DOI: 10.3901/JME.2020.06.159

铆钉结构对铝合金板搅拌摩擦单面 铆接穿透力的影响研究*

闵峻英 张 凯 王 爽 林建平
(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

摘要: 利用三种基于不同铆钉穿透机理的搅拌摩擦单面铆接工艺(Friction stir blind riveting, FSBR)对 AA6061-T6(厚度为 1 mm)与 AA6022-T4(厚度为 2 mm)铝合金板进行了铆接。发现完全依靠挤压机理实现铆钉穿透的工艺(FSBR-III), 其最大铆钉穿透力比另外两种同时依靠挤压与切削机理实现铆钉穿透的工艺(即 FSBR-I 和 FSBR-II)分别高 33%与 83%。通过分析铆钉穿透单一工件的过程, 建立了工件材料去除率与铆钉穿透力的关系曲线, 并综合考虑铆钉穿透机理以及摩擦热的影响, 分析了穿透过程中不同结构铆钉的穿透力变化规律。研究发现, 挤压机理在铆钉穿透机理中所占比重越高, 则相同材料去除率下铆钉穿透力越大, 同时穿透力受摩擦热的影响越明显。此外, 通过接头断面观察, 发现铆钉切削性能更优异的 FSBR-II, 所得接头中的上下工件间隙最小; FSBR-I 与 FSBR-II 工艺会产生切屑, 而在 FSBR-III 连接过程中没有切屑产生。

关键词: 铝合金; 搅拌摩擦; 穿透力; 铆钉结构

中图分类号: TG156

Effects of Rivet Structure on Penetration Force in Friction Stir Blind Riveting of Aluminum Alloy Sheets

MIN Junying ZHANG Kai WANG Shuang LIN Jianping
(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: AA6061-T6(1 mm) and AA6022-T4(2 mm) aluminum alloy sheets are fabricated by three friction stir blind riveting (FSBR) processes with different rivet penetration mechanisms. It is found that the rivet penetration force of FSBR-III with the penetration mechanism of extrusion, is 33% and 83% respectively higher than the other two FSBR processes (i.e. FSBR-I and FSBR-II), where the penetration mechanism is a combination of extrusion and cutting. For the penetration process of upper plate, the relationship between material removal rate and the penetration force is discussed in terms of the penetration mechanism and the influence of frictional heat. It is found that the penetration force at the same material removal rate is larger when the proportion of extrusion is dominated in the rivet penetration mechanism, and the penetration force is more sensitive to the frictional heat. In addition, by observing the cross-sections of joints, it is found that the FSBR-II joint possesses the smallest gap between upper and lower workpieces due to superior cutting performance of the rivet, and FSBR-I and FSBR-II produced chips during the penetration process, while no chips were generated in the penetration process of FSBR-III.

Key words: aluminum alloy; friction stir; penetration force; rivet structure

0 前言

轻量化对汽车等交通工具的节能减排、续航能力以及机动性能的提升具有重要意义^[1]。目前, 实现轻量化的途径主要有轻量化设计、轻量化材料以

及轻量化制造工艺。近年来, 随着轻量化的不断发展, 铝合金、镁合金及复合材料等具有较高比强度和比刚度材料的应用越来越广泛, 零部件结构也向越来越复杂的封闭/半封闭结构件发展。如何实现异种材料以及封闭/半封闭结构件的高性能连接成为实现轻量化亟待解决的问题。

在汽车制造领域, 为了实现异质轻量化材料以及封闭/半封闭结构件的连接, 焊接、胶接以及机械连接技术都在不断发展。尤其是机械连接技术, 近

* 国家自然科学基金(51805375)和上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放基金(MSV201814)资助项目。20190827 收到初稿, 20191117 收到修改稿

年来出现了无铆钉铆接^[2](Clinching)、自冲铆接^[3](Self piecing riveting, SPR)等已在车身制造中广泛应用的技术;另外,受搅拌摩擦焊接技术的启发,还出现了一批基于搅拌摩擦动作的机械连接技术^[4]:如热熔自攻丝螺接^[5](Flow drilling screw, FDS)、自冲摩擦铆焊^[6](Friction self-piecing riveting, F-SPR)、旋转摩擦压铆^[7](Rotation friction pressing riveting, RFPR)、搅拌摩擦单面铆接^[8](Friction stir blind riveting, FSBR)等,其中热熔自攻丝螺接技术也已在

车身制造中实现应用。

FSBR 工艺是近年来出现的一种针对异种材料以及封闭/半封闭结构件高性能连接的单面铆接技术,其具有自穿孔、无需铆模的特点。目前,国内外相关研究已证明 FSBR 工艺能够实现同种/异种金属材料(如铝合金板^[8-10]、镁合金板^[11-12])、非金属材料(主要为纤维增强复合材料^[13])之间的连接。FSBR 工艺最初由美国通用汽车公司于 2006 年发明^[14],所用铆钉的钉芯末端为实心圆柱结构(表 1)。

