

轻质材料成形与连接前沿技术专题

AA5052 铝合金管件电液成形数值模拟与试验验证

蔡达, 杨林桦, 敬笑笑, 崔俊佳, 李光耀

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 建立 AA5052 铝合金管件电液成形数值模型, 分析其成形过程。**方法** 应用 Johnson-Cook 本构方程, 基于 LS-DYNA 平台对成形过程进行数值模拟分析, 然后开展工艺试验, 验证数值模拟模型的可靠性。**结果** 在管件电液自由胀形过程中, 冲击波波阵面波头压力最高, 管壁所受冲击波传递压力的分布关于金属丝几何中心始终是对称的。管坯变形的数值模拟结果与工艺试验结果一致。同时试验和模拟结果对比中, 径向位移的相对误差最大为 5.52%, 管坯轴向收缩率相对误差为 2.53%, 壁厚的相对误差最大为 3.36%。**结论** 所建立的数值模拟模型是可靠的, 可以用来分析 AA5052 铝合金管件电液成形过程。

关键词: 电液成形; AA5052 铝合金管件; 数值模拟; 工艺试验

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.001

中图分类号: TG393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0001-08

Numerical Simulation and Experimental Verification of Electrohydraulic Forming for AA5052 Aluminum Pipe Parts

CAI Da, YANG Lin-hua, JING Xiao-xiao, CUI Jun-jia, LI Guang-yao

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The paper aims to establish the numerical model of electrohydraulic forming of AA5052 aluminum alloy pipe parts and analyze its forming process. The Johnson-Cook constitutive equation was used to simulate the electro-hydraulic forming process of AA5052 aluminum alloy pipe parts based on the LS-DYNA platform. Then process tests were carried out to verify the reliability of the numerical simulation model. During the process of free bulging of the pipe, the shock wave front had the highest pressure, and the distribution of the shock wave pressure on the pipe wall was always symmetrical about the geometric center of the wire. The numerical simulation results of sample deformation profile were in good agreement with the experimental results. In the comparison of the results of experiments and simulations, the maximum relative error of radial displacement was 5.52%. The relative error of axial shrinkage rate was 2.53%. The maximum relative error of wall thickness was 3.36%. The numerical simulation model established in this paper was reliable and could be used to analyze the forming process.

KEY WORDS: electrohydraulic forming; AA5052 aluminum pipe parts; numerical simulation; experiments

随着交通运输等领域对轻量化需求的持续增加, 铝镁轻质合金、高强度钢和复合材料等轻质材料获得了广泛的应用。轻质合金室温下成形性差导致制造难

度显著提升。高能率成形技术在提高此类材料成形效率和成形质量方面具备明显优势, 极具潜力, 能显著改善高强难变形材料制造难题^[1-4]。在高能率成形技

收稿日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(51975202)

作者简介: 蔡达(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为材料电液成形过程与技术。

通讯作者: 李光耀(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源汽车制造、异种材料高效连接技术、汽车轻量化、冲击动力学。

术方面,电液成形是一种典型的可用于运载工具管状类零件制备的技术。

电液成形作为一种典型的高能率成形方法,是将存储在电容器中的电能瞬间释放于电极之间(可通过电极间的金属丝稳定放电状态),通过离子体爆炸过程获得强烈的冲击波载荷,借助液体介质的弱压缩性传递载荷,推动工件发生塑性变形^[5]。与传统准静态成形工艺相比,电液成形具有出色的工艺特点^[6]:①应变速率高,由于利用冲击波载荷加载,成形速度远超准静态成形,能够显著提高材料成形性能的同时有效抑制回弹,提高成形精度;②模具结构简单,降低加工成本,成形效率高,缩短生产周期;③可通过调整电极位置、放电能量等工艺参数得到合理的冲击波形状和压力分布,有效控制成形缺陷;④对材料强度、硬度和电导率都没有限制。

电液成形技术的发展,逐渐引起研究领域与工业领域的重视。国内外学者主要研究内容可归为成形性研究、工艺试验研究及应用、数值模拟研究3个方面。在成形性研究方面,Woo等^[7]基于Marciniak-Kuczynski理论(M-K理论)研究了电液成形过程中6061-T6铝合金的成形极限,结果表明,与准静态条件相比,该材料在高应变速率条件下的成形性能获得了改善。Golovashchenko等^[8]对双相钢的电液成形性能开展测试,同时利用极限弧顶高度试验测定材料的准静态成形极限,对比表明,电液成形能够提高双相钢材料的成形性能。Rohatgi等^[9]通过实验获得了AA5182-O铝合金在准静态成形和电液成形中的成形极限,研究结果表明电液成形将该材料的成形极限提高了2.5倍左右。在工艺试验研究及应用方面,Rohatgi等^[10]对无凹模电液自由成形和圆锥形凹模电液成形过程进行研究,对成形过程中垂直方向位移、运动速度、应变及应变速率随时间变化规律进行了测试和分析,旨在发现电液成形过程中材料的基本变形规律。Pérez等^[11]则研究了放电参数和成形压力场的相关

