

壁板自动化旋铆工艺应用研究*

陈 昊, 贾伟峰, 孙岳炜

(航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024)

[摘要] 旋铆是一种铆杆对铆钉局部加压并绕中心连续摆动直到铆钉成形的铆接方法。旋铆成形后的铆钉材料连续无折断、无弯曲、鼓肚墩粗,与铆钉相连的部件毫无变形。某型壁板的铆合运用旋铆工艺提高铆钉的承载能力以及铆合后的表面外观质量。以 2017 材料的 $\phi 6$ 铆钉为对象,基于 Simufact.Forming 有限元软件,运用点轨迹追踪法对其旋铆成形过程进行了数值模拟研究,提取出铆钉变形区某些特定点变形过程中的应力值,并经过数据处理转化为等效应力-行程曲线,进而探讨了旋铆成形的变形机理。针对壁板的结构组成及其装配工艺流程,将旋铆成形的变形机理应用到旋铆设备。通过优化铆接设备的结构,同时将数控技术引入设备中实现自动化加工,提高壁板加工的效率及质量。

关键词: 旋铆; 铆接; 数值模拟; 变形分析; 自动化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.054



陈 昊

工程师,研究方向为航空航天科学与工程、自动化技术、金属学及金属工艺,从事飞行器的装配和测试技术研究工作。

旋铆(旋压铆接)源于摆碾成形技术,由于增加了摆杆的旋转运动,其成形原理相对传统的压铆技术有了较大的变化,旋铆过程中的材料变

形是一个由摆杆小面积接触压缩,并呈螺旋形的渐近成形过程。正是这种变化,使得旋铆变形力降低,铆杆与铆钉接触瞬间的冲击力减小,从而降低了加工噪声,且铆接质量优于压铆,因此在实际生产中获得了广泛的应用^[1-3]。以下以沉头铆钉的旋铆铆接为对象,基于 Simufact.Forming 软件,运用点轨迹追踪法,并通过数值模拟的手段分析旋铆成形的机理。数值模拟得出的机理、规律和有关参数,可为旋铆设备的参数选择和设置提供参考依据,新型旋铆设备的数控

化还可实现制造过程的连续性并确保工件质量的稳定性。

壁板旋铆加工的工艺分析

某型整体壁板组件由上、下两件壁板铆合而成,如图 1 所示,壁板为数控机加件,使用 HB6306-6×50 的铆钉将两件壁板铆合,因铆钉直径大,在铆钉镦制过程中,径向膨胀难度大,根据此情况,为达到铆接强度要求,壁板上的铆钉孔采用“钻-扩-铰”的流程进行加工,最终将铆钉孔加工至 $\phi 6H8$ 。铆钉镦头通过旋铆成

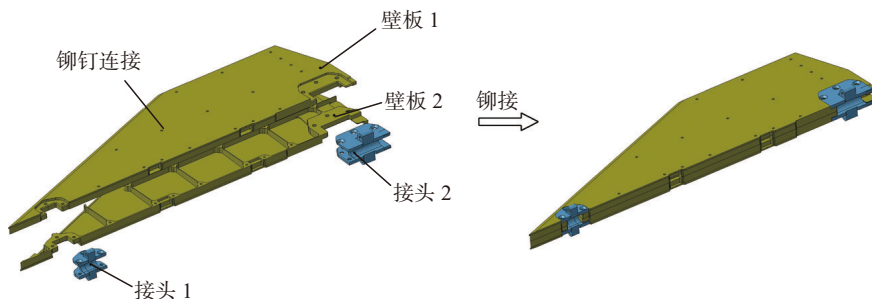


图1 整体壁板构造
Fig.1 Integral panel structure

形,并且按照正面交错法放置铆钉,之后使用铣钉枪将壁板表面镢头凸起部分去除。旋铆成形仅将待成形铆钉区与旋铆机的铆杆接触区域进行了塑性成形,铆钉非接触的轴线方向未发生塑性成形,适用铆钉与壁板为销钉配合的状态。旋铆法与压铆法的铆钉成形过程不同。采用旋铆法,铆钉在塑性成形过程的同时工件也会发生明显的塑性变形,产生位移与应变的几何非线性关系,在材料的本构关系中产生材料(即物理)非线性关系。有限元法是进行非线性分析的有效工具,也是进行金属塑性成形过程模拟最常用的方法之一。在此分析模拟基础上运用旋铆法,可以有效降低成本、提高质量、缩短试验周期。

