



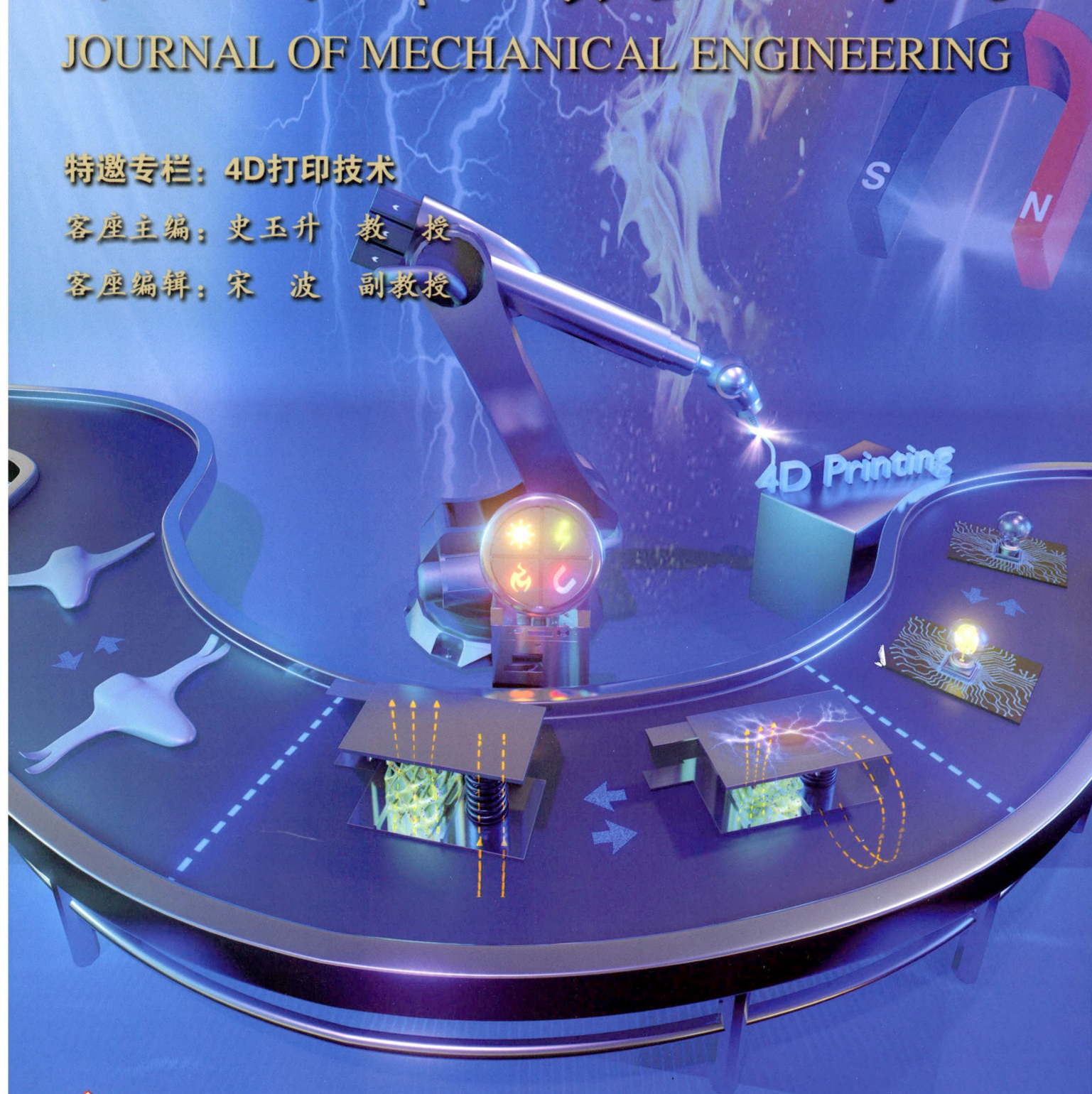
机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：4D打印技术

客座主编：史玉升 教授

客座编辑：宋波 副教授



中国机械工程学会 主办

万方数据

2020年56卷15期 半月刊

特邀专栏：4D 打印技术

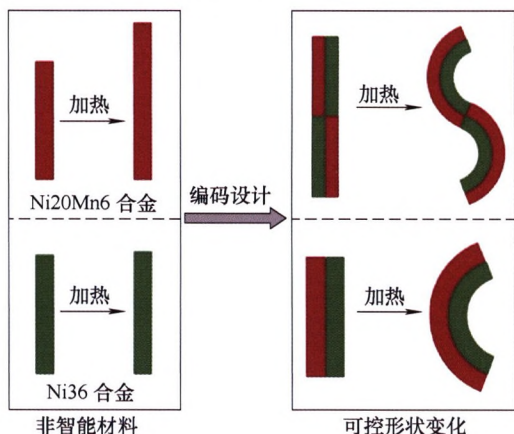
客座主编：史玉升 教授（华中科技大学）

客座编辑：宋 波 副教授（华中科技大学）

策划编辑：岑 伟（《机械工程学报》编辑部）

1 4D 打印——智能构件的增材制造技术

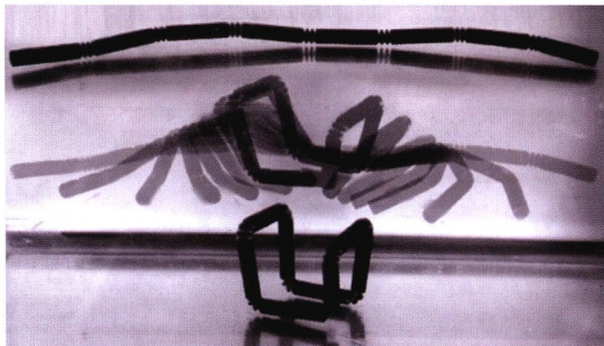
史玉升 伍宏志 闫春泽 杨 潇 陈道兵 张 策 苏 彬 宋 波
李中伟 庞盛永 文世峰 梁 波 赵清亮 贺健康 张述泉 温银堂



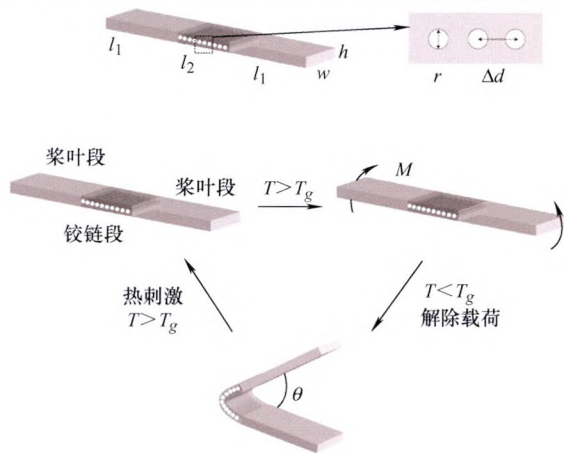
摘要：4D 打印技术自 2013 年提出以来就引起了学术和工业界的广泛关注，它属于智能构件的增材制造技术，是在材料、机械、力学、信息等学科高度交叉融合基础上产生的颠覆性制造技术。讨论了 4D 打印的概念与内涵；介绍了 4D 打印在航空航天、汽车、生物医疗和软体机器人等领域的应用前景；阐述了 4D 打印在智能构件设计、模拟仿真、数据处理与工艺规划、材料、成形工艺与装备和智能构件的功能评测等方面的发展现状以及目前存在的一些问题；提出了关于 4D 打印的研究思考，最后指出了 4D 打印的未来发展方向和研究重点。

