DOI: 10.3901/JME.2013.24.024

大型复杂型面铝合金翻边件电磁成形 塑性流动行为研究*

黄亮^{1,2} 骆文勇^{1,2} 刘贤龙^{1,2} 李建军^{1,2}

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 武汉 430074;
2. 华中科技大学材料科学与工程学院 武汉 430074)

摘要: 大型复杂型面铝合金翻边件电磁成形是一个电磁场和结构场耦合作用下的复杂塑性成形过程。由于大型复杂型面的影响,使得铝合金翻边件在电磁成形过程中的塑性流动行为与传统带凸模翻边成形不同。基于松散耦合法建立耦合电磁场和结构场的大型复杂型面铝合金翻边件电磁成形有限元模型,研究采用1层、2层和3层平板线圈电磁翻边下的板料塑性流动行为,并采用试验研究揭示了不同压边力控制下板料法兰部分塑性流动规律。结果表明,当采用3层平板线圈时,翻边件的复杂型面部分完全贴膜,法兰部分材料进入凹模腔的部分更多,促使板料发生更多的塑性流动;不同压边力控制下,法兰部分由塑性流动产生不同的工件形式,在压边力不足时,法兰部分产生明显的起皱现象;通过合理的压边力控制,可得到贴膜性良好的大型复杂型面铝合金翻边件。

关键词: 大型复杂型面 翻边件 电磁成形 塑性流动

中图分类号: TG391

Research on Plastic Flow Behaviors for Hole Flanging Part of Aluminum Alloy with Large Complicated Profiles by Electromagnetic Forming

HUANG Liang^{1,2} LUO Wenyong^{1,2} LIU Xianlong^{1,2} LI Jianjun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;
2. College of Materials Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Hole flanging part of aluminum alloy with large complicated profiles by electromagnetic forming is a complex metal forming process coupling electromagnetic field and constructive field. Due to the effects of large complicated profiles, plastic flow behaviors during the forming process are different from traditional flanging forming. A finite element model for hole flanging part of aluminum alloy with large complicated profiles by electromagnetic forming is established based on loose coupling simulation method, and then plastic flow behaviors on condition of one layer flat coil, two layers flat coil and three layer flat coil are investigated, and subsequently plastic flow rules of flange parts under different pressures are revealed by experiments. The results are as follows: Large complicated profiles are completed closed to female die surfaces on condition of three layer flat coil, flange parts are put into female die and plastic flow phenomenon is more obvious; flange parts are grown to different modes under different pressures, and obvious wrinkling phenomenon for flange parts appear when pressures are less; hole flanging part of aluminum alloy with large complicated profiles more closed to female die surfaces is obtained by controls of reasonable pressures.

Key words: Large complicated profiles Hole flanging part Electromagnetic forming Plastic flow

0 前言

带复杂型面的大型铝合金翻边零件是航空、航

天等国防领域中广泛应用的一类零件,例如,在运载火箭和飞机中,与大型管路系统连接的燃料贮箱的箱体部分,需要在其上成形出适合于有限空间内的带复杂型面、大尺寸、高精度且具有高强度、较高疲劳性能的翻边零件。在采用常规翻边工艺加工这类翻边件时,需要一套大型工装(包括带大尺寸工作台面的压力机和带复杂型面的大型凸凹模);常温

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB012802)和材料成形与模具技术国家重点实验室自主研究课题(2012-9)资助项目。20130228 收到初稿, 20130903 收到修改稿

下, 铝合金材料塑性较差, 伸长率较小, 成形极限较低, 导致在成形过程中存在材料塑性流动困难且难以控制, 应力、应变分布不均匀, 以及工件容易拉裂、厚度不均匀等缺陷。从而使得工艺过程复杂, 生产效率低, 加工成本高, 不符合快速、精确、高效、低耗的绿色柔性成形要求。

