Fig. 3 Fracture morphology of DA joints

(a) macroscopic fracture; (b) SEM images of region A; (c) SEM images of region B; (d) SEM images of region C

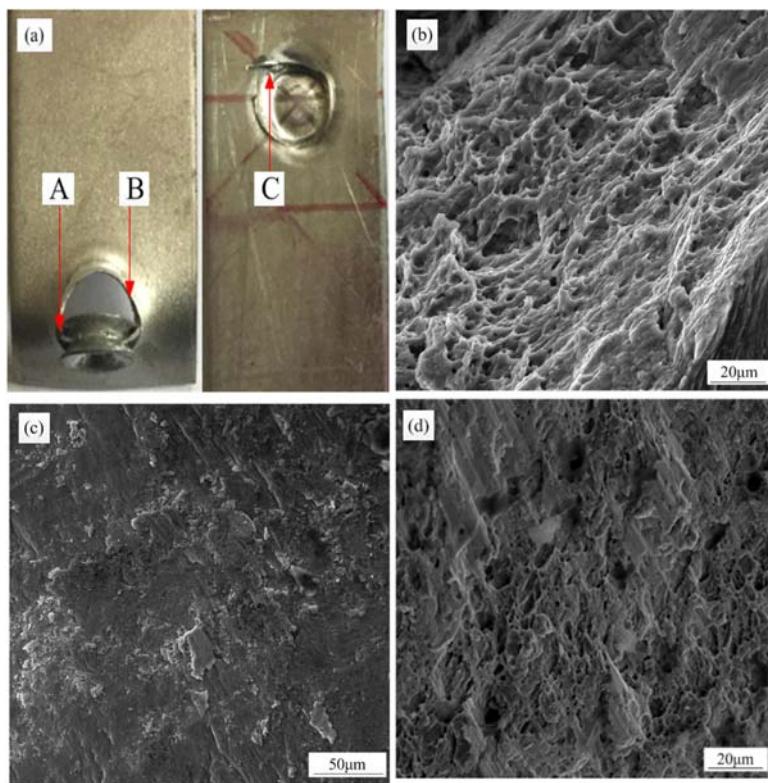


图4 DB组断口形貌 (a)宏观断口; (b)A区SEM图; (c)B区SEM图; (d)C区SEM图

Fig. 4 Fracture morphology of DB joints

(a) macroscopic fracture; (b) SEM images of region A; (c) SEM images of region B; (d) SEM images of region C

中还可以看到明显的刮痕,说明铆钉从下板分离过程中,下板发生塑性变形并与铆钉产生严重刮擦现象。从接头断口SEM图像可知,上板失效部位主要承受拉伸,由于连接过程中冷作硬化效果提高了材料性能,在外部载荷作用下,上板未发生断裂部位出现大量损伤痕迹;对于发生断裂部位,断裂路径由接头中心向两侧扩展,呈现出韧性断裂机制,这些特征最终会影响接头的失效位移。DA组和DB组接头呈现出两种失效形式,DA组接头两基板屈服强度相差较大,接头内锁强度大于基板强度,接头因屈服强度较小的基板断裂失效;DB组接头两基板屈服强度相近,接头内锁结构遭到破坏。

TA组断口形貌如图5所示。从图5(a)可以看出TA组接头铆钉从下板剥离过程中,下板出现较长的撕裂棱,下板铆扣区域出现开裂现象。B区为剥离过程中,下板的起始撕裂位置,图5(c)呈现出大量的撕裂韧窝形貌,为韧性断裂特征;图5(b)和(d)为下板两侧撕裂棱根部附近区域断口形貌,该位置出现了大量的撕裂棱并分布有少量撕裂韧窝,撕裂棱方向与指向裂纹源;同时可以观察到纤维状组织,纤维状方向与撕裂方向一致,是由于剥离过程中铆钉与下板撕裂处摩擦产生刮痕导致。

