

## 7022 铝合金 FSJ 拼连板材铣削变形分析

汪洪峰<sup>1,2</sup> 左敦稳<sup>1</sup> 戴晟<sup>1</sup> 王珉<sup>1</sup> 王建彬<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 黄山学院机电与信息工程学院, 黄山, 245041;

3. 安徽工程大学机械与汽车工程学院, 芜湖, 241000)

**摘要:**利用有限元方法对搅拌摩擦连接(Friction stir jointing, FSJ)连接铝合金板材铣削加工过程进行模拟, 分别获得连接板材铣削后的残余应力分布和变形规律, 并通过实验验证模拟结果的正确性。通过模拟得出铣削残余应力主要集中在连接区, 横向残余应力大于纵向残余应力。纵向残余拉应力主要集中在连接区中心部位及两端, 其他部位均为残余压应力; 横向残余拉应力主要集中在连接区中间位置。连接板材铣削后在中心位置出现下凹, 板材两端向下弯曲形成“M”形状。

**关键词:**7022 铝合金; 搅拌摩擦连接技术; 铣削变形; 残余应力; 有限元分析

**中图分类号:**TG404

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2013)02-0245-05

## Milling Deformation of Jointed 7022 Aluminum Alloy by FSJ

Wang Hongfeng<sup>1,2</sup>, Zuo Dunwen<sup>1</sup>, Dai Sheng<sup>1</sup>, Wang Min<sup>1</sup>, Wang Jianbin<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, Huangshan University, Huangshan, 245041, China;

3. College of Machinery and Automobile Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, 241000, China)

**Abstract:** The laws of the residual stress and deformation of milled friction stir jointing (FSJ) aluminum alloy are obtained by the finite element simulation method. The simulation results are verified by the experiments. The residual stress of milling is mainly concentrated in the jointing region, and the transverse residual stress is greater than the longitudinal residual stress. The longitudinal residual tensile stress appears in the center and both ends of the jointing region. The transverse residual tensile stress appears in the middle of the jointing region. The concave appears in the center. The shape of the "M" is formed because of the both ends bending.

**Key words:** 7022 aluminum alloy; friction stir jointing(FSJ); milling deformation; residual stress; finite element analysis

早期飞机大多数部件采用铆接方式连接, 这严重阻碍了飞机性能的提高和载重量的增加<sup>[1-3]</sup>。随着预拉伸板材的出现, 改变了飞机上许多结构件的加工方法, 特别是框类零件的加工, 摒弃了传统的铆接铣削相结合的办法, 而采用整体铣削加工方法, 这大大减轻了飞机的重量, 相对传统加工方法, 在一定程度上减轻了零件的重量和减少了加工变

形<sup>[4-8]</sup>。但是针对目前大飞机制造, 其结构件尺寸长达 30~50 m, 现有技术无法一次性轧制出符合大飞机结构件需要的预拉伸板材, 故只能通过搅拌摩擦连接技术(Friction stir jointing, FSJ)解决这一困难, 然而板材的拼连会造成内部残余应力的分布不均, 这对后续铣削变形会带来很大的影响。文献[9,10]讨论了 FSJ 工艺参数对连接区残余应力

**基金项目:**国家自然科学基金(51175255)资助项目;江苏省博士后基金(1201007C)资助项目;安徽省高校省级自然科学基金(KJ2012Z388)资助项目;黄山学院人才启动基金(2012xkjq003)资助项目;安徽省高等学校省级优秀青年人才基金(2011SQRC077)资助项目。

**收稿日期:**2012-04-01;**修订日期:**2012-12-07

**通信作者:**左敦稳,男,教授,博士生导师,E-mail:imit505@nuaa.edu.cn.

的影响,但并未讨论 FSJ 工艺参数对连接区产生的残余应力分布场对后续铣削加工的影响;而文献[11]虽然讨论了影响铣削变形的一些主要因素,但其铣削的板材并非是 FSJ 连接板材,因此也无法获得 FSJ 连接区残余应力对后续铣削变形的影响。因此,本文针对 7022 铝合金 FSJ 拼连板材进行框类零件的铣削实验和模拟分析,找出铣削变形的规律并对其进行预测分析,为实际工程应用提供预测和参考价值。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验选用的材料是 7022 航空铝合金,其目前广泛应用在飞机大型结构件及承受大载荷力的零件上<sup>[7]</sup>。FSJ 实验中采用两块 200 mm×200 mm×10 mm 的板材拼接。实验所用材料化学成分见表 1。

