

碳纤维-铝合金电磁铆接工艺及性能研究

蒋浩, 廖宇轩, 李光耀, 崔俊佳

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 研究不同工艺参数下碳纤维-铝合金电磁铆接接头的力学性能。**方法** 利用电磁铆接技术对直径为 $\Phi 5$ mm 的 2A10 铝合金铆钉、厚度为 2.0 mm 的 T300 碳纤维复合材料和 1.8 mm 的 5182 铝合金板料进行铆接, 借助金相显微镜和万能试验机对接头的微观形貌和力学性能进行观察和测试。**结果** 随着电磁铆接放电能量的增加, 铆钉镦头高度逐渐减小, 直径逐渐增大。具体地, 当放电能量从 4.0 kJ 增加至 5.5 kJ 时, H/H_0 (镦头高度/外伸量) 从 0.36 减小至 0.17, 而 D/D_0 (镦头直径/铆钉直径) 从 1.25 增长到 1.68。通过金相观察结果可知, $D/D_0=1.4, 1.5, 1.6$ 这 3 种类型的铆钉镦头均产生了绝热剪切带, 其中下剪切带几乎消失, 上剪切带较为明显, 并且随着 D/D_0 的增大, 绝热剪切带越来越明显。力学性能测试结果表明, 随着 D/D_0 增加, 碳纤维-铝合金电磁铆接接头的剪切性能随之变强, 其中 $D/D_0=1.6$ 接头的最大剪切力达到最大。**结论** 在不同性能指标下, 电磁铆接接头的最佳工艺参数有所不同。当考虑接头的微观组织等性能指标时, 放电能量 5.0 kJ ($D/D_0=1.5$) 为最佳工艺参数; 当考虑接头的剪切性能等因素时, 放电能量 5.3 kJ ($D/D_0=1.6$) 为最佳工艺参数。

关键词: 碳纤维; 电磁铆接; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.006

中图分类号: TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0037-08

Study on Process and Mechanical Properties of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Structures

JIANG Hao, LIAO Yu-xuan, LI Guang-yao, CUI Jun-jia

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: This paper aims to investigate the process and mechanical properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)/Al electromagnetic riveted joint under different process parameters. The $\Phi 5$ mm 2A10 aluminum rivet, T300CFRP with thickness of 2.0 mm, and 1.8 mm of 5182 aluminum alloy were riveted by electromagnetic riveting technology. The microstructure and mechanical properties of the joint were tested by metallographic microscope and universal testing machine. With the increase of the discharge energy, the height of the riveting head decreased and the diameter increased. Specifically, when the discharge energy increased from 4.0 kJ to 5.5 kJ, H/H_0 (head height/rivet overhang) decreased from 0.36 to 0.17, while D/D_0 (head diameter/rivet diameter) increased from 1.25 to 1.68. The metallographic results showed that the three types of riveting heads ($D/D_0=1.4, 1.5$ and 1.6) had adiabatic shear bands (ASBs). The upper shear zone was more obvious, while the lower shear zone almost disappeared. What's more, the ASBs became more obvious with the increase of D/D_0 . The mechanical properties test results showed that with the increase of D/D_0 , the shear performance of CFRP/Al electromagnetic riveted joint became beneficial. The riveting head of $D/D_0=1.6$ had the maximum shear force. The optimum process parameters of the joint were dif-

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52005173); 博士后创新人才支持计划 (BX20200123); 长沙市自然科学基金 (kq2014047)

作者简介: 蒋浩 (1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电磁铆接。

通讯作者: 崔俊佳 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车轻量化制造。

ferent under different performance indexes. The discharge energy of 5.0 kJ ($D/D_0=1.5$) was the best process parameter when the microstructure indexes of the joint were considered. The discharge energy of 5.3 kJ ($D/D_0=1.6$) was the best process parameter when the shear performance of the joint was considered.

KEY WORDS: CFRP/Al structures; electromagnetic riveting; microstructure; mechanical properties

汽车轻量化是实现节能减排最有效的方法之一,大量使用轻质高强材料已经成为车身轻量化最为重要的手段之一^[1-4]。目前,运用在汽车车身的轻量化材料主要有碳纤维复合材料、铝合金以及镁合金等轻质高强材料。在汽车制造中,为了控制成本并增加结构塑性,碳纤维复合材料通常会搭配铝合金等金属。

针对碳纤维-铝合金异种材料连接结构,目前常用的连接技术主要包括传统机械连接(螺栓和铆接)、胶接、搅拌摩擦点焊和激光辅助焊接等^[5-6]。但这些技术均有一定的局限性,比如螺栓连接接头不仅容易松动,而且其疲劳性能较差,并且装配过程不利于智能化生产;胶接工艺,涂胶前需要对工件表面进行砂纸打磨处理,涂完胶后还需固化,生产效率低。近年来,新提出的搅拌摩擦点焊和激光辅助焊接仍处于研究阶段,接头力学性能较差。相比之下,铆接技术工艺简单、连接效率高、接头稳定可靠以及可实现自动化,在汽车、航空航天和建筑等行业具有广泛应用^[7-8]。传统铆接工艺(液压铆接和气动铆接)因铆钉不均匀性变形,对于复合材料连接时容易造成基体损伤等问题,影响连接质量。电磁铆接技术利用互斥的电磁力作为动力源,具有铆接力大、铆接速度快,铆钉变形更均匀,对复合材料损伤小,并且铆接过程无污染无排放等,是一种绿色制造工艺^[9]。

