

分区差异润滑对5A02铝合金三通管 成形质量的影响

徐勇^{1,2,3} 张驰¹ 解文龙^{2,3*} 夏亮亮⁴ 杨宝成^{2,3} 张士宏^{2,3}
黄新越⁵ 王晟诚⁵

1. 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山, 063210

2. 中国科学院金属研究所, 沈阳, 110016

3. 沈阳市航空航天复杂构件精密制造重点实验室, 沈阳, 110016

4. 鲁东大学交通学院, 烟台, 264000

5. 沈阳多元机电设备有限公司, 沈阳, 110000

摘要:为提高三通管的成形质量,采用液压成形工艺提出了分区差异润滑方法。通过有限元模拟验证了分区差异润滑相比于传统润滑方式的优势,从材料流动性出发,对三通轴向单元和环向单元在变形过程中所受到的拉应力和压应力进行提取,分析了差异润滑区域面积大小对成形质量的影响。研究表明,相较于传统润滑方式,分区差异润滑能够有效地降低三通管支臂侧面和顶部的壁厚减薄率,同时可以减少侧面进给补料量从而降低失稳起皱的风险;随着胀形区润滑面积的增大,支臂单元所受的轴向拉应力逐渐减小,降低了三通支臂侧面的减薄率;随着非胀形区人工粗糙面积的增大,三通管侧壁单元所受的轴向压应力减小,但环向拉应力逐渐增大,材料更易向管身与支臂的过渡区流动,避免在管身中部出现材料堆积现象,从而降低了失稳起皱的风险。研究结果可为三通管零件的成形提供技术支持与理论参考。

关键词:三通管;分区差异润滑;液压成形;壁厚分布

中图分类号: TG386

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influences of Differential Lubrication on Forming Quality for 5A02 Aluminum Alloy T-shape Tubes

XU Yong^{1,2,3} ZHANG Chi¹ XIE Wenlong^{2,3*} XIA Liangliang⁴ YANG Baocheng^{2,3}
ZHANG Shihong^{2,3} HUANG Xinyue⁵ WANG Shengcheng⁵

1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, 063210

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016

3. Shenyang Key Laboratory for Aerospace Complex Components Precision Manufacturing, Shenyang, 110016

4. Transportation Department, Ludong University, Yantai, Shandong, 264000

5. Shenyang Duoyuan Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd., Shenyang, 110000

Abstract: In order to improve the forming quality of T-shape tubes, a method of differential lubrication was proposed by using hydroforming. The advantages of differential lubrication were verified by finite element simulation compared with traditional lubrication. Based on the fluidity of materials, the tensile stress and compressive stress of axial and circumferential elements of T-shape tubes were extracted during deformation. The influences of the area of the differential lubrication zones on the forming quality were analyzed. The results show that compared with the traditional lubrication method, the differential lubrication may effectively reduce the wall thickness thinning rate of the sides and tops of the T-shape tubes. Differential lubrication also may reduce the amount of side feed to reduce the risk of wrinkling. With the increasing of lubrication area in the bulging zones, the axial tensile stress of the arm element is gradually reduced, and the thinning rate of the arm sides of the T-shape tubes is reduced. With the increasing of the artificial roughing areas in the non-bulging zones, the axial compressive stress of the T-shape tubes sidewall element decreases, but the circumferential tensile stress

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(52405439); 中国博士后科学基金(2024M763339); 沈阳市科技计划(22-301-1-10)

increases gradually, and the material is more likely to flow to the transition zone of T-shape tubes, avoiding material accumulation in the middle of the tubes, thus reducing the risk of wrinkling. The research may provide technical support and theoretical reference for the forming of T-shape tubes.

Key words: T-shape tube; differential lubrication; hydroforming; thickness distribution

0 引言

三通管件在复杂管路连接中占有非常重要的地位,被广泛地应用于航空航天、汽车制造以及油气运输等领域。在过去的制造中常常采用焊接支臂的方式,这种方法成形时间长、表面质量差。目前国内外三通类零件成形方式大多采用液压成形,液压成形是将液体作为传力介质,再配以配套的模具,通过简单的工艺加载路径对复杂型腔或复杂形状的零件进行整体成形,根据零件技术要求进行单次或多道次成形,因此被广泛应用于现代加工行业^[1]。与焊接制造相比,液压成形能够对管坯进行一体化成形^[2],这种成形方法的成形效率高、管件质量小、表面质量好。

三通零件作为液压成形中较为经典的零件,国内外学者对此均有研究。FENG 等^[3]建立了双层三通管液压成形过程中轴向进给加载路径的预测模型,研究了双层三通管在成形过程中的塑性变形行为,开发了一种在各种应变条件下的预测模型。LOH-MOUSAVI 等^[4]研究了三通管脉动液压成形中不同管壁厚度、摩擦因数和模具圆角对成形质量的影响,并将减薄率作为评价标准衡量成形质量。OSMAN 等^[5]研究了在不同摩擦条件下对 TC4 管材进行脉动液压加载,并研究了脉动频率、振幅和最小内压力对成形性能的影响。KRISHNAMRAJU 等^[6]研究了在管材液压成形中奥氏体不锈钢破裂风险与焊缝位置的关系。张渝等^[7]研究了连续变厚度管壁厚、过渡区长度对液压成形三通管成形质量的影响,采用多岛遗传算法对连续变厚度管的结构参数进行了优化验证,提高了液压成形三通管的成形质量。李晓冬等^[8]对 5052 铝合金三通管内高压成形规律进行研究,探究了模具过渡圆角半径、摩擦因数、内压力和轴向进给加载方式对成形质量的影响。LIU 等^[9]建立了三通管液压成形过程中侧边起皱的失稳起皱模型,并得到了临界起皱压力的分布。ABBASSI 等^[10]通过有限元模拟和神经网络对三通管工艺参数进行优化设计,提高了三通管材成形质量。PASYNKOV 等^[11]采用热成形工艺成形三通管件,采用轴向挤压研究了工艺参数对三通管件的影响。郭训忠等^[12]研究了不同形式模具型面及冲头对液压胀形工艺制备的三通管件成