表 1 7022 铝合金的化学成分(质量分数) %

Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Mn	Zn	Al
0.35	0.41	1.43	2.52	0.15	0.1	5.43	余量

### 1.2 实验设备

实验选用的 FSJ 设备型号为 FSW-2XB-020,搅拌头采用右旋螺纹结构,且在搅拌杆顶端开有 3 个 V 形槽,如图 1 所示。FSJ 实验前先用丙酮对铝合金板材连接区进行擦洗除油,然后用砂纸或砂轮轻轻地将拼连一边的氧化膜打磨掉,去膜方式为机械加工方法,最后用无水乙醇清洗打磨表面,用吹风机吹干,固定在 FSJ 设备工作台上进行连接。连接的工艺参数:搅拌头旋转速度  $\omega=400$  r/min,搅拌头连接速度  $v=100$  mm/min。铣削实验中,机床型号为 UCP710 五坐标加工中心,铣刀直径为  $\Phi 16$  mm,刀具齿数为 3。残余应力测试采用小孔法测试,选用的应变片为 BX120-2BA,钻头直径为  $\Phi 1.5$  mm,小孔深度为 1.5 mm。进行残余应力测试前,将连接区两边去除飞边,并用砂纸手工打磨毛刺,最后用无水乙醇清洗表面,用吹风机吹干



图 1 FSJ 设备照片

贴应变片。板材变形主要通过型号为 MC003 系列三坐标测量仪测量获得。

## 2 FSJ 拼连板材铣削模型的建立

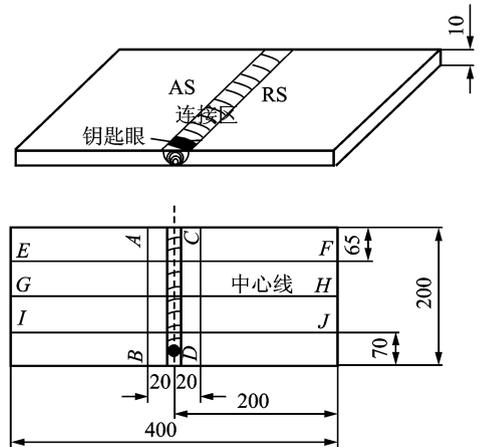
### 2.1 铣削模型建立

在图 2(a)基础上铣削出来的框类结构件尺寸示意图如图 2(b)所示,后面图 2(b)中铣削残余应力和变形分析时所选路径位置同图 2(a)。为了提高模拟的准确性,有限元模型网格采用非均匀式划分,即靠近连接区采用较密的模拟时采用 SOLID70 单元,在进行残余应力和变形分析时采用 SOLID45 单元,模型网格划分如图 3 所示,其共有 9 435 个节点,7 200 个单元。铣削时工件固定在工作台上;铣削完工件后,将工件放置室温中冷却至室温,最后去除装夹约束。

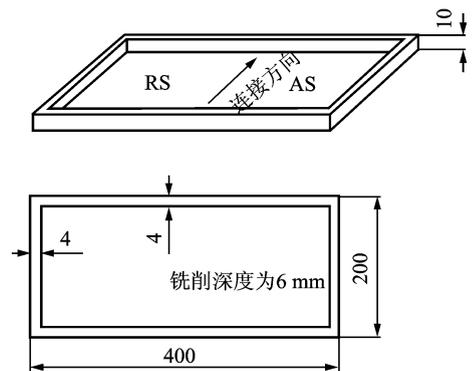
### 2.2 铣削条件

铣削走刀路径选择由外向内走刀模式,装夹方式采用四点对称装夹,铣削深度每次均为 2 mm,铣刀进给量为 200 mm/min,铣刀转速为 7000 r/min,板材最终去除材料厚度为 6 mm。

