

中国材料大会 2024

暨第二届世界材料大会

CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024

Guangzhou, China

**E15-微细加工与成形及晶体塑性
力学应用**

**E15-Micro-Processing/Forming and
Crystal Plasticity Method**

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

E15. 微细加工与成形及晶体塑性力学应用

分会主席：张士宏、喻海良、李落星、夏琴香、李恒

E15-01

Crystal Plasticity and Its Application to Metal Forming

Yao Cheng¹, Guowei Zhou², Yunchang Xin¹, Dayong Li³, Peidong Wu^{4,*}

1. Key Laboratory for Light-weight Materials, Nanjing Tech University, Nanjing, China
2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China
3. State Key Laboratory of Mechanical Systems and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China
4. Department of Mechanical Engineering, McMaster University, Hamilton, Canada

The classical crystal plasticity theory and recent advances, in particular large deformation self-consistent models considering elasticity and strain rate sensitivity as well as twinning and anti-twinning, are first briefly reviewed. After validating the constitutive models through several typical examples, the constitutive models are applied to analyze some critical issues in forming of light metals, including the forming limit diagram, bendability and surface defects of sheet metals.

主题报告

E15-02

晶内/晶界强韧化及损伤断裂行为的 CPFE-CZM 方法

孙朝阳*

北京科技大学

为解决典型轻质高强材料在成形及服役中微结构损伤和断裂行为难以精准预测的难题，本研究结合应变能损伤模型的晶体塑性（CPFE）和幂定律损伤演化的内聚力模型（CZM），提出了晶内和晶界损伤归一化准则，建立了能够阐释滑移和孪生耦合增强增韧及晶内和晶界竞争损伤断裂的 CPFE-CZM 方法。通过原位 SEM/EBSD 微力学试验和间断应变的 TEM 表征方法研究了 TWIP 钢和 ZK60 镁合金的塑性变形机制及损伤断裂行为，证实了 CPFE-CZM 方法的可靠性。通过构建代表性体积单元（RVE），探究了晶粒尺寸、晶粒取向差角度和初始微空洞对晶内和晶界强韧化和损伤断裂行为的影响，获得了以 TWIP 钢和 ZK60 镁合金为代表的典型轻质高强材料损伤失效行为的尺寸敏感性，晶粒取向差效应和初始微缺陷诱导效应。此外，建立的 CPFE-CZM 方法成功拓展应用于典型轻质高强材料的成形极限及高温沿晶损伤断裂行为的预测，为后续制造和成形工艺的制定提供了理论参考。这项工作不仅填补了晶内和晶界损伤失效统一建模的空白，而且为板材成形中的微结构性能预测提供了可靠的方法和分析策略。

邀请报告

E15-03

超细纤维晶钢强韧行为的晶体塑性有限元研究

张旭*

西南交通大学

随着工业技术的发展，对金属材料的性能要求日益提高，其中强度与韧性的协同优化成为了材料科学领域的一大挑战。超细纤维晶钢因其独特的多级多尺度层状异质结构，其中等轴晶表现出更强的硬化能力，细长晶表现出更高的屈服强度，这使其在强度和韧性的协调提升上展现出了巨大的潜力。本研究采用基于位错机制的非局部晶体塑性本构模型，对超细纤维晶钢单轴拉伸变形进行数值模拟，旨在深入解析其内在

的强化机理。本研究重点关注几何必需位错(GND)与背应力强化作用的量化,以及初始位错密度、晶粒长径比和织构对材料力学性能的影响。结果显示, GND 和背应力的强化效果与材料的初始位错密度密切相关,高初始位错密度限制了这一强化作用。此外,材料的长径比会影响 GND 强化作用,初始织构对于材料的拉伸性能及微观变形行为也会产生显著影响。通过对比分析,揭示了超细纤维晶钢的微观结构对其宏观力学性能的影响规律和机理,为超细纤维晶钢的设计与应用提供了理论基础和指导。本研究不仅丰富了材料微观机制与宏观性能关联的理论知识,也为高性能金属材料的开发与优化提供了新的思路。

邀请报告

E15-04

超铁素体不锈钢轧制及退火全程织构演化的介观建模研究

张弛*, 宋康杰, 张立文

大连理工大学 材料科学与工程学院

随着铁素体不锈钢板材的成形性能与微观组织及织构密切相关,其微观组织和织构主要在冷轧退火热处理过程以再结晶方式形成。澄清冷轧退火过程中铁素体不锈钢组织和织构的演化规律,有助于高成形性铁素体不锈钢加工工艺的制定。然而,冷轧退火的微观组织及织构演化不仅受多工艺参数的影响,还与区域晶粒的交互作用相关,使得组织和织构演化呈现复杂性。

本研究以铁素体不锈钢为研究对象,开展冷轧退火工艺实验,分析了微观组织、宏观织构及微区织构随冷轧退火工艺参数的演化特征。同时,开发了针对铁素体不锈钢 BCC 结构的多晶形变的晶体塑性模型,以及含晶体取向状态变量的再结晶元胞自动机模型。结合实验研究和数值计算研究,以期澄清多因素对铁素体不锈钢织构演化的影响规律。该工作为进一步分析铁素体不锈钢再结晶织构形成机制提供了有效工具,也有助于定量预测再结晶织构,为高成形性能铁素体不锈钢制备提供一定的理论基础。

口头报告

E15-05

基于时序-图神经网络的跨尺度多晶体变形模拟

周国伟*, 胡袁哲, 李大永

上海交通大学

机器学习方法在材料本构建模中展现出了巨大的应用前景,能够很好的平衡计算精度与效率之间的关系。由于机器学习相关的材料本构建模研究仍处于起步阶段,现有的机器学习材料本构模型主要针对单晶或多晶体平均响应开展建模预测,忽略了晶粒与晶粒之间的局部交互作用。本文提出了一种新的时序-图神经网络模型,通过图网络(GNN)考虑不同取向晶粒之间的空间交互作用,结合时序网络(MSC),实现了多晶体变形中单晶粒取向、应力应变与整体平均变形响应的两个尺度的高效预测。所建立了时序-图神经网络模型能够实现复杂加载下多晶体变形的准确预测,包括循环加载和随机路径加载,展现了效率与精度的平衡计算,并可以显式建模晶粒与晶粒之间的交互作用。

口头报告

E15-06

轻质高强金属复杂加载状态下塑性变形和损伤断裂特性表征

娄燕山*

西安交通大学机械学院

金属材料因其优异的机械性能广泛应用于汽车、航空航天、国防等领域。本汇报综合回顾轻质高强金属应变强化特性、各向异性、拉伸-压缩非对称性、包辛格效应、应变率效应、温度效应、损伤断裂等塑性变形特性及其本构模型表征方法。然后，介绍金属塑性本构模型在 Ansys LS-DYNA/ABAQUS 等有限元软件二次开发相关的接口和算法。最后，介绍先进本构模型在塑性成型断裂预测、冲击吸能、回弹预测、穿甲模拟、拓扑优化等领域的典型应用。

邀请报告

E15-07

不同加载条件下三维晶体塑性模拟的稳健可扩展代理模型

余国卿, 唐学峰*, 王新云, 邓磊

华中科技大学

晶体塑性 (CP) 方法是预测多晶材料细观响应的有力工具, 但计算成本高昂。这项工作的目的是开发一个训练有素的神经网络模型, 用于三维 CP 模拟的代理建模。为此, 开发了一种基于自注意机制的三维卷积神经网络来预测全场 von Mises 应力应变和取向演化。讨论并评估了代理模型的预测能力及其对不同尺寸的代表体积单元 (RVE) 的可扩展性。结果表明, 该替代模型准确地预测了复杂载荷条件下的宏观和细观响应, 包括单轴拉伸、单轴压缩、简单剪切以及等双轴拉伸-拉伸和双轴拉伸-压缩。与 CP 模拟相比, 代理模型的速度提高了~2500 倍。这项工作进一步加深了对 CP 模拟数据驱动代理建模的理解, 并支持代理模型应用于不同尺寸的 RVE 和不同的加载条件。