形质量的影响,并研究不同成形压力加载路径对应的成形效果。MOHSENI 等^[13]研究了管材冲击液压成形过程的数值模拟,使用欧拉域代替水流冲击进行了损伤分析,验证了此方法的准确性。HUANG 等^[14]采用多目标随机区间优化方法对三通管液压加载路径进行优化,得到最优工艺参数。ZHANG 等^[15]采用响应面法对四通管材的加载工艺参数进行数据优化,得出最优的工艺参数。COLPANI 等^[16]对管材液压成形工艺进行研究,降低了管坯用量,提高了产品的材料利用率。WEI 等^[17]研究了三通管变形过程中的应力-应变状态和变形机理,建立了管坯优化模型,通过两步优化实现了最佳管坯。

润滑在三通管的成形过程中也起到了很重要的影响,PRASANTHI 等^[18]通过有限元模拟探究三通管表面润滑对管材起皱的影响。NGAILE 等^[19]对三通管管坯进行分区,分为摩擦区和导向区,并分析了这两个区域的摩擦因数对壁厚的影响。徐雪峰等^[20-21]采用差异化润滑的方法成形三通管,其研究表明差异润滑能显著提高三通管材的成形质量,可以降低壁厚减薄率,降低管材起皱风险。上述文献中差异润滑的方法主要通过在不同区域采用不同润滑剂实现。本文在此基础上提出人工粗糙处理的方法,进一步实现不同区域的差异化程度,以实现更好的成形质量。此外,研究了分区润滑面积对三通管胀形质量的影响。

1 实验材料与方法

1.1 目标零件几何特征

目标三通管件的几何尺寸如图 1 所示,其中,三通管的外径 $D_1 = 55 \text{ mm}$,壁厚 $\delta = 1.5 \text{ mm}$,成形件支壁直径 $D_2 = 45 \text{ mm}$,主管与支壁轴线夹角为 90° ,支臂底部和顶部过渡圆角直径均为 10 mm 。

1.2 试验材料

在本文中采用的管坯为 5A02 铝合金管,具有强度高、塑性好、耐腐蚀性好以及质量小等特点,广泛被应用于航空航天管路传输方面。5A02 管坯的化学成分如表 1 所示。

采用 WDW-100KN 万能拉伸试验机对实验材料进行室温下的单向拉伸试验,绘制出 5A02 管材的应力-应变曲线见图 2,其基本力学性能参数如表 2 所示。

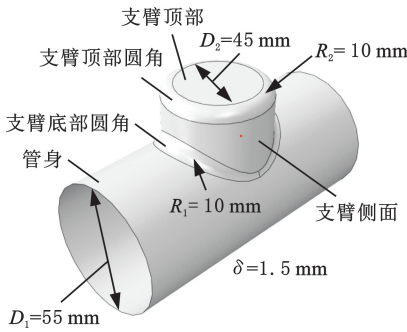


图 1 目标零件特征

Fig.1 Target parts characteristics

表 1 5A02 管材化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of 5A02 tube (mass fraction) %

$w(\text{Si})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Al})$
0.4	0.4	0.1	0.2	2.5	0.15	余量

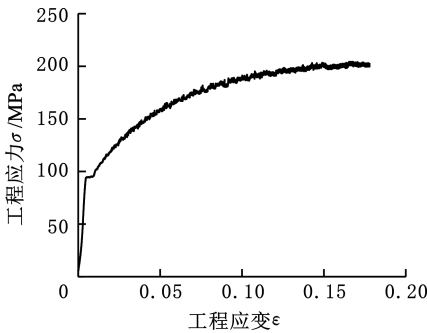


图 2 5A02 管材应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of 5A02 tube

表 2 5A02 管材基本力学性能参数

Tab.2 Mechanics property parameters of 5A02 tube

弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	泊松比
70	95	201	17	0.3

1.3 工艺原理

液压成形三通管件示意图见图 3, 上模具向下运动合模后左右冲头前进至注水位, 向增压缸注水使得管坯内部充满液体, 左右冲头向内补料的同时增压缸持续工作向管坯内加压, 管坯胀形区受到内压压力 p 开始变形直至推动背压冲头运动, 到达指定支臂高度后左右冲头停止前进, 取出管件。

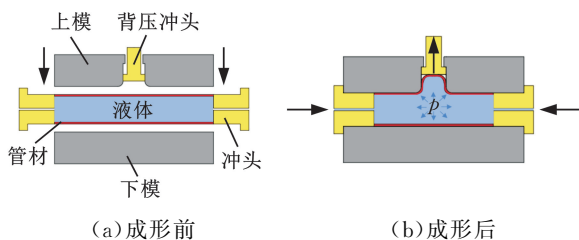


图 3 三通管液压成形示意图

Fig.3 Schematic diagram of T-shape tube hydroforming

在三通零件成形过程中, 由于管材内部受到液体压力的作用, 管坯与模具型腔之间产生较大的接触力, 从而产生较大摩擦力。摩擦对三通零件支臂高度以及支臂壁厚减薄率的影响非常重要, 如果摩擦因数小, 则零件成形高度大, 但在非胀形区由于材料流动堆积会产生起皱; 如果摩擦因数大, 胀形区会因为材料流动差而达不到所要求的支臂高度, 但可以抑制非胀形区因变形不均匀而产生的起皱现象, 同时支臂顶部会因达到屈服极限而产生破裂, 影响产品质量。由此可知, 分别平衡胀形区和非胀形区相对型腔内壁的摩擦因数是提高三通零件的关键所在。如图 4 所示, 依据三通管变形机理, 将三通管管坯分为胀形区 A、非胀形区 B 和补料区 C, 对三个区域采取不同的润滑处理, 以研究对三通管成形质量的影响。其中, L 、 S 分别为区域的长度和面积。

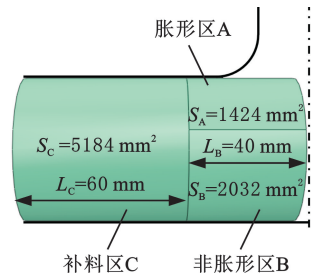


图 4 分区示意图

Fig.4 Diagram of the region division

1.4 实验设备与模具

本文研究所使用的实验设备为 315 t 专用液压成形设备, 实验过程中的位移、力等参数可实时监测。模具主要由上模和下模两部分组成, 上模具和下模具通过定位键定位, 所使用的设备与模具如图 5 所示。

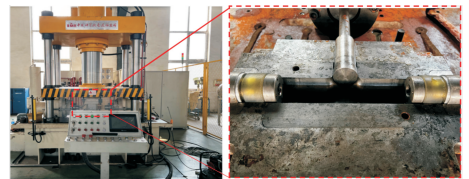


图 5 实验设备与模具

Fig.5 Experimental equipment and die

1.5 有限元模型

由于三通管具有对称结构, 为节省计算时间, 采用 1/4 模型建模, 所建立的有限元模型如图 6 所示。分别对两个对称面进行对称约束, 管坯为可变形的片体结构, 位于中面位置, 设置壁厚为 1.5 mm, 模具、冲头和背压冲头采用离散钢体结构。

