

钛合金异种材料单搭自冲铆接头力学性能

卢毅 何晓聪 王医锋 刘福龙

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500)

文 摘 为研究钛合金异种材料单搭自冲铆接头的力学性能,本文使用接头剖面直观检测法分析了四种铆接接头的成形质量,先后对铜-钛合金接头(H62-TA1 接头)和钛-铝合金接头(TA1-AA5052 接头)进行准静态力学性能测试,得到了两种接头的载荷-位移曲线。采用狄克逊准则剔除异常值,并通过变差系数法验证了试验数据的可靠性。研究表明:H62-TA1 接头质量优于 TA1-H62 接头,TA1-AA5052 接头质量优于 AA5052-TA1 接头;H62-TA1 接头强度(5 177.8 N)高于 TA1-AA5052 接头(4 296.9 N),H62-TA1 接头能量吸收值(21.9 J)大于 TA1-AA5052 接头(10.2 J);H62-TA1 接头失效模式为铆钉拉出失效,TA1-AA5052 接头失效模式为下板拉断失效。

关键词 自冲铆,单搭接头,钛合金,准静态力学性能,失效模式

中图分类号:TH131.1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.018

Mechanical Properties of Single-Lap Self-Pierce Riveted Joints in Dissimilar Sheets of Titanium Alloy

LU Yi HE Xiacong WANG Yifeng LIU Fulong

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

Abstract In the paper, in order to study mechanical properties of single-lap self-pierce riveted joints in dissimilar sheets of titanium alloy, the method of cross-section visual verification were applied to analyze the quality of four joints. The quasi static mechanical properties test was used to test mechanical properties of copper alloy-titanium alloy joints(H62-TA1 joints) and titanium alloy-aluminum alloy(TA1-AA5052 joints), and the load-displacement curve of the two joints was acquired from the test. The Dixon guideline was used to reject abnormal values, and the method of coefficient of variation was used to verify the reliability of the test data. The results show that the H62-TA1 joint is superior to the TA1-H62 joint, and the TA1-AA5052 joint is superior to the AA5052-TA1 joint. The strength of the H62-TA1 joint (5 177.8 N) is higher than the TA1-AA5052 joint (4 296.9 N), and the energy absorption value of the H62-TA1 joint (21.9 J) is greater than the TA1-AA5052 joint (10.2 J). The failure mode of the H62-TA1 joint is the rivet being pull out, and the failure mode of theTA1-AA5052 joint is the lower sheet being snapped.

Key words Self-piercing riveting, Single-lap joint; Titanium alloy, Quasi-static mechanical property, Failure modes

0 引言

近年来,随着结构轻量化设计的发展,自冲铆连接技术是近年来快速发展起来的一种机械冷成型技术,是通过铆接过程中板材和铆钉的塑性变形及回弹形成的机械内锁来实现的。铆接接头形成后,其连接

质量取决于铆钉与板材之间的接触界面摩擦系数及形成理想接头的各项参数,其铆接过程实质为连接两层或多层板的一种冷成型工艺。在冲头作用下,特质半空心铆钉刺穿上层板并进入下层板使铆钉和连接板材发生塑性大变形,以达到形成机械自锁的目

收稿日期:2014-10-17

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(20130576)

作者简介:卢毅,1990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:luyis24@163.com

通讯作者:何晓聪,教授,博导,从事薄板材料连接新技术研究。E-mail:xiaocong_he@126.com

的^[1]。以连接双层板材为例,自冲铆接工艺过程如图 1 所示,其工艺过程可分为夹紧、刺穿、整形、释放四个阶段。自冲铆连接技术有如下优势:可有效连接多层、有镀层的同种或异种材质和厚度及难以采用点焊连接的板材,生成周期短、自动化程度高、易实现批量现代化生产和过程在线监控,无需表面预处理、无需预打孔操作、工艺简单,操作环境安全友好、无废气、无粉尘、低能耗等^[2]。目前自冲铆技术已被应用于汽车和航空航天制造等领域。

