

工艺优化设计

大口径铝合金波纹管电磁胀形数值模拟

洪秀冬¹, 黄亮¹, 李建军¹, 马飞², 林磊²

- (1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;
2. 中国航天科技集团公司长征机械厂, 成都 610100)

摘要: **目的** 研究大口径铝合金波纹管电磁成形过程及工艺参数对成形效果的影响规律。**方法** 针对波纹管现有制造工艺——压弯和焊接复合成形存在压痕严重、焊缝多和可靠性不高等问题, 提出采用电磁成形波纹管的方法, 并基于 ANSYS 建立了波纹管电磁胀形的三维有限元分析模型。**结果** 揭示了波纹管电磁胀形过程中的应力应变分布规律, 发现波纹区域和过渡圆角区域是应力和应变集中区。采用单因素实验方法, 获得了放电电压和线圈匝数对成形质量的影响规律。**结论** 在波纹管电磁胀形过程中, 波纹区域的应力和应变均呈圆环带状分布, 波纹管的壁厚在波纹的波峰处达到最小, 最大减薄率为 10.67%。放电电压和线圈匝数都存在一个最佳值。放电电压过小时, 成形不足, 放电电压过大时, 工件高速碰撞模具, 引起较大反弹, 导致最终贴模性较差; 线圈匝数也对成形质量有一定的影响, 在本次模拟实验中, 11 匝线圈作用下的工件贴模性最佳。

关键词: 大口径铝合金波纹管; 电磁胀形; 贴模性; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.001

中图分类号: TG391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)04-0001-07

Numerical Simulation of Electromagnetic Bulging of Large Diameter Aluminum Alloy Bellows

HONG Xiu-dong¹, HUANG Liang¹, LI Jian-jun¹, MA Fei², LIN Lei²

- (1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Changzheng Machinery Factory, China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, China)

ABSTRACT: To study electromagnetic forming of large diameter aluminum alloy bellows and the influence of processing parameters, a method for electromagnetic shaping bellows was proposed with respect to the problems such as severe indentation, too much welding seams and poor reliability of current bellows in the manufacturing process---bending and welding composite forming, and a three dimensional finite element analysis model of electromagnetic forming of bellows was established based on the ANSYS. By revealing the distribution law of stress and strain in electromagnetic bulging of bellows, the study showed that the wave region and the transition fillet region were stress and strain concentration zone. The influence of discharge voltage and coil turns on the forming quality was obtained by single factor experimental design method. In the electromagnetic bulging of bellows, the stress and strain of the corrugated area are distributed in circular ring, and the wall thickness of bellows reaches the minimum at the crest of the wave, the maximum thinning rate is 10.67%. There is an optimal value of the discharge voltage and the number of turns of the coil. The forming is sufficient when discharge voltage is too small; when the discharge voltage is too large, the workpiece impacts die with high speed, causing large rebound and resulting in poor fittability; The number of turns of the coil also has a certain influence on the forming quality. In this experiment, the fittability is the best under 11 turns of coil.

KEY WORDS: large diameter aluminum alloy bellows; electromagnetic bulging; fittability; numerical simulation

收稿日期: 2016-05-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) (2011CB012802); 国家自然科学基金 (51575206); 中国航天科技集团公司航天科技创新基金 (CASC150704)

作者简介: 洪秀冬 (1991—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向为板料冲压成形。

通讯作者: 黄亮 (1981—), 男, 四川自贡人, 华中科技大学副教授, 主要从事金属塑性成形技术及模具 CAD/CAM 等方面的研究。

铝合金波纹管件具有耐腐蚀、质轻、综合力学性能较好等优点,在军事国防、航空航天、油气运输等领域得到了广泛的应用。目前铝合金波纹管件采用压弯和焊接复合成形,其存在的主要问题如下:波纹管在成形过程中,首先在平板上压筋,而平板压筋后其型面拱曲严重,导致其在后续压弯弯曲模上逐次压弯时,无法与模具型面完全贴合而产生晃动,从而使得成形后的型面偏扭较为严重,成形精度差^[1];此外,在焊接过程中容易出现焊接裂纹、未焊透、夹渣、气孔和焊缝外观缺欠等缺陷^[2],这些缺陷的存在会降低波纹管的承载能力,容易引起脆断,因此,在生产过程中,需要消耗大量的人力物力去进行缺陷检测。

