

应用技术

基于磁流变弹性体的复杂曲面构件柔性成形关键技术

杨秋成^{1,2}, 吴聪^{1,2}, 胡胜寒^{1,2}, 李涛^{1,2}, 李明³, 李昊³,
陈浩^{1,2}, 秦瑶^{1,2}, 徐勇³, 郭训忠^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 材料加工工程系, 南京 211100;
2. 江苏省核能装备材料工程实验室, 南京 211100;
3. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: 磁流变弹性体作为一种可以有效感应磁场作用、弹性模量可控的先进智能材料, 在航空航天制造工程领域具有重要的应用前景。首先分析了基于磁流变成形介质的复杂曲面板材及管材构件的基本成形机理。另外阐述了磁流变弹性体的研究进展, 包括其制备工艺、性能以及柔性介质压力成形工艺。最后, 基于磁流变弹性体的复杂曲面构件精密成形关键技术, 从弹性体制备、磁场搭建及加载路径控制、磁固耦合条件的工艺仿真以及成形缺陷调控等方面分析了该技术的可行性。

关键词: 磁流变弹性体; 复杂曲面构件; 加载路径; 磁固耦合; 缺陷调控

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.024

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0161-09

Key Technology of Precision Forming of Complex Surface Components Based on Magnetorheological Elastomer

YANG Qiu-cheng^{1,2}, WU Cong^{1,2}, HU Sheng-han^{1,2}, LI Tao^{1,2}, LI Ming³, LI Hao³, CHEN Hao^{1,2}, QIN Yao^{1,2},
XU Yong³, GUO Xun-zhong^{1,2}

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Nuclear Energy Equipment Materials Engineering, Nanjing 211100, China;
3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: Magnetorheological elastomer, as an advanced intelligent material with the elastic modulus effectively controlled by magnetic field, has important application prospects in aerospace manufacturing engineering. In this paper, firstly, the basic forming mechanism of complex curved plate and tube components based on magnetorheological forming medium was analyzed. In addition, the research progress of magnetorheological elastomers, including its preparation, properties and flexible medium pressure forming process, was described. Finally, based on the key technology of precise forming of complex curved surface components of magnetorheological elastomer, the feasibility of this technology was analyzed from the preparation of elastomer, the construction of magnetic field and the control of loading path, the process simulation of magneto-solid coupling conditions and the control of forming defects.

KEY WORDS: magneto rheological elastomer; complex curved surface components; loading path; magnetism and solid coupling; defect control

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 江苏省重点研发计划 (BE2019007-2); 装备预研领域基金 (61409230406)

作者简介: 杨秋成 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为基于滚弯结构的自由弯曲成形工艺。

通讯作者: 郭训忠 (1981—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为金属塑性成形工艺及装备。

复杂曲面空心构件具有连续变化的异形截面和中空结构,广泛应用于航天航空、武器装备和核能装备等尖端领域。近年来我国航空航天制造工业快速发展,传统成形工艺很难满足大变径比、大截面变化比的复杂曲面构件制造,例如采用分瓣冲压再对焊工艺成形的航空发动机导向器叶片衬管具有表面质量差、精度低、焊缝处存在缺陷等缺点^[1]。整体成形工艺如内高压成形不仅能避免焊缝处缺陷,零件表面质量和精度都较传统工艺有较大提升,成形工序也有所减少,因此,复杂曲面空心构件的制造大多采用内压成形工艺。内压成形所用的成形介质对构件精度和质量的影响很大^[2]。目前,在复杂曲面构件成形应用较广的内压成形技术主要包括:异形截面管件充液成形技术以及难变形材料薄壁构件热气胀成形技术^[3]。采用气体和液体的胀形介质,其力学特性各向相同或相近,难以根据成形件变形过程应力的变化而变化,所成形构件形状具有一定的局限性,因此,采用新型压力成形介质以拓宽复杂曲面构件成形范围、提高复杂曲面构件成形质量和精度逐渐成为目前关注的重点。

磁流变弹性体采用天然橡胶、硅橡胶等高聚物作为基体,添加微米级磁性颗粒和添加剂,搅拌混合均匀后固化而成。与传统磁流变材料相比,磁流变弹性体克服了磁流变液易沉降、稳定性差和磁性粒子易磨损等缺点^[4-5]。在外加磁场作用时基体材料的粘度变化平缓,对磁性粒子形成链状结构的影响较小。另外,磁流变弹性体还具有磁场作用下响应速度快、磁场撤去后可逆性好和结构设计简单等优点^[6]。磁流变弹性体固化结束后链状结构仍保留在基体内部,可通过在制备时控制磁性粒子的分布或使用调节外加磁场来改变其磁学及力学性能^[7],以满足复杂曲面构件压力成形过程中不同部位的应力变化需求,作为复杂曲面构件压力成形介质。

文中基于磁流变弹性体关键力学性能参数可控的突出优势,尤其是成形过程中可以主动调控胀形介

质的各向作用力,从磁流变介质的制备、磁场条件搭建以及加载路径、磁固耦合条件下的成形工艺仿真和成形缺陷调控方面系统介绍了在力-磁耦合场辅助作用下的基于磁流变弹性体的板材和管材成形关键技术及研究重点。

