DOI: 10.3901/JME.2020.20.038

抛物线壳体软模成形FEM-DEM耦合仿真研究*

曹秒艳^{1,2} 胡 晗^{1,2} 田少杰^{1,2} 杜 冰^{1,3} 赵长财^{1,3}

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

2. 河北省轻质结构装备设计与制备工艺技术创新中心 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 针对一些形状复杂、具有局部特征的难变形薄壁构件的成形问题, 提出固体颗粒介质成形(Solid granules medium forming, SGMF)技术。并以薄壁的抛物线壳体零件为例, 分析零件的特征及成形难点; 基于 ABAQUS 平台, 自行编制程序对抛物线壳体 SGMF 成形过程进行有限元法(Finite element method, FEM)和离散元法(Discrete element method, DEM)耦合仿真分析, 探究不同摩擦因数对工件 SGMF 的影响。研究表明, FEM-DEM 耦合分析技术兼顾离散颗粒介质与连续体板材各自的变形特点, 能较准确模拟金属板材 SGMF 成形过程, 并采用该耦合分析技术确定该抛物线壳体零件的最佳成形工艺参数; 最后在模拟结果的基础上, 开展抛物线壳体零件的颗粒介质成形试验研究, 并成功试制出合格工件, 试验结果与 FEM-DEM 耦合模拟结果基本吻合。

关键词: 薄壁零件; 固体颗粒介质成形; 仿真; FEM-DEM

中图分类号: TG386

FEM-DEM Coupling Analysis and Experimental Research on Soft Forming of Parabolic Shell

CAO Miaoyan^{1,2} HU Han^{1,2} TIAN Shaojie^{1,2} DU Bing^{1,3} ZHAO Changcai^{1,3}

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. Hebei Light Structural Equipment Design and Manufacturing Technology Innovation Center, Qinhuangdao 066004;

3. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: In order to solve the forming difficulties of the thin-wall parts with complex shapes and local characteristics, the solid granular medium forming (SGMF) technology is proposed. The thin-wall parts of parabolic shell are taken as an example to analyze the characteristics and the points of forming difficulties. Based on the ABAQUS software, the SGMF forming process of the parabolic shell is analyzed by using the finite element method (FEM) and discrete element method (DEM) coupling by self-programming, and the influence of different friction factors on SGMF are investigated. The results show that the FEM-DEM coupling analysis technology have deformation characteristics with the discrete of granular medium and continuum sheet respectively, which can simulate the sheet forming process of the SGMF more accurately, and the optimum technological parameters of the parabolic shell parts are identified. Finally, based on the numerical results, the solid granules medium forming experiments of parabolic shell parts are carried out, the qualified parts are successfully produced, and the experiment results are in good agreement with the simulation of FEM-DEM model.

Key words: thin-wall parts; solid granules medium forming; simulation; FEM-DEM

0 前言

随着航天、航空等领域的高速发展, 对轻量化

复杂截面构件的需求日益增长, 整体构件是实现结构轻量化和提高结构可靠性的重要方法之一。当前航天、航空薄壁整体构件主要包括异形截面管件和复杂曲面钣金件, 其中小型复杂曲面钣金件成形主要采用落压成形, 存在尺寸精度差、材料组织损伤影响使用寿命及合格率低等问题^[1]。另外, 随着高

* 国家自然科学基金(51775480, 51605420)和河北省自然科学基金(E2018203143, E2016203294)资助项目。20190925 收到初稿, 20200504 收到修改稿

强度、轻质难成形金属的复杂构件在航天、航空领域的应用日益广泛, 其产品塑性成形难度也愈来愈大, 传统的制造方法已经满足不了相关产品的要求。为了解决上述问题, 国内外诸多学者展开了深入研究, 出现了一些新的塑性成形技术和方法, 其中包括内高压技术、充液成形技术、黏性介质成形、温成形技术等方法。

固体颗粒介质成形工艺(Solid granules medium forming technology, SGMF)是由赵长财首次提出的一种新的软模成形技术, 该工艺采用固体颗粒代替刚性凸模(或凹模)的作用, 对板材、管材等毛坯进行拉深、胀形的成形工艺^[2-6]。该工艺制模简单、周期短、成本低、通用性强, 零件表面质量好, 回弹量小, 可以降低材料消耗, 提高板料成形极限和成形性能。同时, 由于采用固体颗粒作为传力介质, 该工艺具有很强的耐热性能、易于密封、体积压缩量小、对环境无污染, 绿色环保、传压非均匀分布的特点^[7]。基于上述特点, SGMF 自提出后引起国内外的密切关注和广泛应用^[8-14]。

