

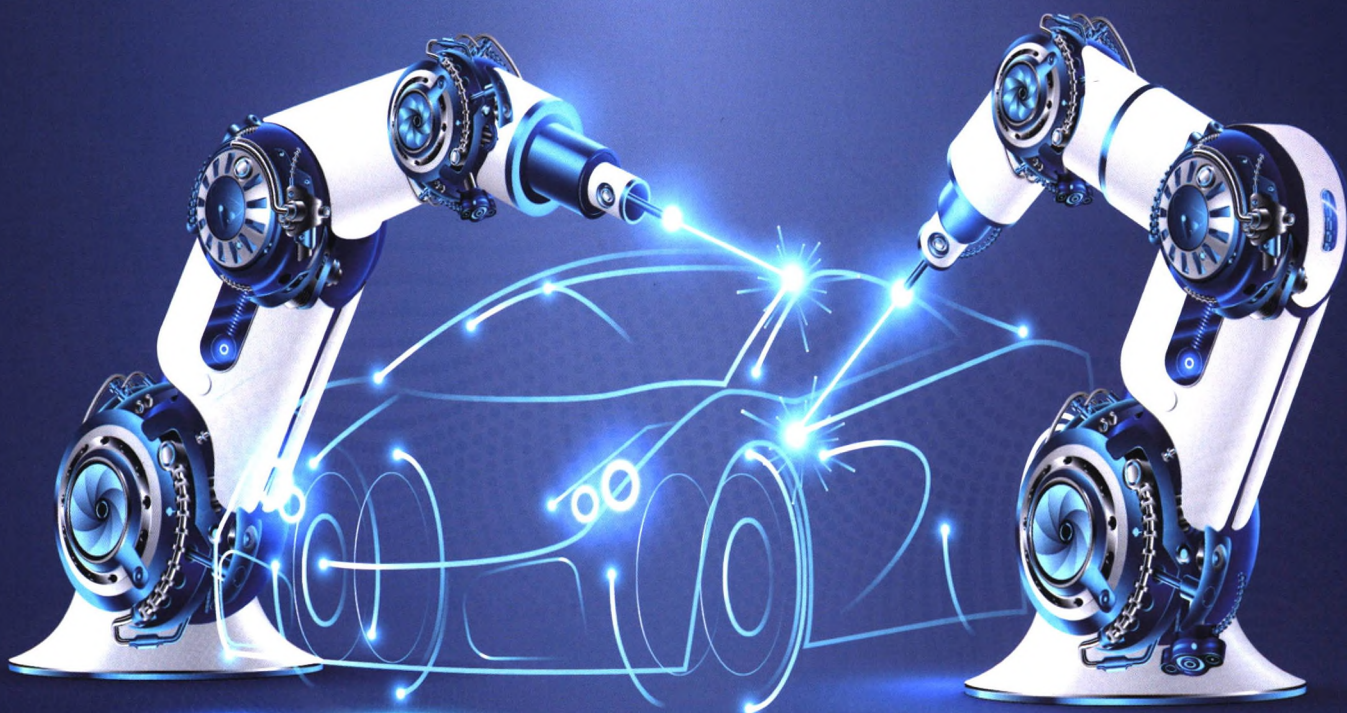
# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：轻质材料焊接与连接

客座主编：武传松 教授

客座编辑：曹健 教授 李永兵 教授



中国机械工程学会 主办

2020年56卷8期 半月刊

万方数据

## // 特邀专栏 //

### 轻质材料焊接与连接

客座主编: 武传松 教授 (山东大学)

客座编辑 (按姓氏字母排序):

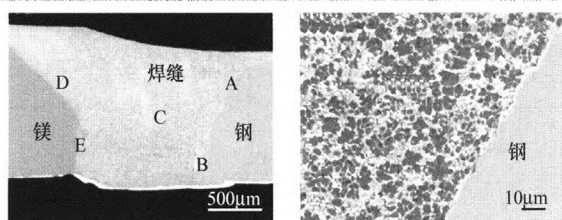
曹 健 教授 (哈尔滨工业大学)

李永兵 教授 (上海交通大学)

策划编辑: 田 旭 (《机械工程学报》编辑部)

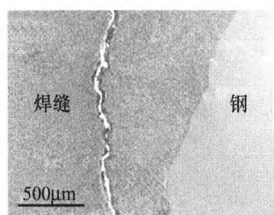
#### 1 镁合金与钢异质材料焊接的研究进展

宋 刚 赵 爽 李涛涛 刘黎明



(a) 接头横截面

(b) 图5a中A区放大图

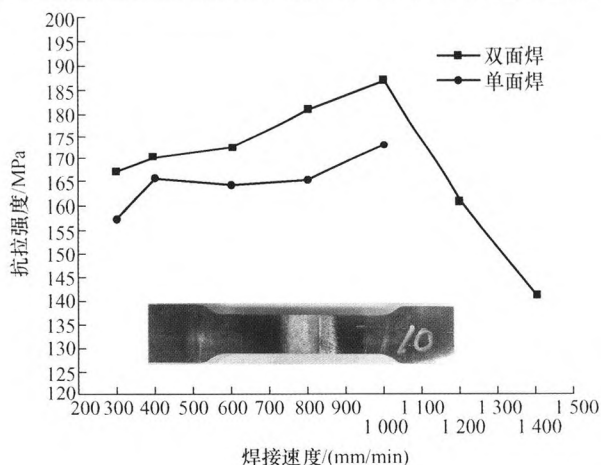


(c) 接头断裂位置

**摘要:** 镁合金是最轻的金属类工程结构材料, 钢仍是目前应用最广泛的金属材料, 镁合金与钢形成结构件能够充分发挥材料“物尽其用”的优势, 在航空航天、汽车等领域具有广阔的应用前景。镁与钢不仅物理和化学性能差异巨大, 而且两者属于典型的不反应难固溶异质材料, 实现镁合金与钢高性能连接是焊接领域研究热点及面临的极大挑战。基于此, 详细总结与分析了国内外镁合金/钢焊接结合模式、焊接方法、焊接接头组织及力学性能等方面的研究进展, 并阐述了镁合金/钢异质材料焊接接头界面错配研究现状。最后, 结合现有研究进展和应用需求, 提出镁合金/钢异质材料焊接未来可能的研究方向, 旨在为后续研究提供参考与借鉴。

#### 13 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织与力学性能研究

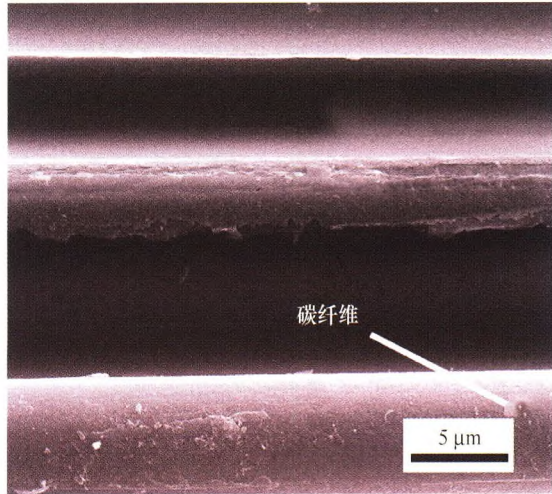
荆洪阳 丰 琪 徐连勇 赵 雷 韩永典



**摘要:** 采用搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)对 10 mm 的 6063-T6 铝合金分别进行单、双面焊接, 并探究焊接速度对接头微观组织及力学性能变化的影响。结果表明, 单双面焊接接头“S”线形貌基本保持一致且集中在前进侧轴肩影响区, 单面焊有更明显的洋葱环形貌。焊核区中部区域等轴晶粒尺寸小于上部轴肩影响区, 且单面焊焊核区晶粒尺寸大于双面焊。搅拌摩擦焊旋转速度为 1 500 r/min, 焊接速度由 300 mm/min 增至 1 400 mm/min 时, 接头力学性能先升高后降低, 且双面焊接头力学性能始终优于单面焊。接头抗拉强度峰值为 187 MPa, 断裂位置多位于后退侧热影响区, 与接头最低硬度位置保持一致, 主要断裂模式为韧性断裂。

