

基于形状记忆磁流变弹性体的胀形成形技术



王军,杨冰雪,姚永涛

哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要:随着胀形成形技术逐渐广泛应用于航空、航天等领域复杂管件的制备,开发具有磁场调节和形状记忆性能的软模胀形成形技术,对降低工件减薄率和脱模难度有重要意义。为此,本文提出一种形状记忆磁流变弹性体软模介质,分析了不同磁性颗粒含量对磁流变弹性体形状记忆性能和力学性能的影响,通过有限元仿真,模拟了胀形过程中软模介质对目标管件的成形精度的影响,然后对目标零件进行胀形试验分析。试验结果表明,形状记忆磁流变弹性体软模介质形状回复率可达90.9%,同时最大减薄率为13.2%,且仿真结果与试验误差不超过4.93%,可有效解决过度减薄和脱模困难的问题。

关键词:形状记忆性能;磁流变弹性体;软模胀形技术;磁场调控;最大减薄率

中图分类号: TG386.4

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.05.012

随着航空、航天领域的技术发展,高效益、高强度、低塑性的轻质材料成为研究和应用的热点。管材是应用最广泛的轻质材料,复杂曲面的管材加工成形性直接决定航空装备的寿命和性能^[1]。近年来,内高压胀形技术因具有零件精度高、生产周期短等优势,成为管件成形的主流技术之一。然而,传统的胀形技术(如刚性模胀形),冲压介质由于自身性能单一,只能满足简单曲面、低精度及要求低的管件的加工指标^[2-4]。胀形成形技术中液体做介质的成形技术经历了相对较长时间研究,一定程度上解决了刚性模具加工精度低、成本高、只能适配特定零件的问题,但是如何解决高压条件下难以密封和容易泄漏等缺陷仍然是一大难题^[5-8]。

为了解决上述问题,软模介质成形技术逐渐吸引了许多学者的注意。Maziar等^[9]在对铝坯的冲压过程中,通过使用橡胶柔性冲头,大大减少了传统拉深过程中导致的工件变薄现象,同时可以形成表面较为光滑的零件,有效提高了零件加工的精度和效率。Watari等^[10]将橡胶垫与金属模具进行组合形成一种弹性工具,进而代替传统的金属冲头和模具对相对较薄的金属板进行冲压的试验方法。试验结果表明,将橡胶垫用作柔性冲头,很大程度上节约了冲孔的成

本,优化了冲孔方式。由于冲压过程中主要依靠橡胶与坯料间的摩擦力使材料流入形腔,零件总的拉深比远远大于常规的刚性模拉深。针对传统的软模介质在复杂构件的成形后存在脱模困难的问题,一些学者提出了气体辅助揭开式脱模技术,有效降低了脱模难度,但这种方法受软模介质模量的限制,因而在使用范围上有一定的局限性^[11]。

磁流变材料是一种新型的智能材料,其性能可以通过调整外加磁场进行实时控制,具有响应快、变化可拟的特点^[12-13]。磁流变智能材料与胀形技术的结合将拓宽冲压工艺成形能力,有助于实现不同曲面管材的成形调控。形状记忆聚合物是另一种特殊的高分子智能材料,该材料在一定条件下(如热、电、磁),在外界作用下被赋予一定的形状,当外部条件发生变化时,它可相应地改变形状并将其固定^[14-15]。如果外部环境以特定的方式再次发生变化,它们能可逆地恢复至起始形态。至此,完成“记忆起始态→固定形态→恢复起始态”的循环。由于形状记忆聚合物的形状记忆特性,它已经成功应用于航空航天等工程领域,在构件成形、模具制备、自脱模等方面具有广阔的应用前景^[16-17]。

基于上述分析,本文提出了一种以形状记忆聚合物作

收稿日期: 2024-11-26; 退修日期: 2025-01-21; 录用日期: 2025-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(12272112); 航空科学基金(2022Z049077001)

引用格式: Wang Jun, Yang Bingxue, Yao Yongtao. Forming technology based on shape memory magneto-rheological elastomers [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(5): 97-103. 王军, 杨冰雪, 姚永涛. 基于形状记忆磁流变弹性体的胀形成形技术[J]. 航空科学技术, 2025, 36(5): 97-103.

