



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

E13-材料疲劳与断裂
E13-Material Fatigue and Fracture

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

E13. 材料疲劳与断裂

分会主席：张哲峰、张显程、李小武、庞建超

邀请报告

E13-IO1

天然贝壳珍珠质和交叉叠片结构的抗疲劳性能探究

李小武^{*1}, 李颖颖², 季洪梅³

1. 东北大学

作为天然生物陶瓷, 贝壳材料虽然简单地由矿物成分和有机基质组成, 但同时具有较高的强度、较好的韧性和抗循环加载损伤的能力, 是人工合成材料所无法比拟的。贝壳材料在自然环境中, 常常承受来自外界的反反复复破坏, 如天敌的反反复复敲打或钻孔等, 这种循环加载模式实际为典型的疲劳加载。本课题组的研究表明, 白蝶贝壳内部的珍珠质结构能够有效地抵抗天敌的钻孔行为, 其内层珍珠质的板片呈现典型的类凸透镜形, 该结构可有效地将变形局域化, 并能够通过板片的旋转以及变形来承受很大的弯曲变形。三点弯曲疲劳测试结果表明, 当最大循环应力小于平均静态弯曲强度的 60% 时, 白蝶贝样品的疲劳寿命可达 10^6 周次以上, 甚至当大于平均静态弯曲强度的 90% 时, 仍能承受 500-1000 周次的加载。与珍珠质结构相比, 贝壳中的交叉叠片结构是一种更为先进的复杂三维各向异性结构, 90% 以上的软体动物的贝壳中含有此结构。本课题组对紫石房蛤贝壳中的交叉叠片结构进行三点弯曲疲劳测试表明, 样品的疲劳强度与静态弯曲强度之比约为 0.87, 明显高于珍珠质的 0.56。此外, 系统对比两种结构经热处理后的力学性能结果表明, 珍珠质结构的力学性能随热处理温度的升高明显降低, 经 300°C 热处理后, 相比于室温未处理样品弯曲强度和断裂功分别下降约 78% 和 77%; 交叉叠片结构经 180°C 热处理后, 力学性能略有下降, 而经 300°C 热处理后弯曲性能反常升高, 且升高程度较大, 弯曲强度和断裂功分别升高约 45% 和 136%, 实现了强度和韧性的同步提高。对交叉叠片结构进一步的疲劳测试结果表明, 300°C 热处理样品的抗疲劳性能仍然最优。另外还发现一个有趣的现象, 如果对样品进行预疲劳实验, 即在较低应力水平下进行 10^5 周循环预加载, 随后升高应力再进行疲劳测试, 发现该结构能够抵抗的疲劳应力显著升高。例如, 300°C 热处理样品在最大应力为 100 MPa 时, 其疲劳寿命为 10^5 - 10^6 周次, 当最大应力提高到 150 MPa 时, 仅能承受 $\sim 10^2$ 次循环加载, 而经预疲劳之后的样品, 在最大应力为 150 MPa 时, 仍能承受 10^5 - 10^6 次循环加载, 其抗疲劳性能显著增强。可见, 全面理解天然生物材料微观结构的设计策略, 深入揭示其抗疲劳性能优异的机制, 可为人工合成结构材料抗疲劳性能的仿生设计提供重要且有效的途径。

邀请报告

E13-IO2

锆合金疲劳破坏的晶体学机制

张聪惠*

西安建筑科技大学

本文基于 SEM/EBSD 滑移迹线分析, 定量研究了纯锆在 0.4% 和 0.8% 应变幅下低周疲劳变形与裂纹萌生行为, 以及疲劳短裂纹与晶界相互作用行为。结果表明, 具有高 Schmid 因子的柱面 $\langle a \rangle$ 滑移是主要的变形模式, 含有驻留滑移带 (PSBs) 的晶粒倾向于其 $[-12-10]$ 方向与加载轴平行; 裂纹萌生在驻留滑移带和晶界 (GBs) 处, 在 0.4% 和 0.8% 应变幅下, PSBs 裂纹占比分别是 61.1% 和 53.5%; PSBs 裂纹主要平行于 Schmid 因子较大的柱面 $\langle a \rangle$ 滑移, 而部分裂纹倾向于在取向角较大的 GBs 处萌生。短裂纹扩展以穿晶扩展为主, 对晶体取向和晶界敏感, 主要在晶界处偏转。短裂纹优先沿着具有较高 Schmid 因子的 (01-10) 柱面滑移系以及 (01-11) 锥面滑移系扩展。结合 Schmid 因子、几何相容性因子和扭转角, 评价了短裂纹跨晶界扩展行为; 在 Schmid 因子 $m > 0.3$, 扭转角 $\alpha < 40^\circ$ 以及几何相容性因子 $m' > 0.3$ 的条件下, 短裂纹更容易跨晶界扩展。

邀请报告

E13-IO3

裂纹尖端残余应力演化及其对裂尖塑性区的影响

张哲¹, 杨冰^{1*}, Malcolm Neil James^{2,3}, 肖守讷¹

1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031

2. School of Engineering, Computing and Mathematics, University of Plymouth, Drake Circus, Plymouth, England

3. Department of Mechanical Engineering, Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa

疲劳裂纹尖端残余应力 (RS) 演化及裂纹扩展过程中屏蔽效应的相关变化影响焊接接头疲劳寿命。为此, 针对 U71MnG 钢轨钢焊态和焊后热处理试样开展了裂纹扩展 (FCG) 试验, 将数字图像相关 (DIC) 技术与 CJP 模型相结合, 得到了应力强度因子 KCJP。随后, 比较了焊态和焊后热处理试样的 $\Delta KCJP$ 和裂纹张开位移的变化, 研究了不同裂纹长度下 RS 和裂纹张开力 F_{op} 的演变规律。结果表明, 在裂纹扩展过程中, 裂尖的 RS 呈逐渐加速下降的趋势, 直至 a/W 达到约 0.56 时完全松弛。由于裂尖屏蔽效应的贡献, 在裂纹扩展的初始阶段观察到 $\Delta KCJP$ 略有降低。最后, 系统分析了裂纹扩展过程中 RS 变化对裂纹尖端屏蔽效应和裂纹尖端塑性区尺寸的影响。

口头报告

E13-O1

定向凝固 Mg-Gd 合金柱状晶组织结构与疲劳性能相关性

房大然*, 连永强、张航、柴涛、林小婷

东北大学秦皇岛分校

利用定向凝固技术制备了 Gd 含量分别为 4%, 6%, 8% (wt. %) 的 Mg-Gd 合金, 分析了柱状晶生长取向和合金微观组织, 并在 0.3% 的塑性应变幅下进行了室温疲劳试验。Mg-4.0Gd 合金柱状晶生长取向集中于 $\langle -12-10 \rangle$ (基面 $\langle a \rangle$ 滑移 $SF < 0.15$), Mg-8.0Gd 合金柱状晶生长取向集中于 $\langle -12-13 \rangle$ (基面 $\langle a \rangle$ 滑移 $SF > 0.40$), 而 Mg-6.0Gd 合金则形成 $\langle -12-10 \rangle$ 和 $\langle -12-13 \rangle$ 取向柱状晶交替分布、类似“珠光体”结构的柱状晶组织。柱状晶取向对合金的疲劳寿命影响明显, Mg-4.0Gd 合金具有最长的疲劳寿命, 而 Mg-6.0Gd 合金的疲劳寿命最短。

口头报告

E13-O2

CoCrNi 中熵合金优异的疲劳性能及机理

鲁凯举*、梁秀兵

军事科学院国防科技创新研究院

High/medium entropy alloys (HEAs/MEAs) are a novel class of materials that are currently under investigations because of their superior properties such as excellent strength-to-weight ratios, ductility, higher degree of fracture resistance, as well as corrosion and oxidation resistance. For HEAs/MEAs potential candidature in engineering applications, their low-cycle fatigue (LCF) behavior is of decisive importance.

In the present work, the LCF behavior of equiatomic CoCrNi model MEA is correlated to its microstructural evolution upon cyclic straining. The fully reversed strain-controlled fatigue tests have been conducted in air at room

temperature under strain amplitude ranging from $\pm 0.3\%$ to $\pm 0.7\%$. Upon comparisons. The alloy exhibits longer fatigue lifetime than most reported HEAs/MEAs and conventional FCC alloys. Microstructural investigations revealed the detailed reasons for its superior fatigue resistance, i.e., cooperative deformation behavior of planar slip bands and dislocation cell/wall. This behavior is correlated to CoCrNi's lower stacking fault energy and high lattice distortion, which enhance planar slip and delays deformation localization leading to its superior fatigue resistance, compared to most reported FCC alloys.

口头报告

E13-O3

Zr 基金属玻璃压-压疲劳尺寸效应研究

姚志锋*¹、乔吉超²、姚尧^{1,2,3}

1. 西安建筑科技大学
2. 西北工业大学
3. 西安工业大学

本研究旨在深入探讨非晶合金在不同长径比下的压缩疲劳性能。通过系统地进行单调压缩和循环压-压疲劳试验，对 Zr 基非晶合金的疲劳寿命、塑性变形以及断口角度进行了全面分析。试验结果显示，非晶合金的疲劳性能显著受到其长径比的影响。在单调压缩条件下，较小长径比的样品表现出更高的塑性，而强度并未因长径比的变化而显著改变。在疲劳试验中，观察到随着长径比的减小，疲劳寿命呈现增加的趋势。这一发现与单调压缩加载下的塑性增加相一致，表明非晶合金的疲劳寿命与材料的塑性变形能力密切相关。

为了准确描述疲劳寿命的分布特性，采用了 Weibull 分布进行统计分析。通过这种方法，我们能够更好地理解和预测非晶合金在不同加载条件下的疲劳行为。此外，还对疲劳试验后的断口进行了详细观察和分析。结果显示，压-压疲劳试验的断口形貌与单轴单调加载下的断口形貌相似，进一步证实了不同尺寸样品在单调和循环压缩测试中的失效机制具有一定的相似性。

综上所述，本研究揭示了非晶合金在长径比变化下的压缩疲劳性能特点，为深入理解非晶合金的疲劳行为提供了重要参考。同时，通过 Weibull 分布的分析，为预测和优化非晶合金的疲劳寿命提供了新的方法。

口头报告

E13-O4

变幅载荷下填充天然橡胶结构件剩余疲劳寿命预测方法

刘湘楠*、王宪、戴巨川
湖南科技大学

建立恒幅载荷下橡胶疲劳寿命预测模型和疲劳累积损伤模型是研究变幅载荷下橡胶结构件疲劳寿命预测问题的关键。以填充天然橡胶结构件为研究对象，开展了变幅载荷下橡胶结构件剩余疲劳寿命预测方法的研究。提出了一种基于支持向量机(Support vector machine, SVM)的恒幅载荷下橡胶疲劳寿命预测模型。该模型以应变幅值和应变均值为输入变量，以橡胶疲劳寿命为输出变量。针对线性疲劳累积损伤模型(Miner 准则)存在的不足，建立了一种考虑载荷加载顺序和载荷相互作用影响的非线性疲劳累积损伤模型。根据所建立的 SVM 模型，分别基于 Miner 准则和非线性疲劳累积损伤两种模型预测变幅载荷下橡胶结构件的剩余疲劳寿命。以试验值为基准，比较了两种疲劳累积损伤模型的预测精度。结果表明：相较于 Miner 准则，