26 支持 4D 打印的可控变形结构设计研究进展

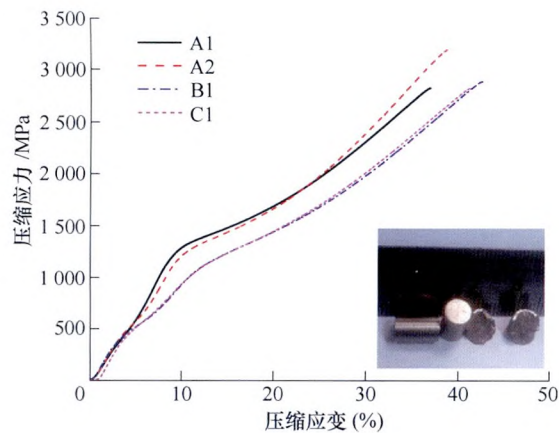
高一聪 曾思远 冯毅雄 郑 浩 邱 浩 谭建荣



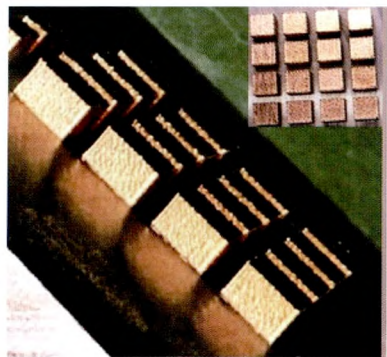
摘要：4D 打印是结合了 3D 打印技术和智能材料的一种智能结构增材制造技术。通过几何结构设计、智能材料分布设计，4D 打印可以制备具有可调节形状、特性或功能的可控变形结构。可控变形结构通过外界的刺激，按设计好的特定方式发生形状、性能和功能的变化，从而使其满足不同领域的应用需求。对可控变形结构的二维结构设计方法和三维变形设计方法的技术研究进展进行综述，总结了支持 4D 打印的可控变形结构设计的突出成果以及创新性技术。结合 4D 打印的概念和支持 4D 打印的可控变形结构设计的研究现状，对其在机械、生物医学等领域的应用进行了展望。



摘要：传统水陆两栖机器人的推进结构通常是将陆上推进结构与水上推进结构进行叠加，导致了现有水陆两栖机器人的机械结构较为复杂，增大了控制的难度。基于 4D 打印技术设计并制备了一种由轮毂和具有热变形响应性质桨叶结构单元组成的轮桨复合推进结构。该结构可通过热刺激变形响应实现水陆运动功能转换，有效地降低了水陆两栖机器人推进结构的复杂度。此外，还分析了几何参数和输入功率对桨叶结构变形响应速率的影响，实现了桨叶结构的可控变形，从而降低了水陆两栖机器人运动控制的难度。原型机试验结果表明，利用 4D 打印技术制备的水陆两栖机器人在降低了结构复杂度与控制难度的同时，可以实现水陆运动功能转换及控制。



摘要：单位体积能量输入随试验变量激光功率和扫描速率的变化而变化，探究了选区激光熔化工艺参数的改变对沉积态块状 Ni_{50.8}Ti_{49.2} 样品组织及性能的影响。考虑到不同能量输入对样品组织的影响，分别对样品扫描方向和沉积方向进行了组织观察，发现随能量输入的升高，金相组织的缺陷逐渐降低，沿沉积方向显微组织由短粗的柱状晶演变为细长的柱状晶。利用 XRD 考察其室温相组成，结果表明样品常温下为 B2 母相，部分样品含少量 Ti₃Ni₄ 相。同时显微硬度测试表明，除激光功率外，第二相的引入能显著提高显微硬度值。利用差示扫描量热仪考察不同样品的相变温度。采用万能力学试验机对圆柱样品进行压缩测试，结果表明，样品的断裂应变最高达 42%，高能量输入样品断裂应变略低。而室温超弹性能随能量输入的提高而显著提高，压缩应变 10% 时，超弹回复率高达 90.2%。

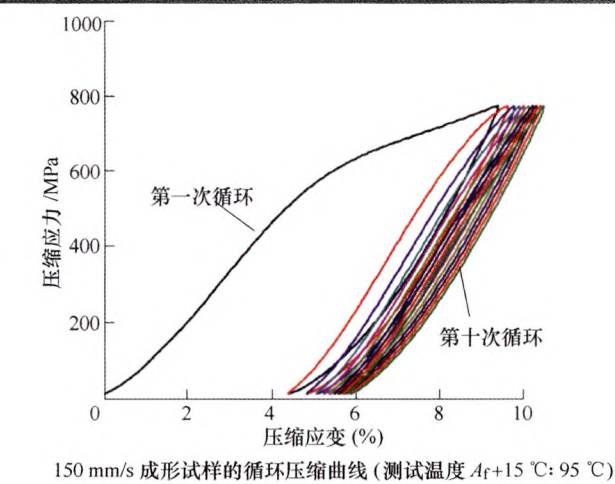


块体试样

摘要：采用激光选区熔化技术(Selective laser melting, SLM)成形制备了不同工艺参数下 Cu-Al-Ni-Ti 铜基形状记忆合金试样。用排水法测试了块体试样的相对密度，对试样进行了显微组织分析和热分析，测试了拉伸试样在不同温度下的力学性能和测试试样的形状记忆性能，研究了激光能量密度对相对密度、显微组织和常温力学性能的影响规律。结果表明：块体试样的相对密度随激光能量密度的增大先增大再减小，试样的相对密度最大值达 99.9%；当激光能量密度适中时(107 J/mm³)，熔化道连续且无明显缺陷，激光能量密度过低或者过高，试样会产生熔化道不连续或者球化等缺陷；拉伸试样的常温拉伸性能随激光能量密度的增大先增大再减小，常温下试样最大抗拉强度和延伸率分别为 541 MPa 和 7.63%。在 300 ℃ 下试样的抗拉强度提升至最大为 611 MPa，延伸率提升至 10.78%。试样的马氏体相变开始温度 Ms 约为 83 ℃，结束温度 Mf 约为 40 ℃，形变回复率接近 90%。

