

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：考虑内部避碰的多无人机有限时间环形编队控制

作者：刘云平 蒋长胜 张婷婷 赵中原 邓志良



58卷 **1** 期 **半月刊**
2022年1月



本刊荣获

- ★ 首届“国家期刊奖”
- ★ 第二届中国出版政府奖期刊奖
- ★ 第二届“国家期刊奖”
- ★ 百强报刊
- ★ 第三届“国家期刊奖”
- ★ “中国期刊方阵”双高期刊
- ★ 中国科技期刊卓越行动计划
- ★ 中国机械工业科学技术奖科技进步一等奖

机械工程学报

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

2022 年第 58 卷第 1 期 1 月 5 日出版

Vol.58 No.1 Published on January 5, 2022

(半月刊, 1953 年创刊)

(Semimonthly, started in 1953)

版权所有: ©2022 Journal of Mechanical Engineering

主管: 中国科学技术协会

主办: 中国机械工程学会

编辑出版: 《机械工程学报》编辑部

编辑部地址: 北京百万庄大街 22 号(100037)

主编: 宋天虎

常务副主编: 王淑芹

编辑部主任:

副主编: 张彤

责任编辑: 郑小光

电话: (010)88379907

传真: (010)68994557

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

http://www.cjme.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

jme@cjmenet.com

印刷: 北京科信印刷有限公司

国内发行: 北京报刊发行局

订购处: 全国各地邮局

Responsible Department:

China Association for Science and Technology

Sponsored by:

Chinese Mechanical Engineering Society

Edited and Published by:

Editorial Office of JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

Address:

22 Baiwanzhuang Dajie, Beijing 100037, China

Chief Editor: Song Tianhu

Executive Chief Editor: Wang Shuqin

Deputy Chief Editor: Zhang Tong

Tel: 0086-10-88379907

Fax: 0086-10-68994557

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

http://www.cjme.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

jme@cjmenet.com

Distributed Abroad by:

China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing, China)

Code: M201

《机械工程学报》编辑部董事会

董事长:

陆大明(中国机械工程学会)

副董事长:

李奇(机械工业信息研究院)

董事:

丁华锋

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院)

丁希仑

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院)

王庆丰

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室)

孔令豹(复旦大学信息科学与工程学院)

邓宗全(哈尔滨工业大学)

巩亚东(东北大学机械工程与自动化学院)

吕明(太原理工大学)

刘宏民(燕山大学)

刘献礼(哈尔滨理工大学)

闫献国(太原科技大学)

孙伟(大连理工大学机械工程学院)

孙汉旭(北京邮电大学自动化学院)

严新平(武汉理工大学)

杜雪

(香港理工大学超精密加工技术国家重点实验室伙伴实验室)

杨兆军(吉林大学)

杨旭静(湖南大学机械与运载工程学院)

何存富(北京工业大学)

张卫红(西北工业大学)

张宪民(华南理工大学机械与汽车工程学院)

陈兵奎(重庆大学机械传动国家重点实验室)

邵新宇(华中科技大学机械科学与工程学院)

岳文辉(湖南科技大学)

郑学军(湘潭大学机械工程学院)

项昌乐(北京理工大学)

赵韩(合肥工业大学)

侯亮(厦门大学机电工程系)

姚振强(上海交通大学机械与动力工程学院)

徐西鹏(华侨大学)

徐金梧(北京科技大学)

高健(广东工业大学)

黄田(天津大学机械工程学院)

黄传真(山东大学机械工程学院)

黄明辉(中南大学机电工程学院)

黄洪钟(电子科技大学机械电子工程学院)

梅雪松(西安交通大学机械工程学院)

温激鸿

(国防科技大学机电工程与自动化学院)

雒建斌(清华大学摩擦学国家重点实验室)

颜晓红(江苏大学)

檀润华(河北工业大学)

ISSN 0577-6686

CN11-2187/TH

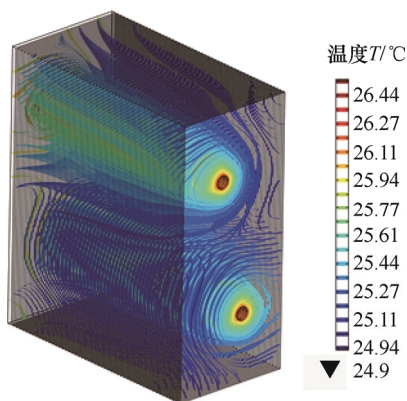
国内邮发代号: 2-362 国外发行代号: M201

国内定价: 60 元/期, 1440 元/年

/// 机器人及机构学 ///

1 磁驱微纳机器人用细胞原位培养系统的设计

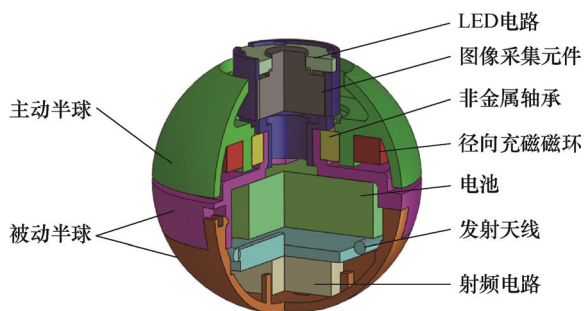
孙浩然 王 林 于世民 代礼周 张广玉 李天龙



摘要: 作为新型机器人一个重要的研究方向, 微纳机器人在生物医疗领域取得了大量的成果, 尤其是磁场驱动微纳机器人, 由于其运动控制精准, 不需与被控对象直接接触等特点被广泛应用于药物主动靶向递送中。近年来, 由于缺乏对磁驱微纳机器人进行运动控制的同时又能给细胞组织提供合适环境的原位培养系统, 严重制约了微纳机器人在促进细胞组织再生领域中的研究。为了实现磁场驱动微纳机器人实验过程中细胞组织的原位培养和监测, 设计了一套针对磁驱微纳机器人的细胞原位培养系统, 反向利用风冷散热器的原理实现系统的温度输出, 并通过 COMSOL 软件进行了非等温流动仿真, 其结果表明本套系统的加热模块的加热效果, 加热执行装置的加热能力均满足需求, 同时明确了培养箱的进出风口位置, 而后通过温控实验验证了该套系统能够实现稳定的温度控制。该套原位培养系统的设计实用性强, 适用性广, 对于微纳机器人原位培养系统的研究具有一定的指导意义。

10 磁驱动双半球胶囊机器人滚动动态性能研究

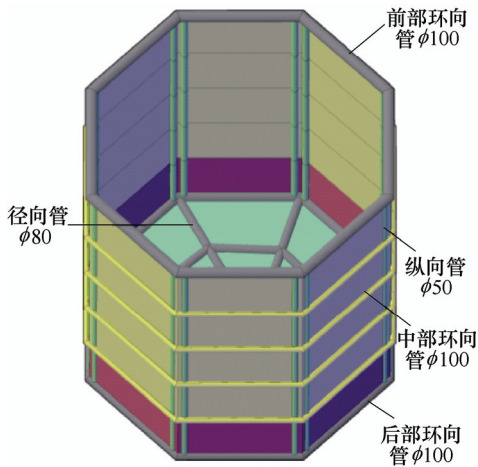
张永顺 纪璇 刘旭 刘冠喜 刘振虎



摘要: 为了实现食管、胃、结肠等宽裕环境内诊断与治疗, 双半球胶囊机器人需要实现稳定的滚动行走。为了探究旋转磁场强度、旋转速度、阻尼等参数对胶囊滚动动态性能的影响, 确定胶囊姿态角变化范围, 结合旋转磁场随动效应建立了双半球胶囊拉格朗日滚动动力学模型, 采用区间状态转移矩阵逼近算法求得状态转移矩阵, 通过分析状态转移矩阵特征指数, 确定了能够实现稳定滚动的临界和最优控制参数。提出了基于激光系统的胶囊滚动姿态检测方法, 模型仿真与试验结果表明: 在一定范围内, 磁场强度的减小及磁场旋转角速度的增加通常有利于机器人滚动动态稳定性的增强, 该动力学特性为控制胶囊实现肠道内稳定滚动控制策略提供了理论依据。

19 圆柱形可展柔性结构高收纳比折叠展开方案

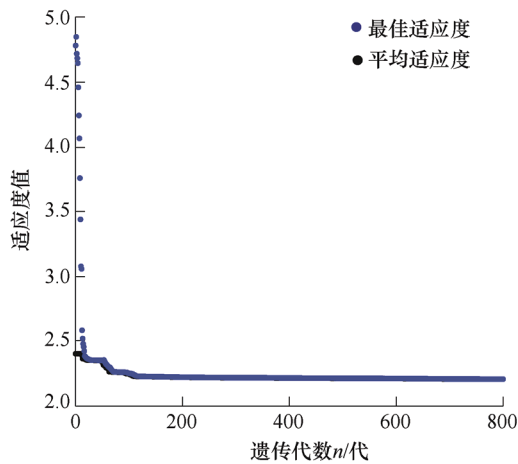
蔡建国 钟一涵 王立武 陈旭 汪子哲 张骞 冯健



摘要: 随着人类对太空的逐步探索,大尺度空间可展开结构的应用日益广泛,对高收纳比的需求日益迫切。面向在轨舱体需求设计圆柱形可展柔性结构,结合折纸技术提出了两阶段、多维度的结构折展方案。针对高收纳比的技术要求,设计的可展柔性结构先执行平面内径向折展,后执行空间纵向折展,该折展方案的收纳比可达到 98.6%。基于一阶基频的需求,对可展柔性结构的模态进行参数化分析,讨论充气管气压和膜面预应力的影响。采用有限元分析软件 ABAQUS 对结构的两阶段展开过程进行了动力学分析,验证了展开过程的平稳有序,形态变化与受力皆合理,证明了结构设计方案的可行性与合理性。最后,使用薄膜褶皱参数的通用计算流程对展开后的褶皱构形特征进行了估算,并预测了对应位置上的褶皱构形。