1 基于磁流变介质的复杂构件成形原理

1.1 基于磁流变介质的板材成形工艺原理

基于磁流变弹性体在磁场作用下表现出的粘塑性特性,将磁流变弹性体应用于复杂曲面板材精密成形领域,有利于提高板材成形质量和精度^[8]。板材磁流变弹性体软模胀形工艺原理如图1所示,将板材置于介质仓和凹模之间,采用压边筋使板材变形区域只限于凹模内部区域。磁场均匀区位于线圈中央区域,将磁流变弹性体填充于介质仓与板材形成的型腔中,调节磁感应强度值,磁流变弹性体在磁场作用下发生磁变效应。伴随着磁性粒子排列结构变化,磁流变弹性体的力学性能也发生了明显变化。柱塞以速度 v 运动,对磁流变弹性体施加力的作用,磁流变弹性体将柱塞力传递给板材使之发生塑性变形。不同磁场条件下磁流变弹性体的性能不同,传递给板材的作用力也不同,板材的成形效果也不同^[9]。

1.2 基于磁流变介质的管材成形工艺原理

磁流变弹性体在磁场作用下的屈服应力及剪切性能的可变、可控特性使其在管材成形领域同样具有较大的优势,主要体现在较小的壁厚减薄率以及更均匀的壁厚分布。基于磁流变介质的管材成形领域应用主要包括两方面:一方面是在薄壁管材弯曲成形过程中将磁流变弹性体作为填充物以获得壁厚相对均匀的薄壁弯曲构件;另一方面是在复杂曲面管状构件精

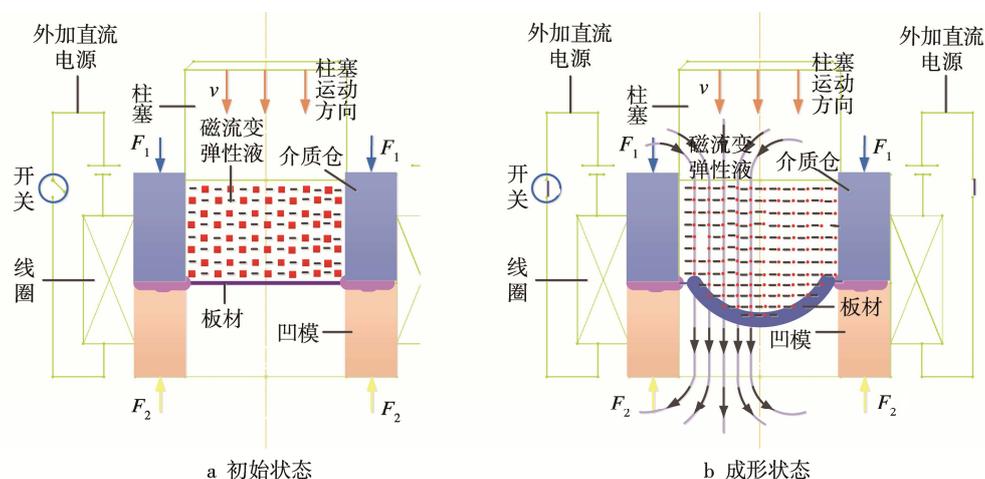


图1 板材磁流变介质软模胀形工艺原理^[9]

Fig.1 Soft mould bulging process principle of plate magnetorheological medium

密成形过程中将磁流变弹性体作为胀形介质填充于管材内部，管材外部设置凹模，通过磁场作用控制磁流变弹性体的磁流变效应及力学性能等使管材可以实现轴向补料和局部胀形，在有效降低成形力的同时，获得具有大膨胀量和壁厚均匀的复杂空心变截面构件。

基于磁流变弹性体的管材弯曲工艺如图 2 所示。实施弯曲实验时利用烧结钕铁硼强磁铁施加外磁场，采用特斯拉计测量单个强磁铁附近的磁场强度 (B) 分布。实验采用两种大小的磁场强度，即管坯两侧放置一对磁铁，通过改变外加电源大小改变磁场强度^[10]。在绕弯过程中，当管材通过弯曲模时，开关闭合，电流通过电磁铁产生磁场，管材内部的磁流变弹性体在磁场作用下弹性模量发生改变，在管材内壁起到支撑的作用，降低成形力，减少起皱等成形缺陷，提高壁厚均匀性。

图 3 所示为基于磁流变弹性体的管材胀形原理。将管坯置于模具型腔内，管材内部充满磁流变弹性体。针对不同构形的复杂曲面构件，所使用的磁流变弹性体也有所差异，主要体现在弹性体中磁性粒子的

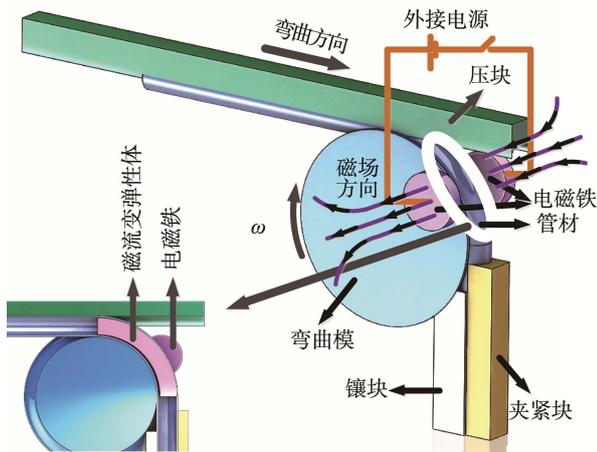


图 2 基于磁流变介质的管材弯曲成形原理^[10]
Fig.2 Principle of tube bending forming based on magnetorheological medium