## 20 表面生长碳纳米管对 C/C 复合材料钎焊接头的影响

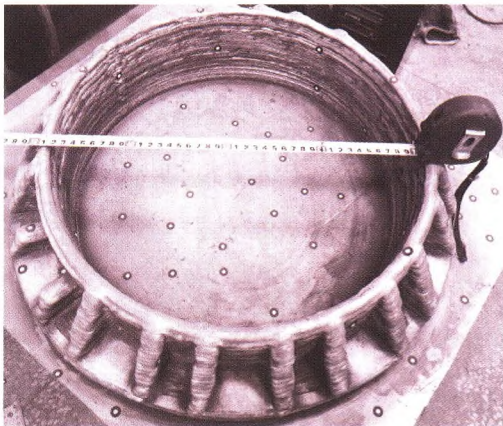
常青 张丽霞 孙湛 宋义河 朱泳安



**摘要：**采用等离子增强化学气相沉积(Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)方法在 C/C 复合材料表面制备碳纳米管,探究了催化剂溶液浓度、碳纳米管生长温度、生长时间、气体压强、气体流量等工艺参数对碳纳米管生长的影响。通过拉曼光谱、扫描电子显微镜、透射电子显微镜等技术对制备的碳纳米管进行表征,最佳工艺参数下所生长的碳纳米管为多壁碳纳米管,碳纳米管壁的层数约 15 层,碳纳米管直径和长度分别为约 18.9 nm 和约 2.5 μm。将 C/C 复合材料与 Nb 和 Ti600 两种金属进行钎焊连接,对有无碳纳米管的钎焊接头进行分析,发现表面生长碳纳米管有利于提高钎料润湿性,钎接头强度也有所提高。

## 28 5356 铝合金过渡端框电弧增材制造及组织与性能

高炼玲 余圣甫 禹润缜 何天英、史玉升



**摘要：**研究电弧熔丝增材制造 5356 铝合金运载火箭过渡端框工艺,探讨不同热输入与热处理温度对堆积金属组织与性能的影响,增材制造了过渡端框模拟件。结果表明,5356 铝合金的显微组织主要为  $\alpha(\text{Al})$  相基体与  $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$  增强相。增材制造过程中的热输入从 113.4 J/mm 增加至 356.4 J/mm 时,5356 铝合金中  $\alpha(\text{Al})$  相晶界处的粗大  $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$  相增多,导致金属抗拉强度、延伸率均显著降低。固溶处理有利于提高 5356 铝合金的力学性能。固溶处理温度由 350 °C 提高至 450 °C 时,5356 铝合金中的  $\alpha(\text{Al})$  相晶粒细化,其晶内的细粒状  $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$  相增多并呈弥散分布,且  $\alpha(\text{Al})$  相晶界处的  $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$  相减少,使得细晶强化与沉淀强化效果逐渐显著,5356 铝合金强度及韧性提高。根据 5356 铝合金过渡端框的结构特点,将其划分为底部支撑圆环、环-扇形组、环-加强筋组 3 个区域依次增材制造。为了减少成形件的变形,改变底部支撑圆环增材制造的起弧位置,环-扇形组采用对称分块成形。对成形的 5356 铝合金过渡端框模拟件进行三维尺寸测量,结构误差在 3.58 mm 之内,具有较高的成形精度。

## 37 退火温度对激光选区熔化 AISi10Mg 合金微观组织及拉伸性能的影响

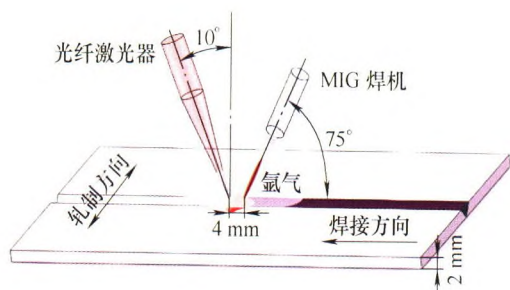
闫泰起 唐鹏钧 陈冰清 楚瑞坤 郭绍庆 熊华平



**摘要：**详细研究了退火温度对激光选区熔化成形 AISi10Mg 合金微观组织和拉伸性能的影响规律。结果表明,退火后的激光选区熔化成形 AISi10Mg 合金组织中网状共晶 Si 发生断裂、粗化;随着退火温度升高,网状共晶 Si 发生球化,以颗粒状均匀分布在 Al 基体中,且弥散二次 Si 粒子也逐渐溶解消失。激光选区熔化成形 AISi10Mg 合金经退火后,其延伸率大幅提高,拉伸断口表现出韧性断裂特征。在 270~280 °C 下退火 2 h,延伸率分别达到 15.7%(XY 向)和 12.7%(Z 向)以上,且强度保持在一个较高的水平(300 MPa),实现了强度/塑性的良好匹配。通过拉伸试样断口分析,认为导致裂纹源萌生的主要原因是未熔粉体、气孔及氧化物等缺陷。

## 46 中高强度铝合金熔化焊接接头的缺陷容限评价方法

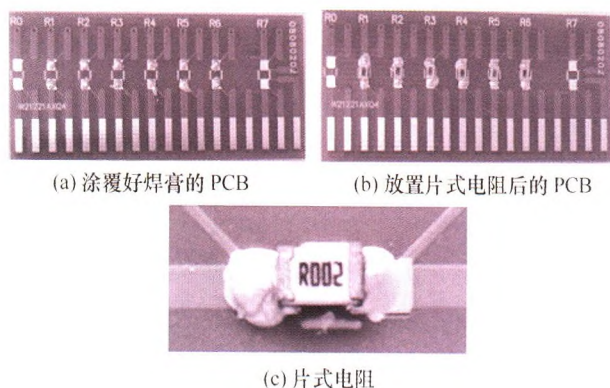
吴圣川 谢成 胡雅楠 吴正凯 康国政



**摘要:**应用电子背散射衍射及高精度同步辐射 X 射线三维原位成像技术,结合高周疲劳试验与裂纹扩展速率试验,揭示了激光复合焊接的中高强度铝合金的微结构特征(如组织、缺陷等)对疲劳性能的影响。结果发现,激光复合焊接过程显著改变了铝合金接头各区的组织特征;焊缝中存在着大量气孔缺陷;接头的拉伸和疲劳性能均低于母材,软化严重;根据缺陷的极值统计与修正的 Murakami 公式,获得了接头的理论疲劳极限。绘制出熔焊接头 Kitagawa-Takahashi 图,通过高周疲劳极限值推证得到铝合金 7020 和 7050 激光复合焊接接头的缺陷容限值分别为 185  $\mu\text{m}$  和 311  $\mu\text{m}$ 。