为避免现有工艺方法的缺点,本文提出将电磁胀形技术应用于铝合金波纹管的制造。电磁成形是通过脉冲电容器放电,使工件与线圈之间产生感应磁场,通过磁场力使金属坯料发生塑性变形。因其成形速率很高,变形时间在微秒级,可显著提高材料的塑性变形能力,且零件尺寸精度高,模具简单,容易实现复合加工,使其成为了一种重要的金属成形工艺。

目前,国内外已有较多学者对管件电磁成形进行了研究。Golovashchenko 等人^[3]在比较了铝、铜、钢和钛合金等几种材料的成形性能后,发现电磁成形铝合金可以使成形极限相对于传统成形提升 2.5 倍。于海平等人^[4]采用数值模拟方法分析电磁缩径过程,发现当工件变形量较大时,全耦合法模拟结果比半耦合法模拟结果更准确,而当变形量较小时,两者的模拟结果接近。LEE 等人^[5]将磁矢量位引入到麦克斯韦方程组,采用无耦合法分析了电磁管件的胀形过程,有限元分析精度有一定的提高。YU 和 LI 等人^[6]采用顺序耦合法分析了线圈长度对管件缩径的影响,发现最大磁压力与管件的长度成正比,线圈长度增加使放电电流幅值减小,能量利用率也降低了。伊朗的 M. A. Bahmani 等人^[7]运用 MAXWELL 软件,对带有集磁器的管件磁脉冲连接系统进行了 2D 和 3D 电磁场模拟仿真,发现使用集磁器,磁通量提高了 40%~50%,相应的磁场力会提高 2 倍左右。李忠等人^[8]分析了管坯与线圈的相对长度对变形均匀性的影响,发现了使管坯变形均匀的管坯与线圈的最佳相对长度。赵志衡^[9]对管件胀形的磁场力的研究表明:胀形时磁场力是体积力,在管件厚度上呈不均匀分布,由内表面向外逐渐衰减,这一点对加深管件电磁成形机理的认识是非常重要的。赵志衡等人^[10]研究表明,线圈、工件的结构参

数和相对安装位置对线圈的磁压力分布影响很大;将受力分布引入成形线圈设计,可以有效提高实验中线圈的使用寿命。

由上述分析可知,一些学者对管件电磁成形做了不少研究,但一般都集中于管件自由胀形,对于管件有模电磁成形的研究工作并不多见。本文为避免传统波纹管制造的诸多缺陷,提出采用电磁胀形波纹管,建立电磁成形波纹管的三维有限元模型,分析其成形过程中的应力和应变规律;采用单因素实验方法,对放电电压和线圈匝数对铝合金波纹管电磁胀形形成质量的影响规律进行研究。

1 研究方法

大口径铝合金波纹管电磁胀形过程涉及材料非线性、几何非线性和边界条件的非线性,是一个电磁场、结构场等多场、多参数耦合的复杂弹塑性变形过程。理论解析法的求解直接,能够给出结果与参数之间的具体关系,对于揭示变形的力学性质和指导实践有着很重要的实际作用。由于解析法是经过很多简化过程得到的,对于稍微复杂的问题,求解复杂,实际操作起来难度较大;实验研究的结果准确可靠,能够直接应用于生产,但大多用试错法,不仅耗费大量的人力物力,而且延长了产品的生产周期。

有限元数值模拟可以直观分析加工过程中任意位置材料的流动和变形形态,为提高生产效率,本文采用数值模拟方法进行相关研究。

1.1 有限元建模

大口径铝合金波纹管电磁胀形是一个高速率成形过程,成形过程中包含大塑性变形和复杂的接边界条件。本文基于多物理场分析平台有限元软件 ANSYS,采用松散耦合法对大口径铝合金波纹管电磁成形进行模拟。计算思路为:在每一时间步内,先应用数值模拟方法计算电磁成形的磁场和磁场力,然后把磁场力施加到工件上,经结构场计算求得工件变形。

研究所采用的材料是铝合金 5A06,为 Al-Mg 系防锈铝。管坯外径为 399.4 mm,壁厚为 2.7 mm,胀形高度为 18 mm,过渡圆角半径为 12 mm,凸出部分半径为 22.5 mm,2 个波纹之间的中心距离为 150 mm。图 1 为目标成形的大口径铝合金波纹管零件的示意图。波