点轨迹追踪法是指在加工变形前,在铆钉上选取某些特定点,通过追踪其加工变形过程中的等效应力值等参数的变化情况,实现对变形过程的深入认识。

由于旋铆变形过程较为复杂,仅仅依靠试验手段难以获得较为详尽的数据,也不能更为深刻地了解旋铆过程材料的变形规律,为此,拟借助有限元数值模拟分析法分析旋铆成形过程中金属变形规律,然后借助分析结果指导生产实际,提升生产效率,降低生产成本^[4]。本文基于 Simufact.Forming 软件提供了点轨迹追踪法功能,获取旋铆中指定点的等效应力等数据与云图,并将大量的数据导出为 Excel 格式,借助 Excel 的数据处理功能进一步分析数据,全面认识旋铆成形机理。

数值模拟简介与分析

有限元数值模拟的第 1 步是建立有限元模型。图 2 所示为沉头铆

钉旋铆成形数值模拟的分析模型,包括:铆钉、铆杆、顶模、上壁板与下壁板等。其中,铆杆、顶模设置为刚性体,同时忽略上、下壁板的极小变形而将其也设置为刚塑性体;铆钉则设置为塑性体^[5-6],并对其进行网格划分,为提高分析精度,对铆钉接触铆杆部分的网格进行了细分^[7]。旋铆成形运动设置为,铆杆施加以垂直向下的进给速度的同时偏转一定角度绕铆钉轴心旋转,其余件固定不动。旋铆过程中铆杆与铆钉接触的边界条件按照常规剪切因子摩擦模型施加。具体参数及边界条件设置如表 1 所示。

为具体分析旋铆变形,进一步揭示旋铆变形规律,在铆钉轴线方向分 3 层,每层径向指定 3 个点^[7],指定的点编号与分布如图 3 所示,将这些点按轴向和径向分组,轴向组设置了轴心处的 1-4-7 点、偏距 1/2 半径处的 2-5-8 点和外缘处的 3-6-9 点 3 组,径向组为顶层的 1-2-3 点、中间层的 4-5-6 点和底层的 7-8-9 点 3 组。分析过程中,追踪其变形过程中的相关变形数据与规律。

基于 Simufact.Forming 软件,可追踪获取铆钉上指定点及其点组的

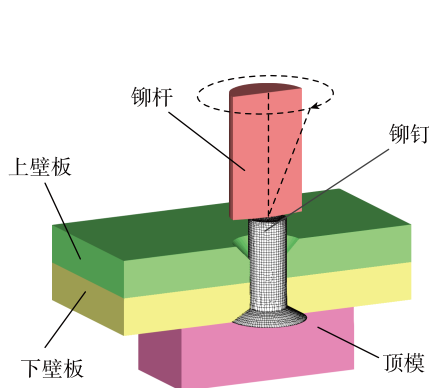


图2 旋铆成形有限元模型
Fig.2 Finite element model of spin riveting

表1 边界条件与参数设置

铆钉尺寸 $D \times L/\text{mm}$	摆杆倾角 / ($^\circ$)	摆杆转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	下压速度 / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	摩擦因子	上壁板厚度 / mm	下壁板厚度 / mm
$\phi 6 \times 16$ (2017)	3	700	2	0.1	6 (90° 沉孔)	6 (120° 沉孔)

变形量、等效应力-行程曲线、加工载荷等大量变形数据,通过分析这些数据可较好地预观察变形规律等,从而在实际生产中获得更好的理论支撑。限于篇幅,这里仅列举变形过程中等效应力选项等及其分析。图 4 列举了有限元模型中铆钉变形时的点组的等效应力随铆杆行程的变化曲线。图 4 中数据是有限元数值计算后提取的数据经过 Excel 软件整理的径向和轴向各 3 组点的等效应力-行程曲线^[9]。其中,图 4(a)~(c)为径向 3 组点的点轨迹追踪曲线,图 4(d)~(f)为轴向 3 组点的点轨迹追踪曲线。图 5 为铆钉分别用旋铆法(700r/min)和压铆法成形过程的压力曲线;图 6 为铆钉在铆杆转速为 300r/min、700r/min、1500r/min 下旋铆成形的压力变化曲线。