29 4-RR(SS)2 高速并联机器人动力尺度综合

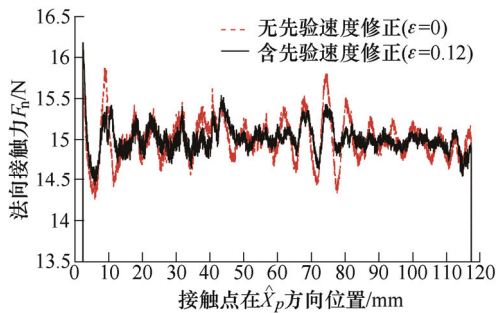
张惠普 汪满新



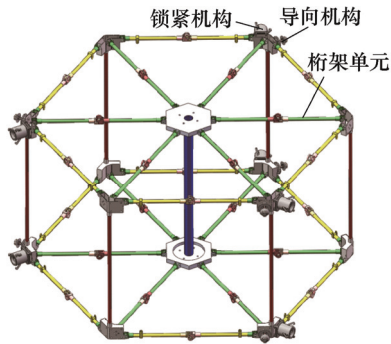
摘要: 研究一种新型四自由度高速并联机器人动力尺度综合方法。该机构以 $RR(SS)_2$ 为支链且具有单动平台结构,与采用双动平台结构的此类机构相比,末端动平台质量更轻,从而具有良好的加减速性能。建立机构运动学和动力学模型,并构造出可反映机构运动和力传递特性的链内/链间压力角,以及以单轴最大驱动扭矩全域最大值最小的动力学性能评价指标。在此基础上,综合考虑装配尺寸等几何约束和运动学性能约束,建立了以使机构动力学性能最优的机构尺度综合模型。在探究压力角和动力学性能随尺度变化规律后,给定具体约束条件,通过遗传算法优化得到一组最优尺度,并基于在 Lamé 抓放轨迹上运动仿真完成伺服电动机参数预估。

41 基于先验速度修正的工业机器人曲面跟踪柔顺控制

曾令城 李明富 杨真真 罗威



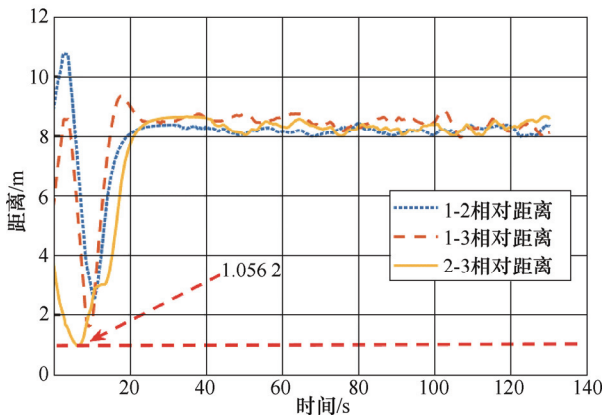
摘要: 在机器人曲面磨抛过程中,当末端工具与工件曲面相对运动时,控制机器人运动使二者间的接触力保持在某个恒定期望值,对于曲面磨抛的质量控制具有重要的作用,对于进一步展开机器人磨抛工艺研究也具有积极的意义。针对过去力信号难以及时补偿将来轮廓变化而导致法向接触力不平稳的问题,提出一种基于力反馈和先验轮廓倾角的柔顺控制方法。首先基于阻抗控制方程建立机器人曲面跟踪柔顺接触模型,引入法向控制速度,推导出其与力反馈信息间的映射关系。同时,设计在线轨迹生成器,利用先验轮廓倾角算法向先验速度,并对法向控制速度进行实时修正。最后将所提方法运用至机器人曲面跟踪物理实验,实验结果表明,该方法相比无先验速度修正的柔顺控制,能有效避免凸面/凹面区域下法向接触力震荡,力方差减小 55%以上。



摘要: 近年来, 在轨服务技术日趋成熟, 因此在空间技术研究领域在轨组装受到了较高的关注度。研究了一种大折展比高刚度索杆张拉式六棱柱组装单元及三爪式对接接口机构, 并对其运动学及动力学特性进行了研究。首先, 提出并设计了一种新型的空间结构组装单元和一种结构为三爪式的对接接口, 进行在轨组装时可应用该接口。接着, 分析了空间结构组装单元的运动学特性, 验证了组装单元具有良好的展开与锁定功能。最终, 通过对大型结构体模型进行有限元分析, 发现了结构体的基频受到多个参数的影响, 通过进一步的分析得到了具体的影响关系和灵敏度, 为在轨组装空间大型结构体的设计奠定了基础。

61 考虑内部避碰的多无人机有限时间环形编队控制

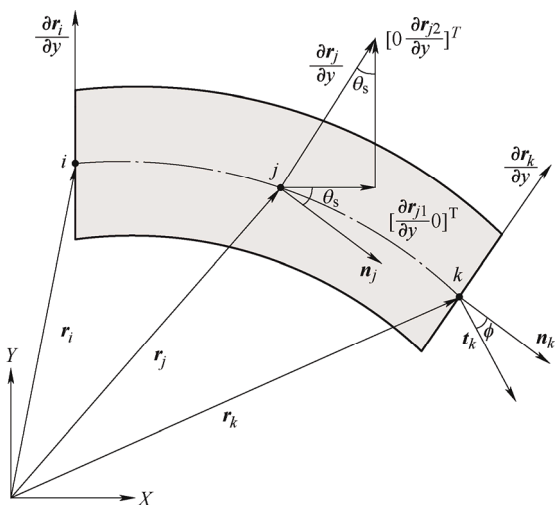
刘云平 蒋长胜 张婷婷 赵中原 邓志良



摘要: 针对多无人机系统利用有限时间环形编队算法执行环形编队任务时易发生碰撞这一问题, 提出一种基于改进人工势场法的多无人机有限时间环形编队控制算法, 引入一组与障碍物移动方向垂直的辅助势场, 避免了多无人机在快速编队过程中发生内部碰撞, 并解决了传统人工势场法易陷入局部最优解的问题。为验证本文算法的有效性, 在无人机初始位置、势场影响范围、包围半径等参数相同的情况下进行计算机仿真实验, 结果表明算法可有效地避免多无人机在环形编队过程中发生碰撞的问题。为进一步验证算法的实用性, 采用三架轴距 450 mm 的“X 型”旋翼无人机进行物理实验, 实验结果表明本文算法在有限时间内完成多无人机环形编队时具有较好的避碰效果。

69 含角接触球轴承和粗糙间隙表面滑动轴承关节的平面柔性多连杆机构动态误差分析与优化设计

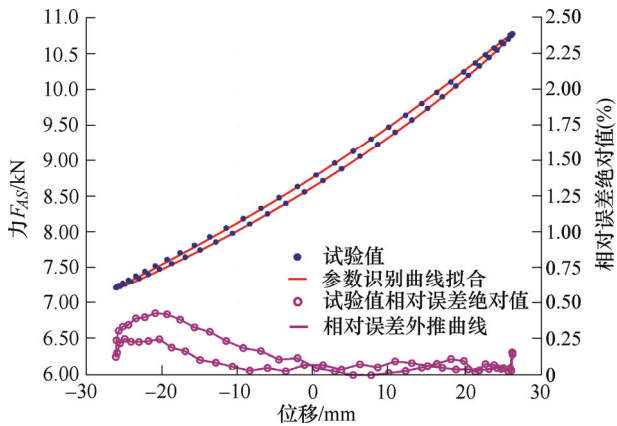
章永年 陶亚满 蒋书运 朱松青 郑恩来 史金飞



摘要: 传统旋转间隙关节接触模型假定衬套和销轴的接触面是光滑的并仅考虑接触区域的初始接触点的影响, 常忽略接触区域中其它接触点的作用, 不可避免导致模型分析精度下降。为此, 提出一种含角接触球轴承和粗糙间隙表面滑动轴承关节的平面柔性多连杆机构动力学建模、分析与优化的计算方法。考虑粗糙旋转间隙关节多点接触状态, 建立了一个新颖粗糙间隙接触模型, 运用一种无剪切锁定变形梁单元对柔性连杆进行离散化。同时, 基于赫兹理论, 推导了角接触球轴承的动态径向等效刚度。与基于传统光滑间隙模型的结果相比, 基于所提出的粗糙间隙模型的多连杆机构动态响应更接近于试验值, 验证了所提出计算方法的有效性。仿真结果表明, 粗糙的关节接触面能够降低滑块速度和加速度偏差, 却增加滑块的位移偏差。冲压工况下含角接触球轴承和粗糙间隙表面滑动轴承关节的平面柔性多连杆机构的动态响应偏差大于空载工况下的结果, 冲压载荷易增加滑块的动态响应偏差。此外, 基于 NSGA-II 算法对平面柔性多连杆机构中滑动轴承关节间隙进行优化设计并得到优化的间隙尺寸值。

88 空气弹簧动刚度模型关键非线性参数辨识及动态特性研究

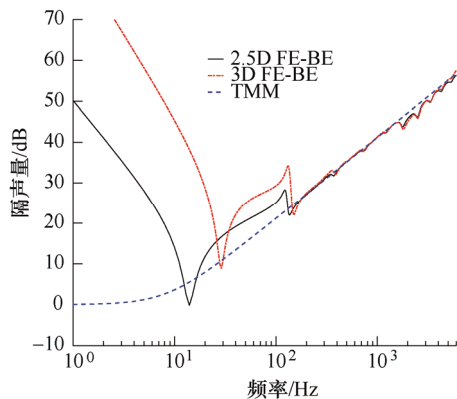
郭明宇 李雪冰 尹航 吕靖成 危银涛



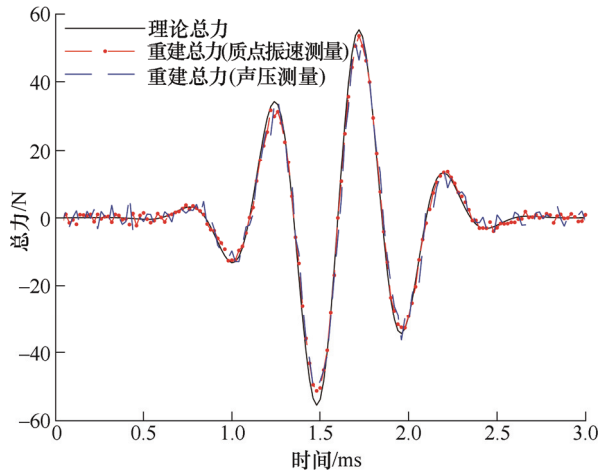
摘要: 提出了一种考虑等效阻尼及滞回特性的乘用车用空气弹簧动刚度模型, 给出模型中各部件物理意义及数学表达以适用于空气悬架的精确控制。基于模型解析表达式给出一套针对模型中有效面积等效刚度、空气气囊刚度和等效阻尼等关键非线性参数辨识的一般方法, 设计示功试验对各参数项进行辨识并验证了在大行程下动刚度模型及参数辨识方法的正确性和可行性(大行程正弦激励下模型最大相对误差小于 0.5%, 参数辨识误差小于 3%)。最后基于推导出的动刚度模型分析了关键参数的影响及其动态特性。结果显示, 乘用车单腔室空气弹簧的滞回特性(相位角)随频率增大呈现先增大后减小的趋势。等效刚度越大相位角峰值越大且对应频率越高; 等效阻尼越大相位角峰值不变, 对应频率减小。根据理论和试验指明了空气弹簧关键非线性参数的频率相关性及其变化规律, 为空气弹簧的理论建模及正向开发提供指导。