电磁铆接技术最早被美国和苏联提出并推广^[10-11]。在20世纪70年代,为解决装配F-14战斗机中大夹层钛合金结构紧固铆接所遇到的难题,美国格鲁门宇航公司开始研究电磁铆接技术,并专门研制了电磁铆接设备^[12]。同时期,苏联伏尔加航空研究所也成功研制出了电磁铆接设备,并将该技术应用在TY-154救生阀体和伊尔-86等型号飞机的装配生产上^[13]。在20世纪70—80年代,美国波音公司发明了电磁铆接装置,使用双枪形式进行干涉配合铆接,并将电磁铆枪装配在自动钻铆机上使用。在20世纪90年代,电磁铆接技术在新型737飞机机身上成功使用,苏联还研制了一条长达12 m应用于飞行器圆筒壁板装配的电磁铆接自动化生产线。随后,美国Eletroimpact(EI)公司也自主研制了一套自动化电磁铆接生产线,应用于波音B787舱体部段和空客A380机翼壁板装配上^[14-15]。21世纪初,我国多所高校及科研单位自主研发或引进了国外电磁铆接设备进行研究。西北工业大学^[16]较早开展自主研发工作,开发了多款电磁铆接设备及手持式电磁铆枪,尤其是在低电压电磁

铆接设备和铆接结构优化方面取得了较大进展。哈尔滨工业大学一直从事电磁铆接设备和电磁铆枪研发工作,研制了380 V低电压电磁铆接设备和轻量化手持式电磁铆枪^[17]。随着电磁铆接设备的发展,电磁铆接技术在各领域开始广泛应用^[18-20]。

与此同时,许多学者对电磁铆接过程进行了数值模拟研究以及相关的工艺试验。哈尔滨工业大学章茂云等^[21]针对直径为 $\phi 8$ mm的2A10铝合金铆钉进行了电磁铆接工艺试验,并与气动铆接接头进行了性能对比,结果表明,在电压为380 V,孔径为8.2 mm时能得到满足技术要求的电磁铆接接头,并且接头的剪切和拉脱性能均要优于气动铆接接头。湖南大学陈乾^[22]针对直径为 $\phi 6$ mm的碳钢铆钉结构,将电磁铆接接头与准静态压铆接头的疲劳性能进行了对比,发现电磁铆接接头的疲劳性能比准静态压铆要高1~3倍。Jiang等^[23]研究比较了不同加载速度下铆接节点的剪切破坏行为,发现在准静态和高速拉伸过程中,铝板发生局部变形和面积弯曲。Cui等^[24]研究了铆接布置对碳纤维布/铝电磁胶铆复合连接接头力学性能的影响,电磁胶铆复合连接具有较强的剪切强度,且连接的能量吸收(EA)值高于胶接和铆接。Jiang等^[25]研究了不同铆钉模的电磁铆接接头在拉拔载荷作用下的疲劳性能,试验表明80°铆钉模的电磁铆接接头,其拉拔疲劳性能最好,因为其配合更加均匀、适中。Zhang等^[26]研究了直径为 $\phi 10$ mm的2A10大直径铝合金铆钉电磁铆接接头的力学性能,并与直径为 $\phi 6$ mm的30CrMnSi等强度钢螺栓接头进行了对比,发现电磁铆接不仅能提升接头的剪切和拉脱性能还能减小整个结构的重量。Jiang等^[27]研究了3种锁紧方式下接头的变形特征、力学性能和破坏行为,双头锁紧方式变形稳定,干涉最均匀,微缺陷较少,力学性能较好。

在电磁铆接工艺中,电磁铆接放电参数直接影响其接头的成形质量。不同的放电参数使铆钉变形和微观形貌等都具有不同的响应,进一步影响电磁铆接接头的力学性能。文中针对汽车装配中常用的碳纤维-铝合金结构,选取直径为 $\phi 5$ mm的2A10铝合金铆钉和T300碳纤维复合材料-5182铝合金异种材料板料结构作为研究对象,重点分析放电能量对电磁铆接接头的镦头成形、微观形貌以及力学性能的影响。通过对比分析,揭示不同工艺参数下电磁铆接接头性能的变化规律,确定最佳的工艺参数。

1 试验

1.1 材料

铆钉选取广泛应用于飞机和火箭装配上的 $\phi 5$ mm2A10 铝合金铆钉,它具有良好的塑性和优良的耐腐蚀性,且无应力腐蚀开裂倾向。试验板料选取 5182 T6 铝合金和 T300 碳纤维增强树脂基复合材料板,其中,5182 铝合金是 Al-Mg-Si 系合金,具有良好的成形加工性能和抗腐蚀性能,在油管、飞机油箱以及交

通车辆、船舶的钣金件等已广泛应用;碳纤维板由 AG80 环氧树脂和东丽 T300 平纹编织碳纤维布采用树脂传递成形(Resin transfer molding, RTM)方法制成,总厚度为 2.0 mm,树脂体积分数大约为 40%。该碳纤维板由 9 层单层厚度为 0.2 mm、铺层角度为 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 的碳纤维布组成。具体地,铝合金的力学性能参数如表 1 所示,碳纤维板的纤维密度为 1.76 g/cm^3 ,纤维模量为 230 GPa,纤维强度为 3530 MPa,拉伸强度为 780 MPa,拉伸模量为 65 GPa,层厚为 0.2 mm,树脂含量为 40%。

表 1 2A10 铝合金铆钉和 5182 T6 铝合金板料的材料参数
Tab.1 Material parameters of 2A10 aluminum rivet and 5182 T6 aluminum sheet