纹管各个波纹均一致,只需提取局部塑性变形区进行研究,因此,本文取一个波纹段来研究大口径铝合金波纹管电磁胀形过程的成形机理和变形规律。

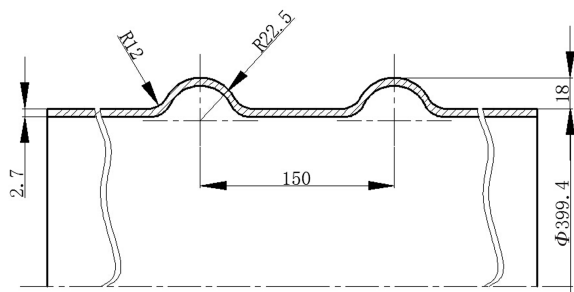


图1 大口径铝合金波纹管零件图

Fig.1 Part drawing of large diameter aluminum alloy bellows

1.1.1 电磁场建模

管件电磁胀形的几何模型如图2a所示,线圈由截面为3 mm×6 mm的纯铜T2绕制而成,匝数为11,长度为63 mm。根据图2a所示的几何模型建立3D电磁场模型,网格模型如图2b所示。

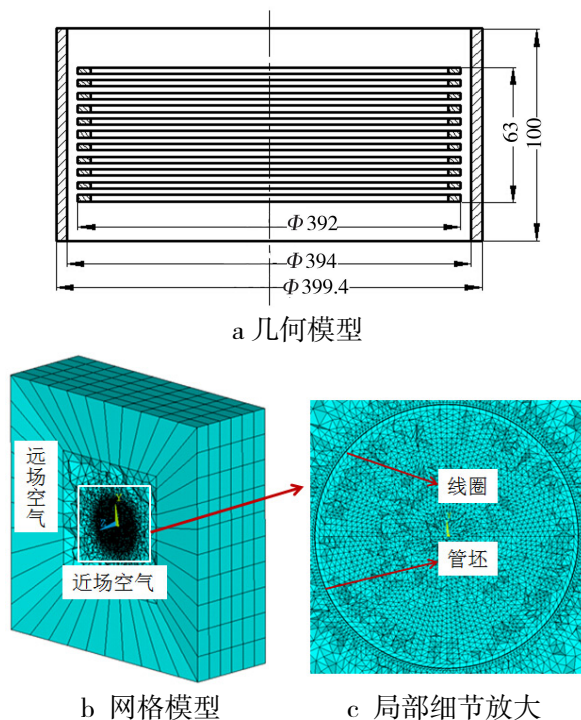


图2 波纹管电磁胀形的电磁场模型

Fig.2 Electromagnetic field model of electromagnetic bulging of bellows

电磁场模型中,管坯、线圈、近场空气等采用Solid97单元,远场空气采用Infin111单元。大口径波纹管电磁胀形数值模型的线圈材料参数如下:电阻率为 $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$,相对磁导率为1,截面积为3 mm×6 mm;管坯材料参数如下:电阻率为 2.78×10^{-8}

$\Omega \cdot m$,相对磁导率为1,弹性模量为75 GPa,屈服强度为187.5 MPa,密度为2750 kg/m³,泊松比为0.3。由于电流的第一个半波之后,管坯感应产生的电磁力对成形的作用很小^[11],只施加电流波形的第一个半波进行模拟分析,忽略后续电流波形对成形的影响。

1.1.2 结构场建模

结构场中管坯的网格划分可从电磁场中继承得到,只是将其修改为Solid164结构场分析单元,将近场空气、远场空气和线圈设置为Null单元,模具设置为刚体,选择模具单元为Solid164单元。以随时间变化的节点磁场力作为结构分析载荷。大口径波纹管电磁胀形的结构场模型如图3所示。