为基体材料与磁流变弹性体相结合的方法,制备具有形状记忆和磁流变特性的智能材料,从而解决液体介质密封困难和传统软模介质脱模难的问题,对提高航空、航天领域的管件加工精度、表面质量、加工效率具有重要的意义。

1 形状记忆磁流变弹性体性能分析

1.1 形状记忆磁流变弹性体制备技术

本文采用3D直写打印技术来制备形状记忆磁流变弹性体(SMRE),图1所示为制备过程的示意图,将制备好的打印墨水注入打印针筒中,通过气压驱动挤出墨水实现打印,通过溶剂快速挥发实现墨水的固化定形。打印墨水的成分包括热塑性聚氨酯(TPU)、聚己内酯(PCL)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、四氢呋喃(THF)和磁性颗粒填料(羰基铁粉,CIP),具体成分信息见表1。

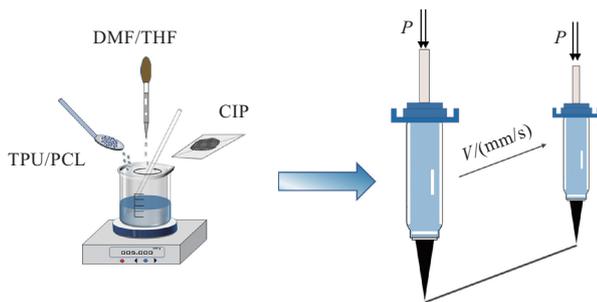


图1 形状记忆磁流变弹性体3D直写打印示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D direct writing printing of shape memory magneto-rheological elastomer

表1 磁流变弹性体原材料参数

Table 1 Magneto-rheological elastomer raw material parameters

材料名称	规格	购买厂家
TPU	WHT1185A	烟台万华
PCL	分子量:114.1424	南京毕科生物科技
DMF	分子量:73.09	阿拉丁
THF	分子量:72.11	阿拉丁
CIP	粒径:5 μ m	德国巴斯夫

本文中采用溶液共混法制备形状记忆磁流变弹性体墨水。首先是A组分材料的制备,用精密天平称取一定量的TPU颗粒于250mL锥形烧杯中,然后称取一定量的溶剂DMF和THF,其中DMF与THF的质量比为1:2,然后将DMF与THF的混合液与TPU按2:1的质量比列混合,最后将上述混合溶液在油浴锅70 $^{\circ}$ C的条件下加热搅拌2h,制备的TPU溶液记作组分A;然后是B组分材料的制备,首先用精密天

平称取一定量的聚己内酯(PCL)颗粒和DMF溶剂,二者按照1:1.5的质量比在锥形烧杯中混合,然后以300r/min的速度机械搅拌1.5h,所得的完全溶解的溶液即为PCL溶液,记为组分B;最后将组分A、组分B与羰基铁粉按照颗粒浓度分别为50%、60%和70%混合,之后将混合物在机械搅拌器下搅拌2h,再将溶液在超声机中超声分散1h,即得到打印所需的原料。

1.2 性能表征分析

1.2.1 微观形貌

磁流变弹性体的微观形貌主要受磁性颗粒含量和外部磁场的影响,图2为不同制备参数下SMRE的微观结构。如图2(a)~图2(c)所示,随着磁场强度的增加,SMRE内部出现了更多更长的链结构。图2(d)~图2(f)为CIP含量为50wt%、60wt%和70wt%时SMRE的微观结构。可以看到,随着CIP含量的增加,链结构增加,但团聚现象在70wt%时也增多。