邀请报告

E15-08

基于镁合金微观变形机制的全耦合损伤模型构建及板材成形失效预测

张凯*

山东科技大学

精确预测镁合金板材塑性变形与损伤失效是实现镁合金复杂薄壁构件高精度、高性能制造的关键, 构建先进的本构模型是实现高精度仿真预测的关键手段。由于轧制等加工工艺形成了织构, 镁合金板材呈现强烈的各向异性和拉压非对称行为, 在压缩加载路径下呈现奇特的 S 形应力-应变响应。这些复杂的宏观力学行为依赖于镁合金自身的密排六方晶体结构, 与滑移、孪生、退孪生微观变形机制及织构演化密切相关, 给镁合金板材成形制造过程中损伤失效的精确预测带来巨大困难。为描述复杂成形制造路径下镁合金塑性变形与损伤失效, 本文基于镁合金微观变形机制, 使随动硬化和等向硬化依赖于塑性应变演化, 提出一种描述硬化非对称的模型。同时, 在连续介质力学框架下, 提出了一个符合热力学一致性的各向异性塑性与韧性损伤全耦合的本构模型。基于所构建的本构方程, 通过 ABAQUS/Explicit 用户子程序 VUMAT 实现有限元数值计算, 采用单个单元模拟在不同加载路径下材料点的力学响应, 展示了所提出的本构模型在不同加载路径下应力-应变响应和损伤预测的能力。最后, 将模型应用到镁合金板材成形过程的数值模拟, 并与实验结果进行对比, 验证了本构模型在镁合金板材成形制造中损伤破坏预测的精度。

口头报告

E15-09

宽应力三轴度下固溶态 2219 铝合金的韧性断裂行为与建模方法

余嘉文, 樊晓光*, 王俐, 王志军, 詹梅

西北工业大学

高性能可热处理的 2219 铝合金广泛应用于运载火箭的承重构件制造。基于固溶处理-冷成形-人工时效的 T8 态成形工艺已获得广泛应用，能有效提升该类构件的强度。因此，掌握初始 W 态 2219 (2219-W) 铝合金的可加工性和韧性断裂行为对工艺设计至关重要。本研究采用混合实验-数值方法系统地研究了 2219-W 合金的韧性断裂行为。研究表明，2219-W 合金在拉伸和剪切测试中表现出优异的塑性，但在压缩和平面应变拉伸测试中断裂较早。尽管断口分析表明其以剪切为主的失效机制，但断裂应变随 Lode 参数和应力三轴度的变化与具有相同失效机制的常规材料大不相同。剪切试验中的高断裂应变可归因于 Portevin-Le Chatelier 效应以及在大剪切变形下材料相对于最大剪切面的旋转。为了模拟这种异常断裂行为，我们使用修正的 Schmitt 参数来量化变形中最大剪切面变化 (MSPV) 效应，然后采用高斯函数计算损伤累积的延缓因子。通过将该延缓因子整合到 Hosford-Coulomb 模型中，建立了一个具有连续性和简洁性的新韧性断裂准则。该模型在各种变形模式下实现了更高的预测能力。本研究有助于更深入地理解 W 态铝合金的韧性断裂，为通过其它手段提升其可加工性提供了理论基础。

口头报告

E15-10

一种覆盖宽泛应力状态的耦合型各向异性屈服准则：建模与验证

都凯^{1,2,*}, 孙亮¹, 任彦强¹, 崔建华¹, 侯勇³, 杨岩峰⁴, 李小强⁵, 袁晓光^{1,2}

1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院
2. 高端装备铸造技术全国重点实验室
3. 多特蒙德工业大学轻量化结构与成形技术研究所
4. 西北工业大学材料科学与工程学院
5. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院

高金属板材在成形过程中通常伴随着单轴拉伸、等双轴拉伸、近平面应变与简单剪切等载荷的共同作用，然而，现有屈服准则通常难以精确描述材料在多种应力状态下的塑性行为。为此，本研究在非关联流动法则下提出了一种覆盖宽泛应力状态的耦合型各向异性屈服准则，并在满足凸性定理的前提下，通过选定试验数据半解析地校准了屈服应力函数和塑性位势函数的各向异性系数。将新开发屈服准则与几种现有的先进屈服模型 (CFI2023、Min2016、CQN2022、BBC2005、Yld2004-13p、Eyl2000-2d、Poly4*Hosford) 应用于 DP490 与 AA6016-T4，定量评估了不同屈服准则对两种板材的塑性功等高线与塑性应变率方向的预测精度。结果表明，相比考察的其它 7 种先进屈服准则，新模型对 DP490 与 AA6016-T4 的各向异性屈服和塑性流动行为均给予了最佳的表征精度。在确保单轴和等双轴拉伸应力状态预测精度的同时，还应当为简单剪切与近平面应变载荷提供精确表征。

口头报告

E15-11

能场直接/间接辅助超薄钛板微流道成形技术研究

闵峻英*, 张翔鹭, 杨代军, 明平文, 张存满
同济大学

双极板是燃料电池的核心部件之一，其流道精细程度和制造精度对燃料电池的功率密度和使用寿命具有重要影响。钛兼具轻量化、耐蚀性高、机械性能卓越等多重优势，是未来重要的极板基材。然而，常温成形钛极板时成形极限较低且回弹较大，制约了燃料电池的高性能发展。提出了能场辅助超薄钛板成形新方法，包括电加热高温成形工艺，以及在多步冷冲压成形工序间引入电场/热场的能场间接辅助超薄钛板成形工艺。研究了热效应和电效应对超薄钛板力学性能及微观组织的影响。能场直接/间接辅助钛极板冲压成形实验结果表明能场直接/间接辅助均有利于提升超薄钛板微流道成形极限和成形尺寸精度。

主题报告**E15-12****增材制造和热轧工艺联合制备高强高韧铝合金异质板**

向瀚林, 徐从昌*, 李落星
湖南大学

高铝合金异质板因其卓越的机械性能和抵御弹道导弹穿透的能力, 在汽车、军事、航空航天等领域具有巨大的应用潜力。在本研究中, 通过电弧增材制造和热轧 (WAAM+HR) 工艺制备了一种高强度-延展性及界面冶金结合强度优异的 5356/7A48 铝合金异质板。其屈服强度和极限抗拉强度分别为 280.2 MPa 和 392.3 MPa, 两者都介于 5356 和 7A48 合金之间, 但延伸率优异, 达到了 22%。其出色的综合机械性能远超过之前研究中报道的 Al/Al 异质板。此外, 与传统复合板相比, 其断裂位移提高了 48.8%, 显示出极高的层间结合强度。软层 5356 和硬层 7A48 分别承受了主要的塑性应变和正应力, 导致层间界面处的背应力强化, 这是强度与塑性协同效应的根本原因。此外, 即使在最大弯曲角度为 180 度时, 异质板也未出现任何断裂迹象, 这归功于外层软覆层承担了大部分弯曲变形。异质片层结构、硬层对软层的高约束以及界面的高几何必需位错 (GNDs) 密度有效激发了背应力强化和位错硬化, 从而使 5356/7A48 铝合金异质板展现出优异的综合机械性能。本研究提出的 WAAM+HR 工艺为制备具有高强韧性和卓越结合强度的多功能异质板提供了一种方法。

