

压印接头混合失效模式静力学分析

余童欣 何晓聪 高爱凤 张越

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500)

文 摘 主要研究了压印接头的混合失效模式,给出混合失效相关概念,分析混合失效模式出现的情况和接头参数,得出其常出现在板材力学性能、流动性和所形成的接头参数较好的情况下,并以 1420 铝锂合金和 TA1 钛合金为例比较得知,混合失效模式的承载能力和能量吸收值均为最大,在接头失效过程中兼具了颈部断裂和拉脱失效的特点并在承载能力和承载位移上更优。

关键词 压印接头,混合失效模式,载荷-位移曲线,能量吸收

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.019

Analysis of Mixed Failure Mode of Mechanical Clinched Joint's Mechanical Property

YU Tongxin HE Xiacong GAO Aifeng ZHANG Yue

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

Abstract This paper is focus on mixed failure mode which is one of failure modes in clinch joint. At present, there is no clear definition of mixed failure mode in any published paper. This paper offers the conception of mixed failure mode and analyzed the situation which mixed failure mode would happen. Mixed failure mode often appears in the situation that the sheets with good mechanical properties, great material flow and perfect parameter of clinched joint section. Load-bearing capacity and buffering capacity of 1420 and TA1 hybrid clinched joint's three different failure modes could be compared directly from force-displacement curves and energy absorption. The result showed that mixed failure mode had excellent performance because it showed characteristics both from neck fracture and button separation mode.

Key words Clinched joint, Mixed failure mode, Force-displacement curves, Energy absorption

0 引言

随着复合材料、钛合金和各种新型材料的应用,传统的板材连接技术如点焊已经不能满足要求,机械连接在新型材料连接中仍占有重要地位^[1]。机械连接中压印连接、自冲铆连接和胶接技术以其优异的静力学和疲劳性能逐步取代传统连接工艺,并得到了广泛应用。

压印技术是将金属板材进行冷成型加工的机械连接方法,HE 等^[2-3]研究了压印接头静态动态的力学性能并运用仿真技术模拟了压印接头的受力情况,并深入研究了钛合金和钛合金,钛合金和铜合金以及钛合金与铝合金的各项力学性能;Francesco Lambiase

等^[4-5]研究了模拟接头和实际操作中不同成型力接头材料的流动性,并研究了压印连接中花瓣模和固定模形成的压印接头的力学性能;LEE Chan-Joo 等^[6]研究了压印接头上板颈部断裂失效模式的接头强度,并推导出计算压印接头强度公式;杨慧艳等^[7-8]研究了压印接头在上板颈部断裂和上板拉脱失效两种失效模式下压印接头强度,并推导出两种失效模式下压印接头的强度公式验证了铜-铝合金接头强度的计算;刘福龙等^[9]研究了复合压印接头的力学性能,发现基板强度对复合接头强度有影响,基板强度高则接头强度高;庄蔚敏等^[10]利用有限元模型对不同材料接头抗轴向载荷的力学性能进行了数值模拟,并引入

收稿日期:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50965009);云南省重大专项项目(ZD201504)

作者简介:余童欣,1991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:yutongxin512@163.com

通讯作者:何晓聪,1955年出生,教授,博导,主要从事薄板材料连接新技术研究。E-mail:xiaocong_he@126.com

加工硬化影响因子 β 来表征不同材料加工硬化特性对无铆钉接头抵抗轴向载荷力学性能的影响程度。

本文侧重于探究出现在压印接头失效模式中的第三种混合失效,研究其产生原理、在实际中的出现条件以及对接头力学性能的影响,并将其与另外两种失效模式进行了比较。

1 压印接头的失效

不同的压印失效模式表征了不同受力及截面参数分析,且不同的失效模式影响了载荷-位移曲线之后的接头情况。接头截面的主要参数见图 1。压印接头失效模式取决于上板颈部和接头内锁强度比较。目前普遍认可压印接头失效模式有两种,即上板颈部断裂失效和上下板拉脱失效^[2]。