表 1 不同 FSBR 工艺过程

工艺分类	文献	铆钉剖面结构	工艺过程
FSBR-I	[14]		(a)
	[15]		(b)
FSBR-II	[18]		(c)
	[19]		(d)
FSBR-III	[20]		(e)
	[21]		(f)
		SBR	
		FDR	

GAO 等^[8]利用该 FSBR 工艺连接了厚度为 3 mm 的 AA5052-H32 铝合金板, 证明了 FSBR 接头在静态拉伸剪切强度以及疲劳强度等方面均优于普通电阻点焊接头。LATHABAI 等^[15]提出了利用钉芯末端中空的抽芯铆钉(表 1)实现 FSBR 连接, 并针对铝合金板的连接与文献[8]中的铆钉进行了对比^[16], 结果表明芯轴末端中空的铆钉在连接过程中产生的穿透力更低, 同时获得的接头强度更高。由于 FSBR 工艺单面连接的特点, 较低的穿透力能够避免工件在铆钉穿透过程中发生较大变形而保证连接质量, 因此目前 FSBR 工艺研究中所用的大都为钉芯末端中空的铆钉, 且如何有效降低铆钉穿透力也成为了 FSBR 工艺研究的重点。针对铆钉穿透力的降低, 研究已发现可以通过提高铆钉转速或降低进给速度来实现^[17]; 另外, 研究发现通过合理改变钉芯末端结构也可以降低铆钉穿透力, 如 MIN 等^[18]通过将芯轴末端进行切槽以及内表面倒角等结构改进(表 1), 使铆钉的切削性能得到提升, 从而显著降低了铆钉穿透力。MIN 等^[19]通过将铆钉芯轴末端结构改变成为倒置的“V”字形结构(表 1), 同样实现了降低铆钉穿透力的目的。可见, 通过改变钉芯末端结构来提升铆钉的切削性能能够有效降低铆钉穿透力, 但切削过程更容易导致切屑的产生, 从而无法满足不允许产生切屑的连接需求(如封闭结构件连接)。对此, 有学者利用不同结构的铆钉提出了新的搅拌摩擦单面铆接工艺, 如 PODLESÁK 等^[20]利用钉芯末端结构呈“子弹头”形状的铆钉提出了旋转单面铆接工艺(Spin blind riveting, SBR)(表 1), 并针对铝合金、镁合金及复合材料的 SBR 连接进行了研究; WANG 等^[21]利用一种芯轴末端结构呈圆锥形的铆钉提出了热熔自攻单面铆接工艺(Flow drill riveting, FDR)(表 1), 并研究了不同厚度的铝合金与 CFRP 的 FDR 接头拉伸强度及接头失效模式。

根据表 1, 可知各连接工艺都是利用铆钉高速旋转与工件产生摩擦, 然后挤压或切削工件, 最终铆钉穿透工件并通过铆套下端膨胀或起鼓实现锁合, 其基本原理都是由最初的 FSBR 工艺^[14]发展而来。通过分析表 1 中的工艺过程, 可知(a)、(e)及(f)中的 FSBR 工艺完全依靠挤压机理实现铆钉穿透工件, 而(b)、(c)及(d)中的 FSBR 工艺同时依靠挤压与切削机理实现铆钉对工件的穿透。(a)~(e)中的 FSBR 工艺通过铆套下端膨胀实现工件锁合, 而(f)中的 FSBR 工艺通过铆套下端起鼓实现工件锁合。

基于不同的铆钉穿透机理以及发展过程, 表 1 中的 FSBR 工艺可分为三类, 即 FSBR-I、FSBR-II 和 FSBR-III。目前, 不同的铆钉结构对铝合金板 FSBR 连接过程的影响尚不清楚, 因此本文分别利用

FSBR-I(表 1 工艺过程(b))、FSBR-II(表 1 工艺过程(d))以及 FSBR-III(表 1 工艺过程(f))对 AA6061 和 AA6022 铝合金板进行了铆接, 并针对 AA6061 单一工件的穿透过程, 建立工件材料去除率与穿透力的关系, 同时综合考虑铆钉穿透机理以及摩擦热的影响, 从而研究铆钉结构对铆钉穿透铝合金板时穿透力的影响。

1 试验过程

1.1 试验材料

本文所用的铆钉材质为低碳钢, 工件材质为 AA6061-T6(厚度为 1 mm)与 AA6022-T4 铝合金(厚度为 2 mm), 工件材料的力学性能如表 2 所示。

表 2 AA6061-T6 与 AA6022-T4 力学性能参数

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率(%)
AA6061-T6	302	334	18
AA6022-T4	159	262	21.5