采用非线性疲劳累积损伤模型获得的剩余疲劳寿命预测值与试验值更为接近。

邀请报告

E13-IO4

超细尺度金属层状复合材料疲劳行为及损伤机理

张广平*

中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心

随着航空航天、信息、新能源与人工智能的不断发展，人们对各种新型高性能金属材料的研发需求及材料在各种苛刻环境下的疲劳服役可靠性要求越来越高。将不同特性的微纳尺度组元层复合而成的超细尺度金属层状复合材料因其具有超高强度，并能保持良好的韧性，近年来其在工程构件表面改性和半导体器件制造等方面显示出广泛的应用前景。面向发展高疲劳抗力的金属层状复合材料，本报告针对超细尺度金属层状复合材料的结构设计、制备、材料疲劳行为及损伤机理等问题，重点介绍目前关于超细尺度金属层状复合材料的最新研究进展；通过考察该类材料在疲劳加载下的损伤形成及演化的微观过程，结合宏微观分析和理论计算，揭示纳米晶和超细晶组元层组成的金属层状复合材料在疲劳加载下的结构稳定性和疲劳损伤行为的物理机制；阐明所发展出的一种新型高强韧性和高疲劳抗力的金属层状复合材料的设计原理，并由此提出该类层状复合材料疲劳性能提升的优化策略。最后，针对目前所发展出的新型超细尺度金属层状复合材料在工业领域中可能的应用进行展望。

邀请报告

E13-IO5

抗疲劳表面变质层机械性能表征理论与测试方法研究

徐广涛*

郑州大学

表面变质层构筑是关键构件抗疲劳制造的核心内容。全面表征抗疲劳表面变质层微观结构的动态演化规律及各项机械性能参数，建立关键构件抗疲劳表面变质层性能-结构关系，是揭示表面变质层抗疲劳机制的关键。表面变质层的表征作为抗疲劳制造基础，根据关键构件抗疲劳制造进行表层强化后形成的抗疲劳表面变质层的梯度特性，从理论、数值及试验三方面开展表面变质层机械性能的表征理论与方法研究，发展梯度结构静态机械性能表征理论及方法，利用相关测试试验设备等搭建表面变质层机械性能测试表征平台，提出测试表面变质层的梯度机械性能参数的表征理论与方法；对 18CrNiMo7-6 合金钢经过热处理等工艺构筑的抗疲劳表面变质层机械性能进行表征。提出关键构件抗疲劳表面变质层的表征理论体系与技术方法，对机械性能等进行系统的表征。实现对关键构件抗疲劳表面变质层结构-性能的全面表征。为在宏观机械性能层面阐明表面变质层抗疲劳机理提供基础。助力中国高端机械装备制造转型升级与跨越发展。

口头报告

E13-O5

铝合金和 CFRP 单搭接接头疲劳性能对比研究

邹田春、李泽钢*、巨乐章

中国民航大学

由于良好的力学性能和轻量化优势，复合材料与合金材料已经广泛用于航空航天业的结构领域。与传统机械连接制造的结构相比，使用胶接技术连接这些轻质材料能更好地整合结构部件，并降低整体重

量。本文使用胶接技术制成了铝合金-碳纤维增强复合材料 (Al-CFRP)、Al-Al、CFRP-CFRP 共三种同质和异质的单搭接胶接接头,首先在电子万能试验机上进行准静态拉伸实验获得了接头的平均失效力,并通过电液伺服疲劳试验机在四种不同载荷水平下进行了疲劳测试。基于试验数据和双参数威布尔分布模型,对接头的 S-N 曲线进行拟合,同时借助扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 获得接头的微观失效形貌,对比分析循环载荷对三种接头在疲劳寿命、破坏模式,损伤演化的影响。结果表明,在所研究的三种胶接接头中,同质的 CFRP-CFRP 胶接接头的平均失效力最高。同时,与 CFRP-Al 和 Al-Al 接头相比,CFRP-CFRP 接头能在最低的有效疲劳寿命获得最高的载荷水平,具有广泛的循环载荷应用范围,并能承受高循环载荷而不损坏。此外,同质胶接接头呈现单一破坏模式,其中 CFRP-CFRP 主要是内聚破坏,Al-Al 接头则是以界面破坏为主。破坏过程是损伤从接头的两端向中间区域扩展,并且沿搭接区域保持轴线对称。而异质胶接接头则出现混合失效的破坏模式,并且随着载荷水平的增加,发生界面破坏面积减小,内聚破坏面积增大。破坏过程则是损伤先从 CFRP 端开始,扩展到 Al 端,接头最终在该端发生破坏。

口头报告

E13-06

基于 ct 技术的纤维复合材料原位拉伸及疲劳性能研究

江兰馨*

四川大学

碳/玻混杂纤维复合材料(C/GFRP) 由于其低成本在轨道交通行业得以应用。然而, C/GFRP 在拉伸下的损伤演化机理尚不明朗。先进的原位 X-ray 断层扫描 (CT) 技术 提供了途径来探究纤维复合材料的损伤演化。本文通过模压工艺制备了 CFRP、C/GFRP 两种拉伸试件,在拉伸过程中对 5 个点进行原位 CT 扫描。通过图像重构算法,建立三维模型,对孔隙进行可视化 and 量化,探究了 CFRP、C/GFRP 的断口失效形貌,大孔隙演变过程、孔隙数量分布和区间占比分布,最后利用 DVC 技术获取了拉伸标定区的全局应变场。研究结果表面, C/GFRP 有更高的初始孔隙体积率,在拉伸过程中孔隙更容易扩展,体现为更高的损伤演化率。其中大孔隙分布在层间。在全局应变场中, C/GFRP 更易发生应变集中,导致层间失效。

口头报告

E13-07

基于 X-CT 成像的球墨铸铁内埋裂纹三维闭合效应原位表征

肖策*

西安交通大学

探明裂纹的闭合效应对揭示疲劳损伤演化、建立疲劳裂纹扩展寿命模型至关重要,而现阶段大多数对裂纹闭合的研究仅针对表面贯穿裂纹的二维情况,关于三维内埋裂纹的闭合行为的研究相对较少。得益于 X 射线断层扫描成像 (X-CT) 表征技术的发展,通过原位 X-CT 试验技术可以直接观测卸载过程中裂纹开口度的变化,然而基于灰度图像的裂尖开口度测量的精确度不高 (体分辨率 $>5\mu\text{m}$),难以量化的描述裂尖闭合效应。受益于球墨铸铁内部的石墨结作为自然标记点,结合数字图像相关法 (DVC),本文中实现了亚体素分辨率裂尖位移场三维成像 (分辨率约 $0.45\mu\text{m}$)。

疲劳裂纹往往从样品表面开始萌生及扩展,然而,在大型铸件或增材结构中内部缺陷的存在也会加速结构的疲劳失效,而内部缺陷对疲劳性能的危害目前难以准确评估,内部裂纹的扩展及闭合规律也尚不清晰。因此本文中提出了一种基于飞秒激光加工与放电离子烧结的方法,通过扩散焊接的方式实现了结构内部可控预制缺陷的加工,并证明了该加工方法对材料的微观结构及力学性能无明显影响。

本文在原位疲劳裂纹扩展试验过程中，分别基于 X-CT 成像对含内部裂纹和表面裂纹的试样进行了卸载过程中的三维成像；结合 DVC 方法提取了不同载荷下的裂尖位移场分布；利用 Williams 级数法计算了裂纹尖端全局应力强度因子分布。结果表明，裂纹闭合水平与椭圆形裂尖角度位置间呈线性关系，内部裂纹的闭合水平与表面裂纹中心处的闭合水平一致。

口头报告

E13-08

FCC 金属裂纹尖端形变孪晶位错演化机制

闫康*

西北有色金属研究院

位错运动在金属材料的塑性变形过程中起着十分重要的作用，位错作为金属材料塑性变形的媒介，决定着金属材料的形变方式。每个位错在基体中都会引起一个本征应力场，同时伴随着一个弹性畸变。大量位错的运动导致了原子面之间的相对滑移并形成了新的表面，这种微观机制就是宏观上的金属材料塑性变形行为的起源。

本文采用透射电子显微镜原位拉伸技术对 FCC 金属铝合金在断裂过程中裂纹尖端出现的晶体扭转和形变孪生现象进行研究，通过这种原位观测的方法揭示了 FCC 金属裂纹尖端的位错运动对显微组织的影响作用机理。本文将研究的侧重点放在裂纹尖端的位错运动方面，首先从位错运动的角度对裂纹尖端晶体取向差改变的过程进行讨论研究；其次根据不全位错（Shockley 不全位错、Frank 不全位错）和全位错之间的相互反应过程解释了非共格孪晶界的形成原因；最后通过裂纹尖端基体在应变作用下向形变孪晶演变过程中出现 9R 特殊结构的现象，从原子尺度揭示形变孪晶的形成原因。以上的研究结果将进一步深化对 FCC 金属变形机制的认识，为进一步目标化设计高强铝合金提供理论支撑。

口头报告

E13-09

Intergranular fracture of bcc Fe: theoretical modelling and atomistic simulations

赵凯*

Jiangnan University

The plastic events occurring during the process of intergranular fracture in metals is still not well understood due to the complexity of grain boundary (GB) structures and its interactions with crack-tip dislocation plasticity. By considering the local GB structural transformation after dislocation emission from a GB in the Peierls-type Rice-Beltz model, herein we established a semi-analytical transition-state-theory-based framework to predict the most probable Mode-I stress intensity factor (SIF) for dislocation emission from a cracked GB. Using large-scale molecular dynamics (MD) simulations, we comprehensively studied the fracture behaviors of bi-crystalline Fe samples with 12 different symmetric tilt GBs inside. The MD results show that the presence of GB could significantly change the critical SIF required for the activation of plastic events, consistent with theoretical predictions via regulating the energy change induced by the transformation of GB structure. As measured in the atomistic simulations and predicted by the theoretical model, the critical SIF at which the dynamic as a function of time deviates from the linearity, increases with the increasing loading rate. However, the classical Rice model underestimates the critical SIF since the effect of localized fields was not considered.