性,旨在推动电液成形技术在工业中的应用。在数值模拟研究方面,基于ANSYS/LS-DYNA程序,将电液成形过程简化为等离子通道、水、受凹模限制的变形金属及空气多个子模型组合,结合等离子通道的能量沉积,使用ALE多材料公式进行数值模拟研究^[12-14]。也可基于Abaqus,采用Geers和Hunter模型模拟水下放电产生的冲击波^[15]。

AA5052铝合金是运载工具的常用材料,然而,针对AA5052铝合金材料的管件电液数值模拟与试验相关研究较少,尤其是AA5052铝合金Johnson-Cook本构方程在电液成形数值模拟中的应用较少,因此文中开展了针对AA5052铝合金的电液数值模拟和试验的研究。

1 试验材料及设备

材料为AA5052铝合金,是5系Al-Mg合金。所用铝管壁厚为1.2 mm,材料热处理状态为O态。材料各元素质量分数见表1。

表1 AA5052铝合金板材化学成分(质量分数)

Tab.1 Compositions of the AA5052 aluminum alloys (mass fraction) %

Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Cu	Al
2.2~2.8	0.1	0.25	0.4	0.15~0.35	0.1	余量

验证工艺试验所采用的管件电液自由胀形试验平台如图1所示,主要由电容柜、控制柜和电液自由胀形工装等组成。设备的恒定电容为408 μF ,最大放电能量为48 kJ。试验工装由自由胀形模具、汇流排、工作电极等组成。自由胀形模具用来固定管坯,为试验的进行提供一个密封的工作空间。汇流排一端连接磁脉冲设备所引出来的同轴电缆,另一端连接工作电极,从而能够使设备释放的电流流经工作电极,达到能量释放的目的。试验前,将管坯与自由胀形

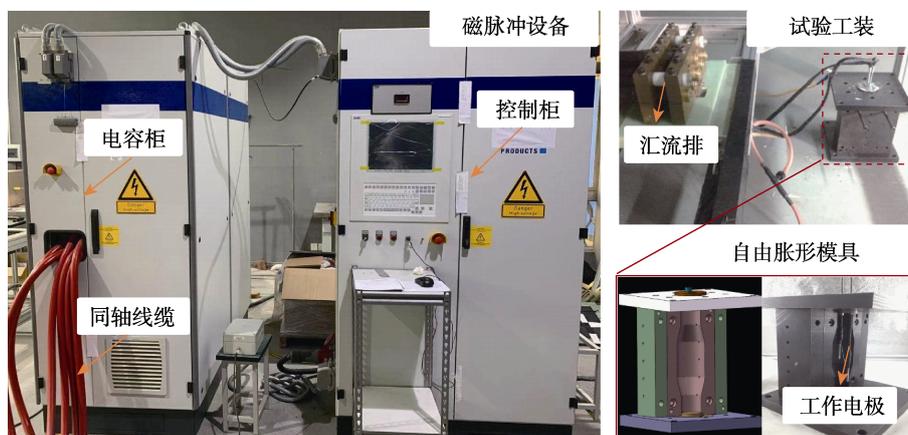


图1 管件电液自由胀形实验平台

Fig.1 Experimental platform for electrohydraulic free forming of pipe parts

模具装配，并在管坯内部注满水。试验过程中，释放在工作电极间的能量为 2.25 kJ，产生冲击波载荷，管坯受到水中传来的压力作用，在自由胀形模具内腔发生塑性变形。

2 数值模型建立与计算

电液成形过程是一个高速率成形过程，涉及冲击波的产生和传递、坯料在高速率下的变形规律等多物理场的耦合，传统的测量方法已经很难实时观察和测量变形过程中的诸多物理量。为此，基于 LS-DYNA 平台，建立了管件电液自由胀形过程的数值分析模型。

数值模拟涵盖了电液成形过程中各主要阶段，从最初的等离子放电通道的能量沉积，到冲击波产生并在水中传递，再到受冲击波载荷作用后坯料的变形。电液成形数值模型包含以下 4 个子模型：① 等离子通道能量沉积模型；② 等离子通道内的压力模型；③ 压力传递的液体介质模型；④ 发生塑性变形的坯料模型。