1.2 铆钉结构

图 1 为三种铆钉的结构示意图以及钉芯末端结构剖面图, 其中图 1a 为 FSBR-I 工艺所用的拉丝内锁铆钉, 其钉芯末端为中空圆柱形结构。图 1b 为 FSBR-II 工艺所用的铆钉, 其通过对 FSBR-I 工艺的铆钉钉芯末端进行机械加工而获得, 因此钉芯末端同样为中空结构, 形状为类似倒置的“V”字; 由于机械加工使铆钉具备了更明显的切削刃, 提升了铆钉的切削性能。图 1c 为 FSBR-III 工艺所用的钉芯末端为圆锥形实心结构的铆钉。三种铆钉的结构尺寸参数如表 3 所示, 其中外径 R 、内径 r_1 与口径 r_0 分别为铆钉钉芯外表面、内表面以及末端端口与铆钉轴线之间的距离; h_1 与 h_2 分别为钉芯末端内侧面与外侧面的高度; α_1 与 α_2 分别为钉芯末端内侧面、外侧面与铆钉轴线之间的夹角。

(a) FSBR-I 工艺

(b) FSBR-II 工艺

图1 不同FSBR工艺所用铆钉的结构示意图及钉芯末端剖面图

表3 不同FSBR工艺的铆钉结构尺寸参数

工艺类型	外径 R/mm	口径 r_0/mm	内径 r_1/mm	内侧面高度 h_1/mm	外侧面高度 h_2/mm	内侧面倾角 $\alpha_1/(\circ)$	外侧面倾角 $\alpha_2/(\circ)$
FSBR-I	3.0	1.7	2.3	0.9	1.5	33°	25°
FSBR-II	3.0	—	2.3	1.7	—	22°	—
FSBR-III	3.2	—	—	—	5.0	—	33°

1.3 铆接过程

如图2所示,铆接试样为矩形,长度和宽度分别为120 mm和38 mm;接头中试样搭接顺序为AA6061为上工件、AA6022为下工件,试样搭接区域为 $38 \times 38 \text{ mm}^2$ 的正方形;铆钉穿透位置为搭接区域的中心位置。

图2 AA6061/AA6022接头尺寸示意图(mm)

FSBR 铆接过程所采用的工艺参数如下:铆钉转速 ω 为6 000 r/min、铆钉进给速率 f 为1 mm/s。图3为FSBR试验台,其中KUKA工业机器人与电主轴(Jäger S3W2)相连,电主轴末端的弹簧夹头夹紧铆钉;工件通过夹紧工装实现定位夹紧,为使铆钉能够穿透至所需深度,夹紧工装中间为直径10 mm的孔;夹紧工装与测力仪(Kistler 9272)相连,对铆钉穿透力进行测量;铆钉穿透过程的工件温度场利用红外测温仪(Optris PI400)进行测量,其中红外测温仪的发射率通过热电偶进行标定。试验过程中,首先将工件定位夹紧于夹紧工装,然后通过控制电主轴以及工业机器人运动实现铆钉的搅拌摩擦穿透,同时测量获得工件温度场;铆钉穿透至指定深

度后(铆钉头部与上工件表面接触),电主轴以及工业机器人停止运动,并结束温度场测量;松开弹簧夹头以及压板,并使用电动铆枪拉拔铆钉钉芯,完成搅拌摩擦单面铆接。

图3 FSBR试验台及夹紧工装剖面示意图

1.4 接头剖面观察

为研究铆钉结构对铝合金板FSBR接头形貌的影响,在接头中心沿宽度方向截取剖面,对所截取的接头剖面进行镶嵌块制作并依次使用 $37 \mu\text{m}$ (400目)、 $15 \mu\text{m}$ (800目)、 $11 \mu\text{m}$ (1 500目)砂纸进行打磨,然后使用 $6 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 抛光剂依次抛光,并利用基恩士VHX-6000数码显微系统对剖面进行形貌观察与所需尺寸测量。

2 结果与分析

2.1 铆钉穿透力

图4为FSBR-I、FSBR-II和FSBR-III的铆钉穿透力-穿透深度曲线。根据FSBR-I的穿透力曲线,可知在穿透初始阶段,穿透力上升并在穿透深度为1.2 mm时到达第一个峰值(620 N);在穿透深度为1.2~2.2 mm时,穿透力先下降后上升并在穿透深度为2.2 mm时到达第二个峰值(480 N);随后,穿透力下降直至穿透深度为5.8 mm时降为零。可见,FSBR-I穿透过程中出现了两次穿透力峰值,且第一次峰值比第二次峰值高140 N。在FSBR-II的铆钉穿透过程中,穿透力在穿透深度为1.2 mm时到达第