65 激光扫描速度对 4D 打印钛镍形状记忆合金相转变和超弹性的影响

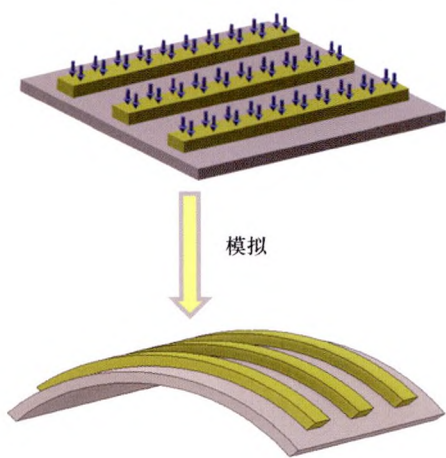
卢海洲 马宏伟 罗 炫 杨 超 李元元



摘要：通过调控激光扫描速度，运用 4D 打印技术制备出具有不同相转变温度和微观结构的钛镍形状记忆合金。结合 XRD、DSC、SEM 和循环压缩等分析方法研究了不同扫描速度对 4D 打印钛镍合金相组成、相转变、微观结构和超弹性的影响。结果表明，当激光扫描速度从 80 mm/s 到 150 mm/s 时，4D 打印钛镍合金中马氏体相(B19')含量减少，奥氏体相(B2)含量增加；马氏体转变开始温度(M_s)和奥氏体转变结束温度(A_f)随激光扫描速度增加而降低。奥氏体状态下循环压缩试验结果表明：激光扫描速度为 80 mm/s 时，4D 打印钛镍合金具有良好的超弹性，10 次循环压缩后稳定的可回复应变达到 4.99%，高于目前文献报道的回复应变 2.64%；激光扫描速度为 150 mm/s 时，在 3 次循环压缩后回复应变几乎保持在 4.55%不变。

72 面向 4D 打印双层结构自弯曲的变形激励源布局设计

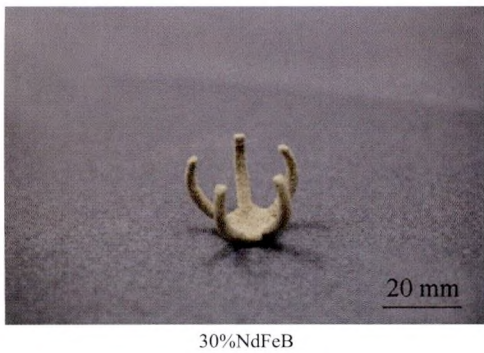
王 闯 刘振宇 段桂芳 谭建荣



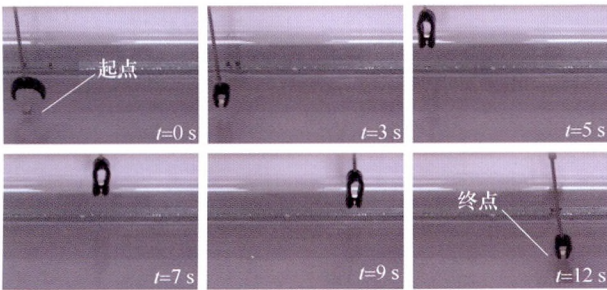
摘要：自弯曲作为 4D 打印的主要变形形式，近年来受到广大研究者的关注。目前针对 4D 打印结构自弯曲变形的研究主要以试验为主，即通过大量试验指导 4D 打印产品设计。针对这一问题，提出了面向 4D 打印双层结构自弯曲的变形激励源布局设计方法。将简单双层结构作为复杂结构变形的激励源，仅需对激励源进行试验测试，即可通过理论模拟多激励源驱动下的 4D 打印结构变形结果，实现 4D 打印结构自弯曲的模拟仿真。同时，通过激励源布局参数反求思路，可以指导 4D 打印自弯曲结构产品设计，为 4D 打印结构设计提供了新的思路。最后，通过试验测试验证了该方法的有效性，并发现相较于激励源间距，激励源数量对结构弯曲有更大影响。通过合理设计激励源数量和间距，能够实现对 4D 打印双层结构自弯曲变形的控制。

80 4D 打印热塑性聚氨酯/钕铁硼磁性复合材料成形工艺与性能研究

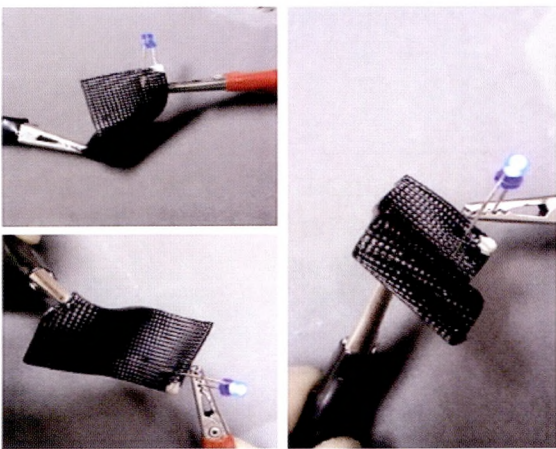
张 策 伍宏志 闫春泽



摘要：传统的 3D 打印技术逐渐无法满足高端制造领域对构件的要求，材料-结构-功能一体化增材制造即 4D 打印技术将是新的发展方向。为此，选取热塑性聚氨酯(TPU)/钕铁硼(NdFeB)磁性复合材料体系，采用激光选区烧结(Selective laser sintering, SLS)工艺成形具有不同 NdFeB 含量的复合材料成形件，研究了复合粉末的粒度及其分布、微观形貌、成形前后化学基团演变，成形件晶体结构、力学性能及变形行为，结果表明 NdFeB 含量会影响复合材料成形件的力学性能和变形行为，增加 NdFeB 含量能够增大成形件在磁场中受到的作用力；当 NdFeB 含量在复合材料中质量分数为 30 %时，复合材料成形件拥有最佳的拉伸强度。本研究将 TPU/NdFeB 复合材料体系作为一种创新的 4D 打印材料，成形的磁性智能构件在磁场中发生变形，实现了磁场驱动的 4D 打印，对 4D 打印磁性智能构件的发展具有指导意义。