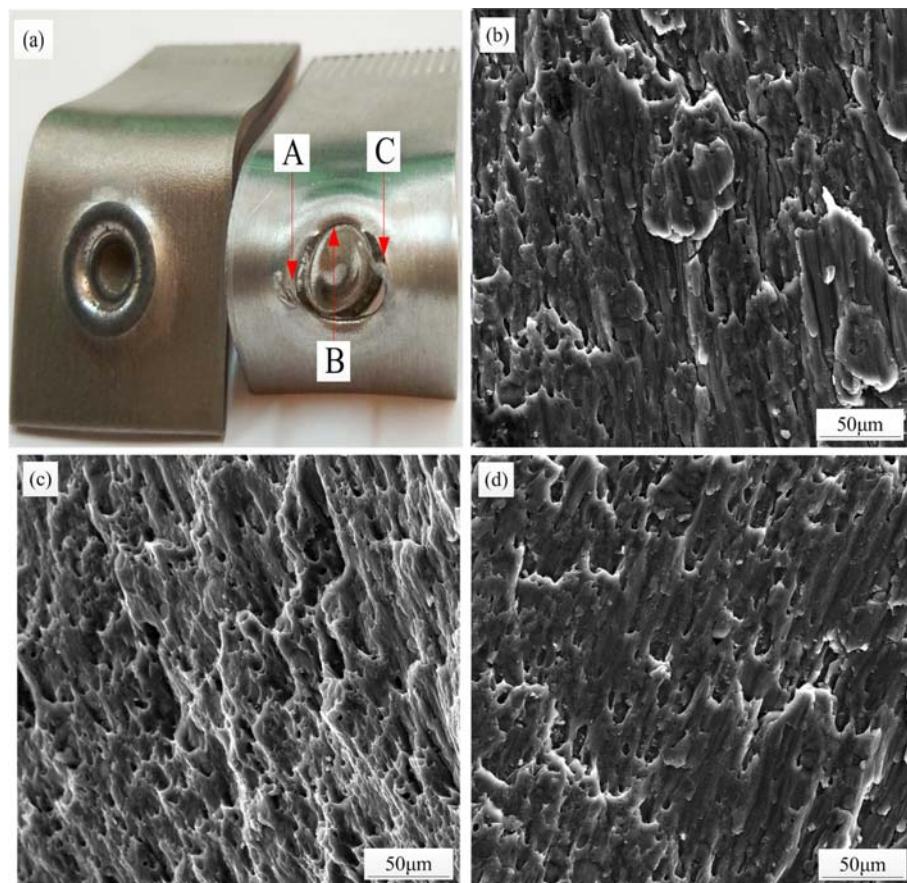


图5 TA组断口形貌

(a)宏观断口; (b)A区SEM图; (c)B区SEM图; (d)C区SEM图

Fig. 5 Fracture morphology of TA joints (a) macroscopic fracture; (b) SEM images of region A; (c) SEM images of region B; (d) SEM images of region C

TB组断口形貌如图6所示,TB组发生铆钉与上板或下板分离的混合失效形式。图6(b)为铆钉与上板分离时上板撕裂处的形貌图,可以发现韧窝和解理台阶的存在,其呈现准解理断裂机制;图6(c)为铆钉与下板分离时下板撕裂处的形貌图,呈现大小各异的等轴韧窝,属于韧性断裂;图6(d)主要呈现沿晶失效特征,局部区域呈现准解理特征,微观组织呈纤维状并观察到碎屑的存在,各损伤区域间有明显分层现象,此处为铆钉从下板剥离时铆钉与下板发生刮擦造成的。当TA组和TB组失效形式都为铆钉与下板分离时,TA组下板撕裂程度较严重,是由于AA5052延展性较差,剥离过程中,下板通过塑性变形无法承受持续增加的载荷,故下板出现较长的撕裂棱,导致接头变形位移发生变化。