电磁成形是一种利用脉冲电磁力使金属板料发生塑性变形的高速率成形方法^[1], 其原理如图 1 所示。通过高压电容器对线圈快速放电产生脉冲磁场, 从而在金属板料上产生感应电流, 并形成脉冲电磁力, 使板料发生塑性变形, 获得所需形状的零件。由于电磁力是瞬间产生的, 可使板料应变速率达 10^3 以上, 能极大地提高难变形轻合金材料的成形极限, 且成形件回弹小、精度高、表面质量好、应变分布均匀。同时, 电磁成形装备结构简单, 工艺柔性好, 易于控制, 且只需要通过单模成形, 加工成本低。因此, 电磁成形技术可为大型复杂型面铝合金翻边件的成形问题提供有效的解决途径。

图 1 电磁成形原理示意图(板料电磁成形)

由于电磁成形涉及材料学、电磁学和塑性动力学等多学科的交叉融合, 成形机理和规律复杂, 不能用单独的解析方法和一般数值模拟方法解决, 因此, 国内外学者主要用基于耦合场分析的有限元法和试验研究电磁成形技术。在数值模拟方法方面, FENTON 等^[2]采用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)有限差分算法建立了板料电磁成形模型, 预测了冲击波的传播和薄壁构件的变形特征。STIEMER 等^[3]建立了耦合热力学和电磁学的电磁成形有限元模拟, 对板料进行拉格朗日网格划分和对电磁场进行 ALE 算法计算, 获得了精确高效的耦合场之间的数据转换。OLIVEIRA 等^[4]基于 ANSYS 对板料电磁成形进行模拟分析, 实现了电磁场和结构场之间的数据传递。于海平等^[5]基于 ANSYS 计算作用在工件上的瞬态磁场力为边界条件模拟电磁成形, 实现了变形与磁场力之间的耦合数值模拟。XIN 等^[6]用 DANAFORM 软件进行了 LY12 板材盒形件磁脉冲成形数值模拟。崔晓辉等^[7]采用松散耦合场分析了平板电磁自由胀形过程, 使

有限元模型中空气网格能够随着板料同步变形而不发生畸变。在塑性流动和成形极限方面, 孟正华等^[8]通过镁合金板材温电磁胀形试验分析了工艺参数对成形的影响规律。THOMASA 等^[9]通过分析不同线圈和电流条件下缩颈应变和成形极限, 揭示了高速成形下板料成形性能提高的原因。在电磁翻边成形方面, SHANG 等^[10]试验得出用电磁成形进行板料翻边可大大降低产生裂纹的趋势。JIMBERT 等^[11]对 6016T4 板料电磁翻边进行了数值模拟和试验研究, 得到贴膜性能良好的翻边件。余本刚等^[12]将电磁场耦合分析的电流密度输入电磁翻边模拟分析中, 得到了电磁场的时间和位置特性, 揭示了电场和磁场的变化规律。张文忠等^[13]研究了 5A06 板料磁脉冲成形圆孔翻边工艺, 发现电磁成形可以显著地提高铝合金的塑性和圆孔翻边性能。

综上, 虽然国内外学者已经对电磁成形/电磁翻边进行了大量研究工作, 提出了建立和计算耦合场数值模型的各种方案, 进行了理论解析与试验方法比较。但已有工作仅限于小尺寸零件电磁成形/电磁翻边工艺上, 没有对大型复杂型面电磁翻边过程中多场耦合作用下塑性变形机理和规律做系统深入研究。因此, 为推动大型复杂型面铝合金翻边件电磁成形技术的发展, 亟须开展这方面的研究工作。

本文首先建立大型复杂型面铝合金翻边件电磁成形的电磁场模型和结构场模型, 接着基于松散耦合场数值求解工件变形结果, 研究采用 1 层、2 层和 3 层平板线圈电磁翻边下板料塑性流动行为, 及分析 3 层平板线圈下电磁翻边件塑性流动均匀性, 然后采用 3 层平板线圈试验研究不同压边力控制下, 板料法兰部分由塑性流动产生的不同工件形式, 从而得到合理的压边力控制下贴膜性良好的大型复杂型面铝合金翻边件。

1 电磁翻边过程数值模拟

1.1 有限元建模

在本文中, 基于 ANSYS 多物理场模块建立电磁翻边成形的耦合数值求解模型, 采用松散耦合场算法计算板料变形过程^[2, 5, 7], 电磁场计算通过电流加载来实现, 将得到的电流载荷曲线分成若干时间段, 分别加载到电磁场模型中计算出相应的洛伦兹力, 然后将计算的洛伦兹力依次加载到板料上, 从而在结构场中计算板料的变形情况。