分析图 4 所示的等效应力-行程变化曲线,可揭示旋铆成形的变形机理;分析图 5 与图 6 可看出不同工况下的铆钉压力变化曲线,直接反映了施铆设备所需的动力。

(1)由图 4 所示的等效应力-行程变化曲线可看出,旋铆成形变形力主要来源于铆杆与铆钉的接触区域,而旋铆成形的接触区由于摆角

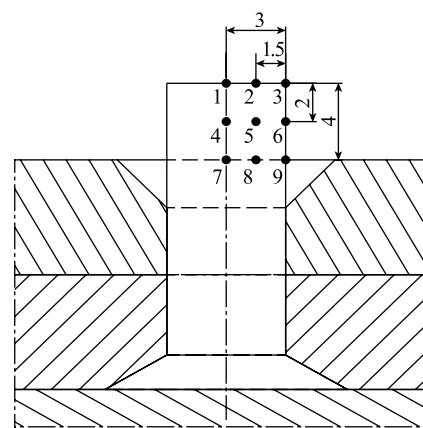


图3 铆钉追踪点的选取
Fig.3 Rivet tracking point selection

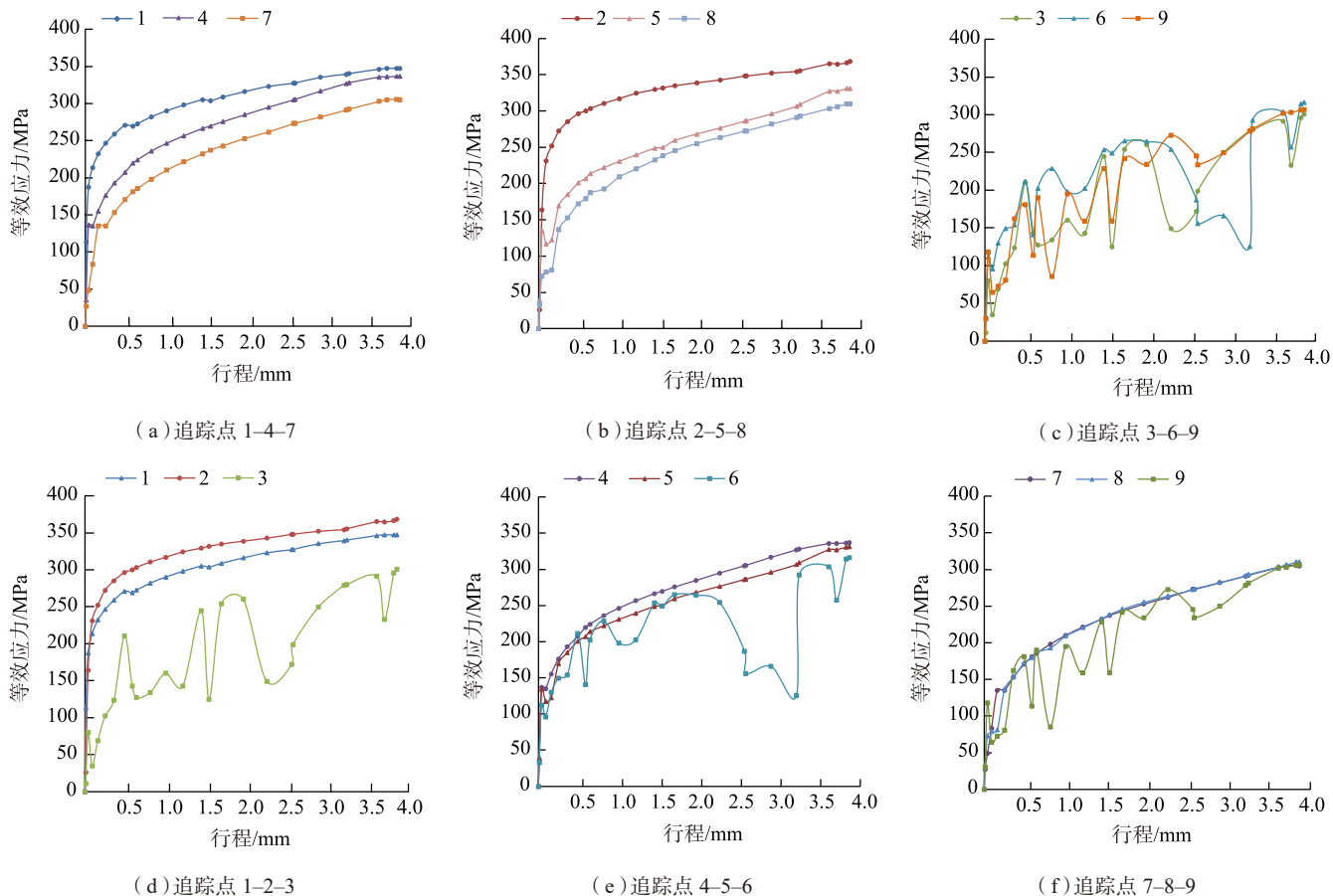


图4 等效应力-行程变化曲线

Fig.4 Equivalent stress-travel curve

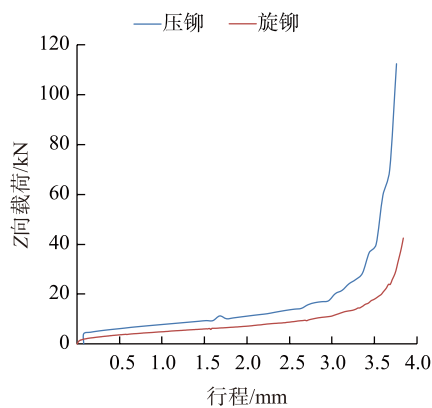


图5 旋铆法和压铆法铆钉载荷对比

Fig.5 Pressure comparison of rotary riveting and riveting

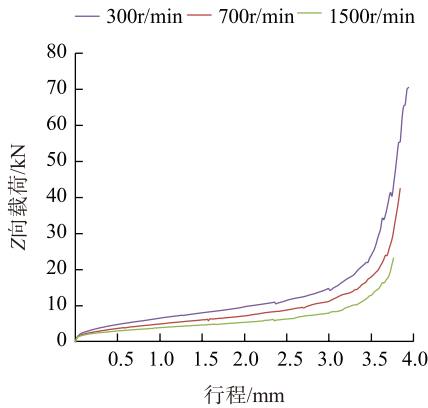


图6 不同转速下的铆钉Z向载荷

Fig.6 Rivet Z-pressure at different speeds

的原因实质是一个扇形区,随着半径的增加,接触面积增大。旋铆成形摆杆与铆钉的接触是周期下压渐近成形的,当进给速度一定时,其接触点轨迹是一条螺旋线,因此变形过程中各点的应力变化会出现波动,且外缘

材料由于缺乏约束而波动明显,这种应力波动会向中心传播,但受材料约束以及摆杆接触等的影响,传播过程中波动的衰减较快,且中间层波动略大。虽然旋铆过程会出现较压铆不稳定的变形现象,但在摆杆与板壁沉