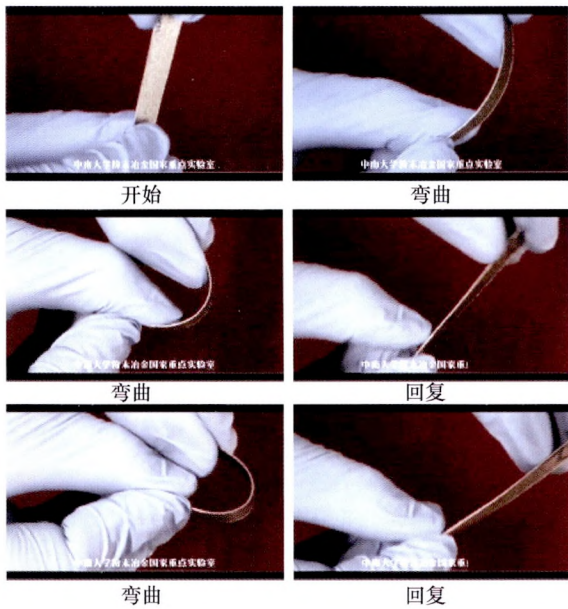
摘要：洋绣球种子芒在湿度条件下，通过弯曲与解弯曲变形特性实现自驱动播种功能。以洋绣球种子芒为生物模本，基于其变形部位的微观结构特性及自驱动变形机理，构建了溶胀度具有各向异性的仿生双层结构模型，指导仿生磁响应 4D 智能水凝胶的设计。以 N,N-二甲基丙烯酰胺为单体，合成硅酸镁锂为交联剂，纳米木浆纤维素为增强相，四氧化三铁为磁响应粒子，由物理交联方法制备聚 N,N-二甲基丙烯酰胺智能水凝胶为基本材料，通过“一步法”模具成型技术成功制备了具有溶胀、磁响应变形特性的仿生磁响应 4D 智能水凝胶，实现了力学强度与多形式智能响应的有效兼顾，为磁响应智能水凝胶瓶颈问题的解决提供了一种有效的仿生学新思路与新方法。



摘要：针对复合导电材料 CNT/PDMS 应用于柔性传感以及复杂结构设计的需求，将直写打印技术与该复合导电材料的成型制备方法结合起来，研究了 CNT/PDMS 复合材料的打印工艺和电阻传感性能。在试验研究中，首先配置了不同 CNT 含量的打印墨水，并对打印墨水的流变性及材料导电性进行测试，试验结果表明配置的打印墨水均具有粘弹性以及剪切变稀的性质，其中以 CNT 质量分数为 7% 的墨水用于直写打印时兼具导电性好易挤出且成型好的特点。通过单点成线试验，设置 3D 打印机参数为：扫描速度为 10 mm/s，挤出气压为 0.3 MPa。在此基础上，进行简单平面条状、二维网状结构以及立体网格结构的打印，对打印的条状结构进行温度和单轴拉伸试验，在不同的温度和拉伸率下打印件均表现有电阻传感特性；对网格状电路进行柔性电路性能测试，在对其施加 6 V 左右电压时，无论网格电路处于伸展还是弯曲状态均能表现出良好的导电性能；对打印的立体网格结构进行压力传感试验，结果表明复合材料有良好的压敏特性。性能表征结果证明该打印工艺可行，从而为后续该材料的复杂结构制造以及在柔性传感电子设备中的应用奠定基础。

104 NiTi 气雾化制粉工艺对选区激光熔化成型性、制件超弹性的影响

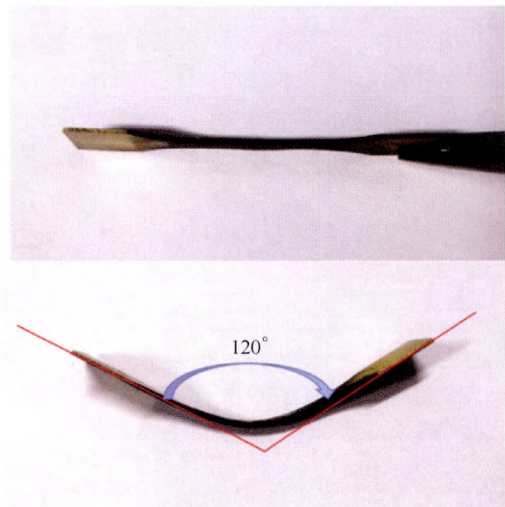
郑 聃 李瑞迪 宋 波 熊 熠 袁铁锤 史玉升



摘要：选区激光熔化成型具有外界温度感知能力的 NiTi 形状记忆合金是 4D 打印金属材料技术的基础研究，根据选区激光熔化技术对粉末性能的要求，研究 NiTi 形状记忆合金不同气雾化制粉工艺对选区激光熔化成型性及制件超弹性的影响规律具有重要意义。通过对比分析真空惰性气体雾化(VIGA)、电极感应熔炼气雾化(EIGA)制粉工艺对 NiTi 合金粉末杂质含量、流动性、球形度等性能的影响，发现 VIGA 制粉工艺由于采用坩埚熔炼，导致合金杂质元素增加、粉体性能恶化，粉末粒度分布偏向细粉侧，极易形成卫星粉，导致粉末流动性差，在打印过程中铺粉困难而难以成型，并且氧含量的增加导致打印过程中易发生球化、开裂等现象，使得 VIGA 工艺制备的 NiTi 合金粉末 SLM 成型性较差。而采用 EIGA 工艺制备的粉末粒度分布均匀、流动性好、氧含量低，满足选区激光熔化技术对 NiTi 合金粉末的特性要求。并对对比分析两种工艺制备的粉末打印样品的表面形貌，成型了具有完全回复性能的超弹 NiTi 形状记忆合金样件。

110 激光选区成形 Cu-Al-Mn-Ti 记忆合金的工艺及性能研究

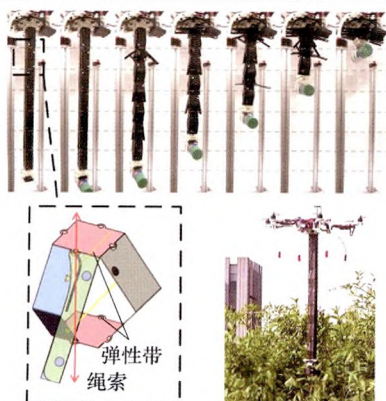
党明珠 朱文志 田 健 魏青松



摘要：采用激光选区熔化技术成形了 Cu-11.85Al-3.2Mn-0.1Ti(质量分数)合金。采用排水法对成形块体试样进行了致密度测试，优化了工艺参数，对试样进行了物相分析和微观组织分析，利用优化的工艺参数成形了拉伸试样和变形测试试样，测试在不同温度下拉伸试样的力学性能，通过 DSC 曲线分析了试样的相变温度及变形试样的记忆性能。结果表明，当激光功率为 270 W，扫描速度为 500 mm/s，层厚为 0.025 mm，扫描间距为 0.1 mm 时，试样具有接近 100%的致密度；试样的物相中主要为马氏体相和 Cu₂AlMn 相，微观组织中观察到了马氏体组织，并且多为层错结构；拉伸试样在 200℃时具有最大抗拉强度 825.6 MPa，延伸率为 20.3%且延伸率随着温度的升高而增大；试样的马氏体相变开始温度约为 260℃，结束温度约为 249℃，奥氏体转变温度高于 400℃，形变回复率在 57%以上。