每个单独的模型都是基于 LS-DYNA 平台建立，并在模拟过程将 4 个子模型耦合在一起。从开始建立物理模型到后处理分析计算结果全过程的计算流程如图 2 所示。

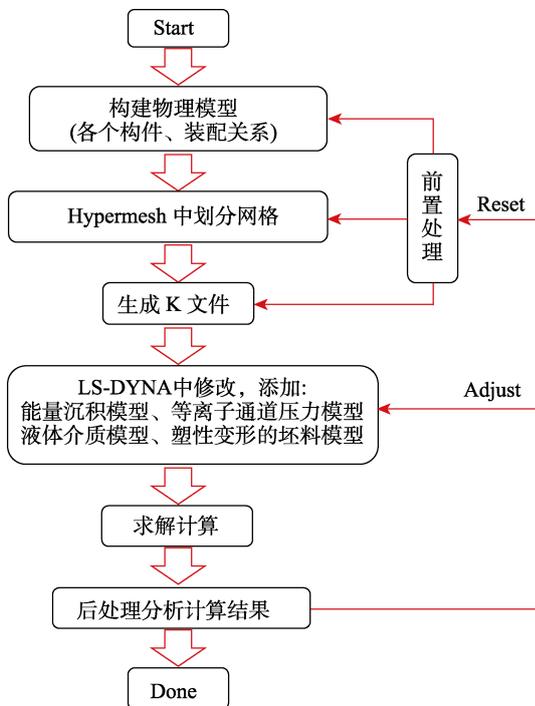


图 2 电液成形数值模拟计算流程
Fig.2 Flow chart of numerical simulation of electrohydraulic forming

2.1 等离子通道能量沉积模型

选择一种易操作的方式获取加载在整个模型的

功率，其计算公式如下：

$$P(t) = I(t)U(t) \quad (1)$$

式中： $P(t)$ 为当前时刻的功率； $I(t)$ 为电路的电流； $U(t)$ 为电极两端的电压。

根据电路中的瞬时电流和等离子通道两端的电压随时间变化的函数关系获取加载在模型中的功率，借助罗氏线圈获取试验过程中放电电流随时间变化的曲线。M. A. WOO 等^[7]基于试验获得的电流、电压数据，认为在电液成形数值模拟中电压随时间变化可视为线性下降，初始时刻达到电压峰值，在电流达到峰值时，电压为 0。

LS-DYNA 中提供专门的关键字 *DEFINE_CURVE 来定义输入模型中的曲线方程式，能量沉积功率 $P(t)$ 与横轴时间 t 围成的面积就是加载在等离子通道的能量，然后利用关键字 *LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK 调取相应的曲线。

2.2 等离子通道内的压力模型

采用 LS-DYNA 中的关键字 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK 和关键字 *MAT_NULL 可以很好地描述等离子通道压力模型。在数值模拟模型中，等离子通道内的压力可用式 (2) 描述：

$$P = C_0 + C_1\mu^2 + C_2\mu^3 + C_3\mu + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)W_p \quad (2)$$

式中： $\mu = -1 + 1/\nu$ ； $\nu = \rho_i/\rho_G$ ，代表每一时刻空间中的相对体积； W_p 代表初始状态下单位体积的能量，采用功率沉积曲线来定义这一随时间变化的量； $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 的数值分别为 0, 0, 0, 0, 0.26, 0.26, 0^[13]。

2.3 压力传递的液体介质模型

采用水作为电液成形时传递载荷的介质，采用 *MAT_NULL 定义水的材料模型，水材料模型的密度为 1000 kg/m³，临界压力为 0.1 MPa，动态粘性系数为 1.0×10^{-9} ^[16]。

由于电液成形时间短，可近似看作等熵过程。借助 GRUNEISEN 方程式来反映水的压力与密度的变化规律，描述冲击波在水中传递的过程，其数学表达式如式 (3) 所示：

$$p = \begin{cases} \rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right] + \left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^+ & (\mu > 0) \\ (\gamma_0 + \alpha\mu)E & (\mu > 0) \\ p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha\mu)E & (\mu < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中： C 为 v_s-v_p 曲线的截距 (v_s 代表冲击波速度，

v_p 代表粒子速度); S_1, S_2, S_3 是 v_s-v_p 曲线的斜率系数; γ_0 代表 GRUNEISEN 常数; α 是 γ_0 和 $\mu=-1+\rho/\rho_0$ 的一阶体积修正量; E 为比内能。 $\mu>0$ 代表压缩状态下的情形, $\mu<0$ 代表拉伸状态下的变化规律。在数值模拟中借助 *EOS_GRUNEUSEN 定义, 水的状态方程参数 $C, S_1, S_2, S_3, \gamma_0, \alpha, E$ 分别为 $1.48 \times 10^3, 1.75, 0, 0, 0.28, 0, 0$ [17]。

2.4 发生塑性变形的坯料模型

电液成形过程中坯料在冲击波作用下产生高速率的塑性变形, 应当考虑应变速率对流动应力的影响。Johnson-Cook 模型是一种典型的经验本构模型, 应用广泛。采用 Johnson-Cook 模型来描述坯料的变形, 可以较好地描述应变、应变率和温度 3 个因素的影响。文中针对室温下 AA5052 铝合金的电液成形, 忽略温度效应, 将坯料本构模型简化为 [18]:

$$\bar{\sigma} = (80.9 + 407.5\bar{\epsilon}^{0.6105}) \left(1 + 0.0018 \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{0.001} \right) \quad (4)$$