采用线性加载方式(其中内压峰值为 40 MPa, 左右冲头补料量为 20 mm)验证有限元模

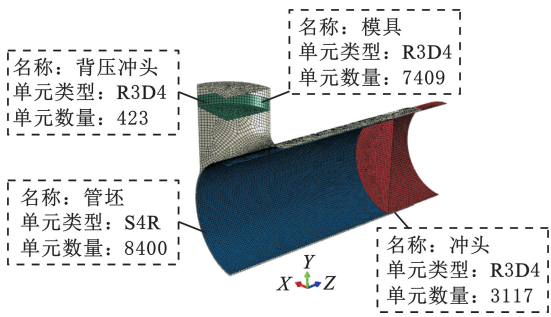


图 6 三通管液压成形有限元模型

Fig.6 Finite element model of T-shape tube hydroforming 型的准确性,内压加载方式如图 7 所示,可以看出,背压力恒定为 3 MPa。

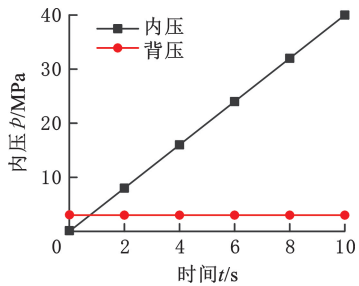


图 7 压力加载路径

Fig.7 Pressure-loading path

沿着成形后三通管的轴向壁厚进行分析,试验件沿轴向提取 12 个点,模拟结果沿轴向提取 45 个点,起点与终点的水平距离为 32.5 mm,提取位置与壁厚分布结果如图 8 所示。通过对比可以看出,有限元模型与实验试件壁厚变化趋势相同,最大减薄区域均发生在支臂顶部圆角处,从壁厚数值大小上看,有限元模型与实验试件的最大误差为 5%,经过验证,证明了所建立的有限元模型较为可靠。

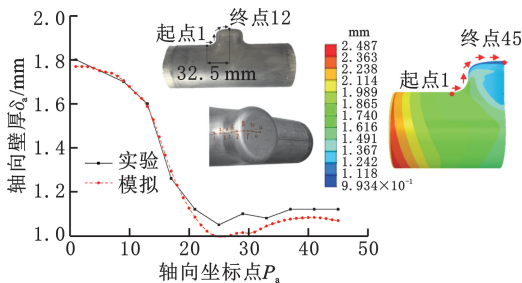


图 8 实验和模拟的壁厚分布

Fig.8 Wall thickness distributions of experiment and simulation

2 分区差异润滑对三通管成形质量的影响

2.1 分区差异润滑方案的选择

差异化润滑能提高三通管材的成形质量,其差异润滑的方法主要通过在不同区域采用不同润滑剂实现。在此基础上,本文提出人工粗糙处理的方法,进一步实现不同区域的差异化程度,以实

现更好的成形质量。

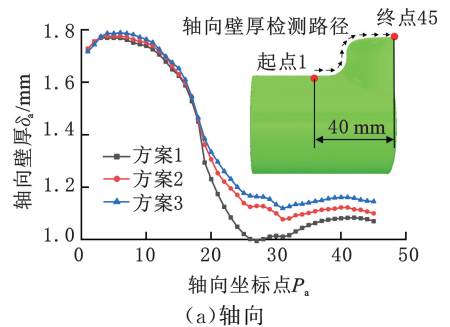
如图 4 所示的分区,在有限元模型中设置三组不同分区摩擦因数的对比实验方案,如表 3 所示,而在实验中可通过主动施加润滑或人工粗糙处理实现不同摩擦因数,当管坯不进行任何处理时摩擦因数约为 0.12^[22],当主动施加润滑剂时摩擦因数约为 0.05^[20],当人工粗糙处理时摩擦因数约为 0.2^[23]。

表 3 分区差异润滑实验方案表

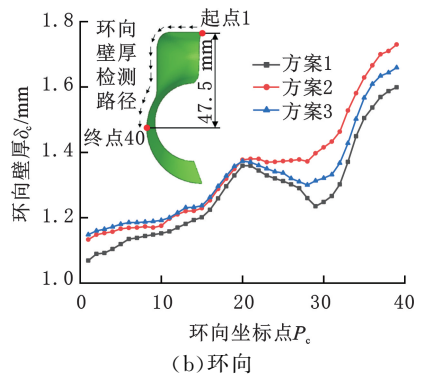
Tab.3 Differential lubrication experimental scheme table

方案	胀形区摩擦因数	非胀形区摩擦因数	补料区摩擦因数
方案 1	0.12	0.12	0.12
方案 2	0.05	0.05	
方案 3	0.05	0.20	

采用图 6 所示的有限元模型,依据图 4 进行区域划分,将表 3 所示的润滑方案代入模型中,沿着三通管轴向和环向取系列点提取壁厚分布,由于管坯差异润滑轴向长度为 40 mm,因此沿轴向水平距离 40 mm 内选取 45 个点进行壁厚提取。环向测量垂直高度为 47.5 mm,选取 40 个参点进行壁厚提取,提取位置与壁厚分布结果如图 9 所示。



(a) 轴向



(b) 环向

图 9 差异润滑各方案壁厚分布

Fig.9 Wall thickness distributions of different differential lubrication schemes

三通管在成形过程中,胀形区减薄最严重,随着支臂的胀形高度逐渐增大,减薄程度最严重的区域在支臂顶部平面处和支臂顶部圆角处,这是因为此处变形量最大。如图 9a 所示,润滑方案 3 和润滑方案 2 均在胀形区添加润滑条件,因此在

胀形过程中,管坯材料在经过支臂底部圆角时具有更好的流动性,从而降低了减薄率。而润滑方案 1 在胀形区没有设置润滑,导致管身材料随着胀形的进行越来越难以流动至胀形区,支臂的变形主要依靠支臂位置材料拉伸减薄,导致最大减薄率明显提高。