铝合金	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	拉伸强度/MPa	硬度(HV)	化学成分(质量分数)/%
2A10 铝合金 铆钉	2.7	73.8	0.33	250	400	102	Si=0.25, Fe=0.2, Cu=3.9~4.5, Mn=0.3~0.5, Mg=0.15~0.30, Zn=0.1, Ti=0.15, 余量为 Al
5182 铝板	2.8	70	0.33	150	225	75	Zn=0.25, Cr=0.10, Si=0.20, Fe=0~0.35, Mn=0.20~0.50, Mg=4.0~5.0, Ti=0.1, Cu=0.15, 余量为 Al

1.2 试件准备

文中主要针对碳纤维-铝合金结构进行电磁铆接工艺试验研究,为了便于测试电磁铆接接头性能,碳纤维板和铝板选取单搭连接方式。碳纤维-铝合金电磁铆接试件的几何尺寸如图 1 所示,碳纤维和铝板的尺寸为 $140\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,厚度分别为 2.0 mm 和 1.8 mm。为避免铆接过程中冲头对碳纤维造成冲击损伤,将碳纤维板放置于半圆头一侧。此外,为避免接头在剪切测试过程中发生非对称性弯曲,在试件夹持区两侧均装配与板料厚度相同的垫块。根据 QJ 782A—2005 铆接通用技术标准, $\phi 5\text{ mm}$ 的 2A10 铝合金铆钉长度为 10.0 mm,碳纤维板和铝板预制孔直径为 $\phi 5.1\text{ mm}$ 。

为保证试验的准确性,获得精确的加工尺寸,文中所有铝板均采用电火花线切割加工。碳纤维板制孔均采用专用钻床进行,主轴转速为 1500 r/min,进给速度为 1.5 mm/min。此外,在电磁铆接前,将孔周围的毛刺去除。

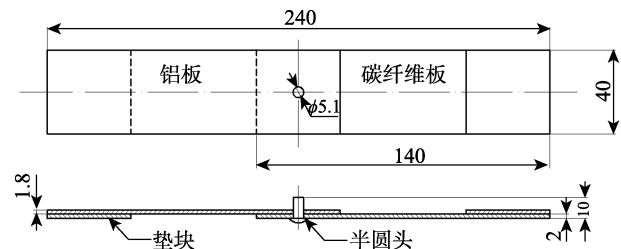


图 1 试件尺寸示意
Fig.1 Schematic of specimen dimension

1.3 试验设备

所用的电磁铆接设备主要由磁脉冲发生器和铆接平台组成,如图 2 所示。磁脉冲发生器主要负责提供电磁铆接所需能量,该磁脉冲发生器最大放电能量为 48 kJ,最大放电电压为 16 kV,它由 6 个最大电容为 66 μF 的电容器组并联而成。其中,放电能量 E 、电容 C 和放电电压 U 满足式(1):

$$E = \frac{1}{2}CU^2$$
 (1)

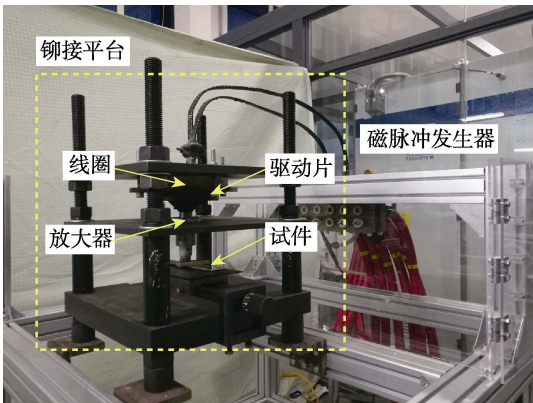


图 2 电磁铆接设备
Fig.2 Electromagnetic riveting equipment

铆接平台将磁脉冲发生器释放的电能转换为动能,负责铆接。该铆接平台是根据电磁铆接原理自主开发设计的,主要由线圈、驱动片、放大器和顶铁等组成。线圈由包裹绝缘纸的铜线缠绕在绝缘的电木骨架上制成,并且在缠绕过程中通过缠绕玻璃丝带、浇

灌绝缘胶水进行固定。绝缘胶水由环氧树脂、聚酰胺树脂和增韧剂(邻苯二甲酸二丁酯)组成,环氧树脂与聚酰胺树脂的体积配比为3:1,增韧剂与环氧树脂的体积配比为1:20。文中研究所用的线圈由铜线缠绕17匝而成。驱动片由导电性能优异的紫铜制成,直径与线圈保持一致,大约为150 mm,根据金属表层感应电流的深度(集肤深度效应)^[28-29],其厚度设定为6 mm。放大器材料选择45#钢,尺寸与驱动片匹配,无其他硬性要求。顶铁材料选择45#钢,尺寸与 $\phi 5$ mm 铆钉的半圆头匹配。

其他部件主要负责固定、安装以及导向。为便于试件安装,整个铆接平台固定于铝合金型材架上。此外,为了缓冲电磁铆接过程带来的巨大冲击力,底部通过橡胶垫相连。具体的电磁铆接试验过程如下:首先将铆钉穿过两层板料,铆钉半圆头置于顶铁上;将整个试件放置于冲头下,铆钉与放大器同轴并接触;为达到更高的能量利用率和更好的铆接效果,调节螺栓高度使线圈和驱动片尽量接触;最后触发磁脉冲发