口头报告

E13-O10

国产核级高强钢焊缝熔敷金属疲劳行为研究

马景平、曹睿*、周鑫

兰州理工大学

核反应堆压力容器(RPV)在服役时主焊缝面临着高温高压和疲劳损伤,焊缝熔敷金属由于组织和应力的不均匀性更容易成为失效的敏感位置。本汇报针对国产化核级低合金钢焊接材料熔敷金属进行模拟服役条件下的力学性能与低周疲劳实验,结果表明:由于焊态组织中 M-A 组元的存在提高了熔敷金属的强度,而热处理后晶界及晶内碳化物使得晶界强度降低,强韧性变差。高温下焊态熔敷金属由于动态应变时效现象强度升高,塑性降低,而高温对热处理态熔敷金属影响较小。常温下焊态熔敷金属由于较高的强韧性从而具有比热处理态熔敷金属更长的疲劳寿命。而高温下由于高应变幅与低应变幅下疲劳寿命分别是由塑性和强度主导,使得焊态熔敷金属在高应变幅下寿命下降明显,而低应变幅下疲劳寿命显著升高。热处理态所有应变幅下疲劳寿命较常温下均发生降低。焊接过程中产生的非金属氧化物是引起两种状态熔敷金属疲劳裂纹萌生和扩展的主要原因,且疲劳裂纹更倾向于沿碳化物聚集处扩展,导致热处理态熔敷金属疲劳寿命的下降。此外建立的疲劳寿命模型为未来核反应堆压力容器的寿命提供了合理预测。

口头报告

E13-O11

长周期堆垛有序结构对镁合金合金超长寿命疲劳性能和失效的影响

詹敏、何超、王清远*

四川大学

含有长周期堆垛有序(LPSO)结构的镁合金以其令人印象深刻的静态力学强度而闻名,但是疲劳裂纹易沿着 LPSO 片层萌生,不能有效地阻止基面位错的运动,导致其超高周疲劳性能得不到有效改善。本工作提出一种挤压成型 Mg-Gd-Zn-Zr 合金,其组织由细晶和包含弯曲的 LPSO 片层的粗晶组成,展现出异常出色的超高周疲劳(VHCF)抗性。裂纹起始机制的研究表明,滑移诱发的裂纹主要发生在细晶区域而不是粗晶的内部。挤压成型过程将大多数粗晶的基面与挤压方向平行,而弯曲的 LPSO 片层的存在则作为阻碍基面位错运动的主要屏障,从而有效地提高了沿基面滑移形成损伤的阈值。疲劳损伤以滑移带和微裂纹的形式出现在细晶内部,最终导致疲劳裂纹的萌生、扩展和最终断裂。

邀请报告

E13-IO6

焊接结构疲劳多尺度失效机制的探索

蒋文春*

中国石油大学(华东)

疲劳断裂是焊接结构失效的主要形式,在焊接结构断裂事故中,疲劳失效约占 70~90%。而多相材料焊接结构的疲劳失效机制更加复杂,包括焊接缺陷、高水平残余应力和组织非均匀。因此,本研究以双相不锈钢十字型焊接接头为研究对象,针对焊接缺陷避免难的问题,探究了焊接缺陷对疲劳强度的影响规律,提出了考虑开裂角度的寿命预测模型,量化焊缝缺陷对疲劳寿命的影响以设计寿命为指导,明确焊缝缺陷尺寸的容许范围(错边量<1.2mm,未焊透深度<8.1mm),指导装备的焊接制造;针对高水平残余应力的问题,阐明了残余应力在循环载荷下的释放行为,建立了考虑残余应力的寿命预测模型,并基于残余应力调控,提出了针对十字型接头的高压水射流处理工艺,与未处理的焊接接头相比,焊接残余应力降低约 60%,并且在表面引入压应力,疲劳寿命可至少提高 100%;针对组织非均匀的问题,建立了考虑物理机制的晶体

塑性本构模型，准确计算了两相微观力学变形，进一步建立了微裂纹萌生寿命预测模型和微裂纹扩展寿命预测模型，实现了对微裂纹萌生位置、扩展方向以及萌生/扩展寿命的准确预测。进一步优化了焊接工艺，对组织与疲劳寿命进行协同调控：维持相平衡，抑制晶界奥氏体生成，促进晶内奥氏体生成，阻碍裂纹萌生和扩展，疲劳寿命可提高 30~70%，并且幅值越小，效果越明显。

邀请报告

E13-IO7

马氏体相变对疲劳裂纹扩展的影响机制研究

王晓钢^{*1}, 刘承欢¹, 孙彬涵², Dirk Ponge², 姜潮¹, Dierk Raabe²

1. 湖南大学机械与运载工程学院

2. Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH

本研究聚焦马氏体相变在疲劳裂纹扩展中的作用这一科学问题，主要采用原位 SEM 疲劳实验技术对一种新型中锰 TRIP 钢开展疲劳行为研究，并结合多种非原位实验技术（如 APT、微观 DIC）开展了深入的疲劳机理分析与探究。结果表明，马氏体相变对疲劳裂纹扩展的影响存在着两面性。在短裂纹阶段，相变可起到抑制疲劳裂纹扩展的有益作用，可使裂纹扩展速率降低达 2 个数量级；而在长裂纹阶段，相变却起到加速裂纹扩展的相反作用。进一步的机理研究揭示，马氏体相变可诱发两种具有对抗性的疲劳机制，即起抑制裂纹扩展作用的相变介导裂纹滞止（Transformation-mediated crack arresting）和起促进裂纹扩展作用的相变介导裂纹合并（Transformation-mediated crack coalescence），其分别在短裂纹阶段和长裂纹阶段起主导作用。研究深入分析了疲劳机制背后的成因，证明这两种机制的形成来源于相变产物马氏体自身所具有的“硬而脆”的内禀特性，而非非来源于相变过程本身。关于马氏体相变在疲劳裂纹扩展中两面性的揭示，可用于合理解释和调和一些看似矛盾的疲劳现象报道，并有望用于一种全新亚稳微观组织梯度材料的设计，以提升材料的抗疲劳性能。

邀请报告

E13-IO8

船用高强度 EH47 特厚钢板低温断裂和止裂性能的宏微观尺寸效应及评价方法

任学冲*

北京科技大学

高强度、高韧性、大厚度钢板被广泛的应用于集装箱船的舱口围顶板、腹板以及上甲板龙骨等关键部位。随着集装箱船大型化和高安全性发展，对钢板的断裂和止裂韧性提出了更高的要求。然而，由于其厚度大、生产工艺复杂等因素，高性能船用钢板研发中仍然存在需解决的关键问题，包括船用大厚度钢板断裂与止裂的微观机制、微观组织对断裂及止裂韧性的影响规律，鉴于大厚度全尺寸厚钢板断裂与止裂韧性的测试难度大，是否可以使用缩比试样对其性能进行评价，从而加速钢板的研发周期。

为解决上述问题，研究以 EH47 大厚度船用钢板为研究对象，开展了不同尺寸及取样位置试样的断裂韧性研究，分析了其微观组织及试样尺寸对断裂韧性的影响规律及机制，明确了在韧-脆转变温度范围内发生解理断裂的临界事件是晶粒尺寸微裂纹穿过晶界扩展，决定船用高强钢解理断裂韧性的关键因素是最大晶粒尺寸；开发了缩比试样止裂韧性试验方法，研究了试样尺寸对止裂韧性评价的影响，确定了试样厚度对船用高强钢止裂韧性的影响规律，通过尺寸系数修正可以保证小尺寸试样止裂韧性试验结果的可靠性，为利用小尺寸试样进行断裂与止裂性能快速评价提供了基础；基于上述研究成果通过优化钢板微观组织，改善了钢板的断裂及止裂性能，验证了本文提出的断裂及止裂韧性微观机制。

口头报告

E13-O12

《金属材料 超高周疲劳 超声疲劳试验方法》国家标准宣贯

彭文杰*

宝钢股份中央研究院

随着工业技术的发展,超高周次承载结构和材料越来越多,金属材料超高周次疲劳测试需求与日俱增。GB/T 43896《金属材料 超高周疲劳 超声疲劳试验方法》国家标准,规定了金属材料超声疲劳试验方法的原理、试样、试验装置、试验步骤等内容。标准主要介绍了不同形状超声疲劳试样尺寸设计方法、应力控制方法、试样端部位移以及动态应变测量方法及其校核。超声疲劳国家标准的发布填补了超高周疲劳试验方法标准国内国际空白,为航空航天、核电、铁路轮轴和轨道等领域关键零部件金属材料超长服役性能表征提供依据。

口头报告

E13-O13

热冲压加热温度对桥壳钢力学及疲劳性能的影响分析

邱宇*、惠亚军、杨业

首钢集团有限公司技术研究院

高温加热是热冲压桥壳的关键工艺参数,直接关系到热冲压后桥壳的强度能否满足轻量化设计要求。本文通过对不同正火温度下 NbTiV 析出强化钢组织性能和耐疲劳性的研究,发现在奥氏体化温度以下加热可以获得最高强度和最优疲劳性能,远优于当前冲压后的性能,原因在于现用奥氏体区加热冲压工艺下奥氏体冷却转变速率低,铁素体晶粒尺寸增大,形成微米级析出,晶粒细化和析出强化作用减弱,强度降低,疲劳性能弱化;在奥氏体化温度以下加热,组织未发生奥氏体化,合金元素扩散,降低偏聚,大尺寸析出相因回溶变小,小尺寸因回溶由析出相转变为固溶原子,造成该温度下 100nm 以下析出相大幅减小,100~300nm 析出相数量的大幅增加,最终引起材料强度提升,疲劳性能得到优化。该研究结果为桥壳轻量化热冲压制备工艺优化提供了有利支撑。

口头报告

E13-O14

316L/2Cr13 多层钢疲劳断裂行为研究及强度预测

周鑫、曹睿*、马景平

兰州理工大学

多层不锈钢复合板广泛的应用于石油化工、海洋船舶、医疗器械、五金刀具等领域,且其疲劳性能是设计生产应用的一项重要指标。本研究采用不同轧制工艺制备了 316L/2Cr13 多层钢,并进行了热处理。旨在研究轧制工艺、热处理工艺对其疲劳性能的影响,分析多层钢疲劳裂纹萌生以及扩展机理,并进行疲劳强度预测。结果表明:不同热处理工艺下,多层钢疲劳强度随着退火温度与保温时间的增加而减小,这主要是由于较低的退火温度下多层钢未发生完全再结晶,奥氏体层仍以轧制态组织为主,位错密度较大,对疲劳裂纹扩展具有阻碍作用;多层钢疲劳裂纹总是从 2Cr13 层中铁素体滑移带处起裂,裂纹沿着 TD 方向发生穿晶扩展,且每层铁素体产生裂纹在扩展途径中若相临,则会连接,加速试样的断裂。除此之外,由于热处理后多层钢的疲劳强度与拉伸强度无明显规律,以奥氏体层硬度与多层钢加工硬化程度为变量,对多层钢疲劳强度建立强度预测模型,为多层钢疲劳强度提供合理的预测,误差率在 10%以内。