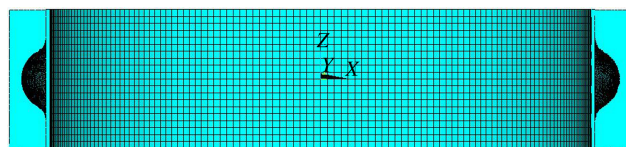


图3 波纹管电磁胀形的结构场模型

Fig.3 Structure field model of electromagnetic bulging of bellows

电磁成形时材料的动态响应和准静态的成形有较大的区别,需要考虑应变率的影响,本文采用一个包括Cowper-Symonds乘子的幂函数本构关系来描述应变率对成形的影响,该函数如下^[12]:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] k [\epsilon_e + \epsilon_p^{\text{eff}}]^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; ϵ_e 为弹性应变; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; k 为强度系数; n 为硬化系数; C 和 P 为应变率参数,对于铝合金而言,一般取 $C=6500 \text{ s}^{-1}$, $P=4$ ^[13];而电磁成形应变率较高,取为 10^3 s^{-1} 量级。在本文中,根据真实应力应变曲线,拟合出强度系数 $k=2.37 \times 10^8$,硬化系数 $n=0.221$ 。

在本次数值模拟中,管坯与模具一直是接触的,将接触设置成自动面面接触,模具为目标体,管坯为接触体,目标体和接触体之间的接触面称为接触对。根据文献[14]和数值模拟经验,将静摩擦因数和动摩擦因数均设置为0.1,滑动界面惩罚因子定义为0.5,其他参数为默认参数。

1.2 工艺参数与质量指标

电磁成形中放电能量通过式(2)来进行计算。

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (2)$$

其中: C 为成形系统的电容; U 为成形系统的放电电压。对于一个确定的成形系统而言, 电容值是确定的, 因此改变放电电压就相当于改变放电能量。而对于电磁成形中的施加载荷的媒介——线圈来说, 不论是从线圈的加工工艺还是从成形质量上来看, 改变线圈匝数是改变线圈参数的最有效的方式。基于此, 选择放电电压和线圈匝数来对波纹管电磁胀形过程进行研究。

为便于后续分析, 将电磁成形后的工件分为几个部分。如图 4 所示, 将变形后的管坯分为 3 个部分, 即工件两端为自由端区域、波纹部分以及过渡圆角区域。成形尺寸精度是衡量零件是否合格的重要指标, 选取管坯外壁的成形形状作为几何尺寸的衡量指标, 并对其壁厚分布情况进行测量分析。

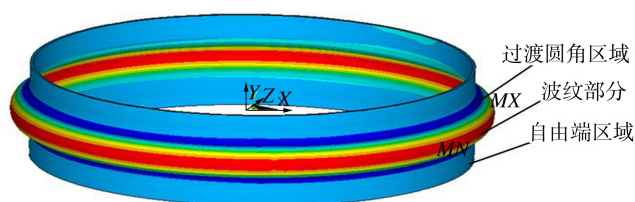


图 4 波纹管变形区域划分

Fig.4 Deformation region division of bellows

2 结果分析

2.1 波纹管电磁成形的应力、应变

图 5 所示为波纹管电磁成形数值模拟过程中的等效应力分布。由图 5a-d 可知, 随着变形程度的增加, 尽管应力大小在不断变化, 但是应力分布规律基本相同, 应力呈圆环带状分布, 且都是从波峰到过渡圆角区域沿轴向方向逐渐减小。

图 6 所示为成形完成时, 波纹管管坯外表面的等效应力沿轴向方向的分布。由图 6 可知, 波纹的波峰位置等效应力较大, 同时在波纹与自由端之间的过渡圆角区域等效应力也有局部应力集中现象。

这是因为在波峰位置变形量最大, 而过渡圆角区域由于曲面形状较复杂, 导致应力相对较大。

图 7 所示为等效塑性应变在成形过程中的分布与变化, 图 8 所示为成形完成后波纹管 X 方向(即径向方向)等效塑性应变沿轴向的分布情况。由图 8 可以看出, 等效塑性应变最大值仍然集中于波纹部分, 波纹以外的部分应变较小, 这是因为电磁成形是高速率成形, 使得波纹区域成为主要受力区, 而波纹