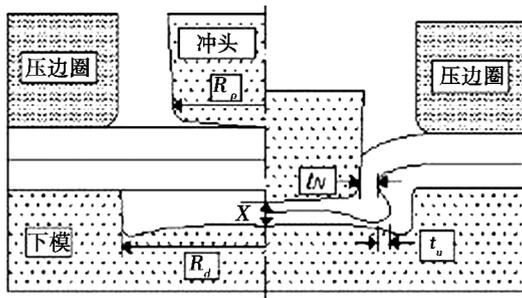


图 1 压印连接过程的参数图

Fig.1 Schematic drawing of mechanical clinching process

1.1 上板颈部断裂失效模式

上板颈部断裂失效模式是指接头在上板颈部断裂,在轴向载荷下,拉伸载荷作用于上板的颈部的内锁。拉应力随轴向载荷增大而增大,当拉应力达到失效力即上板颈部的最大抗拉强度,上板就发生颈部断裂失效^[6]。在接头受到拉伸-剪切载荷作用下,在接头承载的一边有裂纹产生扩大至接头另一边,将接头剪成上下两部分,因此导致接头失效(图 2)。

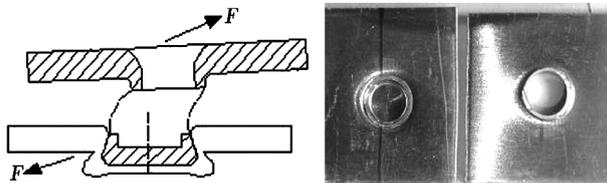


图 2 压印接头上板颈部断裂失效模式

Fig.2 Neck fracture mode of mechanical clinched joint

1.2 上下板拉脱失效模式

上下板拉脱失效模式是指接头由于上板颈部强度较大,上下板形成机械压印点几何内锁强度不足,在轴向载荷下接头内锁结构先失效,垂直滑移分开,导致上下板脱离^[6]。

从宏观上分析,接头上板部分承载的一边由于存在镶嵌量与相对位置的下板发生摩擦使两者都发生塑性变形,如图 3 所示。

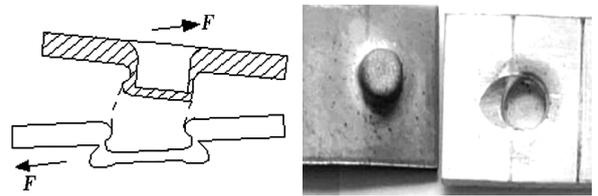


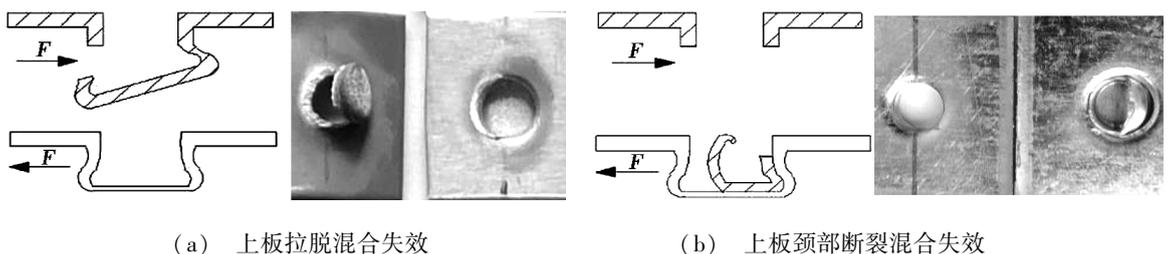
图 3 压印接头上板拉脱失效

Fig.3 Button separation mode of mechanical clinched joint

1.3 混合失效模式

对于混合失效,国内外学者常将其并入颈部断裂或是拉脱失效,并无明确界定,本文认为混合失效是介于两种失效形式之间的失效模式,即一个试件同时存在以上两种失效模式,压印点同时存在裂纹产生扩大和挤压塑性变形,两者所占比例不同,也因此会产生两种混合失效模式:上板拉脱混合失效和上板颈部断裂混合失效(上板拉脱混合失效是上板颈部部分断裂且整个压印点从下板中拉脱;上板颈部断裂混合失效是上板颈部全部断裂且整个压印点存在部分从下板中拉脱)。

上板颈部断裂混合失效是上板的强度较小且上下板形成机械压印点几何内锁充分,有发生颈部断裂的趋势,又因上板颈部强度略低于接头内锁强度,压印点在受到拉-剪载荷作用下,实际中已发生颈部断裂和部分上板被拉起的现象,如图 4(a)所示。上板拉脱混合失效是接头在拉伸-剪切载荷作用下,压印点颈部已产生裂纹,同时由于上板强度较大裂纹并未完全扩展,但接头已因内锁量不足先失效。接头上板颈部强度略高于接头内锁强度,因此发生脱离处的上板压印点存在部分剪断的现象,如图 4(b)所示。