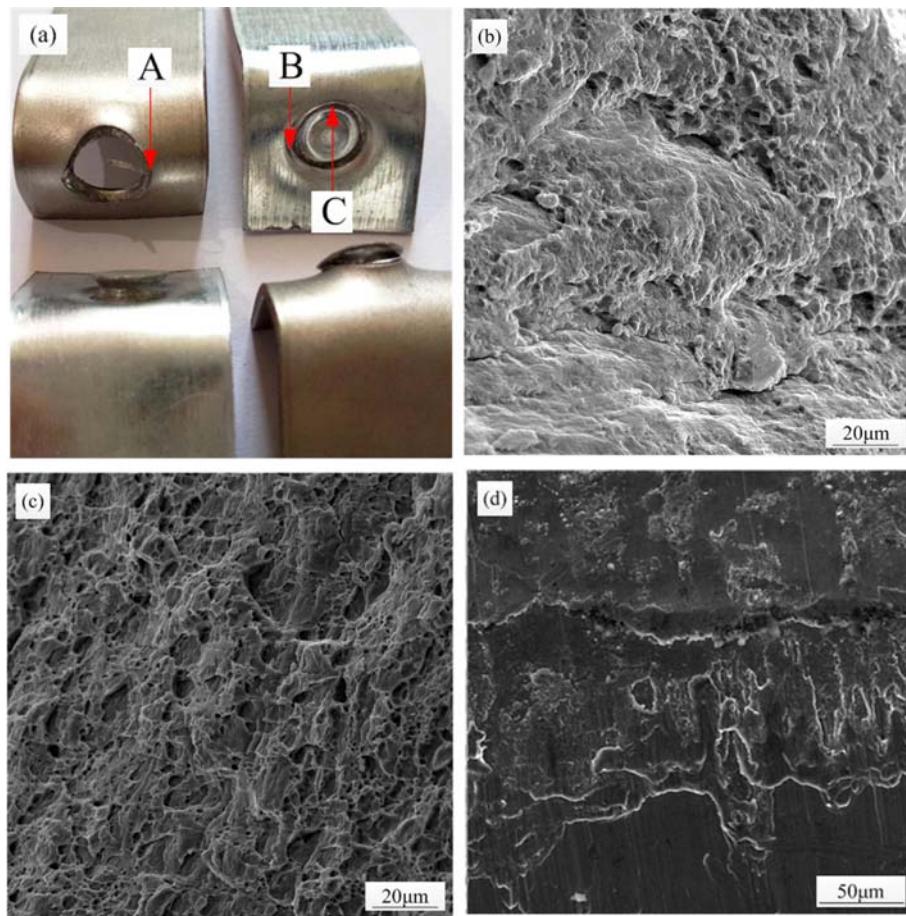


图 6 TB 组断口形貌

(a) 宏观断口; (b) A 区 SEM 图; (c) B 区 SEM 图; (d) C 区 SEM 图

Fig. 6 Fracture morphology of TB joints

(a) macroscopic fracture; (b) SEM images of region A; (c) SEM images of region B; (d) SEM images of region C

3.2 拉伸-剪切和剥离实验结果分析

对于实验数据,依据实际数据样本特征选用格拉布斯(Grubbs)检验法^[12]剔除离群值。经检验,DA 组的第 4 个数据和 TB 组中第 2 个数据为离群值,故将其剔除。对于获得的有效数据利用 MATLAB 计算各组接头最大失效载荷和失效位移统计量如表 3 所示。

表 3 各组接头统计量

Tab. 3 Statistic of different joints

试件 编号	最大失效载荷		失效位移	
	均值/N	标准差	均值/mm	标准差
DA	4187.2	404.77	9.47	0.81
DB	5781.3	197.67	7.29	0.89
TA	1537.4	175.49	12.76	1.09
TB	2332.0	270.28	11.01	1.75