孔的约束下,仍然会得到最终的成形结果。

(2)图5表明,旋铆铆接可减小作用在铆钉上的铆接力,这与实际情况应用相符。

(3)图6显示,旋铆成形时铆杆的转速对铆接力有所影响,转速增高则铆接力减小。这对实际应用具有指导意义,当然,铆杆转速的提高还要考虑其他因素,这里不展开讨论。

壁板旋铆设备的自动化应用

传统的旋铆设备为旋铆机,如图7所示,加工时由人工夹持壁板,将待成形铆钉对准旋铆头,完成后移动壁板将下一个待成形铆钉对准旋铆头,正反交替铆接靠人工翻面。设备仅有铆钉旋铆成形功能,铆钉成形的过程由人工根据现场经验控制。待壁板上所有铆钉成形后使用铆钉枪

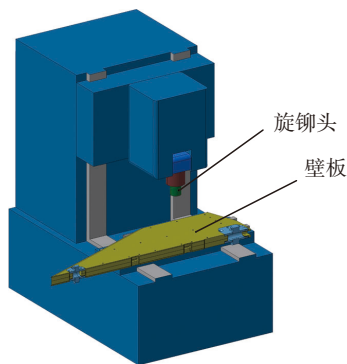


图7 旋铆机铆接壁板

Fig.7 Rotary riveting machine riveting wing panels

将铆钉多余的材料去除。使用传统方法进行壁板旋铆,耗时耗力,质量不稳定。

为提高生产效率,根据壁板组件的外形、结构及加工工艺方法,应该使用自动化旋铆设备代替传统设备完成壁板的铆接^[10]。自动化旋铆设备结构如图8所示,由X轴、Y轴、壁板固定架等组成,壁板借助于安装夹具固定在壁板固定架上。图8中,Y轴组件上安装有旋铆头、顶铁、动力铣头等,实现了模块化集成,各部件的运动由加工程序控制。旋铆头Z向的运动规律参考了数值模拟仿真时得出的数据及规律,并将规律编入Y轴的运动控制器中,可显著提升壁板铆接时的铆钉成形质量。动力铣头的作用一方面是完成壁板上铆钉孔的制孔,另一方面是在铆钉旋铆成形后将高出壁板表面的铆钉墩头部分铣平。模块化的旋铆头、顶铁、动力铣头均由Y轴根据预先编制的程序进行运动及更换。

