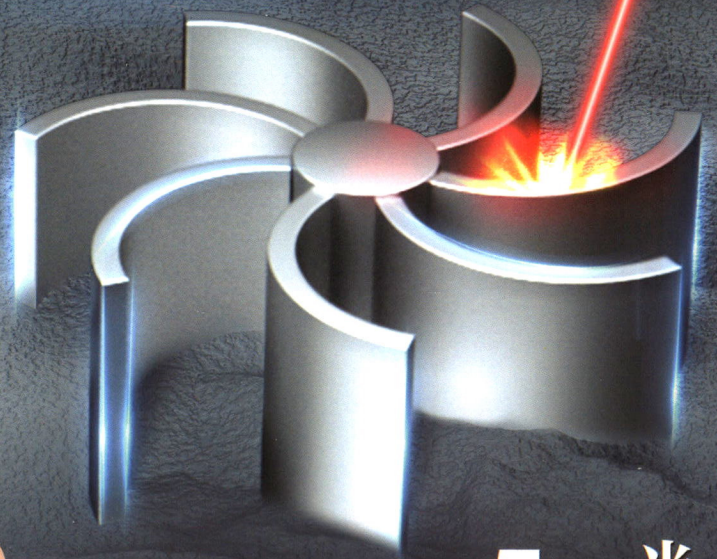
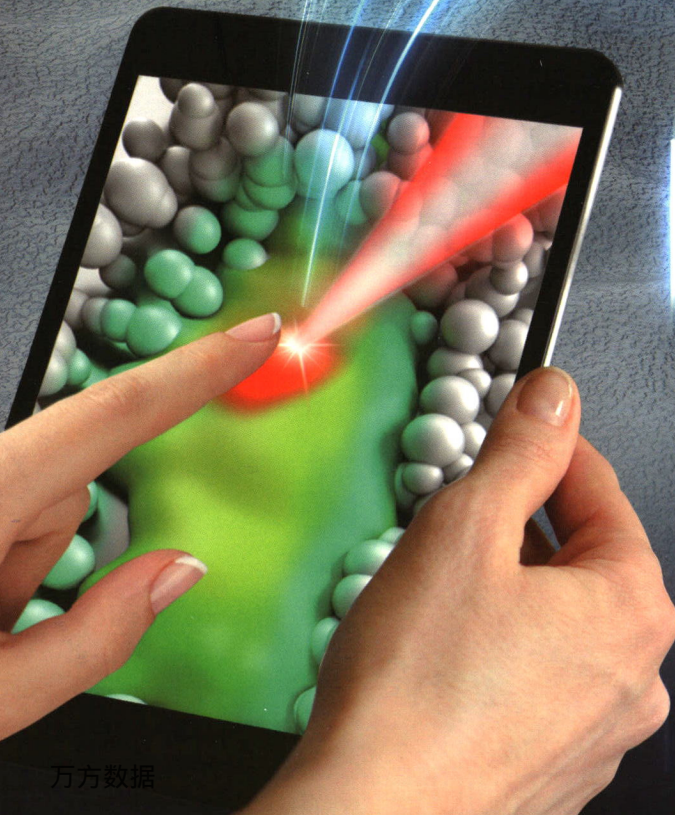


# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：选择性激光熔化工艺的介-微观建模与仿真方法综述

作者：敖晓辉 刘检华 夏焕雄 何奇阳 任策

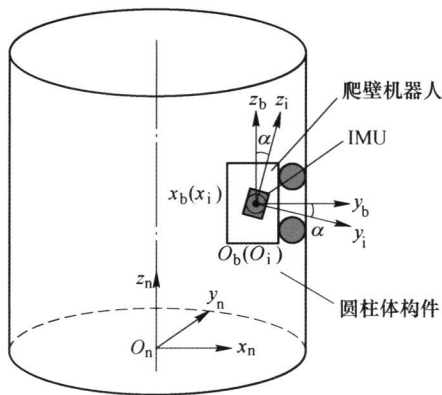


58卷 5期 半月刊  
2022年3月刊

## /// 机器人及机构学 ///

### 1 圆柱形钢制构件表面爬壁机器人姿态估计方法

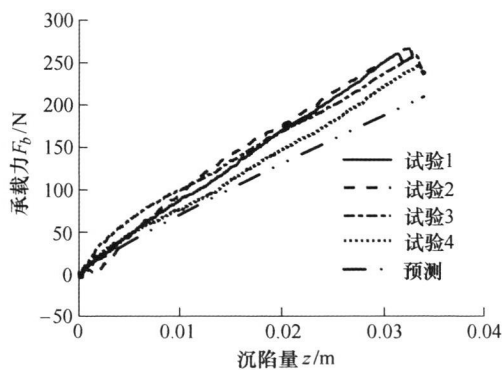
张 文 丁雨林 陈咏华 孙振国



**摘要:** 针对相对封闭、磁干扰等特殊环境下传感器应用受限, 导致爬壁机器人的姿态估计误差偏大的问题, 提出并实现了一种基于惯性测量单元(IMU)和圆柱形状约束的爬壁机器人姿态估计方法(IMU-CC-ATE)。该方法利用爬壁机器人执行工作任务中运动状态和静止状态频繁切换的特点, 使用静止状态时 IMU 的角速度输出值估计相邻运动状态时 IMU 的角速度漂移值; 并结合圆柱形表面约束使机器人姿态估计的横滚角保持不变的特性, 设计扩展卡尔曼滤波器(EKF)对机器人的姿态和 IMU 的角速度漂移进行实时估计。实验结果表明: 该方法使爬壁机器人姿态估计的航向角误差从  $20^\circ$  以上降低至  $3.5^\circ$ , 俯仰角误差保持在  $2^\circ$  以内, 横滚角误差在  $0.5^\circ$  以内, 有效地提高了机器人姿态估计精度。

### 8 松软地质上机器人足-地动力学建模与试验

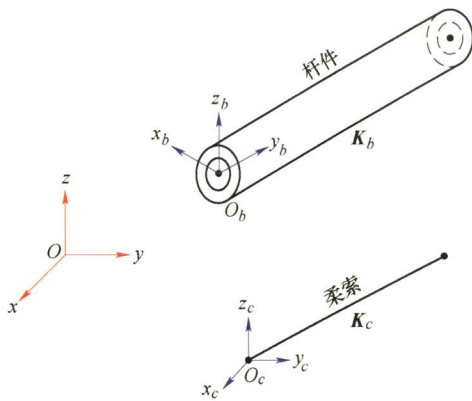
刘逸群 陆培栋 张志鹏 王剑锋 张京明 丁亮 高海波



**摘要:** 足-地动力学是多足机器人在松软地质上移动机理的核心, 在其设计、运动控制和仿真等方面具有重要作用。考虑到切向运动压缩足端周面土壤的情况, 结合地面力学理论和 Rankine 被动土压力理论建立了机器人平底足-地动力学模型。进一步推导建立了一定倾角下矩形足-地动力学模型。开发了多工况足-地作用测试系统, 将压盘实验测得的参数代入到矩形足-地动力学模型, 通过理论值和实验值的对比, 验证了预测误差在合理范围内。对不同足端姿态角的实验数据使用非线性拟合辨识, 得到了推进力和承载力的应力-应变系数, 最小误差为 9.89%, 对比本领域经典文献, 验证了不同足端姿态角下平底足足端应力分布函数的有效性。