铣削模拟时,相关的铣削参数同实际铣削实验



(a) FSJ 连接板材尺寸图



(b) 铣削板材尺寸图

图 2 尺寸图(AS 为前进侧,RS 为返回侧)

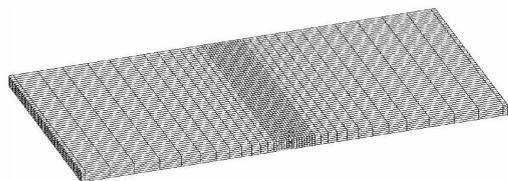


图 3 有限元网格图

相同,铣削力通过文献[8]中铣削力经验数学模型求得。铣削模拟的材料的热力学性能参数和材料的本构方程见文献[8]。

### 2.3 模拟过程

在进行铣削加工模拟之前,首先模拟 FSJ 过程中温度场分布,将获得的温度场作为体载荷施加到力学模型上,再进行 FSJ 过程的残余应力分布模拟,最后将模拟所得的各节点残余应力作为初始状态加入到铣削模型中进行铣削模拟分析,最终得出铣削过程中的残余应力分布和变形。铣削模拟具体过程同文献[11]相同,区别在于铣削模拟之间施加了拼连所带来的残余应力。最终获得的铣削变形网格图如图 4 所示。

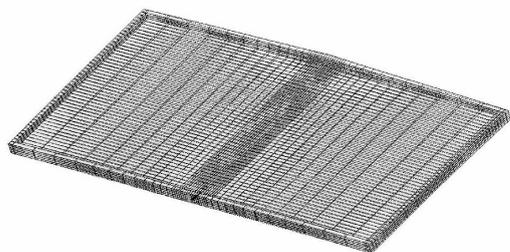


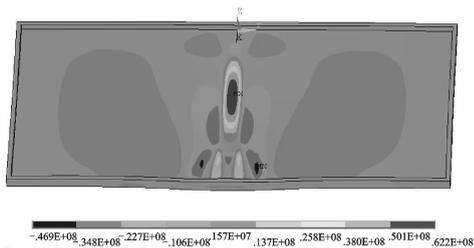
图 4 铣削加工网格变形图

## 3 模拟结果与实验结果对比分析

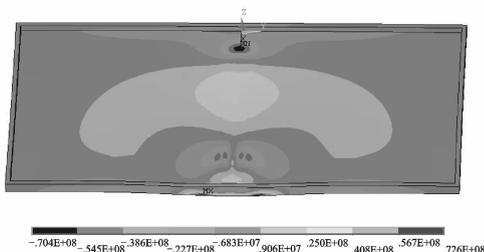
### 3.1 铣削残余应力模拟结果与实验结果对比分析

图 5 为铣削残余应力分布云图。从图中可以看出,铣削残余应力主要集中在连接区,这说明 FSJ 引起的残余应力分布对后续铣削残余应力的分布影响较大。最大纵向残余应力主要集中在连接区中心部位,两端形成“八”字形状的残余拉应力区,其中在没有钥匙眼一侧残余拉应力较大,其他部位均为残余压应力;最大横向残余应力主要集中在连接区两端侧面靠近底部区,在连接区中间位置形成了近似“椭圆形”的残余拉应力区。FSJ 连接板材铣削后,横向残余应力大于纵向残余应力。为了能进一步准确地表达 FSJ 连接板材铣削后残余应力分布,文中采用图 2(b)的划线位置进行分析。