邀请报告**E15-13****电磁驱动流体成形铝合金增塑机制和复杂构件精准制造**

崔晓辉*, 颜子钦, 阳光
中南大学

为了提高铝合金材料的成形极限并实现复杂构件制造, 提出了利用脉冲磁场力驱动流体 (液体和气体) 的成形方法。建立了能够预测板料自由胀形和有模成形过程的电磁场-结构场-流场耦合仿真模型。分析了流体初始压强、放电电压、成形顺序等对材料宏微观断裂变形、微观空洞演变、瞬态流体压强和零件成形精度的影响规律。建立了考虑空洞变化规律的增塑性理论模型, 采用宏微观实验验证了仿真模型和理论模型的准确性。以复杂微细结构为研究对象, 探讨了零件成形深度与均匀性的影响因素, 最终实现了典型构件的精准制造。

邀请报告**E15-14****7050 铝合金环件多尺度残余应力表征**

杨艳慧*, 梁正霏, 张智宏
西北工业大学

随着铝合金环件在制备与加工过程中呈现多尺度的残余应力分布特征, 环件在产生宏观残余应力的同时也会产生微观残余应力。宏观残余应力的释放和重新分布会引起工件在加工和服役过程中变形, 影响其尺寸精度, 与外力叠加后使工件强度降低, 降低工件疲劳极限。微观残余应力与外力的联合作用下, 易造成微区应力集中, 使工件在远小于屈服应力下局部产生微裂纹并导致断裂。晶体塑性理论是一种基于晶体材料塑性变形机理和连续介质力学理论的本构理论, 可以在介观尺度上较为精准地描述金属材料的塑性变形行为。

本文利用 ABAQUS 软件研究 7050 铝合金环件在固溶-胀形-时效过程中的宏观变形行为, 并将模拟的残余应力结果与短波长法测得的残余应力对比, 验证有限元模型的准确性。随后, 根据宏观有限元模拟结果确定感兴趣微区, 提取其应变历史, 利用 ABAQUS 软件将应变历史施加至对应位置的微观多晶模型上, 采用晶体塑性有限元模拟, 研究微观残余应力分布规律及其与微观组织的关系。

得到结论如下:

(1) 7050 铝合金环件在固溶-胀形-时效后的残余应力与短波长法测得的残余应力接近, 有限元模型可信度高。

(2) 微观残余应力分布具有明显的不均匀性, 在晶界和三叉晶界处存在着明显的应力集中。

(3) 造成 (2) 中现象的原因是: ① Schmid 因子与残余应力呈正相关, Schmid 因子较大的晶粒具有更高的残余应力值; ② GND 密度和微观残余应力分布一致, 高 GND 密度主要集中在晶界和三叉晶界附近。

口头报告

E15-15

铝合金大截面带内筋箱体辊轮拉拔一体成形工艺研究

闫钊鸣^{1,2}, 郑杰³, 薛勇¹, 王强^{1,2}, 张治民^{1,2,*}

1. 中北大学材料科学与工程学院
2. 国防科技工业复杂构件挤压成形技术创新中心
3. 重庆理工大学

本研究提出了一种大截面内纵高筋薄壁方箱辊轮拉拔成形方法。研究了载荷和应力随参数变化的规律, 建立了成形力计算公式和成形极限图; 揭示了模具和工艺参数对应力应变分布和内筋充填效果的影响规律, 阐明了方箱辊轮拉拔变形行为。研究了预制坯的变化对金属流动和内筋充填的影响, 进一步掌握了预制坯结构参数对成形载荷和缺陷的影响规律, 提出了辊轮拉拔预制坯的设计方法; 制定了不同规格方箱的成形工艺方案, 试制出了 814 x 814 x 2000 mm 规格的壁厚 8 mm、内筋高度 18 mm 和内筋宽度 46 mm 的铝合金大截面内纵高筋薄壁方箱, 为该类方箱的成形的金属流动控制和精密成形提供了理论基础和技术指导。

口头报告

E15-16

深冷预变形提升铝合金时效处理效率与性能微观机制

喻海良*

中南大学

随着环境污染和能源危机等问题的日趋严重, 为实现节能减排, 轻量化已成为汽车等制造业发展的主流趋势, 这推动了轻质材料铝合金的广泛使用。其中可热处理强化的 6xxx 系铝合金由于具有中等强度、良好的焊接性能和成形性而广泛用于制造车身外板, 这类构件需要在冲压成形后进行烘烤处理以提升强塑性。由于短时烘烤工艺无法充分发挥合金的析出强化潜力, 目前车用铝合金板存在烘烤硬化响应不足的问题, 常规的室温轧制预处理工艺对材料烘烤后强塑性的提升效果接近瓶颈, 需要开发新型预处理工艺以进一步提高烘烤硬化响应。对比了深冷轧制预处理和室温轧制预处理对 6061 铝合金微观组织的影响。发现同一压下量下, 深冷轧制试样的晶粒尺寸小于室温轧制试样, 同时晶粒内小角度晶界比例高于室温轧制试样。根据 X 射线衍射和电子背散射衍射试验, 可知深冷轧制试样位错密度高于室温轧制试样, 这为 β'' 相的析出提供了更多的形核位点。然后开展了 5%、10%、15% 以及 20% 压下量的深冷轧制预处理试验对 6061 铝合金烘烤硬化响应的影响研究。与未进行预变形处理的试样相比, 当深冷轧制的压下量从 5% 增加到 20% 时, 可使试样在自然时效阶段内屈服强度和抗拉强度的增幅分别降低 58.7%~66.8% 和 10.9%~29.5%, 烘烤处理过程中对应的增量分别提高 30.6%~70.6% 和 341.9%~580.6%, 轧制预处理对试样烘烤硬化响应的提升

效果随着压下量的增加而增加。

邀请报告

E15-17

Crystal plasticity modelling of continuous dynamic recrystallization in hexagonal close-packed metals

Shuai-Feng Chen¹, Hong-Wu Song¹, Shi-Hong Zhang^{1*}, Myoung-Gyu Lee²

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China

2. Department of Materials Science and Engineering & Research Institute of Advanced Materials (RIAM), Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

For hexagonal close-packed metals (Mg, Ti, Zr etc.), the occurrence of dynamic recrystallization (DRX) mechanism is varying with the ongoing activation of multiple slip systems and twinning. As a key type DRX mechanism, the continuous DRX (CDRX) is greatly affected by the activity of different slip systems. Here, we conducted quasi in-situ EBSD observation for AZ31 magnesium alloy. With quantitatively analysis of the evolution of subgrain and recrystallized grains, the roles of matrix orientation and grain boundary features on CDRX behavior are critically examined. It is found the matrix orientation plays critical a role on the formation of subgrain, while formation of recrystallized grains is more decided by combination effect of matrix orientation and grain boundary. Based on these experiment results, physical modeling of CDRX behavior in magnesium alloy is established in couple with crystal plasticity (CP) method. In the developed CP-CDRX modelling, the different roles of basal and non-basal slips on subgrain formation and their evolution to new grains. Resultantly, the strong dependency of CDRX behavior on loading direction and grain orientation is successfully predicted with high accuracy. Besides the grains size and DRX fraction, the flow stress, grain boundary features, texture type can be simultaneously obtained with the CP-CDRX simulation.