97 基于 2.5 维有限元-边界元的高速列车车体铝型材声振特性研究

邓铁松 肖新标 圣小珍



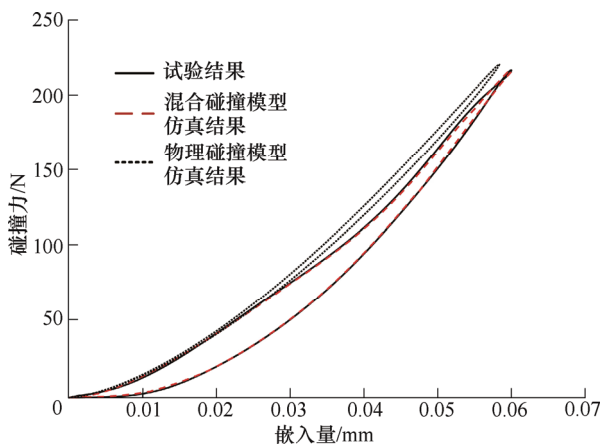
摘要: 铝型材作为高速列车车体层状复合结构的主要部件, 声振性能的优劣直接影响车内声学环境和乘车舒适度。由于铝型材尺寸庞大、结构复杂, 解析模型和传统的有限元/边界元法对其声振特性的预测存在一定的局限。铝型材截面几何特征和材料属性沿纵向均匀一致分布, 当结构波长远大于结构尺寸时, 可视为典型的波导结构, 2.5 维有限元-边界元法被广泛认为是研究其声振特性最合适的方法之一。因此, 基于 2.5 维有限元法建立了铝型材的波动模型, 研究了铝型材的波传播特征; 基于 2.5 维边界元法建立了铝型材两侧声场的预测模型, 同时, 结合结构与声场的边界耦合条件, 建立了铝型材的 2.5 维有限元-边界元声辐射和隔声模型, 分析了力激励位置对结构振动响应、辐射声功率及辐射效率的影响, 讨论了混响声场激励下边界条件对结构隔声性能的影响, 提出了一种基于频散特性的将铝型材等效为均质板的方法。研究表明, 在低频和高频, 结构振动分别以截面的整体变形和局部变形的特征波为主; 等效均质板的弯曲波频散与铝型材的整体弯曲波频散吻合很好; 力激励位置对结构的振动响应和辐射声功率影响显著, 对辐射效率影响很小; 声激励下, 边界条件只对结构在刚度控制区的隔声影响显著, 约束越强, 隔声越大。这些研究结果对高速列车车体铝型材结构减振降噪措施的进一步研究提供了理论依据。



摘要: 基于质点振速测量重建了作用于薄板表面的瞬态力。首先根据薄板的运动方程推导了板表面上力谱与振动速度谱之间的脉冲响应函数,再联立板表面上振动速度谱和全息面上质点振速谱之间的脉冲响应函数,在波数域-时域中构建了力谱和质点振速谱之间的传递关系;在此基础上,以全息面上测量的质点振速作为输入,重建出了每一个波数点处的力谱,并通过对比力谱作空间 Fourier 逆变换得到了板表面上的瞬态力。数值仿真和实验结果验证了基于质点振速测量重建瞬态力方法的可行性和有效性,它不仅能定位出激振力的位置,而且可以重建出力的时间历程。同时,与现有的基于声压测量的重建方法相比,本文方法可以获得相似的重建精度,但重建过程更简单。该方法提供了一种实时、非接触式的测量方式来获取薄板所受的瞬态力,且建立的力和声辐射间的直接联系有助于进一步探索噪声产生的机理。

116 混合碰撞建模方法及其试验验证

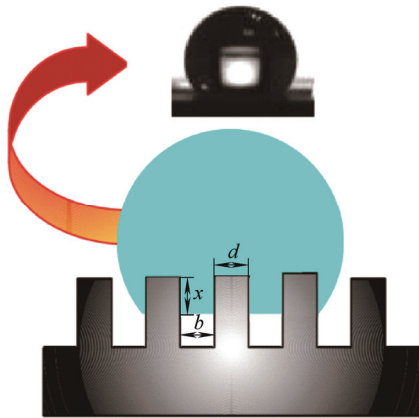
刘 茜 程 靖 梁建勋



摘要: 目前广泛采用的接触碰撞建模方法主要基于传统的物理碰撞模型,如赫兹碰撞模型和非线性弹簧阻尼碰撞模型等,但它们的仿真精度不够高,更适用于接触碰撞趋势的仿真分析。基于此,提出了基于传统物理碰撞模型和数据驱动误差模型的混合碰撞建模方法,以更加准确地对接触碰撞现象进行动力学仿真分析。其中,物理碰撞模型对接触碰撞现象中已知的碰撞因素进行建模;基于径向基函数(Radial basis function, RBF)神经网络的数据驱动误差模型对接触碰撞现象中的误差部分进行建模。小球自由落体碰撞试验对混合碰撞建模方法进行试验验证,试验结果验证了混合碰撞建模方法的可行性和混合碰撞模型的准确性。

124 液滴在固体织构化表面上的润湿行为研究现状

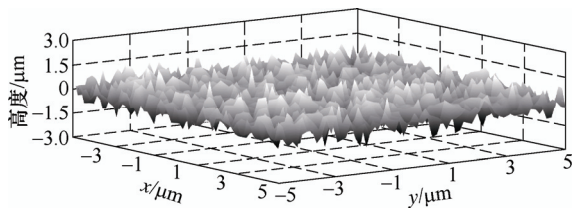
王志远 邢志国 王海斗 单德彬



摘要: 液滴的润湿现象广泛存在于自然界和工程应用中，液滴的表面润湿行为在机械加工领域有很多的应用，已成为国内外表面科学研究的热点问题。针对液滴在固体表面上的铺展、黏着和弹跳现象进行深入分析，从液滴碰撞表面的动态参数以及表面织构参数两个变量进行总结，分析了液滴在固体表面的润湿行为。详述了液滴的润湿理论模型，给出静态接触角与动态接触角数学模型的发展及最新流体润湿理论研究现状。最后，综述了关于表面润湿的 CFD 模拟技术发展以及主流软件的使用情况，并对不同表面织构参数进行的流体数值模拟过程进行总结。从理论模型创建与数值模拟应用两大方面出发，对现有的液滴在织构化表面上润湿行为的研究情况进行梳理和分析，进一步指出当前所存在的问题以及将来的发展趋势。

145 脂润滑点接触副混合润滑模型研究

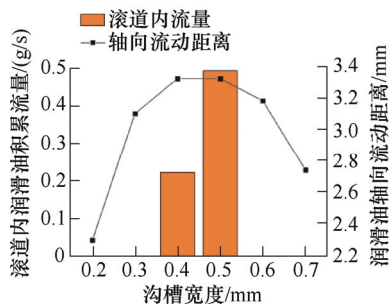
吴正海 徐颖强 刘楷安 陈智勇



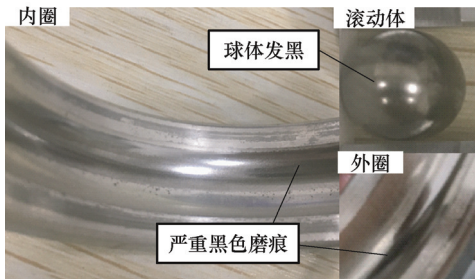
摘要: 考虑润滑脂非牛顿特性和粗糙表面微凸体接触几何，基于润滑脂 Herschel-Bulkey 流变模型和微凸体 K-E 弹塑性接触模型，确定了润滑介质弹流作用和微凸体接触作用的并行处理方案，并提出了一种流体动压区和微凸体接触区的压力边界条件假设，建立了脂润滑点接触副混合润滑的确定性模型。结合处理边界条件的虚压力替代法，构建了混合润滑模型的直接迭代法，研究了不同润滑脂和粗糙表面形貌特征下的点接触副混合润滑特征。结果表明，受表面粗糙形貌影响，二次压力峰和颈缩特征不再明显，脂膜压力分布出现多个压力峰值，且峰值随速度的减小和粗糙度的增大而增大。脂膜厚度与润滑脂稠度等级之间不存在单调关系。当膜厚比约小于 4 时摩擦副进入混合润滑状态。粗糙表面的偏态对混合润滑存在一定的影响。

154 面向乏油工况的高速轴承润滑增效研究

葛临风 陈飞 闫柯 王超 洪军 朱永生



摘要: 高速工况下轴承内部流动阻力增大、接触区供油效率降低导致轴承处于乏油润滑状态，严重影响轴承的服役性能。为提升高速下轴承内部润滑介质流动能力，改善轴承的润滑状态，本文提出一种面向滚动轴承喷射润滑的增效方法。通过在轴承内圈表面设计轴向沟槽结构，提升润滑介质的轴向流动能力，进而提高高速工况下轴承滚道及接触区域的润滑油量。通过建立沟槽化内圈表面润滑油流动模型，探索了沟槽结构流动引流及减阻机理，揭示了用于流动减阻的沟槽内底层润滑油带的形成规律并进行了沟槽结构优化设计。H7006C 角接触球轴承润滑性能试验表明，在不同转速的乏油工况下，沟槽化轴承的温升均显著小于常规轴承，证实了本文润滑增效方法的有效性。

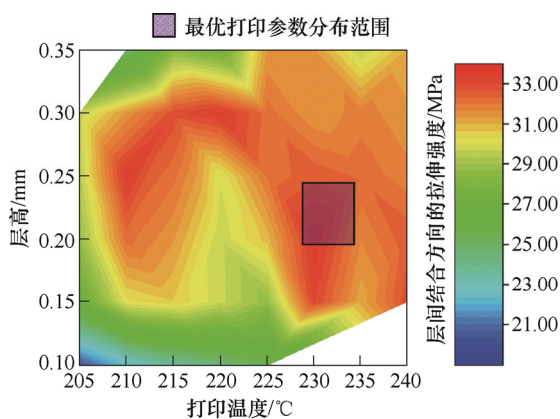


摘要: 液体火箭发动机高速涡轮泵的起动是在高压、低温等极端工况下的典型瞬态起动, 极易导致其支承轴承的失效。本文构建了低温滚动轴承全液膜润滑和起动摩擦转矩的求解模型, 获得了在特定工况下不同滚动体位置的液膜压力分布和最小液膜厚度等; 计算得到了起动过程不同载荷和转速下特定低温轴承的起动摩擦转矩, 并以此提出了确保轴承瞬态安全起动的最小径向预载方法。开展了液氮工况下的两组快速起动低温滚动轴承的试验测试, 获得了高速起动下轴承的动态响应特征, 其结果定性验证了最小径向预载定义方法的合理性; 动态响应的快速特征提取也表明了轴承在起动阶段的失效可能为局部碰磨, 甚至存在不同轴承组件间严重的金属摩擦或者刮擦。研究结果对于提高低温液体火箭发动机高速涡轮泵的安全服役性能具有重要的理论和试验价值。

