

铆速对 SPR 自冲铆异种材料接头成形性能的影响

吴小丹¹, 王敏¹, 孔谅¹, 王大明², 谭天雨²

(1. 上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240; 2. 上海拖拉机内燃机有限公司, 上海 200433)

摘要: 针对低碳钢 340 和铝合金 6000 的异种金属 SPR 自冲铆接, 采用 150、200、250、300、350mm/s 五种不同的铆接速度。观察各铆速下接头的截面成形形貌, 并测得铆速增大时, 接头底切量增大, 底部厚度和剩余厚度均减小。通过测试接头的拉剪强度、剥离强度, 发现两者均随铆速的增大而增大, 且剥离强度增幅较小。接头失效形式主要为自锁失效和板材失效两种。铆速对接头成形性能的影响机理, 主要由冲压载荷峰值变化和应变速率变化两方面组成。载荷峰值越大, 接头成形性越好; 应变速率越大, 板材加工硬化程度越高且断裂应力越大。

关键词: 异种金属, 自冲铆接, 铆速

0 前言

近年来随着汽车轻量化的推进, 铝合金凭借其低密度、高强度、耐蚀性等性能, 得到了汽车制造商的青睐, 并在车身设计制造中得到了广泛的应用。

铝合金能否快速应用于汽车行业很大程度上取决于铝连接工艺的发展, 特别是关于铝钢异种材料的连接工艺。SPR 自冲铆接工艺克服了传统铆接工艺外观差、效率低、工艺复杂等缺点, 实现冲、铆一次完成, 连接过程不破坏板材的镀层, 为汽车车身的连接开辟了新途径^[1]。目前, SPR 技术已成为欧美高端车型制造中的关键连接技术之一, 并且成熟应用在宝马、奥迪、沃尔沃和美洲虎等汽车的铝钢混合车身连接中, 其中美洲虎铝制车身连接中 SPR 铆钉的使用已达 3000 多个。

SPR 自冲铆接过程工艺参数众多, 包括铆钉的材料、尺寸及涂层, 模具的尺寸, 板料的厚度及放置顺序, 以及冲压设备等^[2]。当待铆板材确定, 铆钉与冲压设备选定后, 铆速是影响接头性能最直接的参数, 也是最容易控制的参数。选取合理的铆速会使接头成形质量良好并获得较高的连接强度。为了明确铆速对接头强度的影响机理, 便于 SPR 工艺得到更为成熟地应用, 本文针对铆接速度对接头成形质量的影响展开研究。

1 试验方法

试验采用 0.65mm 的冷轧钢板 340LA 与 2mm 的

6 系铝合金板材进行铆接, 待铆接板材具体的力学性能见表 1。

表 1 板材力学性能

Table 1 Mechanical properties of sheets

板材	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	延伸率%
AL-S-6000	190	90~140	20
340LA	590	340	16

待铆板材确定后, 铆钉的选择参考文献^[3]如下。铆钉腿部直径如式 1 所示, 铆钉长度如式 2 所示。

$$d_2 \geq 2t_{min} + 1; \quad (1)$$

$$L = t_1 + t_2 + C; \quad (2)$$

$$C = 0.617d_2 - 0.1246$$

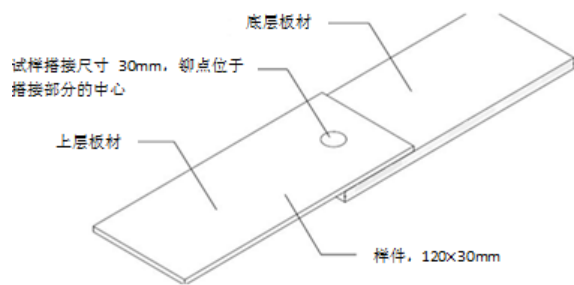
t_1 为钢板厚度, t_2 为铝板厚度。

结合标准铆钉的尺寸要求, 对于 2/0.65mm 板材厚度选择铆钉腿部直径 $d_2 = \varnothing 5.3\text{mm}$, 铆钉长度 $L = 5\text{mm}$ 。铆钉与凹模配套使用, 铆钉尺寸一经确定, 凹模也就确定。

试验选用 Henrob 公司的电动伺服型铆接系统, 棘轮供钉, 铆速选用 150、200、250、300、350mm/s 五个不同值。

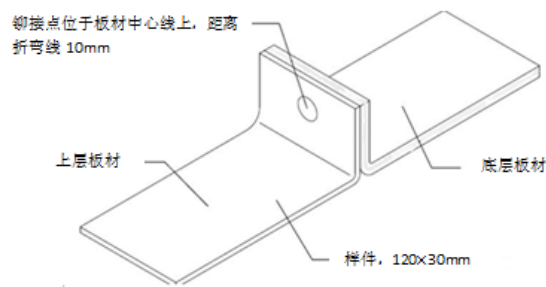
如图 1 所示, 制备板材试样, 按照不同的铆速进行铆接, 记录铆接过程中冲击力峰值, 测试接头剪切和剥离强度。