但只考虑润滑对支臂区域的壁厚分布是不全面的,因为在胀形过程中材料的流动依赖于推头的进给运动,从管材环向来看,越靠近非胀形区,材料向胀形区的流动性逐渐降低,材料会逐渐堆积到管材的侧面,形成增厚的现象。而随着侧面增厚,管材会出现失稳起皱的缺陷。如图 9b 所示,相比于润滑方案 1 和润滑方案 3,润滑方案 2 的壁厚增厚程度明显更大,并且在管身中部壁厚增厚程度更大,产生失稳起皱的风险也就越高。润滑方案 3 的壁厚增厚率相比较润滑方案 2 的壁厚增厚率更小,这是因为在补料过程中,润滑方案 3 在非胀形区增加了摩擦,材料流动性降低,材料更不容易在侧面堆积,会使材料沿着轴向均匀增厚,从而降低了失稳起皱的风险,因此,采用方案 3 的润滑方式更适合三通管的成形。

2.2 胀形区润滑面积对成形质量的影响

在差异润滑影响成形质量的研究中,润滑面积是影响壁厚变化的重要因素,为探究分区差异润滑面积对成形质量的影响,在图 4 所示的分区的基础上改变胀形区的面积,研究胀形区面积对三通管胀形质量的影响。如图 10 所示,固定补料区 C 和非胀形区 B 的面积,按胀形区 A 的面积从小至大分为 A_1 、 A_2 和 A_3 区域,对应方案 4、5 和 6。

按照润滑方案 3 的参数(即胀形区摩擦因数

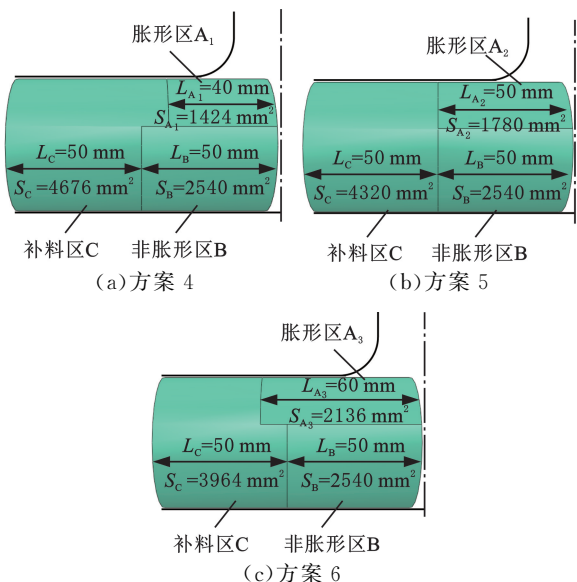


图 10 胀形区面积划分方案

Fig.10 Area planning schemes of bulging zone

为 0.05,非胀形区摩擦因数为 0.20,补料区摩擦因数为 0.12)施加到图 10 所示的对应面积分区中,提取相应的轴向和环向壁厚,沿轴向水平距离 80 mm 内选取 80 个点进行壁厚提取。环向测量垂直高度为 75 mm,选取 80 个参点进行壁厚提取,结果如图 11 所示。

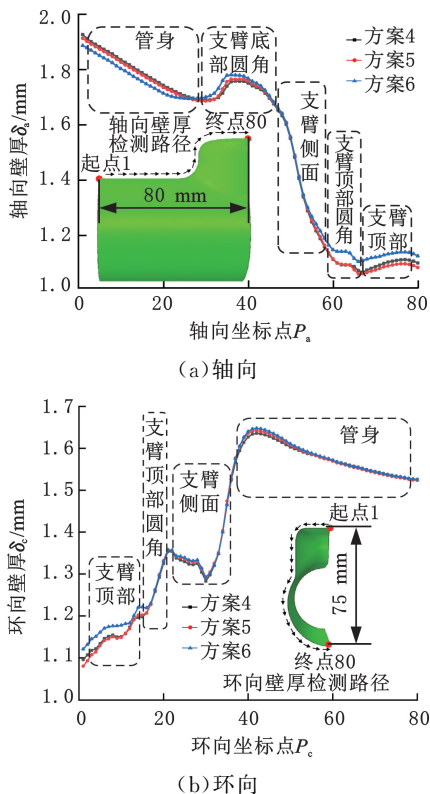


图 11 不同胀形区润滑面积壁厚分布

Fig.11 Wall thickness distributions of lubrication area in different bulging zone

在三通管件成形过程中,最容易发生破裂的位置在支臂顶部,由图 11a 可知,在支臂顶部壁厚减薄量最小的是胀形区面积最大(方案 6)的润滑方式,在支臂顶部的减薄率最大为 26.2%。随着胀形区润滑面积的增大,壁厚减薄程度也逐渐增大。这是因为随着内压增大,胀形区逐渐开始受内压变形,管坯润滑部分逐渐向型腔支臂处流动,而胀形区润滑面积小时其他部分的摩擦增大,导致流入支臂部分的材料减少,造成支臂顶部圆角和顶部的壁厚减薄程度逐渐严重,因此,对于轴向壁厚减薄,施加润滑的胀形区面积越大,支臂顶部的壁厚减薄率越小。

如图 12 和图 13 所示,为更好地分析胀形区面积变化对三通管成形的影响,在模拟结果中分别沿两个对称面选取两个单元 1 和 2 进行应力提取分析,提取的时刻分别为胀形初期和胀形末期,其中胀形初期为管坯与背压冲头接触时刻,胀形高度为 5 mm,胀形末期为胀形高度 20 mm。