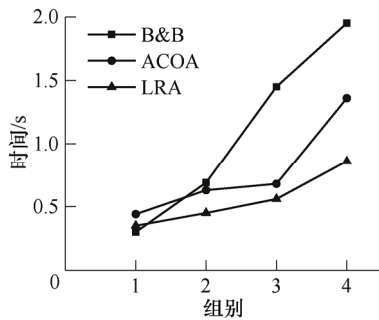
/// 数字化设计与制造 ///

172 3D 打印个性化大腿假肢接受腔形性协同制造策略

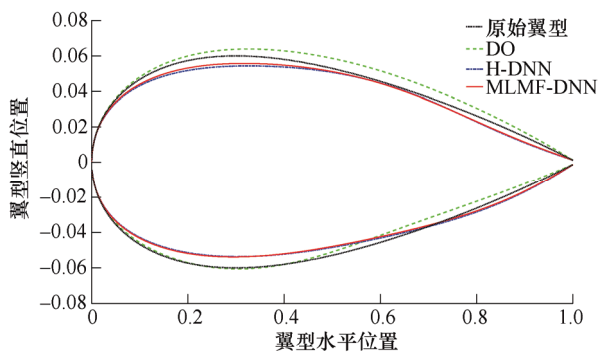
汤磊 刘腾达 单存清 孙畅宁 王玲 田小永 李涤尘



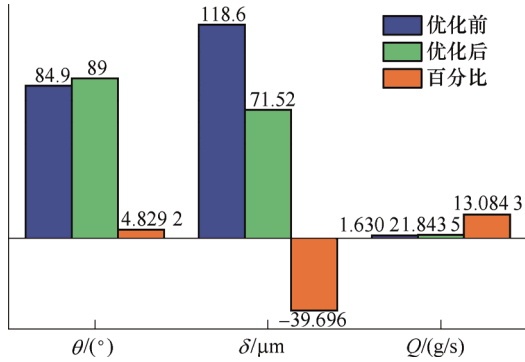
摘要: 假肢接受腔作为连接残肢与假肢系统之间的关键界面, 是假肢系统发挥其功能的重要基础。为满足假肢接受腔个性化、快速、低成本的制造需求, 本研究提出利用材料挤出成型技术(Material extrusion, MEX)制备大腿假肢接受腔的方法与策略。首先通过对残肢-接受腔系统的生物力学分析提出了接受腔材料的力学性能需求。然后, 系统的研究了不同的材料成分和工艺参数体系对成型件的力学性能的影响, 确定了适用于接受腔制备的 MEX 工艺材料。同时, 针对接受腔的力学性能需求, 尤其针对有特殊强度需求和几何结构突变的部位所需的力学性能, 进行了打印工艺参数的优化和打印策略的完善, 提高了打印制件的层间结合强度。最后, 实现 3D 打印接受腔的制备, 提出了接受腔的形性协同制造策略, 实现了 3D 打印接受腔的临床实验。结果表明, 与传统方法制备的接受腔相比, 本研究制备的 3D 打印接受腔具有更好的使用功能和穿戴舒适度。



摘要: 一个有效且可控的产品特性设计变更可改善产品质量, 促进产品创新, 满足顾客需求。在产品的设计过程中, 由于产品特性间联系错综复杂, 某个特性设计发生变化就有可能导致其他特性的一系列变化, 从而引发变更传播及传播路径的重新规划。为此, 基于向量空间模型(Vector space model,VSM)重构产品特性关联集(Product characteristic linkage set,PCLS)和设计变更工艺集(Design change technology set,DCTS), 通过相似度计算获得 PCLS-DCTS 两集变更影响域, 缩小了设计变更传播范围, 构建设计变更传播的向量空间重构模型(Vector space reconstruction model,VSRM); 针对产品特性设计变更传播强度计算复杂度问题, 利用拉格朗日松弛算法(Lagrangian relaxation algorithm,LRA)对 VSRM 变更影响域进行传播路径优化, 并更新对偶函数下界以加快模型的解算速度; 最后, 以超声刀换能器的特性设计变更实验为例, 实验结果表明, VSRM 结合 LRA 方法能够快速有效的筛选出最优设计变更传播路径, 可为产品设计变更传播机制和传播路径优化等相关工程领域提供决策指导。



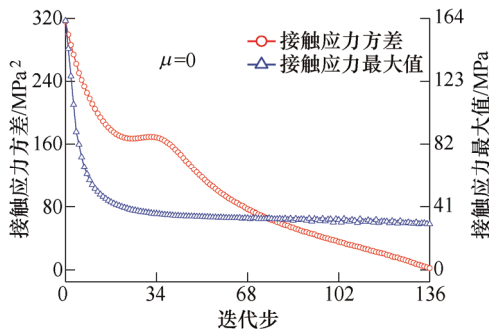
摘要: 为了降低计算量, 多可信度代理模型技术通过融合不同精度和计算量的分析模型构建高精度分析模型的代理模型, 在基于仿真的工程优化中得到广泛应用。现有的多可信度建模方法在面对高维问题时往往仍需要大量高精度样本点, 计算量很大, 且大都基于高斯随机过程理论, 超参数估计时长随着问题维数和非线性程度的增加明显增长且不够稳健。为此, 充分利用深度神经网络在高维信息提取和近似方面的巨大潜能, 以及元学习理论在小样本学习领域的优势, 提出一种基于元学习的多可信度深度神经网络(Meta-learning based multi-fidelity deep neural networks, MLMF-DNN)代理模型方法。通过若干数学算例和 NACA0012 翼型稳健优化问题的应用, 表明提出的 MLMF-DNN 方法相比于经典的 Co-Kriging 方法, 在预测精度和训练时长上均有明显改善, 对于高维问题优势更明显。



摘要: 以气液同轴离心式喷嘴为研究对象,采用了一种优化后的代理模型和多目标优化算法对该喷嘴关键几何结构参数进行优化设计,得到了一个在低压状态下雾化性能更佳的新结构喷嘴。采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)对喷嘴进行流场分析,并用试验验证了 CFD 数值模拟的准确性。基于改进鲸鱼算法(Levy-WOA)优化的 Kriging 模型建立了雾化锥角、液膜厚度、质量流率的代理模型,研究了 4 个关键几何参数对雾化性能的影响规律。基于代理模型采用 MOGWO 算法进行多目标求解,得到了一个几何参数最优组合的喷嘴。研究表明:Levy-WOA 优化的 Kriging 代理模型具有更高的拟合精度和更低的预测误差,并能有效的预测 4 个关键几何参数对雾化性能的影响;优化设计的新喷嘴较原始喷嘴,雾化锥角增大了 4.829 2%,液膜厚度减小了 39.696 0%,质量流率提高了 13.084 3%;试验验证新喷嘴较原始喷嘴雾化锥角提高了 4%,为其他喷嘴的设计提供了一种新的可行性方法。

212 均化接触应力的双线性材料刚度优化设计

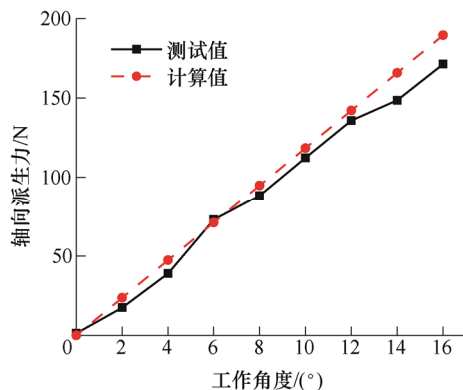
周意葱 林起崑 张宁静 洪军 杨楠



摘要: 装配连接界面是承载和保障机械装备实现既定功能的载体,其连接界面接触应力分布均匀性是影响机械装备磨损、疲劳、裂纹的关键因素,对机械装备高性能服役具有“锚定”作用。为改善连接界面接触应力分布均匀性,开展了材料刚度优化设计研究。首先,以接触应力方差为目标函数,以弹性模量为设计变量,基于渐进优化原理,构建了一种材料刚度优化设计方法。然后,分别针对有无摩擦工况下两个典型接触问题开展了材料刚度优化设计。结果表明,材料刚度优化可大幅降低接触应力方差,验证了本方法在提升连接界面接触应力分布均匀性上的有效性。进一步研究不同问题、不同摩擦因数取值下摩擦行为对优化结果的影响,发现摩擦行为的影响程度大小与问题边界、约束等情况密切相关。

221 考虑粗糙表面特性的驱动轴系统轴向派生力的区间不确定性优化

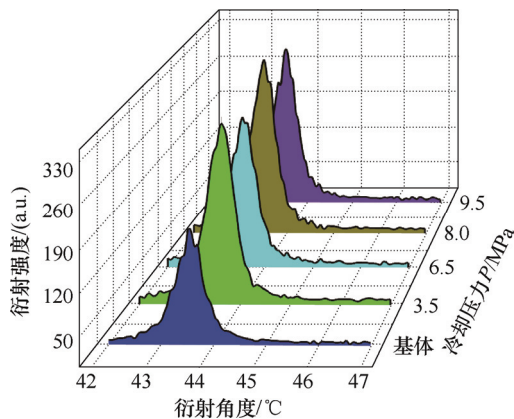
冯华渊 上官文斌 康英姿



摘要: 以一驱动轴系统为研究对象,基于分形理论,首先建立了一种考虑粗糙表面特性的轴向派生力的确定性模型。通过轴向派生力测试,验证了确定性模型的有效性。在考虑粗糙表面特性后,轴向派生力具有较大的不确定性。为了更有效地分析和优化轴向派生力,基于建立的确定性模型和勒让德多项式,提出了一种轴向派生力的区间不确定性模型。在区间模型中,输入参数被视为区间变量。以区间模型的上界和不确定度为优化目标,提出了轴向派生力的多目标区间不确定性优化方法。为了提高优化效率,结合勒让德多项式特点和顶点法,提出了一种快速获取区间模型上界和不确定度的方法。数值算例表明:基于提出的优化方法,不仅可使轴向派生力的上界满足设计要求,还可提高轴向派生力的鲁棒性。

