

几种金属材料自冲铆接头的静态失效机理

王医锋 何晓聪 张先炼 程强 高爱凤

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500)

文 摘 利用自冲铆连接系统、材料试验机及扫描电子显微镜等设备来研究钛合金、铝锂合金及铝合金自冲铆接头的力学性能与静态失效机理。结果表明:TA1 钛合金接头平均最大拉剪载荷(6 285.0 N)在 3 种接头中最大,8090 铝锂合金接头(5 478.3 N)次之,5052 铝合金接头(3 217.7 N)最小;不同金属材料自冲铆接头的静态失效模式有很大的区别,TA1 钛合金接头出现铆钉从沿晶断裂向韧性断裂转变的失效过程,8090 铝锂合金接头出现材料被擦伤与解理断裂的失效过程,5052 铝合金接头仅出现材料被擦伤的失效过程。

关键词 自冲铆接头,钛合金,铝锂合金,拉剪试验,断口分析

中图分类号:TH131.1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.020

Static Failure Mechanism of Several SPR Joints Made by Different Metal Materials

WANG Yifeng HE Xiaocong ZHANG Xianlian CHENG Qiang GAO Aifeng

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

Abstract The mechanical properties and static failure mechanism of the titanium, aluminum lithium and aluminum alloy self-piercing riveted joints were studied by the self-piercing riveting system, materials test machine and scanning electron microscope. The results showed that the average maximum tensile shear load of the TA1 joints(6 285.0 N) is the largest, the 8090 joints took the second place, the 5052 joints is the smallest. Different metal materials self-piercing riveted joints presented a great different static failure mode. The rivets in TA1 joints appeared a failure process from intergranular fracture to ductile fracture. The 8090 joints appeared a failure process of the materials being rubbed and cleavage fracture. The 5052 joints appeared a failure process of the materials only being rubbed.

Key words Self-piercing riveted (SPR) joints, Titanium alloy, Al-Li alloy, Tensile shear test, Fracture analysis

0 引言

21 世纪以来,能源紧缺及环境污染问题已成为全人类共同的危机。为了解决好这些问题,结构轻量化设计慢慢受到重视。在结构轻量化设计的进程中,新型薄板材料被大量使用。钛及钛合金密度小,具有较高的抗拉强度,同时具有良好的抗腐蚀耐高温等特性,被广泛应用于航空、化工及生物医药等行业^[1]。铝锂合金作为一种新型的铝合金材料,具有低密度、高强度、高模量以及优异的抗腐蚀性能,是航空航天中最具潜力的新轻型金属材料^[2]。然而这些新轻金属薄板材料一般难以用甚至不能用传统的焊接方法进行连接,为了实现这些新型材料的有效连接,需要

发展新型薄板连接技术,自冲铆连接技术就是其中的一种^[3-5]。自冲铆连接过程为:首先,压边圈压紧基板;之后,冲头推动铆钉向下行刺穿上层材料;铆钉继续向下行并刺入下层材料,在下模具作用下,基板在下模具模腔内形成一个内锁结构;最后,冲头继续施压,进一步促进基板材料的流动,并形成永久性内锁接头^[6]。

近年来,为实现各种板材自冲铆连接的有效性,国内外学者进行了一系列的研究^[7-9]。何晓聪等^[10-12]总结并优化了自冲铆接头质量及强度可靠性评价标准体系,分析了自冲铆接头失效机理,得出母材强度和厚度、内锁长度、母材与铆钉之间的接触摩

收稿日期:2015-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50965009);昆明理工大学分析测试基金项目(20140974)

作者简介:王医锋,1989 年出生,硕士研究生,主要研究方向为薄板材料连接新技术。E-mail:wf201309@163.com

擦因数决定自冲铆接头的静载强度和失效形式。但是对于金属材料对自冲铆接头力学性能及静态失效机理影响的具体原因,还没有学者进行具体的对比研究。本试验立足于自冲铆连接技术,通过对钛合金、铝锂合金及铝合金进行自冲铆连接试验,并对制成的3种自冲铆接头进行静力学试验,对失效后的接头局部区域进行扫描电镜微观分析;研究其静态失效机理,以期自冲铆连接技术应用于新轻型薄板的连接提供一定的基础数据支撑。