118 折纸结构驱动技术的研究进展

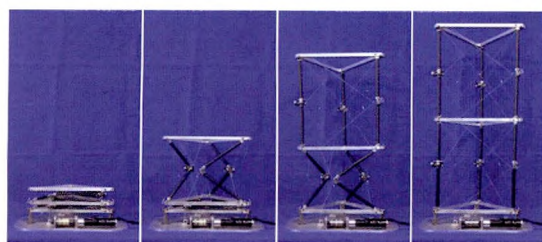
胡楠 陈花玲



摘要：折纸结构因具有强大的折展能力以及在中制造装配简单等优势，为许多复杂工程问题的解决提供了新思路，因此吸引了航天、医疗、机器人等领域的不少学者们对其开展研究。在折纸技术研究领域，折纸结构的驱动技术是其中一个关键技术。按照驱动原理的不同，将折纸驱动技术分为气动驱动、机械式驱动、活性材料驱动三大类，然后分别对其国内外研究现状进行归纳和分析，并对各种驱动方法的优缺点、适用场合等进行对比，最后重点指出了基于活性材料的折纸结构驱动技术研究面临的问题以及未来的发展趋势。

129 空间可展开三棱柱伸展臂设计与优化

高明星 刘荣强 李冰岩 郭宏伟 邓宗全

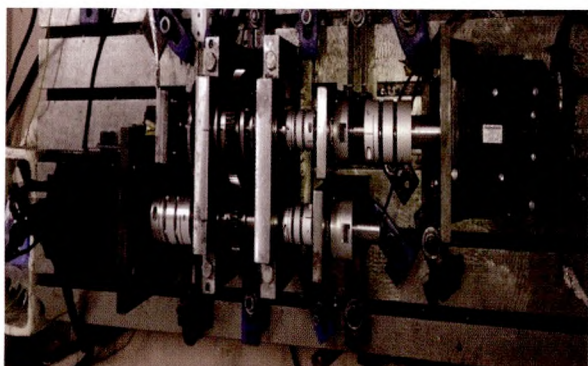


完全收拢 上单元展开 下单元展开 完全展开

摘要：空间伸展臂作为空间折展机构中形式最丰富、研究最早、应用最广泛的一维空间折展机构，其主要作用是展开柔性太阳能帆板，支撑网状天线、合成孔径雷达、太空望远镜等。以三棱柱式伸展臂为研究对象，对伸展臂的展开方式和几何参数进行设计分析。基于几何非线性有限元理论，建立含空间桁架及预应力绳索的可展开伸展臂单元模型，然后建立含多可展开单元的大型伸展臂的几何非线性动力学模型。通过 Matlab 编程计算伸展臂的基频，得到影响伸展臂基频的关键因素，并以伸展臂的基频为优化目标，质量为约束条件，采用遗传算法对伸展臂进行优化设计。研制可展开三棱柱伸展臂样机，对伸展臂进行折展功能及参数优化设计验证试验。结果表明所设计的三棱柱伸展臂可顺利折展，所做的优化设计有效可行。通过该方法可以对特定任务需要的伸展臂进行优化设计，在满足约束条件的情况下，达到基频最高，对伸展臂的设计提供参考。

138 交变负载下变齿厚齿轮副侧隙控制试验研究

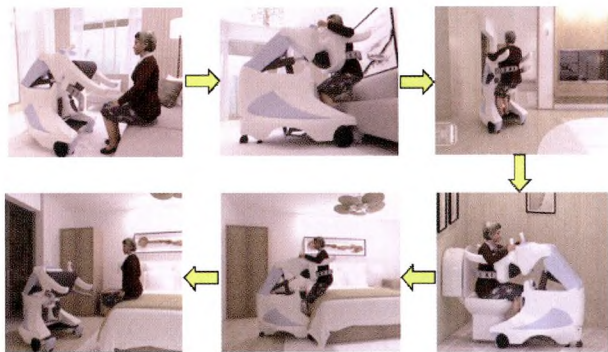
邹帅东 王光建 蒋宇将 任品旭 喻立 李小兵



摘要：提出一种基于变齿厚齿轮的齿轮侧隙控制方法：在取得变齿厚齿轮副连续侧隙曲线规律基础上，根据主动轮的角位移来实时调整变齿厚齿轮主动轮与从动轮的相对位置关系进行侧隙控制；推导了具有偏心误差齿轮副的双向无负载传动误差及侧隙计算公式及其等效关系，在此基础上根据双向传动误差试验曲线获得了齿轮副连续侧隙曲线；在未消除情况下，分析了不同负载幅值及不同负载频率的传动误差试验曲线，结果表明在交变负载下侧隙对齿轮副的动态传动误差有明显影响；在不同负载条件下，开展了基于变齿厚齿轮副的侧隙电控试验研究，对比其动态传动误差试验曲线，结果表明：电控侧隙控制后，因侧隙和脱啮导致的动态传动误差跳变或波动现象明显改善，动态传动误差明显减小，证明该侧隙控制方法有效。

147 仿人怀抱式移乘护理机器人背负运动轨迹规划与舒适性分析

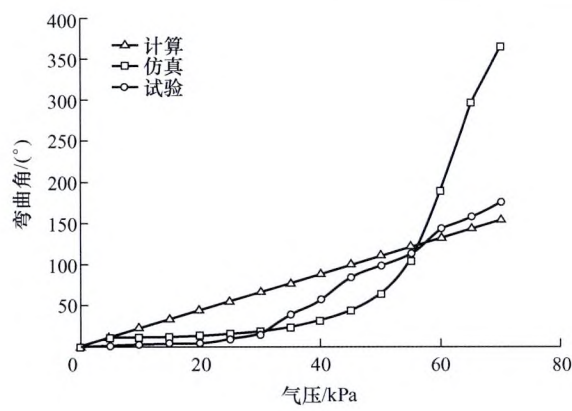
刘玉鑫 郭士杰 陈贵亮 刘今越 甘中学



摘要：护理过程中，失能/半失能人群的移乘服务给护理人员带来过重的身体负担，导致多数养老机构的护理人员患有慢性腰椎疾病。但目前以移位机为代表的移乘辅助器械大都使用不便，耗时费力，普及率较低。为实现下肢失能老人在生活器具间安全且方便的移乘，研制了一款仿人怀抱式移乘护理机器人。该机器人采用三自由度胸靠支撑被护理人的胸部，通过模仿人背人的动作设计，把被护理人背/抱起进行移乘。从研究人背人的动作特征入手，分析了影响移乘舒适性的因素，设计了机器人构型，建立了人机系统的力学模型，通过运动学及动力学解析优化了机器人机构及运动轨迹，明确了机器人的工作空间及其特有的运动特性。对 8 名不同身高体重的试验对象的试验结果显示，所研制的机器人可以较为安全舒适地完成仿人怀抱动作并在不同生活器具间进行移乘服务。人机之间相互作用力的大小及其作用部位是影响舒适感的直接因素，因此可以通过调整胸靠的运动轨迹，实现不同身高体重的被护理人的舒适移乘。