邀请报告

E13-IO9

马氏体钢超高周疲劳研究的新进展

朱刚、刘瑀珂、康博、朱明亮*、轩福贞

华东理工大学，机械与动力工程学院，上海，200237

新一代蒸汽/燃气轮机的旋转部件在严苛服役环境下呈现低应力长寿命 (>10⁷ 周次) 趋势，超高周疲劳破坏是其典型的失效模式，长期困扰装备的服役安全。本研究以典型汽轮机用马氏体钢为研究对象，开展了蒸汽、盐水等环境下的超高周疲劳试验研究，分析了氢元素对长寿命阶段疲劳裂纹萌生的影响，并讨论了低强钢的频率效应问题。结果表明，内部含有缺陷时，氢元素在缺陷处聚集，氢元素促进了板条马氏体的断裂，临氢环境下细晶区机制仍遵循马氏体板条断裂形成位错胞 (Zhu 模型)，缺陷-基体-环境交互作用是缺陷致裂的核心问题；内部不含缺陷时，氢元素吸附于材料表面，促进了局部区域内的位错运动，增强了局部塑性，降低了晶界结合力，使得在交变载荷的作用下以滑移带形式萌生表面裂纹，裂纹萌生模式为“表面-内部-表面”；基于原位热成像技术，获得了超声疲劳过程中试样表面的温度演变规律，建立了微塑性评估方法，发现在未冷却模式下，超声疲劳损伤机制为材料在强力-热耦合下的不均匀塑性变形，而冷却模式下因位错与析出相交互作用使低强钢表现出超声强化效应。进一步开展了基于机器学习方法的超高周疲劳寿命预测研究，发现训练集越大，疲劳寿命预测准确率越高，数据与物理模型的融合可显著提升预测准确度，为小样本数据下的超高周疲劳寿命预测提供了解决方案。

邀请报告

E13-IO10

高强度夹杂物开裂判据及疲劳强度优化研究

张鹏*、刘睿、王斌、王鹏、许自宽、张哲峰

中国科学院金属研究所

建立夹杂物对高强度疲劳性能的影响规律及理论判据，对优化其疲劳性能至关重要。本报告以高碳铬轴承钢为研究对象，通过使用不同冶炼工艺和不同热处理制度获得具有不同强度与韧性的高强度钢，随后进行了拉伸、断裂韧性、高周疲劳试验，系统地研究了夹杂物与强韧性对高强度高周疲劳性能影响的耦合作用。随着抗拉强度的增加，疲劳强度系数逐渐增大而疲劳强度指数则逐渐减小，导致轴承钢的疲劳强度先增加后降低；基于断裂力学方法，首次建立了由夹杂物导致高强度疲劳断裂的能量失效判据，揭示了临界夹杂物尺寸与抗拉强度和断裂韧性的定量关系；阐明疲劳源处不同夹杂物类型的疲劳开裂机制，决定了高强度疲劳寿命呈现显著差异，首次提出通过考虑夹杂物类型三维体积因素，修正了 Murakami 的夹杂物二维面积模型，并对疲劳寿命进行了预测且在两倍误差带范围内。在此基础上，实现了轴承钢疲劳性能的大幅提升。本报告提出的高强度疲劳失效判据、不同夹杂物类型开裂机制以及静态性能与疲劳性能的关系，为冶金学家控制高强度夹杂物尺寸、类型提供理论依据，对提高工程材料服役寿命进行选材、疲劳性能优化具有参考价值。

口头报告

E13-O15

高强度疲劳裂纹扩展机制与预测模型研究李鹤飞*^{1,2}、张鹏²、张哲峰²

1. 石家庄铁道大学

2. 中国科学院金属研究所

疲劳裂纹扩展机制是揭示裂纹在复杂交变载荷下如何扩展及其与微观结构的相互作用，为关键工程构件损伤容限设计和寿命评估提供重要的理论依据。长期以来，人们对高强钢疲劳裂纹扩展机制尚不十分明确，尤其对疲劳裂纹扩展速率变化趋势的理解不够深入，这限制了高强钢构件疲劳寿命估计的准确性。我们通过 X 射线三维成像系统(XRT)和扫描电子显微镜等技术手段研究了 4340 高强钢疲劳损伤演化规律。疲劳裂纹扩展稳态阶段出现疲劳辉纹与韧窝特征共存现象，且随应力场强度因子增大，韧窝占比逐渐增多；三维 XRT 图像则表现为主裂纹前方出现大量的不连续微孔。基于实验观察和损伤分析，我们提出了一种新的疲劳裂纹扩展机制，即钝化复锐-微孔聚合转变机制，并建立了一种疲劳裂纹扩展预测模型，即疲劳裂纹扩展过程中消耗的能量包括以下三种：1) 钝化复锐机制消耗的能量；2) 微孔聚合机制消耗的能量；3) 钝化复锐-微孔聚合混合机制消耗的能量。由预测模型推导出的 Paris 公式中关键参数 m 值与实验结果相符，全阶段疲劳裂纹扩展预测模型在高强钢、钛合金和铝合金中得到了精确验证。

口头报告

E13-O16

竞争失效机制下 Q345 钢角接头的疲劳寿命预测研究

翁硕*¹、周晓洋¹、朱江峰⁴、孟超¹、裴宪军²、朱明亮³

1. 上海理工大学
2. 东南大学
3. 华东理工大学
4. 苏州苏试试验集团有限公司

准确地描述焊接接头的疲劳寿命、载荷水平和断裂位置之间的关系具有重要的工程意义。本研究通过疲劳试验、结构应力法分析、硬度测量、微观组织和断口表面形貌观察等手段系统地研究了 Q345 钢角接头在循环力控制模式下的失效竞争机理和疲劳寿命评价方法。研究表明，随着载荷水平的增加，Q345 钢角接头的疲劳断裂位置逐渐从基板转向了附板。虽然两种失效类型具有相似的断口表面形态，但由于载荷水平和焊缝缺陷的共同作用，疲劳裂纹萌生方式仍有所不同，其中对于基板断裂失效而言，其疲劳裂纹萌生存在多个大面积的缺陷，而对于附着板断裂失效，疲劳萌生区的缺陷面积要小得多。基于结构应力方法，本研究建立了一种新的概率模型，实现了结构应力水平与各失效位置的可能性之间的定性关系，预测结果与实验数据吻合良好。

口头报告

E13-O17

腐蚀疲劳交替环境下 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢的损伤行为研究

张天宇*

空军工程大学

研究工作：研究了腐蚀疲劳交替作用对 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢材料的影响。通过开展 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢在不同腐蚀疲劳交替频次试验，分析腐蚀疲劳交替频率对 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢疲劳寿命、形貌特征等的影响规律，明确其腐蚀疲劳交替损伤机理。

主要研究结果：发现腐蚀时间一定时，0Cr16Ni5Mo1 不锈钢试验件的疲劳寿命随着腐蚀疲劳交替频率的增加而增加。交替频次较低时，疲劳断裂部位主要发生在试验件表面或侧面的腐蚀损伤处，交替频次较高时，疲劳断裂部位也开始从内部缺陷处出现。试验件表面附着的腐蚀产物随着交替周期的进行而减少，但随着交替次数的增加，基体截面深处出现腐蚀产物。

主要研究结论 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢试验件的疲劳寿命随交替次数的增加呈现指数函数规律的增长趋势。腐蚀-疲劳交替作用下 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢的表面腐蚀损伤形式主要为点蚀，裂纹主要萌生于试件表面的缺陷处，腐蚀加速了裂纹萌生的进程。交替次数的增加促进了表面和缺陷处钝化膜的生成，以及腐蚀产物在缺陷内部的堆积，从而使试验件寿命增大。

口头报告

E13-O18

I+II混合模式加载下 U75V 钢轨材料疲劳失效分析：近场动力学表征和试验验证

马晓川*

华东交通大学

对 U75V 钢轨材料在 I+II 混合模式加载作用下的疲劳失效行为进行了分析和表征。首先，开展了 U75V 钢轨材料的疲劳裂纹扩展试验。然后，基于基于常规态型近场动力学论，采用键应变率和键能释放率方法分别表征了钢轨材料的疲劳失效行为。最后，从裂纹扩展长度、路径和角度等方面出发，将模拟结果与实验结果进行了比较，以评估两种方法的表征效果。研究表明：在纯 I 型加载作用下，两种方法都能准确地表征钢轨材料的疲劳失效行为。然而，与键应变率方法相比，键能释放率方法可以在 I+II 混合模式载荷下提供更准确的表征。研究结论有助于结构失效分析时选择更好的材料疲劳断裂表征方法。

邀请报告

E13-IO11

多轴热机械疲劳寿命消耗在线评估技术及软件开发

尚德广，李伟

北京工业大学

采用理论分析和试验验证相结合的方法，首先对热机多轴疲劳试验中输出的载荷谱进行了分析，在单/多轴在线循环计数方法以及多轴疲劳寿命预测技术研究的基础上，提出了一种随机多轴疲劳损伤在线评估方法。然后，针对随机多轴热机械载荷提出了一种等效温度计算方法，以此来考虑温度循环载荷对多轴疲劳损伤的影响，进而提出多轴热机械疲劳寿命消耗在线评估技术。最后，基于上述理论开发了一套功能完整的多轴热机械疲劳损伤评估软件。

邀请报告

E13-IO12

梯度材料结构残余应力的中子散射测试与表征方法

吴圣川*、秦天宇、胡飞飞、奥妮

西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室

截止 2023 年底，中国高铁运营里程超过 4 万公里，位居世界第一。自 2006 年中国高速动车组正式开行至今，关系车辆运行安全的空心车轴设计寿命近半或接近终期，面临着较为迫切的运维改革。其中，仍运行于我国线路的日系 S38C 车轴经历了表面感应淬火技术，表面抗击打和抗疲劳性能突出，但其探伤周期过短、缺陷容限太小，已经严重阻碍了修程修制改革任务。本报告以现役高速动车组碳钢 S38C 车轴为对象，与东莞散裂中子源和日本原子能研究开发机构合作，首次系统开展表面到芯部的残余应力、位错密度、硬度、组织等梯度分布的中子散射测试，为了开展服役中期车轴的剩余寿命评价，把测试的残余应力赋予节点应力，重构获得实物车轴的三维残余应力场，通过系统动力学分析获得车轴临界安全部位的动应

力谱, 在断裂力学框架内, 得到了不同裂纹深度下的剩余寿命, 从而探讨了探伤周期延长的科学性与合理性。本项研究有助于为正在考核的国产 DZ2 车轴的探伤周期制定及运维策略提供技术参考。

邀请报告

E13-IO13

CPFEM 在金属材料疲劳损伤和寿命预测的应用

何金珊*

北京科技大学

随着计算技术的迅速发展, 晶体塑性有限元法(CPFEM)由于具有解决在复杂介质内部和外部边界条件下的晶体力学行为问题的能力, 在研究金属材料疲劳损伤行为以及疲劳寿命预测有着广泛的应用。本研究通过 CPFEM 结合构建多个 RVE 模型, 并在累积耗散能基础上考虑位错运动的不可逆性, 构建新的疲劳寿命预测准则, 成功预测了微晶铸造 K4169 合金的高周和低周疲劳寿命。同时, 通过原子力显微镜测量驻留滑移带的“挤出”和“侵入”高度并结合 CPFEM 预测了不同加载条件下的不可逆系数, 构建了系数与疲劳寿命的双对数线性关系。此外, 本研究通过原位疲劳试验结合 CPFEM 研究了钴基单晶高温合金低周疲劳下短裂纹的萌生扩展过程。研究表明, 具有累积剪切应变最大的滑移系主导了疲劳裂纹的萌生位置及扩展方向。