1 试验

1.1 材料及设备

试验材料为钛合金板(TA1)、铝锂合金板(8090)和铝合金板(5052),板材尺寸为110 mm×20 mm×1.5 mm。

德国Boellhoff公司生产的自冲铆接系统(RIVSET VARIO-FC(MTF));美国MTS公司生产的电液伺服材料试验机(MTS landmark 100);HR-150A型手动洛氏硬度计;捷克TESCAN公司生产的高真空扫描电子显微镜(VEGA3 SCAN)。

1.2 材料性能测试

按GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验法》,在美国MTS公司生产的电液伺服材料试验机(MTS landmark 100)上分别对3种板材进行性能测试。引伸计标距为20 mm,拉伸速率为2 mm/min,测得的材料力学性能如表1所示,3种板材的工程应力—应变曲线如图1所示。试验结果表明TA1工程应力—应变特性最高,8090其次,5052最低。

表1 TA1,8090和5052力学性能

Tab.1 Mechanical properties of TA1, 8090 and 5052

材料	抗拉强度/MPa	屈服极限/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%
TA1	402.5	396.8	98.5	36.4
8090	363.6	340.2	70.7	12.3
5052	229.9	211.5	69.5	13.1

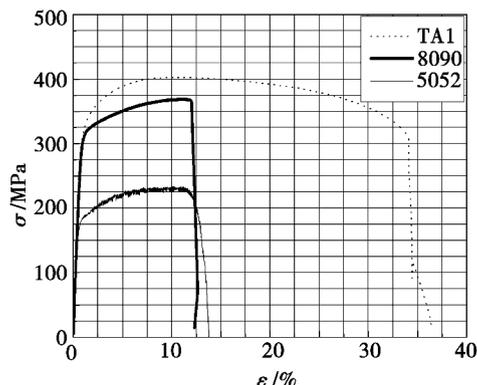


图1 TA1,8090和5052工程应力—应变曲线

Fig.1 Engineering σ - ε curves of TA1, 8090 and 5052

1.3 试验过程

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第3期

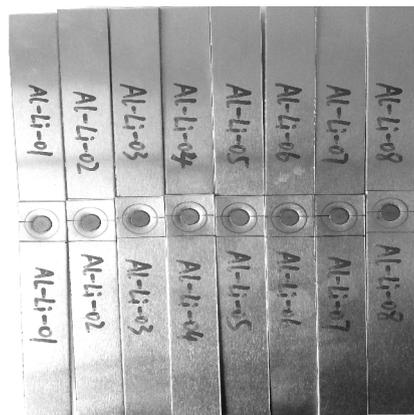
1.3.1 连接试验

采用德国Boellhoff公司生产的自冲铆接系统[RIVSET VARIO-FC(MTF)]分别对3种板材进行铆接试验。为确定所用模具种类,采用HR-150A型手动洛氏硬度计对板材进行宏观硬度测试,TA1,8090和5052洛氏硬度HRF值分别为:109,84和70。

TA1钛合金板材硬度较高,选用平模进行铆接试验,8090铝锂合金及5052铝合金较软,选用凸模进行铆接试验,铆接过程通过载荷—行程曲线在线监控铆接质量^[10]。3种单搭自冲铆接头如图2所示。



(a) TA1-TA1



(b) 8090-8090



(c) 5052-5052

图2 单搭自冲铆接头

Fig.2 Single-lap SPR joints

1.3.2 拉伸-剪切试验

参照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》,在电液伺服材料试验机上分别对 3 种接头进行拉伸—剪切试验。两端夹持长度均为 25 mm,为减小拉伸过程因拉力不对中产生的扭矩,在夹持部分加上相应的垫片。拉伸速率设为 5 mm/min,门槛值设为 200 N,当接头明显断裂或载荷下降到最大载荷的 95%时,视为失效。

1.3.3 扫描电镜试验

采用捷克 TESCAN 公司生产的高真空扫描电子显微镜 (VEGA3 SCAN) 对 3 种接头的失效部位进行

扫描电镜 (SEM) 试验,观察其断裂类型和方式,深入分析自冲铆接头静态失效机理及原因。

2 结果与分析

2.1 静强度分析

3 种接头的载荷—位移曲线如图 3 所示,由图 3 可知,TA1-TA1 接头平均最大拉剪载荷 (6 285.0 N) 在 3 种接头中最高,8090-8090 接头平均最大拉剪载荷 (5 478.3 N) 比 5052-5052 接头平均最大拉剪载荷 (3 217.7 N) 高 41.3%,这种静强度差异主要体现在 TA1 的抗拉强度及屈服极限与 8090 相差不大,却远高于 5052。