板材 SGMF 工艺的核心是离散态的颗粒介质对板材施加压力并使其变形。板材属于连续体, 运用传统有限元法(Finite element method, FEM)可以较好分析其受外载荷条件下的成形过程和变形特点; 而颗粒介质属于散体, 是一种兼具固态和液态的特征的自然界第三态物质, 当前 SGMF 模拟中, 一般采用 Drucker-Prager(D-P)模型对颗粒进行模拟^[6]。虽然 D-P 模型分析的结果在大多情况下与理论计算和实际值基本接近, 但由于将颗粒介质处理为连续体, 无法体现颗粒的离散性, 且成形过程介质产生的大变形使得 D-P 模型的网格极易产生畸变并运算终止, 影响计算精度。而离散元法(Discrete element method, DEM)是目前处理散体颗粒最有效的分析工具^[7-11], 该方法在体现颗粒离散性, 揭示颗粒物质内部细观力链结构、颗粒相互接触变形及传力特性等方面, 具有其他方法不可比拟的优越性。为了充分发挥 FEM 和 DEM 两种方法各自优势, 本项目提出有限元-离散元耦合法对板材颗粒介质成形过程进行模拟, 以期能更真实、准确地探究基于 SGMF 工艺的板材成形机理。

FEM-DEM 耦合方法已应用于双齿辊破碎机的辊齿强度分析^[15], 锥体导管架海洋平台冰激励振动分析^[16], 复合材料的热致应力和局部损伤分析^[17], 以及 AZ31B 板材软模成形极限预测等^[18]。但上述研究大多利用两种软件交替运行, 颗粒与变形体无法实时交互传递载荷与位移边界, 效率偏低, 存在

一定局限性。

综上所述, 本研究针对某一薄壁深壳类零件的几何特征和成形难点, 提出基于 ABAQUS 平台, 采用自编嵌入式程序的方法, 直接将颗粒介质生成于板材拉深模型中, 实现零件 SGMF 过程的 FEM-DEM 耦合分析。并将耦合分析结果与 D-P 介质模型的模拟结果进行对比, 显示出耦合分析方法的优点。最后基于 FEM-DEM 耦合技术获得的成形参数展开成形试验, 并成功试制出薄壁深壳类零件。

1 抛物线壳体成形分析

1.1 抛物线壳体零件几何特征与成形难点分析

本研究中的薄壁深壳类零件为某飞行器关键零件-中心体, 其几何形状如图 1 所示, 其母线由一小段垂直线段和抛物线段组成, 中间圆滑过渡, 口部带有窄边法兰, 既为抛物线壳体零件。该零件具有结构复杂、大拉深比、精度要求高等特点, 原始坯料为厚度 $t_0=1.2\text{ mm}$ 的 0Cr18Ni9Ti 板材, 成形后要求锥体最薄壁厚不小于 0.5 mm , 属于典型难成形工件。

图 1 中心体零件图

若将该零件近似等效为锥形件, 可以发现其等效小端直径 $d_1=15.33\text{ mm}$, 等效大端直径 $d_2=207\text{ mm}$, 法兰直径 $d_3=240\text{ mm}$, 等效锥形件高度 $h_1=238\text{ mm}$, 抛物线高度 $h_2=216\text{ mm}$, 垂直线段 $h_3=14\text{ mm}$, 圆角半径 $r=10\text{ mm}$ 。根据锥形件计算公式可得该零件的相对高度 $h_1/d_2=1.15$, 相对锥顶直径 $d_1/d_2=0.074$, 相对厚度 $t/d_2=0.0024$ (t 为中心体拉深成形目标零件理论平均厚度)。由于 h_1/d_2 较大, 成形难度增大; d_1/d_2 较小, 拉深时不仅毛坯中间部分承载能力低, 容易破裂, 而且毛坯自由表面的宽度大, 容易起皱; t/d_2 较小时, 中间部分容易起皱, 需要增加工序数; 而且当 $h_1/d_2>0.5$, 尤其是 d_1/d_2 较小时, 应用传统软模成形方法需要多次拉深成形。因此, 该件原始工艺中需要 2 道次拉深, 3 道次旋压,