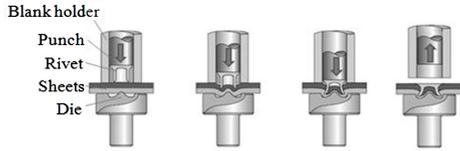


图 1 自冲铆连接工艺过程

Fig. 1 Self-piercing riveting process

异种材料组合的搭接是结构轻量化应用中常见的连接形式。许多学者对异种材料组合如铝合金、高强度钢板等自冲铆接过程和接头性能做了大量研究^[3-5]。何晓聪^[6-8]从接头强度、振动特性和质量评估等方面研究了自冲铆技术,为评价自冲铆接头质量和强度可靠性提供了重要参考。静强度是衡量自冲铆接头强度的一个重要标准,严柯科等^[9]研究了 AA5052 自冲铆接头的静强度特性并分析了其失效特征。邢保英等^[10]研究了自冲铆接头的微观成形机理及其力学性能,为分析接头裂纹损伤和后续接头材料组织再处理提供了参考。He 等^[11]、Mucha^[12]、Atzeni 等^[13]和岁波等^[14]通过数值模拟方法分析了铆接过程中铆钉材料模型、摩擦系数、模具形状、上板厚度对接头成形参数和能量消耗的影响及静态强度和失效过程等。Hoang 等^[15]从工艺角度分析铆接过程中预应力和自然时效处理对铝质铆钉自冲铆静态特性的影响,为分析自冲铆接头静态性能提供了一定的理论依据。

目前,在自冲铆可连接的材料范围内,对钛合金与其他材料之间的有效连接及相关研究较少。本文将运用自冲铆连接技术进行钛合金和铜合金及铝合金异种材料的连接实验,研究其自冲铆连接的可行性,对成形质量好的接头进行准静态力学性能测试并研究其静力学性能。

1 试验

1.1 材料性能测试

试验材料为钛合金板(TA1)、铜合金板(H62)和铝合金板(AA5052),110 mm×20 mm×1.5 mm。根据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验法》,在电子航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 3 期

液伺服材料试验机(MTSlandmark100)上分别对三种板材进行单向拉伸试验。其中引伸计标距为 20 mm,拉伸速率为 2 mm/min,测得的力学性能如表 1 所示。三种板材的工程应力—应变($\sigma - \varepsilon$)曲线如图 2 所示。试验结果表明 TA1 与 H62 的工程应力和应变特性比较接近,并且都高于 AA5052。

表 1 TA1、H62 和 AA5052 力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of TA1、H62 and AA5052

材料	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /MPa	延伸率 /%
TA1	402.5	396.8	105.5	33
H62	424.5	340.3	110.0	30
AA5052	229.9	211.5	69.5	12