邀请报告

E15-18

α -Ti 在超声辅助压缩中各向异性和非均质的声塑性行为

张海栋, 邓磊*, 唐学峰, 王新云

华中科技大学

在塑性成形过程中引入超声振动(UV)是提高金属材料变形能力的一种有前途的有效方法。然而在 α -Ti 的超声辅助变形过程中, 各向异性声塑性行为仍未得到很好的理解, 并且超声效应对多个滑移/孪晶系统的作用机制也不明确。本研究通过建模和实验探究了 α -Ti 各向异性和非均质的声塑性行为。提出了一种考虑多滑移和孪生系各向异性超声响应的声晶体塑性模型, 该模型考虑了晶体取向、临界分切应力和超声能量密度的对声塑性行为的耦合效应。通过 α -Ti 试样沿 RD、TD 和 ND 方向的超声辅助压缩的力学响应和孪生体积分数验证了所提出的模型, 并进行了超声辅助压缩过程的全场晶体塑性模拟。然后, 通过分析多个滑移/孪晶系上的超声活性和晶粒尺度的变形行为, 探索了 α -Ti 的声塑性机理。发现 α -Ti 具有显著的各向异性和非均质的超声软化效果, 并且各向异性和超声软化幅度随超声能量密度的增加而增加。从 RD、TD 到 ND 试样, 超声激活的变形模式逐渐从棱柱滑移和拉伸孪生转变为基底滑移和压缩孪生, 导致宏观上平均 CRSS 降低幅度更大, 使超声软化更明显。超声作用下缓解了 α -Ti 在晶粒尺度的应力不均匀性, 局部变形能力和晶粒旋转均得到增强。位错运动和孪生行为都在超声作用增强。增强的孪生行为可以归结于超声作用下位错辅助形核和扩展行为的增强。这些发现为 α -Ti 在超声辅助变形过程中各向异性和非均质的声塑性行为提供了基本的理解。

口头报告

E15-19

Ti6554 电辅助变形实验研究及多场多尺度建模仿真与应用

武川*

天津职业技术师范大学

航空航天装备制造高质量发展，对紧固件性能提出高要求。钛合金紧固件航空航天装备连接部位发挥举足轻重作用。钛合金紧固件开发已成为我国高端装备快速发展的关键突破环节，而紧固件棒坯是决定其质量优劣的一个关键因素。常规工艺制备棒材微观均质性需要进一步改善。微观组织不均匀会降低抗剪切强度和安全性，已成为制约国产钛合金紧固件质量提升的一大瓶颈。将脉冲电流引入到常规工艺中，利用焦耳热效应和非热效应，发挥电致塑性效应，可降低成形载荷，强度-塑性提高，晶粒得到细化，组织均匀性得到提高。电流辅助变形是一种新型成形方法，可能成为打破上述瓶颈的有效手段。因此，研究钛合金电辅助变形行为、微观组织演化机制、强塑韧化机制及工艺优化方法具有重要的理论和工程意义。本研究为制备均质高强钛合金棒材提供了新的思路和方法，为国产紧固件高质量发展提供必要实验数据和结论支撑。本文以高强 T6554 合金为对象，采用电辅助变形试验、组织表征、力学性能测试和多物理场建模等技术手段，研究工艺参数对宏观变形、微观组织演化和力学性能的影响规律，揭示焦耳热效应和非热效应影响机制，阐明电致塑性原理，并结合机器学习进行电辅助工艺优化，相关结果与试验进行验证对比。

口头报告

E15-20

大厚径比耐蚀铜合金管材流动旋压成形特征及表面缺陷研究

夏琴香^{1,*}，赵杰¹，肖钢锋¹，汤德林²，崔华春²

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院
2. 烟台万隆真空冶金股份有限公司

针对大厚径比耐蚀铜合金管材流动旋压中易出现铲料和起皮缺陷的问题，提出采用有限元模拟对其成形过程进行分析，探索轴向旋压力、隆起高度、应力应变等成形特征与表面缺陷之间的关系。以外径 400mm、壁厚 40mm 的 BFe10-1-1 铜镍合金管材为研究对象，基于 Abaqus/Explicit 建立了多道次流动旋压有限元模型；通过轴向旋压力的变化特征对旋压成形阶段进行了划分，分析了成形中材料的隆起过程，研究了变形区的应力应变特点，探索了等效应变随成形道次的变化规律。结果表明：由于大厚径比结构特点及材料的低变形抗力和显著加工硬化现象，流动旋压过程中旋轮前方材料隆起严重，变形区应变呈现明显的梯度分布；铲料缺陷与材料隆起有关，隆起高度及隆起角度过大使得成形区隆起的材料在与未成形区过渡处出现较大的剪应力，当其超过材料剪切屈服强度时，材料内凹并破裂，出现铲料缺陷；起皮缺陷分为材料剥落及鱼鳞状表面两类，材料剥落与旋压力过大有关，使得管材表面与旋轮之间的摩擦力增加，导致管材表面与旋轮粘连并被扯裂；鱼鳞状表面与外表面应变过大有关，多道次成形使得表面材料逐渐硬化饱和并失去流动能力，被旋轮压入表面产生鱼鳞状折叠。

主题报告

E15-21

高性能复杂微细构件多向加载柔性成形技术

孟宝*

北京航空航天大学

针对航空发动机用微型折叠滤网、叶片冷却导管等微细构件的高效、精密成形制造难题，研究了阵列微孔金属带材变形行为与失效模式，建立了耦合微孔特征尺寸的韧性断裂准则。在此基础上，开展折叠滤网、叶片冷却导管等构件微细成形工艺方案评估，确定了可行的工艺方案并优化了工艺参数，讨论多向加载柔性成形过程中流体压力、橡胶硬度等对微细构件成形质量的影响规律。同时，开展了微细构件多向加载模具设计与加工，通过实验验证了多向加载柔性成形技术在解决高性能复杂微细构件精密成形方面的有效性，实现了折叠滤网、叶片冷却导管、混合能堆微靶等微细构件的高效、精确、低成本制造。

邀请报告

E15-22

纳米多层复合材料塑性变形行为及界面强化机制研究

丁朝刚^{1,2}, 李虎山², 徐杰^{1,2,*}, 单德彬^{1,2}, 郭斌^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室
2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

纳米多层金属复合材料作为一种新型的纳米结构材料，由于内部独特的连续层状结构和高密度界面，表现出优异的综合力学性能和物理性能，如高强度、高热稳定性、高导电性及耐辐照损伤性能等，在能源电力、航空航天、集成电路等领域展现出巨大的应用前景。然而，纳米多层金属复合材料的制备主要采用“自下而上”的沉积工艺，然而该工艺存在周期长、效率低、成本高等缺点，难以满足实际工程应用需求。然而，目前的研究工作多基于纳米压痕测试的微区硬度结果对材料变形行为进行理论分析，难以建立材料微观组织与宏观塑性变形之间的联系。本文以累积叠轧制备的铜/铌多层复合材料为研究对象，研究了拉伸过程中层状结构对材料塑性变形行为影响；此外，采用分子动力学方法对 Cu/Nb 纳米多层复合材料拉伸过程进行模拟，结合拉伸实验结果，对塑性变形过程中材料界面与位错的交互作用进行分析，阐明 Cu/Nb 纳米多层复合材料的界面强化机制。

邀请报告

E15-23

指尖三维触力薄膜传感器的原位电化学辅助成形新工艺

曹志勇*

湖北大学

智能制造中人形机器手指和微机电对形貌、结构功能要求特殊的三维触力薄膜传感器的需求日渐巨大。常规集成电路、光刻等工艺只适合加工平面薄膜传感器。其基底往往采用塑性变形性能差的高强合金材料，现有多能场辅助手段虽然可以提升基底材料的塑性，但同时会对其表面的薄膜造成一定程度的破坏。另外，常规装置的结构与工艺复杂，难以安装相应的模具与设备。这种传感器的塑性成形涉及变形抗力大，薄膜传感灵敏性和力学性能不易保证两个工艺难点。新的三维微尺度传感器加工方法，必须要能从结构和功能上突破常规工艺在成形这类传感器上的瓶颈。