4 次固溶处理, 由于成形道次繁多, 工艺复杂, 其表面质量受到影响, 成品率低, 加工成本高。

1.2 成形方法的制定

SGMF 工艺中固体颗粒介质非均匀传压特性及对接触板材的有益摩擦, 能有效提高板材的成形极限, 减少拉深次数。通过上述对抛物线壳体零件分析, 本文拟采用 SGMF 工艺对该件展开拉深成形研究, 其成形原理如图 2 所示。板材在固体颗粒介质非均匀压力作用下逐渐进入凹模型腔, 随着拉深的进行板材逐渐贴模, 直至成形结束。鉴于零件的几何形状及精度要求, 为获得较好工艺路线及成形参数, 针对其拉深成形过程建立 FEM-DEM 耦合模型, 为试验及生产提供参考依据。

图 2 壳体零件 SGMF 成形原理图

2 抛物线壳体零件 SGMF 耦合模拟分析及成形工艺路线制定

2.1 FEM-DEM 模型建立

板材 SGMF 过程中包含了大变形和复杂摩擦接触, 属于典型非线性准静态问题, 因此本研究选用 ABAQUS/Explicit 显式非线性动态分析方法, 对抛物线壳体软模成形展开模拟研究。

坯料为原始厚度 $t_0=1.2$ mm 的冷轧 0Cr18Ni9Ti 板材, 材料流变应力曲线由单向拉伸^[4]试验获得, 其余板材材料性能参数见表 1。同时, 模拟引入板材的 FLD 破裂准则^[19-20], 0Cr18Ni9Ti 的 FLD 图及破裂准则参数设置如图 3 所示, 其中 FLC 为成形极限曲线, $N(\varepsilon_2^N, \varepsilon_1^N)$ 为工件变形状态; $M(\varepsilon_2^M, \varepsilon_1^M)$ 成形极限破裂临界点。

表 1 0Cr18Ni9Ti 板材性能参数表

密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
7 850	200	0.28

图 3 0Cr18Ni9Ti 材料 FLD 图

SGMF 工艺中, 选择合适种类及粒径的散体颗粒作为传力介质对金属板材顺利成形至关重要。选择介质需考虑的板材材料性能、坯料几何尺寸、成形温度等因素。板材材料软、介质硬度高、安息角大则易在工件内表面留下压痕, 板料硬、介质偏软, 则介质流动性差, 传力效果欠佳; 颗粒粒径过大, 工件局部小特征成形困难且工件表面粗糙度增加; 粒径过小则在高压成形时存在结块、流动性降低的问题。因此, 综合考虑板料材质及工件几何尺寸, 本研究采用 SiO_2 球形颗粒作为介质对工件予以成形, 颗粒具体参数如表 2 所示, 其中 D_{50} 为颗粒粒度(中位直径)。通过自编嵌入式子程序, 生成散体颗粒粒径为 2.0 mm 的颗粒, 其模型单元类型为 PD3D, 数目为 13 206 个。从而构建抛物线壳体颗粒介质成形 FEM-DEM 耦合分析模型如图 4 所示。设置压头、凹模、压边圈为解析刚体, 板材为变形体, 采用 shell 单元。成形过程中, 散体颗粒相互碰撞, 颗粒与其他表面(板材)碰撞, 可变形连续体板材使用有限元法求解, 散体颗粒利用离散元法求解, 并基于罚函数法, 确定颗粒与板材接触, 分析计算颗粒与板材相互作用^[21]。

表 2 颗粒介质模拟参数表

颗粒泊松比 ν	颗粒密度 $\rho_s/(\text{kg/m}^3)$	弹性模量 E/GPa	降噪系数 ζ	中位直径 D_{50}
0.16	2 100	190	30	1.0

本研究中, 工件成形过程中存在复杂的接触问题, 存在三种摩擦作用, 如图 5 所示, 一是模具与板材间阻碍板材变形的摩擦力 F_a , 其摩擦因数为 μ_a ; 二是颗粒介质对板材的主动摩擦 F_s , 其摩擦因数为 μ_s , 该摩擦力有益于板材成形; 三是颗粒与颗粒之