## 60 纳米银焊膏热烧结及通电热老化过程动态电阻监测研究

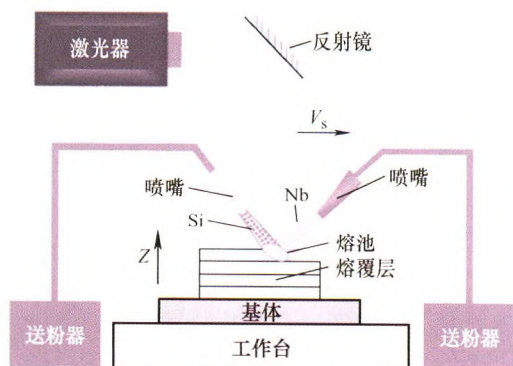
马竞轩 王尚 杨东升 田艳红



**摘要:**由于纳米银焊膏优异的导热性和导电性,使其在第三代半导体封装中受到了极大关注,其中,焊点的长期服役可靠性问题一直是封装领域的研究热点。提出焊点动态电阻在线监测方法,建立相应实时监测系统,将电阻转换为电阻率,研究电阻率在烧结和通电热老化过程中的变化情况,并对上述两个过程的焊点显微组织演变进行分析,建立电阻率变化规律模型。试验结果表明:在烧结过程中焊点电阻率逐步下降,且变化分为三个阶段。第一阶段,保温时间较短,焊点内未形成有效互连,电阻率极高;第二阶段,纳米银颗粒之间开始形成烧结颈,电阻率大幅下降;第三阶段,烧结颈长大,且焊点内有机物挥发完全,电阻率进一步下降。在通电热老化过程中,电阻率变化分为四个阶段。第一阶段,由于温度升高,材料电阻率随温度上升;第二阶段,焊点在高温下发生致密化行为,使电阻率下降;第三阶段,致密化过程基本结束,电阻率保持稳定;第四阶段,在电迁移效应影响下,银原子由阴极向阳极迁移,导致阴极附近出现裂纹,电阻率大幅上升直至焊点断路失效。

## 69 激光功率对原位反应增材制造 Nb-16Si 二元合金显微组织的影响

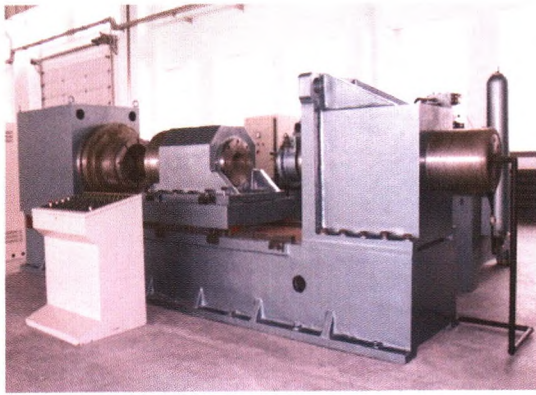
刘伟 李能 任新宇 高超 熊华平



**摘要:**以平均粒径约 80  $\mu\text{m}$  的纯 Nb 和纯 Si 粉末为原料,采用 500 W、750 W、1 000 W 和 1 500 W 功率的激光束为热源,通过双通道同轴送粉激光熔化沉积(Laser melting deposition, LMD)技术制备了四种 Nb-16Si 二元合金。利用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)、X 射线能量色散谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS)以及 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)等手段分析了沉积态合金的宏观组织演变与维氏硬度。结果表明,随 LMD 激光功率由 500 W 增至 1 500 W,沉积试样表面形貌逐渐趋于光滑,相对密度由 91.1%增至 98.5%。激光功率对沉积态 Nb-16Si 合金相组成无明显影响,在高能激光束的作用下,纯 Nb 粉末与纯 Si 粉末发生原位反应,直接合成了室温亚稳态的  $\text{Nb}_3\text{Si}$  相和  $\text{Nb}_{\text{SS}}$ (Niobium solid solution,  $\text{Nb}_{\text{SS}}$ )相。激光功率强烈影响 Nb-16Si 合金的显微组织形貌,随激光功率的增加,合金中先共晶  $\text{Nb}_{\text{SS}}$  相由枝晶状逐渐转变为细小等轴状,其平均尺寸由约 50  $\mu\text{m}$  细化至 1  $\mu\text{m}$  左右,合金中  $\text{Nb}_{\text{SS}}+\text{Nb}_3\text{Si}$  共晶组织形态由细小的层片状共晶,逐渐转变为纳米级的  $\text{Nb}_{\text{SS}}$  相弥散分布在  $\text{Nb}_3\text{Si}$  基体上的不规则共晶。随激光功率增加,合金的维氏硬度由 605 HV 逐渐增加至 898 HV。

## 77 热处理工艺对 Ti<sub>2</sub>AlNb 惯性摩擦焊接头组织及性能的影响

周 军 梁 武 乌彦全 张春波



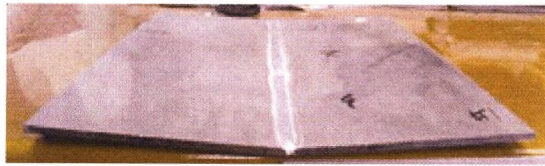
**摘要:** 针对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金惯性摩擦焊接头开展了热处理工艺试验研究,分析了不同热处理工艺对焊接接头组织及力学性能的影响。研究表明,固溶态母材由  $\alpha_2$ 、B2 和 O 相构成,  $\alpha_2$  相呈球状或块状分布于 B2 相晶界上, O 相呈棒状平行或交叉分布于 B2 相晶粒内部; 固溶+单时效态合金母材由 B2+O 两相组成。焊态下的接头焊缝区及热力影响区基本为 B2 相组织, 双时效处理后大部分 B2 相转变成晶界网状 O 相+晶内针状及块状 O 相组织, 单时效处理的接头焊缝区及热力影响区晶界基本无 O 相组织存在, B2 相晶内转变为细密层片状 B2+O 相共析组织。三种热处理状态的接头各区域显微硬度分布基本一致, 焊后双时效提高了 O 相组织的析出而起到强化作用并提高了接头的显微硬度。焊前为固溶态+焊后双时效处理的接头室温抗拉强度最高且为 1 193 MPa; 焊后双时效处理的接头室温拉伸断口以准解理断裂为主, 焊后单时效处理的接头室温拉伸断口以解理断裂为主, 且解理小平面尺寸较大, 抗拉强度稍低。焊前为固溶态+焊后双时效处理的接头在 650 °C 高温下的抗拉强度依然最高且为 986 MPa, 断口上能够观察到较浅的韧窝, 为沿晶的韧性断裂; 焊前为固溶态+时效处理的接头断口形貌基本相同, 接头断裂形式以解理断裂为主, 并含有少量的准解理断口。

## 85 基于“热导拘束+局部变形强化”的铝合金焊轧复合成形方法

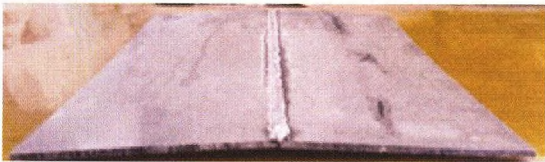
宋 刚 程继文 刘振夫



**摘要:** 铝合金尤其是热处理强化铝合金焊后不可避免会出现热影响区软化现象, 导致焊接接头的力学性能显著下降。基于热导拘束+局部变形强化构想, 提出一种铝合金焊轧复合成形方法, 系统分析铜垫强制冷却非熔化极惰性气体保护电弧焊(Tungsten inert gas, TIG)填丝对接焊及焊后轧制复合工艺对 5083-O 和 6061-T6 异种铝合金焊接接头组织和力学性能的影响。结果表明, 采用焊轧复合成形方法, 能够得到成形良好且无缺陷的铝合金对接接头, 通过轧制使焊接接头同时发生了纵向变形和横向变形; 焊后轧制可以压实铝合金焊缝组织, 有效降低焊接接头部分熔化区的宽度, 同时热影响区(包括固溶区和过时效软化区)晶粒发生位向改变甚至转动现象; 与自由冷却焊接工艺相比, 采用铜垫冷却的焊接接头 6061-T6 侧软化区硬度升高且向焊缝中心产生明显偏移, 焊后轧制使两种冷却方式的焊接接头的整体硬度均得到大幅度提升, 其中软化最严重位置硬度值由 59.5 HV 提高到 84.4 HV, 提升幅度为 41.8%; 两种冷却方式的焊接接头轧制后接头的抗拉强度均大幅度提升, 其中铜垫冷却焊轧复合成形与自由冷却焊接接头相比, 试样抗拉强度由 197.0 MPa 提升到 288.6 MPa, 提升幅度为 46.5%, 与 5083-O 母材的抗拉强度相当, 断后伸长率由 5.88%提升到 8.85%, 断裂位置由 6061-T6 侧热影响区转移至 5083-O 侧母材。