生器放电开关,即可完成电磁铆接。

2 结果与讨论

2.1 铆头尺寸分析

根据铆钉直径大小,选取一系列放电能量(4.0~5.5 kJ)进行电磁铆接试验,获得不同大小尺寸的铆钉铆头类型,如图3所示。可以清晰看出,随着放电能量的增加,铆钉铆头直径越来越大且越来越扁平。为了探讨放电能量和铆头尺寸之间的关系,需对铆钉铆头的变形进行定量分析。对不同放电能量下所有铆接后铆头的直径和高度进行测量,并采用两个无量纲化参数(D/D_0 和 H/H_0)对铆头直径和高度进行评价,测量结果如表3所示。 D_0 和 H_0 表示铆接前铆钉的原始直径和外伸量; D 和 H 分别表示铆接后铆钉鼓形铆头的直径和高度。直径和高度为3个不同方向通过游标卡尺测量取平均值,精度为0.01 mm。

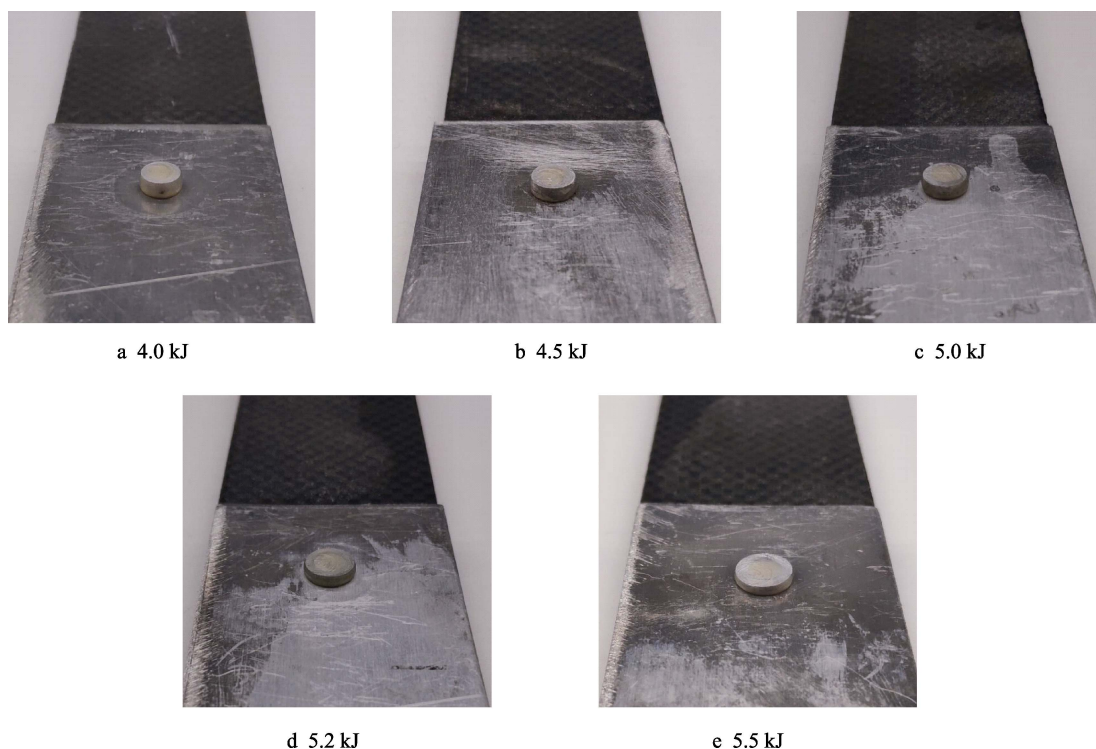


图3 不同放电能量下电磁铆接接头

Fig.3 Electromagnetic riveted joint with different discharge energies

表3 放电能量和铆头尺寸之间的关系

Tab.3 Relationship between discharge energy and joint size

铆头 尺寸	放电能量/kJ								
	4.0	4.3	4.5	4.6	4.7	5.0	5.2	5.3	5.5
D/D_0	1.25	1.30	1.35	1.40	1.43	1.50	1.55	1.60	1.68
H/H_0	0.36	0.32	0.29	0.27	0.26	0.25	0.22	0.20	0.17

从电磁铆接的原理可知,放电能量越大则铆接力越大,因此,铆钉铆头的直径会随着放电能量的增加

而增加,高度会随着放电能量的增加而减小。具体地,从表3可以看到当放电能量从4.0 kJ变化至5.5 kJ时, D/D_0 从1.25增长到1.68,而 H/H_0 从0.36减小至0.17。根据QJ 782A—2005,对于直径5.0 mm 铆钉,铆接后铆钉铆头直径范围应该为7.0~8.0 mm,高度范围应该为2.0~2.8 mm,即 D/D_0 和 H/H_0 的范围分别为1.4~1.6和0.20~0.28,因此,放电能量在4.6~5.3 kJ内的铆头尺寸满足标准要求,其质量是合格的。

为进一步探讨铆头尺寸对碳纤维-铝合金电磁铆接头力学性能的影响,文中对铆头尺寸在合格范围内的试件(D/D_0 值分别为 1.4, 1.5, 1.6)进行了微观观察和力学性能测试,其对应的放电能量分别是 4.6, 5.0, 5.3 kJ。

2.2 金相分析

材料的微观组织在一定程度上会反映其宏观性能。电磁铆接属于高应变下的铆接工艺,铆接过程中铆钉会发生较大的塑性变形,铆钉变形机制与传统铆接方式也具有较大差异,因此,了解高速冲击下铆钉的微观组织演变规律极具意义。本节对以上 3 种不同放电能量下的铆头截面进行了微观观察。具体地,先将电磁铆接后的试件沿轴向切开;然后对试件的表面进行打磨抛光处理;随后采用 Keller 溶液(2.5%的 HNO_3 , 1.5%的 HCl , 1%的 HF , 95%的 H_2O , 体积分数)对观测表面进行腐蚀;腐蚀后采用质量分数为

