

离心超重力下合金塑性行为的研究现状及展望

牛浩琦¹, 张 骏¹, 苟佳华¹, 韩国辉², 陈艳辉^{1*}

¹北京工业大学材料科学与工程学院, 北京

²平高集团有限公司, 河南 平顶山

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月3日; 发布日期: 2026年4月14日

摘 要

超重力作为极端复杂力学环境的典型代表, 通过离心惯性载荷显著调控晶体材料的位错运动、滑移系激活及晶界响应, 深刻影响材料塑性变形与失效机制, 在航空航天、高速旋转机械等高端装备领域具有重要研究价值与应用前景。本文系统综述超重力环境下不同研究方法的对比与不足, 包含实验方法, 仿真计算方法以及两者结合的方法。通过常规晶体塑性行为的研究进展的归纳总结, 阐述超重力与晶粒尺寸、晶界取向、温度等多因素的耦合作用机制, 包括超重力诱导的应力集中效应、晶间滑移调控规律及塑性流变演化特征。总结Neper-Abaqus联合建模等晶体塑性有限元模拟方法与超重力实验技术的应用现状, 分析当前研究在多场耦合模拟精度、极端超重力下微观机制表征等方面研究的研究不足。最后, 展望未来研究方向, 提出需强化微观结构-超重力-塑性行为的定量关联模型构建, 为超重力环境下晶体材料的结构优化与性能调控提供理论与实践参考。

关键词

离心超重力, 高速旋转, 有限元, 合金, 变形

Research Status and Prospects of Alloy Plastic Behavior under Centrifugal Supergravity

Haoqi Niu¹, Jun Zhang¹, Jiahua Gou¹, Guohui Han², Yanhui Chen^{1*}

¹College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan Henan

Received: March 8, 2026; accepted: April 3, 2026; published: April 14, 2026

*通讯作者。

文章引用: 牛浩琦, 张骏, 苟佳华, 韩国辉, 陈艳辉. 离心超重力下合金塑性行为的研究现状及展望[J]. 应用物理, 2026, 16(4): 281-293. DOI: 10.12677/app.2026.164026

Abstract

As a typical representative of extreme mechanical environments, the dislocation motion, slip system activation, and grain boundary response of crystalline materials were significantly regulated under centrifugal supergravity through centrifugal inertial loads, and thus profoundly affects the plastic deformation and failure mechanisms of materials. Studies are important in research and application prospects in high-end equipment fields such as aerospace and high-speed rotating machine in industry. This article systematically reviews the comparison and limitations of various research methods in hypergravity environments, including experimental methods, simulation calculation methods, and combined approaches of both. By summarizing the research progress on conventional crystal plasticity behavior, the paper systematically analyzed the research progress on the crystal plastic behavior under supergravity environments, focusing on elaborating the coupling mechanism between supergravity and multiple factors such as grain size, grain boundary orientation, and temperature. Some important aspect including the supergravity-induced stress concentration effect, the regulation law of intergranular slip, and the evolutionary characteristics of plastic flow were systematically summarized. It mainly described the application status of crystal plasticity finite element simulation methods (such as Neper-Abaqus combined polycrystalline model) and supergravity experimental technologies, and analyzes the current research deficiencies, such as the simulation accuracy of multi-field coupling and the characterization of micro-mechanisms under extreme supergravity. In the last paragraph, it also gives prospect on future research directions, and it is proposed that the construction of quantitative correlation models between microstructure, supergravity, and plastic behavior should be strengthened. Future work should provide theoretical reference for the structural optimization and performance regulation of crystalline materials under complex centrifugal supergravity.

Keywords

Centrifugal Hypergravity, High-Speed Rotation, Finite Element Method, Alloy, Deformation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 超重力概念

重力是一种自然现象，也是物质之间四种基本相互作用力中的一种，又分为微重力和超重力，超重力是指物体处于远大于地球常重力加速度环境下所受的力[1]。研究该环境下物理和化学变化过程的学科为超重力科学，基于其原理开发的应用技术则是超重力工程技术[2]。像航天器发射时，航天员承受的加速度可达 4~5 倍常重力，太阳重力场更是常重力的 28 倍，这些都属于超重力范畴。2017 年发现的 EBLMJ0555-57Ab 恒星，其重力高达 300 倍的重力条件。进而人们对超重力环境下物质的物理和化学变化过程产生了浓厚兴趣，进而诞生了超重力科学[3]。

在航空航天推进系统、高速旋转机械等高端装备领域，晶体材料经常在复杂恶劣的离心超重力环境中服役。离心超重力通过高速旋转产生的离心惯性作用，从而产生远超地球常重力(9.8 N/kg)的离心梯度载荷，直接改变晶体内部位错运动规律、滑移系激活路径及晶界力学响应方式，进而主导材料的塑性变形、损伤演化与失效模式，其塑性行为调控已成为保障极端工况下装备可靠性的核心及关键性问题。超重力环境的特殊性导致晶体塑性行为的研究面临多场耦合条件复杂、微观机制难以准确表征等挑战，现

有研究对超重力与微观结构的耦合作用机制尚未形成系统认知,模拟方法与实验技术仍需突破。物质在理想状态的超重力加速度是一个恒定值,但高速旋转获得的超重力场是弯曲且不均匀的。因此,系统梳理超重力环境下晶体塑性行为的研究进展,厘清核心影响机制与关键技术瓶颈,对推动极端环境材料设计优化与装备安全升级具有重要理论与工程意义。离心超重力本质是通过离心惯性作用形成的人工强化重力场,其载荷水平可达地球重力的数十倍至数万倍,与常规重力环境相比,会显著改变多晶金属材料内部的力学响应规律,从微观层面主导位错运动、滑移系激活、晶界滑移与分离等塑性变形行为,进而影响材料的宏观力学性能与失效模式。因此开展超重力环境下晶体塑性行为研究具有重要的工程实践意义。金属的塑性变形往往是材料失效的重要表现,因此研究离心超重力特殊条件下晶体甚至是多晶材料塑性行为是解决合金应用的关键因素及重要指标,本论文首先介绍了离心超重力的作用方式,然后对于最近几年晶体塑性行为的研究进展及取得的成果进行系统的总结与分析,最后对晶体塑性有限元在离心超重力未来的应用及需要解决的问题进行展望。

2. 超重力实验方法及进展

2.1. 超重力实验的实现方法

(1) 离心旋转法[4]:离心旋转法是目前超重力环境实现中最成熟、应用最广泛的技术手段。其核心原理是利用高速旋转装置产生离心加速度,通过调控旋转转速与旋转半径,可精准控制超重力倍数,最终形成稳定、均匀且可控的稳态超重力场。如图 1 该装置由浙江大学牵头建设,包括三台离心机主机,其中两台离心机“CHIEF1500”和“CHIEF1900”为目前世界上最大容量[5]。这套由我国自主研发的超重力大科学装置能够营造超过地球重力千百倍的“超重力场”,实现“时空压缩”,并在实验室中以微小尺寸、极短时间再现真实世界的变迁。