## 18 基于线性互补理论的可展开索-桁架结构静力学分析

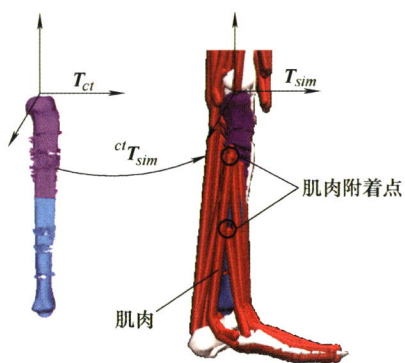
肖航 吕胜男 李龙 罗斯达 段海滨 丁希仑



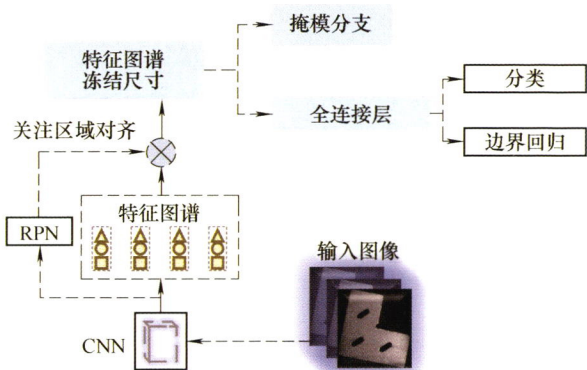
**摘要:** 空间可展开索-桁架结构具有折展比大、重量轻、刚度高的优点, 广泛应用于天线、太空望远镜、太阳翼等大型航天器关键部件中。在统一框架内进行了梁单元和索单元的刚度矩阵集成, 建立了包含柔性绳索和杆件的可展开索-桁架结构刚度模型。基于线性互补理论, 提出了一种反应绳索真实张紧、松弛状态的结构受力变形计算方法, 得到了准确的结构受力与节点位移的映射关系。最后以剪叉机构单元和圆柱面可展开结构为例, 验证了所提出方法的有效性, 并分析了绳索分布对结构变形的影响。该分析方法可扩展应用于各类索-桁架结构的受力变形计算。

## 26 面向并联骨折手术机器人的复位轨迹自动式规划方法

李锦龙 刘传耙 孙涛 张强 连宾宾 宋轶民



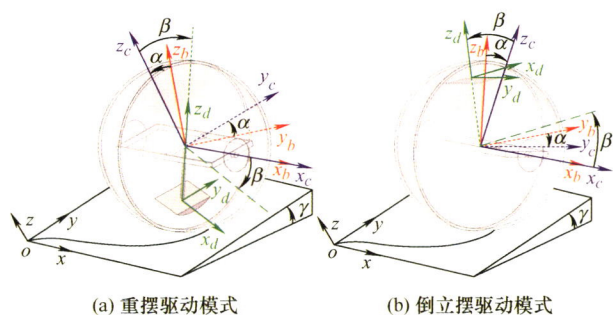
**摘要:** 并联骨折手术机器人及其计算机辅助诊疗技术解决了骨折复位手术治疗创伤大、易二次感染的风险, 但现有骨折复位轨迹规划方法存在碰撞检测效率低、复位路径长及肌肉牵拉力大等问题, 难以实现精准安全的复位治疗。针对此问题, 提出一种融合碰撞检测、肌肉力分析和最短路径搜索的骨折复位轨迹自动式规划方法。首先, 基于患者的 CT 影像重建三维骨模型, 以患者健侧骨模型为复位参考, 获取骨折复位的目标。其次, 定义碰撞检测阈值, 基于八叉树搜索算法快速查找断骨间的最小距离点, 实现断骨碰撞检测。随后, 由 OpenSim 的标准模型通过缩放特征建立个性化骨折肌肉模型, 实时获取复位过程的肌肉牵拉力。最后, 以骨块无碰撞、肌肉牵拉力最小和路径最短为约束条件, 设计 A\* 算法的轨迹搜索节点与估价函数, 实现轨迹规划。开展所述方法与交互式轨迹规划方法针对 9 组胫腓骨骨折的复位轨迹规划对比实验, 本方法平均规划时间仅为 3.2 s, 比交互式方法耗时减小了两个数量级, 平均复位路径长度为 24.3 mm, 减小了 36.7%, 平均肌肉力是 96.4 N, 减小了 16.2%。结果表明, 本方法轨迹规划耗时短、复位效率高且轨迹安全性高, 为精准安全骨折复位治疗提供了新思路。



**摘要:** 为了解决铸件表面缺陷检测以及缺陷位置的三维定位问题,采用双目视觉系统获得图像,依靠三角测量法获得点云数据,基于正态分布变换配准方法实现工件的三维定位。通过多模型级联解决少样本和样本比例失衡情况下的表面缺陷检测,结合无监督模型的编码解码方式,依靠正样本训练获得对缺陷图像进行修复的网络模型,将修复后的图像与原始图像进行差异分析获得缺陷位置;使用 MASK-RCNN 模型进行监督模型训练,获得一体化检测分割模型,直接定位缺陷位置及类别。此外还将运动机构的物理坐标系、双目成像的工件坐标系以及平面图像的坐标进行换算,得到多个坐标系的转换关系,实现了平面缺陷的位置信息映射到三维工件的空间中。实验表明提出的双目视觉系统在工件成像以及检测方面具有良好的效果。

44 质心径向可变球形机器人的设计与运动分析

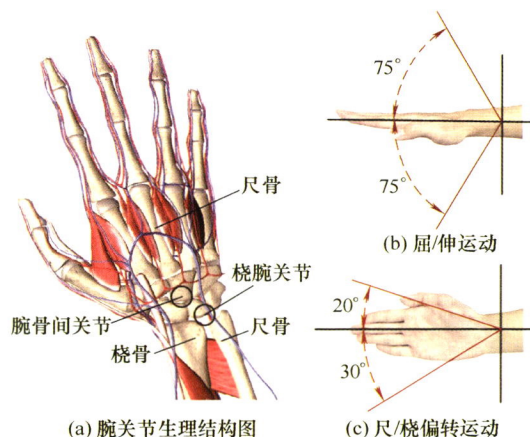
马 龙 孙汉旭 李明刚 孙 萍 张维振 龙秉政 史慧文



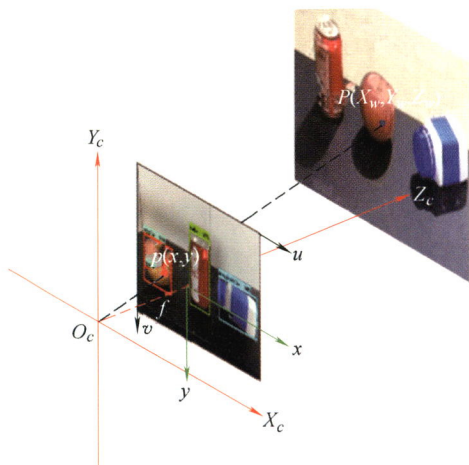
**摘要:** 面向非结构化任务环境下球形机器人的实用性提升需求,研制 BYQ-GS 型质心径向可变球形机器人样机,使球形机器人同时具备重摆驱动模式与倒立摆驱动模式,且 2 种驱动模式下均能实现质心的径向变化。考虑质心径向变化因素,同时将运动过程中受到的可控影响因素融入动力学模型构建过程,得出面向非结构化任务环境的动力学模型。以 BYQ-GS 型球形机器人样机为实验平台,分析倒立摆驱动模式与质心径向移动对球形机器人运动产生的影响。结果表明,与重摆驱动相比,倒立摆驱动在超调量、系统响应速度与能耗方面具有优势,在系统收敛速度与运动稳定性方面具有劣势,并且运动开始阶段质心-球心距离逐渐减小能够使 2 种驱动模式的控制系统收敛速度、超调量、稳定性与响应速度均变差,同时使能耗变优。