20%的硝酸溶液去除试件表面的腐蚀产物;最后采用奥林巴斯激光共聚焦显微镜(OLS5000)对铆头内部的金相组织进行观察表征。

3 种不同接头的铆头截面微观观察结果如图 4 所示,可以看到 3 种不同接头均存在绝热剪切带。绝热剪切带是材料在高速冲击载荷下产生的,通常发生在大塑性变形区域中,如果材料的塑性变形过于剧烈,绝热剪切带位置常有裂纹伴生^[30]。还可以看到,随着 D/D_0 的增大,绝热剪切带越来越明显,说明冲击速度随着放电能量的增加而增加,导致铆头内部发生的绝热剪切变形更为严重,同时提高了裂纹伴生的概率。此外,与之前文献报道相比^[31-32],文中 3 种类型铆头的上剪切带较为明显,而下剪切带几乎消失,说明该铆头上部材料的绝热剪切变形更为严重。这是因为该接头中上铝板较薄,塑性较好,铆接过程中局部发生了一定程度的塑性变形,从而缓解了铆头下部材料的绝热剪切变形。

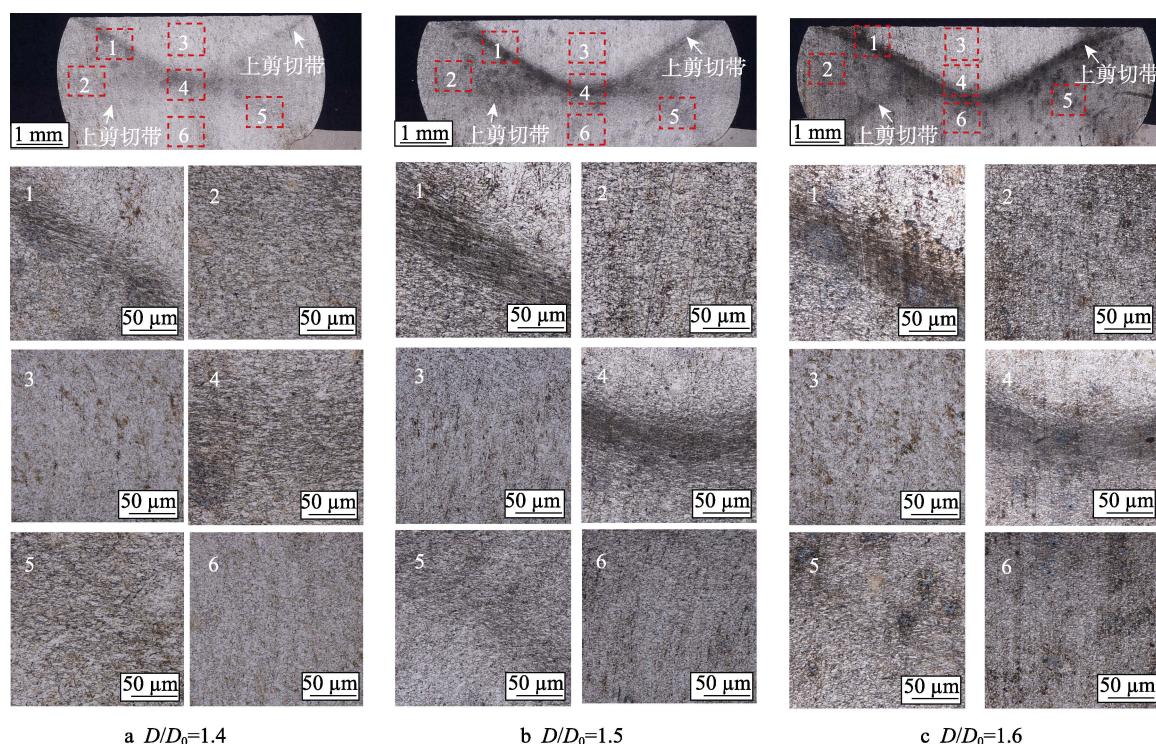


图 4 3 种不同接头的铆头截面微观观察结果

Fig.4 Microscopic of heading section of the joints

无论在何种铆头形式下,绝热剪切带均呈对称分布,并将铆头划分为多个区域。区域 1 为绝热剪切带,从图 4 可以看到,绝热剪切带上的晶粒均发生了拉伸和扭曲变形,又细又长。区域 2 对称分布于两侧,位于上绝热剪切带下部,可被称为自由变形区,该区域晶粒发生了一定程度的变形。在铆接过程中,该区域材料沿径向自由流动,受到两个方向的压缩应力和一个方向的拉伸应力,晶粒沿径向方向明显拉长。区域 3 位于绝热剪切带上部,该区域晶粒基本保持原有形

貌,可被称为小变形区。该区域材料的塑性流动受到钉杆端面与冲头表面之间摩擦作用的限制,导致大多数材料几乎处于静止状态,所以仅仅只有靠近绝热剪切带的部分晶粒发生了扭曲变形。区域 4 位于铆头正中心位置,上下绝热剪切带的交汇处,可被称为中心变形区。该区域材料四周受力,变形最为剧烈。区域 5 为下绝热剪切带,位于铆头下侧,与上剪切带对称分布,该区域晶粒变形不明显,变形程度介于绝热剪切带和自由变形区之间。区域 6 为无变形区,位于下