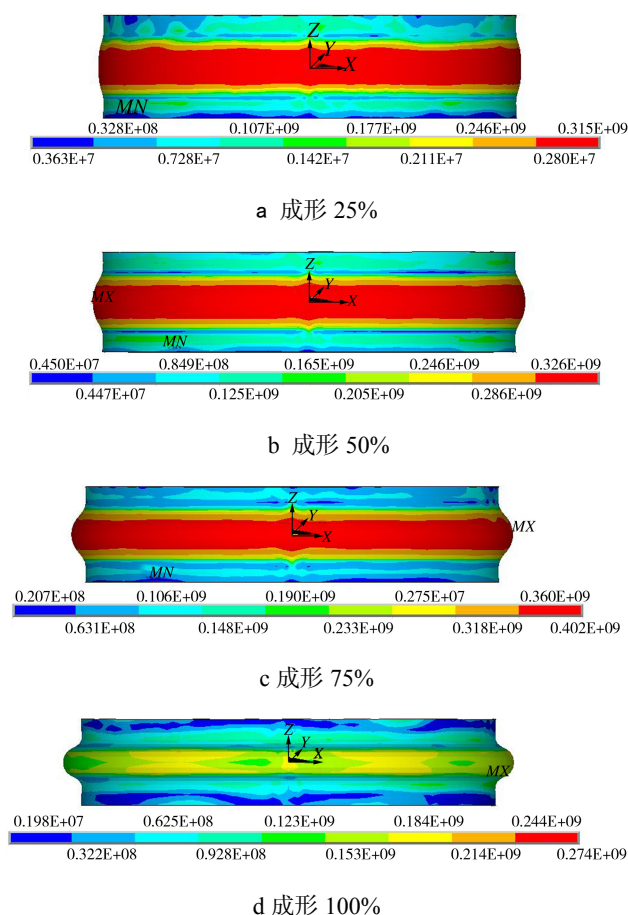


图 5 波纹管电磁成形过程的应力分布

Fig.5 Stress distribution in electromagnetic forming process of bellows

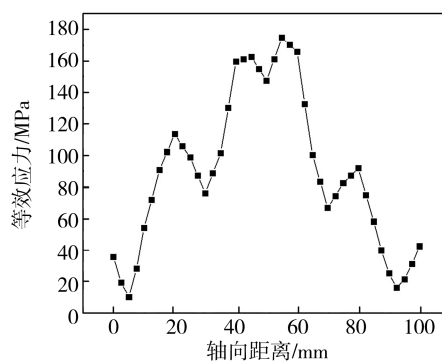


图 6 波纹管电磁成形外表面等效应力沿轴向的分布

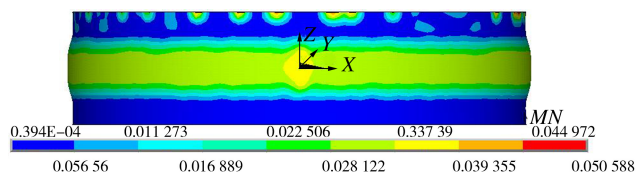
Fig.6 The distribution of equivalent stress along the outer surface of the electromagnetic forming of bellows

以外的自由端部分能够沿着轴向流动补充变形部分的减薄, 从而其应变较小。

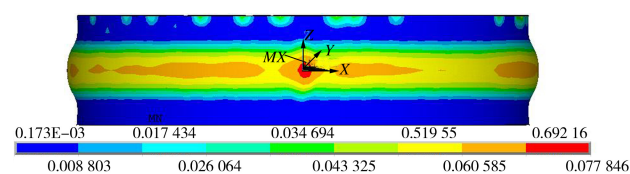
2.2 波纹管电磁胀形后壁厚分布

根据图 9 所示, 选取参考点对波纹管电磁胀形后的壁厚分布进行测量, 位置 1—9 的测量结果分别为

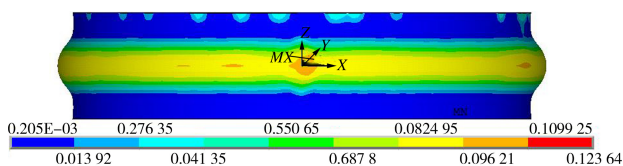
2.668, 2.613, 2.551, 2.521, 2.412, 2.538, 2.503, 2.551, 2.663 mm。根据测量数据可知, 波纹管电磁胀形后, 其最小壁厚为 2.412 mm, 位置在波纹的波峰