57 绳索驱动腕部并联康复机构设计与逆运动学分析

张邦成 刘 帅 喻俊志 庞在祥 张曦予



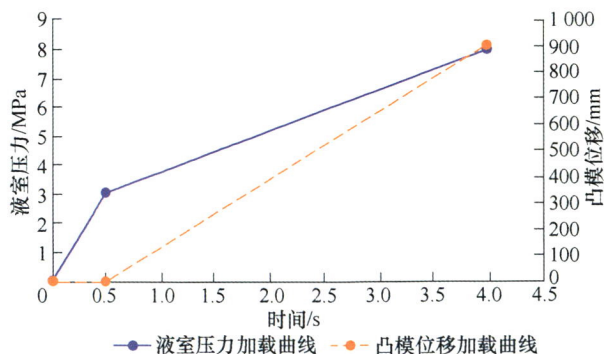
**摘要:** 针对现有腕部康复机构运动范围小,存在柔顺性和舒适性差等问题,提出一种新型绳索驱动、压缩弹簧支撑的柔性并联腕部康复机构。机构定平台、动平台由三根绳索和压缩弹簧连接,弹簧用来模拟腕骨与韧带复合体,起支撑并限制与掌骨相对应的动平台运动;动平台模拟掌骨末端,定平台模拟桡骨和尺骨末端;三根绳索模拟肌肉来驱动并联机构。考虑弹簧轴向位移以及柔性问题,基于有限转动张量法和力与力矩平衡分析方法,构建系统逆运动学数学模型,得到运动学和静力学联合求解的非线性方程组。通过对机构模型分析,完成 0~75° 下各绳索长度和拉力的数值求解。通过仿真与试验得到人体腕部生理运动空间和机构有效工作空间,验证了机构的合理性和分析方法的正确性。所提出的求解方法对康复机器人和绳索驱动并联机构设计具有积极的促进作用。



**摘要:** 针对目前智能家庭场景下, 家居服务机器人对不同物品位姿的识别准确度与操作性差等问题, 进行机器人手眼协调识别技术与物品灵巧操作规划方法的研究, 提出了视觉前馈目标定位与视觉反馈位姿匹配相结合的识别与多位姿抓取方法。首先, 基于 SSD 神经网络模型识别待抓取物品, 并进行三维测定, 以得到物品粗略坐标位置; 其次, 根据所得三维坐标预设深度相机与物品的相对位姿, 采集物品与障碍物的深度信息, 并基于 Linemod 算法与内置三维模型进行位姿匹配, 完成对物品精确位姿的测定; 最后, 依据所得物品与障碍物的位置与姿态, 规范臂手系统的抓取位姿, 实现灵巧抓取物品。由以上原理, 设计手眼协调测试实验进行不同桌面高度的物品抓取成功率与抓取误差测试, 实验抓取总成功率高, 且误差满足实际精度要求; 该研究有利于提高家居服务机器人物品操作的灵巧性与适应性, 对于家居服务机器人产业的发展具有重要意义。

## 78 火箭贮箱箱底充液拉深成形工艺的多目标优化

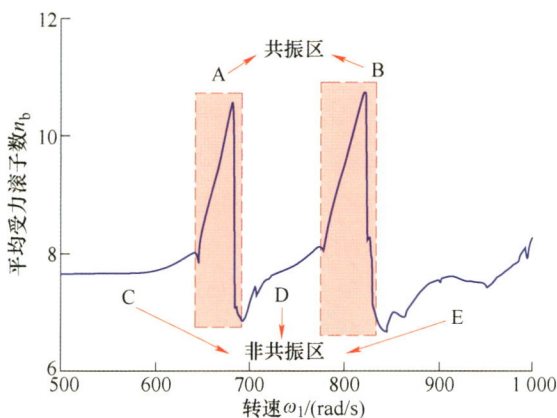
张在房 徐 冯 孙习武



**摘要:** 充液拉深成形技术能实现大型贮箱箱底的整体成形, 然而成形件的质量受到许多工艺参数的影响。针对大型贮箱整体箱底构件充液拉深成形的起皱和破裂缺陷, 以预胀压力、液室压力、压边力、压边圈圆角半径等工艺参数为研究对象, 建立多目标优化模型。对贮箱箱底成形过程进行模拟, 在此基础上, 使用拉丁超立方采样法获得样本数据。采用克里金插值法(Kriging)和径向基函数(Radial basis function, RBF)建立工艺参数和质量指标之间的代理模型。利用 NSGA-III 算法和粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)确定了贮箱箱底达到目标(壁厚减薄率最小、破裂趋势最小、法兰边起皱最小、起皱趋势最小)时的最优工艺参数。最后通过实验验证了方法的有效性和结果的准确性。

87 双转子系统中介轴承的动载荷及其对轴承温度的影响

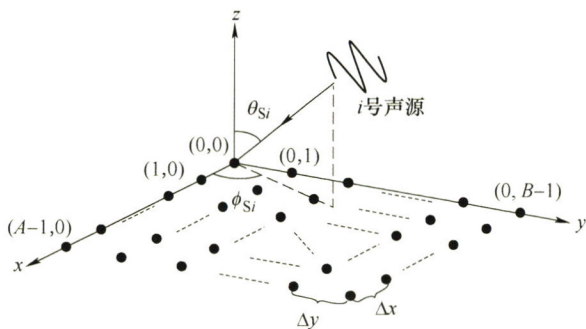
高朋 侯磊 陈子恕



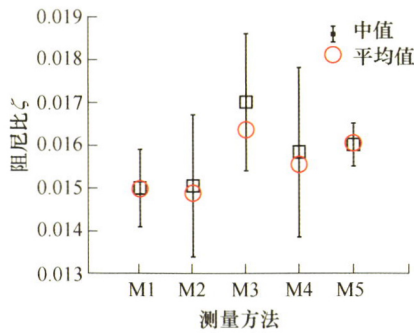
**摘要:** 通过结合传热学和非线性动力学,探讨了航空发动机双转子系统中介轴承在动载荷作用下的热行为。通过双转子系统动力学响应计算获得中介轴承动载荷,将其代入Palmgren经验公式,得到中介轴承的载荷摩擦热和黏度摩擦热,从而建立中介轴承在动载荷作用下的瞬态热传递模型。通过数值计算得到中介轴承各部位的瞬态温度,发现滚子温度最高,外圈温度最低,且温升速率逐渐衰减为零。进一步分析转速、润滑剂运动黏度和环境温度对中介轴承温度和摩擦热的影响,结果表明,中介轴承温度和总摩擦热在双转子系统共振区内骤增并形成两个峰值,在系统非共振区内则逐渐增大;在共振区内,载荷摩擦热起决定作用,在非共振区内,黏度摩擦热起决定作用;润滑剂运动黏度会显著影响黏度摩擦热,从而影响总摩擦热以及中介轴承温度,而环境温度只影响中介轴承温度。中介轴承动载荷能够在一定程度上体现双转子系统的动力学特性,因此,双转子系统的动力学特性对轴承的热行为有着至关重要的影响,在轴承设计中应予以考虑。