间增加颗粒力链稳定性的摩擦力 F_g , 其值与颗粒体积分数和摩擦因数 μ_g 有关^[22]。另外, 图 5 中 δ 为压边间隙。

图 4 壳体零件 FEM-DEM 耦合仿真模型

图 5 金属板材 FEM-DEM 分析模型

2.2 参数优化

为获取较佳成形参数, 采用单一变量原则, 展开不同板材-模具摩擦因数、板材-颗粒摩擦因数及颗粒-颗粒摩擦因数条件下的成形过程模拟分析。

在拉深成形过程中, 法兰(凸缘变形区)板材在切向压应力作用下, 使板材会发生失稳弯曲而起皱; 在径向拉应力作用下, 使法兰板材在成形过程中增厚。法兰处增厚和起皱严重将使法兰的流动阻力增大, 降低板材的拉深高度。通过控制压边间隙 δ 可降低增厚和失稳起皱对板材成形的影响: 压边间隙过大, 法兰板材发生失稳起皱, 大的起皱阻碍了法兰金属的流动, 导致工件过早的拉深破裂; 压边间隙过小, 法兰板材区没有足够空间增厚, 被压边圈牢牢压住, 法兰处板材无法流动, 导致工件过早破裂, 降低板材拉深成形高度。因此合适压边间隙是保证工件顺利拉深成形的关键, 根据文献[3-4]的研究结果, 间隙一般为 $1.20t_0$ 左右, 本研究中间隙也设置为该值。

通过摩擦剪切试验^[23]分别设置板材和模具之间的摩擦因数 μ_a 分别为 0.08、0.10、0.15, 模拟不

同的润滑条件对工件成形的影响, 设置 μ_s 和 μ_g 分别为 0.2、0.3。对直径 $D_0=380$ mm 的圆形坯料进行软模成形, 压头位移为 120 mm 时, 不同 μ_a 下的模拟壁厚变化曲线如图 6 所示。

图 6 不同摩擦因数 μ_a 下的壁厚曲线

由图 6 可看出, 成形工件凹模圆角过渡区是壁厚变化的分界线, 该区域壁厚维持基本原始板厚, 而工件底部(B 处)明显减薄, 法兰 A 处增厚, 且随着摩擦因数 μ_a 增加, 该趋势更加明显。相同压头位移条件下, 随着板材和模具间摩擦因数 μ_a 的增加, 成形工件整体高度 h 逐渐下降, $\mu_a=0.08、0.10、0.15$, 分别对应 $h=106.43$ mm、 105.89 mm、 103.06 mm, 原因在于随着摩擦因数 μ_a 增加, 法兰处板料向凹模内流动受阻, 相应颗粒介质内压增加, 颗粒体系体积压缩率上升, 成形工件高度减小; 同时, 摩擦因数 μ_a 增加也促使板材变形以胀形为主, 底部明显减薄, 而法兰部位所剩余板料宽度增加(法兰 A 处宽度由 $\mu_a=0.08$ 时 6.2 mm 增加至 $\mu_a=0.15$ 时 12.5 mm), 工件整体板厚均匀性下降。因此可见, 采取措施有效降低板材与模具间的摩擦因数对于提高工件成形质量至关重要。采用合适的润滑剂或减小模具表面粗糙度均是其行之有效的方法, 但过低的表面粗糙度要求将造成模具加工成本的提高, 因此该摩擦因数一般控制在合理水平, 最终设定 μ_a 的值为 0.10。

颗粒的材质及形貌决定了介质-板材有益摩擦因数和颗粒介质内摩擦因数的大小。为了探讨颗粒与板材间摩擦因数 μ_s 对板材成形性能的影响, 分别设置 $\mu_s=0.1、0.2、0.4$, 对壳体零件软模成形过程进行仿真分析, 其余成形参数设置为 $\mu_g=0.3、\mu_a=0.10、\delta=1.20t_0$, 得到在板材成形高度 $h=133.2$ mm 时, 不同 μ_s 下的工件壁厚曲线如图 7 所示, 可以发现, 在 $\mu_s=0.1、0.2$ 条件下, 颗粒与板材的摩擦因数越大, 板材壁厚更均匀, 其原因在于颗粒介质对板材之间的摩擦力属于有益摩擦^[24-25], 促进板材向凹模内腔流动, 因此在不影响颗粒介质流动性的前提下, 应该尽量提高二者间的摩擦因数。但当 $\mu_s=0.4$ 时, 板