图 6 是沿图 2(a)中 A-B 和 C-D 路径获得的铣削残余应力模拟值与实验值对比曲线。从图中可



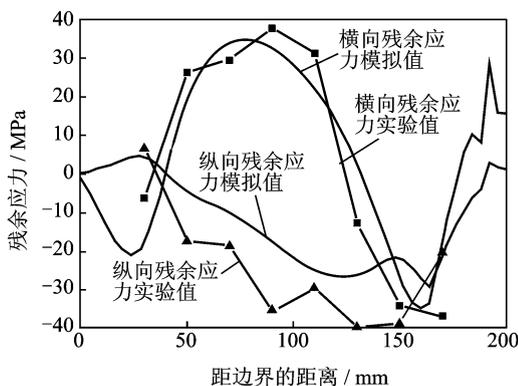
(a) 纵向残余应力分布云图



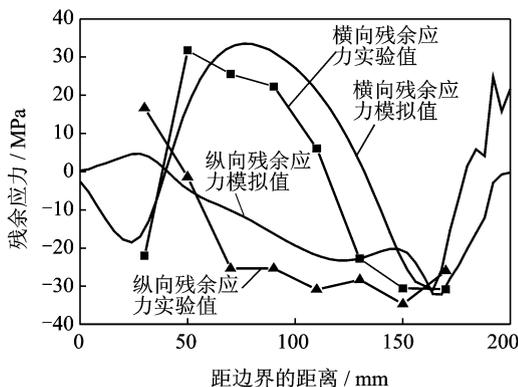
(b) 横向残余应力分布云图

图 5 残余应力分布云图

以看出,模拟值与实验值变化趋势基本相同。图 6(a)中模拟得到的最大纵向残余拉应力为 4.78 MPa,最大横向残余拉应力为 35 MPa。图 6(b)中模拟得出的最大纵向残余拉应力为 4.67 MPa,最大横向残余拉应力为 33.5 MPa。从



(a) 沿 A-B 路径



(b) 沿 C-D 路径

图 6 沿 A-B 和 C-D 路径的铣削残余应力曲线

图中还可以看出,RS残余应力值小于AS,这与FSJ残余应力分布相同,进一步说明在铣削加工过程中FSJ残余应力分布对铣削残余应力的影响较大。

图7是沿图2(a)中E-F和I-J路径获得的铣削残余应力模拟值与实验值对比曲线。从图中可以看出,模拟值与实验值变化趋势基本吻合。图7(a)中模拟得出的最大纵向残余拉应力为50.8 MPa,最大横向残余拉应力为36.6 MPa。图7(b)中模拟得出的最大纵向残余拉应力为17.5 MPa,最大横向残余拉应力为9.28 MPa。从图中还可以看出,E-F处的残余拉应力大于I-J处的残余拉应力,E-F处的残余压应力小于I-J处的残余压应力。造成这种情况的主要原因是夹具的装夹位置对工件的残余应力影响,在E-F处先连接,此时夹具的约束影响了连接过程中材料的受热膨胀,而在I-J处是后连接,此时夹具的约束有影响,但时间相对较短,其对连接中材料的受热膨胀影响不大,故在I-J处的残余压应力较小,残余拉应力较大;而在E-F处的残余压应力较大,残余拉应力较小。

铣削残余应力的模拟值与实验值存在差异的主要原因有:(1)有限元模型的简化;(2)铣削过程同样

未考虑板材两端存在的20 mm未连接部位;(3)材料本身差异;(4)残余应力实际测量的误差等。

### 3.2 铣削变形模拟结果与实验结果对比分析

图8为FSJ连接板材铣削后的变形云图。从图中可以看出,连接区中心出现下凹,板材两端向下弯曲,形如“M”形状。这主要原因是板材上部被铣削,上部的残余拉应力被释放,而在未铣削之前,上部的残余拉应力大于下部的残余拉应力,当铣削时,上部残余拉应力释放,下部残余拉应力相对较大,在下部残余拉应力的作用下,致使铣削板材向下弯曲。为了能进一步准确地表达FSJ连接板材铣削后变形情况,文中同样采用图2(b)的划线位置进行分析。