1.2.2 形状记忆性能

SMRE的形状记忆性能通过测试尺寸为30mm \times 5mm \times 2mm的矩形试样在升温加载下弯曲成U形件,随后降温卸载通过测试弯曲角度获得其形状固定率;然后升温测试回弹至最终状态时的角度,计算获得形状回复率,曲线如图3所示。图3中将含50wt%、60wt%和70wt%的CIP的3D打印SMRE分别标记为SMRE-50P、SMRE-60P和SMRE-70P。结果表明,随着填料含量的增加,成形固定率增大,分别达到77.8%、83.8%和86.6%;同时,形状回复率分别达到97.2%、92.7%、83.3%。这些结果是由于随着CIP填料含量的增加,材料的模量增加,从而提高了固定率。然而,CIP填料含量的增加一方面导致基体相对含量的降低,显著削弱了材料的回复性能^[18];另一方面,从图2中可以看到,CIP填料含量的增加,基体中磁性颗粒的团聚现象增加^[19],导致磁性颗粒分布不均,从而影响形状回复过程中热量的传递,减弱SMRE的形状回复效果。基于上述分析,本文后续的仿真和试验选用CIP填料含量60wt%的样品进行。

2 形状记忆磁流变弹性体性能结构与仿真

2.1 胀形模型建立

为了减少工作量,缩短计算时间,根据试验模型的对称性,本次模拟仅对试验模型的1/2进行计算,对称面设置成对称条件。基于某商业软件在模拟非线性问题方面的优势^[20-21],本次模拟采用该软件建立的模型,如图4所示,该模型由上下冲头、外部模具、磁流变弹性体、初始管材4个部