一次峰值(450 N); 在穿透深度为 1.2~2.3 mm 时穿透力先下降后上升并在穿透深度为 2.3 mm 时到达第二次峰值(435 N); 随后穿透力不断下降, 直至穿透深度为 4.8 mm 时降为零。可见 FSBR-II 穿透过程中同样出现了两次穿透力峰值, 但第一次峰值大小与第二次峰值接近。根据 FSBR-III 的穿透力曲线, 穿透力在穿透初始阶段不断上升, 并在穿透深度为 3.2 mm 时到达峰值(825 N), 随后过程中穿透力产生一定的波动, 并在穿透深度为 10.6 mm 时降为零。

图 4 三种铆钉穿透过程中的穿透力-穿透深度曲线

图 5 为三种铆钉的最大穿透力以及达到最大穿透力时的穿透深度对比。如图 5a 所示, 可知 FSBR-III 的穿透力最大值分别比 FSBR-I、FSBR-II 大 33%与 83%。由图 5b 可知, FSBR-I 与 FSBR-II 穿透力最大值均出现在穿透深度为 1.2 mm 时, 即铆

图 5 三种 FSBR 工艺的铆钉最大穿透力及穿透力达到最大值时的穿透深度对比

钉末端即将穿透上工件, FSBR-III 穿透力最大值出现在穿透深度为 3.2 mm 时, 此时铆钉末端即将穿透下工件。

2.2 穿透力分析

研究发现, 当铆钉穿透单个铝合金工件时, 工件的下表面材料会在铆钉的穿透作用下沿铆钉穿透方向发生塑性变形^[18], 从而影响穿透力; 对于存在上下工件的情况, 当铆钉穿透上工件的下表面时, 在下工件的支撑作用下, 上工件下表面的工件材料的变形行为更为复杂, 需要进一步利用有限元等方法分析其穿透力的变化。另外, 铆钉的穿透过程是克服变形及摩擦阻力将工件材料从原位置去除的过程, 铆钉的结构不同, 其去除工件材料的机理不同, 导致在相同材料去除率下的铆钉穿透力也不同; 同时, 研究发现当铆钉穿透产生的摩擦热使工件材料的温度上升到一定程度时, 可导致即使材料去除率增大但铆钉穿透力下降^[22], 因此摩擦热对穿透力具有较大影响。因此, 下文针对铆钉穿透单一工件的过程(即铆钉穿透深度不大于 1 mm), 结合铆钉穿透机理以及摩擦热的影响对不同结构铆钉的材料去除率-穿透力曲线进行分析, 从而研究铆钉结构对穿透力的影响。

铆钉穿透力(F)可表示为关于材料去除率(Material removal rate, MRR)的函数^[23], 如式(1)所示

$$F = (k/f) \cdot MRR \quad (1)$$

式中, k 为比例系数, f 为铆钉穿透过程中的进给速率, 本文 f 为 1 mm/s。

首先, 针对三种 FSBR 工艺的铆钉穿透过程的材料去除率进行分析。FSBR-I、FSBR-II 与 FSBR-III 工艺中铆钉的材料去除率 MRR_I 、 MRR_{II} 和 MRR_{III} 可分别通过式(2)、(3)和(4)获得^[22], 其中 z 为铆钉穿透深度。

$$MRR_I = \begin{cases} \pi f [r_1^2 - (r_1 - z \cdot \tan \alpha_1)^2] + \\ \pi f [(r_1 + z \cdot \tan \alpha_2)^2 - r_1^2] & 0 \leq z \leq 0.9 \\ \pi f [(r_1 + z \cdot \tan \alpha_2)^2 - r_1^2] & 0.9 \leq z \leq 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

$$MRR_{II} = \pi f [R^2 - (R - z \cdot \tan \alpha_1)^2] \quad 0 \leq z \leq 1.0 \quad (3)$$

$$MRR_{III} = \pi f (z \cdot \tan \alpha_2)^2 \quad 0 \leq z \leq 1.0 \quad (4)$$

图 6 为三种工艺的材料去除率与铆钉穿透深度的关系曲线。由图可知, 随着穿透深度的增加, 三种 FSBR 工艺的铆钉的工件材料去除率均不断变大, 且两者接近线性关系; 另外, 在相同的穿透深度下, 三种 FSBR 工艺按照材料去除率由大到小依

次为FSBR-I、FSBR-II、FSBR-III。

图6 工件材料去除率-铆钉穿透深度关系曲线

为了结合材料去除率分析铆钉结构对穿透力的影响,根据图4和图6获得三种FSBR工艺的铆钉穿透力与工件材料去除率的关系曲线,如图7所示。可见三种FSBR工艺的铆钉穿透力均随工件材料去除率的增加而不断上升,且材料去除率相同时,不同工艺的铆钉穿透力不同,即 k 值大小不同;此外,还可以发现三种工艺的铆钉穿透过程中的 k 值随工件材料去除率的变化趋势也不同。