231 高压冷却下 PCBN 刀具切削高温合金表面残余应力分析及变质层成形机理

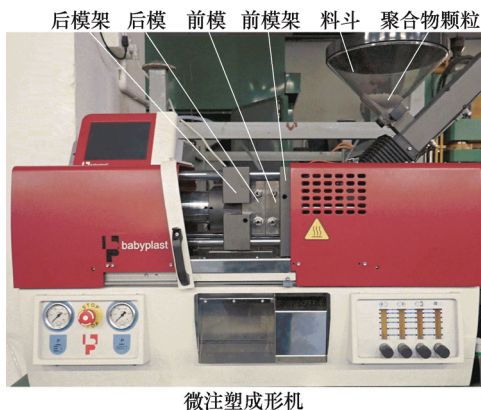
吴明阳 张亚利 程耀楠 张剑宇 褚维旭



摘要: 镍基高温合金是一种典型的难加工材料, 在高温下具有优良的机械性能, 广泛应用于航空航天、能源等领域。切削过程中, 在切削力和切削热的共同作用下, 工件材料发生严重的塑性变形, 导致已加工表面残余应力和变质层分布不均匀, 从而降低工件的疲劳强度, 高压冷却润滑辅助加工技术可有效改善此问题。因此, 研究高压冷却下 GH4169 切削表面残余应力和变质层具有重要的理论意义和实用价值。首先, 对不同冷却压力下的温度、应力和残余应力进行仿真分析, 采用 X 射线衍射法对不同冷却压力下的切削表面残余应力进行测量, 分析冷却压力对切削表面残余应力的影响规律, 并与仿真结果进行比较; 其次, 在残余应力结果分析的基础上, 利用 EDS 和 XRD 观测 GH4169 已加工表面变质层与基体的微观组织结构并进行对比分析; 最后, 分析切削速度、进给量和冷却压力对已加工表面变质层厚度的影响。结果表明: 已加工表面变质层的 XRD 衍射峰比基体的 XRD 衍射峰宽而低, 说明 GH4169 已加工表面变质层出现了晶粒细化现象; 在给定的参数范围内, 随着切削速度、进给量的增大, 变质层厚度也随之增加, 但随着冷却压力的增大, 减弱了由热-力耦合和塑性变形综合作用下而引起残余应力分布不均匀的情况, 进而使变质层厚度呈减小趋势。

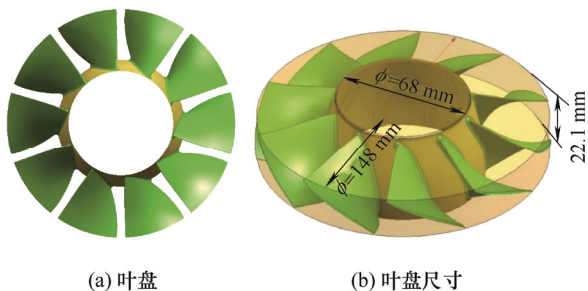
244 微流控芯片模芯的精密铣磨加工及其微注塑成形技术

鲁艳军 刘博 陈福民 郭明荣 唐恒 罗和喜



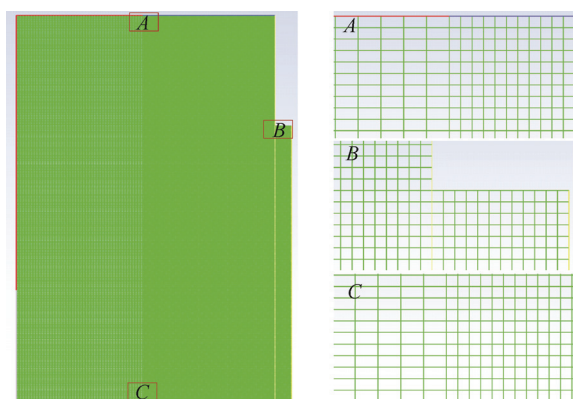
微注塑成形机

摘要: 为降低微流控芯片的大批量生产制造成本, 保证微尺度流道结构的表面质量和形状精度, 提出采用超硬立方氮化硼(CBN)磨棒在模具钢模芯表面精密铣磨加工制造出形状精度可控的微凸起阵列结构, 然后利用微注塑成形技术高效成形制造出具有微凹槽阵列结构的聚合物微流控芯片。分析了铣磨加工工艺参数对微结构模芯表面质量的影响, 通过试验和数学统计理论分析法研究了微注塑成形工艺参数对微结构聚合物表面粗糙度和形状精度的作用机制以及影响程度。试验结果表明: 较优的铣磨工艺参数为主轴转速 16 000 r/min, 切削深度 2 μm 和进给速率 15 mm/min, 此时微结构模芯的表面粗糙度 R_a 达到 0.299 μm 。熔体温度和保压时间对聚合物微流道形状精度 PV 和底部粗糙度 R_a 的影响较大, 保压压力次之, 注射速度则最小。当熔体温度、注射速度、保压压力和保压时间分别为 235 $^{\circ}\text{C}$, 80 mm/s, 5 MPa 和 9 s 时, 微流道形状精度达到 8.950 μm , 微流道底部粗糙度 R_a 为 0.055 μm 。

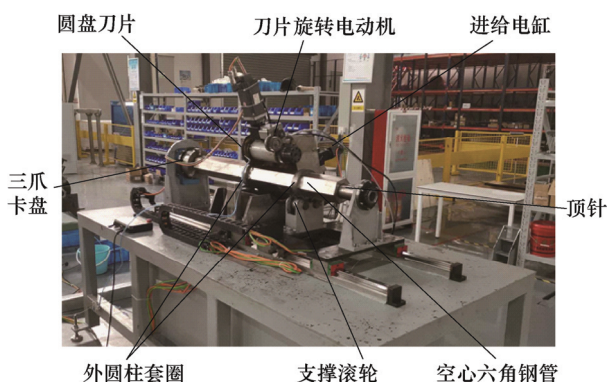


摘要: 鼓形铣刀使用其大弧度切削刃进行切削加工, 不仅可以采用大步距加工而仍保持相同表面加工质量, 还可以通过改变刀具与工件曲面的切触点在刀具切削刃的位置使刀具和刀柄远离工件, 避免碰撞, 因此鼓形铣刀特别适合叶盘类零件的叶片曲面加工。现有的光顺刀轴矢量规划方法多使用最短路径算法在机床旋转轴位置的可行空间中求解光顺的刀轴矢量序列。然而, 最短路径算法需要把连续问题转化为离散问题求解, 在可行空间中的采样间隔越小, 所得刀轴矢量序列的质量越高, 但计算时间会很长。因此提出了缩短最短路径算法求解光顺刀轴矢量序列的计算时间的方法, 并提出了鼓形铣刀侧铣加工叶盘叶片曲面的光顺刀具路径生成方法, 该方法同时考虑机床旋转轴和刀具刀尖点运动轨迹的光顺性。试验结果表明, 该方法生成的刀具路径能够使机床轴运动平稳。

267 CMT 电弧增材制造过程传热传质数值模拟



摘要: 冷金属过渡(Cold metal transfer, CMT)电弧增材制造技术具有熔敷效率高、热输入低、成形稳定等优点, 在大尺度构件直接成形领域应用前景广阔。然而, 其成形过程熔池热-流等物理场演变机理尚不明确, 且很难通过试验手段获得。基于动网格技术, 建立了二维 CMT 电弧增材制造热-流场数值模型。模型中, 采用流体体积法追踪金属-气体界面, 采用焓-孔隙法处理金属融化与凝固, 采用椭圆热源周期性加载等效 CMT 电弧起收弧过程。基于建立的模型, 以铝合金为研究对象, 计算分析了不同驱动力对熔池流动行为影响、CMT 熔滴过渡过程熔滴与熔池相互作用及不同基板热条件对熔覆层形貌和熔池尺寸的影响。结果表明: Marangoni 力对熔池流动行为影响最为剧烈, 其次是电弧压力; 当熔滴随着焊丝向下运动时, 熔滴表面液态金属向下流动, 而其内部金属向上流动, 形成环流; 当熔滴进入熔池后, 熔池表面金属向两侧边缘铺展, 并在底部形成两股反向涡流; 随着基板温度的升高, 熔覆层形貌从瘦高状向扁平状转变。



摘要: 针对厚空心六角不锈钢管滚压剪切, 提出摆动式滚压剪切方法, 建立求解管材滚压剪切过程中的重要参数滚切力的理论模型。分析该方法加工厚空心六角不锈钢管的过程, 根据塑性力学知识建立摆动式滚压剪切机构的几何模型和力学模型, 引入重要参数滚切力并建立其理论模型, 并将该理论模型运用在具体实例上。提出面积修正系数与准静态修正系数对理论模型进行修正, 并通过有限元方法进行修正系数的求解。通过试验对修正后的理论模型进行验证, 检验修正后的理论模型的实用性, 并对进给量的选择与修正系数的选择关系进行分析, 为以后的试验提供参考。相较于以往的研究, 基于修正系数提出的理论模型的精度更高, 能更好地总结滚切力建模误差来源, 可以推广应用到其他类型管材。

60 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

87 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

171 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

211 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

CONTENTS

- 1 Design of Cell in Situ Culture System for Magnetic Propelled Micro-nanorobot**
SUN Haoran WANG Lin YU Shimin DAI Lizhou ZHANG Guangyu LI Tianlong
- 10 Research on Rolling Locomotion Dynamics Characteristics of a Dual Hemispherical Capsule Robot Actuated by Rotating Magnetic Field**
ZHANG Yongshun JI Xuan LIU Xu LIU Guanxi LIU Zhenhu
- 19 Deployment Scheme of Deployable Cylindrical Flexible Structure with Large Storage Ratio**
CAI Jianguo ZHONG Yihan WANG Liwu CHEN Xu WANG Zizhe ZHANG Qian FENG Jian
- 29 Dynamic Dimension Synthesis of 4-RR(SS)₂ High Speed Parallel Robot**
ZHANG Huipu WANG Manxin
- 41 Compliant Control of Industrial Robot Surface Tracking Based on Priori Velocity Correction**
ZENG Lingcheng LI Mingfu YANG Zhenzhen LUO Wei
- 52 Research on In-orbit Assembly Unit and Docking Interface of Large Space Structure**
SHI Chuang LI Weijie GUO Hongwei TAO Lei LIU Rongqiang DENG Zongquan
- 61 Multi-UAV Finite-time Ring Formation Control Considering Internal Collision Avoidance**
LIU Yunping JIANG Changsheng ZHANG Tingting ZHAO Zhongyuan DENG Zhiliang
- 69 Dynamic Error Analysis and Optimization Design of Planar Flexible Multi-link Mechanism with Angular Contact Ball Bearing and Revolute Clearance Sliding Bearing Joints with Rough Surfaces**
ZHANG Yongnian TAO Yaman JIANG Shuyun ZHU Songqing ZHENG Enlai SHI Jinfei
- 88 Identification of Key Nonlinear Parameters and Research on Dynamic Characteristics of Air Spring Dynamic Stiffness Model**
WU Mingyu LI Xuebing YIN Hang LÜ Jingcheng WEI Yintao
- 97 Research on Vibro-acoustics of Aluminium Extrusions from a High-speed Train Body Based on Two-and-half Dimensional Finite Element/Boundary Element Method**
DENG Tiesong XIAO Xinbiao SHENG Xiaozhen
- 108 An Approach for Reconstructing the Time-Dependent Force Acting on a Thin Plate from Particle Velocity Measurements**
HU Long ZHANG Yongbin ZHANG Xiaozheng BI Chuanxing