(a) 上板拉脱混合失效

(b) 上板颈部断裂混合失效

图 4 压印接头混合失效

Fig. 4 Mixed failure mode of mechanical clinched joint

2 混合失效现象出现条件

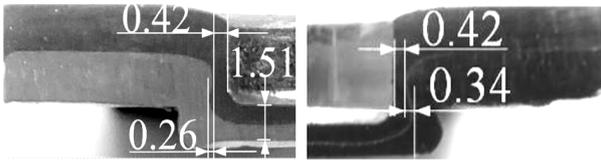
混合失效并非偶然现象,目前在 1.5 mm TA1(钛合金)-1420(铝锂合金)、1.5 mm 热处理后 TA1-SPCC、1.5 mm 镀锌钢-镀锌钢、1 mm SPCC-SPCC(冷轧钢)压印连接实验中出现混合失效的失效模式。

试验所用材料的性能参数如表 1 所示,从压印试验所用材料和压印点截面参数分析,组成压印点上下板为同种材料时,上下板力学性能相当且上下板材料的流动性较高,压印点的成形性较好,即在压印点中所形成镶嵌量 t_v 相对较大,而颈部厚度 t_N 相对较小,内锁强度较好,易发生上板颈部断裂混合失效,如图 5(a) 所示;组成压印点上下板为异种板材时,上板材料的力学性能远高于下板,下板材料流动性较差,压印点的成形性较差,即在压印点中所形成镶嵌量 t_v 相对较小,而颈部厚度 t_N 相对较大,上板颈部强度较好,易发生上板拉脱混合失效,如图 5(b) 所示。

表 1 材料力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties parameters of material

材料	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	拉伸强度/ MPa	伸长率/ %
SPCC	156.2	251.8	308.7	45.5
镀锌钢	191	337.8	365.6	32.7
1420	69	294.9	364.6	14.2
TA1	98.5	396.8	402.5	33



(a) TA1-1420 (b) 镀锌钢-镀锌钢

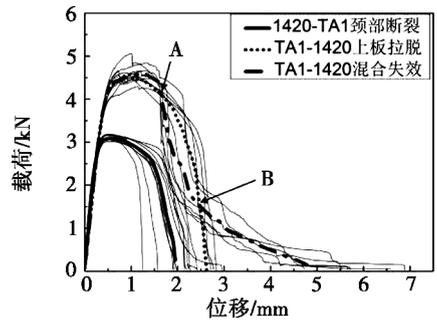
图 5 压印接头截面参数

Fig.5 Schematic diagram of clinched joint section

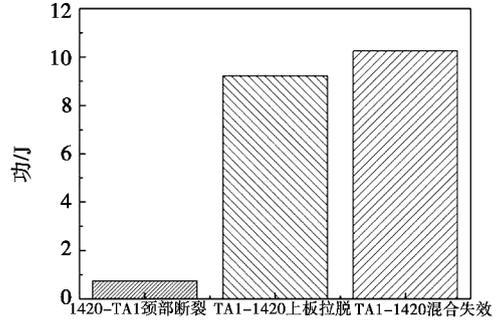
由试验数据分析可知,混合失效多出现在压印上板的力学性能较好,材料流动性较好的场合,当下板的力学性能与上板相似时,易发生上板颈部断裂混合失效,当下板力学性能远低于上板时,则易发生上板拉脱混合失效。

3 混合失效现象分析

接头的失效形式表征了接头质量及其力学性能,具体体现在接头的载荷-位移曲线和能量吸收值中。载荷-位移曲线表征了接头的承载能力,能量吸收值表征了接头的缓冲抗震能力,可根据数据直观的反映失效形式的力学性能。以 1420 铝锂合金和 TA1 钛合金的压印接头为例,现有 1420-TA1、TA1-1420 接头三种失效模式数据,取其平均值作图(图 6)。



(a) 载荷-位移曲线



(b) 能量吸收直方图

图 6 3 种失效模式载荷-位移曲线和能量吸收图

Fig.6 Force-displacement curves and energy absorption of three failure modes

由图 6(a) 可知,上板颈部断裂失效模式的最大承载均值最小,为 1 348.9 N;对于上板拉脱失效与混合失效,上板拉脱失效最大承载力均值为 4 604.8 N,混合失效为 4 638.5 N,在 A 点之前混合失效模式压印点的承载略高于拉脱失效,即达到载荷峰值时混合失效高于上板拉脱失效;在 A-B 之间拉脱失效明显高于混合失效,而在 B 点之后,拉脱失效载荷呈直线下降趋势,而混合失效下降的较为平缓,且有较长的失效位移。