98 典型因素对无网格压缩波束形成声源识别的影响

杨洋 褚志刚 杨咏馨

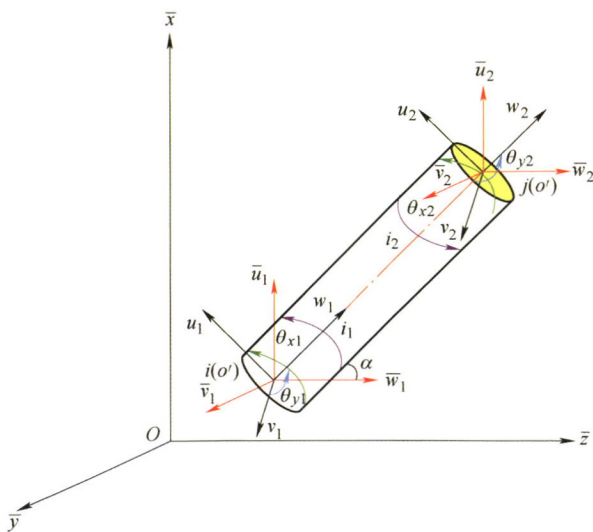


**摘要:** 基于传声器阵列测量和压缩感知理论且将目标声源区域看作连续体处理的无网格压缩波束形成声源识别方法在军事、工业、环境等领域具有良好应用前景。采用蒙特卡罗数值模拟和验证试验探究声源相干性、声源最小分离、噪声干扰和数据快拍数目四个典型因素对声源识别性能的影响,结果表明:该方法适用于任意相干性声源和任意数据快拍数目;高概率获得准确结果的条件是声源足够分离(采用矩形阵列时,单数据快拍下,通常要求声源最小分离不小于 $1/\sqrt{AB}$ ,  $A$ 和 $B$ 分别为矩形阵列的行数和列数)和噪声干扰不过强(单数据快拍下,通常要求信噪比优于15 dB);声源不完全相干时,增多数据快拍降低对声源分离和噪声干扰强度的要求,声源完全相干时,增多数据快拍仅降低对噪声干扰强度的要求。典型因素影响的揭示对无网格压缩波束形成方法的恰当运用及声源识别结果的正确分析具有重要指导意义。



**摘要:** 水力机械过流部件与环境流体相互作用产生的附加质量和阻尼效应, 对其动力响应特性有显著影响。本研究重点测量了空气和水中振动水翼前四阶振型的阻尼特性参数。通过在水翼前缘嵌入一个压电片施加激励, 采用激光测振仪和水翼尾缘的压电片同时获取振动响应信号并相互校准, 构建了叶片式结构模态参数测试系统。将压电片信号作为基准信号, 同步激光测振仪的多点响应信号, 提出了一种单振型测量方法。重点分析了对数衰减法、希尔伯特变换法、共振放大法、半功率带宽法和圆圈拟合法五种常用的阻尼比识别方法。结果表明: 五种阻尼比识别方法的精度和不确定度在同一量级, 综合比较后认为, 对于自由振动响应信号推荐采用对数衰减法, 强迫振动响应信号则推荐采用半功率带宽法; 空气和水中在同一振型条件下, 水翼不同位置点的阻尼比基本保持不变, 最大偏差为 5.8%; 相比空气环境, 水中水翼各阶固有频率下降率在 6.49%~26.73%之间, 各阶模态对应的振型未见明显差异; 水中振动水翼阻尼比变化趋势依赖于具体振型, 其中, 1 阶弯曲、1 阶扭转和 1 阶弯扭振型对应的阻尼比分别增大 13.09%、8.61%和 14.34%, 但 2 阶弯曲振型对应的阻尼比则减小 16.25%。

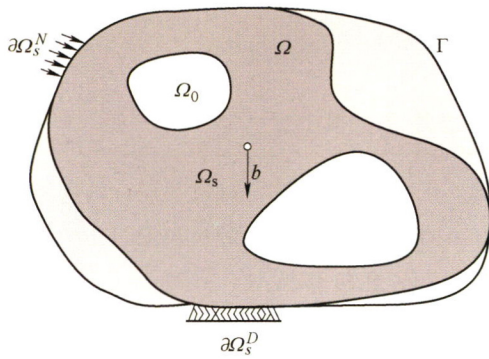
119 超高温高压曲井钻柱纵-横-扭耦合振动模型及黏滑振动特性研究



**摘要:** 针对超高温高压曲井钻柱系统振动失效问题, 采用能量法结合哈密顿原理, 建立了全井段钻柱系统纵-横-扭耦合非线性振动模型, 考虑了井眼轨迹变化、井筒约束作用、钻头与岩石的相互作用力以及井筒超高温高压对管柱弹性模量和钻井液黏度的影响。借助有限元理论实现了非线性振动模型的数值求解。采用现场实测数据, 与所建立模型理论计算结果对比, 验证了钻柱纵-横-扭耦合非线性模型的正确性和有效性。基于此, 借助中国南海乐东超高温高压区块 M 定向井参数, 探究了转盘转速、钻压、扭冲提速工具以及底部钻具组合(Bottom hole assembly, BHA)长度对钻柱系统黏滑振动特性的影响规律, 发现: 在满足其他要求(如经济成本、工具强度、磨损问题、工具通过能力等)的情况下, 应尽可能提高转盘转速和 BHA 长度, 有效提高钻井效率。现场钻压和扭冲工具的扭矩值存在一个设置最优值, 与井身结构、工具尺寸等因素有关, 可采用所提出的分析方法确定不同工况下的最优钻压和冲击扭矩, 有效提高现场钻井效率和 BHA 工具的安全性。

## 136 基于贴体网格的高分辨率三维结构拓扑优化研究

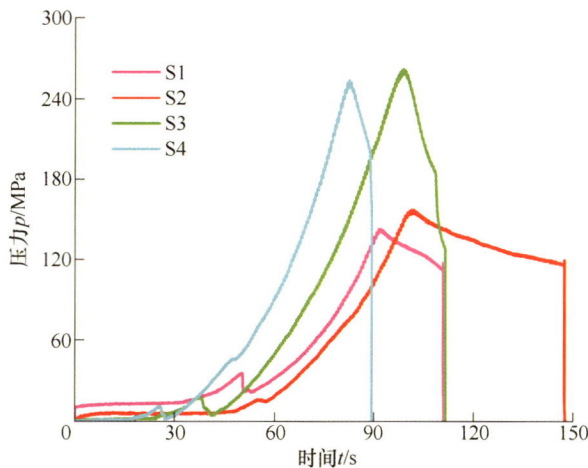
张横 李昊 丁晓红 胡天男 潘晟 朱本亮 倪维宇 徐世鹏



**摘要:** 针对高分辨率三维结构拓扑优化中计算成本高的问题, 提出一种基于水平集方法融合自适应贴体网格的拓扑优化并行计算新框架。通过水平集函数零等值面, 清晰描述优化结果边界, 实现了“所见即所得”的拓扑优化设计结果; 并在每一迭代步中基于该等值面进行网格重构, 加密边界周围网格, 稀疏其余区域内网格, 从而大幅减少了网格数量, 有效降低计算成本; 在计算过程中通过对网格进行分割, 并指派给不同的 CPU 进行计算, 实现并行计算, 可以有效处理大规模计算问题。该框架基于开源软件 FreeFEM, Mmg 和 PETSc 进行开发, 以经典的刚度问题为例, 在 workstation 平台上, 求解网格规模达 380 万的数值算例, 验证该方法的高效性。