口头报告

E13-O19

热-机械荷载下选择性激光熔化 Inconel 718 疲劳裂纹扩展行为

潘斯宁*¹、徐守文^{2,3}

1. 贺州学院
2. 中国科学院力学研究所
3. 中国科学院大学

高温合金 Inconel 718 广泛应用于高功率密度发动机的热力面部件中, 发动机启动-停机和正常运转工况下, 热力面部件受到低频高幅和高频低幅复杂热-机械耦合荷载。增材制造技术因其材料利用率高、快速且近净成型的特点而受到广泛关注, 但逐层堆积过程导致的力学各向异性也会显著影响其疲劳性能。同时, 打印完成的零件往往需要进行不同策略的热处理来减少缺陷、降低各向异性并提升力学性能。因此, 对于不同取向和热处理的镍基高温合金材料在热-机械耦合荷载下的疲劳行为研究是非常有价值的。本文利用脉冲激光变频变幅热-机械耦合疲劳实验系统, 对不同取向以及不同热处理工艺处理后的镍基高温合金材料进行微结构表征并开展热-机械疲劳行为研究。自主搭建的激光变频变幅热-机械耦合疲劳实验系统可实现精确且稳定的能量输入, 其低频高幅热循环温度在 100-700 范围, 高频低幅热循环温度波动约为 80, 可模拟高性能发动机的实际服役工况。实验结果表明, 垂直构建试样的抗拉强度低于水平构建试样, 但塑性高于水平构建试样; 采用热处理可以显著提高强度, 但相应地降低塑性, 并且热处理降低了垂直和水平构建的样品之间抗拉强度的差异。在变频变幅热-机械荷载的耦合作用下, 材料内部反复滑移促成微裂纹萌生。累积热损伤包括低频高幅热荷载引起的塑性变形和高频低幅热荷载引起的弹性变形, 且低频高幅热荷载对裂纹的萌生和扩展起主导作用。

口头报告

E13-O20

旋转载荷下单晶涡轮叶片榫头蠕变-疲劳耦合损伤特性研究

卢志辉、宣海军*、陈传勇
浙江大学

针对航空发动机涡轮叶片榫头部位蠕变-疲劳交互作用损伤失效问题，搭建了用于实现真实涡轮叶片蠕变-疲劳试验的旋转试验台，在高速旋转和高温耦合的条件下进行了单晶涡轮叶片的蠕变-疲劳试验。叶片榫头部位在蠕变和疲劳交互作用影响下，经历了 343 次循环后在榫齿根部出现了明显裂纹。扫描电镜下观察断口起源于榫头应力集中处，为线源特征，且存在大量二次裂纹和孔洞，结合榫头的断口形貌和金相组织发现疲劳损伤占主要因素。最后，基于临界平面的循环损伤累积模型，对单晶涡轮叶片榫头的寿命进行分析，结果表明：榫头部位理论危险点与试验结果一致，且计算寿命与试验寿命相近。

口头报告

E13-O21

固溶时效处理对激光粉末床熔合镍基高温合金高周和超高周疲劳性能的影响研究

孙传文、李伟*
北京理工大学

热处理是一种通过改善材料的微观结构、细化晶粒和消除残余应力来改善增材制造(AM)材料力学性能的有效后处理方法。然而，热处理对增材制造材料的疲劳性能影响尚不明确，特别是在高温条件下，尤其是超高周范围内的影响。本研究在 25°C 和 650°C 下对沉积态试样和固溶时效处理试样开展应力比为-1 的轴向疲劳加载试验，利用二维和三维显微镜、X 射线衍射和电子背散射衍射等测试技术，探究固溶时效热处理对激光粉末床熔(L-PBF)制备的镍基高温合金高周和超高周疲劳性能的影响。结果表明，在相同的试验条件下，固溶失效试样的疲劳寿命明显高于沉积态试样，疲劳性能的提高主要是归因于在微观组织中 Laves 相的溶解和 γ' 和 γ'' 相的析出。此外，适量的 δ 相有利于阻碍位错的运动。内部失效更容易发生在高温环境下，基于此揭示了三种内部疲劳失效机制。结合电子背散射衍射分析，观测到微裂纹的曲折扩展路径与晶体学小平面对应。综上所述，阐述了 L-PBF 镍基高温合金在固溶时效热处理下的相变过程和强化机理。最后，提出了一种基于能量耗散的疲劳寿命预测模型，其预测结果与试验结果具有较好的吻合度。

口头报告

E13-O22

Fusing image and physical data for fatigue life prediction of nickel-based single crystal superalloys

Zhuohan Li¹, Tianli Zhao², Jing Zhang¹, Junlin Hu¹, Yiliang You*¹

1. Beihang University
2. Northeastern University

This paper introduces a method for predicting the fatigue life of single crystals, which fuses image data and physical data by exploiting machine learning techniques. The proposed approach establishes a comprehensive study by progressively contributing a new database to the field, enabling the inference of service conditions, including temperature and σ_{max} , as well as inherent material properties from fracture images, such as crystal orientation. We evaluate the effectiveness of the proposed method via its application to the fatigue life prediction of DD6 alloy, which achieves promising performance across various crystal orientations. The extensive experimental analysis and evaluation suggest that our proposed method has high predictive accuracy and computational efficiency of our proposed method. These results show that our approach holds promise for enhancing our understanding of material fatigue and improving predictive precision in failure analysis.

邀请报告

E13-IO14

先进材料温度相关性疲劳/断裂强度理论表征方法研究

李卫国*

重庆大学航空航天学院

随着现代科技的快速发展，拓展先进材料服役条件的需求愈发强烈，先进材料在超常条件下的力学性能成为各领域关注的核心问题。报告人紧密围绕国家高端技术发展重大需求，瞄准在国家战略装备有着广泛应用前景的先进材料及结构，聚焦其在极端服役条件下的力学性能表征理论及方法。首先对报告人原创性提出的力热能量密度等效原理进行简单介绍；然后对基于此原理建立的系列无拟合参数的温度相关性断裂强度、疲劳强度以及疲劳裂纹扩展门槛值理论表征模型进行介绍；进一步介绍该原理在温度/压强相关性物理性能及尺寸相关性力学/物理性能理论表征上的应用；最后以该原理在声场/电场/辐照等极端服役环境下材料力学性能理论表征上的应用为例，对“力热能量密度等效原理”在力学、材料、物理学、机械和土木等多学科交叉领域的拓展应用进行简单介绍。

邀请报告

E13-IO15

材料疲劳强度与抗拉强度一般关系发展及应用

庞建超*、高崇、李文彬、陈宇、邹成路、腾晓远、李守新、张哲峰

中国科学院金属研究所

针对材料疲劳强度测试与预测，特别是复杂环境、复杂载荷服役构件材料测试与评价费时、费力、费钱的问题，经过 16 年系统探索与研究，凝炼“化繁为简、以易预难、分门别类、形神尽似”的研究思路，基于相似性原则提出系列简便、快速、准确的材料疲劳强度新方法：1) 发现疲劳比随抗拉强度增加线性下降，改变金属材料疲劳比为常数的“传统认知”，首次提出疲劳强度与抗拉强度的一般关系：抛物线关系，该关系适用于多种材料与构件(钢铁、铝合金、铜合金和钛合金等 700 多疲劳强度数据)；2) 通过多组拉伸与两组疲劳强度测试实验，基于疲劳强度与拉伸强度一般关系，可快速预测最优疲劳强度、临界抗拉强度，实现材料疲劳性能快速预测与优化；3) 发现疲劳比可作为材料疲劳性能快速预测关键参数，可以打通疲劳强度与平均应力、缺口系数与服役温度等影响因素关系，实现材料疲劳强度快速预测。这些原创方法得到国内外疲劳同行的关注、引用与发展，并开发成软件在发电机、内燃机、燃气轮机与航空发动机等重要行业推广应用。

口头报告

E13-O23

连续材料与结构中的损伤和裂纹有关工程设计和失效分析的数学模型和计算方法

虞岩贵*

浙江科技大学

口头报告

E13-O24

镍基单晶高温合金高温疲劳行为的尺寸效应

张悦*

镍基单晶合金制造的涡轮叶片是航空发动机中最关键的热端部件之一，它们在很大程度上直接决定了发动机的性能水平。为了增强叶片的承载力，涡轮叶片普遍采用空心结构设计。随着航空发动机进口温度的持续提升，涡轮叶片的设计趋向于更薄的壁厚。这种薄壁结构特征对单晶涡轮叶片的力学性能有着显著的影响。当前，国内外对镍基单晶高温合金薄壁效应的研究主要集中在其拉伸和蠕变性能上，而关于其疲劳性能的研究尚不多见。此外，疲劳试验的温度、频率以及镍基单晶高温合金的一次取向和二次取向均会对疲劳性能产生影响。在本文中，选择了国产第二代单晶镍基合金 DD6 作为研究对象，旨在深入探究合金厚度对其疲劳性能的影响。本文开展了基于 DD6 单晶高温合金薄壁试样的应力控制低周疲劳试验。试验结果表明在高温区单晶高温合金具有明显的尺寸效应，试样越薄，疲劳寿命越低，薄壁试样的疲劳寿命约为常规圆柱形试样的 20%。基于此，本研究提出了一种考虑厚度的唯象的疲劳寿命预测模型，对单晶薄壁试样的寿命预测效果良好。

口头报告

E13-O25

激光增材制造镍基高温合金疲劳性能各向异性及其调控

赵哲南*¹、杨未柱²

1. 浙江大学
2. 西北工业大学

热端部件作为航空发动机最关键的结构，决定了发动机的性能。其工作环境严苛，承受离心应力、振动应力等多种载荷，工况复杂、极易发生疲劳失效，镍基高温合金由于其在高温下出色的强度、抗疲劳、抗蠕变等力学性能，成为航空发动机热端部件最关键的材料。激光增材制造技术非常适合开展高温合金热端部件制备。

在激光增材制造 GH4169 沉积态和 1050°C 固溶时效热处理态的块状毛坯中，通过线切割制备横、纵向疲劳试样，开展准静态拉伸及疲劳试验，研究激光增材制造 GH4169 镍基高温合金各向异性及热处理的调控。结果显示，沉积态合金纵向强度、抗疲劳性能高于横向，而经过热处理后各向异性削弱。这是由于合金纵截面具有较低的<100>织构，以及和制备方向平行竖直向上生长的枝晶组织结构；而横截面<100>织构较为显著，且脆性 Laves 相和载荷方向垂直。此外，沉积态横向残余拉应力高于纵向。而 1050°C 固溶时效热处理显著削弱了枝晶间偏析和残余应力。