(a) TIG 重熔焊接接头



(b) MIG 对接接头

**摘要:** 固有变形逆解析法是一种获取焊接接头固有变形的新方法。但是, 采用该方法来获得铝合金或高强钢等轻量化结构材料的薄板焊接接头固有变形时, 由于焊接过程中产生几何非线性现象的倾向大, 逆解析过程中常常出现收敛困难而无法获得固有变形。针对这一问题, 研究提出了一种借助于切断手段的方法来消除因几何非线性引起的收敛性问题。文中以钨极惰性气体保护焊和熔化极惰性气体保护焊加工铝合金薄板接头为例, 采用提出的“切断法”与“逆解析方法”相结合的新方法来获得了焊接接头固有变形, 并在此基础上运用固有应变法再现了原尺寸铝合金焊接接头的焊接变形。通过比较分别由试验法、热-弹-塑性方法和固有应变法得到的焊接变形结果发现, 尽管不同焊接方法对变形模式和变形量影响显著, 但是利用提出的算法获得的固有变形值得到的焊接变形均能较好地再现热-弹-塑性有限元计算得到的结果。

## 99 电弧增材制造 NiTi 形状记忆合金成形与性能

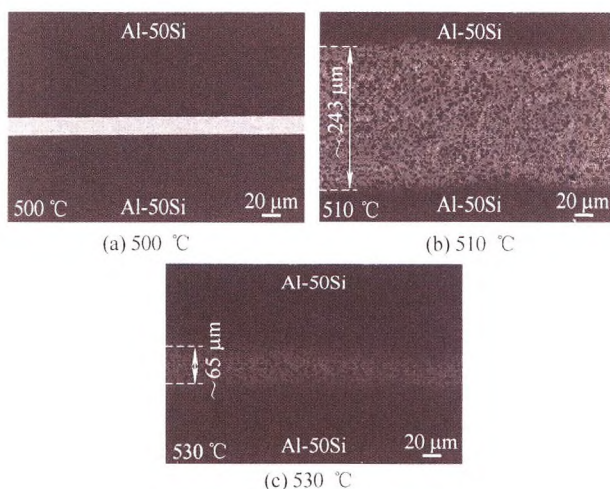
葛福国 彭倍 柯文超 敖三三 从保强 祁泽武 曾志



**摘要:** 基于电弧增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)技术, 以 NiTi 丝(Ni 50.50 at.%)为堆积材料制造形状记忆合金薄壁构件, 研究其组织成分、相变特征和力学性能。结果表明, 由于不同的热循环条件, 沿试样高度方向上每道沉积层微观结构不同, 第一沉积层为较大的等轴晶, 随着热量累积, 晶粒生长趋向为更细小的等轴形态, 层间为柱状晶。室温下, 试样是奥氏体相(Ni 51.10 at.%), 与丝材相比, 电弧增材制造的构件硬度较高且具有更宽的温度变化范围和相变滞后现象。试样拉伸强度约为 611.30 MPa, 延伸率约为 19.50%, 具有较好的断裂韧性。试样在第一次加载-卸载循环时塑性应变仅为 1.01%, 8 个循环后塑性应变趋于稳定, 约为 2.68%。

## 107 超声诱导瞬间液相焊接以 Ag-28Cu 为中间层的过共晶 Al-Si 合金

何朝成 付玉 王谦 韩俭 陈胜勇 闫久春



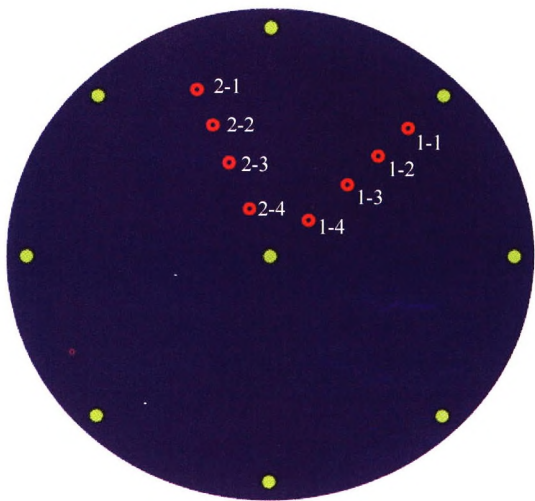
**摘要:** 在大气环境中, 应用超声诱导瞬间液相焊的方法, 焊接以 Ag-28Cu 为中间层的 Al-50Si 合金。研究了超声振动时间、焊接温度对接头微观结构演变和 Si 颗粒迁移的影响。分析了 Si 颗粒增强的完全固溶体接头的快速形成过程。阐述了剪切强度与超声振动时间和接头组织之间的关系。在 520 °C 焊接温度下, 超声振动仅 3 s, 接头发生了界面冶金结合。超声振动 15 s 时, 获得了 Si 颗粒增强的完全固溶体接头。焊接温度对 Ag、Cu 和 Al 之间的相互扩散产生影响。随着温度的增加, 原子扩散加快。由于超声在固-液体介质中的效应, 使得基体金属与中间层表面的氧化膜得到快速破除, 基体金属与中间层产生元素扩散。当扩散达到一定浓度时, 基体金属与中间层发生冶金反应, 形成 Al-Ag-Cu 三元共晶液相, 并且 Si 颗粒迁移进三元共晶液相中。随着超声振动时间延长, 在超声振动、压力作用下, 三元共晶合金减少, 直至完全消失, 剩余的 Al (Ag, Cu) 固溶体保留在焊缝中, 焊缝闭合, 获得了 Si 颗粒增强的完全固溶体接头。Si 颗粒的迁移和三元共晶合金的挤出影响接头的剪切强度。剪切强度随超声振动时间的延长而增加。超声振动 15 s 的剪切试样, 其断裂发生在基体金属侧, 属于韧性断裂, 接头剪切强度最高, 达到约 123 MPa。



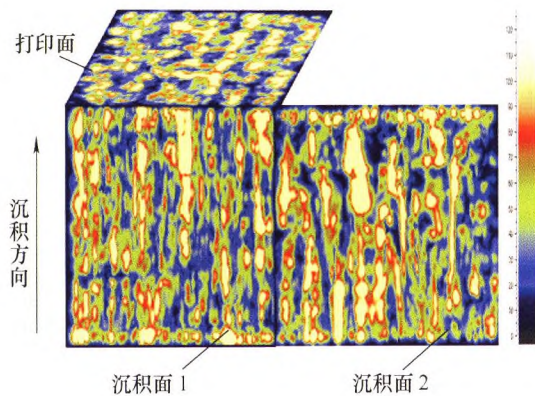
**摘要:** 从无应力制造技术角度出发, 概述了残余应力的来源及其对机械构件性能产生的影响, 分析了研究残余应力分布状态检测和调控技术对于保障生产、稳定产品质量、延长产品寿命等方面具有的重要理论和现实意义。根据残余应力的不同检测方法和调控方法, 给出了无应力制造技术的定义、作用和意义, 以及机械构件残余应力的图形符号表示方法, 包括残余应力梯度、分布均匀度和二维分布的表示符号。最后给出了无应力制造技术体系的构成和相互之间的逻辑关系, 展望了无应力制造技术的未来发展方向和对机械加工和制造领域的促进作用。