铆接后切取接头金相试样, 观察截面宏观形貌, 并测量底部厚度、剩余厚度、底切量, 如图 2 所示



(a) 剪切强度试验

(a) Experiment of Lap Shear Strength



(b) 剥离强度试验

(b) Experiment of Peel Strength

图1 试验试样

Figure 1 Experimental Samples

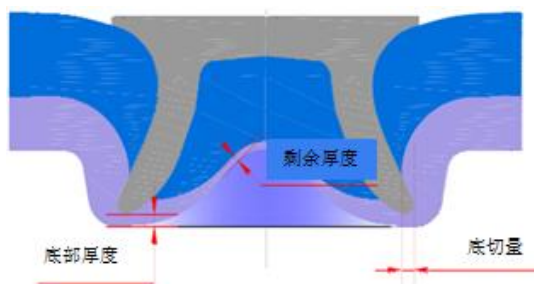


图2 铆接接头主要评价参数

Figure 2 Main Evaluation Parameters of Riveted Joint

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观形貌

图3为不同铆速下铆接头截面的宏观形貌，(a)~(e)铆速按照150、200、250、300、350mm/s依次增大。

如图2a所示，铆钉腿部张开角度过小，且铆钉头下压位置太高，导致铆钉头与上板材之间有很大的间隙，两层板之间也可见明显的间隙。显然这样的铆接头密封性能差，且铆钉腿部扩口小难以保证连接强度，属于不合格的铆接接头。如图2b中，铆钉头下压位置有所降低，铆钉内壁与上板材间的间隙变小，但铆钉腿部扩张仍不充分。如图2c中，铆钉腿部扩张角度变大，铆钉头下压位置进一步降低，但铆钉头与上板材之间仍有明显间隙。如图2d中，铆钉腿部扩展充分，铆钉头部与上板材、上板材与下板材之间无明显间隙，接头宏观形貌理想。图2e中，铆钉腿部虽进一步扩展，但铆钉下

下压位置过低，导致下板材有被铆穿的危险。综合看来，图2d是最理想的接头截面形貌。

不同铆速下，接头截面底切量、底部厚度、剩余厚度值如表2所示，冲压载荷峰值如表3所示。

表2 铆接接头截面数据 (mm)
Table 2 Data of Joints in Radial Direction

铆速 mm/s	底切量	底部厚度	剩余厚度
150	0.33	0.45	0.83
200	0.43	0.39	0.75
250	0.58	0.31	0.72
300	0.67	0.21	0.51
350	0.72	0.11	0.44

由表2可看出，随着铆速的增大，接头底切量逐渐增大。底切量越大，意味着铆钉腿部嵌入下层板越深，铆钉与下层板所形成的互锁程度就越高，接头的连接强度也就越高，如果数值过小则铆钉容易脱落。底部厚度随着铆速的增大而不断减小，底部厚度过小会导致铆钉腿部直接刺穿下层板材，从而使铆接失效。剩余厚度随着铆速的增大而不断减小，剩余厚度越小表示下层板料在模具内变形及流程度