口头报告

E13-O26

滚压成型 GH4169 螺纹紧固件的高周疲劳性能研究

胡力元、卢艳丽*

西北工业大学材料学院

GH4169 高温合金在高温环境下具有良好的机械性能，常作为连接飞机机体的高强度螺纹紧固件的关键材料使用。为保证飞机安全运行，连接螺纹结构件需要同时满足高强度和高疲劳寿命的要求。滚压螺纹会在紧固件表面产生一定深度的残余压应力层，同时还会改善表面粗糙度，相比传统的车削螺纹，这两方面都有利于提高螺纹紧固件的疲劳性能。本工作以航空航天领域广泛使用的 GH4169 高温合金为研究对象，采用滚压成形工艺制备了表层具有滚压变形层结构的螺纹件试样，研究了其微观组织演化机制、力学性能、

高周疲劳行为以及疲劳损伤机理。结果表明位错滑移主导其晶粒细化机制：位错不断切割细化位错胞、亚晶粒以及第二析出颗粒碎化是螺纹件表层晶粒细化的主要演化机制。经滚压处理后 GH4169 螺纹件疲劳强度、疲劳比显著增加，其提高原因主要归结于下述两个因素的协同作用：其一是高强度的表面晶粒细化层抑制了疲劳裂纹从表面萌生，滚压变形层有效抑制了循环变形过程中表面晶粒的应变局域化，且滚压处理后表层第二相析出颗粒碎化以及所引入的残余压应力也有助于延迟表面裂纹萌生；另一方面次表层晶内及晶界区域形成的高密度位错组态（高密度位错网、位错缠结及位错墙）有效降低了裂纹扩展速率，在一定程度上延缓了裂纹扩展。这些结果对于提高飞机高强度螺纹紧固件的疲劳寿命，缩短其研发周期，降低其研发成本具有重要的指导意义和实用价值。

口头报告

E13-O27

镍基高温合金超薄带材低周疲劳行为研究

李雨晴、孟宝*、门明良、万敏

北京航空航天大学

镍基高温合金薄壁构件在航空航天领域服役过程中常承受着复杂的循环载荷，而 0.1-0.3mm 厚度的薄壁构件与大厚度构件在疲劳损伤行为及微观机理等方面存在显著差异，呈现出明显的尺寸效应，因此传统理论难以对其疲劳性能进行分析。本文针对 0.1mm 厚的 GH4169 超薄板疲劳损伤行为及损伤机理不明的问题，研究其在超薄尺寸下的低周疲劳行为。本研究采用应变控制方法进行低周疲劳实验，通过视频引伸计测定试件的应变值，为防止试件屈曲，将试件拉伸变形至工程应变为 25% 的状态，然后进行应变幅值分别为 0.14%、0.21%、0.28% 的循环加载-卸载试验至试件断裂，频率为 5Hz，记录其循环次数，并绘制滞回曲线。通过扫描电子显微镜，观察试件断口微观形貌，揭示不同应变幅值下 GH4169 疲劳断裂的微观演化机理。结果表明，随着应变幅值的增加，材料的疲劳寿命降低，卸载模量的最大值减小，循环加载过程中的卸载模量呈波动上升趋势，且该趋势逐渐增大。拉伸卸载模量和压缩卸载模量的差值增大，应力谷值下降，且下降速率增大。试验中，应变幅为 0.14%、0.21%、0.28% 时，拉伸卸载模量波动上升幅度分别为 2.05%、2.22%、2.31%。当应变幅从 0.14% 增加至 0.21% 时，卸载模量最大值下降了 7.38%；当应变幅从 0.21% 增加至 0.28% 时，卸载模量最大值下降了 3.62%。

口头报告

E13-O28

基于晶界工程提升 718Plus 合金塑性的微观机理

李慧*

上海大学

镍基合金在长时效或服役后在晶界处析出 η 相会导致晶界的脆化，弱化材料的力学性能，调整脆性析出相的分布规律可以抑制裂纹的萌生与扩展，提升材料的综合力学性能。本工作利用 EBSD 技术、扫描电子显微镜 (SEM)、原子探针层析技术 (APT)、X 射线显微镜 (XRM) 等研究了不同工艺处理的 718Plus 合金的显微组织演化规律，分析了该合金显微组织与沿晶裂纹萌生与扩展间的关系。经过晶界工程处理，样品中低 Σ 重位点阵 (CSL) 晶界比例提升至 70% 以上，优化了晶界网络特征，调整了 η 相的分布规律。由于晶界网络特征及 η 相分布规律的优化，样品的强度没有明显变化，室温拉伸延伸率由 7.6% 提升至 21.2%，704°C 高温拉伸延伸率由 12.6% 提升至 17.1%，显著的提升了材料的拉伸性能。拉伸过程中的微裂纹主要在晶界处及大尺寸的析出相处萌生，并沿着随机晶界扩展。根据实验结果，分析了强化相的演化规律，晶界类型对晶界析出相析出与分布规律的影响机制，以及拉伸性能提升的微观机理。

口头报告

E13-O29

热障涂层对 DD6 镍基单晶高温合金疲劳寿命和断裂行为的影响研究

李家平、李东旭、范学领*

西安交通大学, 西安市极端环境服役性能与防护技术重点实验室

本文以带涂层和不带涂层的 DD6 镍基单晶高温合金为对象, 对有、无涂层试样的断口形貌、裂纹萌生扩展行为和损伤机理进行了分析, 阐明了热障涂层对 DD6 单晶高温合金的疲劳失效行为和寿命的影响。结果表明, 两类试样的裂纹均由基底缺陷处萌生, 然而应力水平对其裂纹扩展行为有着显著影响。在应力幅值较低时, 试样以 I 型断裂为主, 随着应力幅值的增加, 断裂面呈现出从 I 型断裂到晶体断裂的转变; 应力幅值对试样的裂纹扩展机制及裂纹密度也有着较大影响。此外, 对有、无涂层试样的循环硬化/软化曲线、应力-应变曲线及疲劳寿命进行了分析, 结果表明, 热障涂层提高了单晶基体的疲劳寿命。最后, 采用 Basquin 模型预测了带涂层 DD6 镍基单晶高温合金的疲劳寿命, 预测结果与试验相比误差不大于 2 倍分散带, 预测精度较好。

墙报

E13-P01

增材制造 TC11 钛合金疲劳裂纹扩展行为及失效机制研究

吴玉雪、王永欣*

西北工业大学

在本项研究中, 对比了 LRP 成型的 TC11 合金(名义成分 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si)及传统锻件 TC11 的疲劳等性能, 并对 LRP TC11 裂纹扩展行为的各向异性及微观组织对疲劳性能尤其是疲劳寿命的影响进行探究, 结果表明: LRPTC11 裂纹扩展速率具有不太显著的各向异性及周期性, 光镜下发现两者都与相结构有关, 魏氏组织的边界存在片状 α 相, 其余晶内为大量针状 α 相其疲劳性能低于边界片层组织, 当裂纹扩展到魏氏组织边界时扩展速率变慢, 使裂纹扩展具有一定周期性。同时, 激光成型的 TC11 内部缺陷如孔洞、杂质等对疲劳性能有显著影响, 孔洞尺寸大小、据表面距离会干涉裂纹萌生和扩展进程从而影响疲劳寿命, 疲劳寿命短的试样裂纹扩展路径会一定程度上更单一, 而微观组织差别是影响疲劳性能的主要因素, 本研究还系统解释了微观组织特点对显微形貌的影响从而干扰疲劳性能的失效机制。

墙报

E13-P02

TB17 钛合金高周疲劳裂纹萌生机制研究

赵晨曦、王永欣*

西北工业大学

为探究 TB17 钛合金 2 种典型组织形态(双态组织和网篮组织)的疲劳性能, 揭示微观组织对其疲劳裂纹萌生机制的影响, 采用单轴疲劳试验机对其疲劳性能进行了测试, 并结合扫描电镜及电子背散射衍射技术对 TB17 的组织与疲劳性能进行了深入研究。结果表明: 双态组织的疲劳寿命与最大应力呈双线性关系, 表明存在具有竞争关系的不同疲劳裂纹萌生机制; 网篮组织具有最高的疲劳强度。高周疲劳断口均为单源萌生, 在疲劳裂纹萌生区可以观察到小平面的特征。变形主要发生在 $\beta+\alpha_s$ 基体中, 疲劳断裂口呈现较高的核平均取向差, 应变局域化有助于疲劳裂纹的萌生。两种组织的裂纹萌生处的 α_p 晶粒中基底滑移被激活, 微裂纹倾向于在 α_p/β_{trans} 界面形核, 微裂纹扩展表现出晶体取向依赖性特征。

墙报

E03-P03

初探缺口效应与表面完整性对铝合金结构疲劳行为的协同作用机理于谊飞、蒋文春*、王炳英
中国石油大学（华东）

制造强国战略中，工程结构的疲劳寿命预测至关重要。受限于缺口、粗糙度、材料组织等影响因素间盘根错节的作用关系，精细化寿命预测模型的构建异常困难。对于结构疲劳，不同阶段之间的疲劳行为差异及所消耗循环周次的边界定义仍然是模糊且有争议的，由此导致通过累计各阶段所消耗循环周次的总和来预测结构疲劳全寿命的方法可能是一个伪命题。因此，本研究尝试转变思路：从疲劳时间序列转换到缺口空间序列，探索考虑缺口-粗糙度-微观组织协同作用的疲劳全寿命预测模型。

墙报

E03-P04

超温循环氧化对 GH3230 低周疲劳行为与断裂机制研究王莉莎、曹睿*
兰州理工大学

随着航空发动机推重比的不断提高，发动机的涡轮前进口温度也呈现不断升高的趋势，热端部件结构材料的使用温度和耐久性成为影响发动机性能的关键因素。某些极端的飞行或试验工况下燃烧室还会出现短时超温现象，这样的热循环可能引发低周疲劳(LCF)由于不同的热膨胀和收缩。镍基高温合金 GH3230 因其优异的性能而被广泛应用于航空和航天事业，其关键性能标准是材料能够承受由启动、运行和关闭引起的大量热循环，因此，本文主要探究超温循环氧化对 GH3230 低周疲劳行为的影响。将 GH3230 合金模拟服役条件进行 1200°C/0（原始）、40、60、100 次（空冷至室温停留 5 min 为一个循环）的循环氧化试验，再将氧化损伤后不同状态下的试样进行室温、700°C 静态拉伸及低周疲劳试验。实验结果表明，室温下，随着循环氧化次数的增加，疲劳寿命逐渐下降。其原因主要和循环氧化过程氧化损伤的形成有关：（1）大面积的氧化层剥落以及氧化层表面碳与氧反应生成的气孔使其表面凹凸度更大，裂纹萌生的几率更大；（2）近表面的晶粒尺寸变得更大，使其晶界面积减少，加速了晶体的滑移，导致应力集中，且疲劳过程中产生的大量塑性滑移带及碳化物的开裂，加速其裂纹扩展。（3）去掉氧化皮后试样不受氧化层影响，表面变得光滑，减小了裂纹萌生的几率。高温 700°C 下疲劳寿命较之室温下明显下降，裂纹从室温下的沿晶裂纹变为沿晶-穿晶混合形式，且裂纹也有被氧化的迹象，说明疲劳试验温度的升高明显加快了疲劳裂纹的起裂和扩展。