(2) 冲击加载法:冲击加载法主要通过高速撞击、爆炸冲击、脉冲加载等方式,在极短时间内产生瞬时长超重力场,其超重力倍数可达到极高水平,但具有瞬时性、不可持续性及非均匀性的特点。

(3) 超重力振动台:超重力振动台通过搭载超重力离心机,借助高速旋转产生的离心力,模拟出百倍于地球重力的超重力环境[6],如图 2 所示。核心是实现超重力场与振动功能的协同,为极端环境科研提供支撑。其关键实现方式是将振动台主体安装在离心机吊篮中,通过离心机转臂高速旋转产生离心力,为振动台营造稳定超重力场,再结合电液伺服激振系统等部件,实现振动模拟与超重力环境的精准匹配。

2.2. 高速旋转离心超重力下受力情况分析

高速旋转下的试样承受由离心力、重力及重力旋转所需的扭转力共同作用的总载荷,如图 1(a)所示[7]。扭转力是一种与离心力垂直的力,用于推动旋转载荷,本试验中离心力、重力及扭转力的分布如图 1(b)所示。重力诱导的应力仅为 0.011 MPa,与离心和扭转诱导的应力相比,该值可忽略不计。考虑到力学实验的多种方式,常见的有疲劳模式和蠕变模式。疲劳模式即多次改变方向,即多次开启和关闭,而蠕变模式则仅进行一次启动操作。在两种不同的作用模式下需要考虑扭力和离心力的主导作用。在疲劳模式下,需要考虑扭力的作用效果,图 1(c)给出了典型条件下扭力离心力耦合条件下合力及分力的变化曲线,表明不同阶段有不同的主导作用力。在加速的过程中,即旋转速度小于 2000 转/分钟之前,扭转应力大于离心应力,这一过程处于加速阶段,因此扭转力在加速过程中起主导作用。如果转速达到 2800 转/分钟,离心应力约为 5.6 MPa,加速过程中的扭转应力约为 3.9 MPa,二者在该阶段数值接近。如果转速继续增大,则离心力开始占主导作用。启动过程为加速阶段,扭转力为主导作用力且数值较大,其方向与旋转方向相反;稳定旋转阶段仅存在离心力,若摩擦足够小,扭转力可忽略不计;停机过程为减速阶段,扭转力再次成为主导力,其方向和大小分别由箭头的方向和长度表示。疲劳试验中不存在稳定旋转

阶段，频繁的加速与减速过程使得扭转力成为试验中的主导力；而蠕变试验仅进行一次启动操作，主要过程为稳定旋转阶段，此时施加稳定的离心力，如图 1(d)和图 1(e)所示。

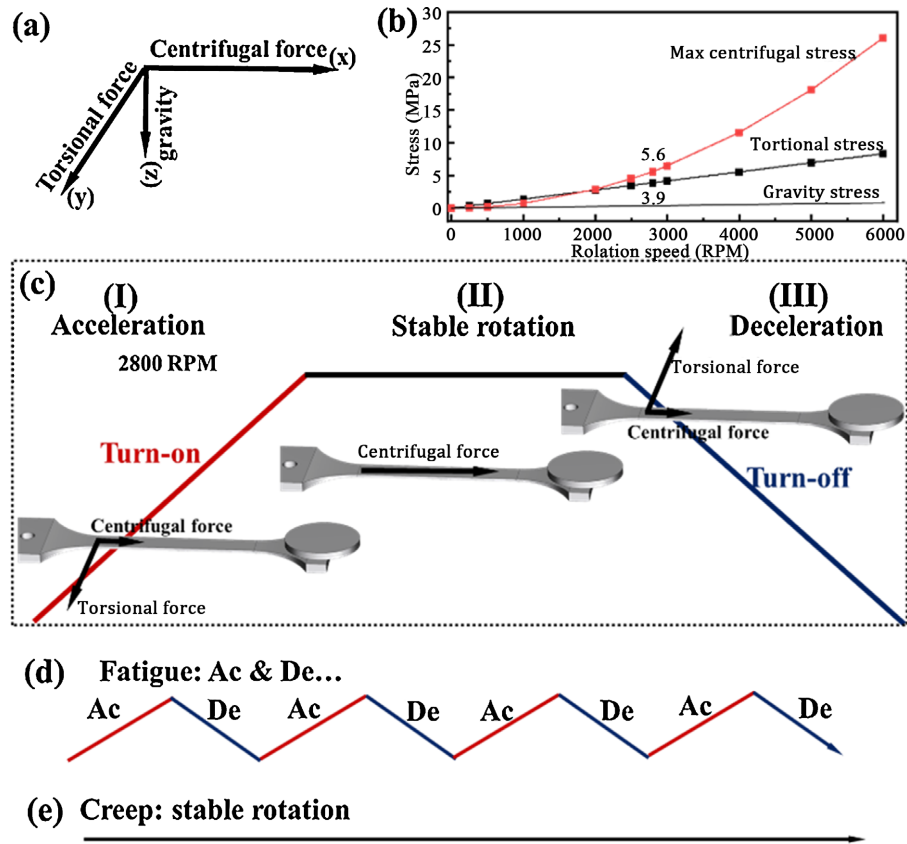


Figure 1. (a) Force analysis of sample; (b) relationship between gravity and the centrifugal and torsional stresses in samples; (c)~(e) schematic demonstration of the force loading mode in the creep and fatigue modes; “Ac” represents the acceleration process, and “De” represents the deceleration process.

图 1. (a) 试样受力分析；(b) 试样中重力、离心力与扭力的关系；(c)~(e) 蠕变与疲劳模式下受力加载方式示意图；“Ac”代表加速过程，“De”代表减速过程。

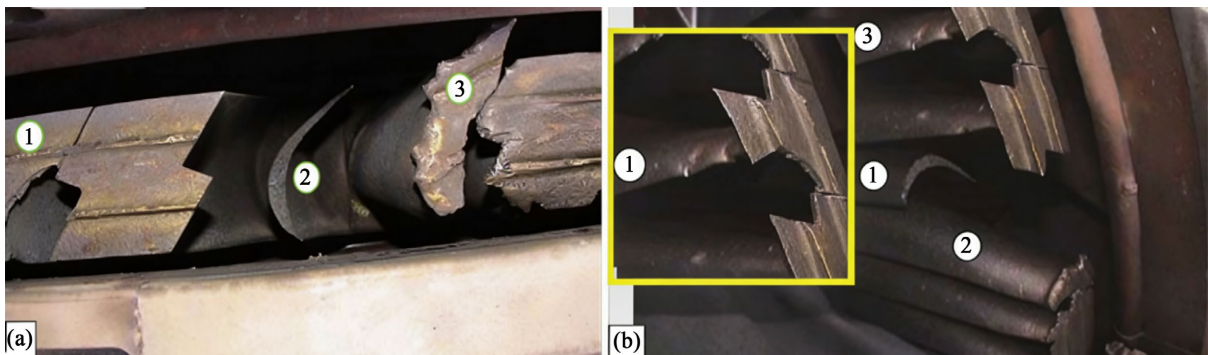


Figure 2. Failure in blade (a) Overview of the failed blade and its surroundings. (b) Leading edge damage in blades
图 2. 失效叶片的位置 (a) 失效叶片及其周边的俯视图。(b) 部分叶片前缘损伤