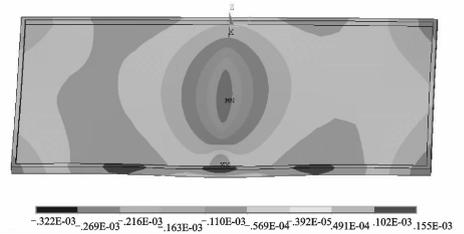
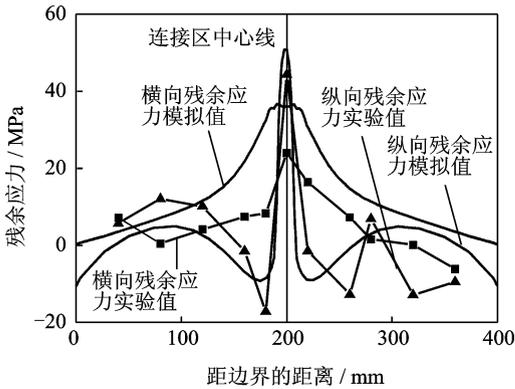


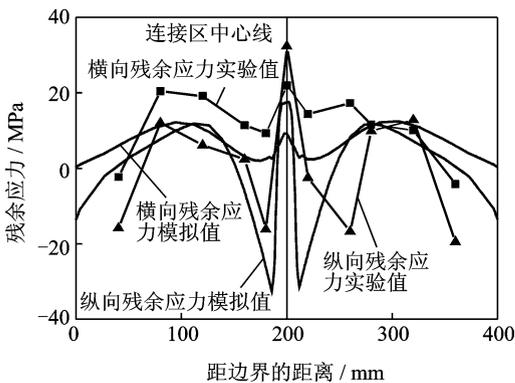
图8 铣削变形云图

图9(a)为沿图2(a)中A-B和C-D路径获得的铣削变形曲线。从图中可以看出,工件经过铣削加工后,沿连接区方向仍呈弯曲变形状态,铣削加工后工件钥匙眼侧变形高于连接区起始端。具体原因是起始端为残余压应力,致使起始端有翘起趋势,但受中间下凹部位的影响,起始端翘起并不明显。钥匙眼侧也受到残余压应力作用,但压应力相对起始端较小,且中间下凹部位靠近起始端,间接地将钥匙眼端抬高,使得钥匙眼端整体翘起。实验测得的数值要比模拟值低些,但变化趋势基本相同。图中实测值和模拟值曲线均有相交的部位,说明FSJ拼连板材铣削过后出现了扭曲现象。同时还可以看出,连接区AS变形要小于RS变形。

图9(b)为沿图2(a)中E-F和I-J路径获得的铣削变形曲线。从图中可以看出,工件铣削加工变形仍然受到FSJ拼连板材变形的影响,出现中间部位向下位移,两边由于板材的重力作用而向两边弯曲。同时模拟值与实验值基本吻合,只是在连接区中心模拟值较实验值变化大。另外从图中还可以看出,距连接区起始端的距离越近变形越大,特别是板材中间向下位移越大。前者中间位置向下位移大于后者,前者两端翘起的高度应大于后者,但因后者向下位移小于前者,后者相对翘高前者,另外加上自身重力的作用,致使后者翘起的高度略大于前者。实验值和模拟值均有交叉的部位,进一步说明了FSJ