2.5 整体模型与接触

如图 3 所示是管件电液自由胀形模型, 该模型主要由空气、水、等离子体、管坯和模具组成, 且均采用实体六面体单元网格, 且等离子通道-水、水-空气网格共节点, 以保证流固耦合数值模拟过程的需要。管坯、模具网格作为整体嵌入到等离子通道-水-空气的网格中, 两部分的网格不共节点, 且管坯外层网格和模具内层网格设置 0.1 mm 的间隔, 以保证数值模拟过程不发生管坯对模具的穿透。最后, 水外层网格和管坯内层网格直接接触。在仿真过程中, 管坯作为观测重点, 为了提高数值模拟的精度, 管坯网格需更加细分, 其沿径向由内向外被划分为内、中、外 3 层, 网格的大小控制在 0.5 mm 左右, 其余模型网格均为 1 mm 左右。除此之外, 需要对模具圆角区域的网格进行细化处理, 避免在仿真过程中发生网格穿透。

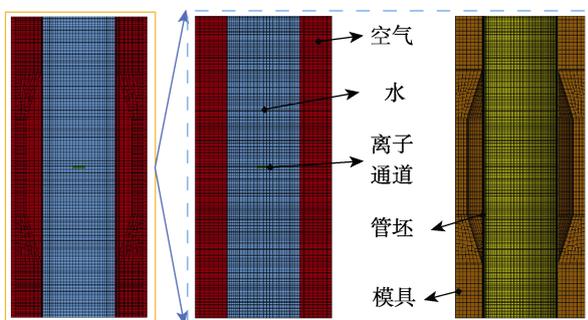


图 3 管件电液成形模型

Fig.3 Electrohydraulic forming model of pipe parts

网格划分完毕后, 将整体模型导入 LS-DYNA 中进行关键字定义。在网格属性 Section 命令中, 模具和坯料采用 Rigid 定义, 而等离子通道、空气、水则

采用 Rigid_ALE 定义。为了防止高速率成形过程中网格发生畸变, 模拟过程采用了单点 ALE 多物质单元方程 (ELFORM=11)。在定义接触时, 利用关键字 *AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 来定义管坯与模具的接触, 管坯外表面网格作为主面, 模具内表面网格作为从面。利用 LS-DYNA 中的关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 来定义混合物质 (等离子通道+水+空气) 和管坯的接触。与此同时等离子通道的爆炸、冲击波在水中的传播和液体与管坯表面的接触过程都是采用拉格朗日-欧拉 (Arbitrary lagrange-eulerian, ALE) 算法来实现的。在整个模拟过程中, 耦合力是通过 Penalty Method 来计算的, 如果系统检测到 Lagrange 面进入到 ALE 单元中, 耦合力则是通过 Lagrange 面穿透到 ALE 材料的距离来计算。在整个模拟过程中, 不同的物质会在不同的单元体中间流动来模拟电液成形过程中能量的扩散过程。

3 结果与讨论

3.1 试验与数值模拟对比

3.1.1 变形轮廓对比

AA5052 铝合金管件电液自由胀形过程中, 主要变形区的变形轮廓数值模拟结果与工艺试验结果对比如图 4 所示 (左侧为数值模拟结果, 右侧为试验变形结果), 结果发现二者的变形轮廓是一致的。在正对金属丝的截面上变形最大, 向两侧逐渐减小。为了描述管坯变形情况, 在管坯中部主要变形区域内进行标记。以管件径向胀形最大的截面 (金属丝正对截面, 文中为管坯中心截面) 为基准面, 以轴向 1 cm 距离为梯度, 基准面上下各取两个截面, 将特征截面依次标记为 1#—5#。

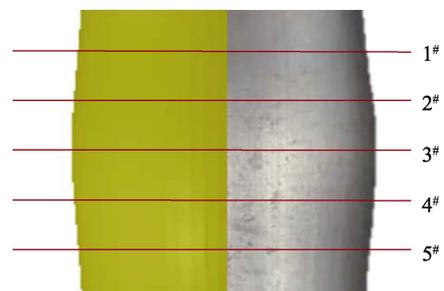


图 4 模拟与试验变形轮廓结果对比

Fig.4 Comparison of deformation profile between simulation results and experiment results

3.1.2 轴向位移对比与径向位移对比

虽然电液成形速率较高, 但在管坯轴向上, 还是存在材料的流动, 有一定的轴向位移。在数值模拟中管坯轴向收缩率为 1.54%。试验中管坯轴向收缩率为

1.58%，二者相对误差为 2.53%。

在 5 个特征截面上，特征截面处径向位移曲线模拟结果与试验结果对比如图 5 所示。5 个特征截面的径向位移模拟与试验数据及二者误差如表 2 所示。可以发现，二者的变化趋势是一致的，正对金属丝的 3# 截面径向位移最大，向两侧逐渐减小。在 3# 截面，径向位移试验和仿真结果的相对误差最大，为 5.52%。文中 4# 和 5# 截面的径向位移小于对称的 1# 和 2# 截面，可能是因为在试验过程中，在靠近 4# 和 5# 截面的一侧存在泄压，压力没有完全用于驱动管坯发生塑性变形。