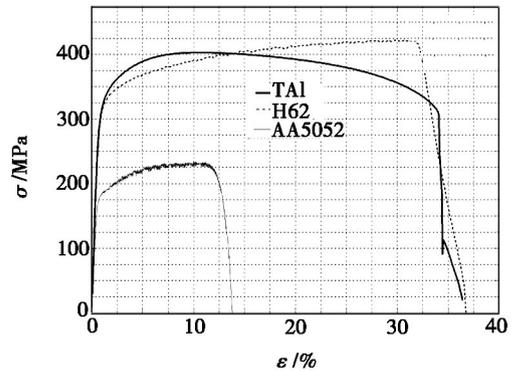


图 2 TA1、H62 和 AA5052 工程应力—应变

Fig. 2 Engineering $\sigma - \varepsilon$ curves of TA1、H62 and AA5052

1.2 自冲铆连接试验

接头几何尺寸如图 3 所示。制备接头所用的上模冲头直径为 7.8 mm,凹模为平底模具,采用长度为 5 mm、钉腿直径为 5.3 mm 的铆钉,上、下板材尺寸均为 110 mm×20 mm×1.5 mm,试件搭接部分长度为 20 mm。制备钛—铜合金接头(TA1-H62 接头)及铜—钛合金接头(H62-TA1 接头)设定预压紧力 5 MPa,刺穿力 19.5 MPa,整形力 11 MPa,行程 131.60 mm;制备钛—铝合金接头(TA1-AA5052 接头)及铝—钛合金接头(AA5052-TA1 接头)设定预压紧力 5 MPa,刺穿力 20 MPa,整形力 11 MPa,行程 131.60 mm。由于 TA1 及 H62 常温下硬度较大,采用最大硬度的铆钉仍无法成功铆接,因此,在铆接 TA1 和 H62 之前用丁烷对 TA1 搭接部位进行局部热处理(加热温度为 750℃),铆接 TA1 和 AA5052 时两种板材都不加热。铆接过程通过载荷—行程曲线在线监控铆接质量^[7]。制备分别获得 10 个 H62-TA1 单搭自冲铆接头和 10 个 TA1-AA5052 单搭自冲铆接头用于后续试验。

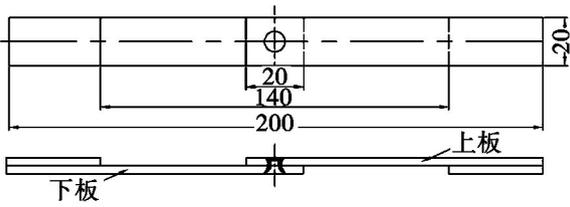


图3 接头几何尺寸

Fig. 3 Geometry of the joints

1.3 准静态力学性能测试

对 H62-TA1 接头和 TA1-AA5052 接头进行准静态力学性能测试,拉伸速率为 5 mm/min。两端夹持长度均为 30 mm,为防止拉伸过程产生扭矩,在夹持部分加上相应的垫片。当接头明显断裂或载荷下降到最大载荷的 95% 时,视为失效。如图 4 为两组待试验接头。



(a) H62-TA1 接头



(b) TA1-AA5052 接头

图4 待试验接头

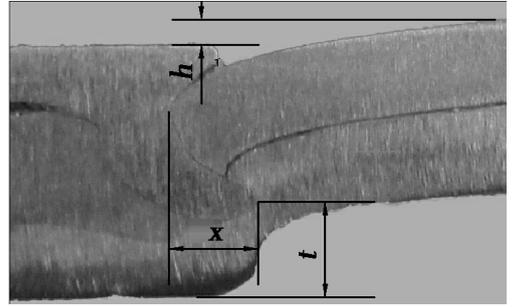
Fig. 4 Joints for test

2 试验结果和分析

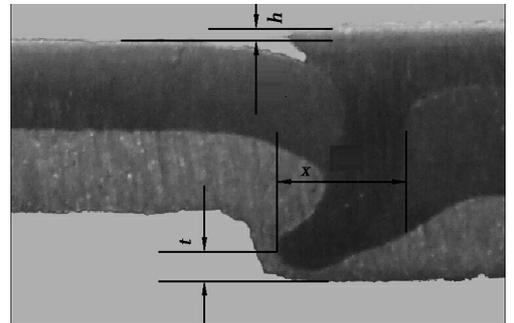
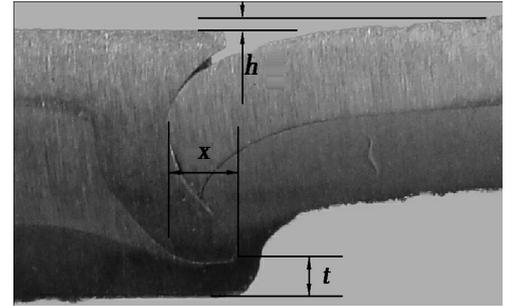
2.1 接头质量分析