邀请报告

E13-IO19

高周疲劳短裂纹扩展行为原位实验研究王宠*、谭凯、沈郑钰、王清远
四川大学

疲劳裂纹的初始扩展在高周疲劳寿命中占比远高于 Paris 公式对应的稳态扩展寿命，对寿命预测具有重要意义。本文基于超声谐振加载原理，发展了一种高周疲劳短裂纹原位实验方法，利用原位光学显微系统在振动加载的同时记录了双相等轴 TC4 钛合金疲劳裂纹的扩展行为，通过自研裂纹识别算法获得了短裂纹扩展速率，并根据显微表征将其与钛合金的微观组织特征进行了关联分析。采用神经网络算法获得了短

裂纹扩展规律，进一步分析了裂纹扩展的微观机理。通过对短裂纹扩展速率和扩展路径的预测实现了对 TC4 钛合金短裂纹高周疲劳扩展寿命的良好预测。

邀请报告

E13-IO17

增材制造飞行器材料的疲劳断裂行为

马玉娥*、孙文博

西北工业大学

随着增材制造技术在飞行器结构中的快速发展，增材制造飞行器材料疲劳断裂行为亟需研究。由于增材制造工艺的独特性，导致微观组织等具有各向异性。增材制造后各向异性不能完全消除。为厘清打印方向对材料的力学性能响应机理，梳理了飞行器不同载荷形式，设计了不同打印方向的试样，研究了不同载荷作用下增材制造钛合金的各向异性响应分析了孔洞分布规律，研究其疲劳裂纹扩展行为，建立了各向异性本构方程，为增材制造技术在飞行器结构中的应用提供了力学基础。

邀请报告

E13-IO18

脉冲电流辅助超声冲击强化对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响

张宇、叶一璇、黄秉汉、唐超、杨洋、祝利成、叶畅*

华中科技大学

通过脉冲电流辅助超声冲击强化 (Eletropulsing assisted-Ultrasonic Impact Treatment, EA-UIT) 对 TC4 钛合金进行表面改性处理，借助于激光共聚焦、TEM、EBSD、和 XRD 研究了处理前后钛合金表层的表面形貌、微观结构和残余应力演变规律；利用疲劳试验机对比分析了 EA-UIT 对钛合金疲劳性能的影响规律。研究表明，经过 EA-UIT 处理后，钛合金近表面区域观察到严重细化的晶粒和具有显著塑性流动特征的变形层，表面粗糙度由 $0.82\ \mu\text{m}$ 降低至 $0.45\ \mu\text{m}$ 、表面残余压应力提升至 $1460\ \text{MPa}$ 、晶粒尺寸细化至 $0.64\ \mu\text{m}$ 。疲劳实验结果表明，EA-UIT 处理后 TC4 钛合金的高周疲劳寿命得到了显著的提高，疲劳极限也大幅度提升。结合疲劳断口形貌特征、残余应力松弛行为和织构演变规律进一步分析了 EA-UIT 处理的疲劳强化内在机理。在高应变率超声冲击作用下，在表面一定深度区域产生剧烈的塑性变形，引起位错增殖、晶粒细化和有益的残余压应力；在低频高能脉冲电流作用下，材料中位错激活能显著降低，位错运动阻力下降，更容易发生塑性变形，使得 EA-UIT 处理进一步细化晶粒、引入更深塑性变形层和更严重加工硬化效果，从而显著改善 TC4 钛合金的疲劳抗性。

口头报告

E13-O30

TC21 合金多层次片层组织的缺口高周疲劳损伤机理

黄朝文*、李响

贵州大学 材料与冶金学院

片层组织是高强韧钛合金的典型服役组织，常见构件均带各类缺口，前期研究发现，组织与缺口参数对钛合金构件的疲劳损伤具有协同影响效应，但相关机制尚不明晰。本文通过三重热处理得到 TC21 合金由 α 丛束 (αc)， α 板条 (αlat) 和细片层时效 α (αfine) 共同组成的多层次片层组织，并系统研究了其缺口高周疲劳损伤微观机理。主要结论如下：

1.时效温度的增加为相变提供了更充分的驱动力，导致 α_c 和 α_{fine} 的尺寸显著增加。此外，它还有利于 α_{lath} 中 Al 元素偏析，从而影响 α_{lath} 和 α_2 纳米颗粒的尺寸和含量。TC21 合金的缺口拉伸性能和 NHCF 性能随时效温度的升高而呈现先增加后减小的趋势。微观组织的细化和不均匀组织区域的增加均对 NHCF 性能产生了不利的影响。尤其是后者，显著促进疲劳裂纹的早期萌生。

2.微观组织的细化加剧了局部应力集中，导致疲劳微裂纹沿 $\alpha_{lath}/\beta_{trans}$ 界面的萌生和扩展。此外，细小的 α_{fine} 中高应变的 $\{\alpha\}$ 孪晶界面开裂引入了一种新的疲劳裂纹萌生机制。 $\{\alpha\}$ 锥面滑移和 $\{0002\}\alpha$ 基面滑移的协同作用促进了 α_{lath} 内部 PSBs 的产生和局部硬化。这不仅促进 α_{lath} 内部微孔和微裂纹的萌生，而且促进微裂纹穿过 α_{lath} 扩展。此外，不均匀组织区域的不均匀变形是引发微孔和微裂纹的主要驱动因素。

3.激活锥面滑移所需的循环载荷和临界分切应力均高于基面滑移，导致基面滑移先于锥面滑移激活，并充分进行。因此，基面滑移的优先激活是不可逆循环塑性变形区微孔和微裂纹形成的前提条件。此外，循环应力、微观组织尺寸、 α_2 纳米颗粒含量等因素对多重滑移的启动有协同作用，且不均匀组织区域的非均匀变形优先激活的是基面滑移而不是锥面滑移。

口头报告

E13-O31

喷丸强化对含缺陷 TC4 合金疲劳裂纹萌生和扩展影响研究

何悦、陈传勇、宣海军*

浙江大学能源工程学院高速旋转机械实验室

金属材料表面喷丸强化处理对其疲劳裂纹萌生和扩展性能具有显著影响。本文对钛合金 TC4 试样进行喷丸强化，结合室温下含不同尺寸缺陷的试样疲劳试验和应力强度因子计算，研究了喷丸强化前后 TC4 合金在不同尺寸、不同载荷下的疲劳裂纹萌生和扩展行为。结果表明：喷丸强化可以提高 TC4 总疲劳寿命，缺陷尺寸相同时，较低水平载荷下抗疲劳效果更加明显，载荷水平相同时，较小缺陷尺寸下抗疲劳效果更加明显；相比于未强化试样，经喷丸处理后的试样裂纹萌生寿命显著提高，裂纹扩展寿命有所降低；利用模型和有限元进行了萌生寿命和扩展寿命分析，分析结果与测试结果有良好一致性。

口头报告

E13-O32

TC17 合金网篮组织的高周疲劳性能研究

卢云梅、卢艳丽*

西北工业大学材料学院

TC17 合金具有高强度、高断裂韧性和高淬透性等特性，广泛应用于航空航天、医疗器械等高端领域。在服役过程中，TC17 合金零部件由于受到高频循环载荷的作用，极易引起疲劳失效，其微观组织的疲劳与断裂性能是决定该材料能否用于先进航空发动机叶盘类锻件制造亟待解决的问题。因此，本文采用 SEM、EDS 和 EBSD 等手段对 TC17 钛合金网篮组织的高周疲劳断口进行观察，分析 TC17 合金疲劳失效特征及机理，明确引起失效的主要损伤形式。基于疲劳条带的形成理论和 Paris 公式，研究了疲劳裂纹形成和扩展的规律，对裂纹扩展寿命进行定量分析。结果表明，TC17 合金网篮组织的疲劳断口较粗糙，表面起伏较大，无明显塑性变形，裂纹源区网篮组织中的 α 片层交织的形态，表明 α/β 相界在裂纹扩展中起到了显著的阻碍作用，裂纹扩展区疲劳条纹间距的对比提供了关于裂纹扩展速率的定性信息，断口寿命反推表明高周疲劳裂纹萌生寿命均占疲劳总寿命的 85% 以上。网篮组织中 α 丛域与 β 晶界是影响滑移变形的两个最主

要组织特征，位错滑移可穿过 β 基体进行而不改变滑移方向，滑移线在经过晶界和 α 相域边界时会发生明显的转折。网篮组织对 TC17 钛合金抗疲劳裂纹扩展能力具有显著影响，其中原始 β 晶粒对裂纹扩展路径影响较大，主裂纹多在原始 β 晶界位置发生偏折，裂纹路径曲折，分叉较多，并在断口上留下 β 晶粒形貌。

邀请报告

E13-IO16

设计三重功能纳米析出相塑韧化高强层状亚稳钛合金

张金钰*

西安交通大学

亚稳工程，即利用相变/孪晶诱发塑性(TRIP/TWIP)，通过动态 Hall-Petch 效应显著提高亚稳态合金的加工硬化率，从而平衡材料的强度-延/韧性矛盾。然而，TRIP/TWIP 效应通常具有较低的临界启动应力，导致合金展现出极低的屈服强度，从而也限制了此类合金进一步的工程应用。如何大幅度提升亚稳态合金 TRIP/TWIP 的启动应力以提升材料的屈服强度，并在基体中实现变形机制启动顺序的精准控制，仍然是目前单相亚稳态合金设计所面临的一个挑战性难题。针对上述问题，团队提出了一种与众不同的结构设计策略，即少量的多形态硬质-塑性 α 纳米析出相分布于亚稳态软相 β 基体的新型异质叠层结构，明显不同于以往大量的亚稳态软相镶嵌在硬相基体中的层状化设计。这种独特的纳米析出相与层状化设计相结合的微观组织优势在于：叠层结构极大的提升了亚稳态 β 基体的马氏体相变启动应力，使得原本在高应力下启动的位错滑移机制在低应变下得以出现，实现合金“增强”，同时持续提高的加工硬化能力和应力水平使得马氏体相变又能够在高应变下发生，成功实现了 ODP 与 TRIP 在塑性变形过程中的“无缝衔接”，实现合金“增塑”，而且层间开裂机制与裂纹偏转能够提升材料的韧性，实现合金“增韧”。这种新型异质叠层结构设计策略为开发高性能亚稳态 β 钛合金提供了范例，并为设计先进钛合金和其它具有类似特性的金属结构材料提供了新的思路。