1.1.1 电磁场建模

电磁场分析的主要理论基础为麦克斯韦方程组, 给出以下三个假设: ① 电流在线圈中沿周向均

匀分布,其他方向电流忽略不计;② 材料为各向同性,电导率和磁导率恒定;③ 变形过程中位移电流忽略。因此,各参数关系可表示为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{J} = \sigma_{\omega}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\mathbf{J}$ 为电流密度, σ_{ω} 为板料的电导率。

板料上的磁场力密度计算如式(2)所示

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \quad (2)$$

以上计算出来的电磁力将作为结构场中的载荷来计算板料的变形。电磁翻边成形的电磁场模型如图 2 所示,电磁场中的板料、线圈和近场空气都采用 plane13 单元,远场空气采用 infin110 单元,而在结构场分析中采用 plane182 单元。电磁翻边成形数值模型的基本参数如表 1、2 所示,其中,线圈材料为纯铜 T2,板料材料为铝合金 5A06。由于电磁成形中驱使板料变形的主要是第 1 个波形的电流,因此电流载荷选取计算出的电流曲线的第 1 个波形。

图 2 电磁翻边成形的电磁场模型

表 1 线圈基本参数

参数	数值
电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	1.75×10^{-8}
相对磁导率	1
截面积/ mm^2	3×6

表 2 板料基本参数

参数	数值
外径/mm	640
内径/mm	180
厚度/mm	5
电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	6.73×10^{-8}
相对磁导率	1
弹性模量/GPa	70
密度/(g/mm^3)	2.64
泊松比	0.35
屈服强度/MPa	230

1.1.2 结构场建模

结构场分析中板料的几何模型可以继承电磁场中的模型,并以电磁场中计算出的随时间变化的节点力作为载荷,同时还需要加载压边装置和凹模,压边圈与板料之间采用间隙控制。电磁翻边成形的结构场模型如图 3 所示。

图 3 电磁翻边成形的结构场模型

材料在高速下的动态响应与传统成形有很大区别,特别是板料的应变速率对成形有很大影响,因此在模拟中采用 Cowper-Symonds 本构模型进行计算^[1],其表达式为

$$\sigma = \sigma_y \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{p} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中, σ_y 为准静态下的流动应力, $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率, p 和 m 为材料的应变率相关常数,对于铝合金材料,通常取 $p=6\ 500$, $m=0.25$ 。

1.2 模拟结果与讨论

基于相同的放电电流条件下,分别采用 1 层、2 层和 3 层平板线圈进行电磁翻边模拟,因为如果再增加线圈层数,所增加的线圈距离板料较远,不会对成形产生作用。线圈所采用导线横截面为 $3\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,轴向间距为 2 mm ,径向为 5 mm ,外径为 398 mm ,每层 10 匝。图 4 为分别采用 1 层、2 层和 3 层平板线圈的电磁翻边板料位移模拟结果。由图 4 可知,采用一层平板线圈电磁翻边模拟时,所得电磁力较小,板料变形量较小,已变形板料几乎没有贴膜,不能达到最终的成形要求;压边环下的法兰部分板料没有发生变形,也没有发生塑性流动进入凹模腔中。采用 2 层平板线圈电磁翻边模拟时,翻边零件的复杂型面部分已经基本完成成形步骤,已变形板料部分完全贴膜,但翻边孔的边缘部分没有达到变形要求;压边环下的法兰部分板料发生部分变形,由于这种变形条件下的电磁力大于采用 1 层平板线圈电磁翻边的电磁力,所以法兰部分材料部分进入凹模腔,发生板料的塑性流动,从而增大塑性变形区并使板料变形更均匀。采用 3 层平

板线圈电磁翻边模拟时, 翻边零件的复杂型面部分已完全完成成形步骤, 已变形板料完全贴膜, 虽然翻边孔的边缘部分没有达到变形要求, 但比采用 2 层平板线圈电磁翻边时更靠近凹模腔直壁区, 之后仅需电磁整形即可让边缘部分完全贴膜, 从而达到翻边件复杂型面和直壁区两部分都贴膜的成形要求; 压边环下的法兰部分板料发生部分变形, 由于这种变形条件下的电磁力大于采用 1 层、2 层平板线圈电磁翻边的电磁力, 所以法兰部分材料进入凹模腔的部分更多, 促使板料发生更大的塑性流动, 从而增大塑性变形区。因此, 采用 3 层平板线圈进行大型复杂型面铝合金电磁翻边是更合理的。