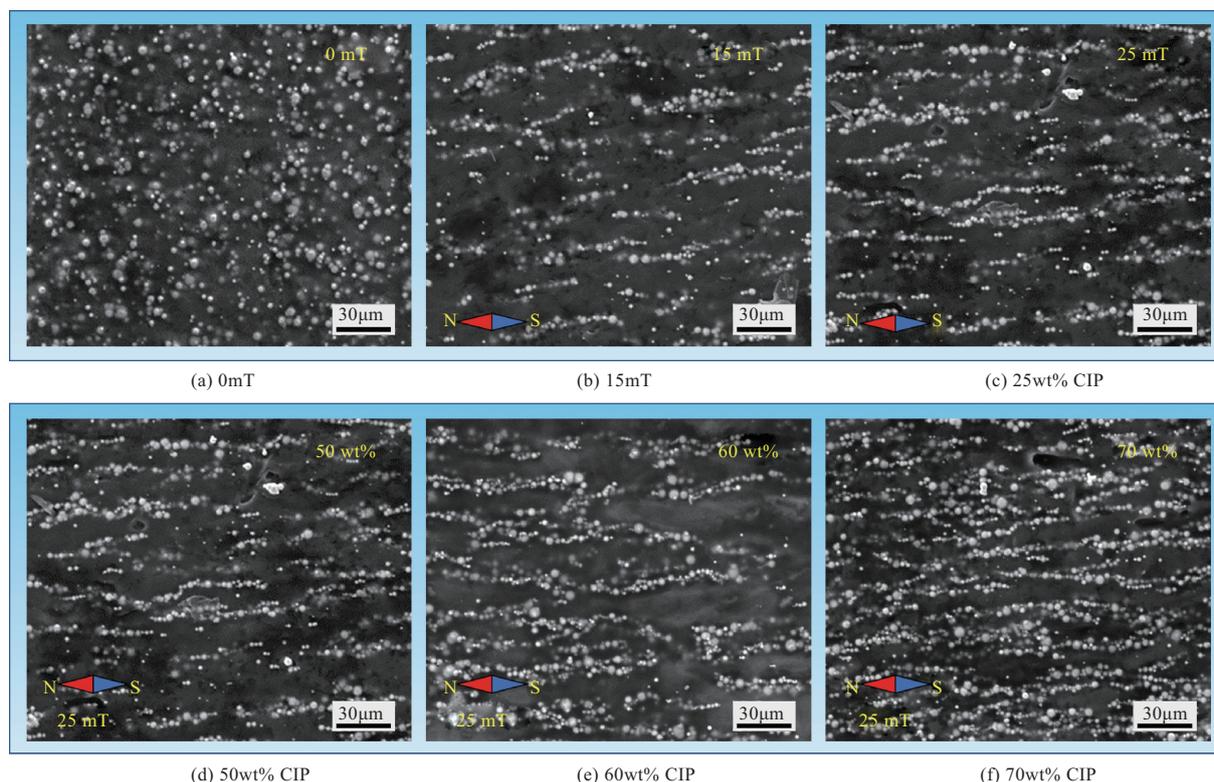


图2 不同制备参数下 SMRE 的微观结构

Fig.2 Microstructure of SMRE under different preparation parameters

件组成。其中,冲头和外部模具设置为刚体,单元类型为 C3D8R,设定为实体。磁流变弹性体设置为实体,单元模型为 C3D8RH,单元大小为 0.3mm,由于磁流变弹性体变形较大,网格容易产生畸变,因此,本次模拟打开扭曲控制开关。初始管材采用壳单元,厚度采用 5 个积分点,为 0.5mm,单元类型为 S4R,单元尺寸为 0.3mm。本次模拟的弹性体采用 Mooney-Rivlin 模型,试验曲线采用测定的单轴压缩曲线,泊松比 μ 设定为 0.495。初始管材为铝材,因此,采用有限元仿真软件材料库中的 AL_1060A,材料性质对比后高度重合。相互作用属性均设定为纵向行为为罚约束,切向行为为罚摩擦公式,弹性体和初始管材之间摩擦因数为 0.4,初始管材与外部模具之间的摩擦因数为 0.3。接触类型为“面与面接触”,并将各面之间进行匹配,将其中刚度较高的面设置为主面。由于该模拟存在较大的变形,网格之间可能产生自接触现象,因此,需要设置自接触。

2.2 胀形模型仿真结果

本文进行了磁流变弹性体管材胀形结果的模拟,通过确定各种材料的力学性质和冲头的位移获得了如图 5 所示的固定位移下管材的厚度胀形结果,可以根据胀形厚度计算出管材减薄率。

由图 5 可知,在冲头位移到 3mm 时,初始管材开始胀形。在冲头位移到 6mm 时,胀形高度达到第一梯度。冲头位移达到 8mm 时,胀形高度达到第二梯度。冲头位移达到 13mm 时,胀形高度达到第三梯度。本文设置的三个梯度分别为 1mm、2mm、3mm。冲头位移在 13mm 时,径向位移达到 2.97mm,基本与模具贴合,符合目标要求。

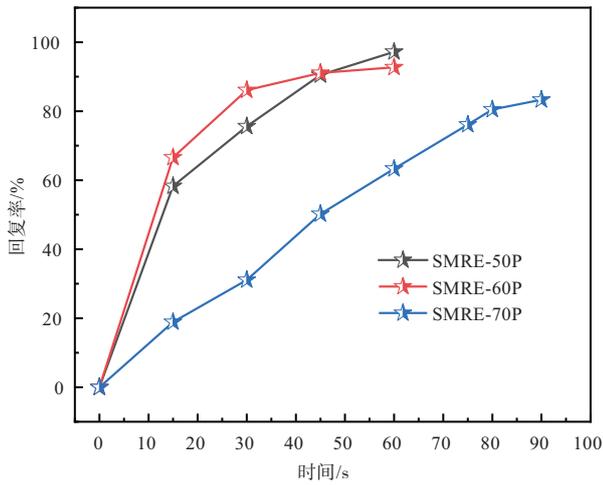
在减薄率方面,通过对以往的研究可得,在减薄率超过 20% 后,铝材容易产生集中性失稳,因此,本次试验需要确保管材的减薄率小于 20%。对模拟结果进行取样时,取样位置应在胀形高度的最高点,因为根据模拟结果分析,减薄率最大的地方为胀形高度的最高点。