2.3. 离心超重力下叶片失效实验分析

超重力下叶片安全服役至关重要，对高速旋转服役后失效的叶片进行断裂失效原因分析也是常见的

实验手段。常见的金相与机械性能检测如图 2 所示, 该叶片采用镍基合金 Inconel 738LC, 实验对燃气轮机二级叶片的断裂失效进行了分析失效的叶片[8]。该涡轮发动机已服役约已运行 73,500 小时, 由于叶片断裂, 涡轮发动机受损严重。调查从对涡轮机和叶片表面进行彻底的目视检查开始, 随后断裂表面的断裂形貌学分析、微观组织研究、化学成分分析及硬度测量。通过系列分析结果表明, 叶片表面出现了严重凹坑, 且存在疲劳痕迹断裂表面上的痕迹。虽然微观结构变化并不严重, 但裂纹是由高温引起的由前缘腐蚀引发, 经疲劳作用扩展, 最终因横截面积减小而断裂。

2.4. 离心超重力下轮盘失效实验分析

圆盘失效诱因主要来源于在高倍数超重力场中的离心力与扭力的共同作用。离心力对构件的影响: 失效情况主要与超重力倍数、构件结构对称性及材料性能密切相关: 全对称旋转工件因应力分布均匀, 失效多表现为高倍超重力下的整体环向拉伸断裂, 或长期服役后的蠕变失效[9], 断裂路径多沿径向扩展。不全对称类工件则因离心力与局部应力集中叠加, 失效常始于叶根、叶片前缘等薄弱部位, 初期出现微裂纹萌生与扩展, 随离心力持续作用, 裂纹沿环向或径向延伸, 最终导致叶片断裂脱落、构件整体失效。此外, 超重力与温度场耦合时, 热应力会加剧离心力的破坏效应, 降低材料屈服极限, 使失效临界超重力倍数显著下降。扭力对构件的影响: 过量扭力会打破晶粒间的结合力, 引发晶间滑移[10]与位错塞积[11], 破坏微观组织的连续性, 同时加剧构件的非均匀扭转变形, 降低尺寸精度与服役稳定性。在失效表现上, 全对称旋转圆盘的扭力分布相对均匀, 失效多以缓慢的晶间蠕变滑移[12]为主, 长期服役后易出现沿径向的剪切带[13]与微裂纹[14], 最终发展为局部剪切断裂; 而不全对称类叶片工件的扭力易在叶根圆角、叶片前缘等异形部位形成集中区, 切向剪切应力超过材料剪切屈服极限时, 会率先萌生剪切型微裂纹, 裂纹沿切应力方向扩展, 叠加超重力持续作用, 裂纹快速贯通并引发叶片突发性剪切断裂或脱落[15]。研究表明涡轮发动机盘在超速时会发生迸裂, 如图 3 所示, 测试了两块由相同镍基超合金制成的双盘。对于第一个(B 盘), 旋转速率增加, 冰碛破裂。第二个(S 盘)通过在爆破前停止旋转并卸载以测量残余变形来保持安全。

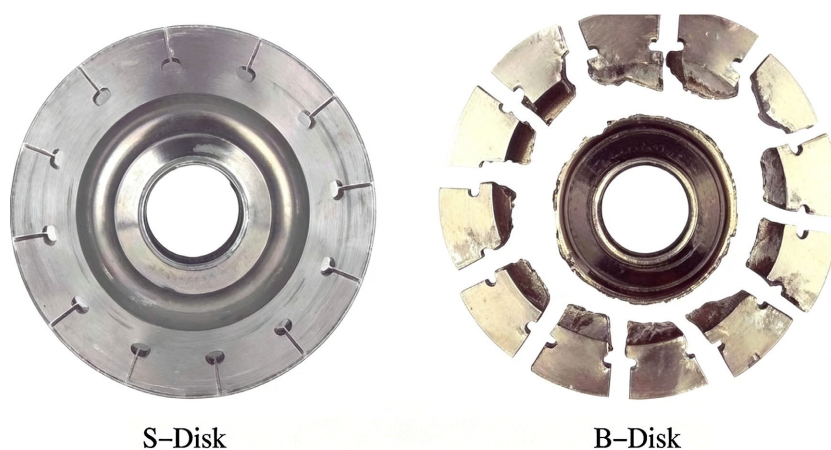


Figure 3. Photographs of S-disk and B-disk after experiments
图 3. 实验后 S 盘和 B 盘的照片

2.5. 实验方法的不足与解决方案

传统检测离心超重力的过程中存在诸多技术难点, 整体检测精度与可靠性难以满足高要求研究及工程需求, 核心困难集中在高转速干扰问题, 离心装置运行时转速可达数万转每分钟, 产生的强振动[16]、

电磁干扰[17]会严重影响检测传感器的稳定性,导致检测数据出现偏差,难以精准捕捉超重力场的实时变化。传统上,超重力环境下构件的变形与失效通常在特定的位点启动,如旋转中心区域、晶界、微观缺陷[18]或应力集中部位。正如离心力学与材料本构模型所预测的那样[19],构件的应力应变演化以梯度分布模式[20]和动态累积的方式进行。超重力场下的应力传递[21]、晶粒变形[22]及裂纹萌生受离心加速度[23]大小、旋转转速以及材料微观组织的制约。这些最初形成的局部应力集中[24]或微观变形将作为构件失效的起始位点,导致超重力下旋转构件的最终断裂。如:计算等方法可以研究根据工作转速下轮盘的应力应变分布,通过分别根据平均径向应力法和平均周向应力法预估出涡轮盘的破裂转速,并对结果进行有限元仿真检验,判断断裂位置。通过计算仿真方法,也可以推断出轮盘通气孔位置为裂纹萌生的危险位置[25]。仿真计算也可以通过计算涡轮盘通气孔疲劳裂纹扩展寿命,推测时超重力条件下裂纹扩展位置及失效方式[26]。

综上,由于缺少晶体层面有限元的观察,单纯通过实验方法,研究者对超重力环境下构件的微观演化中间过程知之甚少,使得他们只能通过最终失效现象来反推过程中可能发生的应力传递、晶粒变形及断裂机制。晶体塑性有限元的发展于实验相结合成为研究超重力下构件行为的关键要素,开展必要的仿真模拟是解决超重力下材料失效的有效手段。