图4 电磁翻边板料位移模拟结果(mm)

采用 3 层平板线圈电磁翻边模拟时, 电磁力的

矢量分布如图 5 所示。由图 5 可知, 电磁力的方向是垂直于板料平面的, 与使用凸模冲压成形相似, 但最大电磁力出现在线圈中部, 因此, 主要的塑性变形发生在线圈中部对应的板料位置, 翻边孔端部的变形是由于中部板料的拉拽作用产生塑性流动而发生。

图5 电磁力矢量分布(3 层平板线圈, N/m)

采用三层平板线圈电磁翻边模拟时, 板料的等效应力和等效塑性应变分布如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知, 在整个电磁翻边成形过程中, 等效应力分布是较为均匀的, 特别是由于电磁成形有抑制起皱和有效控制回弹的作用, 因此在法兰部分和复杂型面部分等效应力的分布更均匀, 没有大的应力梯度形成, 只在翻边孔靠经线圈的表面部分有少许应力集中。由图 7 可知, 由于电磁成形作为体积力均匀作用到变形板料上, 所以除了翻边孔端部等效塑性应变较大, 发生大变形的复杂型面部分和其他翻边孔部分的等效塑性应变是均匀分布的。

图6 板料等效应力分布(3 层平板线圈, MPa)

图7 板料等效塑性应变分布(3 层平板线圈)

2 电磁翻边过程试验

2.1 试验材料和方法

2.1.1 试验材料

试验采用中铝公司提供的铝合金 5A06 板料, 其热处理状态为 H112 以及力学性能如表 3 所示, 化学成分如表 4 所示。通过线切割把板料加工为外径 640 mm、内径 180 mm、壁厚 5 mm 的初始毛坯。

表 3 铝合金 5A06 力学性能

参数	数值
抗拉强度/MPa	350~355
屈服强度/MPa	220~225
伸长率(%)	18.0~19.5

表 4 铝合金 5A06 化学成分 %

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
质量分数	0.12	0.31	0.06	0.62	6.38	0.01	0.05	余量

2.1.2 试验方法及工装

基于以上的数值模拟结果, 试验采用 3 层同心圆线圈的方案进行 5A06 板料电磁翻边试验, 获得不同压边力条件下的试验结果, 并对翻边零件法兰处金属的塑性流动规律进行分析。然后, 通过调整合适的压边力, 获得最佳的带复杂型面的大型铝合金翻边零件, 以及分析了翻边件零件的贴膜性。图 8 为大型复杂型面 5A06 铝合金电磁翻边成形工装示意图, 其中图 8a 所示为将凹模固定在 250 kN 压力机平台上, 图 8b 所示为凹模和放电线圈。

图 8 大型复杂型面 5A06 铝合金电磁翻边成形工装示意图

2.1.3 试验设备

本研究采用的试验设备是华中科技大学国家脉冲强磁场科学中心 200 kJ 电磁成形机(图 9), 主要参数如下: 电源电压为 380 V, 最大充电电压为 25 kV, 最大放电能量为 200 kJ, 电容器总电容为 640 μ F。

2.2 试验结果与讨论

图 10 为不同压边力条件下的成形翻边件。由

图 9 200 kJ 电磁成形机

图 10 可知, 第 1 幅图是初始板料, 在其他 3 幅图从上到下压边力逐渐减小, 且由于电磁力的拉拽作用使得铝合金板料法兰部分逐渐进入凹模腔而发生塑性变形, 发生了明显的塑性流动现象, 从而弥补翻边孔端部金属的减薄, 保证最终成形工件壁厚均匀, 并且, 翻边零件的直径从 640 mm 最终减小到 605 mm; 由于压边力不足, 翻边零件的法兰部分产生了明显的起皱现象, 这传统带凸模翻边成形是一致的。通过试验结果与模拟结果对比发现, 大型复杂型面铝合金翻边件在形状尺寸上是一致吻合的, 仅有工件的孔边缘部分需要进行电磁整形, 从而达到翻边件复杂型面和直壁区两部分都贴膜的成形要求。