## 144 椭圆截面环形耐压壳屈曲特性研究

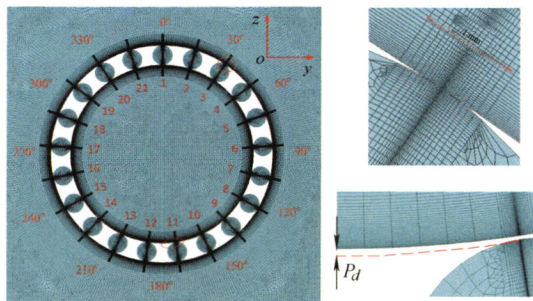
王欣 张建 狄陈阳 王芳



**摘要:** 环形耐压壳具有较好的抗压能力和水动力特性, 是深海空间站的一种优选结构。既有研究主要对圆截面环形耐压壳以及加肋圆截面环壳进行了屈曲分析, 对椭圆截面环壳的研究缺乏试验支撑。为进一步探究椭圆截面环形耐压壳的屈曲特性。通过基于弧长法的非线性数值计算, 分析椭圆截面长、短轴比值对环形耐压壳屈曲载荷的影响规律, 优选出一组椭圆参数。采用快速成型技术制作两个树脂材料椭圆截面环形耐压壳, 以及两个等体积、等质量的树脂材料圆截面环形耐压壳, 进行几何测量、静水外压和数值计算。结果表明, 长、短轴比值为 1.27 的椭圆截面环形耐压壳具有良好的抗压性能, 其屈曲载荷是等效圆截面环形耐压壳的 1.718 倍, 该研究可为深海空间站载人舱的创新设计提供参考。

## 151 考虑热效应的圆柱滚子轴承内外圈位移及滚道应力特性分析

郝旭 李宁 于长鑫 翟敬宇

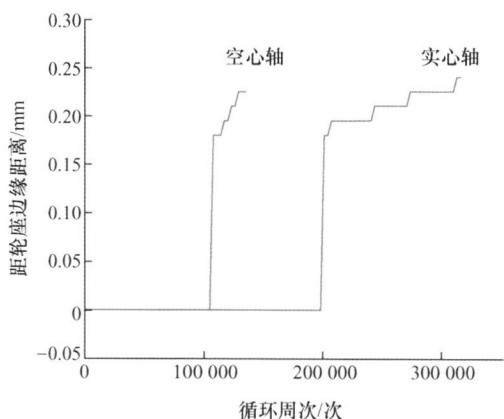


**摘要:** 针对圆柱滚子轴承热特性如何影响轴承内外圈变形等轴承接触力学特性机理不明的问题, 开展了考虑温度、转速、润滑等参数影响圆柱滚子轴承内外圈位移及滚道应力特性的动态分析。建立了轴承系统热-力耦合有限元模型, 通过测试轴承变形量以及网格尺寸合理性分析验证了有限元模型的有效性。分析了不同转速、润滑油温度与流速下轴承内外圈位移及滚道应力特性。结果表明, 轴承套圈位移随转速的增加逐渐增加; 润滑油温度对滚道应力的影响取决于轴承游隙的大小, 低温润滑下轴承滚道应力较大; 轴承从启动状态到热平衡状态过程中内外圈位移变化明显, 不同套圈角位置处位移变化幅度不同, 整体上外圈位移大于内圈位移。



### 161 空心轴与实心轴过盈配合结构微动磨损与疲劳的仿真分析

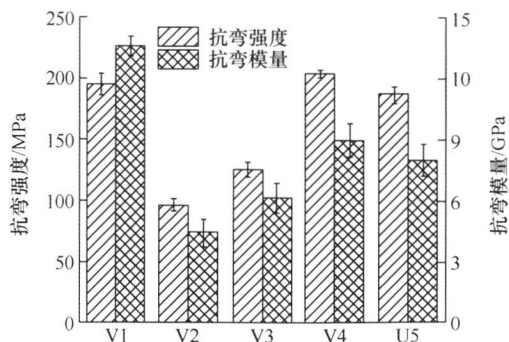
董懿辉 鲁连涛 李小萱 赵海 陈翰 曾东方



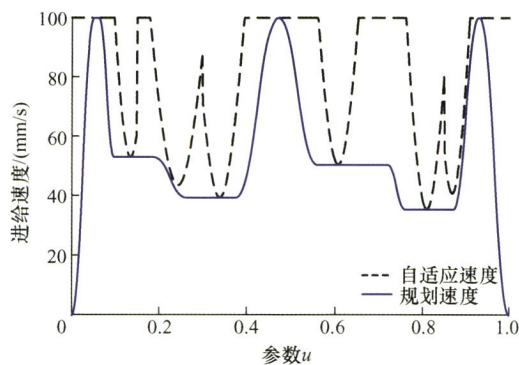
**摘要:** 为了分析空心轴与实心轴过盈配合结构微动磨损与疲劳行为的差异,建立了两种过盈配合结构的微动磨损-微动疲劳联合仿真模型。该联合仿真模型基于 Archard 磨损方程和有限元软件 ABAQUS 的自适应网格技术实现了循环微动磨损的仿真,基于线性累积损伤理论和修正的 SWT 临界平面法实现了微动疲劳寿命预测。分析结果表明:空心轴的微动磨损比实心轴严重,微动磨损显著降低了过盈配合边缘附近的应力集中,同时在配合内部引起了新的应力集中,并导致微动裂纹萌生位置出现在配合内部。受到微动磨损的影响,空心轴的微动疲劳寿命仅约为实心轴的 40%,但两种结构的微动裂纹萌生位置几乎一致。

### 170 连续纤维增强复合材料变刚度结构 3D 打印与性能研究

侯章浩 田小永 朱伟军 兰红波 李涤尘



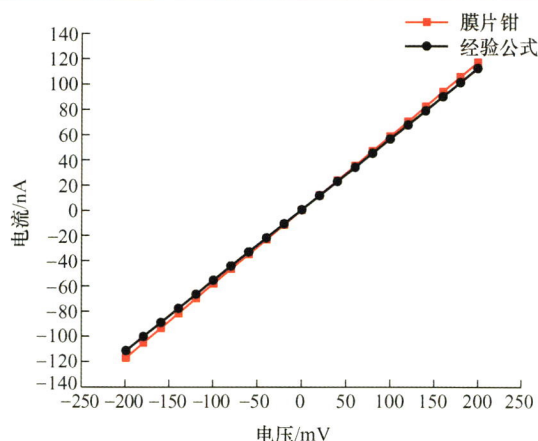
**摘要:** 连续纤维增强复合材料变刚度结构可以通过调控纤维含量和方向分布以最大化利用纤维的性能优势。然而现有制造工艺难以实现纤维含量的精确调控,基于连续纤维增强复合材料 3D 打印工艺,建立了工艺参数与纤维含量的映射关系,通过动态调控打印过程中纤维与树脂的进给比例,实现了连续纤维增强复合材料变刚度结构的一体化无模快速制造。系统研究了纤维含量变刚度分布对制件弯曲与冲击性能的影响,在相同平均纤维含量下,3D 打印变刚度结构的抗弯模量与冲击强度分别比均质结构提高了 70%和 65%。通过建立 3D 打印连续纤维增强复合材料变刚度结构的本构及有限元分析模型对其失效行为进行了分析,结果表明将较高纤维含量设置在制件的背侧,可以增加制件对纤维拉伸破坏的抵抗能力,大大提高制件的承载能力和纤维的使用效率。研究为航天航空、轨道交通等领域复合材料的设计制造提供了新的思路。