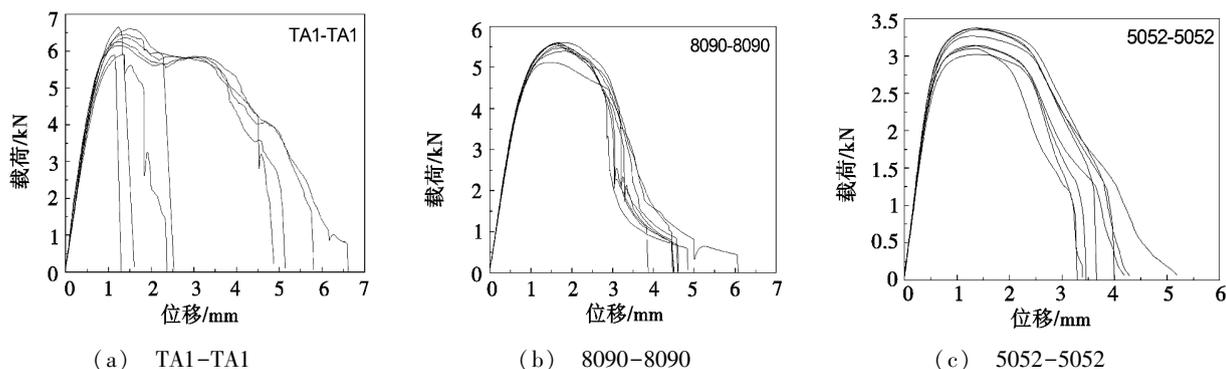


图 3 载荷—位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves

综上所述,在板材厚度一样的情况下,被连接板材的强度越高,其单搭自冲铆接头的静强度越高。但是在实际应用时,TA1-TA1 接头的静强度仅比 8090-8090 高 12.8%,而 TA1 的密度却是 8090 的约两倍,所以当自冲铆接头应用在承载要求相同,且在结构轻量化要求方面较高的结构上时,应优先选用 8090-8090 接头。

2.2 静态失效机理分析

3 种接头经拉伸—剪切试验后的静态失效模式如图 4 所示。TA1-TA1 接头出现上板与铆钉分离且铆钉断裂的混合静态失效模式,如图 4(a) 所示,8090-8090 接头出现下板与铆钉分离且板材部分被撕裂的混合静态失效模式,如图 4(b) 所示,5052-5052 接

头出现下板与铆钉分离的静态失效模式,如图 4(c) 所示。

对比观察 3 种接头的不同静态失效模式可知,TA1-TA1 接头的内锁强度大于铆接后铆钉的强度,从而导致铆钉断裂且上板与铆钉分离;8090-8090 接头与 5052-5052 接头的机械内锁部位为接头的薄弱部位,使得在拉伸—剪切过程中两种接头的下板都与铆钉分离开;而 8090-8090 接头出现板材被撕裂的情形,说明其内锁强度要高于 5052-5052 接头,使得接头在静态失效的过程中板材被撕裂。另外,由于 TA1 的工程应力—应变特性较高,其接头上板在拉伸的过程中翘曲的程度较小,而 8090-8090 及 5052-5052 接头上板都发生较严重的翘曲。