3. 有限元研究现状

3.1. 涡轮盘的有限元研究

离心超重力材料塑性形变研究较多的是圆盘结构。使用有限元模拟全局稳定标准,可以确定每次模拟的最大旋转速度极限[27]。在旋转环的情况下,模拟计算可以推算出最大载荷如图4。如果考虑变形的不均匀性和应力的多轴性会使这些标准的准确性有所不同,在非轴对称涡轮盘的情况下,它们会远离极限旋转速度。在超速情况下,旋转盘的爆裂被假定为由广义塑性引起。相应的临界旋转速率一般通过希尔稳定准则进行载荷计算。根据材料行为类型和有限元仿真,它以两种不同方式应用:(I)对于时间无关的材料行为和仿真,希尔稳定准则通过弧长控制方法隐式应用。然后研究了材料参数和塑性模型的作用。临界角速度主要由极限应力控制,而屈服应力的作用有限。特雷斯卡屈服准则导致的临界速度比同样拉伸行为下的冯·米塞斯准则低约7%。(II)在时间依赖的材料行为或模拟情况下,基尔希稳定性准则是通过修正二阶功的事后估计显式应用。与显示等效硬化规律的时间无关材料相比,材料粘度会导致极限旋转速率的增加。

有限元仿真计算是获得离心超重力工作转速下轮盘的应力应变分布的有效途径。大部分的仿真通过建立涡轮盘的有限元模型[28],进行网格无关性检验,通过平均应力法对轮盘破裂转速进行预测,对涡轮盘的强度储备进行检验。同时,对涡轮盘在破裂转速附近的应力分布进行的计算可以获得平均径向应力法和平均周向应力法得出的破裂转速比较。在塑性条件下,可以通过计算轮盘的破裂转速与应力分布,并将涡轮盘在塑性条件下与弹性条件下的得到的破裂转速与破裂方式进行比较,建立涡轮盘参数化模型,减轻了优化设计工作量。图5是典型的计算圆盘接近破裂时的应力分布,从图中可以看出破裂方式及其动态演变过程。

3.2. 涡轮叶片的有限元研究

高速旋转的涡轮叶片也是有限元仿真经常研究的对象。图6是一个典型的例子,首先建立了一种晶体塑性模型[29],并结合了各向异性弹性和基于滑移的粘塑性,研究超重力下镍基单晶高温合金涡轮叶片榫根的局部变形。通过分析了连续有限元与晶体塑性有限元的结果区别,给出了连续介质在弹性区域(轴向载荷6 kN)模拟的松树型试验的等效应力和应变等值线。两种模型都预测应力集中在EOC处。特定

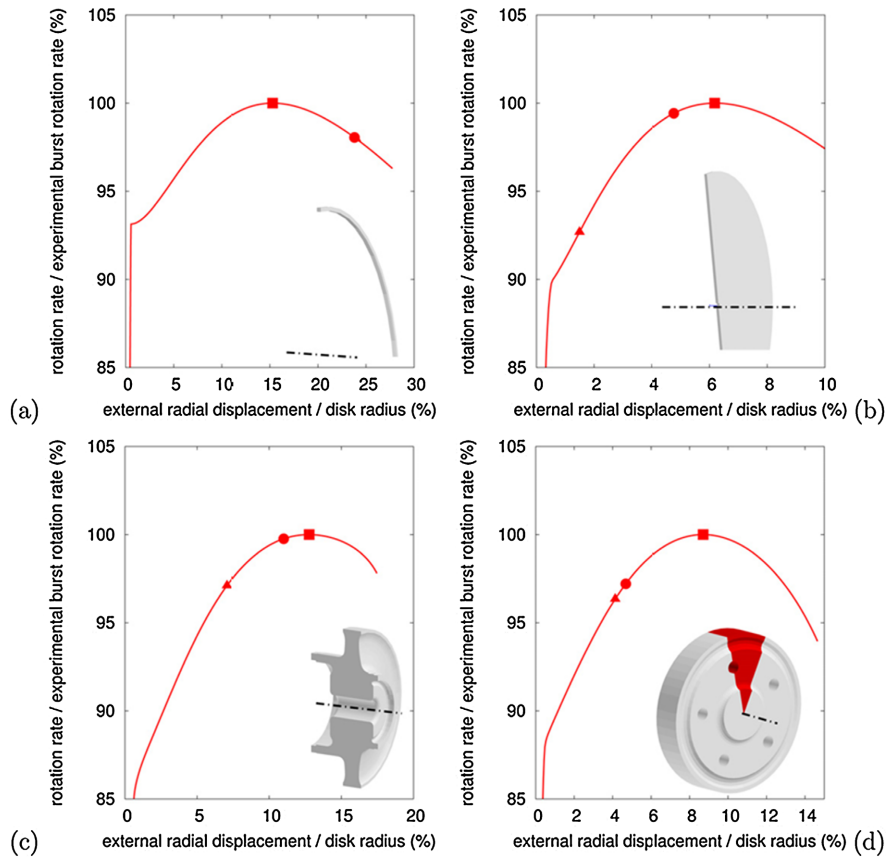


Figure 4. Comparison of three burst criteria on the equilibrium curve: (a) rotating ring, (b) axisymmetric rotating disk with rectangular cross-section, (c) axisymmetric turbine disk, (d) non-axisymmetric turbine disk.