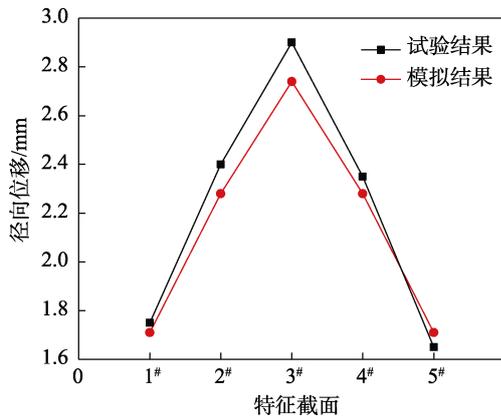


图 5 径向位移模拟与试验结果对比

Fig.5 Comparison of radial displacement between simulation results and experiment results

表 2 径向位移模拟与试验数据及二者误差
Tab.2 Data of radial displacement in simulation results and experiment results

截面	仿真/mm	试验/mm	相对误差/%
1#	1.71	1.75	2.29
2#	2.28	2.4	5.00
3#	2.74	2.9	5.52
4#	2.28	2.35	2.98
5#	1.71	1.65	3.64

3.1.3 壁厚分布对比

在 5 个特征截面上，分别获取管坯壁厚数据，其中试验用到的测量工具为带表外卡规，如图 6 所示。壁厚分布模拟结果与试验结果对比如图 7 所示。可以发现，二者的变化趋势是一致的，正对金属丝的 3# 截面壁厚最小，减薄最严重。具体数值及误差分析见表 3，在 5# 截面，壁厚分布试验和仿真结果的相对误差最大，为 3.36%。可能是因为在管坯轴向上，仿真中材料的流动略微小于试验中材料的流动。同时在试验过程中，在靠近 5# 截面的一侧可能存在泄压，使 5# 截面变形最小，壁厚减薄最小。综上，管材电液自由胀形数值模拟结果与工艺试验结果基本吻合，可借助仿真模型分析电液成形过程。



图 6 试验用的测量工具

Fig.6 Measuring tool used in the experiment

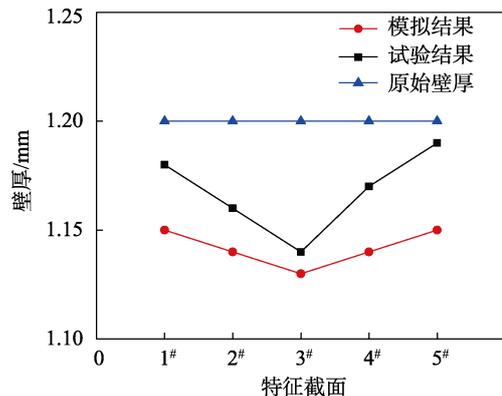


图 7 壁厚分布模拟与试验结果对比

Fig.7 Comparison of wall thickness distribution between simulation results and experiment results

表 3 壁厚模拟与试验数据与误差
Tab.3 Data of wall thickness in simulation results and experiment results

截面	仿真/mm	试验/mm	相对误差/%
1#	1.15	1.18	2.54
2#	1.14	1.16	1.72
3#	1.13	1.14	0.88
4#	1.14	1.17	2.56
5#	1.15	1.19	3.36

3.2 试验样品硬度分析

采用 TUKON 1102 显微维氏硬度计测量电液成形后样件的硬度，分别在室温下进行 3 组重复性试验，选取冲头下压载荷为 1 kg，保压时间为 10 s。维氏硬度测试结果如图 8 所示。发现电液成形后样件

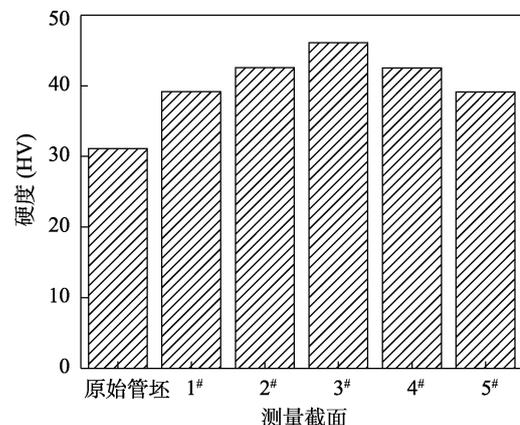


图 8 维氏硬度测试结果

Fig.8 The results of Vickers hardness tests.