项目提出一种原位电化学辅助塑性成形工艺，主要工艺特色为：将绝缘好的微模具置入装满电解液的化学反应池中，在电化学工作站的调控下采用多工位（切口，拉深和切料三步）级进方式连续进料成形，借助多能场（电场和化学场）协同，可以有效减少成形时高强材料的变形抗力。所需工艺装置简单，设有废料清理和取件气压吸孔，效率高，既可以成形三维曲面薄膜的微器件，也可用于加工平面薄膜传感器。塑性成形和电化学成膜工艺原位同步进行，可以有效避免现有多能场辅助以及二次成膜工艺对表面功能薄膜的破坏。触力手指薄膜传感器上设有触点微结构，使得制备的具有传感功能的弹性薄膜兼具优异的触力响应电阻特性，以及良好的成形润滑性能。另外连续成形过程中薄膜的迁移及厚度减薄可以在持续的电化学场能作用下得到在线及时修复。

项目主要创新点：提出了一种新的微尺度三维传感器件成形工艺方法，将塑性成形技术和成膜工艺进行有机结合；提出了一种新的多场耦合下的理想变形-弹塑性粘着接触力学-薄膜生长耦合失稳理论模型；提出了一种新的形/性一体化控制方法和理论，可以实现对薄膜传感器的成形与成膜过程中失稳、接触损伤，及薄膜生长与演变过程控制。项目的立项对于揭示三维薄膜传感器成形中的关键科学问题，促进微传感器成形领域的技术进步，具有非常迫切和重要的研究意义。

口头报告

E15-24

Inconel 718 高温合金薄板微精冲成形研究

纪开盛, 刘艳雄*, 周旺标, 张涵, 龚宇澄

武汉理工大学

近年来, 微型化关键构件在航空航天、核工业、汽车、武器装备、能源、电子、电气等领域需求量不断快速提升。为了应对严苛的服役环境考验, 具有优异综合性能的镍基高温合金薄板成为这些领域微型构件的关键材料, 如何实现镍基高温合金微型化关键构件高质量冲裁成为研究的热点与亟需解决的关键课题。因此, 本文针对当前微冲裁研究中存在断面撕裂带的问题, 基于精冲理论提出了微精冲工艺, 以 Inconel 718 高温合金薄板为研究对象, 并针对冲裁断面和工艺力能参数演变规律开展成形研究, 实现镍基高温合金微型构件高质量微精冲成形。

研究表明, 微精冲工艺能够获得没有撕裂带的冲裁断面。随着晶粒尺寸增加, 冲裁断面中塌角深度逐渐增加, 毛刺高度逐渐降低; 随着 γ/γ'' 相含量的增加, 冲裁断面中塌角深度及毛刺高度均减小。基于 Inconel 718 高温合金薄板拉伸屈强比对微精冲冲裁力工艺系数的影响关系, 提出了微精冲最大冲裁力计算方法。在此基础上, 有限元模拟和理论分析确定压边力是提高微精冲成形断面质量的关键成形工艺参数, 有别于宏观精冲, 晶粒尺寸与析出相含量均会影响所需压边力的大小。研究确定了实现全光亮带冲裁断面的压边力工艺系数, 提出了微精冲压边力计算方法, 为微精冲工程应用提供理论支持。

口头报告

E15-25

Coupled quantitative modeling of microstructural evolution and plastic flow during continuous dynamic recrystallization

Fei Chen *

Shanghai Jiao Tong University

Continuous dynamic recrystallization (cDRX) dominates microstructural evolution during the hot working of metallic materials with high stacking fault energy (SFE), such as aluminum alloys. However, in reality, a lack of quantitative and visual modeling of the process hinders its widespread application in the hot working process. In this study, using a recently developed multilevel cellular automaton (MCA) that integrates the newly established cell switching rules and topology deformation technique, a novel mesoscale MCA-cDRX model was constructed to investigate the evolution of both microstructures and macroscopic mechanical response in the hot working of AA7075 aluminum alloy. By considering the evolution of dislocation density and the orientation angle of the local cells as the primary clues, the plastic flow, recrystallization kinetics, features of subgrain size and high-angle grain boundaries, and influence of initial matrix characteristics on the cDRX mechanism were analyzed. The model predictions are consistent with the experimental data. Quantitative analysis confirms that the incubation time for the initiation of subgrain formation is significantly short. The fine-grain matrix and high initial volume fraction of low-angle grain boundaries can significantly accelerate the progress of cDRX owing to a stronger accumulation of

dislocations in the dislocation cell walls through the climb and cross-slip mechanisms in the deformed aluminum alloy. The subgrain size is dependent on the Zener-Hollomon parameter. The developed simulation framework offers an effective means to allow the visualization of the cDRX.

邀请报告

E15-26

Zr 合金 LOCA 条件下相变及力学行为模拟

李学雄¹, 王小齐¹, 孟子凯¹, 张金虎¹, 黄剑瑜², 高长源², 徐东生^{1,*}, 杨锐¹

1. 中国科学院金属研究所, 沈阳, 110016
2. 中广核研究院有限公司, 深圳, 518028

采用多尺度模拟研究了锆合金在辐照条件下的蠕变、氧化、以及失水事故对力学性能的影响。分子动力学模拟了不同晶粒尺寸的 α -Zr 纳米晶的拉伸蠕变过程, 分析了其主要影响因素及多晶结构演化及变形机制, 结果表明随着变形加大, 部分晶粒明显长大, 晶界区域部分无序原子比例逐步增多; 升高温度和应力加速蠕变过程及组织演变, 同时使晶界宽化, 辐照后的体系蠕变应变更高。通过相场耦合弹性能及静电势能, 模拟得到不同温度下, 由氧扩散控制的有无辐照条件下的锆合金氧化膜生长动力学曲线; 平行于氧化物-金属界面的压应力, 随着氧化膜厚度的增大而增大, 辐照模拟中考虑了第二相粒子在辐照作用下发生非晶化导致 Fe 的释放进入氧化物, 造成锆合金早期氧化膜生长速率的提高。基于率相关的晶体塑性方法研究了不同 α 相含量和织构特征对锆合金 LOCA 条件下力学性能的影响, 结果表明, 随 α 相含量升高, 合金强度降低; β 相中平均应力较高, 而 α 相中平均应变较高, 整体应力协调系数先略微降低而后升高, α/β 或 α/α 晶粒混合微区易发生晶体旋转; 随 Basal- α 织构提高, 合金屈服强度上升, 但继续变形过程中呈现加工软化特征; 应变协调系数先升高后降低。

邀请报告

E15-27

蒸汽腔吸液芯表面多级微结构跨尺度微成形与传热性能研究

王晓亮^{1,2}, 徐杰^{1,2,*}, 单德彬^{1,2}, 郭斌^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室
2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