图 4. 在平衡曲线上对三种破裂准则的比较: (a) 旋转环, (b) 具有矩形截面的轴对称旋转盘, (c) 轴对称涡轮盘, (d) 非轴对称涡轮盘

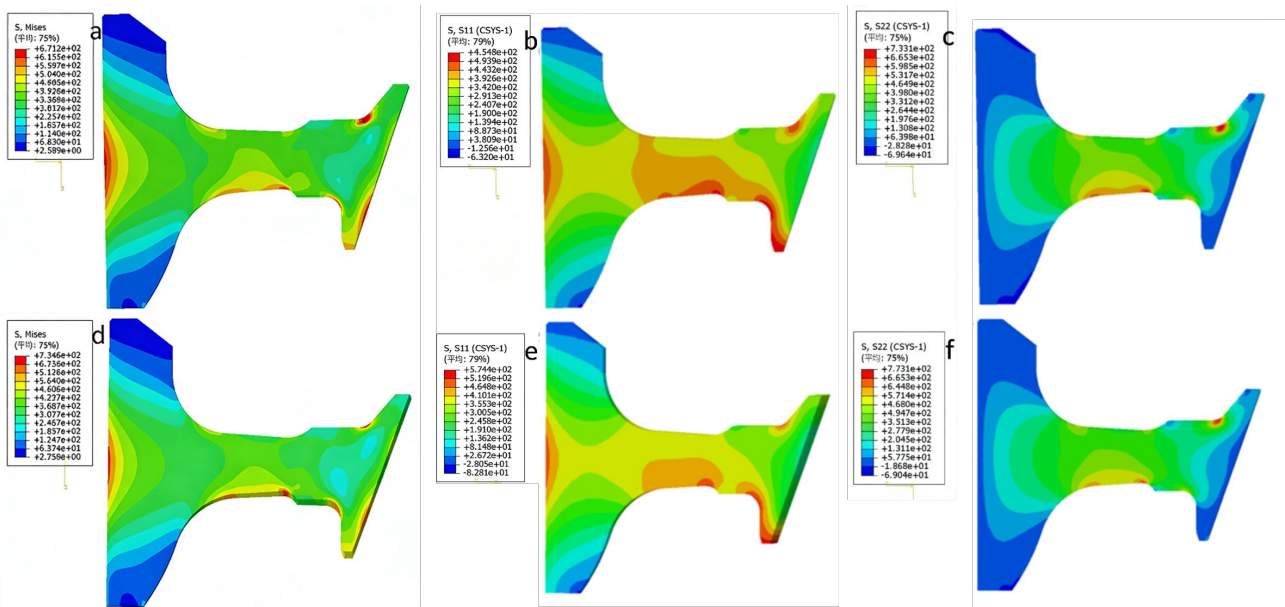


Figure 5. Contour plots of Mises stress, hoop stress and radial stress of the model: (a)~(c) tetrahedral mesh; (d)~(f) hexahedral mesh

图 5. 模型的 Mises 应力、离心力、扭力云图(a)~(c) 四面体网格(d)~(f) 六面体网格

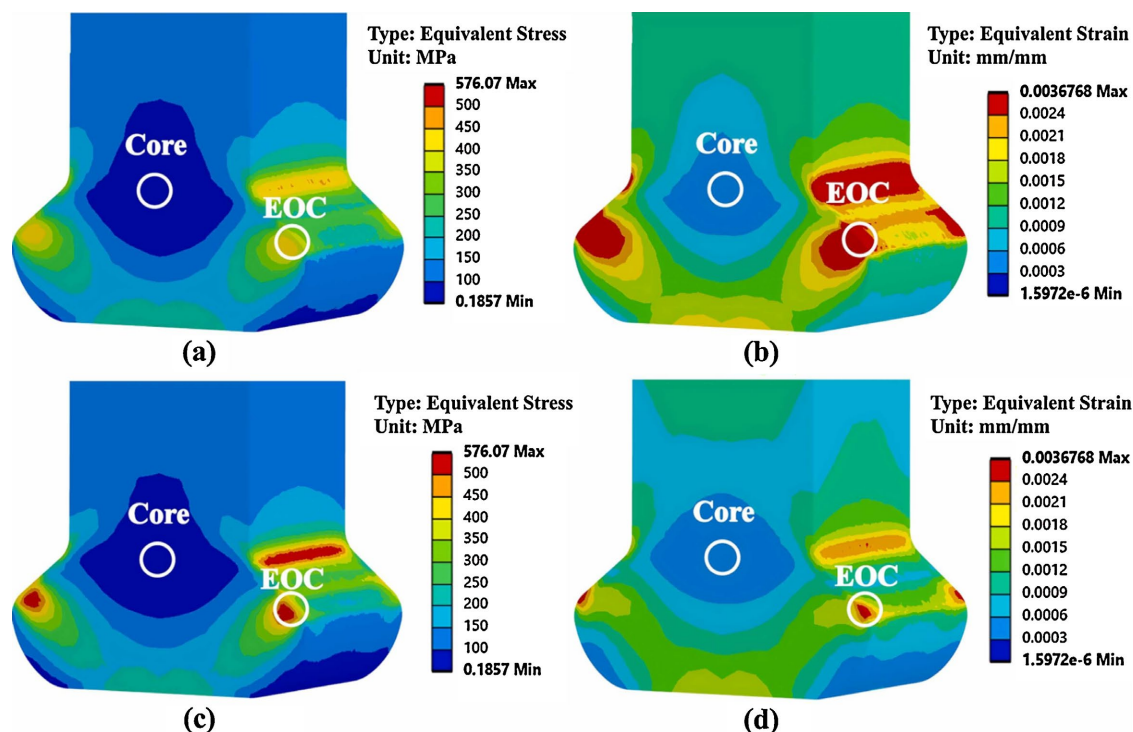


Figure 6. Predicted distributions of equivalent stress (MPa) and equivalent strain (mm/mm) under 6 kN axial load. The results compare the continuous FEM predictions: (a) stress, (b) strain; and CPFEM predictions, (c) stress, (d) strain

图 6. 在 6 kN 轴向载荷下等效应力(MPa)和等效应变(mm/mm)的预测分布。结果比较了连续 FEM 预测(a) 应力, (b) 应变与 CPFEM 预测, (c) 应力, (d) 应变

区域的应力集中造成有限破裂, 对材料服役给出了理论指导。

4. 实验与有限元结合对离心超重力的研究

4.1. 轮盘爆裂转速研究

单一的实验方法或者单一的仿真模拟单独的存在都有着较大的局限性。通过仿真预测, 设定实验数据, 可以有效的减少实验次数, 降低成本。同时仿真结果给出的动态演变过程对于理解材料失效过程提供更好的理论支持。图 7 给出了典型的高速旋转圆盘的[30]不同爆裂模式的 1/24 圆盘的应力场。从应力云图可以看出, 应力分布符合预期, 主要集中在冷却孔和涡轮盘的腹板截面。为了获得实际爆裂转速, 设计了涡轮盘的常温全尺寸仿真测试。通过计算可以得出, 转速的增加是以均匀步长进行的: 第一步对应稳态转速, 之后步长以线性增加转速, 直到涡轮盘发生爆裂。测试结果表明, 当转速达到 $\omega = 24,282$ 转/分钟时, 涡轮盘发生破裂, 图 7(c)显示了试验后涡轮盘的残骸[31]。可以看到整个盘沿圆周方向断裂为五个较大的碎片, 飞出并撞击到约束环上, 然后进一步破碎成更多的小碎片掉入试验舱中。被测试的涡轮盘在腹板与轮缘之间的环形区域发生了圆周爆裂, 然后在盘腹板最小截面处发生径向爆裂, 这表明涡轮盘的爆裂属于圆周模式爆裂。实验和仿真结合提供了更优秀的结果。

4.2. 高速旋转 7075Al 条蠕变和疲劳断裂微观机制的研究

在离心超重力环境中, 旋转构件长期承受高倍离心载荷与温度场耦合作用, 蠕变与疲劳是决定其服役安全与寿命的核心力学行为。蠕变会导致材料在恒定超重力载荷下发生缓慢塑性变形, 逐步改变构件几何形态与应力分布, 甚至引发尺寸失稳或结构失效; 疲劳则源于转速周期性加减速产生的循环载荷,