材变形区壁厚急剧减薄, 板材壁厚均匀性远远低于 $\mu_s=0.1$ 和 $\mu_s=0.2$, 这是因为在实际应用中, 较大摩擦因数的颗粒介质一般均为多棱角的不规则块体, 高压条件下容易在板材内表面形成压痕, 并加剧板材壁厚减薄程度, 影响其成形工件质量。因此, 实际应用中应该根据金属材料的硬度及几何特征选择合适种类及形貌的颗粒介质。

图7 不同 μ_s 下的板材成形壁厚曲线

颗粒与颗粒之间的内摩擦因数影响颗粒的流动性, 通过自行研制颗粒介质剪切摩擦试验研究发现^[23], 颗粒介质内摩擦因数与颗粒材料种类及形貌密切相关, 不同类型的颗粒介质其内摩擦因数区别较大, 规则球状金属颗粒介质 μ_g 为 0.2, 一般均匀天然细砂 $\mu_g=0.4$, 而诸如具有多棱尖角的砾石或者金刚砂等内摩擦因数可达到 0.6。选择恰当的颗粒介质对拉深顺利成形具有重要影响。图 8 中显示了将内摩擦因数 μ_g 分别设为 $\mu_g=0.2$ 、0.4、0.6 进行拉深仿真的成形力与压头位移关系曲线(设置 $\delta=1.20t_0$, $\mu_a=0.10$, $\mu_s=0.2$), 得到压头行程 190 mm 过程中, 板材成形高度与成形力关系图。从图 8 中可以看出, 当成形高度在 $h=100\sim150$ mm, μ_g 在 0.6 与 0.4 时成形力近似相等, 这是由于此时介质基本结块形成一个整体, 因此变化趋势几乎相同; 如果颗粒表面摩擦因数小, 颗粒流动性增强, 传力性能显著提高, 所需成形力降低。

图8 不同 μ_g 下成形力变化曲线

进一步研究发现, μ_s 、 μ_g 与颗粒的表面形貌及

材质属性直接相关, μ_g 越大, 则 μ_s 也相应较大。SGMF 中, 较大的 μ_s 有利于促使板料向凹模内的流动, 但是, 追求过大的 μ_s 不可避免使颗粒内摩擦因数 μ_g 过大, 形成楔塞结块, 降低介质流动性和传力效果。因此, 选择合适的颗粒介质对于 SGMF 顺利成形具有重要意义。本模拟验证单一变量对板材成形的影响, 并结合剪切试验考虑, 确定 $\mu_s=0.2$ 、 $\mu_g=0.3$ 为最终合理模拟参数。

2.3 工艺路线制定

由于抛物线深壳体零件具有大拉深比形状特点, 无法采用一道次拉深成形, 故本研究拟采用两道次成形, 其拉深工艺路线如图 9 所示, 两道次之间拉深高度成为工件顺利成形的关键。

图9 壳体零件拉深成形目标零件成形工艺路线

为寻求合理的第一道次拉深高度, 基于第 2.2 节中得到的最终模拟参数, 运用 FEM-DEM 耦合法对抛物线壳体零件进行 SGMF 过程进行仿真分析, 根据图 3, 得出全局损伤变量

$$D = \frac{\varepsilon_1^N}{\varepsilon_1^M} \quad (1)$$

式中, $N(\varepsilon_2^N, \varepsilon_1^N)$ 为工件变形状态; $M(\varepsilon_2^M, \varepsilon_1^M)$ 成形极限破裂临界区点。已知 $D=1$ 损伤产生, 当 $D>1$, 材料失效导致单元移除, 工件破裂, 如图 10 所示。

由图 10b 可知, 当板材成形高度 $h=164$ mm 时, 零件已产生裂纹, 其裂纹四周 D 值达到 1, 压头下降, 裂纹扩展, 板材破裂如图 10a 所示, 颗粒溢出, 计算停止; 当 $h=155$ mm, 裂纹萌生区 $D=1$, 处于破裂危险区, 因此设置第一步成形高度为 155 mm。