采用接头剖面直观检测法判定接头质量,并且通常参照三个检测标准^[7],即钉头高度 h 、残余底厚 t 和钉脚张开度 x 。如图 5(a) 所示,为 TA1-H62 和 H62-TA1 两种单搭自冲铆接头截面。对比两种接头截面,TA1-H62 接头残余底厚 t 和钉头高度 h 较大,其铆钉脚被严重墩粗,故 H62-TA1 接头质量较好。所以在运用自冲铆技术连接 TA1 与 H62 时,应将 H62 作为上板,TA1 作为下板,制成 H62-TA1 接头。如图 5(b) 所示,为 TA1-AA5052 和 AA5052-TA1 两种单搭自冲铆接头截面。两种接头 h 和 t 相差较小,

TA1-AA5052 接头铆钉脚张开度 x 大于 AA5052-TA1 接头,故 TA1-AA5052 接头质量较好。所以在运用自冲铆技术连接 TA1 与 AA5052 时,应将 TA1 作为上板,AA5052 作为下板,制成 TA1-AA5052 接头。



(a) TA1-H62 和 H62-TA1



(b) TA1-AA5052 和 AA5052-TA1

图5 接头截面

Fig. 5 Cross-section of joints

2.2 强度分析

本文选用狄克逊准则来剔除异常值^[16]。狄克逊准则是通过极差比判定和剔除异常数据,并认为异常数据应该是最大数据和最小数据,其基本方法是将数据按大小排列,检验最大数据和最小数据是否为异常数据。基本做法为:将实验数据 x_i 按值的大小排成宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第3期

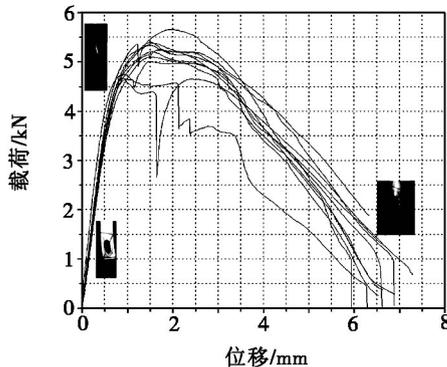
顺序统计量 $x(1) \leq x(2) \leq x(3) \cdots \leq x(n)$, 通过狄克逊检验的临界值表计算

$$f(n) = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2} \quad (1)$$

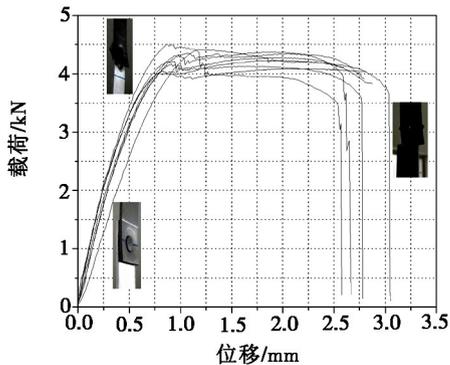
式中, x_2 表示按大小排列后第 2 个数据, x_n 表示第 n 个数据, 以此类推。然后根据狄克逊检验的临界值表将 $f(n)$ 与 $f(n, a)$ ($a=0.05$ 或 0.01 , 表示可疑值在 95% 或 99% 置信概率下进行检验) 进行比较, 如果 $f(0) > f(n, a)$, 则判定该数据为异常数据, 予以剔除。

经检验, H62-TA1 接头组的数据无异常值, TA1-AA5052 接头组的第 10 个数据为异常值, 将其剔除。两种单搭自冲铆接头的载荷一位移曲线如图 6 所示。H62-TA1 接头组的平均最大拉剪载荷为 5 177.8 N, 标准差为 221.7 N; TA1-AA5052 接头组的平均最大拉剪载荷为 4 296.9 N, 标准差为 137.2 N。通过计算 H62-TA1 接头组的静强度的变差系数为 0.002 7, TA1-AA5052 接头组的静强度的变差系数为 0.002 9, 故数据为可靠性数据^[7-8]。