图7 铆钉穿透力与工件材料去除率的关系曲线

设FSBR-I、FSBR-II以及FSBR-III的系数 k 分别为 k_I 、 k_{II} 与 k_{III} ,并建立其随材料去除率的变化曲线,如图8所示。可以发现在相同的穿透深度下, k_{III} 远大于 k_I 与 k_{II} 。在材料去除率小于 $1 \text{ mm}^3/\text{s}$ 时, k_I 大于 k_{II} ;而在材料去除率大于 $1 \text{ mm}^3/\text{s}$ 时, k_I 小于 k_{II} 。另外,随着材料去除率增加,三种工艺的铆钉穿透过程中 k 值随材料去除率的变化趋势为: k_I 基本不变、 k_{II} 不断增大、而 k_{III} 迅速减小。

图8 不同FSBR工艺的值与穿透深度的关系

如前面分析,系数 k 可表达为穿透机理(M)和被穿透工件材料温度(T)的函数,即式(5)

$$k = k(M, T) \quad (5)$$

首先结合铆钉结构对FSBR-I、FSBR-II与FSBR-III的铆钉穿透机理进行分析。由于FSBR-I的钉芯末端为空心圆柱形结构,穿透过程中内、外侧面的交线会对工件材料产生切削作用,同时铆钉内、外侧面会对工件材料产生挤压作用,因此其同时依靠切削机理与挤压机理实现铆钉的穿透,铆钉穿透机理可表示为 $M_I = M_I(C, E)$ (其中 C 表示切削机理, E 表示挤压机理)。FSBR-II的钉芯末端同样为空心结构,因此同样为同时依靠切削与挤压机理实现铆钉穿透,即铆钉穿透机理为 $M_{II} = M_{II}(C, E)$;同时由于FSBR-II的铆钉具备更明显的切削刃,因此FSBR-II铆钉穿透机理中切削机理所占的比重较FSBR-I中切削机理所占的比重更大。针对FSBR-III,由于铆钉末端为实心结构,因此其完全依靠挤压机理实现铆钉穿透,铆钉穿透机理为 $M_{III} = M_{III}(E)$ 。图9为铆钉穿透过程中的工件温度场及铆钉穿透位置附近工件材料的温度测量,如图9a所示,利用红外测温仪对铆钉穿透过程中的工件温度场进行测量,从而获得工件在测量点处的温度-穿透深度曲线,如图9b所示。可见随着铆钉不断穿透,工件材料的温度不断上升;另外,不同结构铆钉在相同穿透深度下的工件材料温度不同。

(a) 铆钉穿透过程的工件温度场测量

图9 三种FSBR工艺铆钉穿透过程中的工件温度场测量及工件材料的温度-穿透深度曲线对比

结合铆钉穿透机理及图9b中工件的温度-穿透深度曲线对图8中三种FSBR工艺的 k 值进行分析。首先对 k_{III} 进行分析,可知由于FSBR-III铆钉穿透机理为 $M_{III}=M_{III}(E)$,因此相同穿透深度下 k_{III} 远大于 k_I 与 k_{II} ,即相同材料去除率下FSBR-III的铆钉穿透力最大;随着铆钉不断穿透, T_{III} 不断升高,从而导致 k_{III} 不断减小。另外,通过图9b可知在相同穿透深度下 T_{III} 小于 T_I ,但随着铆钉穿透深度的增加, k_{III} 迅速减小,而 k_I 却变化较小,可见摩擦热对 k_{III} 的影响更明显,同时可以说明铆钉穿透机理中挤压机理所占的比重越大,则 k 值越容易在摩擦热的影响下发生下降,即铆钉穿透力更容易受摩擦热的影响。

然后对 k_I 与 k_{II} 进行对比分析。首先由图9b可知,在穿透初始阶段, T_I 与 T_{II} 都较低且相差较小,因此在材料去除率小于 $1\text{ mm}^3/\text{s}$ 时 k_{II} 小于 k_I 主要是因为铆钉穿透机理不同而导致的。已知FSBR-I与FSBR-II的铆钉穿透机理分别为 $M_I=M_I(C, E)$ 与 $M_{II}=M_{II}(C, E)$,然而通过图10a FSBR-II铆钉穿透深度为 0.1 mm 时的工件剖面观察,可以发现与铆钉内侧面接触处的工件材料所发生的流动程度较小,即铆钉内侧面与工件材料之间的挤压作用较小,说明在铆钉穿透初始阶段,FSBR-II的铆钉穿透机理以切削机理为主,从而导致了 k_{II} 小于 k_I ,即在相同材料去除率下FSBR-II的铆钉穿透力小于FSBR-I的铆钉穿透力;图10b为FSBR-II铆钉穿透深度为 0.6 mm 的工件剖面,可见与铆钉内侧面接触处的工