由图 2 可知,4 组接头的载荷-位移曲线呈现不同变化趋势。DA 组拉剪初期载荷随位移呈线性增加,在峰值附近持续一段时间出现陡降,此时接头下板一端出现断裂;在下板不断撕裂过程中,载荷出现小幅度回升并迅速下降至一定值,一直持续到下板完全断裂。DB 组在起始阶段载荷随位移呈线性增加趋势,随着载荷增加上板铆钉孔区域出现严重变形,上板翘曲程度增大且接头的机械内锁结构遭到破坏;载荷达到峰值之后开始缓慢下降,其对应铆钉从下板拉出这一过程。TA 组在剥离初期载荷随位移

增加而平稳增加,当载荷达到峰值时铆钉开始从基板中剥离;随着铆钉从下板剥离,载荷缓慢下降到一定值,随后迅速下降为零。TB组出现两种失效形式,当失效形式为铆钉与下板分离时其载荷-位移曲线变化趋势与TA组相近,但TA组从峰值到开始陡降为零这一阶段曲线的下降幅度较TB组大,是由于AA5052的延展性较Q215差,TA组下板脱层现象较严重;当失效形式为铆钉与上板分离,随着铆钉头部从上板剥离出来,载荷随位移平稳增加,当载荷达到峰值后陡降为零。

DA组最大失效载荷均值为4187.2N小于DB组(5781.3N),DA组失效载荷取决于下板强度;由于Q215塑性较好,DB组接头成形质量更优,其内锁强度较高。TA组最大失效载荷均值为1537.4N小于TB组(2332.0N),由于AA5052铝合金抗拉强度和屈服强度较小,材质较软且延展性差,铆钉更容易从下板剥离出来;Q215延展性好,接头剥离时发生混合失效形式,部分接头内锁强度大于上板强度,接头静失效载荷较高。DA组失效位移均值为9.47mm大于DB组(7.29mm),由于DA组失效形式为下板断裂,板材在撕裂过程中发生的位移量较大。TA组失效位移均值为12.76mm大于TB组(11.01mm),由于AA5052延展性较差,接头在剥离过程中,下板出现较长的撕裂棱导致失效位移较大。综上所述可知,TA1-Q215组合接头的最大失效载荷大于相同搭接类型的TA1-5052接头,其失效位移小于TA1-5052组合接头。

4 结论

(1) DA组最大失效载荷均值为4187.2N小于DB组(5781.3N),TA组最大失效载荷均值为1537.4N小于TB组(2332.0N),总的来说TA1-Q215接头的最大失效载荷大于相同搭接类型的TA1-5052接头。

(2) 4组接头出现下板断裂失效、铆钉与上板分离和铆钉与下板分离三种失效形式;其中DA组因下板断裂失效;DB组失效形式为铆钉与下板分离,铆钉几乎从上板脱落且下板发生脱层现象;TA组因铆钉与下板分离失效,接头机械内锁遭到破坏;TB组出现铆钉与上板或下板分离的混合失效形式。

(3) DA组下板为韧性断裂机制,下板先从一端断裂,沿着板宽方向向铆扣处撕裂,随后下板另一侧在持续拉伸过程中逐渐被拉断;DB组上板铆钉孔撕裂处为韧窝形貌,铆钉与下板分离过程中,下板发生塑性变形并与铆钉产生严重刮擦现象;TA组铆钉从下板剥离过程中,下板出现明显撕裂棱,断口呈现韧性断裂机制;TB组失效形式为铆钉与上板分离时,上板撕裂处为准解理断裂机制;当铆钉与下板分离时下板撕裂处为韧性断裂,铆钉从下板剥离过程中产生刮痕。

参考文献:

- [1] 金和喜,魏克湘,李建明,等.航空用钛合金研究进展[J].中国有色金属学报,2015,25(2):280—292 (JIN Heshan, WEI Kexiang, LI Jianming, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2):280—292 (in Chinese))
- [2] 王瑞琴,黄先明,付文杰,等.TA1钛板材的组织和性能改进[J].金属热处理,2014(8):88—92 (WANG Ruiqin, HUANG Xianming, FU Wenjie, et al. Improvement of microstructure and properties of TA1 titanium sheet[J]. Heat Treatment of Metals, 2014(8):88—92 (in Chinese))
- [3] 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):27—36.
- [4] Sun X, Khaleel M A. Dynamic strength evaluations for self-piercing rivets and resistance spot welds joining similar and dissimilar metals[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(10):1668—1682.
- [5] He X C, Wang Y F, Lu Y, et al. Self-piercing riveting of similar and dissimilar titanium sheet materials[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12):1—11.
- [6] 程强,何晓聪,张先炼,等.8090铝锂合金T型自冲铆接头剥离性能[J].热加工工艺,2016,45(13):139—145 (CHENG Qiang, HE Xiaocong, ZHANG Xianlian, et al. Peeling properties of self-pierce riveting T-joints of 8090 aluminum-lithium alloys[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(13):139—145 (in Chinese))
- [7] 金鑫,李永兵,楼铭,等.基于正交试验的铝合金—高强钢异种金属自冲铆接工艺优化[J].汽车工程学报,

- 2011, 1(4):185—191 (JIN Xin, LI Yongbing, LOU Ming, et al. Process optimization of self-piercing riveting aluminum to high strength steel using DOE method[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(4): 185—191 (in Chinese))
- [8] Han L, Chrysanthou A. Evaluation of quality and behaviour of self-piercing riveted aluminium to high strength low alloy sheets with different surface coatings[J]. Materials and Design, 2008, 29(2):458—468.
- [9] Zhang X L, He X C, Xing B Y, et al. Influence of heat treatment on fatigue performances for self-piercing riveting similar and dissimilar titanium, aluminium and copper alloys[J]. Materials and Design, 2016, 97:108—117.
- [10] 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研究[J]. 焊接学报, 2016, 37(6):50—54 (XING Baoying, HE Xiaocong, WANG Yuqi, 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 (in Chinese))
- [11] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:131—240 (ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:131—240 (in Chinese))
- [12] 叶川, 伍川辉, 张嘉怡. 计量测试中异常数据剔除方法比较[J]. 计量与测试技术, 2007, 34(7):26—27 (YE Chuan, WU Chuanhui, ZHANG Jiayi. Comparision about how to get rid of abnormal data in metrology & Measurement[J]. Metrology & Measurement Technique, 2007, 34(7):26—27 (in Chinese))

Mechanical properties and failure mechanism analysis of titanium alloy heterogeneous medium self-piercing riveting joint

LIU Yang, HE Xiao-cong, DENG Cong, XING Bao-ying

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Tensile-shear experiment and peel experiment of titanium alloy heterogeneous medium single-lap and T-type self-piercing riveting joints was carried out. Compared with its static performance of joint, typical fracture surface of joint was studied by scanning electron microscopy, and the microscopic failure mechanism was analyzed. Results show that the maximum failure load of TA1-Q215 joint is larger than that of TA1-AA5052 joint with the same lap type; the failure of TA1-AA5052 single-lap joint is caused by lower plate fracture, which demonstrates ductile fracture feature. The appearance of rivet hole fracture surface of TA1-Q215 single-lap joint is dimple; during the separation process between rivet and lower plate, plastic deformation occurs on plate, and serious scratch phenomenon is also observed. The failure of TA1-AA5052 T-type joint is due to the separation of rivet and bottom plate, the bottom plate has obvious torn edges. When failure mode of TA1-Q215 T-type joint is the separation between rivet and upper plate, plate is torn due to quasi cleavage fracture mechanism. When rivet and the bottom plate separates, the torn bottom plate exhibits ductile fracture; during peeling process, rivet produces scratches on bottom plate.

Keywords: TA1 titanium alloy; self-piercing riveting (SPR); static performance; failure mechanism; fracture analysis