在各个测量点上的硬度均要高于原始管坯,管坯中心位置(3#测量截面)硬度最大,并向两侧递减。说明电液加载的加工硬化作用明显,且由于管坯中心位置(3#测量截面)正对放电金属丝位置,径向位移最大,加工硬化最明显。

3.3 电液成形过程模拟分析

3.3.1 冲击波压力分布

图9为电液成形1/2模型中的压力分布情况,反映了电液成形过程中,从等离子通道产生冲击波开

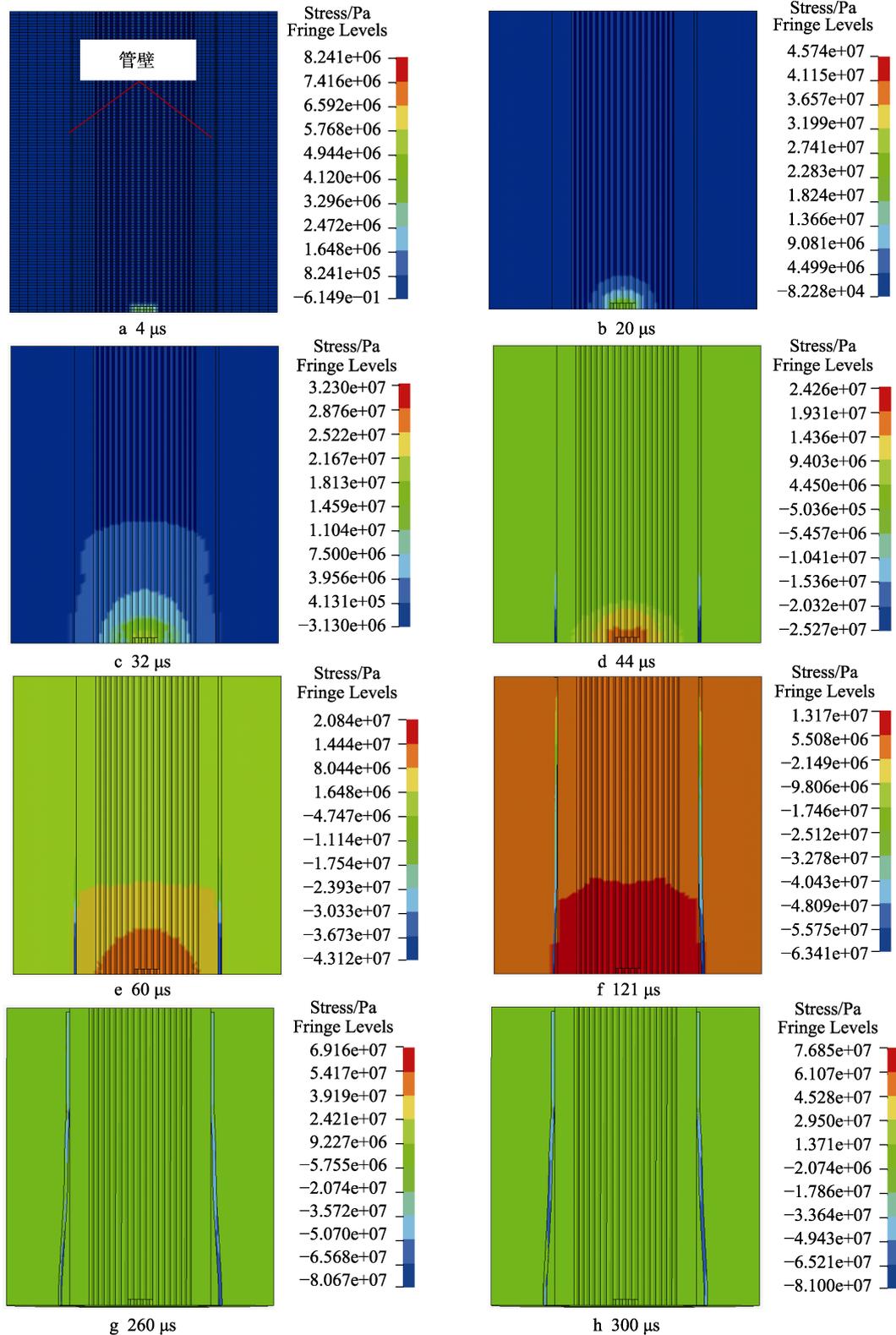


图9 电液成形模拟场的压力分布云图

Fig.9 Cloud charts of pressure distribution in electrohydraulic forming simulation

始,压力在液体中传递,最终作用在管坯上的全过程。

从图 9 可以看出,初始时间内,等离子通道释放能量,形成了一个类似于椭球面的冲击波,其长轴与金属丝长轴方向一致,短轴则经过金属丝的几何中心。随着时间的推移,冲击波辐射范围逐渐扩大,愈发趋近于球形。当 $t=32 \mu\text{s}$ 时,冲击波已与管坯内壁接触,因为管坯对冲击波的阻碍,冲击波波阵面波头压力最高,管壁所受冲击波传递压力的分布关于金属丝几何中心始终是对称的。由于管坯变形需要一定时