(b) 穿透深度 $z=0.6\text{ mm}$

图10 FSBR-II不同铆钉穿透深度下的工件剖面观察

件材料所发生的流动程度增大,说明铆钉内侧面与工件材料之间的挤压作用增强,即FSBR-II的铆钉穿透机理中挤压机理所占比重上升;同时,由于 T_{II} 小于 T_I ,温度对 k_{II} 的影响较 k_I 更小,因此 k_{II} 不断上升,并最终超过 k_I 。

另外,需要注意的是,本文的穿透力分析只针对了铆钉穿透上工件(厚度 1.0 mm)的情况,由于板厚较薄,钉芯末端的空腔不会被工件切屑填满。而当利用FSBR工艺连接厚度较大的被连接件时,采用FSBR-I或FSBR-II铆钉切削铝合金板的过程中,存在钉芯末端空腔被工件切屑填满的情况。当空腔被填满后,FSBR-I与FSBR-II铆钉钉芯末端与工件材料的接触面变为分别以 r_1 与 R 为半径的圆形平面,铆钉完全依靠挤压机理实现工件材料的去除,材料去除率也不再满足式(2)、(3)。此时,由于 r_1 小于 R ,相同穿透深度下的材料去除率 MRR_I 小于 MRR_{II} 。此外,由于穿透机理的改变以及钉芯末端与工件材料的接触面变为平面, k_I 与 k_{II} 急剧增大,即穿透力随着材料去除率的增加而大幅上升,而过大的穿透力会导致铆钉穿透过程中出现钉芯被压入铆套而使铆接孔变大等质量问题^[12]。因此,当采用FSBR-I或FSBR-II工艺连接厚度较大的被连接件时,应使用钉芯末端空腔深度大于被连接件总厚度的铆钉。

2.3 接头形貌

利用三种不同FSBR工艺所获得的AA6061-T6/AA6022-T4接头宏观形貌如图11所示。

(a) 穿透深度 $z=0.1\text{ mm}$

(a) FSBR-I接头

图 11 三种 FSBR 工艺所得接头宏观形貌对比

研究表明,较大的上下工件间隙会降低 FSBR 接头的拉伸强度^[18]。如图 12 所示,为了研究铆钉

图 12 三种 FSBR 工艺所得接头的断面形貌对比

结构对接头质量的影响,通过接头断面观察,接头中上下工件间隙最大值($t_{\max}$)如表 4 所示。

表 4 不同 FSBR 工艺所得接头的 $t_{\max}$ 值对比

工艺类型	FSBR-I	FSBR-II	FSBR-III
$t_{\max}/\text{mm}$	0.6	0.2	0.7

通过图 12 可知,随着铆钉穿透上工件以及下工件,工件材料在铆钉的挤压作用下向工件中间流动并产生堆积,同时由于上工件厚度较小、刚性较差,导致其在材料堆积的作用下向上弯曲,从而使上下工件间隙增大。同时可以发现,由于 FSBR-I 与 FSBR-II 铆钉的铆套下表面具备凹槽,因此沿铆钉孔向上流动的上工件上表面材料能够被包容在凹槽中;与 FSBR-I、FSBR-II 不同,FSBR-III 铆钉的铆套下表面为平面,因此在铆钉穿过程中,铆套下表面与沿铆钉孔向上流动的工件材料相互作用,从而进一步挤压堆积在上下工件之间的材料,使因材料堆积而变大的上下工件间隙减小。因此如表 4 所示,完全依靠挤压机理实现铆钉穿透的 FSBR-III 工艺所得接头的 $t_{\max}$ 值最大,但与 FSBR-I 接头的 $t_{\max}$ 值相比相差不大;由于 FSBR-II 主要依靠切削机理实现穿透,两工件中间铆钉孔周围的材料堆积最少,因此接头的 $t_{\max}$ 值最小。此外,由于 FSBR-I 与 FSBR-II 的铆钉穿过程存在对工件材料的切削作用,因此穿透后有切屑产生;而 FSBR-III 的铆钉穿过程完全为挤压作用,穿过程无切屑产生。另外还可以发现,三种铆钉在穿透下工件的下表面时,下表面的工件材料均沿铆钉进给方向发生了塑性变形而形成不同长度的“轴衬”。通过观察比较,可以发现 FSBR-III 接头的“轴衬”长度最大,而 FSBR-II 接头的“轴衬”长度最小,说明铆钉穿过程中对工件材料的挤压作用越大,则下工件的下表面材料所发生的流动程度越大,形成的“轴衬”越长。“轴衬”的形成对铆钉穿过程穿透力的变化也产生了影响,如图 4 所示,三种 FSBR 工艺按照铆钉穿透力降为零时的穿透深度由大到小依次为 FSBR-III、FSBR-I、FSBR-II,可见“轴衬”越长,则铆钉完全穿透上下工件所需的行程越大,因此铆钉穿透力降为零时的铆钉穿透深度也越大。