图 10 不同压边力条件下的成形翻边件

通过合理调整压边装置施加到法兰部分的压边力, 得到了成形良好的大型复杂型面铝合金翻边件, 如图 11a 所示, 从而验证了以上数值模拟的可靠性。利用三维反求技术, 测量出已成形的翻边零件与模具接触的表面形状, 然后进行贴膜性分析, 如图 11b 所示, 可知, 除了在法兰部分贴膜性稍差, 整个翻边件贴膜性良好, 满足实际成形要求。

(a) 大型复杂型面铝合金翻边件 (b) 贴膜性分析
图 11 成形良好的大型复杂型面铝合金翻边件及其贴膜性分析

3 结论

(1) 分别采用 1 层、2 层和 3 层平板线圈进行电磁翻边模拟, 发现当采用 3 层平板线圈时, 翻边零件的复杂型面部分完全贴膜, 压边环下的法兰部分板料发生部分变形, 与采用 1 层和 2 层平板线圈相比, 法兰部分材料进入凹模腔的部分更多, 促使板料发生较大的塑性流动。

(2) 通过试验分析发现, 由于电磁力的拉拽作用使得法兰部分板料逐渐进入凹模腔而发生塑性变形, 发生了明显的塑性流动现象, 且由于压边力不足, 翻边件的法兰部分产生了明显的起皱现象。

(3) 通过合理调整压边装置施加到法兰部分的压边力, 得到了成形良好的大型复杂型面铝合金翻边件, 且除了在法兰部分贴膜性稍差, 整个翻边件贴膜性良好, 满足实际成形要求。

参 考 文 献

- [1] 李春峰. 高能率成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- LI Chunfeng. High energy rate forming[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
- [2] FENTON G K, DAEHN G S. Modeling of electromagnetically formed sheet metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 75 (1-3): 6-16.
- [3] STIEMER M, UNGER J, SVENDSEN B, et al. An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198(17-20): 1535-1547.
- [4] OLIVEIRA D A, WORSWICK M J, FINN M, et al. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: Free-form and cavity fill experiments and model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(1-2): 350-362.
- [5] 于海平, 李春峰, 李忠. 基于 FEM 的电磁缩径耦合场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 231-234.
- YU Haiping, LI Chunfeng, LI Zhong. Numerical simulation of coupled fields of electromagnetic forming for tube-compression based on FEM[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 231-234.
- [6] XIN L, JINTAO H, KEBING C. Research and deformation simulation on electric-magnetic forming process of metal plate[C]//Proceedings of the 6th ICTP. Nuremberg, 1999: 2483-2488.
- [7] 崔晓辉, 莫健华, 王波, 等. 基于松散耦合法的电磁平板成形 3D 有限元仿真[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 45-51.
- CUI Xiaohui, MO Jianhua, WANG Bo, et al. Loose coupling simulation for electromagnetic sheet forming: 3D finite element method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 45-51.
- [8] 孟正华, 黄尚宇, 胡建华, 等. 镁合金板材温热电复合成形试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 45-51.
- MENG Zhenghua, HUANG Shangyu, HU Jianhua, et al. Experimental research on warm and electromagnetic hybrid forming of magnesium alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 45-51.
- [9] THOMAS J D, SETH M, DAEHN G S, et al. Forming limits for electromagnetically expanded aluminum alloy tubes: Theory and experiment[J]. Acta Materialia, 2007, 55(8): 2863-2873.
- [10] SHANG J, WILKERSON L, HATKEVICH S. Hemming of aluminum alloy sheets using electromagnetic forming[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(8): 1370-1377.
- [11] JIMBERT P, EGUIA I, PEREZ I, et al. Analysis and comparative study of factors affecting quality in the hemming of 6016T4AA performed by means of electromagnetic forming and process characterization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 916-924.
- [12] 余本刚, 张棋飞, 舒行军, 等. 基于 ANSYS 对电磁翻边成形的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 91-93.

(下转第 38 页)