蒸汽腔依靠内部毛细微结构通过工质相变带走大量潜热, 具有导热性强、均温性好, 极限热流高、运行平稳等优势, 成为先进电子器件散热的重要技术思路。蒸汽腔内部的吸液芯是其实现高效散热的核心, 多级微结构吸液芯可在蒸汽腔内一次加工成形, 具有热阻小、传热面积大、结构稳定性好等优势, 在航空航天等极端环境热控系统中具有广阔的应用前景。本报告针对一种具有三维复杂结构特征的铝合金多级微结构吸液芯, 提出了基于多块组装式冲头的排气式热压印成形新工艺, 研究了传统模压和排气式工艺跨尺度微成形过程中材料填充和缺陷演化规律, 解决了多级微结构填充不足和翘曲、表面粗化技术难题, 并针对多级微结构吸液芯的蒸发、沸腾传热性能进行了试验验证与评价。发明了基于多块组装式冲头的排气式热压印模具装置来成形吸液芯表面多级微结构, 采用慢走丝线切割—微细电火花组合加工技术解决了带有大量微小阵列排气孔的微结构冲头的制造难题。排气式工艺显著改善了热压印微结构的填充性能以及翘曲和表面粗化缺陷, 确定了多级微结构最佳成形工艺参数为压印温度 300°C 和最大载荷 25kN, 比传统热压印工艺节省了 50% 的最大载荷, 且不存在翘曲变形。在传热性能测试过程中, 发现多级微结构蒸发速率比方柱及金字塔微通道分别提升了 146.2% 和 96.8%, 多级微结构沸腾传热的临界热流密度和最大传热系数分别比平面提高了 76.4% 和 87.2%, 证实了多级微结构具有显著提升的相变传热性能。

口头报告

E15-28

Zr-2.5Nb 合金不同冷却速率下相变过程的 α -变体自适应显微组织机理

宋国栋*

西安建筑科技大学

尽管锆合金相变过程中的变体选择已被广泛研究，但与变体选择相关的微观组织特征形成机制的研究仍然有限。系统研究了水冷、炉冷和空冷三种冷却方式下均匀化 Zr-2.5Nb 合金变体自适应形貌和变体界面特征的形成机制。结果表明，12 种 α 变体 (V1-V12) 在水冷样品中平均出现，而在炉冷样品中不同，而在空冷样品中观察到 6 种 α 变体。变体在水冷和空冷样品中均呈现三角形形貌，在炉冷样品中呈丛域组织。此外，存在五种类型的界面特征：类型 I/10.53°，类型 II/60°，类型 III/60.83°，类型 IV/63.26°，和类型 V/90°。空冷样品中类型 II 的比例高达 98%，水冷样品中类型 II 的比例高达 57.9%；类型 I 在三个样品中均很低；并且在炉冷样品中观察到类型 V 的比例很高 (23.6%)。变体的自适应形貌与变体选择过程中的等效应变密切相关。理论计算表明，对于特定的 2-变体组合，总有一个或多个 3-变体组合的等效应变低于 2-变体组合。较低的等效应变有助于 3-变体组合的出现，从而形成三角形形貌。界面特征类型的形成是由变体的类型和频率以及 2-变体组合的等效应变决定的。五种边界类型的等效应变的均值依次是：类型 II (0.0757)，类型 III (0.0859)，类型 IV (0.1012)，类型 V (0.1112) 和类型 I (0.1307)。即，类型 II 是最容易的，而类型 I 是最困难的，这导致了水冷、空冷和炉冷样品中类型 II 的比例很高，而类型 I 的比例很低。炉冷样品中存在较高比例的类型 V 与变体的种类和比例有关。V4 和 V10 的比例明显高于其他类型，导致类型 V 的比例较高。

口头报告

E15-29

深冷轧制、室温轧制及时效处理对 Cu-6Ni-6Sn 合金力学、电学及耐磨性能的影响

谢志宝，喻海良*

中南大学轻合金研究院

本研究旨在探讨深冷轧制 (Cryorolling, CR)、室温轧制 (Room-Temperature Rolling, RTR) 及随后时效处理对 Cu-6Ni-6Sn 合金的力学性能、电导率和耐磨性能的影响。研究发现，与 RTR 处理的样品相比，CR 处理显著提高了合金的位错密度，并促使形变纳米孪晶数量增多。此外，这种深冷轧制技术有利于析出相的均匀密集形成，从而显著优化了合金的微观结构。采用深冷轧制和后续的时效处理的合金展现出了卓越的综合性能：抗拉强度达到 1004 MPa，电导率为 11.8% IACS，以及优异的耐磨性能。本研究为 Cu-6Ni-6Sn 合金的应用提供了一种重要的材料性能优化策略。

口头报告

E15-30

超脉冲电流辅助快速精密弯曲 AZ61 镁合金管成形技术

徐虹*，刘文龙，王瑞，蔡瀚荣，赵淼，王玉鹏，程秀明，邵锦怡

吉林大学

镁合金管的室温成形性较差限制了其应用。由于镁合金的低塑性及对温度敏感、管材的三维中空结构及弯曲时变形区拉/压复杂塑性变形等因素耦合，导致镁合金管成形研究难度较大。本报告创新性采用脉冲电流辅助技术对 AZ61 镁合金管进行快速精密弯曲成形。通过电-热-力等多场耦合效应辅助变形过程，获

得成形性较好的镁合金管及均匀微观组织。脉冲电流辅助弯曲可以控制管材在较低均匀热输入下快速再结晶，避免了传统热弯曲的晶粒长大以及组织畸变，其机制在于通过脉冲电流引起的电子风力促进了位错的迁移，使得管内（压）/外（拉）非基面滑移系均得到激活，并形成以非基面滑移和少量拉伸孪晶为主的变形机制。研究脉冲电流作用下镁合金管材的微观组织演变与变形机制，对进一步丰富电致塑性理论以及开发新型的管材弯曲工艺有着重要意义。

邀请报告

E15-31

塑性变形理论建模新范式：人工智能赋能和数据科学驱动

何霁*，江晟达，刘霄，郭聪，钱昌明，李淑慧

上海交通大学机械与动力工程学院

传统塑性变形理论基于唯象方法，主要依赖于开发者的经验并通过拟合已得到的实验数据来获取，具有强烈的局限性。随着材料微观结构和力学性能的复杂程度不断提高，开发更为复杂的唯象本构模型已经极其困难。材料模型不通用、难以联系材料性能和制造过程成为制约塑性成形加工的主要问题之一，也为塑性理论的发展提出严峻挑战。人工智能与数据科学的发展为材料和机械科学带来了新的机遇，随着材料设计和应用的快速发展，不需要传统的显式本构模型，反映材料微观结构和宏观性能之间关系的塑性变形理论建模方法应运而生。其中，以物理规律增强神经网络建模、高效多尺度聚类分析、数据驱动免本构建模为代表的理论建模新范式具有其鲜明的特色和显著优势，是极具潜力的模拟预测方法。通过对这3个方面的总结梳理，探讨了人工智能赋能和数据科学驱动的塑性理论建模及多尺度模拟技术开发的发展现状与未来趋势。

邀请报告

E15-32

铝合金件拉形-快速加热电磁渐进复合成形研究

安俊达，杜林峰，刘苡璇，冯飞*

中国农业大学

本文提出了一种铝合金件拉形-快速加热电磁渐进复合成形方法，该方法可实现单曲率零件的精确成形与回弹控制。采用数值模拟的方法分析了板料的变形、板料内部的应力应变演化及温度场分布情况。模拟结果表明，铝合金件纯拉形时主要发生弹性变形，而复合成形方法将弹性变形转化为塑性变形。实验和仿真结果表明，板件纯拉形 50mm 时，卸载后端部最大回弹量达到 47.6 mm。而经过 5 层的复合成形后板材发生了显著的塑性变形，回弹后板料端部仅抬起 5.88 mm，相较纯拉形情况下回弹量降低了 87.6%。

口头报告

E15-33

冷拉珠光体钢丝截面织构梯度及其对钢丝扭转行为的影响

贾春妮¹，蔡蕊^{1,2}，王培^{1*}，李殿中¹

1. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心 沈阳 110016

2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院 沈阳 110016

高碳珠光体钢丝因其优异的力学性能而广泛应用于建筑、交通、机械等行业，如钢丝绳、轮胎增强帘线、预应力混凝土结构等。钢丝通常由热轧盘条经冷拉拔而成，通过冷拉拔实现减径及长度延伸。拉拔过