间,故管坯没有在与冲击波接触后立即变形。随着能量释放逐渐减小,压力变化不再明显。

3.3.2 管坯应力分布

管件电液胀形过程中,管坯变形区在胀形的同时,管坯轴向上也存在材料流动,是一个比较复杂的变形过程。Von-Mises 等效应力作为单元在多个方向上的合应力,能够明确表征管坯内部应力分布情况。图 10 为不同时刻管坯 1/2 模型中 Von-Mises 应力情况。

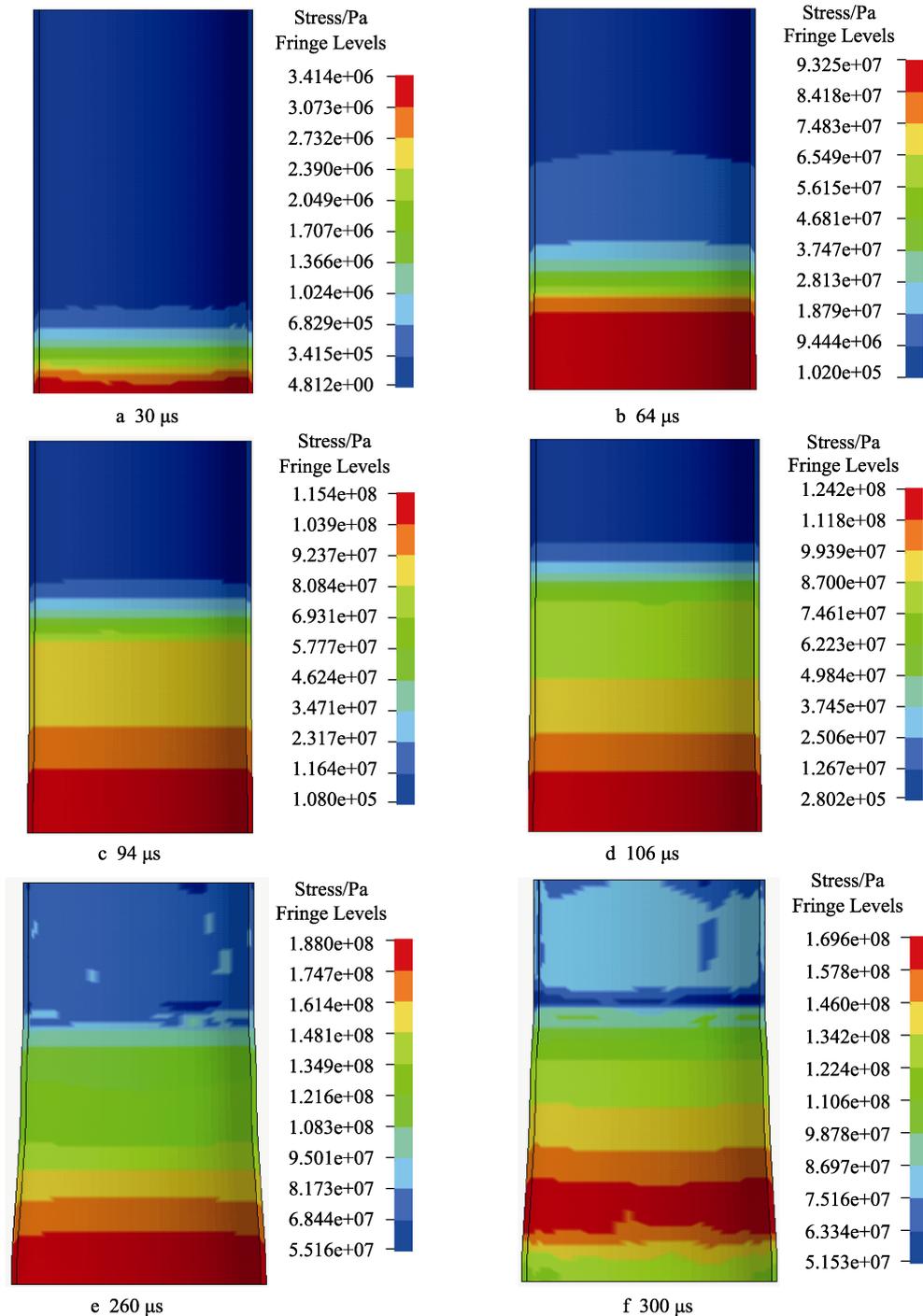


图 10 电液成形模拟场管坯应力分布云图

Fig.10 Cloud charts of stress distribution on the pipe in electrohydraulic forming simulation