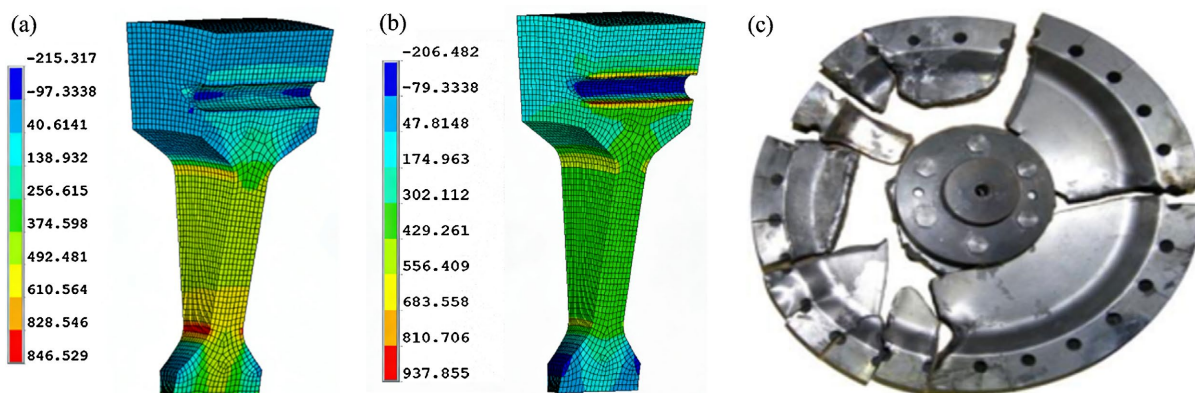


Figure 7. FE simulation and experimental results of the fan disk: (a) radial stress of the disk, (b) hoop stress of the disk, and (c) fragments from the burst test

图 7. 风扇盘的 FE 仿真和实验结果(a) 盘的径向应力, (b) 盘的环向应力和 (c) 盘的爆裂实验图

易在应力集中处萌生裂纹并扩展, 最终导致突发性断裂。二者的交互作用会显著加速材料性能劣化, 大幅缩短构件寿命。高速旋转的齿轮或涡轮机在其机械性能上承受着以超重力和扭力为主的复杂受力。旋转测试和实验数据提供了直接的应用数据, 比目前最常用的模拟数据更重要、更准确。蠕变(稳定旋转)和疲劳(频繁加减速)是高速旋转时的主要工作模式。出于安全考虑, 疲劳和蠕变阶段均在小于材料极限应力的应力下工作。因此, 研究旋转试样的蠕变和疲劳行为及其差异, 对实际应用具有重要意义。我们前期的实验[32]研究了高速旋转的 7075 铝叶片裂纹及其微观结构的变化, 揭示蠕变和疲劳断裂行为之间的差异, 关键结果如图 8 所示。结果表明, 蠕变模式下的裂纹表现出明显的塑性扩展和颈缩行为, 而疲劳模式下的裂纹表现为脆性裂纹, 没有明显的塑性变形。蠕变和疲劳裂纹的差异可以归因于它们在过程中施加的力的差异。加速和减速时的反向主导扭转力在疲劳模式下具有与颈部方向垂直的力, 而蠕变时的力主要是沿颈部分布的超重力。通过有限元分析计算, 全面了解了旋转铝合金叶片的应力应变和塑性变形的演化规律。该研究为工业用旋转机械及其原合金的使用安全性的检测和表征提供了一种方便、实用的方法。

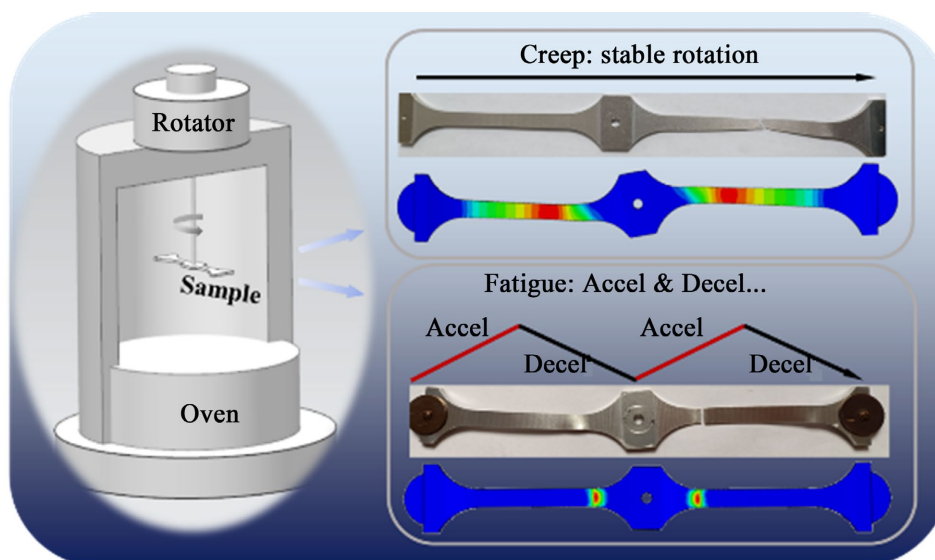


Figure 8. Schematic diagram of creep and fatigue of 7075Al slat

图 8. 7075Al 条蠕变和疲劳方式下应力分布示意图

5. 展望：高速旋转件晶体塑性变形研究

5.1. 晶体塑性有限元

传统有限元研究只能研究宏观层面的应力应变，对于晶粒等微观层面的过程无法探究，晶体塑性有限元是在有限元的基础上赋予构件晶粒参数，将晶体塑性理论与传统有限元方法相结合的先进数值模拟技术，核心用于从晶粒尺度揭示材料的微观变形机制与失效规律，弥补了宏观有限元无法捕捉微观组织演化的不足，已成为超重力、高温等极端工况下构件微观行为研究的核心手段。其本质是基于晶体的各向异性特征，将材料微观结构(晶粒取向、晶界、滑移系等)纳入数值模型，通过求解晶体塑性本构方程，精准描述外载荷作用下晶粒内部的滑移、孪生、位错运动及晶界相互作用等微观过程。有限元分为宏观尺度的有限元与微观尺度(晶粒、分子)，晶体塑性有限元方法已成为揭示材料微观变形机制的重要手段[33]，能够从晶粒尺度描述滑移、孪生、晶界协调与应力分布等行为。当前研究多通过建立多晶模型、引入各向异性本构关系[34]，模拟外载荷下晶粒取向、应力应变与微观结构演化规律，并在金属塑性成形、高温蠕变、疲劳损伤[35]等领域得到广泛应用。

与传统宏观有限元仅关注构件整体应力应变分布不同，晶体塑性有限元以单晶晶粒为基本计算单元，考虑不同晶粒的晶体取向差异，能够量化分析晶粒尺度的应力应变不均匀性，明确晶界、缺陷等微观位点的应力集中机制。其核心原理是基于塑性变形的滑移系理论[36]，认为金属材料的塑性变形主要源于晶体内部滑移系的激活，通过设定滑移系临界剪应力[37]、硬化准则及晶界相互作用模型，可模拟不同载荷条件下晶粒的变形、转动及演化过程，进而揭示宏观变形与微观组织演化的内在关联。