程中, 在外力作用下钢丝发生塑性变形, 并逐渐形成<110>丝织构的择优取向。由于拉拔过程中钢丝与模具间摩擦的影响, 钢丝横截面各处的受力、变形并不均匀。本工作通过多尺度计算方法详细探讨了这种不均匀分布的成因。首先, 建立了基于宏观尺度的有限元模型, 系统探究了珠光体钢丝冷拔过程中非均匀的弹性变形行为。其次, 将宏观力学响应引入介观尺度的代表性体积单元模型中, 探究了非均匀弹性变形对织构演化的影响机制。结果表明, 钢丝横截面织构分布不均匀是由于拉拔过程中钢丝内部复杂的多轴应力状态。在钢丝芯部, 最大主应力平行于钢丝轴向, 从而诱发<110>丝织构。而在钢丝次表面区域, 最大主应力逐渐转向周向方向, 并在次表面形成以{110}<110>周向织构为主的取向特征。此外, 钢丝次表面{110}<110>周向织构会导致钢丝扭转过程中可开动的滑移系有限, 促进钢丝扭转过程中应变局域化, 降低钢丝扭转变形能力。

口头报告

E15-34

增材制造医用钴铬合金组织与性能研究

卢衍锦¹, 林锦新²

1. 福建师范大学
2. 中国科学院福建物质结构研究所

采用选择性激光熔化技术制备了不同铜含量(2 wt%、3 wt%和 4 wt%)的钴铬合金。研究了铜含量对合金的摩擦学性能和耐腐蚀性能的影响。结果表明, 在钴铬合金中添加 2 wt%和 3 wt%的铜含量显著地抑制了马氏体相的生成, 而 4 wt%铜含量的对其抑制作用不显著。此外, 4 wt%铜含量促使基体中形成了大量的纳米富铬沉淀。富铬析出相对提高拉伸力学性能和耐磨性起到了主要作用, 但同时降低了材料的延伸率。

口头报告

E15-35

高温合金毛细管多道次跨尺度拉拔尺寸效应及建模研究

杨岩峰*, 李恒

西北工业大学

以 GH4169 管材跨尺度拉拔过程(外径 6mm×壁厚 0.5mm 到 1.02mm×0.09mm)为研究对象, 采用 t/d (厚度和晶粒尺寸之比)作为韧性断裂相关尺寸效应因子, 设计了跨尺度箔材(厚度从 0.05-1.5mm)单轴拉伸试验和原位拉伸试验, 揭示了尺寸效应因子 t/d (1.07~24.26)对高温合金断裂行为的影响规律和机理。根据试验结果, 建立了晶体塑性空拉模型和宏观有限元空拉模型, 结合空拉实验, 揭示了尺寸效应因子(t/d 从 1-15)、摩擦系数(0.1-0.3)、变形量(3.33-10.00%)、模角(6-24°)、定径带(0.1-3.0mm)、径厚比 D/t (12-100)对毛细管空拉中材料流动和壁厚演变的耦合影响。结果表明: 模角、摩擦系数、变形量、 D/t 对管材空拉中壁厚演变影响较大, 定径带和 t/d 对壁厚的影响较小; 随着摩擦系数和模角的增大, 剪切变形增大, 导致壁厚的增加幅度减小; 随着变形量的增加, 周向负应变增大, 分配给径向的正应变增加, 从而导致壁厚变大; 当 D/t 较小时(厚壁管), 管材外侧的轴向变形小, 内侧的轴向变形大, “曲拱”现象明显, 导致壁厚增加量较小; 随着 D/t 的增加(壁厚减薄), 管材外侧和内侧的轴向变形差距变小, 导致壁厚的增加量增加; 拉拔过程中管材与模具定径带发生分离, 导致定径带对壁厚演变的影响有限; 随着 t/d 的增加, 轴向变形抗力和径向变形抗力之比不变, 导致壁厚演变不随 t/d 的变化而变化; 在此基础上, 提出毛细管空拉壁厚精确控制方法, 壁厚绝对误差从 0.041mm 降低到 0.013mm, 拉拔成形精度提升 68.29%。

邀请报告

E15-36**Zr-4 合金管材皮尔格冷轧过程中的织构演变及变形机制研究**

邓偲瀛, 陈帅峰, 郑策, 宋鸿武*, 张士宏
中国科学院金属研究所

锆合金包壳管通常选用多道次的皮尔格冷轧工艺进行加工制造。Zr-4 合金包壳管的织构是影响最终服役性能包括蠕变, 辐照膨胀, 耐腐蚀性和氢致延迟开裂的关键因素之一。然而, 织构演化与变形机制之间的关系尚不明确。本文针对不同冷轧变形量和 Q 值条件下织构的形成机理进行了系统的研究, 采用电子背散射衍射法(EBSD)测试了管材冷轧过程中的织构演变, 通过有限元法模拟了冷轧过程, 分析了皮尔格冷轧过程中复杂的受力状态, 根据受力状态计算了等效 Schmid 因子分布, 讨论了织构演变和变形机制之间的关系。结果表明, 织构演变的差异主要取决于基面滑移的开启。随着变形量和 Q 值的增大均会导致基面滑移的等效 Schmid 因子增大, 促进基面滑移系的开启, 而增大的基面滑移开启量会使得管材织构向径向方向 (RD) 发生偏转。

口头报告**E15-37****变形镁合金强度及异性的微观组织影响与计算: 织构组态与位错分布**

吴文杰, 杨佩可, 陈文振*
哈尔滨工业大学 (威海)

本文探讨了商用镁合金织构组态及位错分布对镁合金强度及各向异性的影响, 并提供了镁合金强度提升的组织优化策略。主要发现与亮点如下: (1) 基于 Sachs 单系滑移假设与 Schmidt 因子建立了便于解析计算的松弛约束模型 (RC), 量化分析了等效取向因子 M 和主导滑移/孪生机制的织构影响, 对比 Taylor 和 VPSC 模型评价了该模型的合理性; (2) 基于松弛 RC 模型构建了织构影响的 Hall-Petch 关系 (MHP), 评估了镁合金屈服强度及其各向异性的织构组态依赖性; (3) 进一步引入位错密度及分布计算, 构建了织构组态和位错密度共同影响的 GM Hall-Petch 关系, 用于解释加工硬化引起的强度提升及其异性强化问题。本文为设计和优化高强度变形镁合金及其塑性加工方法提供了重要的见解和指导。

口头报告**E15-38****Cu-Ni-Al 合金 1100°C 热轧组织演变及织构模拟**

程啸林, 赵孟欣, 赵亚军*, 董闯
大连交通大学

类似 Ni 基高温合金 Inconel 718, Cu-Ni-Al 合金具有 γ 相-Cu 和强化相 γ' 相-Ni₃Al, 具有超 1000°C 的抗软化温度, 但此类合金变形抗力大、热塑性差、热加工区间窄, 属于难变形合金。为了加快合金生产应用, 探究单次下压率-组织性能变化, 本文以 Cu-50at.%Ni₃Al 难变形合金为例, 总变形率 80-90%, 单次下压率 (10%~80%) 进行多道次变形。通过 EBSD 表征、粘塑性变形过程模拟 (添加剪切分量的速度梯度), 结合 Taylor 晶体塑性模型, 进行织构模拟。研究单次下压率对应的剪切分量对组织细化、织构演变影响, 理解合金微观组织演变及高温热变形机制。