- 116 Novel Hybrid Method for Contact Analysis and Experiment Test**
LIU Qian CHENG Jing LIANG Jianxun
- 124 Research Progress of Droplet Wetting Behavior on Solid Textured Surface**
WANG Zhiyuan XING Zhiguo WANG Haidou SHAN Debin
- 145 The Study on Grease Mixed-Lubrication Model of Point Contact Pair**
WU Zhenghai XU Yingqiang LIU Kaian CHEN Zhiyong
- 154 Research on Lubrication Efficiency Enhancement of High-speed Bearing under Oil-starvation Conditions**
GE Linfeng CHEN Fei YAN Ke WANG Chao HONG Jun ZHU Yongsheng
- 162 Theoretical and Experimental Study on the Lubrication Model and Transient Start-up Process of the Cryogenic Rolling Bearing**
ZHANG Guoyuan LIANG Maotan ZHAO Yangyang ZHAO Weigang LI Xukang
- 172 Collaborative Manufacturing Strategy of Shape and Performance for the Personalized 3D Printing Transfemoral Prosthesis Socket**
TANG Lei LIU Tengda SHAN Cunqing SUN Changning WANG Ling TIAN Xiaoyong
LI Dichen
- 179 Vector Space Reconstruction Model Based on Product Characteristic Linkage and Design Change Propagation**
GAN Yi HE Yiqi GAO Li LI Bingchu
- 190 Meta-Learning Based Multi-Fidelity Deep Neural Networks Metamodel Method**
ZHANG Li CHEN Jiangtao XIONG Fenfen REN Chengkun LI Chao
- 201 Study on Spray Performance and Optimization Design of Gas-liquid Coaxial Swirl Nozzle**
YOU Yunxia HOU Li YI Zongli ZHANG Haiyan SHENG Xin
- 212 Optimization Design of Bilinear Material Stiffness for Contact Stress Homogenization**
ZHOU Yicong LIN Qiyin ZHANG Ningjing HONG Jun YANG Nan
- 221 Interval Optimization for Generated Axial Force of Drive Shaft Systems Considering Rough Surface Characteristics**
FENG Huayuan SHANGGUAN Wenbin KANG Yingzi
- 231 Analysis of Surface Residual Stress and Formation Mechanism of Metamorphic Layer in PCBN Tool Cutting Superalloy under High-pressure Cooling**
WU Mingyang ZHANG Yali CHENG Yaonan ZHANG Jianyu CHU Weixu
- 244 Precision Milling and Grinding of Mold Core for Microfluidic Chip and its Micro-injection Molding Technology**
LU Yanjun LIU Bo CHEN Fumin GUO Mingrong TANG Heng LUO Hexi

256 Smooth Flank Milling Tool Path Generation for Blisk Surface with Barrel Cutters

LU Yaoan CHEN Shoufeng WANG Chengyong

267 Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in CMT-based Additive Manufacturing

ZHAO Wenyong CAO Xiyong DU Xinwei WEI Yanhong LIU Renpei CHEN Jicheng

277 Theoretical modeling and Verification of Roll-shearing Force of Thick Hollow Hexagonal Stainless Steel Tube

JIANG Junxia TAO Bangming LIAO Haipeng ZHANG Xinyuan DONG Qun

DOI: 10.3901/JME.2022.01.172

3D 打印个性化大腿假肢接受腔形性协同制造策略*

汤磊 刘腾达 单存清 孙畅宁 王玲 田小永 李涤尘
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 假肢接受腔作为连接残肢与假肢系统之间的关键界面,是假肢系统发挥其功能的重要基础。为满足假肢接受腔个性化、快速、低成本的制造需求,本研究提出利用材料挤出成型技术(Material extrusion, MEX)制备大腿假肢接受腔的方法与策略。首先通过对残肢-接受腔系统的生物力学分析提出了接受腔材料的力学性能需求。然后,系统地研究了不同的材料成分和工艺参数体系对成型件的力学性能的影响,确定了适用于接受腔制备的 MEX 工艺材料。同时,针对接受腔的力学性能需求,尤其针对有特殊强度需求和几何结构突变的部位所需的力学性能,进行了打印工艺参数的优化和打印策略的完善,提高了打印制件的层间结合强度。最后,实现 3D 打印接受腔的制备,提出了接受腔的形性协同制造策略,实现了 3D 打印接受腔的临床实验。结果表明,与传统方法制备的接受腔相比,本研究制备的 3D 打印接受腔具有更好的使用功能和穿戴舒适度。

关键词: 3D 打印; 假肢接受腔; 力学性能; 工艺优化; 临床试用评价

中图分类号: TG156

Collaborative Manufacturing Strategy of Shape and Performance for the Personalized 3D Printing Transfemoral Prosthesis Socket

TANG Lei LIU Tengda SHAN Cunqing SUN Changning
WANG Ling TIAN Xiaoyong LI Dichen

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: The prosthetic socket provides the critical attachment between the residual limb following amputation and the prosthetic device, without which the prosthetic device cannot work properly. The purpose of this study was to present a quick-responded framework for the customized manufacturing of low-cost prosthetic socket, using material extrusion technology (MEX). The required mechanical property of the prosthetic socket was proposed through the biomechanical analysis of residual limb and prosthetic socket. Based on that, the suitable manufacturing material is selected through the systemically research on the impact of material and process parameter on the mechanical properties of the printed parts. Then, the process parameters and the printing strategy are further optimized to improve the interlaminar tensile strength, especially for the structures with specially required mechanical properties and geometrical mutations. Finally, the manufactured prosthetic socket indicated the effectiveness and feasibility of the collaborative manufacturing strategy of shape and material properties. The clinical application showed that compared with the traditional prosthetic socket, the 3D printing prosthetic socket in this study can offer better comfort and functionality.

Key words: 3D printing; prosthetic socket; mechanical property; process optimization; clinical application and evaluation

0 前言

近年来,由于交通事故、自然灾害以及心血管病、糖尿病等疾病造成的截肢人数不断上升,肢体

残疾已经成为我国人口中的重大残障疾病之一。假肢是以代偿肢体形态和功能的方式帮助残肢患者康复和回归社会的重要手段,假肢接受腔作为连接肢体与假肢系统之间的生机界面,是假肢发挥各种功能作用的重要基础。由于每一位截肢患者的截肢位置、残肢形状、软组织状况以及活动水平等都各不相同,假肢接受腔的设计就必须因人而异、因残而

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1107000)。20210204 收到初稿,20210716 收到修改稿

异, 针对患者残肢的特定条件进行个性化的设计与制造, 无法大规模的批量生产。

传统的假肢接受腔设计制造流程包括了残肢测量、阴模取型、阳模修型、试穿、阳模再修型、接受腔成形等步骤。从最初在患者的残肢上取型到最终制作完成的接受腔, 期间要不断的重复修型-试穿-再修型的迭代循环, 直到最终得到一个患者较为满意的接受腔形状。接受腔修型的依据来源于患者试穿的主观反馈以及假肢医师的技术经验。但这种患者口述的反馈信息以及假肢医师的主观修型经验存在很大程度的不准确性, 因此与残肢的适配性问题一直是个性化假肢接受腔的设计制造所面临的主要挑战^[1]。同时, 复杂的设计制造流程导致了个性化接受腔高昂的成本以及漫长的设计制造周期, 限制了其大规模普及应用。

目前, 具有复杂几何形状快速成形能力的 3D 打印技术在假肢矫形器等个性化康复辅具领域的巨大应用前景已经引起了越来越多的关注和研究^[2]。数字化的设计方法结合 3D 打印制造技术能够实现假肢接受腔在设计制造过程中的量化精准调控, 摆脱传统方法中的石膏取型-修型-试穿循环, 降低材料浪费与环境污染。3D 打印技术相较于传统接受腔制造工艺具有成形精度高、制造成本低、能够小规模批量快速生产的优点, 是行业发展的主流趋势^[3]。但不可否认的是, 现阶段的 3D 打印假肢接受腔由于其较差的力学性能, 还难以进入实际的临床应用, 需要进行进一步的探索研究^[4]。

许多学者已经就 3D 打印技术在假肢领域的应用做了许多研究工作, 具体如表 1 所示。

表 1 国内外 3D 打印假肢接受腔产品研究

工艺	材料	接受腔种类	作者/单位	备注
SLS	Nylon	小腿接受腔	ROGERS 等 ^[5]	接受腔内部具有柔性顺应结构, 舒适性高
SLS	Nylon	小腿接受腔	ROGERS 等 ^[6]	—
MEX	PLA	小腿接受腔	HSU 等 ^[7]	在 3D 打印接受腔的外部涂覆聚醚树脂以增加其强度
MEX	PLA	小腿接受腔	HSU 等 ^[8]	—
SLS	Nylon	小腿接受腔	MONTGOMERY 等 ^[9]	接受腔材料的脆性高, 受到冲击后易发生破坏
MEX	VeroWhite Plus	小腿接受腔	SENGEH 等 ^[10]	为保证结构强度, 3D 打印接受腔的厚度非常大
MEX	TangoBlack Plus	小腿接受腔	DOUBROVSKI 等 ^[11]	—
MEX	VeroWhite Plus	小腿接受腔	WEBBER 等 ^[12]	—
MEX	PLA	大腿/小腿接受腔	COMOTTI 等 ^[13]	多材料复合 3D 打印接受腔, 结构强度差
SLS	Nylon	小腿接受腔	湖北省康复辅具技术中心	假肢一体打印成形, 成本高昂

目前用于接受腔制备的 3D 打印工艺主要是激光选取烧结(Selective laser sintering, SLS)和材料挤出成形(Material extrusion, MEX)两种。SLS 工艺材料以尼龙为主, 具有成形效率高和成形件强度高的优点, 但是材料的低韧性会导致接受腔的抗冲击性能较差。MEX 工艺制备的接受腔成本远低于 SLS 和手工方式的制备成本, 但在打印效率和制件力学性能上不及 SLS 工艺。尤其是 MEX 制件的层间结合强度较低, 需要在接受腔局部区域增加厚度以弥补强度的不足, 增加了额外的重量、成形时间与制造成本。面向假肢接受腔个性化与低成本快速制造的需求, 本研究提出了一种基于 MEX 增材制造技术的工艺设计优化方法与假肢接受腔形性协同制造策略。主要工作内容有: 基于残肢-接受腔系统的生物力学分析结果提出接受腔的力学性能指标; 对高性能热塑性材料 MEX 成型件进行力学性能测试并确定适用于接受腔制备的 MEX 工艺材料; 优化