分析可知,对于上板颈部断裂,首先在压印点承载边的颈部承受拉伸-剪切载荷,由于内锁强度大于上板颈部强度,在上板颈部首先产生裂纹,随载荷增大,裂纹扩展至压印点中心位置,此处压印点直径最大,承载力同时达到最大,之后存在部分挤压塑性变形,承载力逐渐下降直至压印点失效。

对于上板拉脱失效模式,在 A 点之前内锁结构破坏较早,由颈部的摩擦和塑性变形维持压印点,并达到压印点承载的最大值;A-B 点之间是由于拉伸-剪切载荷的继续,整个压印点分离为上下板两部分,上板小部分被拉出压印点继续挤压下板压印点产生更大的塑性变形可以承受较高载荷;B 点之后压印点两部分塑性变形结束,接头基本无承载能力,即导致曲线直线下降,整个压印点失效。

对于混合失效,首先在压印点的颈部产生裂纹并
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 3 期

扩大,但在裂纹扩大的同时,因为其内锁强度不够,部分上板被拉出两者同时作用达到载荷峰值;A-B点之间因为已经存在较大裂纹在拉脱过程中挤压下板塑性变形较小,所能承受载荷明显小于拉脱失效的同样位置;当压印点大部分被拉出后,挤压承载边,承载边的压印点有裂纹,但其内锁结构未失效,仍可承载一定拉伸-剪切载荷直至接头失效。

观察3种失效模式的能量吸收值可知,颈部断裂的能量吸收值最小为0.744 1 J,拉脱失效其次为9.23 J,混合失效最好为10.25 J,说明混合失效和拉脱失效最大承载能力相当,但混合失效的缓冲抗震能力更好。

混合失效模式的承载能力和能量吸收值均为最大,在接头失效过程中兼具了颈部断裂和拉脱失效的特点并在承载能力和承载位移上更优。

4 结论

(1)混合失效是介于两种失效形式之间的失效形式,即压印点同时存在裂纹产生扩大和挤压塑性变形两种破坏形式,两者所占比例不同;上板拉脱混合失效是上板颈部部分断裂且整个压印点从下板中拉脱;上板颈部断裂混合失效是上板颈部全部断裂且整个压印点存在部分从下板中拉脱。

(2)混合失效常出现在上板材料力学性能较好,材料流动性较好,所形成的接头参数较好,所形成镶嵌量 t_v 和颈部厚度 t_N 较大,上板颈部断裂混合失效更易出现在镶嵌量 t_v 相对较大的接头中,上板拉脱混合失效易发生在镶嵌量 t_v 相对较小,而颈部厚度 t_N 相对较大。

(3)由载荷—位移曲线和能量吸收直方图可知

混合失效的承载能力和能量吸收值均为最大的,分别为4 638.5 N和10.25 J,表征了在压印接头失效模式中混合失效模式是一种兼具两者优势的失效模式,因此具备更高的力学性能。

参考文献

- [1] 任晓华.航空制造技术发展趋势[J].航空科学技术,2010(3):2-5.
- [2] HE XIAOCONG,ZHAO LUN,YANG HUIYAN.Investigations of strength and energy absorption of clinched joints[J].Computational Materials Science,2014,94:58-65.
- [3] HE XIAOCONG,ZHANG YUE,XING BAOYING.Mechanical properties of extensible die clinched joints in titanium sheet materials[J].Materials and Design,2015,71:26-35.
- [4] LAMBIASE F,DI ILIO A.An experimental study on clinched joints realized with different dies[J].Thin-Walled Structures,2014,85:71-80.
- [5] LAMBIASE F,DI ILIO A.Finite element analysis of material flow in mechanical clinching with extensible dies[J].Journal of Materials Engineering and Performance,2013,22(6):1629-1636.
- [6] LEE CHAN-JOO,KIM JAE-YOUNG.Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets[J].Materials and Design,2010,31(4):1854-1861.
- [7] 杨慧艳,何晓聪,丁燕芳.铜合金同种和异种板材压印连接研究[J].热加工工艺,2014,43(7):34-38.
- [8] 杨慧艳,何晓聪,周森.压印接头拉剪强度的有限元模拟[J].机械工程材料,2013,37(9):74-78.
- [9] 刘福龙,何晓聪,邢保英.材料属性对压印及其复合接头性能的影响[J].热加工工艺,2014,11:162-165.
- [10] 庄蔚敏,刘学成.加工硬化特性对无铆钉接头力学性能影响的研究[J].汽车技术,2011,11:52-56.