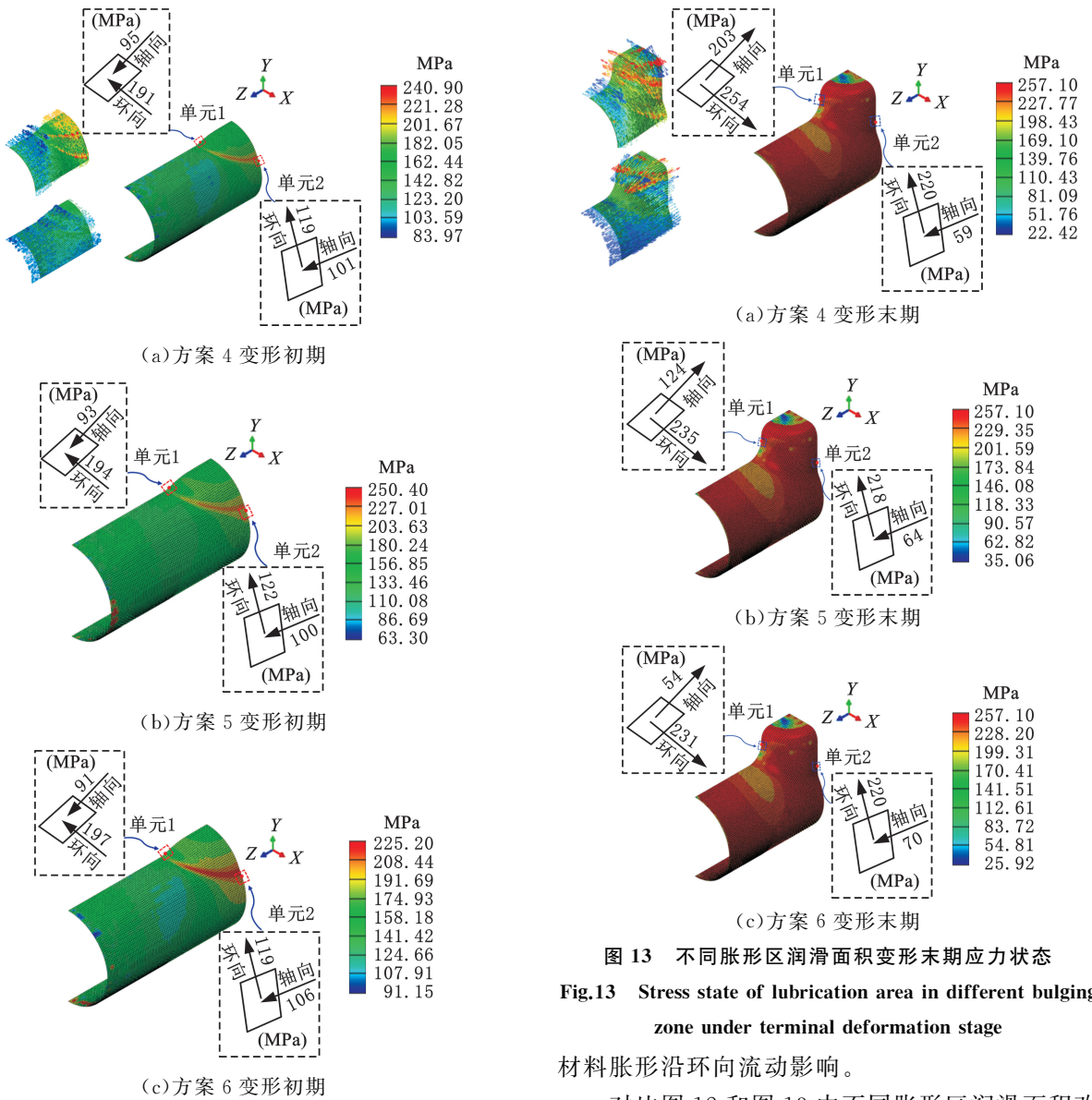


图 13 不同胀形区润滑面积变形末期应力状态

Fig.13 Stress state of lubrication area in different bulging zone under terminal deformation stage

材料胀形沿环向流动影响。

对比图 12 和图 13 中不同胀形区润滑面积改变对应力产生的影响,结果表明随着胀形区润滑面积的增大,单元 1 流经支臂底部圆角时所受的轴向压应力减小,说明此时材料向支臂底部圆角处流动所受的阻力减小。同时,在管坯材料流向支臂侧面后,单元 1 所受的轴向拉应力逐渐减小,说明胀形区增大能使更多的管坯材料流进管材支臂,进而补偿管材胀形带来的壁厚减薄现象。由于改变的是胀形区润滑面积,对单元 2 的应力影响不大,因此,改变胀形区润滑面积不能改善侧面增厚现象。

2.3 非胀形区人工粗糙面积对成形质量的影响

为研究非胀形区人工粗糙面积变化对管材成形质量的影响,如图 14 所示,固定胀形区 A 的润滑面积和补料区 C 的面积,改变非胀形区 B 的人工粗糙面积进行模拟实验,按非胀形区 B 的面积从小至大分为 B₁、B₂ 和 B₃ 区域,对应方案 7、8 和 9。

图 12 不同胀形区润滑面积变形初期应力状态

Fig.12 Stress state of lubrication area in different bulging zone under initial deformation stage

由图 12 可知,单元 1 在变形初期承受轴向压应力和环向压应力,而单元 2 承受轴向压应力和环向拉应力。因为在变形初期,选取的单元 1 还未进入支臂,主要受两端补料影响,因此承受轴向压应力,同样选取的单元 2 也由于此承受轴向压应力。在三通管成形过程中,管材开始胀形,支臂材料流动引起单元 1 受环向压应力,单元 2 受环向拉应力。

由图 13 可知,随着内压力的增大,胀形区的材料逐渐流入支臂,单元 1 受到支臂底部材料胀形和侧边材料胀形的影响而承受双向拉应力,同时随着变形的持续,受材料加工硬化以及摩擦力增大的影响,其应力水平也有明显增加,此时支臂侧面及顶部减薄程度逐渐增大。单元 2 应力方向不变,环向拉应力增大而轴向压应力减小,受支管

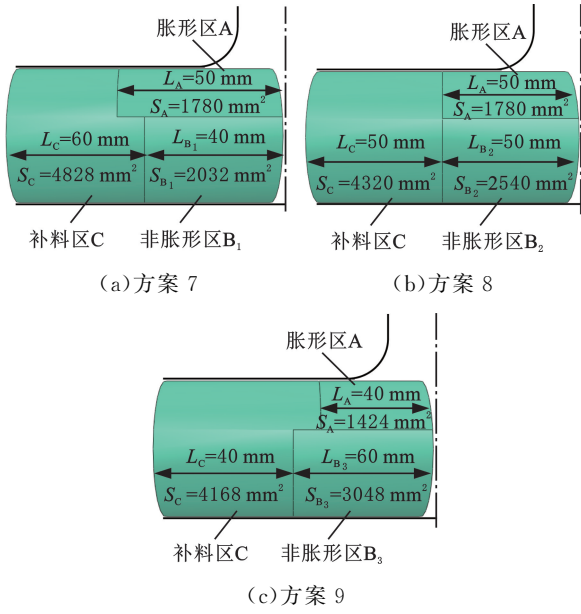


图 14 非胀形区面积划分方案

Fig.14 Area planning schemes of non-bulging zone

同样按润滑方案 3 的参数(即胀形区摩擦因数为 0.05,非胀形区摩擦因数为 0.2,补料区摩擦因数为 0.12)施加到图 14 所示的对应面积分区中,提取相应的轴向和环向壁厚,沿轴向水平距离 80 mm 内选取 80 个点进行壁厚提取。环向测量垂直高度为 75 mm,选取 80 个参点进行壁厚提取,结果如图 15 所示。