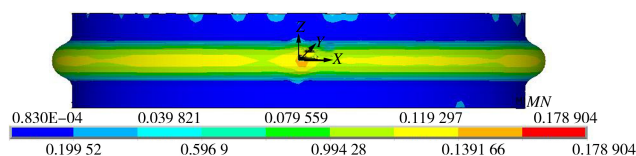
a 成形 25%



b 成形 50%



c 成形 75%



d 成形 100%

图7 波纹管电磁成形过程的应变分布

Fig.7 Strain distribution in electromagnetic forming process of bellows

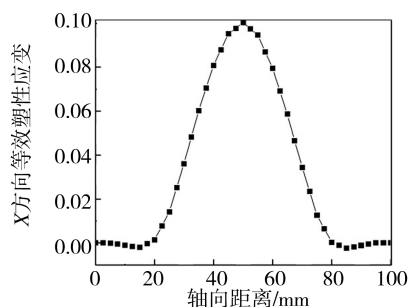


图8 波纹管外表面X方向等效塑性应变沿轴向的分布

Fig.8 The distribution of X direction equivalent plastic strain along the axial direction of the electromagnetic forming of bellows

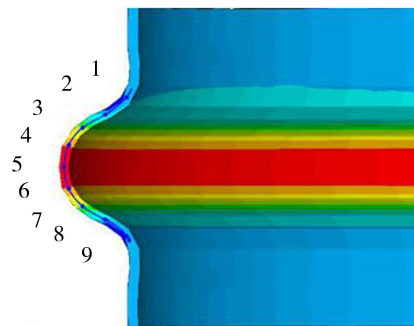


图9 管坯上选取的参考点的示意图

Fig.9 Schematic of reference point selected on the tube

的顶点处, 最大减薄量为 10.67%, 这也可以从等效塑性应变图上看出来, 等效塑性应变在波纹的波峰处最大, 从而其减薄量最大。

2.3 不同放电电压对波纹管贴模性的影响

基于相同的线圈, 通过不同的电压参数, 得到了不同电压下波纹管管坯变形的最终结果。图 10 所示为不同放电电压下的管坯变形后的轮廓与模具轮廓的对比。由图 10 可以看出, 在电压为 10 kV 时, 能量不足以使管坯完全变形。继续加大电压, 在电压为 15 kV 时, 管坯变形后的贴模性较好。如果电压继续加大, 波纹管波峰位置由于吸收的能量较大, 与模具内壁高速碰撞后又反弹回来, 导致波峰处贴合的不理想。此外, 波纹管变形区以外的自由端部分, 由于惯性继续沿轴向方向运动, 从而挤压已变形的波纹区域, 使得过渡圆角区域贴模性变差。

2.4 不同线圈匝数对波纹管贴模性的影响

为了研究线圈轴向长度与管坯变形之间的关系, 基于线圈轴向长度小于、近似等于和大于管坯变形区域长度 3 种情况, 分别选取 9 匝、11 匝、13 匝、15 匝线圈, 来对其成形过程进行模拟分析。由图 11 可知, 在同一放电电压下, 11 匝线圈作用下的管坯变形后的贴模效果最佳, 9 匝线圈作用下的管坯不能完全贴模, 而 13 匝、15 匝线圈作用下的管坯尽管其波纹部分贴合的较好, 但是自由端部分沿轴向继续挤压已成形区, 使得过渡圆角区域附近形成 2 个反向凸起。这是因为线圈匝数越多, 同一电压下产生的电磁力越大, 从而导致管坯在变形时, 自由端部分惯性较大, 在惯性力作用下挤压已成形区, 从而产生上述现象。