对模拟结果分析可知,成形时模拟结果的最大减薄率为 14.27%。满足试验所要求的减薄率。证明了弹性体梯度胀形试验的可行性。

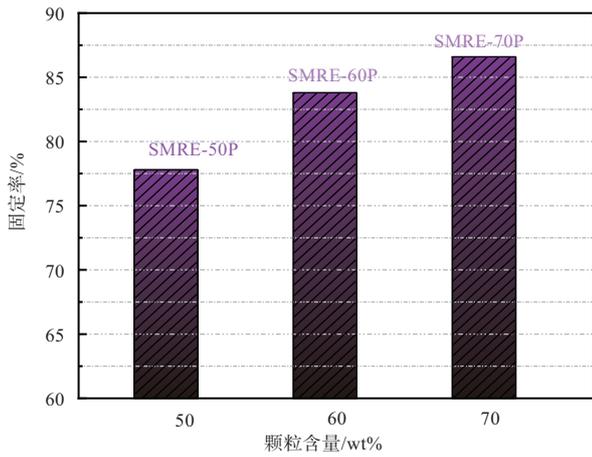
3 胀形试验

3.1 试验设计

本文基于形状记忆磁流变弹性体的磁致变刚度和形状记忆回复原理,实现目标零件的成形。图 6 为形状记忆磁流变弹性胀压成形原理图,该成形工艺流程为:将形状记忆



(a) SMRE形状回复率



(b) SMRE形状固定率

图3 SMRE形状记忆性能

Fig.3 SMRE shape memory performance

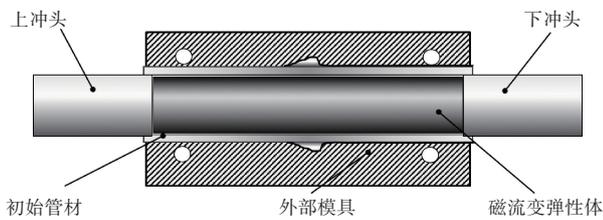


图4 有限元模型示意图

Fig.4 Finite element model schematic diagram

磁流变弹性体预填充到管材内部,并将两者一起放入模具内部,通过管材一端的压头的移动,迫使管材内部的形状记忆磁流变弹性体发生体积压缩并产生相应的反作用力,通过该反作用力迫使管材发生屈服变形,最终贴合模具的内表面,实现目标零件的形状。管件胀形过程中,压头只对形状记忆磁流变弹性体的两端施加推力,由于磁流变弹性体的泊松比一般大于0.49,属于不可压缩材料,因此,在压缩