如图 6 所示, 在准静态力学性能测试过程中, 对于 H62-TA1 接头组, 随着拉伸位移的增加, 拉伸-剪切载荷增大, 接头上的材料发生弹塑性变形; 拉伸位移进一步增大, 拉伸-剪切载荷达到最大值后, 在一段拉伸位移内载荷慢慢下降, 此阶段对应于铆钉被慢慢拉出, 接头失效; 对于 TA1-AA5052 接头组, 随着拉伸位移的增加, 拉伸-剪切载荷增大, 接头上的材料发生弹塑性变形, 拉伸位移进一步增大, 拉伸-剪切载荷达到最大值后, 在一个较小的拉伸位移内载荷急剧下降, 此阶段对应于下板被瞬间拉断, 接头失效。铜-钛接头可承受的平均最大拉剪载荷比钛-铝接头提高了 20.5%, 这种静强度的差异主要体现在 H62 的工程应力应变都比 AA5052 高。但由于 AA5052 要轻于 H62, 因此当钛合金异种自冲铆接头运用在轻量化要求较高的结构上, 应优先考虑选 TA1-AA5052 接头。



(a) H62-TA1 接头



(b) TA1-AA5052

图 6 载荷一位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

2.3 能量吸收分析

为对比分析 H62-TA1 接头和 TA1-AA5052 接头的缓冲吸震性能, 分别取两种接头组中最大拉剪载荷与其平均最大拉剪载荷最接近的接头为分析对象。H62-TA1 接头组中取第 10 个接头, 其最大拉剪载荷为 5 213.6 N, 最大拉伸位移为 6.569 mm; TA1-AA5052 接头组中取第 5 个接头, 其最大拉剪载荷为 4 275.5 N, 最大拉伸位移为 2.807 mm。

由图 6 所示的载荷-位移图下的面积计算相应单搭自冲铆接头拉剪变形时的能量吸收数值。其计算过程为将试验获得的接头载荷-位移曲线图片导入绘图软件中(本文采用 Auto CAD 软件), 并实现其横坐标 1:1 比例显示。通过软件功能获得接头载荷-位移曲线与横坐标系所围成区域的面积, 根据以下关系式获得接头的能量吸收值:

$$Y = \frac{W_{\text{unit}} X}{S_{\text{coordinate}}} \quad (2)$$

式中, $S_{\text{coordinate}}$ 为缩放后整个坐标系所围成区域的面积, W_{unit} 为坐标系中横、纵坐标单位刻度所围成面积的能量值, X 为曲线与横坐标系所围成区域的面积。

H62-TA1 接头的拉伸位移大于 TA1-AA5052 接头(图 6), 这是由于 H62 的强度大于 AA5052 以及 H62 的延伸率高于 AA5052(表 1)所致。而接头的能量吸收值主要由接头的拉伸位移和拉剪载荷共同决定, 两种板材分别与 TA1 板进行自冲铆连接并进行准静态力学性能测试之后, 得出 H62-TA1 接头的能量吸收值(21.9 J)大于 TA1-AA5052 接头(10.2 J), 相比 TA1-AA5052 接头增大了 114.7%, 这说明 H62-TA1 接头的缓冲吸震能力要强于 TA1-AA5052 接头, 因此当钛合金异种自冲铆接头运用在缓冲吸震能力要求高的结构上, 应优先考虑选用 H62-TA1 接头。

2.4 失效模式分析

从图 7(a) 可以看出, H62-TA1 接头的上下板与

铆钉相接触的部位都出现变形的情况,并且下板与铆钉相接触部位周围的变形程度较高,这是由于TA1的屈服强度要高于H62所致;此组接头中的铆钉最后被拉出,这是由于铆钉与下板之间的机械内锁被破坏所造成的。从图7(b)可以得出,此组接头的下板都出现被不同程度拉断的现象,这是因为上板强度和铆钉与下板之间的机械内锁强度都大于下板强度。