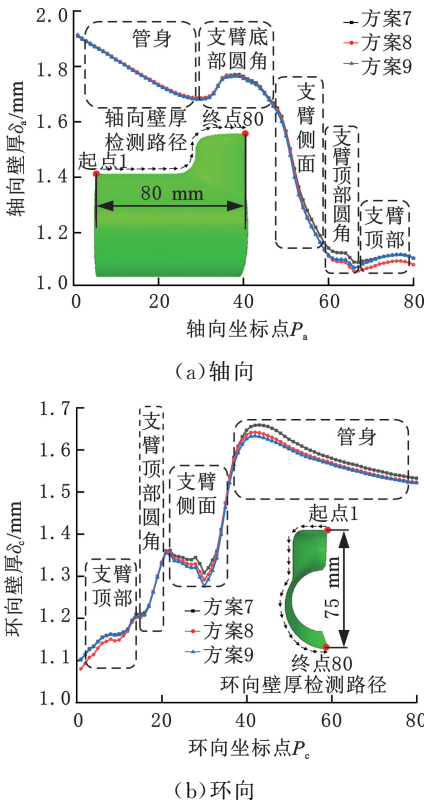


图 15 不同非胀形区润滑面积壁厚分布

Fig.15 Wall thickness distribution of lubrication area in different non-bulging zone

由图 15 可知,三通管材环向壁厚增厚的峰值位于管身中间部位,增厚程度越大,管材失稳起皱的风险越高,而其中方案 7 中增厚率最大(为 11%)。这是因为胀形区面积一定时,非胀形区面积越小,在成形过程中胀形区材料能够更轻易地向支臂部分流动,但非胀形区相比胀形区的材料流动速度更低,当非胀形区面积小时,补料区的材料更易向中间部分流动,造成管材中部形成材料堆积,增厚程度增大。随着非胀形区的面积增大,材料向中间流动越来越困难,因此也就避免了出现材料堆积形成的增厚现象,降低了成形过程中发生失稳起皱的风险。

对不同非胀形区人工粗糙面积的模拟结果进行分析,如图 16 和图 17 所示,在模拟结果中分别沿两个对称面选取两个单元 1 和 2 进行应力提取分析,提取的时刻同样为胀形初期和胀形末期。

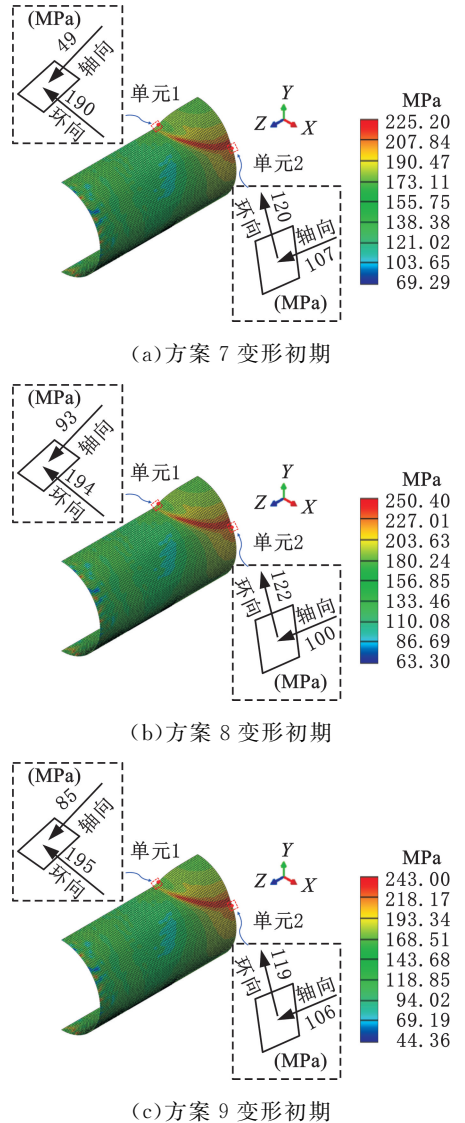


图 16 不同非胀形区人工粗糙面积变形初期应力状态
Fig.16 Stress state of artificial roughness area in different non-bulging zone under initial deformation stage

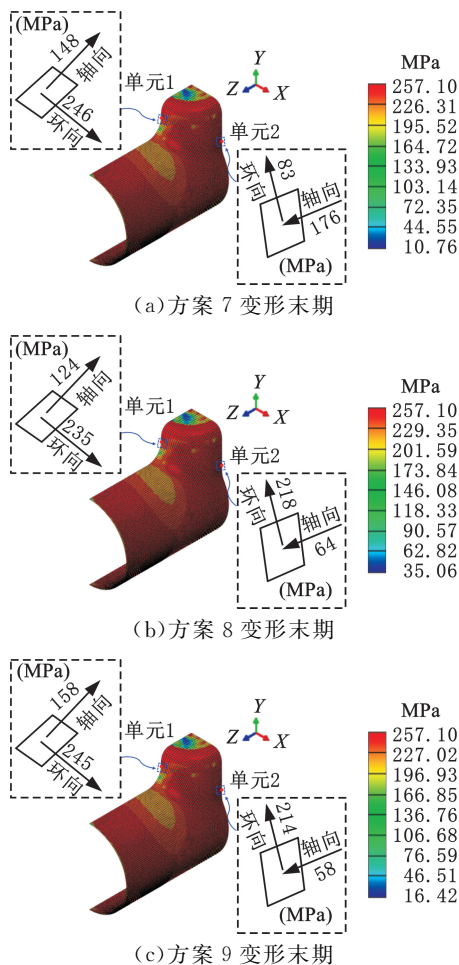


图 17 不同非胀形区人工粗糙面积变形末期应力状态
Fig.17 Stress state of artificial roughness area in different non-bulging zone under terminal deformation stage