第一次拉深成形和第二次拉深成形中间设置热处理工艺-固溶处理, 固溶处理是将不锈钢加热到 $950\sim1150$ °C, 保温一段时间, 使碳化物和各合金元素充分地溶解于奥氏体中, 然后快速淬水冷却, 碳及其他合金元素来不及析出, 获得纯奥氏体组织, 以便第二步拉深。因此在第二道次拉深仿真分析过程中, 只继承第一步数值结果中工件的形状及厚度, 不继承工件的应力状态, 由于第一步成形处法兰增厚到 $t_1=1.35$ mm, 调整压边间隙 $\delta=1.20t_1$ 。最终得到拉深成形的模拟目标件如图 11 所示, 底部最薄壁

厚为 0.627 mm, 满足要求。

图 10 FLD 断裂准则下裂纹萌生过程及破裂应力云图

图 11 壳体零件拉深成形模拟目标件

2.4 试验方法

成形试验在 250/150 t 双动板材成形压机上进行, 成形过程采用固定压边间隙模式成形(图 12)。根据模拟结果, 结合剪切试验, 选择水基二硫化钼为润滑剂^[26], 首先将凹模成形表面及压边圈和板材接触区域涂上润滑剂, 并放置坯料于凹模中心位置, 将颗粒介质放置于板材上, 压边圈下压固定压边间隙为 $\delta=1.20t_0$, 锥形压头下行压缩颗粒介质从而实现板材拉深成形, 第一次拉深成形和第二次拉深成形均在同一套模具中进行。依据颗粒介质摩擦试验及板材成形试验研究结果^[6, 13, 23], 选择 SiO_2 球形颗粒作为目标件 SGMF 传力介质, 通过试验测定该介质颗粒-颗粒摩擦因数为 0.31, 颗粒-板材摩擦因数

为 0.22, 其余性能参数如表 2 所示。

图 12 壳体零件 SGMF 模具

原始坯料尺寸板材直径 $D_0=365\sim400$ mm, 坯料厚度为 $t_0=1.2$ mm, 固体颗粒介质的初始装料体积为 3 300~3 600 mL。

2.5 结果及分析

为了验证 FEM-DEM 耦合模型对目标零件软模成形有效性, 图 13 给出了成形工件高度分别为 155 mm 和 238 mm 时耦合模型模拟和试验壁厚数据对比曲线。另外, 还参考文献[25]构建介质为 D-P 模型的板材拉深模型, 得到 D-P 模型壁厚曲线与前面两条曲线进行比较, 分析不同仿真模型对工件成形的仿真效果。从图 13 中可以看出, 工件法兰区域均有不同程度增厚, 耦合模型值与试验更加接近; 工件底部为壁厚减薄较大区域, 两种仿真模型模拟壁厚值与试验值基本吻合。综合上述两个部位及传力区壁厚曲线可以明显看出, 针对目标零件软模成形, 采用 FEM-DEM 耦合模型对指导成形试验具有更高准确度。

图 13 不同成形高度下零件壁厚分布

进一步研究发现, D-P 模型存在以下问题。其一是成形过程中介质模型的几何形状发生显著变化, 网格易产生严重扭曲如图 13a 所示, 导致计算精度下降^[8]; 二是由于 D-P 模型介质为连续体, 二次拉深时, 在连续挤压的过程中, C 处局部产生不均匀拉应力如图 13b 所示, 作用在板材对应局部位置拉应力大于周围, 在 D-P 模型成形圆角处壁厚产生波动性变化。试验过程中颗粒与板材之间和颗粒与颗粒之间只存在压应力没有拉应力, 因此 D-P 模型与试验不符, 这也是造成两者误差较大的原因。FEM-DEM 耦合模型由于模型颗粒为散体, 无径向方向的拉应力, 解决了因 D-P 模型受力方式不同对板材成形的不利影响。

通过测量成形后工件壁厚发现, 在凸缘最外沿厚度最大值为 1.49 mm, 工件底部壁厚最小, 最小壁厚为 0.61 mm, 如图 13b 所示, 满足锥体壁厚不小于 0.5 mm 的要求, 用样板校核该件母线均符合要求, 成形工件如图 14 所示。