分析织构演变和 EBSD 实验结果, 发现合金 1100°C 高温单相变形时, 主要为 γ 相-Cu 基体变形, 且晶粒尺寸随着单次下压率增大而减小, 原因是随着单次下压率增大, 剪切增大, 细化晶粒。高温下, 单次下压率越小, 道次越多, 再结晶越充分, 弱化织构。

口头报告

E15-39

铸造铝合金变形行为多尺度分析及断裂模型构建

杨宝成, 陈帅峰, 徐勇, 宋鸿武*, 张士宏
中国科学院金属研究所

随着汽车轻量化发展, 铝合金铸造件的使用量也越来越多。然而, 这些广泛使用的铝合金铸件, 内部往往存在微观组织不均匀及孔洞等缺陷, 导致了力学性能大的分散性和位置差异性显著影响构件服役安全性, 尤其当冲击或碰撞发生时存在高的开裂甚至断裂风险。实现这类构件破坏行为的准确预测, 对于服役安全性评价、工艺优化具有重要意义, 然而已有断裂模型对材料力学性能分散性预测存在局限性, 亟需开发考虑组织不均匀及孔洞影响的断裂模型。为此, 选用典型 A356 铸造铝合金, 结合微观组织表征、性能测试和晶体塑性有限元模拟等方法, 揭示了 A356 铝合金不同应力状态下塑性变形机理, 厘清微观组织不均匀和铸造孔洞引起力学性能分散性的内在原因, 明确了微观组织不均匀对孔洞演化行为的影响机制。在此基础上建立能同时考虑铸造孔洞和微观组织非均匀性影响的韧性断裂模型。该模型能够很好地预测力学性能分散性和铸造铝合金构件的断裂行为。

墙报

E15-40

反拉力对钢丝变形不均匀性和织构强度影响的宏微观耦合模拟研究

蔡蕊^{1,2}, 贾春妮¹, 王培^{1,*}, 李殿中¹

1. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心 沈阳 110016
2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院 沈阳 110016

反拉力对冷拔珠光体钢丝变形均匀性的提升和<110>织构的增强有重要作用。拉拔是指施加外力使钢丝拉长的过程, 而反拉力是指在拉拔过程中施加与拉拔力方向相反的力。反拉力不足会导致钢丝性能不合格。本研究通过多尺度模拟, 采用有限元法建立宏观拉拔模型, 结合晶体塑性理论对织构演化进行分析。研究表明, 较高的反拉力降低了钢丝的变形不均匀性。然而, 反拉力不应超过临界值, 以防颈缩。反拉力对钢丝的轴向残余应力影响显著, 反拉力越大, 轴向残余拉应力越大, 而对周向和径向残余应力的影响相对较小。随着反拉力的增大, 珠光体钢丝横截面上相同位置的织构强度逐渐增强, 并以<110>取向为主。同时, 在相同的反拉力下, 织构强度从钢丝的中心到次表面逐渐减小, 与实验结果一致。通过宏微观耦合的模拟方法详细分析了反拉力在冷拔珠光体钢丝中的作用机制, 得出了提高反拉力可以改善钢丝性能但需控制在合理范围内的结论。

墙报

E15-41

金属双极板流道辊压成形尺寸精度评价研究

刘哲文, 赵富强*
太原科技大学

金属双极板是燃料电池核心部件之一, 其成形尺寸精度直接影响电池性能。辊压成形工艺具有可连续化、效率高的优点是金属双极板成形的的主要路线之一。本文以 0.1mm 厚 316L 不锈钢为研究对象, 首先, 对比不同辊压模具参数对流道尺寸精度的影响。发现增大模具圆角半径会提高流道深度和拔模角的尺寸精度, 在此基础上, 建立金属双极板流道尺寸精度评价方法, 以多流道深度和拔模角的尺寸精度为评价准则,

对不同模具圆角半径成形的流道进行评价, 优选出模具圆角半径为 0.20mm 为最佳模具参数, 最终得到尺寸精度高的流道。

闪报

E15-42

基于 U-Net 网络的 GH4169 合金 δ 相识别模型

刘延星*, 李润华, 关俊祥

东莞理工学院

由于优异的高温综合性能, GH4169 合金广泛应用于航空航天等领域。为应对极端苛刻的服役环境, 通常利用 δ 相对 GH4169 合金的微观组织进行调控。然而, 由于 δ 相形貌细长多变, 当前 δ 相表征手段存在精度差、效率低、成本高等问题。针对这一问题, 本文开展基于 EBSD 和深度学习的 δ 相析出工艺研究。首先, 开展 δ 相析出实验, 利用 SEM 和 EBSD 检测技术精准确定 δ 相的形貌、含量、分布等特征信息。然后, 基于 SEM 和 EBSD 检测数据, 结合深度学习算法, 构建可从 SEM 图像中精准快速提取 δ 相特征信息的模型。之后基于 δ 相的特征信息, 建立纳入热处理时间、温度影响的 δ 相析出模型。主要研究成果如下:

(1) 通过微观组织表征分析保温温度、保温时间对 GH4169 合金 δ 相析出行为的影响规律。研究结果表明: 保温温度和保温时间显著影响 δ 相析出, 在一定保温时间内, δ 相析出含量随着保温时间延长而增加, 形貌由颗粒状和短棒状逐渐向长棒状和针状演化。

(2) 针对传统 δ 相定量分析方法存在可重复性差、效率低等问题, 构建基于 U-Net 网络模型的 δ 相识别模型。为解决 δ 相形貌复杂和 δ 相在图像中占比少等问题, 对 U-Net 网络模型进行优化, 并将模型与传统定量分析方法进行了对比, 结果表明: 优化后的 U-Net 网络模型准确率、召回率、F1 分数和 IOU 均有所提升, 识别效果较好。在优化后网络模型的基础上, 分别引入残差模块和注意力机制, 召回率分别提高了 0.25% 和 0.32%, IOU 分别提高了 0.06% 和 1.78%, 模型整体精度更高。与传统定量分析的对比结果表明, 模型能有效实现 δ 相定量分析。

(3) 基于识别模型得到的 δ 相特征信息, 对 δ 相析出工艺进行仿真模拟。首先, 通过线性回归方法得到了不同时效处理条件下描述 δ 相析出含量与时间关系的 Avrami 方程。然后, 在 DEFORM 软件中建立 δ 相析出模型。之后, 结合 JMatPro 热力学软件对材料参数进行设置, 通过 DEFORMR 软件模拟未直接输入参数的工艺条件。模拟结果和实验数据吻合较好, 表明模型具有良好的内插能力, 能准确预测 GH4169 合金 δ 相析出行为。

仅发表论文

E15-43

不锈钢一体化台面单水槽充液拉深成形工艺研究

吴菲*, 洪熠豪, 章争荣, 韩建霖

广东工业大学

不锈钢带台面单水槽具有深度大及台面不对称的特点, 传统冲压成形主要通过多道次拉深与退火工艺相配合来实现, 这样导致产品制造工序复杂、生产链长, 产品一致性差等问题, 从而提出采用一次充液拉深成形不锈钢水槽方法。本研究基于非线性动态显示算法的 Dynaform 有限元分析软件对水槽无模充液拉深工艺参数进行数值模拟分析与研究, 为了解决拉深过程台面材料难以流入水槽筒体, 采用充液拉深, 将水槽与台面的一部分预成形为一个筒体, 然后再将筒体多余部分反拉深到台面。结果表明, 通过设置合理的预成形结构形状, 控制成形过程的液体压力及其加载路径、压边力与间隙等关键成形参数, 可有效改善不锈钢板料流动均匀性, 提高不锈钢水槽的成形性, 拉深件壁厚更加均匀一致, 从而有效提高带台面单水

槽成形质量。