3 结论

本文利用具有不同铆钉结构的 FSBR-I、FSBR-II 及 FSBR-III 三种搅拌摩擦单面铆接工艺对铝合金板 AA6061-T6(厚度为 1 mm)与 AA6022-T4(厚度为 2

mm)进行了连接,并结合工件材料去除率,对铆钉穿透单一铝合金工件时的穿透力进行了分析,从而研究了不同铆钉结构对穿透力的影响,得到以下结论。

(1) 完全依靠挤压机理实现铆钉穿透的FSBR-III工艺,其最大穿透力分别比同时依靠挤压与切削机理实现铆钉穿透的FSBR-I和FSBR-II工艺高33%与83%。铆钉穿透过程中对工件材料的切削作用越显著,其最大穿透力越小。

(2) FSBR-I和FSBR-II工艺的连接过程有切屑产生,而FSBR-III无切屑产生。

(3) 铆钉穿透机理中挤压机理所占比重越大,则相同材料去除率下的铆钉穿透力越大,且穿透力受摩擦热的影响越明显。

(4) 铆钉穿透过程中对工件材料的切削作用越显著,上下工件之间铆钉孔周围的材料堆积越少,因而接头上下工件的间隙越小。

参 考 文 献

- [1] 李永兵,李亚庭,楼铭,等.轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J].机械工程学报,2012,48(18):44-54.
- LI Yongbing, LI Yating, LOU Ming, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-54.
- [2] 沈永飞,李昊,熊志明,等.轻量化薄板无铆钉铆接的力学性能及接头断裂机理[J].机械设计与研究,2018,34(1):99-102.
- SHEN Yongfei, LI Hao, XIONG Zhiming, et al. Investigation on strength and failure mode of clinching[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(1): 99-102.
- [3] 张先炼,何晓聪,赵伦,等.钛合金薄板自冲铆接工艺及失效行为研究[J].机械工程学报,2018,54(13):202-207.
- ZHANG Xianlian, HE Xiaocong, ZHAO Lun, et al. Process and failure behaviors of self-piercing riveting in titanium alloy sheets[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 202-207.
- [4] PADHY G K, WU Chuansong, GAO Song. Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: a review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 1-38.
- [5] SZLOSAREK R, KARALL T, ENZINGER N, et al. Mechanical testing of flow drill screw joints between fibre-reinforced plastics and metals[J]. Materialpruefung Materials Testing, 2013, 55: 737-742.
- [6] LI Yongbing, WEI Zeyu, WANG Zhaozhao, et al. Friction self-piercing riveting of aluminum alloy AA6061-T6 to magnesium alloy AZ31B[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(6): 061007.
- [7] DUAN Hongyan, HAN Gaokun, WANG Mingxing, et al. Rotation friction pressing riveting of AZ31 magnesium alloy sheet[J]. Materials & Design, 2014, 54: 414-424.
- [8] GAO Dalong, ERSOY U, STEVENSON R, et al. A new one-sided joining process for aluminum alloys: friction stir blind riveting[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009: 131(6) 061002-1.
- [9] MA Yunwu, LI Yongbing, CARLSON B E, et al. Effect of process parameters on joint formation and mechanical performance in friction stir blind riveting of aluminum alloys[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(6): 061007.
- [10] MIN Junying, LI Jingjing, LI Yongqiang, et al. Affected zones in an aluminum alloy frictionally penetrated by a blind rivet[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(5) 054501-1.
- [11] ZHANG Changqing, WANG Xijing, LI Boqiang. A technological study on friction stir blind rivet jointing of AZ31B magnesium alloys and high-strength DP600 steel[J]. Advanced Materials Research, 2011, 183-185: 1616-1620.
- [12] MIN Junying, LI Jingjing, CARLSON B E, et al. Friction stir blind riveting for dissimilar cast Mg AM60 and Al alloy sheets[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(5): 051022-1.
- [13] MIN Junying, LI Yongqiang, LI Jingjing, et al. Friction stir blind riveting of carbon fiber-reinforced polymer composite and aluminum alloy sheets[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015(76): 1403-1410.
- [14] WANG P C, STEVENSON R. Friction stir rivet and method of joining: US, 7862271[P]. 2006-09-19.
- [15] LATHABAI S, TYAGI V K, CANTIN G D, et al. A blind rivet and a method of joining therewith: AU, 137868[P]. 2009-11-19.
- [16] LATHABAI S, TYAGI V, RITCHIE D, et al. Friction stir blind riveting: a novel joining process for automotive light alloys[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2011, 4(1): 589-601.
- [17] MIN Junying, LI Jingjing, LI Yongqiang, et al. Friction stir blind riveting for aluminum alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 20-29.
- [18] MIN Junying, LI Yongqiang, CARLSON B E, et al. A new single-sided blind riveting method for joining of dissimilar materials[C]//CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2015, 64: 13-16.
- [19] MIN Junying, YANG Qingbao, ZHANG Kai, et al. Numerical simulation of the frictional penetration process in