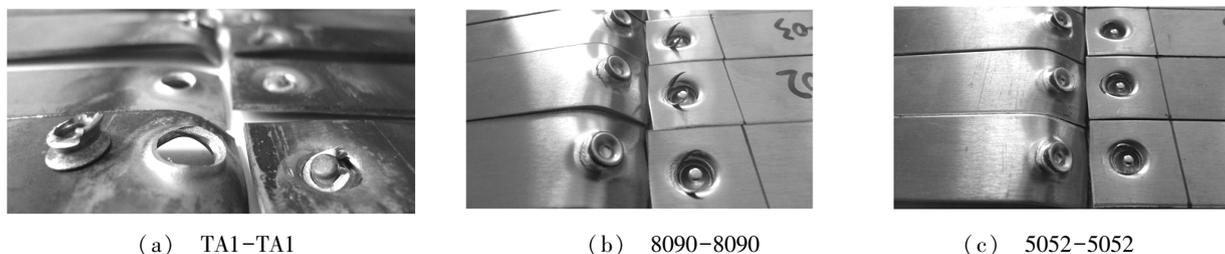


图 4 失效模式

Fig. 4 Failure mode

通过对断口形貌特征进行全面观察和分析,可进而研究断裂的类型、方式、原因和机理^[6]。为深入分析自冲铆接头静态失效机理,分别对 3 种接头的失效

部位进行扫描电镜 (SEM) 试验。

对于 TA1-TA1 接头,铆钉断裂为此接头失效的明显特征,图 5(a) 为铆钉镶嵌在板材中并且断裂时

的宏观断口, A 区为铆钉被开始拉断时的位置, B 区为铆钉被拉断中的位置, C 区为铆钉被拉断结束后的位置。图 5(b)、图 5(c) 和图 5(d) 为铆钉断口三个区域被放大 2 000 倍后的 SEM 图像。铆钉开始被拉断时的断口形貌可以看到晶粒界面分离的现象, 且呈“冰糖状”花样, 属于沿晶脆性断裂特征, 如图 5(b) 所示; 铆钉被拉断中间时段的断口形貌可以看到裂纹

沿晶界上颗粒界面进行分离及少许韧窝状微孔, 这说明裂纹是在晶界的颗粒上依据微孔聚合断裂机制发生断裂, 此断口属于沿晶韧性断裂特征, 如图 5(c) 所示; 铆钉被拉断结束后的断口更多的呈现出大量韧窝状, 属于明显的韧性断裂特征。综上所述, 整个铆钉被拉断的过程呈现为沿晶断裂向韧性断裂转变的静态失效过程。