由图 16 和图 17 可以看出,当胀形区面积一定时,随着非胀形区面积的增大,单元 2 受到的环向拉应力逐渐增大,而轴向压应力逐渐减小,这说明在同一变形状态下有更多的材料从非胀形区向胀形区流动。同时环向拉应力增大、轴向压应力减小使材料不易堆积,环向流动变得更容易,从而引导中部材料向支臂处流动,降低了管身与支臂过渡方向的壁厚增厚率。同时继续增大非胀形区的人工粗糙面积时,它对应力的影响效果逐渐减弱,方案 8 和方案 9 的应力分布结果差距不大,而方案 9 中人工粗糙面积增大意味着工作量的增加,因此综合选取方案 8 更加适合于降低侧边壁厚的增厚率和起皱风险。

3 实验验证

通过区域差异润滑对三通管材成形性的研究,为达到最小减薄率和相对较小的增厚率,选取方案 8 进行实验,为形成较好的对照实验,采用未进行差异润滑的方案 1 进行数据对比。成形管件及壁厚分布如图 18 所示,外管没有出现破裂和失

稳起皱的现象,成形后支臂高度为 20 mm,表明管件已经完全贴合模具,成形质量良好。

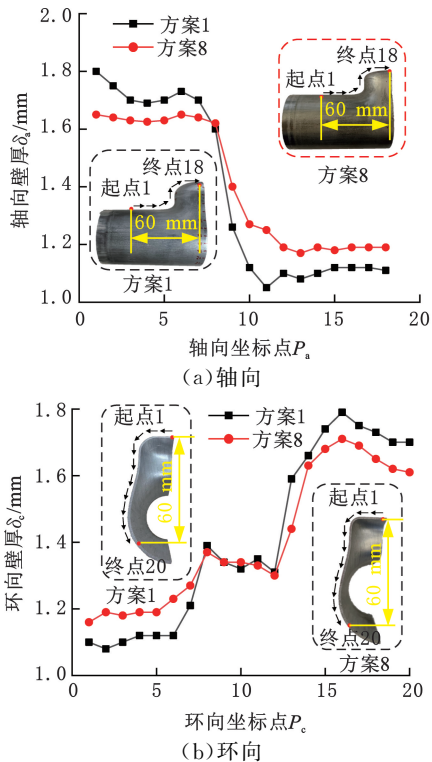


图 18 实验壁厚分布

Fig.18 Experimental wall thickness distribution

由图 18 的实验结果可知,区域差异润滑方式能够提高三通管件成形质量。在轴向方面,与采用区域差异润滑(方案 8)的三通零件相比,未进行差异润滑(方案 1)的三通零件管身部分增厚程度更大;其中采用方案 8 区域差异润滑得到的三通零件轴向最大减薄率为 22%,径向最大增厚为 14%;采用方案 1 未进行差异润滑得到的三通零件轴向最大减薄率为 28%,径向最大增厚为 20%。采用区域差异润滑成形效果明显优于未进行差异润滑的成形效果。

4 结论

- 1) 随着胀形区润滑面积的增大,在管坯材料流向支臂侧面后,支臂单元所受的轴向拉应力逐渐减小,降低了三通支臂侧面的减薄率。
- 2) 随着非胀形区人工粗糙面积的增大,侧壁单元所受环向拉应力逐渐增大,但所受轴向压应力逐渐减小,材料更易流向管身与支臂间的过渡区,避免材料堆积,降低了失稳起皱的风险。
- 3) 采用区域差异润滑得到的三通零件轴向最大减薄率为 22%,径向最大增厚为 14%;而采用未进行差异润滑得到的三通零件轴向最大减薄率为 28%,径向最大增厚为 20%。采用区域差异润滑方式能够提高三通管件成形质量。

参考文献:

- [1] YUAN Shijian. Fundamentals and Processes of Fluid Pressure Forming Technology for Complex Thin-walled Components[J]. *Engineering*, 2021, 7(3): 358-366.
- [2] 张家旗, 王连东, 宋希亮, 等. 重卡桥壳 D 形横截面预成形管坯轴向-环向补料液压胀形研究 [J]. *中国机械工程*, 2023, 34(7):847-858.
- ZHANG Jiaqi, WANG Liandong, SONG Xiliang, et al. Investigation on Hydroforming with Axial-circumferential Feeding of Preformed Tubes with D-shaped Cross-section of Heavy Truck Axle Housing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(7):847-858.
- [3] FENG Y, JIA Y, CHEN G, et al. Predictive modeling of Loading Paths for Hydroforming of B-layered Y-shaped Tubes[J]. *International Journal of Material Forming*, 2024, 17(4):40.
- [4] LOH-MOUSAVI M, BAKHSHI-JOOYBARI M, MORI K I, et al. Improvement of Formability in T-shape Hydroforming of Tubes by Pulsating Pressure[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222(9):1139-1146.
- [5] OSMAN Ö, MEVLÜT A, ÖMER F, et al. Enhancing Formability of Ti-6Al-4V Cylindrical Cups by Pulsating Hydroforming Process: Experimental, Numerical and Microstructural Investigations [J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2024, 50:101606.
- [6] KRISHNAMRAJU M, VENKATESHWAR REDDY P, MAHAJAN P, et al. An Investigation on Forming and Fracture Behavior of Austenitic Stainless Steel Tubes[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 2024, 23(1):115-132.
- [7] 张渝, 周豪, 王祥鉴, 等. 面向壁厚均匀的液压成形三通管的坯料设计方法与参数优化[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(5):225-234.
- ZHANG Yu, ZHOU Hao, WANG Xiangjian, et al. Design Method and Parameters Optimization of Tube Blank for Hydroforming of T-shaped Tube with Uniform Thickness[J]. *Journal of Net shape Forming Engineering*, 2024, 16(5):225-234.
- [8] 李晓冬, 徐雪峰, 华如雨, 等. 5052 铝合金 T 型三通管内高压成形规律研究 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(3):41-49.
- LI Xiaodong, XU Xuefeng, HUA Ruyu, et al. Research on Internal High Pressure Forming Laws of 5052 Aluminum Alloy T-shape Tube [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(3):41-49.
- [9] LIU Guang, PENG Junyang, YUAN Shijian, et al. Analysis on Critical Conditions of Sidewall Wrinkling for Hydroforming of Thin-walled Tee-joint[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 97:42-49.
- [10] ABBASSI F, AHMAD F, GULZAR S, et al. Design of T-shaped Tube Hydroforming Using Finite Element and Artificial Neural Network Modeling [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34:1129-1138.
- [11] PASYNKOV A A, LARIN S N, SEMENOVA L P. Processes of Isothermal Formation of Hollow T-shaped Tubes Made of High-strength Alloys[C]// *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020, 329:02003.
- [12] 郭训忠, 陶杰, 李鸣. 模具型面及冲头对 304 不锈钢三通成形效果影响研究 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(15):1875-1878.
- GUO Xunzhong, TAO Jie, LI Ming. Influence of Die Surface and Punch Style on Forming Effects of SS304 T-shapes by Hydroforming [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(15):1875-1878.
- [13] MOHSENI A, REZAPOUR J, GOHARI R S, et al. Low Velocity Impact Tube Hydroforming Process: Experiments and FSI Modeling by Considering Ductile Damage Model [J]. *International Journal of Material Forming*, 2023, 16(6):62.
- [14] HUANG Tianlun, SONG Xuewei, LIU Min. The Multi-objective Non-probabilistic Interval Optimization of the Loading Paths for T-shape Tube Hydroforming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94:677-686.
- [15] ZHANG Chi, LIU Wen, HUANG Lirong, et al. Process Analysis of Biconvex Tube Hydroforming Based on Loading Path Optimization by Response Surface Method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112: 2609-2622.
- [16] COLPANI A, FIORENTINO A, CERETTI E. Characterization and Optimization of the Hydroforming Process of AISI 316L Steel Hydraulic Tubes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107:293-309.
- [17] WEI Chuang, HAN Zhiren, JIA Zhen, et al. An Optimization Method of Wall Thickness Distributions in T-shaped Tube Compound-forming Method with Unconventional Tube Blank [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 200:111892.
- [18] PRASANTHI G. FEA Simulation Analysis of Tube Hydroforming Process Using DEFORM-3D [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97:1187-1197.