- friction stir blind riveting[C]//Proceedings of NUMIFORM 2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. 2019: 695-698.
- [20] PODLESÁK F, HALSIG A, HOFER K, et al. Spin blind-riveting: secure joining of plastic with metal[J]. Weld World, 2015, 59(6): 927-932.
- [21] WANG Shuang, MIN Junying, LIN Jianping, et al. Flow drill riveting of carbon fiber-reinforced polymer and aluminum alloy sheets[J]. Welding in the World, 2019: 1-12.
- [22] MIN Junying, LI Yongqiang, LI Jingjing, et al. Mechanics in frictional penetration with a blind rivet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 268-279.
- [23] 吴文梯, 韩少锋. 基于恒定材料去除率高速铣削加工技

术的研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(9): 43-44.

WU Wenti, HAN Shaofeng. Research on high speed milling technology based on constant material removal rate[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(9): 43-44.

作者简介: 闵峻英(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进成形制造技术、异种材料连接技术等。

E-mail: junying.min@tongji.edu.cn

张凯, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为异种材料连接技术。

E-mail: zknevsnev@163.com

王爽, 女, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为异种材料连接技术。

E-mail: 18143093279@163.com

林建平, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车轻量化与先进成形制造技术等。

E-mail: jplin58@tongji.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

薄壁曲面零件五轴侧铣加工过程几何-力学仿真及变形误差刀路补偿

作 者: 李洲龙

毕业学校: 上海交通大学

指导教师: 朱利民

五轴侧铣加工因具有极高的加工效率和表面质量, 在航空航天复杂零件制造中有着广泛的应用。但由于切削几何的复杂性和加工系统的弱刚性, 复杂薄壁件侧铣加工往往容易出现刀具包络面与设计面几何失配引起的刀路偏差和时变强切削力引起的让刀变形误差, 导致加工精度难以保证。针对上述问题, 本文开展了五轴加工过程的几何-力学集成仿真研究, 解决了侧铣刀路误差控制和五轴铣削力精确预报的难题, 提出了基于刀位修正的加工让刀变形补偿技术, 显著提高了复杂薄壁零件的加工精度。本文的主要研究内容如下。

(1) 提出了考虑刀具跳动的五轴侧铣包络面建模与刀路优化新方法。推导了刀齿在刀具跳动影响下的回转面及扫掠包络面表达式, 并依据加工表面成形原理拼接最外层刀齿包络面为刀具有效包络面。将考虑跳动的侧铣刀路优化问题归结为刀具有效包络面向设计曲面的最佳一致逼近问题, 通过微量调整刀轴轨迹实现了刀具路径几何精度的大幅提升。

(2) 提出了一种精确高效判定五轴加工中刀具-工件啮合区域的弧面求交法。基于刀具运动信息提取了刀具轴向离散可行接触圆弧集, 应用弧面相交法及距离场法精确提取了啮合圆弧段, 进而轴向插值判定刀具-工件啮合区域。该方法降低了计算维度, 解决了传统实体建模法计算效率低、鲁棒性差和离散几何建模法计算精度低的问题。

(3) 提出了一种综合考虑刀具跳动影响和底刃切削效应的五轴铣削力预报方法。建立了适用于变进给、曲线路径以及刀具跳动影响下的五轴加工瞬时切厚计算模型, 解决了基于经典简化模型和基于次摆线轨迹模型在切厚计算中难以兼顾计算效率和精度的问题。发展了考虑底刃切削效应的平底刀切削力预报模型及实验标定方法, 解决了现有模型在五轴负倾角加工工况下切削力预报失准的难题。

(4) 提出了适用于复杂薄壁零件五轴侧铣工况的加工变形预报与刀路补偿技术。建立无需网格重划的工件刚度修正模型, 提出了切削力-变形耦合迭代式, 探明了五轴侧铣变形映射原理, 实现了薄壁曲面侧铣加工变形的准确预报。在此基础上, 建立了变形误差关于刀轴面调整的微分关系, 通过刀路优化实现了融合变形的加工成形面向设计曲面的最佳一致逼近, 显著提升了薄壁曲面零件的加工精度。