邀请报告

E13-IO20

激光粉末床熔融制备 K477 疲劳短裂纹扩展行为及模型探究

张锋、钱桂安*

中国科学院力学研究所

K477 是镍基沉淀硬化型等轴晶高温合金，其在 900 °C 以下具有良好的蠕变强度、抗硫化性能、高温拉伸塑性和高温组织稳定，是航空发动机中的叶片的关键制造材料，其高温抗疲劳性能直接影响发动机的耐久性和可靠性。采用激光粉末床熔融 (Laser powder bed fusion, LPBF) 工艺，能够实现对高温合金气冷涡轮叶片材料性能的局部调控和复杂冷却内腔成形，解决涡轮叶片超高温、强瞬变的设计难题。本文通过对 LPBF 的 K477 样品材料首先进行微结构表征，通过金相显微镜、SEM 和 EBSD 技术进行观测分析。然后进行开展室温、300°C、650°C 和 750°C 下进行不同应力比的原位高温疲劳实验。基于数字图像技术，量化短裂纹扩展速率及速率，分析不同温度下疲劳短裂纹萌生和初始扩展的过程与机理，揭示不同温度、应力比及典型微结构对疲劳短裂纹扩展速率的影响机制。利用多尺度耦合方法，基于 Murakami 和 Kitagawa-Takahashi 模型和原位实验结果，建立增材制造高温合金短裂纹扩展模型。研究结果表明疲劳裂纹萌生位置有温度和应力决定，高温大应力比下呈现多裂纹萌生特点，且均由位错滑移带局部损伤所致。通过对 800°C、R=0 的材料高周疲劳极限进行预测，可以得到良好的预测精度，其误差 $\leq 15\%$ 。

口头报告

E13-O33

界面对激光熔覆修复 Ti60 钛合金组织和力学性能的影响陈金瀚^{*1,2}、陈玮¹、袁荒²

1. 中国航空制造技术研究院
2. 清华大学

本研究采用激光直接能量沉积技术制造具有非均质结构的高温钛合金单道和修复样品。通过实验对非均质结构进行了详尽的微观结构和机械性能表征。采用改进的压痕反演算法获得局部弹塑性力学性能。理论强化模型证实，各向异性 α/α' 马氏体的引入导致晶界强化和位错强化增强。非均质样品中，高强度熔覆区与母材间的过匹配并没有损害整体结构强度。非均质结构引起的应变失配会影响材料塑性，但对宏观应力应变响应状态没有影响。基于应力疲劳分析了非均质结构的不同损伤行为，断在熔覆区的样品主要产生于 10^4 寿命周以上的高周疲劳。并基于应变疲劳建立了非均质结构本构模型，为激光修复件的疲劳寿命预测提供支撑。本工作为激光修复非均质结构的多尺度性能研究提供新的视角，以促进激光熔覆修复在工程领域的未来应用。

口头报告

E13-O34

增材制造 TC11 钛合金低周疲劳行为与寿命预测

高瑞仪、宣海军*、陈传勇

浙江大学

金属增材制造技术可用于复杂结构轮盘的制备，在航空航天等领域具有显著的优势和巨大的发展潜力。目前增材制造钛合金的强度已经能够超过锻件，但其在疲劳性能上与锻件仍有一定的差距。为了探究其疲劳失效机制，本文利用疲劳试验机在 0.8%、1.0% 和 1.2% 的应变幅下，以应变比 $R=0$ 进行低循环疲劳试验，采用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等检测技术对增材制造 TC11 钛合金的微观组织进行表征，分析了断口形貌。结果表明 TC11 钛合金在非对称循环加载下呈现循环软化，与内应力演化行为密切相关。结合小试样试验结果，对非对称循环加载低周疲劳寿命进行了预测，同时完成了轮盘的低循环疲劳试验，结果表明预测结果与测试结果吻合较好。

口头报告

E13-O35

多层次有序共格界面驱动纳米马氏体钛合金超高比强度与韧性

张崇乐、张金钰*、包翔云、李娇、张东东、刘刚、孙军

西安交通大学

亚稳态马氏体相是高强韧钛合金的关键微观组织特征之一，能够在合金中引入高密度相界面 (PBs)，进而显著提高钛合金的强度、加工硬化能力和延展性。基于亚稳态工程，通过调节 β 基体的稳定性，可以控制钛合金中的马氏体相变类型，如快速冷却时析出较硬的密排六方 α' 相或较软的正交结构 α'' 相。由于马氏体强化效应通常遵循 Hall-Petch 关系，因此在微观组织中获得纳米马氏体，从而提升合金强度并维持延展性，是有效的材料强韧化途径。在本工作中，为了获得具有高密度位错结构 α' 马氏体的低成本超强钛合金，我们利用 Cr 元素调整 β 基体的稳定性，通过快扩散元素 Cr 与慢扩散元素 Al 之间的扩散特性差异构筑高密度化学界面。化学界面不仅促进了水淬过程中亚稳 β 晶粒出现硬质纳米 α' 马氏体转变，还限制了 α' 纳米马氏体的长大，据此成功研制了平均马氏体 α' 片层厚度 (λ) ~ 22 nm 的低成本超高比强度 Ti-2.8Cr-4.5Zr-5.2Al (wt.%) 合金。这些纳米级马氏体在 500 °C 以下保持较好的组织热稳定；高于 500 °C 时，由于位错结构

α' 马氏体分解，合金发生回火驱动的韧脆转变。纳米马氏体工程策略为设计高强韧亚稳态金属结构材料的微观组织设计提供了新途径。

口头报告

E13-O36

预疲劳变形和短程有序对高层错能 Ni-10Cr 合金拉伸性能的影响

马进¹、李小武*¹、刘峰²

1. 东北大学
2. 季华实验室

很多材料在服役过程中，其力学性能往往随着疲劳损伤程度的累积而降低。因此，系统研究预疲劳变形对材料力学性能的影响具有十分重要的实际意义。之前的一些研究已经对于预疲劳影响机制做出了一定的探索，但是却忽略了金属内部短程有序（SRO）的重要作用。本工作以具有 SRO 的高层错 Ni-10Cr 合金为研究对象，在总应变幅度为 0.0015 的预疲劳条件下对不同循环周次的样品进行准静态拉伸实验，并用扫描电子显微镜（SEM）和透射电子显微镜（TEM）探索了相关的位错结构。结果表明，疲劳损伤对 Ni-10Cr 合金力学性能的影响并不是线性的。当预疲劳循环周次为 2000 N 时，屈服强度（YS）增加，极限抗拉强度（UTS）和延伸率（EL）显著降低。然而，当预疲劳循环周次为 20000 N 时（疲劳寿命约为 32000 N），其 YS, UTS 和 EL 同步提高。此外，在低循环周次下，基于 SRO 引起的“滑移面软化”，高层错能的 Ni-10Cr 试样表现出明显的平滑滑移特征（平面滑移带），能够提高其加工硬化能力。随着预疲劳周数的增加，变形均匀性提高，位错密度增加，位错滑移方式由平面滑移转变为波状滑移（位错脉络、位错壁、位错迷宫、位错胞和驻留滑移带）。拉伸至断裂后，位错滑移方式以波状滑移为主（位错胞块），循环周次为 20000 N 的试样中出现少量变形孪晶。

仅发表论文

E13-PO01

基于应变效应与温度效应的 TC4 钛合金材料 Johnson-Cook 本构模型的改进与参数研究

殷望添、刘永葆*、贺星、田泽刚

海军工程大学动力工程学院

钛合金因其优异的力学性能和耐高温特性被广泛应用于航空发动机以及燃气轮机的压气机叶片制造，研究损伤条件下钛合金材料的强度及力学响应对评估设备的安全评估有着重要意义。传统 Johnson-Cook (J-C) 本构模型在描述高应变率条件下受到外物冲击时叶片的动态响应存在不足。因此，本研究旨在通过实验与数值模拟相结合的方法，深入研究 TC4 钛合金材料在高应变率和中低温度条件下的拉伸行为。首先，结合实验数据对 J-C 模型中应变项、应变率项和温度项详细分析，并评估他们对应力-应变关系的影响。然后，基于此提出了一种改进的 J-C 模型，该模型考虑了低塑性时的应变效应以及中低温度下的软化效应，通过优化应变项和温度项方程改进并对相关参数进行校准，显著提高了模型对应变敏感性和温度依赖性的描述能力。最后，为验证改进模型的有效性，本研究利用 ABAQUS 软件平台，通过编写 VUMAT 子程序对 TC4 钛合金的拉伸试验进行了数值仿真。仿真结果与实验数据的对比分析显示，改进后的 J-C 模型与实验数据之间的误差降至 1.33%。这一结果不仅验证了改进模型参数的准确性，而且表明修正后的模型能够更精确地预测钛合金叶片在动态冲击载荷下的变形行为和力学响应。

仅发表论文

E13-PO02

一种用于疲劳裂纹扩展试验的新型裂纹长度监测方法

郝伟哲*、张晨

中国航空制造技术研究院

柔度法是金属材料疲劳裂纹扩展试验中用于监测试样裂纹长度的常用方法。以 C(T)试样为例,传统柔度法测量柔度位置位于试样表面,虽简便但往往因监测裂纹开口位移的 COD 规无法适用于腐蚀液体环境而无法使用。本文以 7050 铝合金为原料,探究了一种新型柔度法。该方法使用了一套 C(T)试样专用刀口,刀口可安装于试样上,以改变裂纹开口位移的监测位置。以传统柔度法测定裂纹长度的结果,探究了归一化裂纹长度与专用刀口位置的归一化柔度之间的关系。结果表明,专用刀口位置的归一化柔度与归一化裂纹长度之间的关系可用与传统柔度法相似的五阶多项式函数拟合而成。

仅发表论文

E13-PO03

7065 铝合金高周疲劳性能研究

张晨*、韩宝帅、杜志楠、陈明璐

中国航空制造技术研究院

7065 铝合金与传统 7×××系铝合金相比,力学性能大幅提高。本文以 7065 铝合金为研究对象,进行了 7065 铝合金在不同应力比(-1、0.06、0.5)下的高周疲劳试验,并绘制了各应力比条件下的 S-N 曲线。结果表明,随着应力比的提高,7065 铝合金的最大应力水平及疲劳极限均有提高。此外,应力比为 0.5 的高周疲劳结果特征与典型高周疲劳结果存在差异,表现为成组法应力水平超过材料的弹性极限,甚至超过了材料的抗拉强度。本文推测这种现象的成因是疲劳加载导致的定向加工硬化。高周疲劳试验期间,试样经受从零逐渐增大至设定值的疲劳振幅(或称动载荷)。随着疲劳振幅逐渐增大直至最大应力超出试样的弹性极限,试样发生逐渐增大的塑性变形,直至疲劳振幅达到设定的水平。

仅发表论文

E13-PO04

Analyse and Validate the Potential Mechanism of Negative Crack Growth in Fracture based on ABAQUS

Chengming Sui*

COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co.,Ltd.

In the initial stage of the J - R testing using the unloading compliance technique, the crack growth often exhibits abnormally negative values. The negative crack growth phenomenon indicates that the experimental procedures for measuring crack growth are sometimes flawed and may lead to apparent negative crack growth. This report explores the mechanism of negative crack growth using computational models. A finite element model created by Abaqus is used to test different conditions that may lead to negative crack growth in order to verify the mechanism. These simulations are the selection of a suitable set of parameters to build the model based on CT specimen as the prototype to evaluate the impact on this phenomenon in various scenarios. Through this study, several key results are analyzed and deduced. The observed negative crack growth is essentially a negative crack length computed from the energy. Finite element analysis (FEA) demonstrated that changing the load position, sample rotation and material blunting can result in negative crack growth.