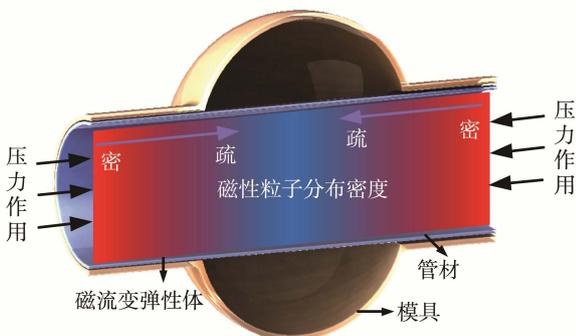


图 3 基于磁流变弹性体的管材胀形原理
Fig.3 Tube bulging principle based on magnetorheological elastomer

分布情况的不同。从所示模具型腔的形状可以看出，该复杂曲面构件的变形程度从中间到两侧逐渐减小，则适用于其成形的弹性体中磁性粒子如图 3 中所示，从中间到两侧，粒子分布密度逐渐增大。在弹性体两端部的磁性粒子分布密度最大，在磁场作用下该部分将会呈硬质状态，轴向补料时作为刚性支撑阻碍材料厚向流动。弹性体中间区域磁性粒子含量降低，尤其是弹性体中心区域在轴向机械压力作用下实施胀形，形成局部大膨胀凸起。

2 磁流变弹性体的国内外研究现状

2.1 磁流变弹性体制备研究方面

Shiga 等^[11]首次提出磁流变弹性体的概念，并利用铁粉和硅橡胶基体制备出了磁流变弹性体。磁流变弹性体的制备大多是将高分子聚合物基体与磁性粒子以某种方式混合而成。研究表明，磁性粒子的大小、形状、分布以及数量，基体材料的种类和性质，添加剂的种类和性质等对制备得到的磁流变弹性体具有不同程度的影响，因此对磁流变弹性体制备的研究主要集中于对磁性粒子^[12-13]、基体材料^[14]和添加剂^[15]的选择和调控。李光辉^[16]选择硅橡胶作为基体、羰基铁粉作为磁性粒子以及二甲基硅油和石墨作为添加剂，制备出了不同石墨含量以及不同制备方式的磁流变弹性体样品，并对其微观结构进行了表征。肖林京等^[17]在相同条件下制备不同配比单-粒径磁流变弹性体样品，用真空扫描隧道显微镜观测磁流变弹性体纵切面的微观结构，可以看到铁磁性颗粒基本上沿磁场方向成柱状排列，内部结构致密（如图 4 所示）。

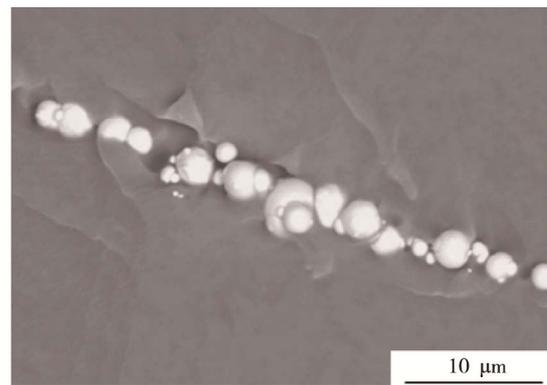


图 4 磁流变弹性体纵切面的 SEM 图^[17]
Fig.4 SEM diagram of longitudinal section of magnetorheological elastomer

Bellan 等^[18]通过研究以室温硫化硅橡胶为基体的磁流变弹性体，分析磁性粒子含量和磁场强度对磁流变弹性体的磁流变效应的影响，发现材料的磁流变效应随着磁性粒子含量的增加呈线性增长，并且预结

构化材料的磁流变效应要明显高于未预结构化材料。许金楼^[19]以天然橡胶为基体,设计了一种磁流变弹性体一步固化成形系统,研究了制备工艺对磁流变弹性体性能的影响,发现胶料的塑炼工艺、混炼工艺和硫化温度对磁流变弹性体有较大影响,在3种不同硫化温度(128, 133, 143 °C)中,128 °C条件下磁性粒子在基体中的链状排列最为明显,磁致模量最高。

2.2 磁流变弹性体性能研究方面

美国 Lord 公司 Jolly 等^[13,20]基于铁粉和硅橡胶的磁流变弹性体进行了全面的研究。研究表明,在外加磁场作用下,当铁粉含量达到 30%时,磁流变弹性体的剪切模量变化高达 0.6 MPa(约为 30%~40%)。Stepanov 等^[21]通过对高弹性磁流变弹性体进行拉伸、静态剪切和动态剪切实验来研究其粘弹性行为,发现在 0.3 T 的外加均匀磁场条件下,材料的弹性模量大幅上升,并观察到了由磁场诱导的新的伪塑性效应,这导致了磁流变弹性体的剪切损耗模量显著降低。Boczkowska 等^[22]研究了聚氨酯基磁流变弹性体剪切变形条件下的力学性能,发现磁流变弹性体的流变性能很大程度上取决于弹性体的组织结构,尤其是磁性粒子的大小、形状以及分布情况,通过优化磁性粒子的尺寸、形状和排列方式,可提高磁流变弹性体在外加磁场下的刚度。Mazlan 等^[23-24]在外加磁场作用下进行了磁流变液的压缩实验,获得了挤压模式下不同电流和压缩速度下两种磁流变液的应力应变曲线,分析了不同影响因素的作用,解释了压力降产生的原因。