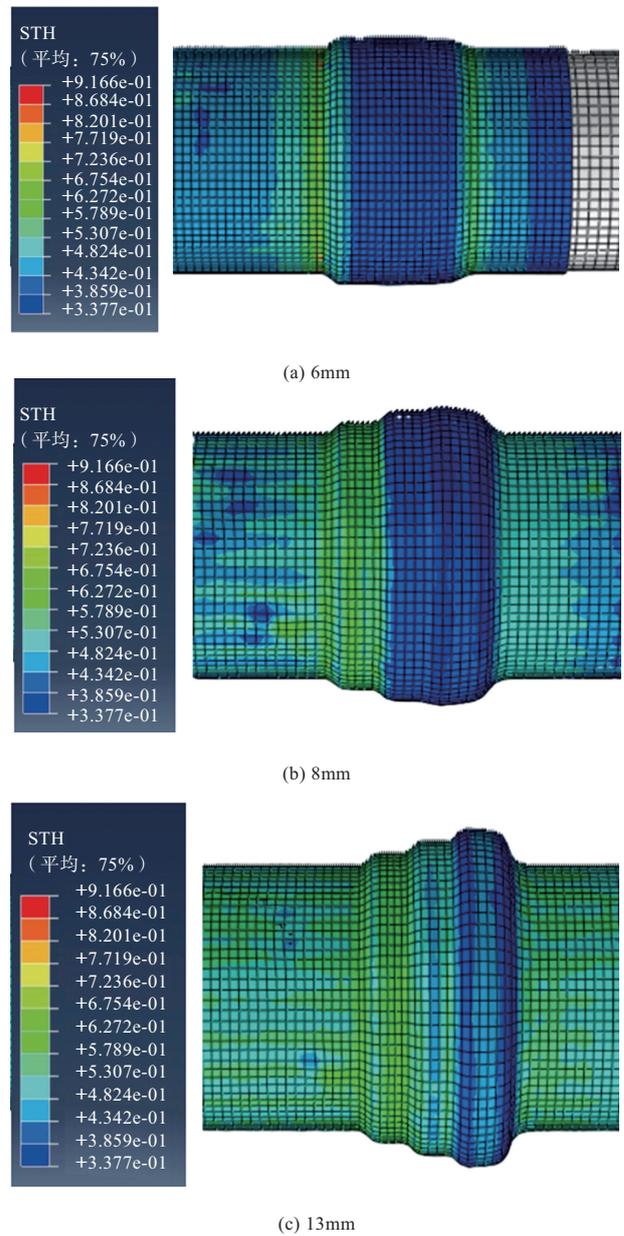


图5 固定位移下管材的厚度胀形结果

Fig.5 Thickness expansion results of the pipe under fixed displacement

过程中会产生较大的径向变形,从而迫使管件发生屈服变形。

3.2 试验结果

胀形质量的评判主要以成形件的减薄率和胀形高度来判断,在减薄率超过20%后,铝材容易产生集中性失稳,因此,本次试验需要确保管材的减薄率小于20%^[22]。首先需要到管材的减薄率进行测量。测试材料减薄率的方法有很多,如通过厚度测定仪进行测定。本文使用的减薄率测试

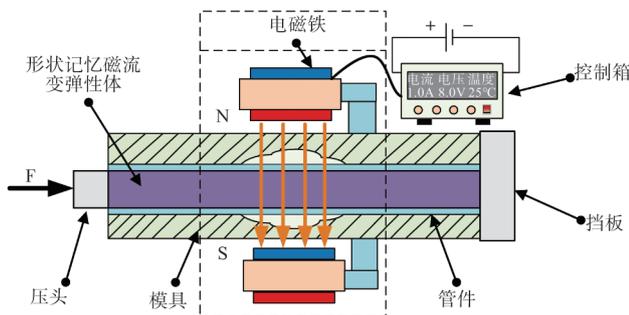


图6 形状记忆磁流变弹性体胀压成形原理图

Fig.6 Shape memory magneto-rheological elastomer bulging forming principle diagram

方法是通过破坏管材的方法,使用千分尺进行测量。然后通过游标卡尺对目标零件的胀形高度进行测量并记录。

最终成形的零件如图7所示,对试验验证所获得的目标零件进行胀形高度和减薄率的测量之后,对比试验结果与有限元模拟结果,见表2。从表2可以看出,最大减薄率与最大胀形高度的误差仅为5.62%和0.07%。有限元模型建立的可靠性得到了充分验证。



图7 试验验证获得的目标零件

Fig.7 Target part obtained through experimental verification

表2 有限元预测值与试验值比较

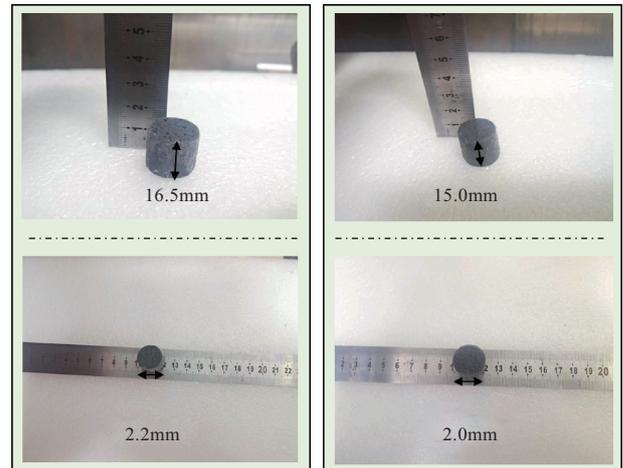
Table 2 Comparison of finite element predictions and experimental values

类型	参数	响应值	
	冲头进给量/mm	最大减薄率/%	最大胀形高度/mm
仿真值	13	14.27	2.97
试验值	13	13.60	2.99
误差/%	—	4.93	0.07

脱模质量通过取出内模的外形完整程度和形状回复程度进行评价,通过在不破坏零件的基础上,利用内模的形状记忆性能进行脱模,对取出的内模进行外观评估。图8为内模外观尺寸图,其中图8(b)为脱模完成后的内模,从图8中可以看出,内模周向完整无缺损,对比脱模前后尺寸,形状回复率高达90.9%,证明形状记忆磁流变弹性体在无损伤脱模领域具有很广阔的应用前景。