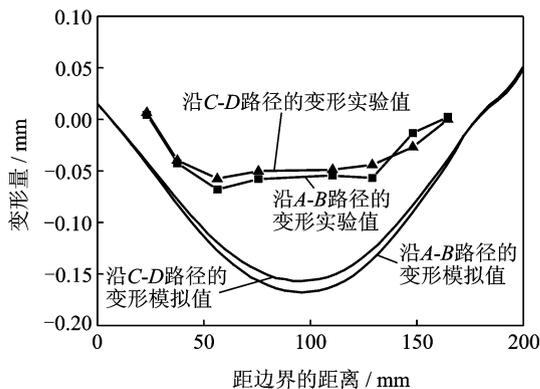


(a) 沿E-F路径

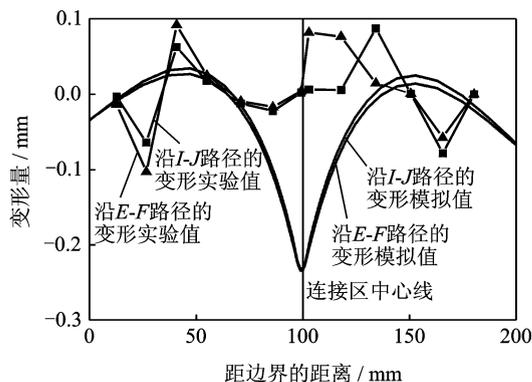


(b) 沿I-J路径

图7 沿E-F和I-J路径的铣削残余应力分布曲线



(a) 沿A-B和C-D路径的铣削变形



(b) 沿E-F和I-J路径的铣削变形

图 9 铣削变形的模拟值与实验值

拼连板材铣削加工后变形出现扭曲现象。

铣削变形的模拟值与实验值存在差异的主要原因有:(1)材料热力学性能在高温阶段具有不稳定性;(2)FSJ时板材两端留有20 mm未连接,在铣削模拟时认为此部分也被连接,铣削薄壁件时仍对此部分进行了铣削;(3)实际测量的误差等。

## 4 结 论

(1)FSJ连接板材铣削残余应力主要集中在连接区,横向残余应力大于纵向残余应力。最大纵向残余应力主要集中在连接区中心部位,两端形成“八”字形状的残余拉应力区且钥匙眼侧相对较小,其他部位均为残余压应力;最大横向残余应力主要集中在连接区两端靠近底部区域,连接区中间位置形成了近似“椭圆形”的残余拉应力区。

(2)FSJ连接板材铣削后在连接区中心出现下凹,下凹的距离范围为0.15~0.3 mm,连接区两端出现翘起的高度范围为0.1~0.6 mm,平行于连接区板材两端出现向下弯曲,形如“M”形状。

(3)FSJ连接板材引起的残余应力对后续铣削残余应力影响较大。

## 参考文献:

- [1] Kostka A, Coelho R S, Santos J D, et al. Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(11): 953-956.
- [2] 汪洪峰,左敦稳,邵定林,等.工艺参数对搅拌摩擦焊7022铝合金残余应力及耐磨耐蚀性能的影响[J].航空材料学报,2011,31(1):31-37.  
Wang Hongfeng, Zuo Dunwen, Shao Dinglin, et al. Effect of process parameters on the residual stress and wear and corrosion resistance of 7022 aluminium alloy by FSW[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011,31(1):31-37.
- [3] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50: 1-78.
- [4] Guerra M, Schmidt C, McClure J C, et al. Flow patterns during friction stir welding [J]. Materials Characterization, 2003, 49(2): 95-101.
- [5] Liechty B C, Webb B W. Modeling the frictional boundary condition in friction stir welding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12/13): 1474-1485.
- [6] 汪洪峰,左敦稳,王珉,等.厚板7022铝合金搅拌摩擦焊接实验研究[J].功能材料,2010,41(11):2029-2033.  
Wang Hongfeng, Zuo Dunwen, Wang min, et al. Experimental study on friction stir welded on thick plate of 7022 aluminium alloy[J]. Journal of Functional Materials,2010,41(11):2029-2033.
- [7] Richter-Trummera V, Suzano E, Beltrão M, et al. Influence of the FSW clamping force on the final distortion and residual stress field [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 538: 81-88.
- [8] Zuo D W, Wang H F, Miao H, et al. Analysis on milling deformation of 7022 aluminum alloy blank jointed by FSJ [J]. Key Engineering Materials, 2012, 499: 27-32.
- [9] Khodaverdizadeh H, Mahmoudi A, Heidarzadeh A, et al. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints [J]. Materials and Design, 2012, 35: 330-334.
- [10] Sarkari Khorrami M, Kazeminezhad M, Kokabi A H. Mechanical properties of severely plastic deformed aluminum sheets joined by friction stir welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 543: 243-248.
- [11] 王树宏.航空铝合金厚板初始残余应力及其对铣削变形影响的基础研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.