图 14 成形零件

3 结论

(1) 基于有限元软件 ABAQUS 仿真平台, 自编嵌入式子程序, 利用 FEM-DEM 耦合技术对抛物线壳体颗粒介质拉深成形过程进行模拟仿真, 分析了不同成形参数(摩擦因数)对工件成形的影响。研究表明, 在保证颗粒具有良好流动性及传力性能的基础上应尽量提高介质-板材间的摩擦因数, 减小板材-模具间的摩擦, 从而有效提高板材的成形极限和板厚均匀性。结合摩擦试验, 确定将 SiO_2 球形颗粒作为该抛物线壳体成形介质。结合 0Cr18Ni9Ti 的 FLD 图, 确定该工件采用两道口拉深成形。

(2) 参考模拟仿真结果, 基于 SGMF 技术经过两道口拉深及一次固溶处理成功试制出薄壁中心体合格零件, 并分别将 D-P 模型和 FEM-DEM 耦合仿真得到的壁厚曲线与试验壁厚进行了对比。结果表明, 采用 FEM-DEM 耦合模型更能体现出 SGMF 中介质的离散特性, 与试验结果吻合度更高, 模拟过

程更加准确、高效。

参 考 文 献

- [1] 苑世剑, 王小松. 内高压成形技术研究与应用新进展[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 22-30.
YUAN Shijian, WANG Xiaosong. Developments in researches and applications of tube hydroforming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(2): 22-30.
- [2] 赵长财, 李晓丹, 董国疆, 等. 板材固体颗粒介质成形新工艺及数值模拟[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 212-215.
ZHAO Changcai, LI Xiaodan, DONG Guojiang, et al. Solid granules medium forming technology and its numerical simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 212-215.
- [3] CAO Miaoyan, ZHAO Changcai, DONG Guojiang, et al. Instability analysis on the free deformation zone in forming process of cylindrical parts with hot granule medium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(8): 2188-2196.
- [4] 赵长财, 贾向东, 杨盛福, 等. 薄壁深抛物线形零件固体颗粒介质成形工艺[J]. 中国机械工程, 2015, 26(24): 3379-3386.
ZHAO Changcai, JIA Xiangdong, YANG Shengfu, et al. Solid granule medium forming for deep parabolic-shape thin walled parts[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(24): 3379-3386.
- [5] 曹秒艳, 左苗苗, 王鹏, 等. 基于非局部摩擦理论的颗粒介质传力特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 136-142.
CAO Miaoyan, ZUO Miaomiao, WANG Peng, et al. Research on pressure-transfer characteristics in the solid granule medium forming based on the nonlocal friction theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 136-142.
- [6] 杜冰, 赵长财, 李雪峰, 等. 高温合金凸环管件固体颗粒介质成形工艺[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1721-1729.
DU Bing, ZHAO Changcai, LI Xuefeng, et al. Forming technology of high temperature alloy convex ring shaped tube by solid granule medium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 1721-1729.
- [7] 孙其诚, 金峰, 王光谦. 密集颗粒物质的多尺度结构[J]. 力学与实践, 2010, 32(1): 10-15.