4 结论

本文采用磁流变弹性体作为管材胀形的软模,通过对



(a) 脱模前 (b) 脱模后

图8 内模外观尺寸

Fig.8 Inner mold dimensions

不同浓度的磁流变弹性体的磁流变效应和力学性能等进行理论推导和试验测试,获得在不同磁场状态下具有最佳性能的磁流变弹性体。随后在此基础上,通过对弹性体的结构进行3D打印,进一步提高磁流变弹性体的性能和响应能力。最后通过试验对有限元模拟的结果进行验证。主要结论如下:

(1) 本文提出了一种以磁流变弹性体为成形介质的新方法。通过磁流变弹性体的磁场调控,实现管材表面压力的合理分布,减少了管材目标件出现集中性失稳的现象。

(2) 通过有限元模拟,获得了理想状态下管材目标件的最大胀形高度和减薄率,并且将有限元模拟的结果与试验结果进行对比,发现最大减薄率与最大胀形高度的误差仅为4.93%和0.07%,证明了有限元模型的可靠性。

(3) 对胀形零件脱模质量进行了评估,结果表明脱模后的内模形状回复率高达90.9%,且内膜周向完整无缺损,证明形状记忆磁流变弹性体在无损伤脱模方面的优势及其可重复利用性能优势。

AST

参考文献

[1] 成靖, 李晓军, 曾一畔, 等. 航空复杂钣金构件冲压成形的研究与应用[J]. 锻压技术, 2018, 43(12): 25-29.
Cheng Jing, Li Xiaojun, Zeng Yipan, et al. Research and application of stamping forming for complex sheet metal parts in aviation industry[J]. Forging and Stamping Technology, 2018, 43(12): 25-29. (in Chinese)

[2] 马壮, 王静. 管柱镶件成型工艺与模具设计[J]. 工业设计, 2012 (2): 73.

- Ma Zhuang, Wang Jing. Forming process and mold design of pipe collar inserts[J]. *Industrial Design*, 2012(2): 73. (in Chinese)
- [3] 刘勇, 耿会程, 朱彬, 等. 高强铝合金高效热冲压工艺研究进展[J]. *锻压技术*, 2020, 45(7): 1-12.
Liu Yong, Geng Huicheng, Zhu Bin, et al. Research progress on high-efficiency hot stamping process of high-strength aluminum alloys [J]. *Forging Technology*, 2020, 45(7): 1-12. (in Chinese)
- [4] 祝世强, 王永铭, 沈汝洵, 等. 2219时效强化铝合金隧道管成形工艺[J]. *锻压技术*, 2023, 48 (5): 111-116.
Zhu Shiqiang, Wang Yongming, Shen Ruxun, et al. Forming process of 2219 age-hardened aluminum alloy tunnel pipes [J]. *Forging Technology*, 2023, 48(5): 111-116. (in Chinese)
- [5] Dohmann F, Hartl C. Hydroforming a method to manufacture light-weight parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60 (1-4): 669-676.
- [6] Tolazzi M. Hydroforming applications in automotive: a review [J]. *International Journal of Material Forming*, 2010,3(S1): 307-310.
- [7] Ceretti E, Fiorentino A, Giardini C. *CIRP encyclopedia of production engineering: hydroforming (Sheets and Tubes)* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014.
- [8] 苑世剑, 刘伟, 徐永超. 板材液压成形技术与装备新进展[J]. *机械工程学报*, 2015,51(8): 20-28.
Yuan Shijian, Liu Wei, Xu Yongchao. Recent advances in sheet metal hydroforming technology and equipment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015,51(8): 20-28. (in Chinese)
- [9] Maziar R, Ripin Z M, Ahmad R. Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010, 3(3): 196-203.
- [10] Watari H, Ona H, Yoshida Y. Flexible punching method using an elastic tool instead of a metal punch[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 137(1-3): 151-155.
- [11] 兰红波, 郭良乐, 许权, 等. 大面积纳米压印光刻晶圆级复合软模具制造[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 894-905.
Lan Hongbo, Guo Liangle, Xu Quan, et al. Fabrication of large area nanoimprint lithography wafer level composite soft mold [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 894-905. (in Chinese)
- [12] Olabi A G, Grunwald A. Design and application of magneto-rheological fluid[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(10): 2658-2664.
- [13] Bastola A K, Hossain M. A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 200: 108348.
- [14] Katmer S, Karatas C. Shrinkage and warpage in the permanent shape of shape memory polyurethane Parts[J]. *Materiale Plastica*, 2021, 58(4):245715957.
- [15] Ohki T, Ni Q Q, Ohsako N, et al. Mechanical and shape memory behavior of composites with shape memory polymer [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(9): 1065-1073.
- [16] Wang Miao, Zhang Zhenming. Research on the forming and demolding process of shape memory self-demolding mold[J]. *AIP Advances*, 2024, 14 (3): 035309.
- [17] 李琦, 杨宇, 王志刚, 等. 柔性变形翼结构设计、建模与分析研究进展[J]. *航空科学技术*, 2024, 35(6): 1-11.
Li Qi, Yang Yu, Wang Zhigang, et al. Research progress on the design, modeling and analysis of flexible deformable wing structures [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2024, 35 (6): 1-11. (in Chinese)
- [18] Wang Jun, Yao Yongtao, Yang Bingxue, et al. 3D printing of shape memory magnetorheological elastomers composites[J]. *European Polymer Journal*, 2024, 220: 3403.
- [19] 朱绪力, 孟永钢, 田煜. 颗粒体积比和磁场强度对磁流变弹性体颗粒结构的影响[J]. *清华大学学报*, 2010, 50 (2): 246-249.
Zhu Xuli, Meng Yonggang, Tian Yu. Influence of particle volume fraction and magnetic field strength on the particle structure of magneto-rheological elastomers [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2010, 50(2): 246-249. (in Chinese)
- [20] 原崇新, 潘杰, 屈蒙, 等. 变刚度复合材料加筋壁板的压缩试验及仿真研究[J]. *航空科学技术*, 2024, 35(3): 41-46.
Yuan Chongxin, Pan Jie, Qu Meng, et al. Compression test and simulation study of curvilinear fiber composite stiffened laminates [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2024, 35 (3): 41-46. (in Chinese)
- [21] 刘闯, 黄天麟, 邸嘉男, 等. 用于三维机织物预成形变形预测的各向异性超弹性本构模型[J]. *航空科学技术*, 2024, 35(3): 28-40.