绝热剪切带下部,该区域晶粒完全未发生变形,与铆钉原始晶粒一致。

$D/D_0=1.5$ (放电能量为 5.0 kJ) 的接头既能一定程度上增加铆头的强度,又能降低铆头内部裂纹的产生概率,是被推荐使用的最佳工艺参数。另外,以上各个变形区域的晶粒变形程度均随着 D/D_0 的增大而增大,并且在变形程度最大的 $D/D_0=1.6$ 的铆头中未发现裂纹的产生,该现象也说明电磁铆接技术适合碳纤维-铝合金结构的连接,只要在满足国标的铆头尺寸范围内,其内部均不会有缺陷产生。

2.3 力学性能分析

不同放电参数对碳纤维-铝合金电磁铆接接头的铆头尺寸以及微观组织变形都有重要影响。本节将进一步分析放电参数对电磁铆接接头力学性能的影响。电磁铆接接头的力学性能测试在 Instron 5985 万能试验机上进行,加载速度统一设置为 2 mm/min。

3 种类型接头的剪切力-位移曲线和失效过程如图 5 所示,可以看到 3 种类型接头的力-位移曲线的变化趋势是一致的,但是其峰值力具有明显的差异。整个剪切过程可以分为 3 个阶段:第 1 个阶段是弹性阶段(位移 0~0.5 mm),3 条曲线重复性较高,载荷以相同的速率快速增长;第 2 个阶段是屈服阶段(位移 0.5~2.5 mm),剪切力增速放缓,3 条曲线均在位移 2.5 mm 左右处达到峰值,从剪切失效过程(见图 5b)可以看到,在这个阶段铆钉在剪切力的作用下开始发生倾斜,铝板发生一定程度弯曲,剪切阻力由板料之间的摩擦力、铆钉和板料孔壁的挤压力提供;第

3 个阶段是失效阶段(位移 2.5~9 mm),剪切力逐渐减小,在这个阶段铝板弯曲程度更大,碳纤维板受到铆钉挤压,发生严重挤压破坏,最终导致铆钉与碳纤维板发生分离,这个阶段的剪切力主要由铆钉和碳纤维板之间的挤压力提供。

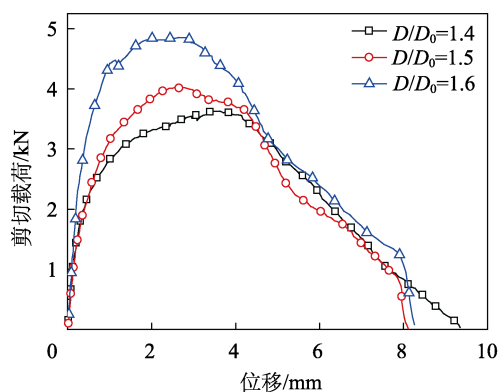
3 组重复试验得到的最大剪切力如表 4 所示,可以看到 $D/D_0=1.4, 1.5$ 和 1.6 试件的平均最大剪切力分别为 3.61, 4.19, 4.92 kN。可以看到铆头尺寸参数越大,接头的最大剪切力越大, $D/D_0=1.5$ 和 1.6 试件的最大剪切力要比 $D/D_0=1.4$ 的试件分别高 16.1% 和 36.3%。这表明在合理范围内增加放电能量有利于提高接头的抗剪强度。一方面是因为铆头直径越大,接头的干涉量也越大,铆钉与孔壁之间的配合更加紧密,而且一定程度增加了铆钉和孔壁的挤压面积,使剪切过程中孔壁上可以受到更多的挤压载荷。另一方面,放电能量增加,铆接力的增加使铆头和半圆头把板料压得更紧密,增大了剪切过程中板料之间的摩擦力,从而能提供更大的剪切阻力。

3 种类型试件的典型剪切失效模式如图 6 所示,

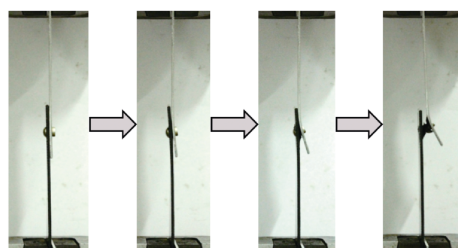
表 4 $D/D_0=1.4, 1.5$ 和 1.6 这 3 种类型接头的最大剪切载荷

Tab.4 Maximum shear load of three types of joints: $D/D_0=1.4, 1.5$ and 1.6

试件	$D/D_0=1.4$	$D/D_0=1.5$	$D/D_0=1.6$
1	3.63	4.02	4.85
2	3.55	4.29	4.93
3	3.65	4.25	4.98
平均值	3.61	4.19	4.92