- SUN Qicheng, JIN Feng, WANG Guangqian. Dense particulate matter multi-scale structure[J]. *Mechanics and Practice*, 2010, 32(1): 10-15.
- [8] ZHANG Ling, WANG Yujie, ZHANG Jie. Force-chain distributions in granular systems[J]. *Physical Review E*, 2014, 89: 012203.
- [9] SINGH A, MAGNANIMO V, SAITOH K, et al. Effect of cohesion on shear banding in quasistatic granular materials[J]. *Physical Review E*, 2014, 90: 022202.
- [10] BARRETO D, O'SULLIVAN C. The influence of inter-particle friction and the intermediate stress ratio on soil response under generalised stress conditions[J]. *Granular Matter*, 2012, 14: 505-521.
- [11] GRÜNER M, MERKLEIN M. Numerical simulation of hydro forming at elevated temperatures with granular material used as medium compared to the real part geometry[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(1): 279-282.
- [12] 李鹏亮, 张志, 曾元松. 钛合金机头罩固体颗粒介质成形工艺研究[J]. *锻压技术*, 2012, 37(5): 60-63.
- LI Pengliang, ZHANG Zhi, ZENG Yuansong. Study on titanium alloy spinner based on solid granules medium forming[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2012, 37(5): 60-63.
- [13] 张凌云, 袁海环. 固体颗粒介质拉深新工艺及成形模具设计[J]. *锻压技术*, 2010, 35(1): 93-95.
- ZHANG Lingyun, YUAN Haihuan. New technology of solid granule medium deep drawing and forming die design[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2010, 35(1): 93-95.
- [14] WEN Tong, LIU Qing, HUANG Qing, et al. Deformation and densification behavior of discrete media filled thin-walled tubes during forward extrusion[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(8): 2162-2169.
- [15] 毕秋实, 王国强, 黄婷婷, 等. 基于 DEM-FEM 耦合的双齿辊破碎机辊齿强度分析[J]. *吉林大学学报*, 2018(6): 1770-1776.
- BI Qiushi, WANG Guoqiang, HUANG Tingting, et al. Tooth strength analysis of mineral sizer by coupling discrete element method and finite element method[J]. *Journal of Jilin University*, 2018(6): 1770-1776.
- [16] 王帅霖, 季顺迎. 锥体导管架海洋平台冰激振动的 DEM-FEM 耦合分析及高性能算法[J]. *海洋学报*, 2017, 39(12): 98-108.
- WANG Shuailin, JI Shunying. Ice induced vibration of conical platform based on coupled DEM-FEM model with high efficiency algorithm[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(12): 98-108.
- [17] LECLERC W, HADDAD H, GUESSASMA M. DEM-FEM coupling method to simulate thermally induced stresses and local damage in composite materials[J]. *International Journal of Solid and Structures*, 2019, 160: 276-292.
- [18] 曹秒艳, 李建超, 苑亚宁, 等. 基于 DEM-FEM 的 AZ31B 板材软模成形极限预测[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(4): 675-683.
- CAO Miaoyan, LI Jianchao, YUAN Yaning, et al. Forming limit prediction in flexible die forming of AZ31B sheet based on combination of DEM-FEM[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(4): 675-683.
- [19] 黄晓忠, 陈劫实, 陈军. 板料冲压成形破坏判断准则的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(4): 23-31.
- HUANG Xiaozhong, CHEN Jieshi, CHEN Jun. Review on fracture criterion of sheet metal forming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(4): 23-31.
- [20] 王丽英, 彭忠义, 刘战波. 不锈钢成形极限曲线图拉压区试验研究[J]. *物理测试*, 2009, 27(3): 37-71.
- WANG Liying, PENG Zhongyi, LIU Zhanbo. Experimental study on drawing and compressing area of forming limit diagram for stainless steel[J]. *Physics Examination and Testing*, 2009, 27(3): 37-71.
- [21] 熊天伦. FEM-DEM 耦合模型在 ABAQUS 中的实现 [C]//中国力学大会-2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集. 北京: 中国力学学会, 2017: 378-391.
- XIONG Tianlun. FEM-DEM coupled model in ABAQUS[C]//The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics 2017 Proceedings of the Conference to Celebrate the 60th Anniversary of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Beijing: CCTAM, 2017: 378-391.
- [22] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[J]. 北京: 科学出版社, 2009.
- SUN Qicheng, WANG Guangqian. Introduction to particulate matter mechanics[J]. Beijing: Science Press, 2009.
- [23] 左苗苗. 高频振动条件下固体颗粒动态特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- ZUO Miaomiao. Dynamic characteristics of solid

- granules by superimposing high frequency vibrations[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [24] CAO Miaoyan, LI Jianchao, LIU Yanyang, et al. Frictional characteristics of sheet metals with superimposed ultrasonic vibrations[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(8): 1879-1887.
- [25] 曹秒艳, 房凯旋, 高明欣, 等. 基于超声振动的镁合金双锥件颗粒介质成形工艺[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 726-732.
- CAO Miaoyan, FANG Kaixuan, GAO Mingxin, et al. Technical study on granular medium formation of magnesium alloy biconical parts based on ultrasonic vibration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 726-732.
- [26] 李斌, 冶银平, 万宏启, 等. 水性二硫化钼基粘结固体润滑涂层制备及其摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 142-149.
- LI Bin, YE Yinping, WAN Hongqi, et al. Preparation and tribology properties of hydrophilic molybdenum disulfide bonded solid lubricating coatings[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 142-149.

作者简介: 曹秒艳, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为金属板、管材特种成形工艺及其理论。

E-mail: jacmy@ysu.edu.cn

赵长财(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为金属板、管材特种成形工艺及其理论。

E-mail: zhao1964@ysu.edu.cn