157 三维气动软体驱动器弯曲建模与分析

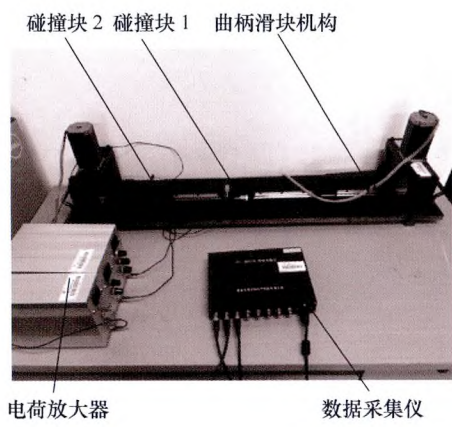
谢荣臻 黄东煜 苏满佳 管贻生 朱海飞



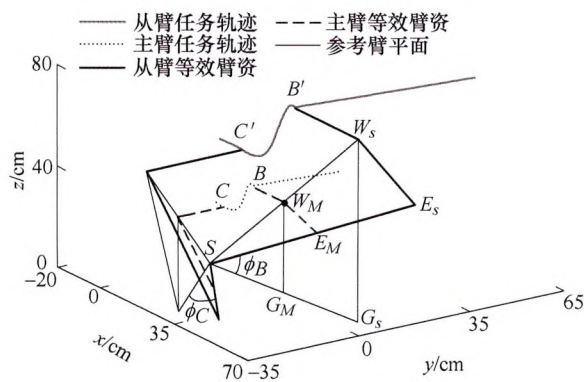
摘要：为设计弯曲性能优越的三维气动软体驱动器，针对单腔通气时驱动器的弯曲变形机理，展开了弯曲特性的研究。首先基于 Yeoh 模型的能量密度分布函数，结合驱动器弯曲时的静力平衡方程，建立驱动气压与驱动器弯曲角度变形的非线性数学模型；其次，通过数学模型分析气腔半径、中心圆半径以及壁厚对弯曲的影响，并通过建立单目标多约束优化模型寻找最优尺寸组合；然后通过有限元仿真，进一步研究两腔通气时驱动器弯曲角、偏转角与末端点坐标的变化规律。最后通过对比理论模型、有限元仿真、样机试验的数据。结果表明：在 60 kPa 气压的范围内，理论结果、仿真结果与试验结果的表明上述分析参数对弯曲影响的趋势保持一致，从而验证了理论模型的正确性。上述研究为设计气动软体弯曲驱动器提供了可靠的理论基础。

170 考虑摩擦与刚度的空间机构动力学特性

韩雪艳 李富娟 高振辉 李仕华

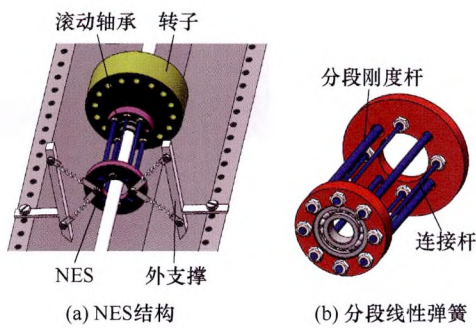


摘要：为了建立更加准确的接触碰撞力模型，提高空间指向机构指向精度和稳定性；提出了一种考虑摩擦因素的改进的非线性法向接触刚度模型，基于修正的 L-N 模型，建立了更加准确的新的接触碰撞力模型，与已有模型进行了对比分析，并对新的接触碰撞力模型的准确性进行了试验验证；采用牛顿-欧拉法、“接触-分离”两状态模型、修正的 Coulomb 模型及新的法向接触碰撞力刚度模型，以空间指向机构为研究对象，建立了其动力学方程，研究了不同工况环境对空间指向机构动态特性的影响。研究结果表明：考虑摩擦因素的新的接触碰撞力模型能够更加精确地描述关节铰的接触碰撞效应，并且新模型的适用范围更加广泛；间隙导致空间指向机构动态性能出现明显的振荡，并随着间隙的增大，振荡加剧；关节铰结合面处的表面粗糙度越小，初始碰撞力越大；转速越大对机构产生的冲击力越大，机构的振动频率越高，机构的运行越不稳定。研究结果丰富了接触碰撞力建模方法，为高精度指向机构的设计与应用提供理论依据。

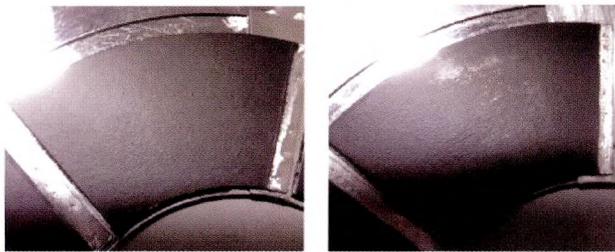


摘要：为了在异构遥操作系统中将主臂运动信息完整的映射到从臂，以人臂运动特性为依据，针对 7 自由度机器人提出了一种新的主从运动学映射方法。该方法以机器人末端位姿和自转角为基础，建立主从映射矩阵。提出关节融合策略，对因有偏置而无法汇成肩肘腕点的机器人进行关节融合，从而形成等效肩肘腕点，并以此确定映射矩阵参数。建立参考坐标系，对遥操作过程中产生的基系漂移误差进行修正。针对肘或腕不汇交的 7 自由度机器人，提出了一种新的逆运动学求解方法。该方法利用几何关系求解等效肩肘腕点的位置，并依据各等效点与各关节之间的关系求解各关节角。仿真和试验结果证明了所提出的映射方法能够使从臂按照主臂所提供的信息在等比例模型中完成运动，并且在运动过程中从臂自转角与主臂相同，完成避障任务。

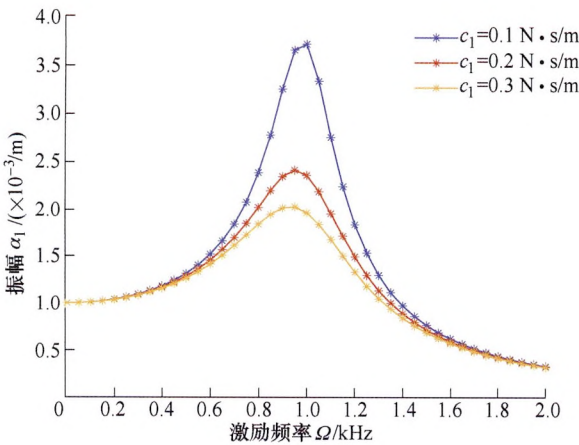
机械动力学



摘要：现代旋转机械需要结构简单且具有宽频抑振范围的抑振装置，因此研发了一种具有分段线性非线性刚度的非线性能量阱(Nonlinear energy sink, NES)。首先介绍了该非线性能量阱的结构和工作原理；其次分析了非线性能量阱的刚度和阻尼特性，并建立了转子-非线性能量阱系统的动力学方程；之后，采用数值方法分析了非线性能量阱在各向同性转子系统和各向异性转子系统中的振动抑制效果，并对其宽频抑振能力进行了验证；最后，建立试验系统验证了非线性能量阱的效果。研究表明，该非线性能量阱对于各向同性和各向异性转子系统都有很好的振动抑制能力，数值仿真最佳抑振率达到 68%，试验最佳抑振率达到 67%。