2.3 基于磁流变介质的塑性成形工艺研究方面

国内学者对磁流变液介质压力成形进行了系统的研究^[25-27]。哈尔滨工业大学王朋义^[9]通过对

A11060 板材进行磁流变液软模胀形试验,研究了外加磁场强度、磁流变液中的磁性粒子含量对板材成形过程中加载曲线、试件构形及应变分布的影响规律。研究发现,相同试验条件下胀形力随着外加磁场强度和磁流变液中的磁性粒子含量的增加而增大;但当磁性粒子含量较高时,试件的最大厚向应变和最大胀形高度随着磁场强度的增加并不是单调增加,而是先增大后减小。磁流变弹性体介质压力成形也有一定的研究进展。王忠金等^[28]提出了一种大变径比的变径零件粘弹塑性软模成形方法,用以解决现有的软模成形方法只能成形小变径比的零件的问题,并能够减小成形过程中起皱,提高成形稳定性。王朋义等^[29]提出了一种如图 5 所示的基于磁流变弹性体的板材软模成形装置及方法,在板材软模成形过程中通过调节电流来改变成形区域的磁场强度大小,进而改变磁流变弹性体的弹性模量,使得成形板材在磁流变弹性体合适的弹性模量下成形出所需的形状,用以解决当前成形过程中无法改变橡胶性能的问题。

国外 Thiruvarduchelvan 等^[30]在传统拉深工艺获得的拉深件基础上,通过重复挤压凹模与容框件的环形聚氨酯垫,依靠聚氨酯橡胶与坯料间的摩擦力使材料流入型腔,从而获得了反拉深比为 2.7~3.0 的杯形件。

3 基于磁流变弹性体的复杂曲面构件精密成形关键技术

3.1 磁流变弹性体的制备关键技术

对于磁流变弹性体的制备,目前的工艺是先将橡胶基体与硫化剂均匀混合,然后以一定温度在恒温干燥箱中预热,使基体的粘度降低,便于磁性粒子在基体中运动,容易呈一定规律排布。再利用高速搅拌机

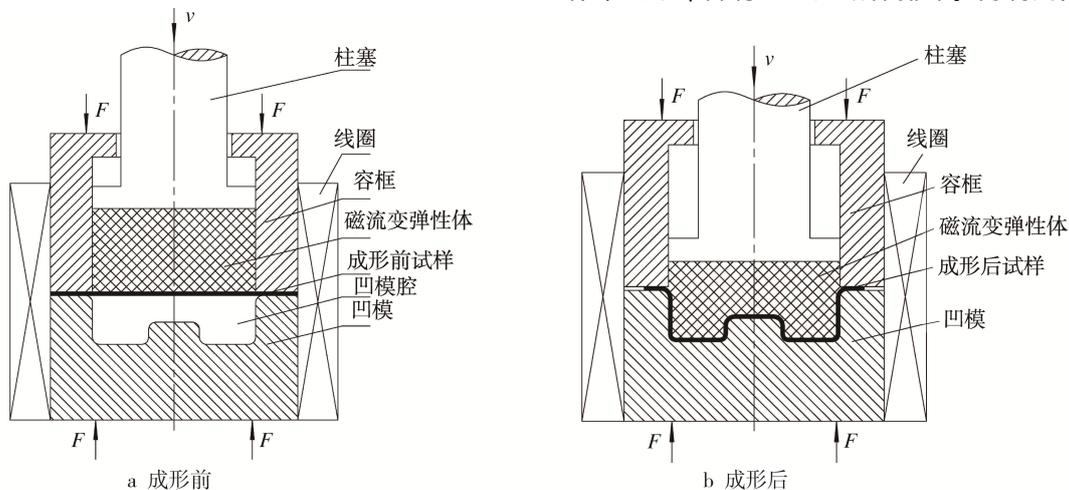


图 5 基于磁流变弹性体的板材软模成形装置^[29]

Fig.5 Plate soft mold forming device based on magnetorheological elastomer

将一定比例的橡胶基体与磁性粒子搅拌均匀后，放入真空干燥箱中抽真空，以排除内部的气泡。最后在定型模具中固化，在模具周围施加不同强度的匀强磁场，就可得到具有不同力学特性的磁流变弹性体试样^[31]。但是这种方法对磁性粒子的性质以及磁场加载的条件要求较为严格，因此针对此问题开发出两种磁流变弹性体的新型制备方法，降低磁性粒子在橡胶基体中的运动阻力，使磁性粒子在橡胶基体中的轴向与径向分布与含量可精确控制，充分发挥磁流变弹性体的磁流变效应，适用于制备各向异性且对机械物理性能有一定要求的磁流变弹性体。

针对在某一匀强磁场作用下，为在磁流变弹性体内不同方向上产生的磁流变效应不同或呈梯度分布，首先根据目标磁流变弹性体在某一轴向上的磁流变效应变化要求，将目标磁流变弹性体按照一定分割顺序等分为若干段磁流变效应单体。其中制备的每一段磁流变效应单体都具有一个特定的磁性粒子所占质量分数，然后将单体置于由两块永磁铁所产生的匀强磁场中使磁性粒子结构化分布，待混合物固化成形后取出得到的磁流变效应单体。最后将预制得到的磁流变效应单体按顺序叠放在最终定型模具中进行组合，如图 6 所示，其中①—④对应不同磁性粒子含量的磁流变弹性体，将组合体经加热加压成形后得到目标磁流变弹性体^[32]。