自动旋铆设备采用数控机床的成熟技术,各运动轴的控制由数控伺服系统来完成,旋铆头、顶铁、动力铣头的更换参照数控机床的换刀流程实现。自动旋铆设备的数控化可实现壁板装配切削加工工艺中各工步的连续操作。使壁板铆接加工的人工作业内容仅为壁板的上架和铆钉的交替放置,其余工作均由设备自动

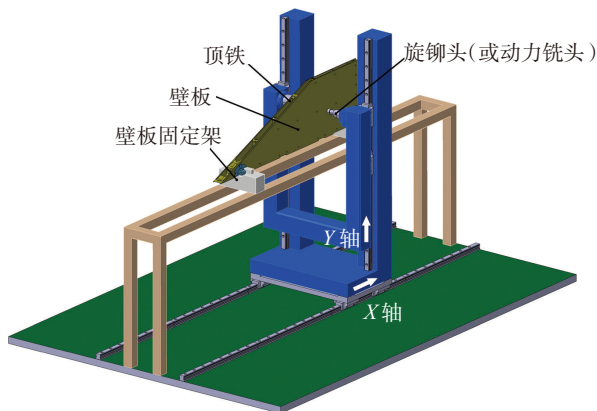


图8 自动化旋铆设备及应用

Fig.8 Automatic riveting equipment and application

完成。壁板加工铆合过程如图8所示,加工工艺流程如图9。

人工将壁板装夹在固定架上并安装到设备上;由设备Y轴上的动力铣头完成壁板上铆钉孔的制孔;由操作工一次完成在壁板正反两面所有铆钉的放置;设备Y轴更换动力铣头,一端安装旋铆头,另一端安装顶铁;Y轴和X轴按照预先编制的程序运动,自动将旋铆头和顶铁移动到壁板上待成形铆钉处;启动设备进行旋铆加工,待一侧壁板的旋铆加工完成后将旋铆头和顶铁位置互换;完成另一侧壁板的旋铆加工;将Y轴上的旋铆头和顶铁更换为动力铣头,将凸出壁板表面的铆钉多余部分铣去;人工将壁板下架将成品从设备上取下。

结论

通过对铆钉旋铆成形的数值模拟仿真分析,可以看出旋铆成形过程较传统的压铆增加了铆杆的旋转运动,使得变形过程的变形区域减小,材料变形量的减小直接决定了旋铆压力的减小,这种变化使其变形规律有别于传统的压铆变形。通过采用点轨迹追踪法对变形区指定点变形过程中的应力变化等进行分析,探讨了铆钉旋铆变形机理。通过分析发现,影响旋铆变形的影响因素较为复杂,除铆钉自身材料特性及旋铆压力

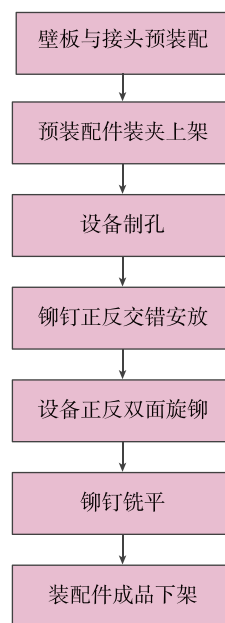


图9 加工工艺流程

Fig.9 Processing process

值大小,旋铆变形还受到诸如摆杆的旋转速度、摆杆摆角等参数的影响。因此借助有限元仿真分析,可更好地揭示变形规律,结合设备自身硬件设定最优的运动参数,大大降低设备开工前所做的实物验证和验证时间,更快地指导工艺,从而提高实际生产效率。

相比传统的旋铆机,运用自动旋铆设备可实现在壁板不翻面的条件下完成两面铆钉的交替旋铆成形。虽相对传统设备有明显优势,但目前的自动化旋铆设备仍存在进一步优

化的空间: 现有设备未能集成自动检测功能, 壁板的上下架及铆钉的放置工作仍然是由人工完成的。后续可通过在设备 Y 轴上加装 CCD 检测装置和铆钉自动送料装置, 并由机器臂实现壁板的上下架的装夹来进一步实现设备智能化。