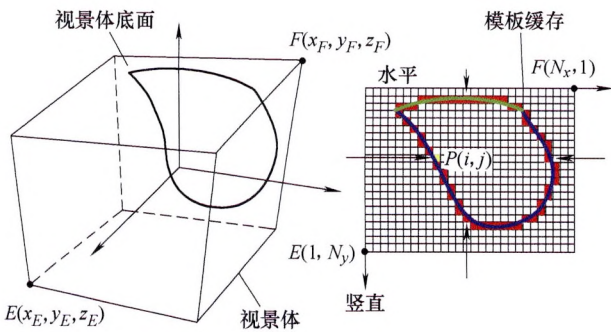


摘要：搭建了波纹箔片刚度测试试验台，基于单片波纹箔片结构的刚度测试试验，利用 MATLAB 拟合试验数据的方式推导出波纹箔片非线性的刚度模型。根据扇形波纹箔片的结构特点，对波纹箔片划分网格，根据各节点的面积占比，对各节点赋予刚度值。通过有限元法和有限差分法，耦合气体雷诺方程、气膜厚度方程以及波纹箔片非线性刚度模型的方程进行求解，研究波纹箔片非线性刚度特点对气体止推箔片轴承静态特性的影响。对恒定刚度模型和非线性刚度模型进行仿真分析，并与试验结果进行对比，验证波纹箔片非线性刚度的合理性。对两种模型所计算的止推轴承偏心率进行比较，发现了止推箔片轴承在轻载时，非线性刚度模型的波纹箔片刚度更小，偏心率更大。另外，利用箔片刚度试验和理论相结合的方法预测止推轴承静态特性，其方法具有一定的工程指导意义。

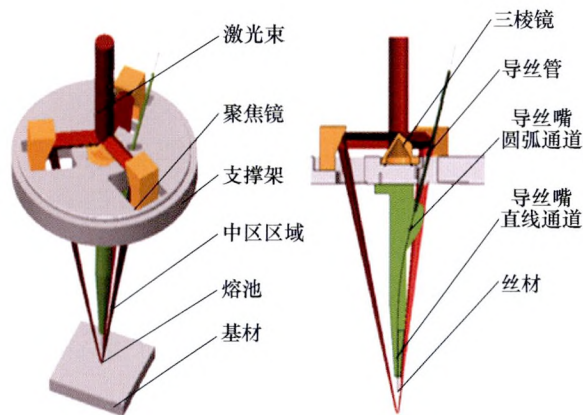


摘要：超磁致伸缩驱动器(Giant magnetostrictive actuator, GMA)输入电流与输出位移之间存在着磁滞非线性关系。为精确控制 GMA 输出位移的稳定性，通过分析 GMA 的工作原理，基于非线性压磁方程、Jiles-Atherton(J-A)磁滞非线性模型、二次畸变模型和 GMA 结构动力学原理，建立了 GMA 磁滞非线性动力学系统的方程；应用多尺度法分析该系统的主共振，得到该系统幅频响应曲线方程；使用 Matlab 数值仿真分析 GMA 系统中不同等效阻尼系数、激励磁场强度、预应力、三次刚度项系数与输出响应幅值之间映射规律；通过改变激振力参数值的大小，绘制 GMA 系统的时域波形、相轨迹图、Poincaré 图和幅值谱图，采用 4 阶 Runge-Kutta 法求解并绘制 GMA 系统的响应随激振力变化分岔图。研究表明：在给定 GMA 参数的条件下，在碟簧和激励线圈的作用下，GMA 具有“跳跃”和磁滞现象；GMA 系统在一定参数下存在着混沌现象。

数字化设计与制造

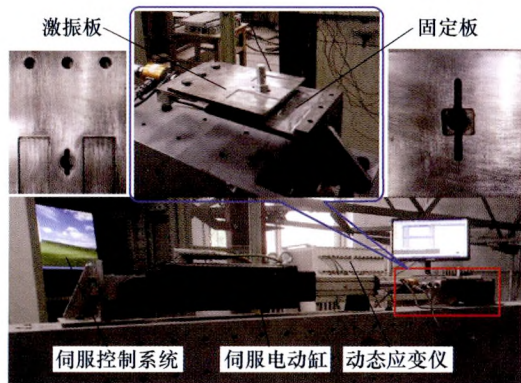


摘要：轴截面加工廓形的精确计算是螺旋特征加工的一个重要问题。不同于常规的解析法、离散法或布尔运算法等都在三维图形空间内进行求解，从可视化角度将空间几何问题映射到图像空间，提出了一种基于 OpenGL 图形渲染隐含计算的计算方法。首先，对螺旋特征成型加工的数学模型进行构建，然后，对螺旋特征轴截面加工空间的渲染计算原理从图形空间到图形空间的关系进行解析，随后，对计算的完整实现方案分别从图形空间与图像空间之间的映射关系、几何模型空间相交像素信息渲染表征实现以及轴截面廓形的最终解析提取进行研究，并给完整的计算实现框架与流程性函数组。最后以锥铣刀的螺旋槽铣削加工为例，进行了轴截面加工廓形的计算，并通过与解析解进行比验证了所提方法的有效性。



摘要：采用“三光束光内同轴送丝”激光熔覆新方法研究可以获得表面质量较高单道熔覆层的工艺参数组合方案。建立三光束激光熔覆工艺参数与熔覆层表面形貌关系以及几何特征变化规律的数学模型，通过激光提供的单位能量密度 E_1 与丝材所需的能量密度 E_2 之间比值关系判断熔覆层表面形貌状态，工艺参数和熔覆层几何特征关系的数学模型预测熔覆层几何特征变化规律，并采用单因素试验法进行验证。研究结果如下： $E_1/E_2 < 1$ ，熔池能量“不足”， $1.1 \geq E_1/E_2 \geq 1$ ，熔池能量处于“不足”到“充足”过渡阶段，以及 $E_1/E_2 > 1.6$ ，熔池能量“过剩”，这三种情况形成的熔覆层表面质量较差；只有当 $1.5 \geq E_1/E_2 > 1.1$ ，熔池能量“充足”能够充分熔化进入熔池的丝材，且丝材能够以连续平稳的“搭桥过渡”方式熔入熔池，熔覆层表面连续光滑，质量较高；熔覆层几何特征变化规律：数学模型预测值变化趋势与试验值基本吻合，离焦量减小，熔覆层宽度 W 减小，高度 H 增大，宽高比 a 减小；激光功率增大，熔覆层宽度 W 增大，高度 H 减小，宽高比 a 增大。扫描速度增大，熔覆层宽度 W 减少，高度 H 减少，宽高比 a 略有增加。送丝速度增大，熔覆层宽度 W 和高度 H 都会增大，宽高比 a 减小。综上采用“三光束光内同轴送丝”新方法对不锈钢 304 材料的丝材和基材进行激光熔覆试验，工艺参数组合方案满足 $1.5 \geq E_1/E_2 > 1.1$ ，可以制备出表面形貌佳熔覆层。