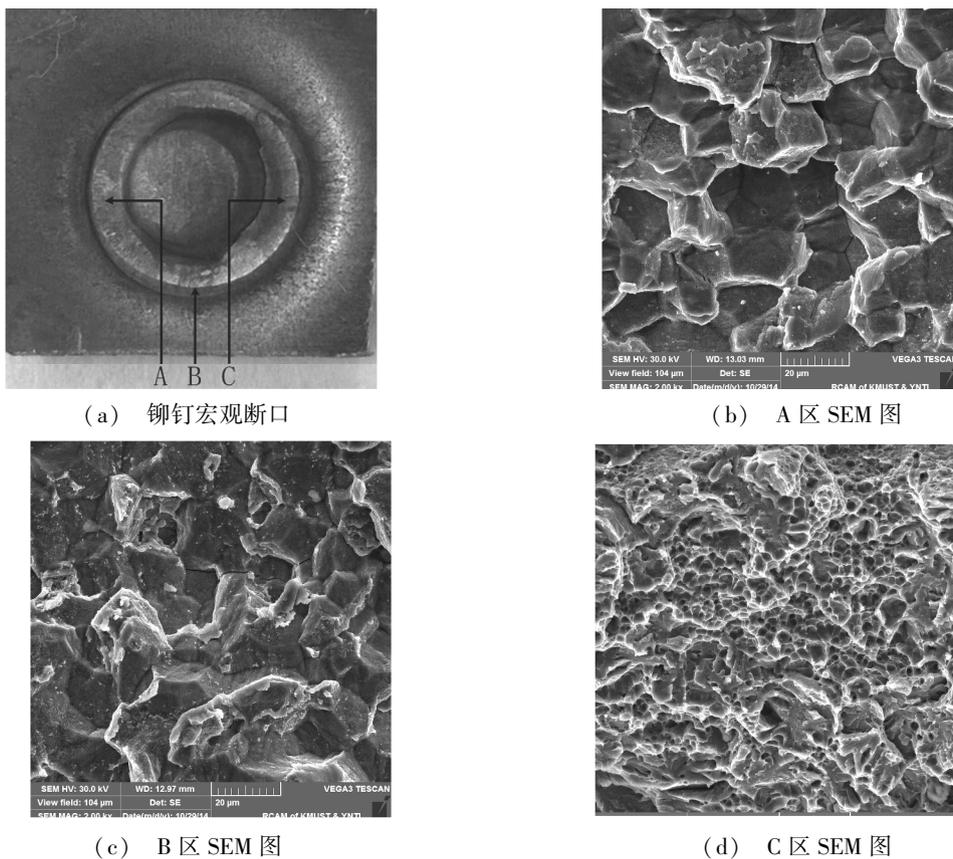


图 5 TA1-TA1 接头失效部位断口形貌

Fig. 5 Fracture morphology of the failure parts on TA1-TA1 joints

对于 8090-8090 接头, 下板局部被擦伤及少许材料被撕裂是此接头失效的明显特征, A 区为材料被擦伤的区域, B 区域为少许材料被撕裂的区域[图 6(a)]。图 6(b) 和图 6(c) 为接头断口两个典型区域放大 1 000 倍后的 SEM 图像。由图 6(b) 可知, A 区

呈现出材料被明显摩擦的痕迹, 说明接头在拉伸过程中, 铆钉与下板发生摩擦; 当铆钉与下板材料摩擦进行到一定程度时, 少许材料随着下板与铆钉分离时被撕裂, 且由图 6(c) 可知, 被撕裂的少许材料断口形貌为河流花样与解理台阶, 这是解理断裂典型的特征。

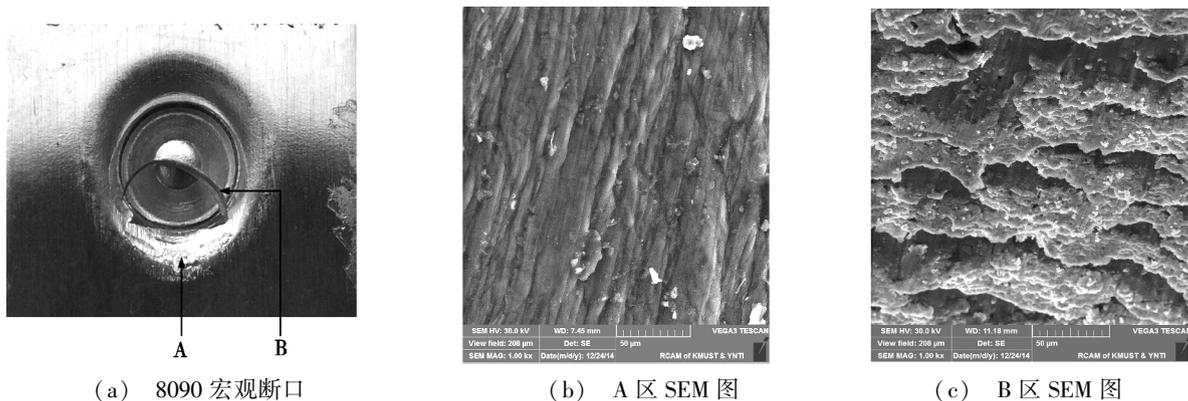


图 6 8090-8090 接头失效部位断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of the failure parts on 8090-8090 joints

解理断裂是一种脆性断裂机制,但材料仍具有一定的塑性变形。从预防此失效机制的角度考虑,也由于8090铝锂合金本身塑性不如其他铝合金,提高其材料的韧性是必要的。对于5052-5052接头,下板局部被擦伤是此接头失效的明显特征,A区和B区的材料均不同程度地被擦伤,如图7(a)所示。图7(b)和图7(c)为接头失效的两个典型区域被放大1000

倍后的SEM图像。对于自冲铆接头,铆钉实质是镶嵌在上下板材中,从而接头在拉伸过程中板材发生塑性变形,在下板与铆钉分离时,B区材料先于A区材料被摩擦,两处材料呈现出不同程度地被摩擦的痕迹,且A区材料近乎被撕裂。从宏观及微观上分析此接头失效断口区域表明,接头静态失效的过程即板材发生塑性变形,且板材与铆钉摩擦后分离的过程。