从图 10 可以发现, 由于冲击波的作用, 管坯内部产生相应的应力, 随着时间的推移, 管坯的等效应力逐渐增大, 当超过了管材的屈服极限, 开始发生塑性变形。但由于管材自由胀形无模具限制, 整个过程受双向拉应力。由于中间部位最早开始受力, 故在变形过程大部分时间所受应力均为最大, 变形最大, 所产生的减薄也最严重。整个能量释放在 274 μs 结束后, 管坯由于惯性, 上端区域存在微小变形, 此时应力最大处不再是中间部位。

4 结论

1) AA5052 铝合金管件电液自由胀形过程中, 冲击波波阵面波头压力最高, 管壁所受冲击波传递压力的分布关于金属丝几何中心始终是对称的。

2) AA5052 铝合金管件电液自由胀形过程中主要变形区的变形轮廓数值模拟结果与工艺试验结果是一致的。在正对金属丝的截面上变形最大, 硬度也是最大, 两侧逐渐减小。

3) 特征截面处, 径向位移曲线与壁厚分布模拟结果与试验结果变化趋势一致。径向位移试验和仿真结果相对误差最大为 5.52%。壁厚分布试验和仿真结果的相对误差最大为 3.36%。同时数值模拟中管坯轴向收缩率与试验中管坯轴向收缩率二者相对误差为 2.53%。管材电液自由胀形数值模拟结果与工艺试验结果基本吻合, 说明仿真模型可靠, 可借助仿真模型分析电液成形过程。

参考文献:

- 胡斌. 汽车行业发展对轻质结构部件的需求与展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(3): 120—124.
HU Bin. Demand and Prospect for Lightweight Structural Components in Automotive Industry[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2020, 12(3): 120—124.
- JIANG Hao, ZENG Chao-chao, LI Guang-yao, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2020, 257: 113162.
- LI Guang-yao, DENG Hua-kun, MAO Yun-fei, et al. Study on AA5182 Aluminum Sheet Formability Using Combined Quasi-Static-Dynamic Tensile Processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 373—386.
- 毛云飞. AA5052 铝合金高速下本构及断裂模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 5—6.
MAO Yun-fei. Research on Constitutive Model and Ductile Fracture Criterion of AA5052 at High Work Piece Speed[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 5—6.
- ZOHOOR M, MOUSAVI S M. Experimental Analysis and Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Electrohydraulic Forming of Sheet Metal Parts[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 16—28.
- 李春峰. 高能率成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 118—134.
LI Chun-feng. High Energy Rate Forming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 118—134.
- WOO M A, SONG W J, KANG B S, et al. Acquisition and Evaluation of Theoretical Forming Limit Diagram of Al 6061-T6 in Electrohydraulic Forming Process[J]. Metals, 2019, 9(4): 401—415.
- GOLOVASHCHENKO S F, GILLARD A J, MAMUTOV A V. Formability of Dual Phase Steels in Electrohydraulic Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1191—1212.
- ROHATGI A, SOULAMI A, STEPHENS E V, et al. An Investigation of Enhanced Formability in AA5182-O Al during High-Rate Free-Forming at Room Temperature: Quantification of Deformation History[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 722—732.
- ROHATGI A, STEPHENS E V, DAVIES R W, et al. Electrohydraulic Forming of Sheet Metals: Free Forming vs. Conical-Die Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(5): 1070—1079.
- PÉREZ I, KNYAZYEV M K, JOSÉ J S. Experimental Investigation of Electric Discharge Parameters in Correlation with Peak Pressure at Industrial Electrohydraulic Forming[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(10): 1299.
- 安云雷. 管材电液成形数值模拟与工艺试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 15—48.
AN Yun-lei. Modeling and Experimental Investigation of Electrohydraulic Forming of Tube[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 15—48.
- MAMUTOV A V, GOLOVASHCHENKO S F, MAMUTOV V S, et al. Modeling of Electrohydraulic Forming of Sheet Metal Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 84—100.
- CAI Da, LIANG Jie, OU Hang, et al. Mechanical Properties and Joining Mechanism of Electrohydraulic Expansion Joints for 6063 Aluminum Alloy/304 Stainless Steel Thin-Walled Pipes[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 161: 107427.
- HAJIALIZADEH F, MASHHADI M M. Investigation and Numerical Analysis of Impulsive Hydroforming of Aluminum 6061-T6 Tube[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 257—273.
- CHENG Jia, GREEN D E, GOLOVASHCHENKO S F. Investigation of the Formability Enhancement of DP600 Steel Sheets in Electro-Hydraulic Die Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 178—189.
- 李晓杰, 张程娇, 王小红, 等. 水的状态方程对水下爆炸影响的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 46—52.
LI Xiao-jie, ZHANG Cheng-jiao, WANG Xiao-hong, et al. Numerical Study on the Effect of Equations of State of Water on Underwater Explosions[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 46—52.
- DENG Hua-kun, MAO Yun-fei, LI Guang-yao, et al. A Study of Electromagnetic Free Forming in AA5052 Using Digital Image Correlation Method and FE Analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 595—605.