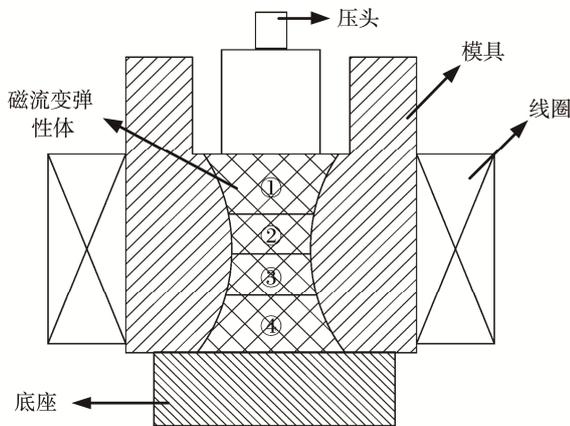


图 6 变轴向磁性粒子分布磁流变弹性体成形示意图^[37]
Fig.6 Forming diagram of magnetorheological elastomer with variable axial magnetic particle distribution

对于大型磁流变弹性体，在制备过程中对磁场发生器的要求非常高，这就要求磁场发生器在较大的磁场范围内保持较大的磁场强度，这将大大增加磁场发生器的制造难度，延长生产周期，甚至难以完成制造，极大限制了磁流变弹性体在成形中的应用。为在无外加磁场的情况下实现磁性粒子的规律排布，首先将磁性粒子与增塑剂混合均匀，然后将得到的混合物加入到流体态橡胶原料中利用高速搅拌机搅拌一定时间，使磁性粒子在橡胶基体中分布均匀，再将混合物搅拌均匀后放入真空容器中抽真空以去除混合物内部的

气泡，最后将混合物倒入模具中固化成形，在固化成形的过程中，放在离心机上转动，使模具沿中心轴线旋，如图 7 所示，通过控制转速及其变化得到所需的磁流变弹性体^[33]。

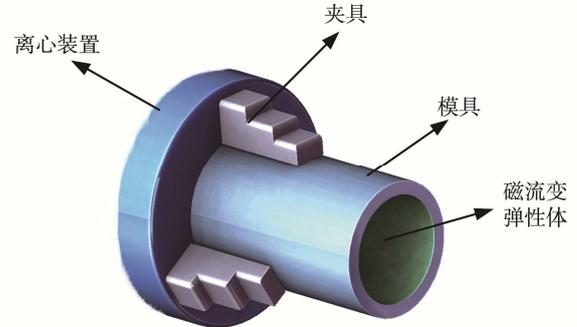


图 7 磁流变弹性体径向成形示意图
Fig.7 Radial forming of magnetorheological elastomers

3.2 磁场搭建以及加载路径关键技术

磁性粒子在基体材料中的分布情况对磁流变弹性体的性能有决定性影响，而磁性粒子的分布又受磁场大小与分布的控制（如图 8 所示），因此磁场条件的搭建尤为关键。磁场发生装置可采用永磁铁或电磁线圈，其中永磁铁的磁场强度大小不易调节，且在制备过程中操作不方便，故磁场选择通过通电流线圈产生，可以通过调节外接直流电源的大小，改变线圈的磁场强度^[19]。根据法拉第电磁感应定律有如下公式：

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (1)$$

式中： B 为磁感应强度； μ_0 为空气中的磁导率常数； N 为电磁线圈匝数； I 为直流电源电流大小， l 为模具的高度。通过设定所要求的实验参数，可以利用式（1）求得所需要的直流电源大小。

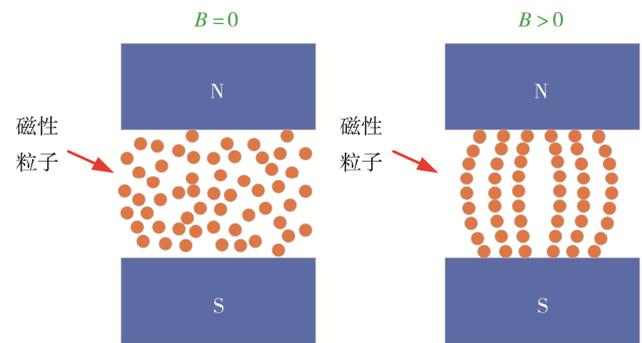


图 8 不同磁场条件下磁性粒子的分布情况
Fig.8 Distribution of magnetic particles under different magnetic field conditions

由于磁流变弹性体的性能随外加磁场条件的改变而发生变化，因此便于调节磁流变弹性体的传力特性，控制成形过程的加载曲线，有助于复杂曲面构件的成形性和零件的成形质量的提高。构件内部的应力

状态由不同的加载条件决定，应力状态的差异又对构件的变形方式及变形程度产生了重要影响，对构件的成形极限起到决定性作用。加载路径是直接影 响构件材料流动和成形质量的重要工艺参数，通过对构件轴向进给速度的研究，调节轴向应力加载曲线，可以优化构件的成形质量。对于磁流变弹性体 介质压力成形，弹性体弹性模量的大小、工作区域 磁感应强度以及构建的轴向加载速度，是决定塑性 失稳及成形缺陷的关键因素。通过所建立的弹性体 性能多因素作用模型，分析各参数对于弹性体性能 的影响，采用不同位置不同磁感应强度同时控制的 方式，在成形不同阶段精确控制磁场作用，如图 9a、