### 133 基于超声导波的压力容器健康监测 II: 定位精度的影响因素

杨斌 胡超杰 轩福贞 罗承强 项延训 肖飏



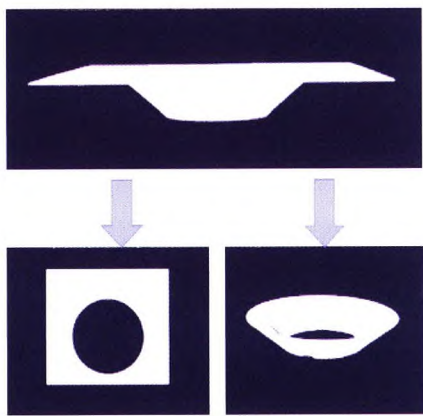
**摘要:** 基于超声导波的压力容器健康监测研究的第二部分, 主要考察影响压力容器损伤定位精度的因素。重点研究 PZT 压电片阵列形式、激发频率、缺陷位置及稀疏度对压力容器缺陷定位精度的影响规律。为分析既定试验阵型的稀疏度对压力容器封头和筒体缺陷定位精度的影响, 提出降低入射波幅值来模拟导波在不同直径、轴长的压力容器中传播的方法, 并试验验证该方法的可行性。研究表明, 对于直径为 325 mm 的压力容器封头, 沿圆周均匀布置 8 片 PZT 压电片、顶点布置 1 片 PZT 的阵列形式的缺陷定位精度最高; 当激发频率为 210 kHz 和 220 kHz 时, 算法对压力容器封头的定位误差最小, 有效比率最高; 压力容器封头中缺陷的径向位置对定位精度影响很小, 算法对位于传感器连线上的径向缺陷定位精度最高; 试验结果与采用降低入射波幅值的方法对大直径、长轴压力容器的缺陷定位结果接近, 当导波传播距离特征值所对应的 A0 导波幅值小于 5 时, 传感器阵列过于稀疏而导致缺陷定位精度快速降低。



**摘要:** 钛合金激光增材制造技术已经逐步应用于航空航天等领域中复杂构件的直接近成形制造。然而, 由于特殊的制造工艺导致的高衰减性和不均匀性使其内部缺陷采用常规超声检测方法检测效率低、成像结果差, 为此研究了阵列超声检测方法在增材制造钛合金构件检测中的关键技术。采用激光增材制造方法制备 TC18 钛合金试样, 利用高频水浸超声方法分析其超声衰减特性, 提出适用于增材制造钛合金构件的内部回波成像方法。基于线阵换能器全矩阵数据采集的方法分析声波沿试样不同表面入射时声波群速度随角度的变化规律, 对增材制造钛合金试样的各向异性进行分析, 并基于测量结果对阵列超声成像算法进行校正。分别采用线阵和环阵换能器对试样进行 C 扫描检测试验, 分析影响检测结果的主要因素。研究表明, 采用环阵换能器结合全聚焦算法能更精确地表征试样的内部缺陷, 在增材制造钛合金构件的无损检测中有较好的应用前景。

## 148 基于线激光扫描的飞机表面镗窝孔参数提取方法

石循磊 杜坤鹏 张继文 赵安安 杨力



**摘要:** 飞机表面孔的加工和检测仍是飞机自动化装配领域的一大瓶颈, 主要有工程量大, 材料复杂多样, 精度要求高以及表面多为大型自由曲面等原因。为了实现飞机表面镗窝孔的非接触式自动化检测, 首先分析实际工程中镗孔检测的难点, 结合装配时的根本质量需求和接触式量规的测量原理, 给出镗孔参数的评价标准; 然后, 借助窝深量规的测量原理, 提出一种针对粗糙曲面工件的补偿模型及修正算法; 最后, 基于线激光三维扫描技术得到的点云数据及灰度图, 综合运用点云库和计算机视觉等技术, 提出一种飞机表面镗孔参数的高精度提取方法。通过多组试验, 比较该方法测量结果与标准件及量规测量结果的差异, 验证了该方法能够高效、准确地检测镗孔的相关参数。

## 可再生能源与工程热物理

## 155 180°螺旋式 Savonius 风力机气动特性试验研究

朱建勇 刘沛清

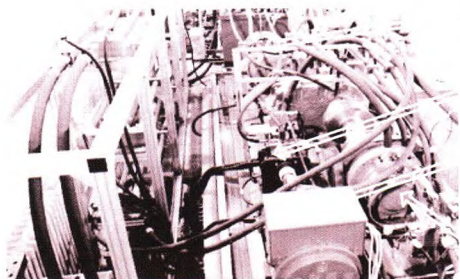


**摘要:** 为了揭示雷诺数对 S 型风力机气动特性的影响规律以及常规 S 型风力机与 180°螺旋式 S 型风力机气动特性的差异, 采用理论分析和风洞试验手段开展研究。基于不同雷诺数下二维凹、凸面阻力系数气动数据, 理论分析得出, 当雷诺数超过  $10^4$  时, S 型风力机的气动特性受雷诺数的影响较小。通过总结结构级数对 S 型风力机的影响规律, 推测出螺旋式 S 型风力机的最大风能利用系数低于常规 S 型风力机。对旋转直径 360 mm、高度 800 mm 和偏心距 100 mm 气动外形尺寸相同的常规和 180°螺旋式 S 型风力机, 在雷诺数  $1.26 \times 10^5 \sim 2.21 \times 10^5$  开展风洞试验验证理论分析的结论。此外, 针对螺旋式 S 型风力机, 还开展气动外形参数和在风力机端部施加端板流动控制的试验, 试验结果得出较大的长宽比和端板流动控制均能明显提高风力机的风能利用系数和拓宽较大风能利用系数对应的尖速比范围。



## 162 基于风速预测的液压型风力发电机组并网转速控制研究

艾超 高伟 陈立娟 张亚滨 郭佳伟



风力机模拟系统

变量马达

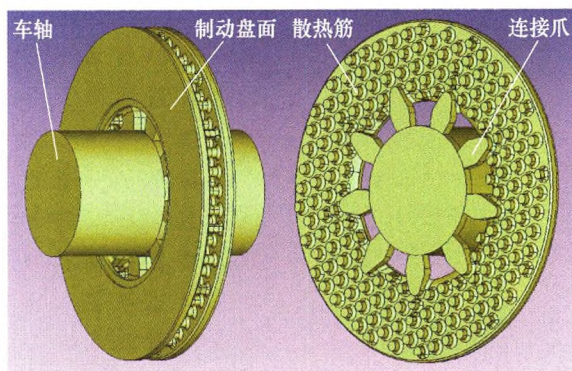
励磁同步发电机

定量泵

**摘要:**以垂直轴液压型风力发电机组为研究对象,主要针对机组的垂直轴风力机特性和高精度并网转速控制展开研究。首先建立风速、垂直轴风力机和液压主传动系统的数学模型,分析垂直轴风力机的空气动力学特性,得到垂直轴风力机输出转速周期性波动规律。根据风速预测曲线,结合垂直轴风力机空气动力学模型,得到风力机转速特性曲线。然后根据机组的实际并网需求,提出基于短期风速预测的变量马达排量 and 比例节流阀协调控制的高精度并网控制策略,使变量马达转速稳定在  $1500 \text{ r/min} \pm 6 \text{ r/min}$  满足并网需求。最终利用 Matlab/Simulink 软件对所提出的转速控制策略进行仿真验证,并考虑真实风速波动情况,在 30 kVA 液压型风力发电机组半物理模拟试验台上对转速控制策略进行试验验证。所得到的研究成果为垂直轴液压型风力发电机组的广泛应用提供理论指导。