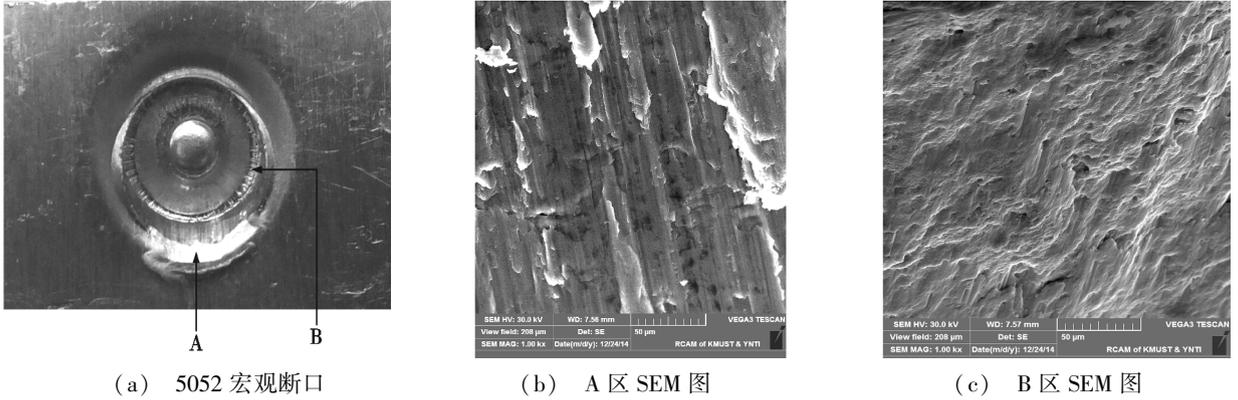


图7 5052-5052接头失效部位断口形貌

Fig. 7 Fracture morphology of the failure parts on 5052-5052 joints

3 结论

(1)TA1钛合金接头平均最大拉剪载荷(6 285.0 N)在3种接头中最大,8090铝锂合金接头(5 478.3 N)次之,5052铝合金接头(3 217.7 N)最小。

(2)当被连接材料基板强度较高时,其单搭自冲铆接头静强度相对较高。对于结构轻量化而言,3种自冲铆接头中,8090铝锂合金自冲铆接头具有更大的优势。

(3)不同金属材料制成的单搭自冲铆接头的静态失效机理有很大区别。TA1钛合金自冲铆接头静态失效机理为铆钉从沿晶断裂向韧性断裂转变的过程;8090铝锂合金自冲铆接头静态失效机理为材料被擦伤且少许材料发生解理断裂的过程;5052铝合金自冲铆接头静态失效机理为材料发生不同程度地被擦伤的过程。

参考文献

[1] 陈勇,蒋炳炎,周志平,等.飞机钛合金构件热损伤检测试验[J].宇航材料工艺,2007,37(5):75-77

[2] Kashyap B P, Chaturvedi M C. Superplastic behaviour of annealed AA 8090 Al-Li alloy[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19(10):1369

[3] He Xiacong, Xing Baoying, Zeng Kai, et al. Numerical and experimental investigations of self-piercing riveting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1-4):715

[4] Xing Baoying, He Xiacong, Wang Yuqi, et al. Study of

mechanical properties for copper alloy H62 sheets joined by self-piercing riveting and clinching[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 216:28

[5] Xing Baoying, He Xiacong, Zeng Kai, et al. Mechanical properties of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5052[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1/4):351

[6] 邢保英. 自冲铆连接机理及力学性能研究[D].昆明:昆明理工大学机电工程学院,2014

[7] Pickin C G, Young K, Tuersley I. Joining of lightweight sandwich sheets to aluminum using self-piercing riveting[J]. Materials and Design, 2007, 28(8):2361

[8] 邢保英,何晓聪,唐勇,等.自冲铆成形机理及静力学性能分析[J].材料导报,2013(2):135

[9] He Xiacong. Coefficient of variation and its application to strength prediction of self-piercing riveted joints, Scientific Research and Essays, 2011, 6(34):6850

[10] 何晓聪,何家宁,柯建宏,等.自冲铆接头的质量评价及强度可靠性预测[J].湖南大学学报,2010,37(12):1

[11] He Xiacong, Pearson I, Young K. Self-pierce riveting for sheet materials: state of the art[J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 199(1/3):27

[12] 邓成江,何晓聪,邢保英,等.基于试验的自冲铆接头失效机理分析[J].热加工工艺,2013,42(17):220

(编辑 吴坚)