表3 不同铆速下的铆接冲压载荷峰值
Table 3 Punch peak force of different riveting speed

铆速 mm/s	150	200	250	300	350
铆接力 KN	26.7	39.8	50.6	63.2	79.8

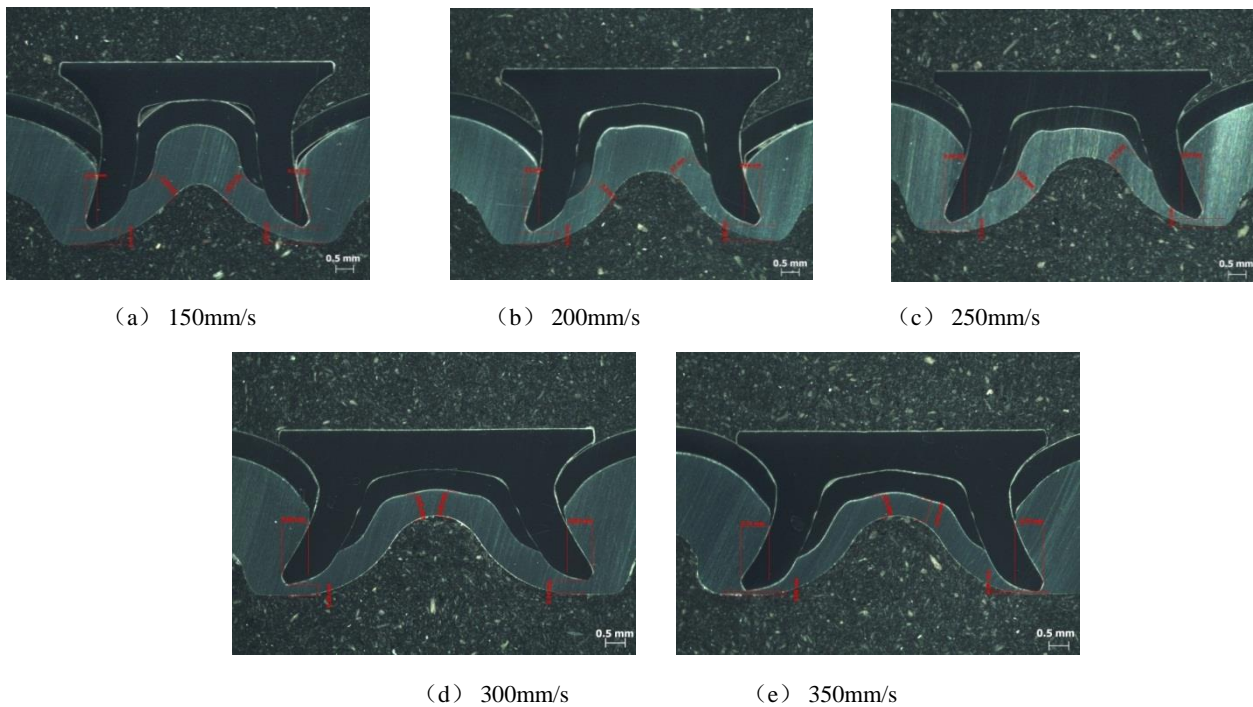


图 3 不同铆速下的铆接头截面宏观形貌
Figure 3 Cross-section macro morphology of SPR joint under different riveting speed

度越大。

铆速对接头成形性能的影响很大程度上是由于铆接冲压载荷峰值的变化。由表 3 可看出，铆速与冲压载荷峰值成正比例关系。图 4 展示了铆接过程中铆接速度、冲头位移、冲压载荷峰值随时间的变化关系。铆接过程可简单分为两个阶段：第一个阶段是铆钉刺穿上层板，第二个阶段是铆钉腿部扩展进入下层板中。由图 4 也可看出，当铆钉开始接触上层板时，冲压载荷开始出现并不断增加，在铆接即将结束的时候，铆接速度减小到最小值，冲压载

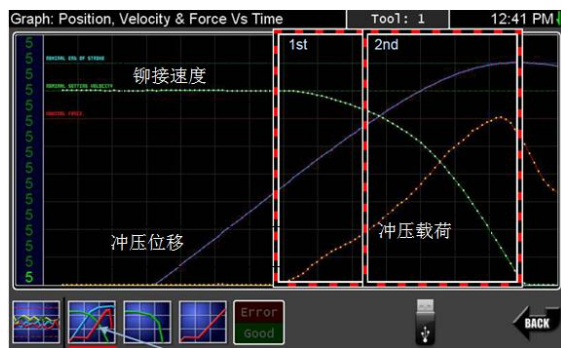


图 4 冲压位移，铆接速度和冲压载荷随时间变化图
Figure 4 Displacement, Velocity and Force Vs Time

荷达到峰值。这个阶段是铆钉腿部扩展变形的重要时刻，载荷越大铆钉腿部扩展变形受到的作用力就

越大，并且下层板材在模具内的流动也越充分，有利于铆钉腿部充分扩展嵌入到下层板中。

此外，铆速的影响还体现在应变速率对板材加工硬化程度和断裂应力的影响上。文献^[4]指出，应变速率增大时，板材加工硬化率提高，断裂应力有减小的趋势；应变速率过大时，板材加工硬化率大大提高，会过早产生断裂，导致铆钉铆穿下板材或者铆钉腿部变形不充分，使接头底切量反而减小。

2.2 力学性能分析

图 5 比较了不同的铆接速度对接头拉剪和剥离强度的影响。由图可知，当铆接速度变化时，拉剪强度从低铆速时的 2.3 kN 增大到高铆速时的 3.4 kN，而剥离强度变化不大，从 1.1 kN 增大到 1.4 kN。

比较表 2 中的底切量值和图 5 中的拉剪、剥离强度值可看出，底切量与强度值随铆速的增大均一致增大，这说明底切量的大小决定了接头的连接强度。因此，可以用底切量的大小来评价接头的质量。

拉剪、剥离试验过程中，接头应力分布如图 6 所示。图 6a 展示了拉剪接头铆钉压应力分布情况，图 6b 展示了剥离接头板材所受应力分布情况^[5]。拉剪接头应力分布与铆接冲压方向垂直，而剥离接头应力分布与铆接冲压方向平行。文献^[6]指出，铆