9b。结合调节加载速度的方式，精确调节加载路径， 实现复杂曲面构件精确成形，如图 9c。参考磁流变 弹性体本构关系，在原有通过调节加载速度改变加 载路径的基础上，采用对磁场强度的调节来改变磁 流变弹性体的性能，实现加载路径的双重控制。通 过调整外加磁场条件，磁流变弹性体的力学性能变 化迅速，影响与构件接触面的摩擦润滑条件和传递 给构件的力，导致构件在成形过程中的应力状态不 同，对加载路径产生很大影响，而不同的加载路径 会导致试样的应力应变分布和构形出现明显的差 异。通过对加载路径的双重控制，可显著提高构件 的成形极限，保证构件成形性的发挥。

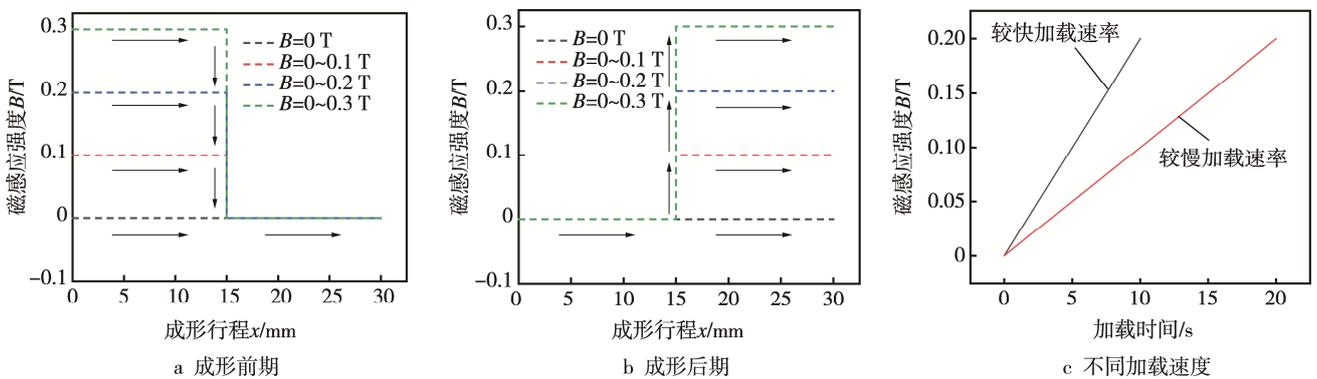


图 9 不同磁场加载路径下的磁场强度

Fig.9 Magnetic field intensity under different magnetic field loading paths

3.3 磁固耦合条件下的成形工艺仿真技术

复杂曲面构件磁流变弹性体精密成形属于磁固 场耦合条件下的复杂塑性变形过程，磁场强度在成形 不同阶段、不同成形位置会不断发生变化，导致材料 流动不均匀，构件壁厚分布差异较大，严重制约了成 形构件使用安全性和使用寿命。通过建立磁流变弹性 体介质压力成形磁固耦合有限元模型，系统研究外加 磁场大小、磁性粒子数量、间隙大小、轴向进给速度 以及外加压力大小对壁厚分布的影响，揭示复杂曲面 构件在环向、轴向的壁厚分布规律。磁流变弹性体的 磁化率和相对磁导率不是恒定的，是根据磁介质所在 的磁场矢量而变化。相同试验条件下，随磁流变弹性 体中磁性粒子含量和磁感应强度的增加，其成形力也 随之增大。在成形过程中，不同的成形阶段和位置所 需的成形力也是不同的，因此，在磁-固耦合条件下 复杂曲面零件的成形过程中，合理控制磁性颗粒在磁 流变弹性体介质中的分布，如图 10 所示，使有较大 变形区域含有更多磁性粒子，是提高零件成形性能的 关键。

磁固耦合条件下的成形工艺仿真实施主要包括 以下程序：采用固化法制备高性能磁流变弹性体介 质；通过控制磁流变弹性体中磁性粒子的分布，得到 具有不同磁性的介质；用实验方法测试不同磁场条件

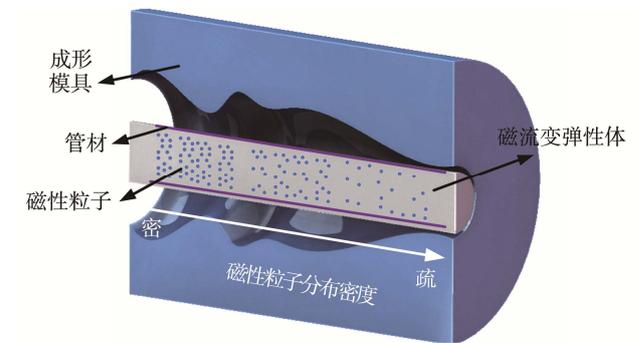


图 10 成形过程中磁性粒子分布示意图

Fig.10 Distribution of magnetic particles in forming

下介质的性能；采用内充磁流变弹性体压力试验手 段，获得构件不同磁流变弹性体介质条件下的真应 力、应变曲线，构建磁流体压力成形磁固耦合有限元 分析模型、分析压力成形机理及非均匀流动规律。

后续，采用试验方法，改变成形条件，优化成形 工艺，分别制备典型缺陷试件，如含有弯曲段开裂、 波区开裂、焊缝开裂、死皱和飞边的构件以及制备具 有不同磁性粒子含量的构件，验证内充磁流变体压力 成形过程中磁固耦合模型的精确性；采用应变网格分 析方案，测量成形后构件表面应变网格的变形结果， 获得坯料各区域内的应变分布，分析各坯料的变形情 况和材料流动规律。