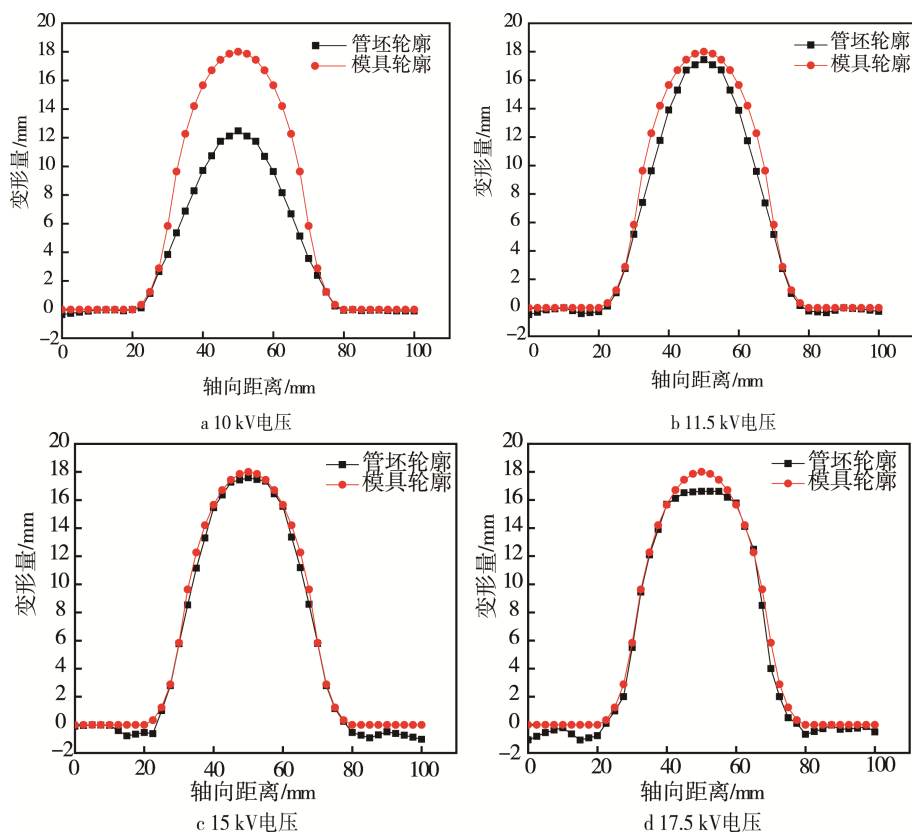


图 10 不同放电电压下波纹管管坯变形后轮廓与模具轮廓对比

Fig.10 Comparison chart of die contour and tube contour after deformation under different discharge voltage

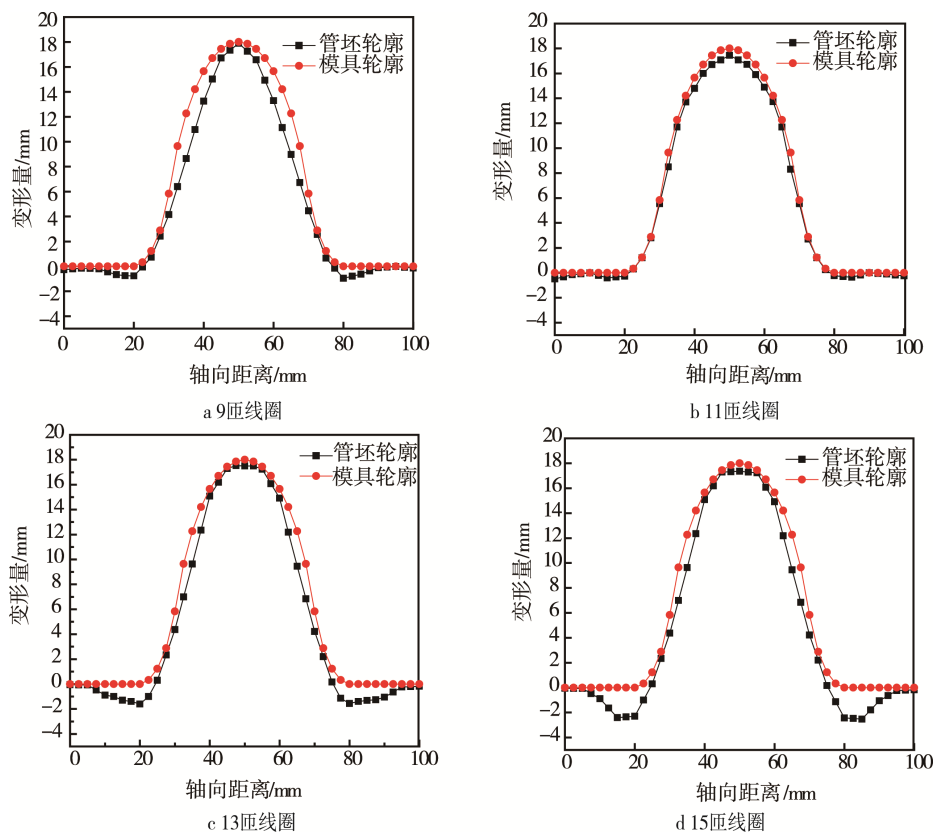


图 11 不同匝数线圈作用下波纹管管坯变形后轮廓与模具轮廓的对比

Fig.11 Comparison chart of die contour and tube contour after deformation under different coil turns