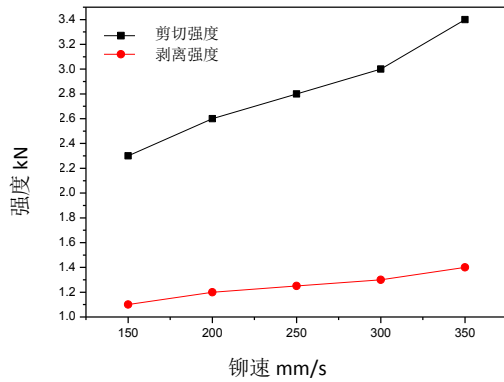
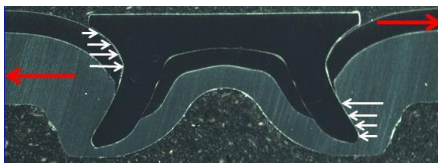


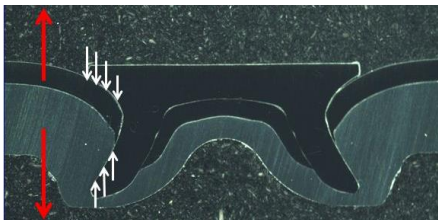
图5 不同铆速下接头强度比较

Figure 5 Comparison of Strength with different Velocity

接过程中，板材微观组织的变化是由切应力作用所引起，使得组织沿切应力方向即垂直铆冲压方向发生了细化，因此呈现出接头整体的抗剪切强度明显优于抗剥离强度。



(a) 拉剪接头铆钉压应力分布图



(b) 剥离接头板材应力分布图

图6 接头应力分布图

Figure 6 Stress distribution illustration(not in scale)

拉剪、剥离试验过程中，接头失效形式如图7所示。失效形式主要分为两种，接头自锁失效和板材失效。自锁失效如图7a所示，即铆钉腿部从下层板中脱离出来。板材失效主要指上层板材失效，即加载过程中，上板材由于强度不足沿铆钉头部发生撕裂现象，最终导致接头失效，如图7b~7d所示。铆速为150mm/s和200mm/s的拉剪接头，失效形式主要为自锁失效，250mm/s~350mm/s的拉剪接头失效形式全为板材失效。对于剥离接头，所有铆速下均为板材失效。

3 结论

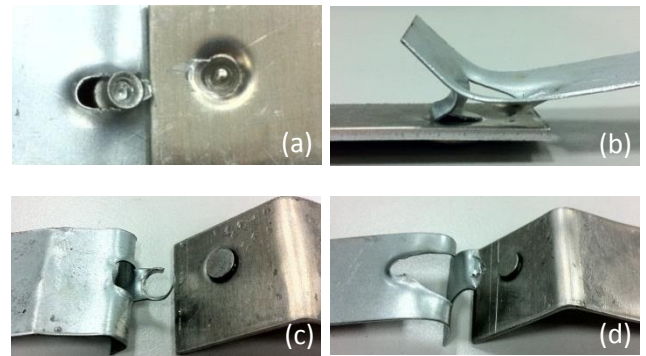


图7 接头失效形式

Figure 7 Failure mode occurred on shear and peel joint

(1) 一定范围内，铆速增大时，接头底切量增大，剩余厚度和底部厚度均减小。铆速增大时，接头拉剪强度明显增大，而剥离强度增大幅度较小。

(2) 铆速对接头成形性能的影响机理由两方面组成，一是由于冲压载荷峰值的变化影响了接头的成形性，二是由于应变速率的不同对板材加工硬化程度和断裂应力的影响不同。

(3) 拉剪过程中，低铆速下的接头倾向于自锁失效，而高铆速下的接头发生板材失效。剥离过程中，无论铆速大小，接头均发生板材失效。

参考文献:

- [1] 刘瑞军. 自冲铆接技术在汽车车身轻量化中的应用[J]. 汽车与配件, 2007, 21.
- [2] 岁波. 轻型车身自冲铆连接技术的发展[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 85—88.
- [3] 李双义, 张连洪, 万淑敏, 等. 自冲铆接工艺参数的制订及铆接表观质量的评定[J]. 第十届全国塑性工程学术年会, 第三届国际塑性加工先进技术研讨会论文集, 2007.
- [4] Xu L J, Cui A, Yang Q. Influence of Punch Velocity and Strength Matching on the Quality of SPR with Half-Hollow Rivet Based Numerical Simulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 319: 468-473.
- [5] Han L, Chrysanthou A, Young K W. Mechanical behaviour of self-piercing riveted multi-layer joints under different specimen configurations[J]. Materials & design, 2007, 28(7): 2024-2033.
- [6] 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.