**摘要:** 为提高 NURBS 插补速度的平滑性以及针对传统插补参数计算方法精度低的问题,研究了曲率约束下的平滑进给速度规划和基于参数增量补偿的插补点参数计算方法。基于曲率约束获得自适应进给速度,依据自适应速度对曲线进行分段。改进了传统的 S 形加减速规划方法,对满足合并条件的相邻区间进行综合规划,并且对速度超限的问题做出调整。基于二阶 Runge-Kutta 法求取下一插补点参数的初始增量值,采用后向差分法简化计算。利用圆弧近似求取参数增量的补偿值,最终获得下一插补点的参数。通过仿真测试了所提方法的性能,速度曲线平滑且各指标满足约束条件,进给速度波动也更小。测试试验对比了所提方法与传统方法,研究结果证明了该算法的有效性。

## 190 石墨烯纳米孔传感器制造与单分子过孔形态检测

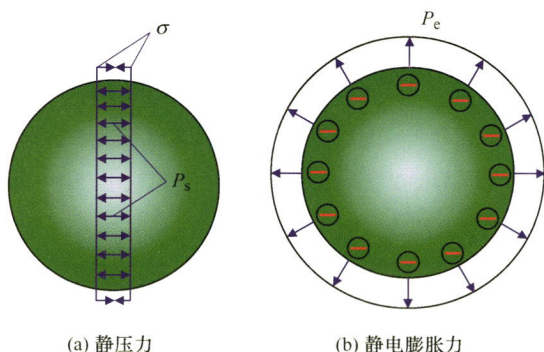
袁志山 戴敏 郑李娟 王成勇



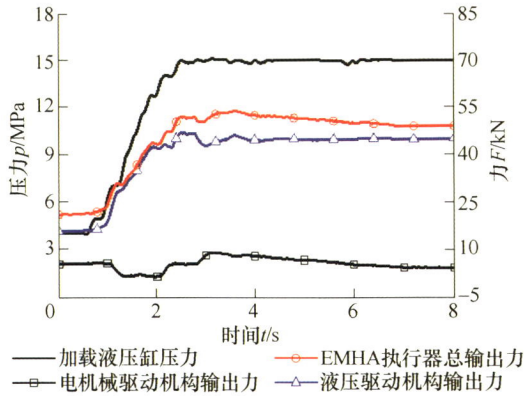
**摘要:** 石墨烯是已知最薄的二维材料,其厚度仅为 0.335 nm。与传统固态纳米孔相比,石墨烯纳米孔传感器具有极高的检测分辨率。通过 MEMS 工艺与二维材料湿法转移工艺组合制造出石墨烯薄膜芯片。其中,使用 Raman 和氦离子显微镜成像判别转移后石墨烯质量。随后,采用氦离子束刻蚀技术在单层石墨烯薄膜上制造出直径为 20 nm 的石墨烯纳米孔。测量出石墨烯纳米孔传感器电流-电压关系,与经典纳米孔电导理论符合。本论文研究表明单层石墨烯纳米孔传感器检测可检测出牛血清蛋白(Bovine serum albumin, BSA)水平,垂直和旋转三种过孔形态,阻塞电流值分别为 1200 pA, 150 A, 650 pA。同时也辨识出多分子同时过孔信号,BSA 分子排列成三角形状穿过石墨烯纳米孔。

## 198 钛合金生物润滑剂电牵引磨削性能及表面形貌评价

贾东洲 李长河 张彦彬 杨敏 曹华军 刘波 周宗明

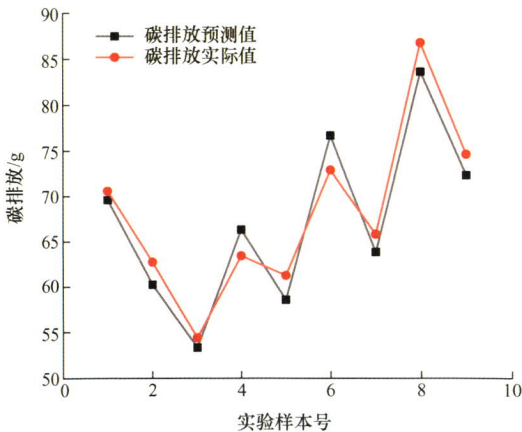


**摘要:** 微量润滑(Minimum quantity lubrication, MQL)雾化液滴易发生飞移飘散,不仅对环境和工人健康产生威胁,同时降低了润滑剂的有效利用率,是目前 MQL 磨削的瓶颈问题。创新提出了气流场与静电场耦合作用下,雾化液滴平均粒径及粒径分布精准可控的静电雾化微量润滑(Electrostatic MQL, EMQL)磨削新工艺。为了探究电压对于液滴迁移活性的影响规律,对比分析了 MQL 与不同电压 EMQL 工况下润滑剂雾化及荷电特性,结果表明相较于 MQL 工艺,电压为 40 kV 时雾化液滴体积平均粒径减小了 29.56%、粒径分布跨度 R.S 值降低了 47.85%,40 kV 时液滴荷质比为 0.302 mC/kg。为了揭示 EMQL 钛合金 Ti-6Al-4V 磨削润滑机理,进行了干磨削、浇注式、MQL 和 EMQL 四种润滑工况磨削试验,结果表明:相比于干磨削、浇注式及 MQL 工况,EMQL 工况下获得了最小切向磨削力和法向磨削力分别为 28.53 N 和 77.18 N,摩擦因数分别降低了 29.39%、9.31%和 13.95%,比磨削能分别下降了 51.34%、18.40%和 30.11%。利用激光共聚焦显微镜观察工件表面形貌,结果显示:EMQL 工况下,工件表面始终未出现粘附重铸层,在电压为 35 kV 时获得最优工件表面,其面粗糙度  $S_a$  为 0.84  $\mu\text{m}$ ,且粘附点数量和尺寸均得到明显减小。



**摘要:** 针对阀控液压缸节流损失大, 电机械执行器带载能力弱的问题, 通过液压缸活塞与电机械执行器螺母刚性连接的方式, 将两类执行器集成为新型的机电液混合驱动直线执行器, 主要由电机械驱动机构和液压驱动机构组成。电机械驱动机构用于执行器运动控制, 液压驱动机构具有功率放大功能, 用于提高执行器带载能力。研究中, 活塞杆设计为中空结构用于长行程丝杠的安装, 活塞上增设通油孔用于油液快速流通。通过密封设计, 将活塞两侧设计为可充高压油液的容腔, 采用 ANSYS Workbench 有限元软件对新型执行器零部件进行强度校核。最后, 制造执行器试验样机并构建性能测试平台, 测试结果表明, 设计的机电液混合驱动直线执行器密封效果良好, 运动过程中启制动平稳, 具有良好的速度与位置控制特性; 执行器液压驱动机构增力效果显著, 且节流损失较小。所提机电液混合驱动直线执行器融合了液压驱动和电机械驱动的优点, 为实现高效高功率密度直线驱动提供了一种新的思路。