自冲铆接头有两种最常见的失效形式,即铆钉脚与下板分离和铆钉头部与上板分离。这里出现了两种不同于目前研究的单搭自冲铆接头的失效模式,特别需要指出的是,对于TA1-AA5052接头的接头部位完好而板材被拉断的这种失效模式,由于其接头强度大于被连接板材强度,这就为后续研究其接头的动态疲劳特性提供了基础。



(a) H62-TA1 接头



(b) TA1-AA5052 接头

图7 接头准静态力学性能测试的失效模式
Fig. 7 Failure mode of joints by the quasi static mechanical properties test

3 结论

(1)H62-TA1 接头连接质量优于TA1-H62 接头,TA1-AA5052 接头连接质量优于AA5052-TA1 接头。

(2)铜-钛接头可承受的平均最大拉剪载荷(5 177.8 N)高于钛-铝接头(4 296.9 N),相比于钛-铝接头拉剪强度,钛-铝接头提高了20.5%,这说明在满足强度要求的前提下,在钛合金异种自冲铆接头轻量化要求较高的结构上,应优先考虑选用TA1-AA5052 接头;H62-TA1 接头的能量吸收值(21.9 J)大于TA1-AA5052 接头(10.2 J),相比TA1-AA5052 接头增大了114.7%,这说明在钛合金异种自冲铆接头缓冲吸震能力要求高的结构上,应优先考虑选用H62-TA1 接头。

(3)H62-TA1 与TA1-AA5052 两种接头失效模式相差较大。H62-TA1 失效模式为铆钉拉出失效,TA1-AA5052 接头失效模式为下板拉断失效。

参考文献

- [1] 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): 27-36
- [2] 邢保英,何晓聪,唐勇,等. 铆钉分布形式对自冲铆接力学性能的影响[J]. 工程力学,2013,30(12):280-285
- [3] Abe Y, Kato T, Mori K. Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminum alloy sheets using conventional rivet and die [J]. Journal of Material Processing Technology, 2009, 209(8): 3914-3922
- [4] Pickin C G, Young K, Tuersley I. Joining of lightweight sandwich sheets to aluminum using self-pierce riveting [J]. Materials and Design,2007,28(8):2361-2365
- [5] Abe Y, Kato T, Mori K. Join ability of aluminum alloy and mild steel sheets by self-piercing rivet [J]. Journal of Material Processing Technology,2006,177(1/3): 417-421
- [6] 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): 28-36
- [7] 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):1-4
- [8] He Xiacong. Coefficient of variation and its application to strength prediction of self-piercing riveted joints[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(34): 6850-6855
- [9] 严柯科,何晓聪,张玉涛,等. 轻型车身自冲铆接头拉伸剪切实验研究[J]. 机械设计,2012,29(2):79-82
- [10] 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):135-138
- [11] He Xiacong, Gu F, Ball A. Recent development in finite element analysis of self-piercing riveted joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5-8): 643-649
- [12] Mucha J. A Study of quality parameters and behaviour of self-piercing riveted aluminium sheets with different joining conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(4): 323-333
- [13] Atzeni E, Ippolito R, Settineri L. Experimental and numerical appraisal of self-piercing riveting [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1):17-20
- [14] 岁波,都东,常保华,等. 铝合金板自冲铆连接过程的模拟分析[J]. 材料科学与工艺,2007, 15(5):713-717
- [15] Nguyen Hieu Hoang, Magnus Langseth. Aluminium self-piercing rivet's failure: testing and numerical analyses [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(541/542): 1355-1359
- [16] 孙培强. 正确选择统计判别法剔除异常值[J]. 计量技术,2013(11):71-73

(编辑 任涛)