a 剪切力-位移曲线

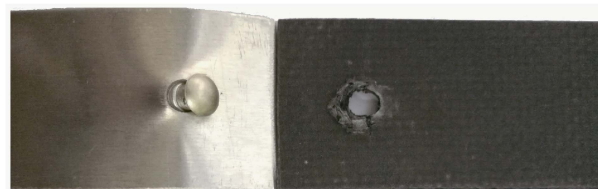


b 剪切失效过程

图 5 剪切测试结果
Fig.5 Shear test results



a $D/D_0=1.4$



b $D/D_0=1.5$



c $D/D_0=1.6$

图 6 $D/D_0=1.4, 1.5, 1.6$ 这 3 种类型接头的典型剪切失效模式

Fig.6 Typical shear failure modes of the joints with $D/D_0=1.4, 1.5$ and 1.6

可以看到3种不同类型碳纤维-铝合金电磁铆接接头的失效模式相似,均是铝板发生弯曲,碳纤维板孔附近发生严重挤压破坏,铆钉从碳纤维板脱离位于铝板铆接孔中。碳纤维板通常存在挤压、剪切、截面、撕裂、劈开和混合等失效模式,文中3种接头的碳纤维板均发生挤压失效,该失效模式是一种渐进式的压溃,不是突发式的,相比其他失效模式更为安全。还可以看到不同接头类型的碳纤维损伤程度具有一定差异, $D/D_0=1.6$ 类型试件的碳纤维板比 $D/D_0=1.4$ 和 1.5 类型试件破坏更加严重,说明在剪切过程中承受了更大的阻力,这也是该类型试件具有最高剪切力的原因之一。另外,从前文可知, $D/D_0=1.6$ 试件在碳纤维板中的干涉量要远高于其他两种接头,根据之前文献报道,当接头的干涉量超过2%,碳纤维材料更容易被损伤^[33]。

3 结论

针对碳纤维-铝合金异种材料连接结构,进行了一系列电磁铆接工艺试验,不仅得到了符合国家铆接通用标准的工艺参数范围,还通过金相观察和力学性能测试研究了工艺参数对铆头塑性变形和剪切性能的影响,得到主要结论如下。

1)电磁铆接放电能量直接影响铆钉铆头的尺寸,放电能量越大,铆头高度越小,直径越大。具体地,放电能量从4.0 kJ到5.5 kJ, H/H_0 从0.36减小至0.17,而 D/D_0 值从1.25增加到1.68。

2)金相观察结果表明, $D/D_0=1.4$, 1.5 和 1.6 这3种类型铆头均有绝热剪切带的产生,其中下剪切带几乎消失,上剪切带较为明显,并且随着 D/D_0 的增大,绝热剪切带越来越明显。3种铆头形式下的绝热剪切带均呈对称分布,并将铆头划分为多个区域,各个区域内部晶粒的变形程度均随着 D/D_0 的增大而增大,并且在变形程度最大的 $D/D_0=1.6$ 的铆头中未发现裂纹的产生。

3)碳纤维-铝合金电磁铆接接头的剪切性能随铆头直径(D/D_0)的增加而增加, $D/D_0=1.6$ 接头的最大剪切力最大。这是因为 $D/D_0=1.6$ 的接头具有较高的干涉量,铆钉与孔壁之间的配合更加紧密,一定程度增加了铆钉和孔壁的挤压面积,使剪切过程中孔壁可以受到更多的挤压载荷。另一方面,放电能量(D/D_0)增加,铆接力增加使铆头和半圆头把板料压得更紧密,增大了剪切过程中板料之间的摩擦力。

4)综合以上研究结果可知,不同性能指标下,接头的最佳工艺参数有所不同,需根据应用场合需求应选取相应的最佳工艺参数。具体地,考虑接头的微观组织等性能指标,放电能量为5.0 kJ($D/D_0=1.5$)为最佳工艺参数;考虑接头的剪切性能等因素,放电

能量为5.3 kJ($D/D_0=1.6$)为最佳工艺参数。

参考文献:

- [1] 孙建亮,王立新,康医飞,等.汽车轻量化材料及连接技术现状分析[J].汽车实用技术,2018(24):261—263.
SUN Jian-liang, WANG Li-xin, KANG Yi-fei, et al. Analysis on the Current Situation of Lightweight Materials and Connection Technology for Automobiles[J]. Practical Technology for Automobiles, 2018(24): 261—263.
- [2] 冯美斌.汽车轻量化技术中新材料的发展及应用[J].汽车工程,2006(3):213—220.
FENG Mei-bin. Development and Application of New Materials in Automotive Lightweight Technology[J]. Automotive Engineering, 2006(3): 213—220.
- [3] 李永兵,马运五,楼铭,等.轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J].机械工程学报,2016,52(24):1—23.
LI Yong-bing, MA Yun-wu, LOU Ming, et al. Progress of Lightweight Multi-Material Automobile Body Connection Technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1—23.
- [4] 冯美斌.汽车轻量化技术中新材料的发展及应用[J].汽车工程,2006(3):213—220.
FENG Mei-bin. Development and Application of New Materials in Automotive Lightweight Technology[J]. Automotive Engineering, 2006(3): 213—220.
- [5] 谢超杰,杨尚磊,刘浩博,等.碳纤维增强铝基复合材料的制备与连接技术[J].焊接技术,2017,46(5):1—7.
XIE Chao-jie, YANG Shang-lei, LIU Hao-bo, et al. Preparation and Connection Technology of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Welding Technology, 2017, 46(5): 1—7.
- [6] PRAMANIK A, BASAK A K, DONG Y, et al. Joining of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Composites and Aluminium Alloys-A Review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 101: 1—29.
- [7] 殷俊清,王仲奇,康永刚,等.自动钻铆环境下铆接工艺研究[J].航空制造技术,2014(Z1):79—83.
YIN Jun-qing, WANG Zhong-qi, KANG Yong-gang, et al. Research on Riveting Technology under Automatic Drilling and Riveting Environment[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014(Z1): 79—83.
- [8] 张洪双.铆接工艺参数分析[J].机械设计与制造,2011(6):241—243.
ZHANG Hong-shuang. Analysis of Riveting Process Parameters[J]. Machinery Design and Manufacturing, 2011(6): 241—243.
- [9] 邓将华,李春峰,于海平,等.电磁铆接技术[J].锻压技术,2010,35(3):1—6.
DENG Jiang-hua, LI Chun-feng, YU Hai-ping, et al. Electromagnetic Riveting Technology[J]. Forging Technology, 2010, 35(3): 1—6.