MEX 技术的打印工艺参数, 进一步提高样件的力学性能; 进行接受腔的 3D 打印制备, 提出了接受腔的形性协同制造策略, 实现 3D 打印接受腔的临床应用并进行了性能评价。

1 假肢接受腔力学性能需求分析

1.1 残肢-接受腔系统生物力学分析模型

假肢接受腔作为连接残肢与假肢系统之间的生机界面, 传递体重以及运动载荷。通过构建残肢-接受腔系统生物力学模型, 分析日常活动条件下体重载荷与运动载荷对接受腔力学性能的需求, 作为 3D 打印大腿接受腔形性协同制造的目标。基于截肢者残肢的医学影像数据重建残肢与接受腔的三维几何模型, 对各模型进行网格划分与材料赋予^[14-15], 构建残肢-接受腔生物力学模型。

设置模型边界条件, 股骨头-髌臼和残肢-接受

腔接触对设置为摩擦接触，其余骨骼与软组织之间为绑定接触^[16]。软组织与盆骨的上截面和内截面固定，通过在受腔的底部施加相应的载荷去模拟残肢-接受腔系统在日常活动中所受到的真实载荷，如图 1 所示，包括了截肢者行走步态周期内患侧下肢支撑期的 5 个不同阶段^[17]。

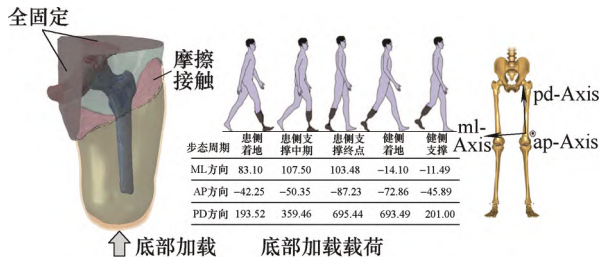


图 1 残肢-接受腔系统生物力学模型与多步态运动载荷

1.2 残肢-接受腔系统生物力学分析结果

生物力学分析结果显示，接受腔材料应力较大的区域主要是上部口型区域以及底部与假肢系统的连接部位。如图 2 所示，当载荷处于患侧支撑中期时，接受腔所受到的峰值应力 σ_p 最大，位置为坐骨平台内侧根部，大小约为 7.67 MPa。其中，竖直方向的主应力分量 σ_a 约为 6.6 MPa，水平方向的主应力分量 τ_a 约为 3.8 MPa。由于 MEX 制件的力学性能具有较为显著的各向异性，因此在接受腔的 3D 打印制造过程中需根据其力学性能需求与材料实际力学性能提出个性化的制造策略，在保障 3D 打印接受腔使用功能的前期下，降低接受腔的材料使用量与成型时间，实现个性化 3D 打印接受腔的快速低成本制造。

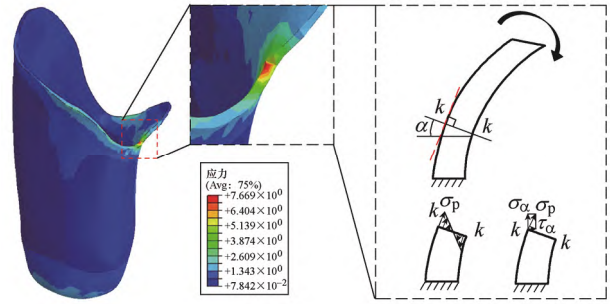


图 2 行走步态下患侧支撑过程中接受腔材料应力分布及坐骨平台内侧根部材料应力状态分析

2 MEX 工艺 3D 打印接受腔的材料与工艺参数优化

2.1 MEX 工艺打印材料优化

本文试验并比较了常用的 4 中热塑性材料的 MEX 打印样件在各个方向的力学性能，分别是聚乳酸(Polylactic acid, PLA)、尼龙(Polyamide, PA)、ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)以及 PETG (Polyethylene Terephthalate)。打印工艺参数设置使用材料推荐设置范围的中值，样件尺寸与力学测量方法参照 GB/T 1040.2—2006 《塑料拉伸性能的测定》标准。力学测量结果如图 3 所示，与材料注塑件拉伸强度相比，除 ABS 外的其他热塑性材料的 MEX 制件打印方向的拉伸强度均明显降低。PLA 材料样件沿打印方向的拉伸强度为 50.78 MPa ± 0.85 MPa，优于另外三种材料。

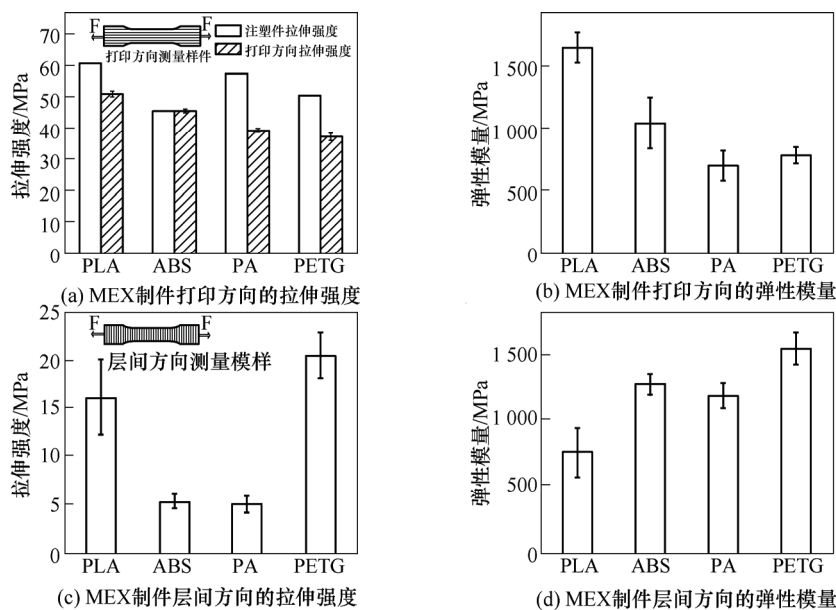


图 3 MEX 工艺打印样件力学性能测试结果

层间方向的力学测量结果显示，各个材料的层间结合强度相较于打印方向拉伸强度均显著降低。PA 材料的层间拉伸强度降幅最大，仅为注塑件拉伸强度的 9%，PETG 降幅最小，层间结合强度最高。这些结果表明，层间结合强度低是 MEX 制件力学性能最大的短板，改善层间方向的力学性能是 MEX 工艺优化主要目标。综合考虑制件的力学性能、打印效率与表面质量后，将力学性能优异、成型质量好、材料变形小的 PLA 材料作为本研究选用的接受腔 3D 打印材料。

2.2 MEX 工艺打印 PLA 材料的关键工艺参数

MEX 工艺中的工艺参数主要包括了打印速度、温度、路径方向、层厚、线宽等等。采用正交试验方法研究打印温度、打印速度、层高和喷嘴直径等主要工艺参数及参数间交互作用对层间结合强度的影响。四因素均设置为三水平，如表 2 所示。

表 2 正交实验的参数水平设置

水平	因素			
	A 打印温度 / $^{\circ}\text{C}$	B 打印速度/(mm/s)	C 层高 /mm	D 喷嘴直径 /mm
1	205	10	0.1	0.6
2	215	20	0.2	0.8
3	225	30	0.32	1.0

层间结合强度的测试标准参照国标 GB/T 1040.2—2006。依据正交试验的 27 组测量结果，利用方差分析方法得出各打印工艺参数及其交互作用对层间结合强度的影响，如表 3 所示，其中 A 为打印温度，B 为打印速度，C 为分层高度，D 为喷嘴直径，A×B 代表打印温度与打印速度的交互作用，A×C 代表打印温度与分层高度的交互作用。结果显示，打印温度与分层高度、打印速度与分层高度存在明显的交互作用。打印温度与分层高度的交互作用、打印速度是影响层间结合强度的最关键工艺参数。

表 3 各打印工艺参数对层间结合强度影响的方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 比	显著性
B(打印速度)	50.43	2	25.215	4.20	**
D(喷嘴直径)	35.78	2	17.890	2.98	*
A×C	117.82	4	29.455	4.91	**
B×C	65.33	4	16.333	2.72	*
误差	84.00	14	6.00		
S 总	353.36	26			

*表示显著性高，**显著性更高。

2.3 关键工艺参数对材料层间结合强度的影响

采用单因素分析法研究打印速度和层高-打印温度交互作用对 PLA 材料 MEX 工艺制件层间结合强度的影响规律，以制件的力学性能与打印效率为目标优化打印工艺参数。

由图 4 可知，打印速度的单因素分析结果显示，当打印速度低于 10 mm/s 时，强度明显降低，其原因在于，过慢的打印速度导致材料挤出的压力不足，挤出材料无法与基底材料实现较好的粘连；而当打印速度高于 30 mm/s 时，强度也会降低，原因是过快的打印速度使得材料在加热头内未能得到充分的加热熔融，影响了材料层间的粘结。

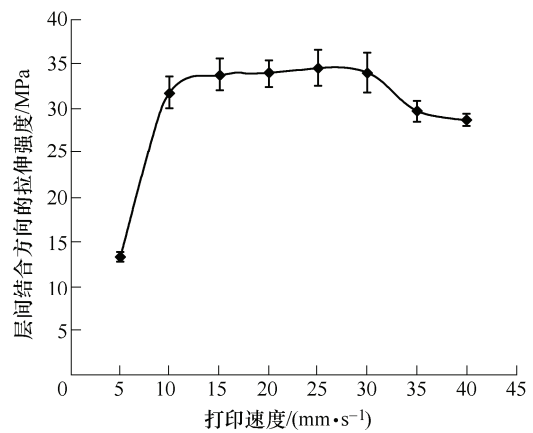


图 4 打印速度对层间结合方向拉伸强度的影响

由图 5 可知，层高-打印温度交互作用分析结果显示，当打印层高≤0.15 mm 时，由于 Z 轴传动产生的每层的高度误差就越大，导致实际单层所需材料与实际送料量不匹配，引起层间粘接不良。当层高≥0.30 mm 时，挤出铺放的材料与基底材料之间间距过大，熔融材料所受的压力不足，也会导致粘接不牢。