3 结论

1) 基于 ANSYS 平台,建立了波纹管电磁胀形三维有限元模型,数值模拟研究发现,波纹区域和过渡圆角区域是应力和应变集中区,应力和应变呈圆环带状分布;波纹管在波纹的波峰位置处最薄,最大减薄率达到 10.67%。

2) 获得了放电电压和线圈匝数对波纹管电磁胀形成形质量的影响规律。放电电压过大,成形质量较差,过小时,又会出现成形不足,因此存在一个最佳放电电压值。线圈匝数的影响规律大致相同,也存在一个最佳线圈匝数值,在本次模拟中最佳线圈匝数是11匝。

参考文献:

- [1] 彭赫力, 张小龙, 李中权, 等. 波纹管液压成形数值模拟和实验[J]. 航天制造技术, 2015 (2): 23—25.
PENG He-li, ZHANG Xiao-long, LI Zhong-quan, et al. Numerical simulation and experiment of bellows hydraulic forming[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2): 23—25.
- [2] 詹梅, 石丰, 邓强, 等. 铝合金波纹管无芯模缩径旋压成形机理与规律[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(2): 108—115.
ZHAN Mei, SHI Feng, DENG Qiang, et al. The Forming Mechanism and Rule of the Shrinkage of the Aluminum Alloy Corrugated Pipe with no Mandrel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(2): 108—115.
- [3] GOLOVASHCHENKO S F, MAMUTOV V S, DMITRIEV V V, et al. Formability of Sheet Metal with Pulsed Electromagnetic and Electrohydraulic Technologies[C]. Aluminum-2003, San-Diego, 2003: 99—110.
- [4] 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 Hai-ping, LI Chun-feng, LI zhong. Numerical Simulation of Coupled Fields of Electromagnetic Forming for Tube Compression Based on FEM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 231—234.
- [5] LEE S H, LEE D N. A Finite Element Analysis of Electromagnetic Forming for Tube Expansion[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1994, 116(2): 250—254.
- [6] Yu H, Li C F. Effects of Coil Length on Tube Compression in Electromagnetic Forming[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(6): 1270—1275.
- [7] BAHMANI M A, NIAYESH K, KARIMI A. 3D Simulation of Magnetic Field Distribution in Electromagnetic Forming Systems with Field-shaper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2295—2301.
- [8] 李忠, 李春峰, 赵志衡. 电磁胀形管坯所受磁压力的瞬态分布[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(3): 301—305.
LI Zhong, LI Chun-feng, ZHAO Zhi-heng. Transient Distribution of Magnetic Pressure in Tube Electromagnetic Bulging[J]. Materials Science and Technology, 2008, 16(3): 301—305.
- [9] 赵志衡. 管件电磁胀形磁场力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001: 1—100.
ZHAO Zhi-heng. Study on Electromagnetic Force of Tube Electromagnetic Bulging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001: 1—100.
- [10] 赵志衡, 李春峰, 邓将华. 管坯电磁成形时线圈受力的研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 12(4): 387—390.
ZHAO Zhi-heng, LI Chun-feng, DENG Jiang-hua. Study on the Force of Coil in Electromagnetic Forming of Tube[J]. Materials Science and Technology, 2005, 12(4): 387—390.
- [11] 熊威, 甘忠, 许旭东, 等. 基于粘弹塑性模型的时效成形仿真[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 33—37.
XIONG Wei, GAN Zhong, XU Xu-dong, et al. Aging Simulation Based on Visco Elastic Plastic Model[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(2): 33—37.
- [12] 王泽鹏, 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS 13.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
WANG Ze-peng, HU Ren-xi, KANG Shi-ting, et al. ANSYS 13.0/LS-DYNA Examples of Nonlinear Finite Element Analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [13] YU H P, LI C F, LIU D H, et al. Tendency of Homogeneous Radial Deformation during Electromagnetic Compression of Aluminium Tube[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(1): 7—13.
- [14] 张馨蕾. 高强钢板料电磁成形数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
ZHANG Xin-lei. Numerical Simulation of Electromagnetic Forming of High Strength Steel Sheet[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.