5.2. 板条状材料晶体塑性有限元研究

目前晶粒塑性有限元的研究主要集中在板条状构件冷加工研究过程，基于多晶模型，已有研究探讨了 Zener 钉扎力作用下的晶粒生长行为及其极限尺寸[38]；基于多晶模型的镍基高温合金 FGH4098 有限元计算已用于预测服役寿命；基于多晶模型的 AZ31 镁合金有限元分析能完整呈现包括位错滑移和机械孪生在内的变形演化过程，并明确孪生对晶粒取向的贡献[39]；弹性/晶体粘塑性有限元分析已用于评估三种体心立方钢板在圆柱形杯体拉深过程中的拉伸性能，有限元分析结果表明纤维织构会影响拉伸过程中的应变局部化与凸耳形成[40]。多数计算结果与实验结果吻合良好，证实该有限元法能精准预测极端应变局部化与凸耳现象，并评估裂纹的萌生与扩展。而通过晶体塑性有限元方法分析合金的疲劳裂纹萌生过程探究 Inconel718 镍基合金进行高温拉伸试验和低周疲劳试验[41]。结果表明：Inconel718 镍基合金的高温低周疲劳裂纹萌生寿命随着总应变范围的增大而缩短；该镍基合金的高温低周疲劳裂纹容易在三叉晶界处萌生，这些区域存在较大的累积塑性滑移。介观尺度下的应力 - 应变分布云图如图 9 所示，其中

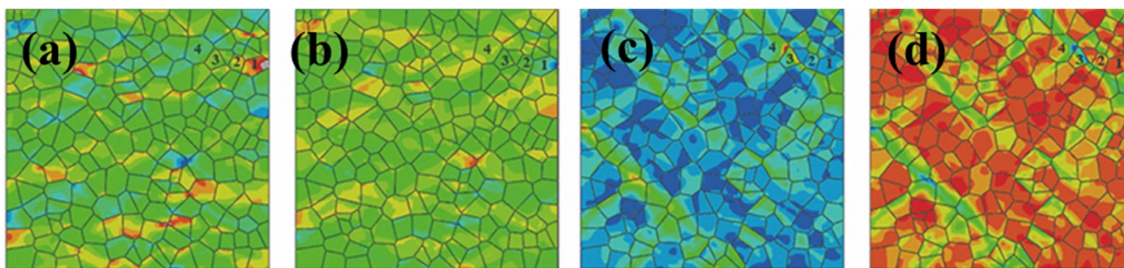


Figure 9. (a) Contour plot of stress under model loading conditions; (b) Contour plot of stress under model unloading conditions; (c) Contour plot of strain under model loading conditions; (d) Contour plot of strain under model unloading conditions
图 9. (a) 模型加载条件下的应力云图; (b) 模型卸载条件下的应力云图; (c) 模型加载条件下的应变云图; (d) 模型卸载条件下的应变云图

图 9(a)和图 9(c)分别为低周疲劳载荷条件下加载至最大应变 0.8%时的应力和应变云图, 图 9(b)和图 9(d)分别为低周疲劳载荷条件下最大应变为 0 时的应力和应变云图, 由图 9 可知: 不同晶粒之间存在不同的应力 - 应变响应; 对于应力状态, 图 9(a)的晶粒 1 在加载时存在较大的应力, 而卸载后晶粒 1 的应力迅速减小, 其值小于周围晶粒的应力, 如图 9(b)所示; 对于应变状态, 晶粒 4 加载时的局部应变大于其周围晶粒的局部应变, 而在卸载状态时的残余应变小于其周围晶粒的局部应变。这种不同晶粒的不同应力 - 应变行为主要和晶粒取向(最大滑移方向与加载方向之间的夹角)有关。当滑移方向与加载方向呈 45° 时, 晶粒表现出软取向特性, 会在晶粒中形成相对较低的应力水平以及相对较高的应变水平, 即经典的 Schmid 准则。

6. 总结与展望

随着晶体塑性有限元的不断发展与进步, 研究人员已可以模拟不同冷加工工况下的微观过程, 使得我们对难以实现原位观测的过程了解更多, 但是对于离心超重力下的晶体塑性研究仍有不足; 对完善极端工况晶粒失效机理有着重要作用。但仍存在许多待解决的问题:

(1) 考虑晶粒结构的有限元缺乏研究。分析不同晶粒对于晶体塑性有限元的影响, 确定更加真实的晶体塑性行为。

(2) 目前研究的都是现有晶体塑性有限元模型多对晶界作用、动态加载下的滑移系激活机制进行理想化简化, 未能充分考虑晶界滑移、位错塞积及晶粒间协同变形的复杂过程, 难以精准复现超重力等极端工况下材料的动态微观演化行为, 与实际实验结果存在偏差。

(3) 模型与原位观测契合度不足。晶体塑性有限元的仿真结果依赖于本构参数的设定, 而现有参数多通过宏观实验反推, 缺乏微观尺度的原位验证与校准, 导致模型预测结果与原位观测到的晶粒变形、裂纹萌生等实际微观现象契合度较低。

(4) 下一步研究应着重开发一种能够考虑应力梯度对位错运动驱动力的 CPFEM 算法, 设计一种可在超重力离心机中进行的高温微拉伸原位实验, 以直接观测应力梯度下的晶界滑移行为。

基金项目

感谢国家自然科学基金资助(No. 51988101)。

参考文献

- [1] Liao, M., Zhang, C., Liu, G. and Wang, Z. (2025) Excellent Mechanical Properties of Micro-Grain Nickel-Based Superalloy by Coupling Super-Gravity Fields with Layered Solidification. *Materials & Design*, **258**, Article ID: 114637. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114637>
- [2] 杨致芬, 郭春绒. 超重力技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008(20): 8432-8435.
- [3] 黄斌, 丰生杰, 傅程, 李娇扬, 张璐, 刘慰博. 超重力技术应用进展[J]. 当代化工, 2022, 51(12): 2941-2946.
- [4] 高浩天, 王义娜, 周勃. 基于 PMSM 的风力机叶片单轴旋转离心式疲劳加载系统稳态控制的研究[J]. 辽宁科技学院学报, 2025, 27(1): 18-23+81.
- [5] 世界上容量最大超重力离心模拟与实验装置核心设备在浙江省正式启动[J]. 华东科技, 2025(11): 44.
- [6] 王永志, 屈崧伶, 王体强, 李雨润, 汤兆光, 陈平山, 袁晓铭, 刘志军, 梁小丛. DCIEM-40 超重力振动台平行试验可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45(1): 236-249.
- [7] Chen, Y., Gou, J., Niu, H., Yang, F., Li, A. and Mao, S. (2026) Characterization on Rotated Materials by Rotational Tools: High-Speed Rotated Creep and Fatigue Tests on Aluminum Alloy. *Materials Characterization*, **231**, Article ID: 115875. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115875>
- [8] Poursaeidi, E., Aienravaie, M. and Mohammadi, M.R. (2008) Failure Analysis of a Second Stage Blade in a Gas Turbine Engine. *Engineering Failure Analysis*, **15**, 1111-1129. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.020>