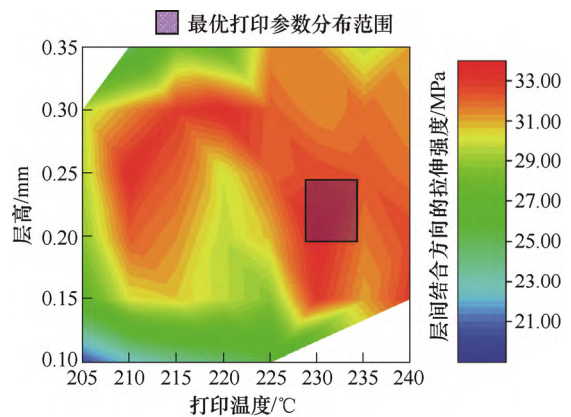


图 5 打印温度与层高对层间结合方向拉伸强度的影响

综合以上结果,当层高设置为 0.2~0.25 mm,打印温度范围设置 228 °C ~ 235 °C,如图 5 中黑框所示,既能实现良好的成形效果,具有良好的层间结合强度,又具有较高的打印效率。此时,PLA 材料的 MEX 成形件层间结合强度约为 33 MPa,打印方向拉伸强度约为 63.8 MPa,均高于传统聚乙烯接受腔材料 29.3 MPa 的强度,对于生物力学分析中得到的材料应力峰值也具有超过 4 的安全系数。

3 假肢接受腔的 3D 打印制造与评价

3.1 基于接受腔力学性能需求的材料厚度设计优化方法

传统的假肢接受腔是在石膏阳模的基础上翻膜塑型而成,接受腔壁厚均匀分布。而 3D 打印接受腔则可以根据接受腔各区域的力学性能需求与材料实际力学性能,建立力学性能需求与材料厚度之间的映射关系,构建具有梯度厚度分布的接受腔个性化制造模型。依据残肢-接受腔系统生物力学模型的多步态分析结果,根据不同区域的材料应力分布,在坐骨平台与连接部位等高负载区域保持原有材料厚度,在接受腔中段等低负载区域在保证材料应力小于许用应力的前提下移除部分材料,降低接受腔重量,提高制造效率。接受腔壁厚与材料峰值应力之间的关系为

$$T = 0.357 \times \sigma + 1.643$$

式中, σ 为材料应力, T 为接受腔材料的壁厚。如图 6 所示,接受腔壁厚最大为 4 mm,最小为 2 mm。

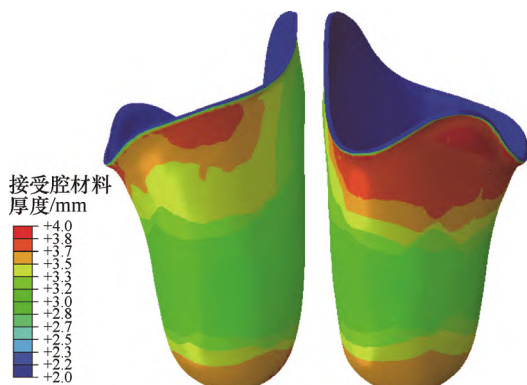


图 6 接受腔制造模型的材料厚度分布

3.2 接受腔打印路径规划

利用优化后的打印工艺参数进行假肢接受腔的 3D 打印制备(图 7)。在接受腔中部的均匀薄壁结构

中,采用了紧贴几何轮廓由外到内的逐圈填充打印方法,能够有效的提高打印效率;而针对接受腔底部、上部口型圈以及坐骨平台的主要承载部位,则采用了双层轮廓和正交线填充的打印路径,能够保证材料铺放的致密均匀程度,保证材料结构的力学性能和接受腔使用的安全性。最终制备完成的接受腔总质量约为 700 g,总制造时间约为 40 h,重量相较于传统接受腔降低 30%以上。

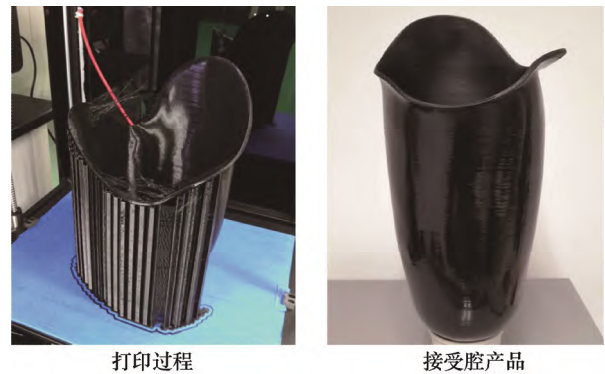


图 7 3D 打印个性化假肢接受腔制备过程

3.3 3D 打印假肢接受腔的临床试用与评价

将 3D 打印制备完成的接受腔与假肢其他部件连接并装配,通过截肢者的临床试用来评价 3D 打印假肢接受腔的使用舒适性与功能性。

评价结果如图 8 所示,通过对四名志愿者水平行走的步态特征进行对比,在 10 min 步行的行走长度测试中,穿戴 3D 打印接受腔行走速度更快,相比传统接受腔可多行走 19.82% 的长度,原因是 3D 打印接受腔的质量更轻,使其能够更好地满足患者长时间长距离使用假肢的需求。由图 8、9 所示,与传统接受腔相比,穿戴 3D 打印接受腔时志愿者健侧和患侧的支撑时间和步长基本一致,因此本研究认为 3D 打印接受腔可以完成日常活动的基本动作,在长时间和长距离的使用情景中具有明显优势,且具有良好的穿戴舒适度。



图 8 截肢者穿戴 3D 打印接受腔进行性能评价

《机械工程学报》第十一届编委会

名誉主任

钟群鹏 (院士) 路甬祥 (院士) 潘际銮 (院士)

名誉委员

王玉明 (院士) 石治平 (研高) 叶声华 (院士) 宁汝新 (教授) 过增元 (院士) 刘大响 (院士)
刘友梅 (院士) 刘宏民 (教授) 李圣怡 (教授) 周祖德 (教授) 胡正寰 (院士) 柳百成 (院士)
钟掘 (院士) 闻邦椿 (院士) 耿荣生 (教授) 徐金梧 (教授) 徐滨士 (院士) 熊有伦 (院士)

主任

陈学东 (院士)

副主任

王国彪 (教授) 邓宗全 (院士) 李奇 (编审) 陈超志 (教授级高工) 邵新宇 (院士)
黄田 (教授) 黄庆学 (院士)

国内委员

丁汉 (院士) 王雪 (教授) 王田苗 (教授) 王华明 (院士) 王庆丰 (教授) 王时龙 (教授)
王树新 (教授) 王海斗 (教授) 王润孝 (教授) 王耀南 (院士) 孔祥东 (教授) 卢秉恒 (院士)
史玉升 (教授) 冯吉才 (教授) 权龙 (教授) 曲兴华 (教授) 朱胜 (教授) 朱荻 (院士)
朱向阳 (教授) 华林 (教授) 刘强 (教授) 刘少军 (教授) 刘军山 (研究员) 刘志军 (教授)
刘辛军 (教授) 刘检华 (教授) 刘雪峰 (教授) 刘献礼 (教授) 刘德顺 (教授) 孙伟 (教授)
孙汉旭 (教授) 孙逢春 (院士) 严新平 (院士) 杜雪 (教授) 杜朝辉 (教授) 李大勇 (教授)
李荣德 (教授) 李涤尘 (教授) 杨永强 (教授) 杨华勇 (院士) 杨兆军 (教授) 杨绍普 (教授)
何存富 (教授) 沈功田 (研究员) 张峥 (教授) 张义民 (教授) 张卫红 (教授) 张立军 (教授)
张宪民 (教授) 陈新 (教授) 陈文华 (教授) 陈兵奎 (研究员) 陈雪峰 (教授) 苑世剑 (教授)
苑伟政 (教授) 范志超 (研究员) 林京 (教授) 林峰 (教授) 林忠钦 (院士) 周仲荣 (教授)
周华民 (教授) 单忠德 (院士) 项昌乐 (院士) 赵杰 (教授) 赵继 (教授) 赵韩 (教授)
赵丁选 (教授) 赵宏伟 (教授) 赵国群 (教授) 柯映林 (教授) 钟志华 (院士) 段吉安 (教授)
段宝岩 (院士) 姜澜 (教授) 洪军 (教授) 官声凯 (院士) 姚建华 (教授) 姚振强 (教授)
袁巨龙 (教授) 袁寿其 (教授) 都东 (教授) 贾振元 (院士) 夏长亮 (院士) 钱林茂 (教授)
徐西鹏 (教授) 殷国栋 (教授) 高金吉 (院士) 郭万林 (院士) 郭东明 (院士) 涂善东 (院士)
陶飞 (教授) 黄卫东 (教授) 黄传真 (教授) 黄明辉 (教授) 梅雪松 (教授) 彭艳 (教授)
彭芳瑜 (教授) 葛世荣 (教授) 韩旭 (教授) 焦宗夏 (教授) 温激鸿 (研究员) 谢建新 (院士)
雒建斌 (院士) 廖维新 (教授) 谭建荣 (院士) 翟婉明 (院士) 熊蔡华 (教授) 融亦鸣 (教授)
戴一帆 (教授)

国际委员

Bi Zhang (美国)	Denis Cavallucci (法国)	Dong-Pu Cao (英国)
Duc Truong Pham (英国)	Erhan Budak (土耳其)	Guang-Bo Hao (爱尔兰)
Gui-Yun Tian (英国)	Hai-Jun Su (美国)	Han Huang (澳大利亚)
Hong-Chao Zhang (美国)	Jian-Sheng Dai (英国)	Jie (Peter) Liu (加拿大)
Jin Wang (英国)	Jorge Angeles (加拿大)	Jun Wang (澳大利亚)
Kai Cheng (英国)	Kazushi Sanada (日本)	Lian-Xiang Yang (美国)
Li-Hui Wang (瑞典)	Marco Ceccarelli (意大利)	Ming-Jian Zuo (加拿大)
S.S. Park (加拿大)	Shao-Ping Bai (丹麦)	Shin Usuki (日本)
Tamás Insperger (匈牙利)	Wei Gao (日本)	Wei-Dong Li (英国)
Wei-Ming Shen (加拿大)	Xian-Wen Kong (英国)	Xiao-Ping Du (美国)
Xi-Chun Luo (英国)	Xu-Dong Zhao (英国)	Xun Chen (英国)
Y. Lawrence Yao (美国)	Yan Jin (英国)	Ye-Hwa Chen (美国)
Yong Huang (美国)	Yong-Bo Deng (德国)	Yu-Chun Xu (英国)
Zhao-Jie Ju (英国)		