3.4 复杂曲面构件磁流变成形缺陷调控技术

在成形大变径比、大截面变化比复杂曲面构件过程中, 由于引入了不均匀磁场, 成形过程精确控制困难, 容易出现塑性失稳及壁厚分布差异较大和尺寸精度低等缺陷。对于磁流变弹性体介质压力成形, 针对弹性体弹性模量的大小、工作区域磁感应强度以及轴向加载速度进行研究, 是解决塑性失稳及成形缺陷问题的关键。基于构件起皱的能量理论模型以及材料不均匀流动理论深入研究成形过程中典型缺陷产生机制, 并提出成形缺陷控制方法, 如根据曲面复杂程度调整磁性粒子数量和局部磁场大小, 实现复杂曲面构件成形缺陷的精确预测和有效控制。进给速度、外加压力大小和磁场施加条件等多因素综合作用下更容易导致构件压力成形过程产生传力区局部材料严重堆积、开裂、变形区截面畸变甚至起皱、轴向及环向壁厚非均匀分布等缺陷。通过合理控制内充磁流变弹性体的磁性粒子含量、外加磁场以及外加载荷的大小可以对常见典型缺陷进行有效控制甚至完全消除。

4 结论

磁流变弹性体作为一种最具发展潜力的磁流变材料, 可以实现板材、管材构件的精密成形。基于其粘塑性特性, 应用于复杂曲面板材精密成形领域将会有效提高复杂薄壁构件的成形质量。其在磁场作用下的屈服应力及剪切性能的可变性使其在管材成形领域同样具有较大的优势, 主要体现在较小的壁厚减薄率以及更均匀的壁厚分布调控。随着磁流变弹性体制备、磁场条件搭建及加载路径控制、磁固耦合条件的工艺仿真以及成形缺陷调控等技术研究的逐渐深入, 基于磁流变弹性体的复杂曲面构件精密成形关键技术将在我国诸多武器装备制造领域获得重要而广泛的实际应用。

参考文献:

- [1] 郎利辉, 程鹏志, 邵天巍, 等. 航空发动机导向器叶片衬管内高压成形工艺[C]// 第十二届全国塑性工程学术年会第四届全球华人塑性加工技术研讨会论文集, 重庆, 2011.
LANG Li-hui, CHENG Peng-zhi, SHAO Tian-wei, et al. High-pressure Forming Process for Vane Liner of Aero Engine Guide[C]// Proceedings of the 4th Global Chinese Plastic Machining Technology Symposium at the 12th National Plastic Engineering Annual Conference, Chongqing, 2011.
- [2] 金成闯. 盒形件磁性介质软模拉深成形工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [3] JIN Cheng-chuang. Research on Soft Die Drawing Forming Process of Magnetic Medium for Box Shaped Parts[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [3] 苑世剑, 刘伟, 王国峰, 等. 轻合金复杂薄壁构件流体压力成形技术新进展[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 31—37.
YUAN Shi-jian, LIU Wei, WANG Guo-feng, et al. New Progress in Fluid Pressure Forming Technology for Light Alloy Complex Thin-walled Components[J]. Shanghai Aerospace, 2019, 36(2): 31—37.
- [4] JOLLY M, BENDER J, CARLSON J. Properties and Applications of Commercial Magneto Rheological Fluids[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(1): 5—13.
- [5] ZHAO X P, YIN J B. Preparation and Electrorheological Characteristics of Rare-earth-doped TiO₂ Suspensions[J]. Chemistry of Materials, 2002, 14: 2258.
- [6] 贺俊智, 郭霞, 李冬冬, 等. 磁流变弹性体的研究进展[J]. 高分子通报, 2018(5): 21—27.
HE Jun-zhi, GUO Xia, LI Dong-dong, et al. Research Progress of Magneto Rheological Elastomers[J]. Polymer Bulletin, 2018(5): 21—27.
- [7] 李剑锋, 龚兴龙, 张先舟, 等. 硅橡胶基磁流变弹性体的研制[J]. 功能材料, 2006, 37(6): 1003—1012.
LI Jian-feng, GONG Xing-long, ZHANG Xian-zhou, et al. Development of Silicone Rubber Based Magneto Rheological Elastomers[J]. Functional Materials, 2006, 37(6): 1003—1012.
- [8] 王朋义. 板材可变粘度粘性介质压力胀形过程变形行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WANG Peng-yi. Study on Deformation Behavior during Pressure Bulging Process of Plate with Variable Viscosity and Viscous Medium[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 王朋义. A11060 板材磁流变软模成形工艺及成形极限研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
WANG Peng-yi. Research on Magneto-rheological Soft Mold Forming Process and Forming Limit of A11060 Plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [10] 温彤, 张智顺, 张梦, 等. 基于磁流变颗粒填充体的薄壁管精密弯曲成形[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 63—66.
WEN Tong, ZHANG Zhi-shun, ZHANG Meng, et al. Thin-walled Tube Precision Bending Based on Magneto Rheological Particle Filling[J]. Journal of Huazhong