Liu Chuang, Huang Tianlin, Di Jia'nan, et al. An anisotropic hyperelastic constitutive model for predicting preforming deformation of 3D woven fabrics [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2024, 35(3): 28-40. (in Chinese)

[22] 徐勇, 李昊, 郭训忠, 等. 基于磁流变弹性体的新型管材成形

技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2022, 65(10): 14-22.

Xu Yong, Li Hao, Guo Xunzhong, et al. Research progress on novel tube forming technology based on magnetorheological elastomer [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65 (10): 14-22. (in Chinese)

Forming Technology Based on Shape Memory Magneto-rheological Elastomers

Wang Jun, Yang Bingxue, Yao Yongtao

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: With the increasingly widespread application of bulging forming technology in the preparation of complex pipe fittings in the aviation, aerospace and other fields, the development of soft die bulging forming technology with magnetic field regulation and shape memory properties is of great significance for reducing the thinning rate of workpieces and the difficulty of demoulding. In this paper, a shape memory magneto-rheological elastomer soft mold medium is proposed. The influence of different magnetic particle contents on the shape memory and mechanical properties of magneto-rheological elastomers is analyzed. Finite element simulations are conducted to analyze the influence of the soft mold medium on the forming accuracy of the target pipe during the bulging process, and bulging experiments on the target parts are then carried out. Experimental results show that the shape recovery rate of the shape memory magneto-rheological elastomer soft mold medium can reach 90.9%, with a maximum thinning rate of 13.2%. The simulation results have an error of no more than 4.93% compared to the experiments, effectively addressing the issues of excessive thinning and demolding difficulty.

Key Words: shape memory properties; magneto-rheological elastomer; soft mold bulging technology; magnetic field control; maximum thinning rate

Received: 2024-11-26; **Revised:** 2025-01-21; **Accepted:** 2025-03-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12272112); Aeronautical Science Foundation of China (2022Z049077001)