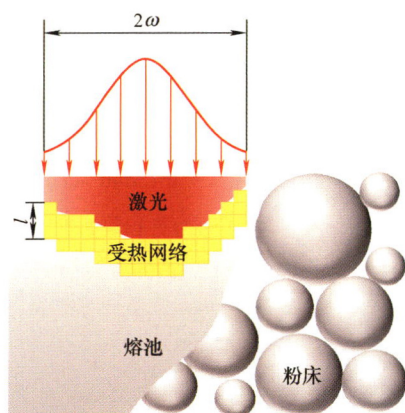
223 激光增材制造过程低碳建模与工艺参数优化



**摘要:** 激光增材制造是基于高能激光束快速熔覆金属粉末成形的工艺, 其工艺过程时间长、能耗大会导致产生大量碳排放, 基于此, 系统分析激光增材制造过程的碳排放特性, 建立激光增材制造过程碳排放模型; 在此基础上, 以碳排放、粉末利用率及熔覆质量为优化目标, 建立激光增材制造过程工艺参数多目标优化模型, 提出一种结合改进非支配排序与人工鱼步长人工鱼群求解算法, 解决模型求解后期寻找参数解集盲目性大、目标函数解集均匀性差问题, 通过熵权-灰色关联分析综合 Pareto 最优解集法获取最优工艺参数组合。最后, 以 LDM4030 激光增材制造装备为试验平台进行激光熔覆试验, 试验结果表明: 该模型及算法可有效降低激光增材制造过程碳排放, 提高粉末利用率, 保证熔覆质量, 为我国激光增材制造装备产业实现碳达峰、碳中和提供一条有效途径。

239 选择性激光熔化工艺的介-微观建模与仿真方法综述

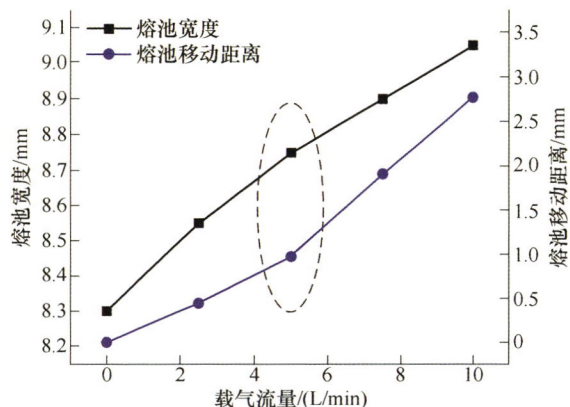
敖晓辉 刘检华 夏焕雄 何奇阳 任 策



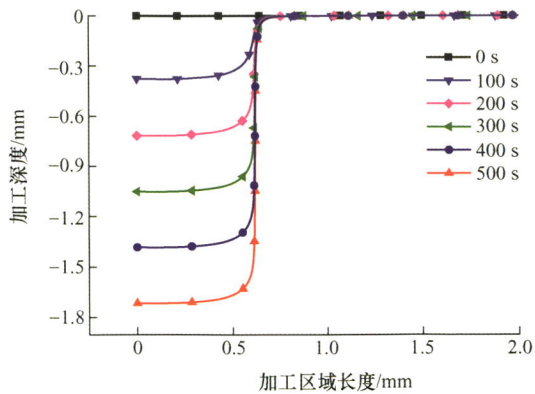
**摘要:** 选择性激光熔化(Selective laser melting, SLM)工艺是一个复杂的物理化学冶金过程,既涉及宏观零件尺度、介观熔池尺度和微观金相尺度等多尺度问题,又包含相变、流动、传热、传质等多物理场耦合作用。由于采用实验手段在线观测工艺过程十分困难,并且周期长、成本高,因此高保真的数值模拟方法已成为探究 SLM 工艺机理、预测工艺成形质量的重要手段。从介观粉末熔池演变和微观凝固组织形成两个方面,详细论述了 SLM 工艺数值模拟的物理模型与仿真方法的内涵,分析了各个物理模型和仿真方法的特点、优势及其适用范围,并综述了 SLM 工艺过程介观熔池物理行为和微观组织形貌的数值仿真研究现状。最后,总结了 SLM 介微观数值模拟方法目前所面临的挑战和发展趋势。

258 铝合金熔滴复合电弧沉积同步 WC 颗粒强化增材制造工艺研究

贺鹏飞 魏正英 杜 军 蒋敏博 马 琛



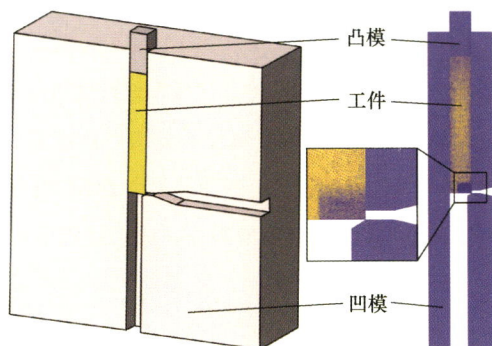
**摘要:** 针对铝基复合材料高效率、低成本增材制造,提出了铝合金熔滴复合电弧沉积同步颗粒强化增材制造新方法。实验研究中,以倾斜变极性电弧为热源,2024 铝合金为基体材料,球形 WC 颗粒为增强相。成形过程中,由熔滴发生系统产生的铝合金熔滴,竖直落入倾斜电弧产生的熔池,与此同时 WC 颗粒以气载粉的方式送入熔池后沿,并随着电弧和基板的相对运动分散在铝合金基体中。单道多层沉积实验结果表明,送粉位姿、载气流量和 WC 颗粒直径均对 WC<sub>p</sub>/Al 沉积过程影响显著。保持送粉方向平行于钨针轴线,且粉末流汇聚于熔池后沿时,有利于在沉积过程中保持电弧形态的稳定并获得较高的颗粒植入比例。金相分析显示,WC<sub>p</sub>/Al 沉积层内 WC 颗粒分布总体均匀,且颗粒与基体结合可靠;WC 颗粒的存在会抑制柱状晶的生长,并且当 WC 颗粒直径小于 40 μm 时,具有显著的晶粒细化效果。



**摘要:** 航空发动机中的微小孔电解加工的入口杂散腐蚀影响着零部件的疲劳强度, 针对电解加工微小孔时入口形貌不理想的难题, 利用抽吸电极电解加工方法, 有效降低了高温合金上微小孔入口的杂散腐蚀。通过多物理场耦合模型分析了电解加工过程中的电场、流场分布情况和轮廓成型过程, 与相同参数下管电极电解加工对比, 同时研究加工过程中的供给流量与抽吸压力的大小对入口形貌的影响, 并优化了仿真参数, 进而指导加工工艺。仿真与试验结果表明: 采用合适的抽吸电极结构和加工工艺参数, 电解加工的入口杂散腐蚀区域可明显减小甚至消失, 可以有效提高加工定域性; 在其他参数不变的情况下, 采用 1.5 mL/min 的供给流量、27 mL/min 的回收流量时, 加工过程稳定无短路, 获得的入口形貌无杂散腐蚀。研究结果对进一步了解抽吸电极电解加工的原理以及提高高温合金小孔加工质量均具有重要意义。