## 172 基于旋转热流法和均布热流法的列车轴盘制动温度场仿真分析

张金煜 虞大联 刘韶庆 田爱琴

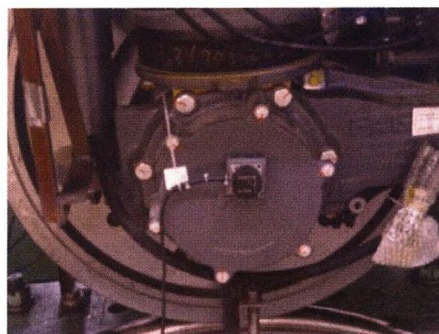


**摘要:**针对目前摩擦热流加载方式对列车轴盘制动温度场影响规律的研究不全面的问题,系统考察了不同制动工况条件下,旋转热流法和均布热流法这两种摩擦热流加载方式计算得到的制动盘温度场的变化规律及差异性。计算结果表明,在不同制动工况条件下,对于制动盘面上的温度最高点,旋转热流法与均布热流法计算得到的温度值及其变化特性的差异最大。同时,这种差异与闸片-制动盘接触面积、车辆制动初速度、制动减速度以及轮质量等工况条件密切相关。随着距离盘面深度的增加,这种差异迅速减小,在 2 mm 处可近似认为相同。此外,在连续多次制动条件下,某一次制动中旋转热流法与均布热流法计算结果的差异性与之前的制动无关,并据此提出一种制动盘最高温度值的快速算法。研究成果为列车轴盘制动温度场计算中摩擦热流加载方式的选择提供了理论依据。

## 运载工程

## 182 车轮扁疤所引起的车辆系统振动特性分析

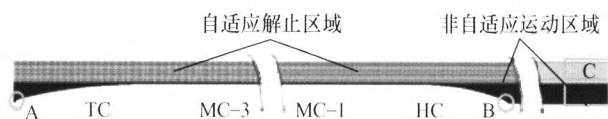
刘国云 曾京 邬平波 朱海燕 张波



**摘要:**车轮扁疤所诱发的轮对弹性变形会导致车辆系统部件振动加速度增大,但目前相关研究主要采取刚体动力学模型。为更准确研究车轮扁疤对高速车辆振动特性的影响,在目前成熟且广泛已知的车辆-轨道耦合模型和车辆系统刚柔耦合模型的基础上,综合考虑车辆主要部件的弹性振动和轨道弹性振动的影响,建立改进的车辆-轨道动力学模型。结果表明,在扁疤作用下,轮对弹性变形对轮轨垂向力影响甚微,但对轴箱端盖垂向振动响应影响很大;扁疤所产生的冲击载荷经过转向架或者钢轨的传递作用,会导致同轴另一侧以及转向架同侧处的轮轨力产生小幅值波动;扁疤所在轮对的左右两个轴箱端盖振动加速度要远大于同一转向架的其他两处;在低速时,车轮扁疤对构架端部垂向振动加速度也有着不可忽视的影响。提出的研究成果揭示了车轮扁疤作用下车辆-轨道系统弹性变形的重要性,对车轮状态监控也具有重要意义。

## 190 真空管道超级列车气动热效应

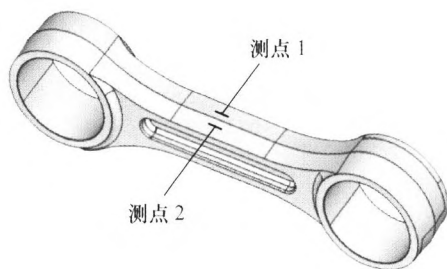
周 鹏 李 田 张继业 张卫华



**摘要:** 超高速真空管道列车产生的气动热效应不容忽视。根据二维轴对称可压缩 N-S 方程、Sutherland 三方程模型和 SST  $k-\omega$  湍流模型,运用动网格和动态自适应网格两种方法,对车速为 1 250 km/h 的超级列车在低压管道中飞行时所产生的流场结构及气动热变化规律进行了深入研究。研究表明,伴随着弓形激波、正激波、反射激波、菱形激波等激波簇结构的变化,击中车身的激波会引起蒙皮表面产生明显的瞬时温升;列车温度边界层从头车车窗下方开始,沿车身向后逐渐变厚,在尾车车身处达到最大,而后在尾车肩部变薄,接着继续增厚,直到边界层分离;头尾车司机室窗户附近温升最大,且最大温度主要出现在头车司机室窗户;随着列车不断运动,不同车厢的气动力及其周围的温度分布逐渐趋于稳定,达到平衡状态。研究成果为超高速真空管道列车蒙皮结构防热材料设计奠定一定基础。

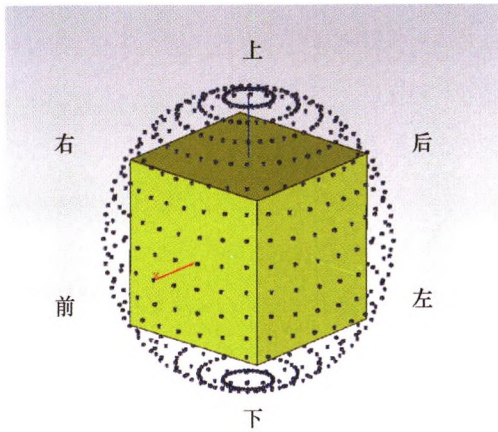
## 200 高速动车组牵引拉杆载荷特性研究

杨广雪 李广全 周君锋 冯永华

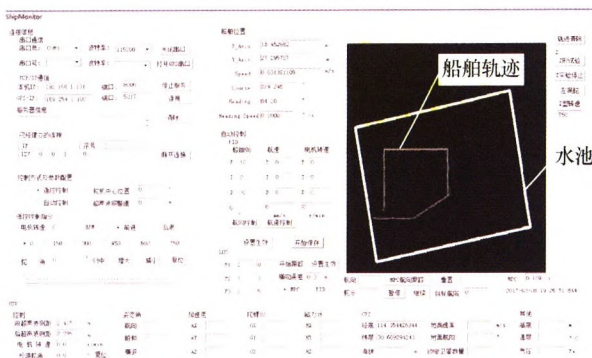


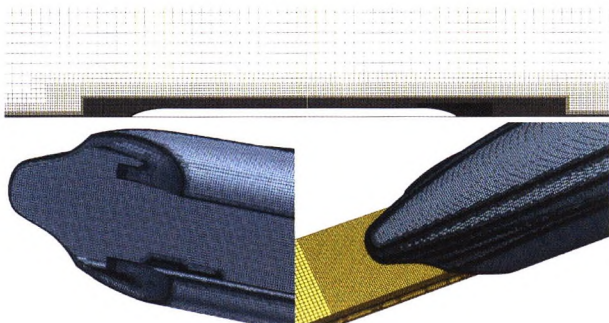
**摘要:** 采用准静态载荷标定的方式制作牵引拉杆载荷传感器,将其安装于某型高速动车组进行线路载荷测试,得到列车启动牵引、高低速直线运行、通过坡道及制动停车等典型工况下的载荷时间历程及载荷变化特点。在此基础上,编制不同速度等级下的牵引拉杆载荷谱,并依据线性累积损伤准则分析结构疲劳损伤分布及运行速度对疲劳损伤的影响规律。研究表明,与拖车牵引拉杆载荷相比,动车牵引拉杆载荷幅值变化受电机扭矩载荷的影响较大,尤其在列车启动、制动阶段,其趋势载荷变化明显;随着列车运行速度的增加,牵引拉杆载荷幅值不断增大,得到动车牵引拉杆载荷的振动主频与列车运行速度成正比。定义相对疲劳损伤来表征每级载荷的疲劳损伤贡献程度,得到结构疲劳损伤与牵引拉杆载荷幅值的对应关系,获取列车运行速度对结构疲劳累积损伤的影响规律。动车牵引拉杆载荷在列车时速 280 km/h 时产生的结构疲劳累积损伤最小,而拖车牵引拉杆的疲劳累积损伤值随着运行速度的增大呈现增大的趋势。该研究结果对高速列车转向架结构的优化设计及相关理论研究具有一定的参考价值。