从技术发展及应用角度分析, 集多功能于一体的数控自动旋铆设备取代单一功能的旋铆机将成为智能制造的趋势与必然。通过应用数字化自动加工设备进行旋铆加工, 可显著提高壁板加工装配效率和铆钉成形质量, 同时大幅降低人工劳动强度。本文通过对某型壁板装配旋铆加工过程进行工艺模拟仿真, 并将虚拟制造与实际制造过程相结合, 是对智能制造的一次有意义的探究。

参考文献

[1] 陈昊, 陈为国, 杨俊国. 旋铆成形过程的数值模拟分析[J]. 机床与液压, 2016, 43(2): 21-24.
 CHEN Hao, CHEN Weigu, YANG Junguo. Numerical simulation of spin riveting forming process[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 43(2): 21-24.
 [2] BURKHALTER H. 巴尔迪克一径向

铆接—满足最精确的铆接成形要求[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 53-54.

BURKHALTER H. Burkhalter-Radial Riveting-meet the most precise riveting requirement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 53-54.

[3] 罗征志, 曹建国, 胡亚民. 摆动辗压成形工艺研究现状及发展[J]. 锻压技术, 2010, 35(2): 13-16.

LUO Zhengzhi, CAO Jianguo, HU Yamin. Present research status and prospect of orbital forming process[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(2): 13-16.

[4] 刘平, 张开富, 李原. 铆接变形及其有限元分析[J]. 航空制造技术, 2008, 51(22): 94-97.

LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Rivet deformation and its FE analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(22): 94-97.

[5] 黄志超, 庞连红, 邱祖峰, 等. 摆碾铆接过程数值模拟分析[J]. 机械设计与制造, 2012, 23(20): 193-195.

HUANG Zhichao, PANG Lianhong, QIU Zufeng, et al. Numerical simulation and analysis for rolling and riveting process[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, 23(20): 193-195.

[6] HYUN-JIKCHO, JEONG-SEOKOO. Orbital forming simulation of automotive hub bearing using the explicit finite element method[J]. International Journal of Modern Physics B, 2008, 22(9): 1626-1633.

[7] 刘劲松, 肖寒, 段小亮. 材料成型与控制工程领域的典型实例专业精讲: Simufact 在材料成型与控制工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

LIU Jinsong, XIAO Han, DUAN Xiaoliang. Typical examples of materials molding and control engineering specialties: Application of Simufact in material forming and control engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.

[8] 李兵, 游国强, 龙思远, 等. 铝合金旋铆连接过程数值模拟分析[J]. 特种铸造及有色金属, 2010, 30(4): 314-317.

LI Bing, YOU Guoqiang, LONG Siyuan, et al. Numerical simulation of revolving-riveting process for aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(4): 314-317.

[9] KIM S Y, LM Y T. Three-dimensional finite element analysis of non-isothermal shape rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(1): 57-63.

[10] 胡亚民, 姚万贵, 冯文成. 我国摆动辗压技术现状及展望(一)[J]. 锻压装备与制造技术, 2011, 46(1): 9-12.

HU Yamin, YAO Wangui, FENG Wencheng. Present situation and prospect of the technology of rotary forging in China[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2011, 46(1): 9-12.

通讯作者: 陈昊, E-mail: chen8913@126.com。

Research on Application of Automatic Spin Riveting Process of Wall Panel

CHEN Hao, JIA Weifeng, SUN Yuewei

(AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Nanchang 330024, China)

[ABSTRACT] Spin riveting is a kind of riveting methods, in which the rivet shaft presses the local of rivet, and swings continuously around a central pivot until rivet shaped. After forming, the rivet material is continuous without breaking, bending, bulging, and the parts connected with the rivet are not deformed. In the 2017 materials as the object of $\phi 6$ rivets, based on Simufact. Forming software, using the method of tracking its spin riveting and the numerical simulation on forming process, extracting the stress values of rivets during certain points of the deformation zone, and the data is transformed to the equivalent stress-travel curve, then explore deformation mechanism of spin riveting. According to the structure of the wind panel and its assembly process, the deformation mechanism of the spiral riveting is applied to the rotary riveting equipment. By optimizing the structure of the riveting equipment, the CNC technology is introduced into the equipment to realize automatic processing and improve the efficiency and quality of wall panel processing.

Keywords: Spin riveting; Riveting; Numerical simulation; Deformation analysis; Automation

(责编 文竹)