238 考虑螺纹柔性的螺栓连接临界松动载荷计算方法



摘要：螺栓连接松动是螺栓失效的一种重要形式。工程中，螺栓连接节点常常会受到交替变化的横向动态载荷作用，由于螺栓轴线与受力方向垂直，螺栓容易因预紧力降低而发生松动，从而改变螺栓连接节点乃至整个结构的固有力学特性。为研究横向载荷作用下螺栓连接的临界松动载荷，通过建立螺栓连接的力学模型对螺纹的受力情况进行分析，并在此基础上考虑螺纹柔性提出一种螺栓连接临界松动载荷的计算方法。设计并加工了螺栓连接横向振动试验装置，对螺栓连接的临界松动载荷进行了试验研究，通过对比理论计算结果和试验结果，验证了计算方法的准确性。基于提出的理论计算方法，给出了横向载荷作用下螺纹应力的分布规律，对比了刚性螺纹模型和柔性螺纹模型的应力分布特点，结果发现柔性螺纹模型可以很好地反映螺纹应力的整体变化情况。

CONTENTS

- 1 Four-dimensional Printing —— the Additive Manufacturing Technology of Intelligent Components**
SHI Yusheng WU Hongzhi YAN Chunze YANG Xiao CHEN Daobing ZHANG Ce SU Bin
SONG Bo LI Zhongwei PANG Shengyong WEN Shifeng LIANG Bo ZHAO Qingliang
HE Jiankang ZHANG Shuquan WEN Yintang
- 26 Review of Design of Programmable Morphing Composite Structures by 4D Printing**
GAO Yicong ZENG Siyuan FENG Yixiong ZHENG Hao QIU Hao TAN Jianrong
- 39 Motion Function Transformation and Control of Amphibious Robot Based on 4D Printing**
HUANG Zhongyi YANG Yuguang LÜ Pengyu DUAN Huiling
- 46 Investigation on Microstructure and Properties of Selective Laser Melting Ni_{50.8}Ti_{49.2} Shape Memory Alloys**
WANG Shuo FENG Yan LIN Xin
- 53 Effect of Laser Energy Density on Relative Density, Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Al-Ni-Ti Alloy Fabricated by Selective Laser Melting**
ZHU Wenzhi DANG Mingzhu TIAN Jian WEI Qingsong
- 65 Influence of Laser Scanning Speed on Phase Transformation and Superelasticity of 4D-printed Ti-Ni Shape Memory Alloys**
LU Haizhou MA Hongwei LUO Xuan YANG Chao LI Yuanyuan
- 72 Incentive Source Layout Design for Self-bending of 4D Printing Double-layer Structure**
WANG Chuang LIU Zhenyu DUAN Guifang TAN Jianrong
- 80 Research on Processing and Properties of 4D Printed Thermoplastic Polyurethane/NdFeB Magnetic Composites**
ZHANG Ce WU Hongzhi YAN Chunze
- 90 Study on the Preparation and Self-driven Deformations of Bionic Magnetism Response 4D Intelligent Hydrogel**
CHANG Yanjiao HOU Wenhua LIANG Yunhong SUN Dehui
- 97 Research on Printing Process and Performance of CNT/PDMS Soft Sensing Material**
XU Xuejie ZHU Zicai LUO Bin HE Qingsong
- 104 Effect of NiTi Powder Gas Atomization Process on the Selective Laser Melting Moldability and Alloys' Superelastic**
ZHENG Dan LI Ruidi SONG Bo XIONG Yi YUAN Tiechui SHI Yusheng

- 110 Properties of Cu-Al-Mn-Ti Shape-memory Alloy Processed by Selective Laser Melting**
DANG Mingzhu ZHU Wenzhi TIAN Jian WEI Qingsong
- 118 Progress in Actuating Technology of Origami Structure**
HU Nan CHEN Hualing
- 129 Design and Optimization of Space Deployable Tri-prism Mast**
GAO Mingxing LIU Rongqiang LI Bingyan GUO Hongwei DENG Zongquan
- 138 Experimental Investigation on Backlash Control of Variable Tooththickness Gear Pair under Varying Load Excitation**
ZOU Shuaidong WANG Guangjian JIANG Yujiang REN Pinxu YU Li LI Xiaobing
- 147 Bionic Motion Planning and the Analysis for Human Comfort of a Piggyback Nursing-care Robot for Transfer Tasks**
LIU Yuxin GUO Shijie CHEN Guiliang LIU Jinyue GAN Zhongxue
- 157 Modeling and Analysis of 3D Pneumatic Soft Actuator on Bending**
XIE Rongzhen HUANG Dongyu SU Manjia GUAN Yisheng ZHU Haifei
- 170 Dynamic Characteristics of Space Mechanism Considering Friction and Stiffness**
HAN Xueyan LI Fujuan GAO Zhenhui LI Shihua
- 181 Master-slave 7-DOF Manipulator Motion Mapping Based on Elbow Self-motion and Its Analytical Geometric Inverse Kinematics**
ZHAO Jing WANG Xin ZHANG Ziqiang GONG Shiqiu LI Xiaohui
- 191 Application of Nonlinear Energy Sink for Rotor System Vibration Suppression**
YAO Hongliang CAO Yanbo ZHANG Qin WEN Bangchun
- 198 Performance of Thrust Foil Bearings with Nonlinear Foil Stiffness Model**
XU Fangcheng HOU Liukai WU Bin
- 207 Research on Hysteresis Nonlinear Dynamics of Giant Magnetostrictive Actuator**
YAN Hongbo GAO Hong HAO Hongbo
- 218 A Transversal Profile Calculation Method for Helical Forming Machining Based on OpenGL**
JIA Kang ZHENG Shuai HONG Jun
- 227 The Influence of Process Parameters on Geometry Characteristics by Three Beams Laser Cladding**
LIU Fan JI Shaoshan FU Geyan SHI Shihong
- 238 Computing Method of Bolted Joint Critical Loosening Load with Flexible Thread**
JIANG Wenqiang MO Ze AN Liqiang WANG Zhangqi YANG Wengang

《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) 张峰 (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) 宫声凯 (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 668200