**摘要:** 与明线运行相比,隧道内的高速列车车内噪声将明显增加。通过线路试验,对我国某型高速列车以 160~350 km/h 速度在明线和隧道运行时的车内振动噪声进行测试分析。掌握两种线路下的车内振动和噪声、车身表面气动噪声、转向架区域振动和噪声特性及其随速度的变化规律;采用 50 通道球形声阵列,识别两种线路下的车内主要噪声源,并分析噪声源的车内区域贡献率,进而在此基础上研究两种线路下的车内声振传递特性。结果表明,两种线路下车内噪声频谱差异主要体现在 315~2 000 Hz,各测点不同线路的声压级差值与运行速度相关性较小,车内噪声受轮轨噪声激励影响相对明显。对于客室中部,列车 350 km/h 匀速运行时,隧道段列车顶板和客室后方贡献率分别增加 4.0%和 3.0%,地板贡献率降低 8.6%,差异频段主要体现在 63~160 Hz。对于侧墙区域,明线段车内低频噪声主要来自侧墙的振动,而在隧道时,车内低频噪声则主要来自于侧墙车身表面的气动激励。客室内噪声总值和频谱分布的差异在隧道运行情况下会减小,现有更关注客室端部噪声控制的传统认识,在列车隧道运行下,需要同样重要地关注和对待客室中部区域。



**摘要:** 环境干扰下如何实现精确、可靠路径跟踪控制是目前无人水面船(无人船)自主航行的关键和难点问题。从无人船路径跟踪控制的算法设计、系统实现和试验验证等三个层面开展研究:在算法设计层面,提出了考虑水流干扰条件下的自适应视距(Line-of-sight, LOS)制导算法以及基于 LEM(Line-of-sight & extended state observer & model predictive control, 视距-扩张状态观测器-模型预测控制)的自适应路径跟踪控制方法;在系统实现层面,设计了无人船路径跟踪控制系统架构,并解决了 MPC 快速求解、系统状态采集与不可测状态观测问题;在试验验证层面,构建了在室外水池环境下的模型船路径跟踪控制试验平台,并在此平台上完成了 MPC 与比例-积分-微分(Proportional-integral-derivative, PID)路径跟踪控制对比试验,以及基于 LEM 与基于传统 LOS 的 MPC 路径跟踪控制(Traditional LOS & MPC, TLM)对比试验。试验结果表明,构建的无人船路径跟踪控制系统运行稳定可靠,提出的 LEM 自适应路径跟踪控制方法具有更高的路径跟踪控制精度和可靠性。



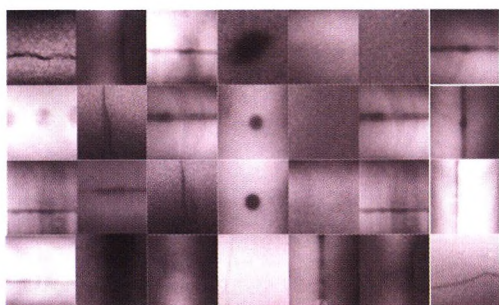


**摘要:** 高速磁浮列车的气动升力是列车悬浮和导向控制的关键气动载荷,以五辆编组高速磁浮列车为研究对象,利用数值计算方法分析高速磁浮列车气动升力的分布规律,研究列车气动升力的影响因素,结果表明,头车和尾车的气动升力分布最为恶劣,车体底部结构对气动升力的分布影响很大,车体底部与轨道梁之间的间隙流场特性决定了气动升力的分布规律。根据高速磁浮列车气动升力的分布规律,提出一种通过控制间隙空间的空气流量来控制列车气动升力的方法,数值计算和风洞试验表明,气动升力控制方法能够显著改变列车的气动升力,实现列车气动升力的精确控制,指导高速磁浮列车的气动升力工程设计。

## 交叉与前沿

### 235 一种改进卷积神经网络模型的焊缝缺陷识别方法

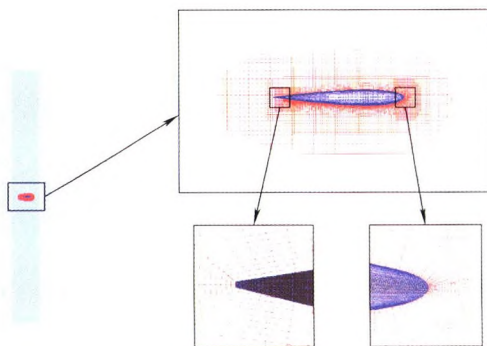
姜洪权 贺帅 高建民 王荣喜 高智勇 王晓桥 夏锋社 程雷



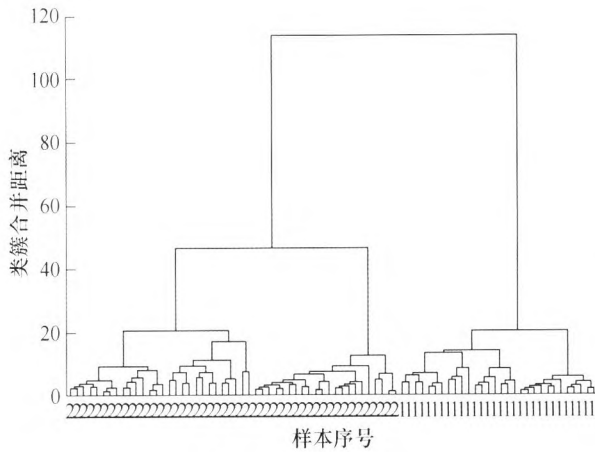
**摘要:** 针对传统卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)应用于焊缝缺陷识别时,池化模型适应差及特征选择能力低、以及易导致过拟合问题,提出了一种基于改进卷积神经网络(Improved pooling model and feature selection of CNN, IPFCNN)的焊缝缺陷识别方法。结合焊缝缺陷图像本身的特点,对传统平均池化模型做出改进,提出一种综合考虑池化域与其所在区域特征图分布的池化模型;为增强模型特征选择能力,提出将随机森林与卷积神经网络相结合的强化特征选择方法。以某汽轮机制造过程中焊缝缺陷识别案例对所提方法进行了验证和说明,结果表明提出的池化模型在处理不同特征分布的池化域时具有动态自适应性,并通过提高特征选择能力,使得所提方法比传统 CNN 方法具有更高的缺陷识别率。

### 243 三维被动摆动水翼对波浪滑翔机推进动力的性能研究

胡峰 赵文涛 黄琰 俞建成 赵宝德 崔健

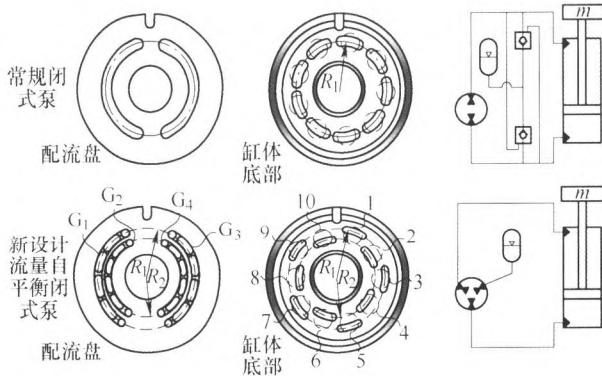


**摘要:** 针对水翼在波浪滑翔机运动中对本体产生的推进力的预报问题,利用 CFD 分析软件 Star-CCM+中的平面运动机构(PMM)模块,对水翼翼板在波浪滑翔机主体随浪升沉过程中产生的升沉和绕自身旋转轴被动摆动的耦合运动过程进行三维模拟。通过对运动过程中水翼产生的推进动力进行分析,探究水翼的波浪参数(波高、周期)和结构参数(展弦比)等对水翼推进性能的影响。研究发现,在相同波高下,水翼摆动角速度与波浪周期成反比;水翼的前向平均推力系数与周期的平方成反比、与波高近似成二次项比例关系;展弦比增加可以增大翼板的平均推力系数,但增加幅度不大。