- [10] 江洪伟, 李春峰, 赵志衡, 等. 电磁成形技术的最新进展[J]. 材料科学与工艺, 2004(3): 327—331.
JIANG Hong-wei, LI Chun-feng, ZHAO Zhi-heng, et al. Recent Progress in Electromagnetic Forming Technology[J]. Materials Science and Technology, 2004(3): 327—331.
- [11] 欧阳伟, 黄尚宇. 电磁成形技术的研究与应用[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(3): 35—40.
OUYANG Wei, HUANG Shang-yu. Research and Application of Electromagnetic Forming Technology[J]. Journal of Plastic Engineering, 2005, 12(3): 35—40.
- [12] SCHMITT H, SKKHON J. High Impact Portable Riveting Apparatus: US, 3559269[P]. 1968.
- [13] 邓将华. 电磁铆接数值模拟与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 7—8.
DENG Jiang-hua. Numerical Simulation and Experimental Research on Electromagnetic Riveting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 7—8.
- [14] HARTMANN J, MACIAS E. ASAT4 Enhanced Flexibility for the C-17[C]// SAE Technical Paper Series, 1998.
- [15] HIRATSUKA N, OSAWA T, ASSADI M, et al. One Piece Barrel Fastening[J]. SAE Technical Paper Series, 2007(1): 3913.
- [16] 曹增强. 电磁铆接理论及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1999: 55—65.
CAO Zeng-qiang. Theory and Application of Electromagnetic Riveting[D]. Xi'an: Northwest Polytechnic University, 1999: 55—65.
- [17] 孙立强. 新型手持式电磁铆枪的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 36—58.
SUN Li-qiang. Development of a New Handheld Electromagnetic Riveter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 36—58.
- [18] ZIEVE P, RUDBERG T, VOGELI P. A Two Tower Riveting Machine with a True Z Axis[J]. SAE Technical Paper Series, 2004: 2807.
- [19] HARTMANN J, MEEKER C, MINSHULL A. Automated Wing Panel Assembly for the A340-600[J]. SAE Technical Paper Series, 2000: 3015.
- [20] ZIEVE P, HARTMANN J. High Force Density Eddy Current Driven Actuator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24: 3144—3146.
- [21] 章茂云, 于海平, 孙立强, 等. $\Phi 8$ mm 2A10 铝合金铆钉电磁铆接工艺试验研究[J]. 航天制造技术, 2012(3): 7—10.
ZHANG Mao-yun, YU Hai-ping, SUN Li-qiang, et al. $\Phi 8$ mm 2A10 Aluminum Rivet Electromagnetic Riveting Process Test Research[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(3): 7—10.
- [22] 陈乾. 电磁铆接工艺铆钉动态塑性变形及接头性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 31—39.
CHEN Qian. Research on Dynamic Plastic Deformation and Joint Performance of Electromagnetic Rivet Technology[D]. Changsha: Hunan University, 2017: 31—39.
- [23] JIANG H, SUN L, LIANG J S, et al. Shear Failure Behavior of CFRP/Al and Steel/Al Electromagnetic Self-Piercing Riveted Joints Subject to High Speed Loading[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111500.
- [24] CUI J, GAO S, JIANG H, et al. Adhesive Bond-Electromagnetic Rivet Hybrid Joining Technique for CFRP/Al Structure: Process, Design and Property[J]. Composite Structures, 2020, 244: 112316.
- [25] JIANG H, CONG Y, ZHANG J, et al. Fatigue Response of Electromagnetic Riveted Joints with Different Rivet Dies Subjected to Pull-Out Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105238.
- [26] ZHANG X, YU H, SU H, et al. Experimental Evaluation on Mechanical Properties of a Riveted Structure with Electromagnetic Riveting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83: 2071—2082.
- [27] JIANG H, ZENG C, LI G, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113162.
- [28] 朱树峰. 管件电磁成形线圈结构参数的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018: 8—17.
ZHU Shu-feng. Research on Structural Parameters of Pipe Fitting Electromagnetic Forming Coil[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018: 8—17.
- [29] 程然. 板料电磁温热成形均匀压力线圈结构及参数优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 10—21.
CHENG Ran. Research on Uniform Pressure Coil Structure and Parameter Optimization of Sheet Metal Electromagnetic Thermoforming[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 10—21.
- [30] 杨扬, 程信林. 绝热剪切的研究现状及发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2002(3): 401—408.
YANG Yang, CHENG Xin-lin. Research Status and Development Trend of Adiabatic Shear[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002(3): 401—408.
- [31] 张旭. 电磁铆接过程铆钉动态塑性变形行为及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 61—85.
ZHANG Xu. Research on Dynamic Plastic Deformation Behavior and Microstructure Performance of Rivet in Electromagnetic Riveting Process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 61—85.
- [32] 于海平, 邓将华, 李春峰, 等. 电磁铆接加载速率对 TA1 铆钉变形影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(3): 378—383.
YU Hai-ping, DENG Jiang-hua, LI Chun-feng, et al. Research on the Influence of Electromagnetic Riveting Loading Rate on TA1 Rivet Deformation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(3): 378—383.
- [33] CAO Z, CARDEW M. Interference-Fit Riveting Technique in Fiber Composite Laminates[J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10: 327—330.