- University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(7): 63—66.
- [11] SHIGA T, OKADA A, KURAUCHI T. Magnetorheological Behavior of Composite Gels[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 58(4): 787—792.
- [12] 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 Xu-li, MENG Yong-gang, TIAN Yu. Effects of Particle Volume Ratio and Magnetic Field Intensity on the Structure of Magneto Rheological Elastomer Particles[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2010, 50(2): 246—249.
- [13] JOLLY M, CARLSON J. The Magnetorheological Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix[J]. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structure*, 1996, 7: 613—622.
- [14] SUN T L, GONG X L, CHEN L, et al. Study on the Damping Properties of Magneto Rheological Elastomers Based on Cis-polybutadiene Rubber[J]. *Polym Test*, 2008, 27(4): 520—526.
- [15] 陈琳, 龚兴龙, 姜万权, 等. 增塑剂对磁流变弹性体磁流变效应的影响[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 703—705.
CHEN Lin, GONG Xing-long, JIANG Wan-quan, et al. Effect of Plasticizer on Magnetorheological Effect of Elastomer[J]. *Functional Materials*, 2006, 37(5): 703—705.
- [16] 李光辉. 磁流变弹性体的制备及其磁致传感特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
LI Guang-hui. Preparation of Magnetorheological Elastomers and Their Magnetogenic Sensing Characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [17] 肖林京, 范亚敏, 朱绪力, 等. 磁流变弹性体的制备及其压敏导电性能研究[J]. *功能材料*, 2016, 47(7): 7216—7219.
XIAO Lin-jing, FAN Ya-min, ZHU Xu-li, et al. Preparation of Magneto Rheological Elastomers and Study on their Pressure-sensitive Conductivity[J]. *Functional Materials*, 2016, 47(7): 7216—7219.
- [18] BELLAN C, BOSSIS G. Field Dependence of Viscoelastic Properties of Elastomers[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2002, 16(17): 2447—2453.
- [19] 许金楼. 天然橡胶基磁流变弹性体的制备及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
XU Jin-lou. Preparation and Properties of Natural Rubber-based Magneto Rheological Elastomers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [20] JOLLY M, CARLSON J, MUNOZ B. A Model of the Behavior of Magneto Rheological Materials[J]. *Smart Materials & Structures*, 1996, 5(5): 607—614.
- [21] STEPANOV G, ABRAMCHUK S, GRISHIN D. Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Viscoelastic Behavior of Magnetic Elastomers[J]. *Polymer*, 2007, 48(2): 488—495.
- [22] BOCZKOWSKA A, AWIETJAN S, PIETRZKO S. Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers under Shear Deformation[J]. *Composites Part B Engineering*, 2012, 43(2): 636—640.
- [23] MAZLAN S A, EKREEM N B, OLABI A G. Apparent Stress Strain Relationships in Experimental Equipment where Magnetorheological Fluids Operate under Compression Mode[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(9): 095002.
- [24] MAZLAN S A, EKREEM N B, OLABI A G. An Investigation of the Behaviour of Magnetorheological Fluids in Compression Mode[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1): 780—785.
- [25] 王新云, 夏巨湛, 胡国安, 等. 粘性介质压力成形研究进展(上)[J]. *锻压技术*, 2003, 28(5): 40—43.
WANG Xin-yun, XIA Ju-chen, HU Guo-an, et al. Research Progress on Pressure Forming of Viscous Media (Part I)[J]. *Forging Technology*, 2003, 28(5): 40—43.
- [26] 刘建光, 王忠金, 高铁军. 板材粘性介质压力成形粘性附着力影响因素试验研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(10): 146—150.
LIU Jian-guang, WANG Zhong-jin, GAO Tie-jun. Experimental Study on Influencing Factors of Adhesive Adhesion in Plate Viscous Medium Pressure Forming[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10): 146—150.
- [27] 邓明, 罗光平. 用于粘性介质压力成形的介质性能的研究[J]. *锻压技术*, 2006, 31(5): 51—54.
DENG Ming, LUO Guang-ping. Study on Medium Properties for Viscous Medium Pressure Forming[J]. *Forging Technology*, 2006, 31(5): 51—54.
- [28] 王忠金, 宋辉, 胡泊, 等. 一种大变径比的变径零件粘弹塑性软模成形方法: 中国, 201010195839.7[P]. 2010.
WANG Zhong-jin, SONG Hui, HU Po, et al. A Viscoe-

- lastoplastic Soft Die Forming Method for Reducing Diameter Parts with Large Diameter Ratio: China, 201010195839.7[P]. 2010.
- [29] 王忠金, 王朋义, 袁斌先, 等. 一种基于磁流变弹性体的板材软模成形装置及方法: 中国, 201310244724.6[P]. 2013.
WANG Zhong-jin, WANG Peng-yi, YUAN Bin-xian, et al. A Plate Soft Die Forming Device and Method Based on Magnetorheological Elastomers: China, 201310244724.6[P]. 2013.
- [30] THIRUVARUDCHELVAN S, LEWIS W. The Redrawing of Cups at a Redraw Ratio of Three using an Annular Urethane Pad[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87(1/2/3): 128—130.
- [31] 张恒伟. 硅橡胶基磁流变弹性体制备与性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
ZHANG Heng-wei. Preparation and Performance Analysis of Silicone Rubber Based Magnetorheological Elastomers[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [32] 郭训忠, 王辉, 陶杰, 等. 精确控制磁性粒子轴向分布的磁流变弹性体及其制备方法: 中国, 201910929992.9[P]. 2019.
GUO Xun-zhong, WANG Hui, TAO Jie, et al. A Magnetorheological Elastomer with Precise Control of Axial Distribution of Magnetic Particles and Its Preparation Method: China, 201910929992.9[P]. 2019.
- [33] 郭训忠, 王辉, 吴聪. 一种控制磁性粒子径向分布的磁流变弹性体制备方法: 中国, 201910972225.6[P]. 2019.
GUO Xun-zhong, WANG Hui, WU Cong. A Preparation Method of Magnetorheological Elastomer Controlling Radial Distribution of Magnetic Particles: China, 201910972225.6[P]. 2019.