**摘要:** 黏结漏钢的准确识别和预报对于连铸全流程的控制至关重要。黏结漏钢是连铸过程中最具危害的重大事故,如果不能及时、准确地对黏结漏钢进行提前预测和处置,由此带来的漏报、误报不仅严重损坏铸机设备,还将极大影响铸坯质量和生产顺行,带来巨大经济损失。为了捕捉和识别黏结漏钢时结晶器铜板的温度时序特征,将层次聚类(Hierarchical clustering)与动态时间弯曲(Dynamic time warping, DTW)计算方法相结合,构建并开发了一种基于机器学习的新型黏结漏钢预报方法。与现场服役的漏钢预报系统进行测试和对比,结果显示,建立的方法在保证真黏结 100%报出率的同时,将误报次数降低了近 60%,大幅提高了黏结漏钢预报准确率,避免了由错误报警引起的铸机降速或停机,对于促进连铸过程顺行、稳定和改善连铸坯质量具有积极意义。基于聚类的黏结漏钢预报方法展示出良好的应用潜力,为连铸过程异常监控提供了新思路。

257 新型流量自平衡泵控非对称液压缸运行特性试验研究



**摘要:** 降低液压系统能耗,最直接有效的方法是采用无节流损失的闭式泵控技术,通过改变泵转速或排量,使泵输出流量和压力与负载匹配。但对于应用面超 80%的非对称液压缸,存在液压泵两个油口流量与液压缸两腔流量不一致的问题,必须增设复杂的补油回路,并且当负载或运行速度方向发生变化时,需要补油回路快速准确切换,否则容易导致吸空和大的压力冲击,尤其是轻载工况,两腔压力接近时,系统稳定性更差。为了解决泵控系统的这些问题,创新设计出一种可平衡非对称液压缸流量的三配流窗口流量自平衡液压泵,结构上实现液压泵与液压缸流量始终一致,不需要增设复杂的补油回路即可实现液压缸平稳驱动。为验证新设计方案可行性,首先从原理上分析流量自平衡液压泵的工作特性,并设计制造出试验样机。在此基础上,研究采用制造的液压泵驱动非对称液压缸的运行特性。结果表明,采用新设计流量自平衡液压泵不需要增设复杂的大流量补油回路,即可平稳驱动非对称液压缸;当控制腔发生变化时,液压缸速度与转速之比变化非常小。

**CONTENTS**

- 1 Research Progress on Welding of Magnesium Alloy and Steel Dissimilar Materials**  
SONG Gang ZHAO Shuang LI Taotao LIU Liming
- 13 Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welds on 6063-T6 Aluminum Alloy**  
JING Hongyang FENG Qi XU Lianyong ZHAO Lei HAN Yongdian
- 20 Influence of Surface Modification by Carbon Nanotube on C/C Composite Brazing Joints**  
CHANG Qing ZHANG Lixia SUN Zhan SONG Yihe ZHU Yongan
- 28 Study on Arc Additive Manufacturing Process and Properties of 5356 Aluminum Alloy Rocket Booster Module Transition End Frame**  
GAO Lianling YU Shengfu YU Runzhen HE Tianying SHI Yusheng
- 37 Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Tensile Properties of AlSi10Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting**  
YAN Taiqi TANG Pengjun CHEN Bingqing CHU Ruikun GUO Shaoqing XIONG Huaping
- 46 Defect Tolerance Assessment Method of Fusion Welded Medium and High Strength Al Alloy Joints**  
WU Shengchuan XIE Cheng HU Yanan WU Zhengkai KANG Guozheng
- 60 Dynamic Resistance Monitoring of Nano Silver Paste during Sintering and Thermoelectric Aging Process**  
MA Jingxuan WANG Shang YANG Dongsheng TIAN Yanhong
- 69 Influence of Laser Power on Microstructure of Nb-16Si Binary Alloys Fabricated by In-situ Additive Manufacturing**  
LIU Wei LI Neng REN Xinyu GAO Chao XIONG Huaping
- 77 Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Inertial Friction Welded Ti<sub>2</sub>AlNb Joint**  
ZHOU Jun LIANG Wu WU Yanquan ZHANG Chunbo
- 85 Compound Technique of Welding and Rolling for Aluminum Alloy Based on Thermal Conductivity Constraint and Local Deformation Strengthening**  
SONG Gang CHENG Jiwen LIU Zhenfu
- 92 Method to Obtain Inherent Deformation of Welded Joint Based on the Cutting Technique**  
LIANG Wei SUN Xiaolu

- 99 Forming Properties of Wire Arc Additive Manufactured NiTi Shape Memory Alloy**  
GE Fuguo PENG Bei KE Wenchao AO Sansan CONG Baoqiang QI Zewu ZENG Zhi
- 107 Hypereutectic Al-Si Alloys with Ag-28Cu Interlayer Jointed by Ultrasound-induced Transient Liquid Phase Bonding**  
HE Chaocheng FU Yu WANG Qian HAN Jian CHEN Shengyong YAN Jiuchun
- 113 Stress-free Manufacturing Technology**  
XU Chunguang LI Peilu
- 133 Structural Health Monitoring of Pressure Vessel Based on Guided Wave Technology. Part II: Damage Localization Accuracy Influencing Factors**  
YANG Bin HU Chaojie XUAN Fuzhen LUO Chengqiang XIANG Yanxun XIAO Biao
- 141 Research on Ultrasonic Array Testing Methods of Laser Additive-manufacturing Titanium Alloy**  
LI Wentao ZHOU Zhenggan
- 148 Method for Extracting Hole Parameters of Aircraft Surface Based on Linear Laser Scanning**  
SHI Xunlei DU Kunpeng ZHANG Jiwen ZHAO Anan YANG Li
- 155 Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Helical Savonius Rotor with Twist of 180°**  
ZHU Jianyong LIU Peiqing
- 162 Research on the Speed Control of Hydraulic Wind Turbine Based on Wind Speed Prediction**  
AI Chao GAO Wei CHEN Lijuan ZHANG Yabin GUO Jiawei
- 172 Simulation of Temperature Field of Train Axle-mounted Disk Braking Based on Rotating Heat Flux Method and Uniformly Distributed Heat Flux Method**  
ZHANG Jinyu YU Dalian LIU Shaoqing TIAN Aiqin
- 182 Vibration Characteristic Analysis of Vehicle Systems Due to Wheel Flat**  
LIU Guoyun ZENG Jing WU Pingbo ZHU Haiyan ZHANG Bo
- 190 Aerothermal Effect Generated by Hyper Train in the Evacuated Tube**  
ZHOU Peng LI Tian ZHANG Jiye ZHANG Weihua
- 200 Study on Traction Rod Load Characteristics of High Speed Train**  
YANG Guangxue LI Guangquan ZHOU Junfeng FENG Yonghua
- 207 Experimental Analysis on Characteristics and Source Identification of Interior Noise of a High-speed Train Running in a Tunnel**  
LIU Ming ZHANG Jie GAO Yang JIANG Wenjie XIAO Xinbiao
- 216 Adaptive Path Following Control System for Unmanned Surface Vehicles**  
LIU Chenguang CHU Xiumin MAO Qingzhou XIE Shuo
- 228 Aerodynamic Lift Force of High-speed Maglev Train**  
DING Sansan YAO Shuanbao CHEN Dawei

- 235 An Improved Convolutional Neural Network for Weld Defect Recognition**  
JIANG Hongquan HE Shuai GAO Jianmin WANG Rongxi GAO Zhiyong WANG Xiaoqiao  
XIA Fengshe CHENG Lei
- 243 Study on Propulsion Performance of Three-dimensional Passive Swinging Hydrofoil on Wave Glider**  
HU Feng ZHAO Wentao HUANG Yan YU Jiancheng ZHAO Baode CUI Jian
- 250 Development of Sticking Breakout Prediction Method Based on Hierarchical Clustering of Temperature Timing Characteristics in Continuous Casting**  
DUAN Haiyang WANG Xudong YAO Man
- 257 Experiment Study on Operation Characteristics of New Flow Self-balancing Pump Controlled Asymmetric Hydraulic Cylinder**  
ZHAO Bin GUO Weiwei GE Lei HAO Yunxiao QUAN Long



# 《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) 张崢(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)