## 278 挤出切削制备梯度结构铝带材的新工艺及机理

邓文君 曾俞宁 周子涵



**摘要:** 挤出切削是一种新型剧烈塑性变形工艺, 通过设计特定的材料塑性流动通道, 使得材料在切削和挤出的共同作用下, 实现一步法制备具有梯度结构的超细晶金属板材或带材, 具有工艺简单、所需装备成熟、制造效率高等优点。目前关于挤出切削成形工艺、机理以及制备的梯度超细晶结构材料性能方面研究非常匮乏。通过理论分析、试验以及数值分析相结合的方法, 对不同挤出厚度下梯度结构铝带材 1060 的成形过程进行探究, 分析挤出切削加工机理以及工艺参数对制备梯度结构铝带材 1060 的影响规律。研究表明, 随着挤出厚度的增加, 高应变区范围无明显变化, 但低应变区增大, 更多的材料从侧向挤出。挤出切削制备的梯度结构铝带材晶粒细化显著, 硬度提升明显, 晶粒尺寸与硬度在厚度层上均呈明显的梯度分布规律。制备的梯度结构铝带材的拉伸强度随着挤出厚度的增加呈下降趋势, 而延伸率有所上升。相比原始样品, 梯度结构铝带材的拉伸强度几乎提升了一倍, 而延伸率仅略微下降。研究表明, 挤出切削是一种可行且高效的梯度结构材料制备工艺, 可通过调控工艺参数制备不同梯度分布的材料。

## **CONTENTS**

- 1 Attitude Estimation of Wall Climbing Robot on Cylinder-shaped Steel**  
ZHANG Wen DING Yulin CHEN Yonghua SUN Zhenguo
- 8 Modeling and Verification of Robot Foot-terrain Dynamics in Soft Geology**  
LIU Yiqun LU Peidong ZHANG Zhipeng WANG Jianfeng ZHANG Jingming DING Liang  
GAO Haibo
- 18 Static Analysis of Deployable Cable-truss Structures Based on Linear Complementarity Theory**  
XIAO Hang LÜ Shengnan LI Long LUO Sida DUAN Haibin DING Xilun
- 26 Automatic Planning Method of Reduction Trajectory for Parallel Fracture Surgery Robot**  
LI Jinlong LIU Chuanba SUN Tao ZHANG Tao LIAN Binbin SONG Yimin
- 34 Casting Defect Detection Method Based on Multi Model Cascade and Binocular Vision**  
ZHANG Shijun JIN Zhenlin
- 44 Design and Motion Analysis of a Spherical Robot Having the Ability to Change the Centroid Radially**  
MA Long SUN Hanxu LI Minggang SUN Ping ZHANG Weizhen LONG Bingzheng  
SHI Huiwen
- 57 Design and Inverse Kinematics Analysis of Wrist Parallel Rehabilitation Mechanism: A Rope Driven-based Method**  
ZHANG Bangcheng LIU Shuai YU Junzhi PANG Zaixiang ZHANG Xiyu
- 69 Design of Hand-eye Coordination System for Home Service Robot**  
TIAN Weihai LUO Yazhe LI Yifei CHEN Diansheng
- 78 Multi-objective Optimization of Hydroforming Process of Rocket Tank Bottom**  
ZHANG Zaifang XU Feng SUN Xiwu
- 87 Dynamic Load of the Inter-Shaft Bearing and Its Influence on Bearing's Temperature**  
GAO Peng HOU Lei CHEN Yushu

- 98 Influence of Typical Factors on Acoustic Source Identification of Grid-free Compressive Beamforming**  
YANG Yang CHU Zhigang YANG Yongxin
- 108 Experimental Investigation on Damping Characteristics of a Vibrating Hydrofoil in Low-Order Modes**  
ZENG Yongshun QI Xin YAO Zhifeng WANG Jingzhu WANG Yiwei WANG Fujun
- 119 Study on Axial-lateral-torsion Coupling Vibration Model and Stick-slip Characteristics of Drilling String in Ultra-HPHT Curved Wells**  
GUO Xiaoqiang LIU Jun WANG Jianxun LI Xiao WEI Anchao ZHU Haiyan
- 136 Numerical Study on the Body-fitted Topology Optimization for Three-dimensional High Resolution Structure Design**  
ZHANG Heng LI Hao DING Xiaohong HU Tiannan PAN Sheng ZHU Benliang NI Weiyu XU Shipeng
- 144 Research on Buckling Properties of Toroidal Pressure Hull with Elliptical Cross-section**  
WANG Xin ZHANG Jian DI Chenyang WANG Fang
- 151 Distribution Characteristics of Stress and Displacement of Rings of Cylindrical Roller Bearing Considering Thermal Effect**  
HAO Xu LI Ning YU Changxin ZHAI Jingyu
- 161 Simulation Analysis of Fretting Wear and Fatigue of Press-fitted Structure of Hollow Axle and Solid Axle**  
DONG Yihui LU Liantao LI Xiaoxuan ZHAO Hai CHEN Han ZENG Dongfang
- 170 3D Printing and Performance of Continuous Fiber Reinforced Variable Stiffness Composite Structures**  
HOU Zhanghao TIAN Xiaoyong ZHU Weijun LAN Hongbo LI Dichen
- 178 NURBS Interpolator with Adaptive Smoothing Feedrate and Parameter Increment Compensation**  
XU Bo DING Yi JI Wei
- 190 Graphene Nanopore Sensor Fabrication and Single Molecule Translocation Form Detection**  
YUAN Zhishan DAI Min ZHENG Lijuan WANG Chengyong
- 198 Grinding Performance and Surface Morphology Evaluation of Titanium Alloy Using Electric Traction Bio Micro Lubricant**  
JIA Dongzhou LI Changhe ZHANG Yanbin YANG Min CAO Huajun LIU Bo ZHOU Zongming

- 212 Configuration Design and Performance Test of Electromechanical Hydraulic Hybrid Driving Linear Actuator**  
QIAO Shufei HAO Yunxiao QUAN Long GE Lei XIA Lianpeng
- 223 Low-carbon Modeling and Process Parameter Optimization in Laser Additive Manufacturing Process**  
JIANG Xingyu LIU Ao YANG Guozhe LIU Weijun BIAN Hongyou SUO Yingqi
- 239 A Review of Meso-micro Modeling and Simulation Methods of Selective Laser Melting Process**  
AO Xiaohui LIU Jianhua XIA Huanxiong HE Qiyang REN Ce
- 258 Investigation of Droplet + Arc Deposition Additive Manufacturing with WC<sub>p</sub> Simultaneous Reinforcement for Aluminum Alloy**  
HE Pengfei WEI Zhengying DU Jun JIANG Minbo MA Chen
- 268 Research on Electrochemical Machining Technology of Small-hole Using Suction Electrode**  
YAN Ying SUN Guorong DONG Jintong ZHOU Ping
- 278 New Process and Mechanism for Preparing Gradient Structural Aluminum Strip by Extrusion-machining**  
DENG Wenjun ZENG Yuning ZHOU Zihan



# 《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) 潘际奎 (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)



ISSN 0577-6686



9 770577 668224