- neering, 2020, 234(6):1792-1806.
- [14] 高猛. 极限工况下四轮轮毂驱动电动汽车扭矩矢量控制[D]. 长春:吉林大学, 2021.
GAO Meng. Torque Vector Control of Four-Wheel Hub Drive Electric Vehicle under Extreme Working Conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [15] IGARASHI Y, YAMAKITA M, NG J, et al. MPC Performances for Nonlinear Systems Using Several Linearization Models [C] // 2020 IEEE American Control Conference (ACC). Denver, 2020:2426-2431.
- [16] YAAKOUBI H, HAGGÈGE J, REZK H, et al. Explicit Hybrid MPC for the Lateral Stabilization of Electric Vehicle System[J]. Energy Reports, 2024, 11:1100-1111.
- [17] ZHANG Z, XIE L, LU S, et al. Vehicle Yaw Stability Control with a Two-layered Learning MPC[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(2):423-444.
- [18] JING C, SONG Y, LUO S. Hierarchical Control for Distributed Drive Electric Vehicles Based on Four-wheel Steering[J]. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2023, 19(3/4):212-243.
- [19] HAN Z, XU N, CHEN H, et al. Energy-efficient Control of Electric Vehicles Based on Linear Quadratic Regulator and Phase Plane Analysis[J]. Applied Energy, 2018, 213:639-657.
- [20] 高华敏, 张卓然, 王晨, 等. 定子无铁心轴向磁场永磁轮毂电机损耗分析及效率优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6):2002-2012.
GAO Huamin, ZHANG Zhuoran, WANG Chen, et al. Loss Analysis and Efficiency Optimization of Stator Coreless Axial Magnetic Field Permanent Magnet Hub Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6):2002-2012.
- (编辑 胡佳慧)
-
- 作者简介:** 阚小博, 男, 2001年生, 硕士研究生。研究方向为车辆主动安全与控制。E-mail: kanxiaobo@nuaa.edu.cn。赵又群* (通信作者), 男, 1968年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为车辆动态仿真与控制、新型动力与电动车辆等。获国防技术发明二等奖1项。发表论文200余篇。E-mail: yqzhzo@nuaa.edu.cn。
- 本文引用格式:**
阚小博, 赵又群, 李丹阳, 等. 基于非线性模型预测控制的分布式驱动电动汽车多目标扭矩协调控制[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5):1123-1131.
KAN Xiaobo, ZHAO Youqun, LI Danyang, et al. Multi-objective Torque Coordination Control for Distributed Drive Electric Vehicles Based on Nonlinear MPC[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):1123-1131.
-
- (上接第 1102 页)
- [19] NGAILE G, JAEGER S, ALTAN T. Lubrication in Tube Hydroforming (THF): Part I. Lubrication Mechanisms and Development of Model Tests to Evaluate Lubricants and Die Coatings in the Transition and Expansion Zones[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(1):108-115.
- [20] XU Xuefeng, WU Kongwei, WU Yiwang, et al. A Novel Lubrication Method for Hydroforming of Thin-walled Aluminum Alloy T-shaped Tube[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102:2265-2273.
- [21] 范玉斌, 徐雪峰, 王磊, 等. T型管内高压成形差异化润滑优化[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(3):44-52.
FAN Yubin, XU Xuefeng, WANG Lei, et al. Differential Lubrication Optimization of T-tube Hydroforming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(3):44-52.
- [22] 门向南, 刘昊, 邓涛, 等. 5A02铝合金变径管电磁成形工艺及材料性能[J]. 锻压技术, 2024, 49(5):115-124.
MEN Xiangnan, LIU Hao, DENG Tao, et al. Electromagnetic Forming Process and Material Properties of 5A02 Aluminium Alloy Reducer Pipe [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49(5):115-124.
- [23] 付敏敏, 亢涛涛, 王强, 等. 5A06铝合金锥形壳体挤压成形工艺研究与试验验证[J]. 锻压技术, 2024, 49(6):126-133.
FU Minmin, KANG Taotao, WANG Qiang, et al. Research and Experimental Verification on Extrusion Forming Process of 5A06 Alminum Alloy Conical Shell[J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49(6):126-133.
- (编辑 胡佳慧)
-
- 作者简介:** 徐勇, 男, 1983年生, 研究员。研究方向为塑性加工先进技术。E-mail: yxu@imr.ac.cn。解文龙* (通信作者), 男, 1995年生, 助理研究员。研究方向为复杂薄壁构件的成形理论及工艺开发。E-mail: xiewenlong77@163.com。
- 本文引用格式:**
徐勇, 张驰, 解文龙, 等. 分区差异润滑对5A02铝合金三通管成形质量的影响[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5):1094-1102.
XU Yong, ZHANG Chi, XIE Wenlong, et al. Influences of Differential Lubrication on Forming Quality for 5A02 Aluminum Alloy T-shape Tubes[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):1094-1102.