- [9] 晏子敬, 李峰, 王瑞恩, 杨大壮, 段佳. 内压和弯矩复合载荷下弯管的蠕变分析[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(11): 29-32+28.
- [10] Ran, Z., Li, X., Han, L., Li, Q., Wang, J. and Feng, W. (2026) Investigation of Microplastic Deformation Mechanisms in TA2 Metallic Bipolar Plates Using a Crystal Plasticity Model Coupling Slip and Twinning. *Journal of Materials Research and Technology*, **41**, 5303-5319. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.02.031>
- [11] 高英俊, 黄宗吉, 邓芊芊, 廖坤, 李依轩, 易小爱, 罗志荣. 晶界三叉处位错塞积的结构转变与能量分析(英文) [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 45-63.
- [12] Yan, W., Li, Z., Wang, X., Feng, J., Liu, J. and Geng, X. (2026) Study on the Impression Load Relaxation Behaviors of Single Crystals Based on Crystallographic Creep Slipping Theory. *International Journal of Solids and Structures*, **325**, Article ID: 113700. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113700>
- [13] 李钢, 杜军旗, 李奎, 彭文雅, 赵宇, 黄龙超, 楼美琪, 赵小花, 毛新平. ZTC4 和 ZTA15 钛合金力学性能及绝热剪切变形规律研究[J]. 稀有金属, 2026, 50(1): 50-59.
- [14] Yan, K., Zhou, W., Wang, X., Li, L., Xue, Y., Yang, H., et al. (2026) Atomic-Scale Research on Stress-Induced ITB→9R→DT Structural Transformation at Microcrack Tips in FCC Metal. *Materials Characterization*, **233**, Article ID: 116144. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2026.116144>
- [15] Mazière, M., Besson, J., Forest, S., Tanguy, B., Chalons, H. and Vogel, F. (2009) Overspeed Burst of Elastoviscoplastic Rotating Disks: Part II—Burst of a Superalloy Turbine Disk. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **28**, 428-432. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2008.10.002>
- [16] 唐世杰. 石油化工装置旋转机械振动故障诊断技术研究与应用[J]. 石化技术, 2026, 33(1): 400-402.
- [17] Zuo, H., Yin, H., Yu, G., Wang, H., Wang, H., Xie, Y., et al. (2025) Scalable and Lightweight Mxene-Ni-Pdms/Melamine Sponge with Super-Elastic, Hydrophobic and Enhanced Electromagnetic Interference Shielding Performance. *Materials Chemistry and Physics*, **339**, Article ID: 130763. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130763>
- [18] 翟博. 微观缺陷分析在金属材料失效质量原因调查中的应用[J]. 中国金属通报, 2025(10): 179-181.
- [19] 陈云敏, 马鹏程, 唐耀. 土体的本构模型和超重力物理模拟[J]. 力学学报, 2020, 52(4): 901-915.
- [20] Sun, C., Li, L., Li, H., Chen, Y. and Ruan, Y. (2025) Gradient Distribution of Reinforced Phases B2 and Ti5Si3 Enabling Tribocorrosion Optimization in Titanium Alloy. *Tribology International*, **208**, Article ID: 110659. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110659>
- [21] Zhou, X., Zhang, J., Liu, S., Wu, X., Siddique, A., Akbarjon, N., et al. (2026) Constructing Interfacial Transition Layers with Constant Thickness and Gradient Modulus in Carbon Fiber Composites for Mitigating Stress Concentration and Enhancing Stress Transfer. *Composites Part B: Engineering*, **313**, Article ID: 113365. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113365>
- [22] 庞如法, 邱春林. 奥氏体不锈钢箔材冷轧变形的晶体塑性有限元分析[J]. 锻压技术, 2025, 50(5): 180-187.
- [23] Ohara, K., Katayama, M., Kamachi, H., Kume, A. and Karahara, I. (2025) Prolonged Exposure to Centrifugal Acceleration Increases Biomass and Alters Biomass Allocation in *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. with No Apparent Impact on Elemental Concentration in the Shoot System. *Life Sciences in Space Research*, **47**, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2025.05.003>
- [24] Rosemeier, M., Antoniou, A. and Krimmer, A. (2026) Evaluating Probabilistic Fatigue Life of Trailing-Edge Adhesive Joints in Wind Turbine Blades with Emphasis on Stress Concentration in Bi-Material Corners. *Composites Part B: Engineering*, **316**, Article ID: 113496. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2026.113496>
- [25] 林枫, 梁晨, 季晨, 孙景国. 某船用燃气轮机涡轮盘疲劳裂纹扩展寿命预测研究[J]. 热动力工程, 2025, 40(6): 156-164.
- [26] 郭秩维, 李昀睿, 张付震, 胡绪腾, 万煜玮, 李洋. FGH4096 合金疲劳裂纹扩展规律和模型对比[J]. 航空发动机, 2026, 52(1): 112-121.
- [27] Mazière, M., Besson, J., Forest, S., Tanguy, B., Chalons, H. and Vogel, F. (2009) Overspeed Burst of Elastoviscoplastic Rotating Disks—Part I: Analytical and Numerical Stability Analyses. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **28**, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2008.07.008>
- [28] 李静, 葛会俊, 杨智博, 王瑶瑶, 方鹏亚. 基于有限元仿真的航空发动机涡轮盘疲劳可靠性分析[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2025, 43(5): 36-42.
- [29] Bang, T.Y., Yun, T., Park, S., Kim, H. and Choi, Y.S. (2026) Crystal Plasticity Modeling of Local Deformation Behavior of Ni-Based Single-Crystal Superalloy Turbine Blade Fir Tree. *Materials Today Communications*, **50**, Article ID: 114565. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114565>
- [30] Xie, Y., Liu, Q., Zhu, S., Sun, H., He, Y. and Wang, Q. (2023) Burst Speed Prediction and Reliability Assessment of

- Turbine Disks: Experiments and Probabilistic Aspects. *Engineering Failure Analysis*, **145**, Article ID: 107053. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107053>
- [31] Nozhnitsky, Y.A. and Servetnik, A.N. (2018) Prevention of Hazardous Failure of the Turbine Rotor Due to Its Overspeed. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **449**, Article ID: 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/449/1/012025>
- [32] Jiao, Y., Yang, F., Niu, H., Xie, L., Zhai, Y., Li, A., *et al.* (2024) Hypergravity-Exacerbated Cracking in High-Speed Rotating 7075 Aluminum Blades. *Journal of Materials Research and Technology*, **30**, 542-551. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.071>
- [33] 孙进, 张同先, 王寅杰. 晶体塑性理论进展及晶体塑性有限元模型的应用[J]. 铸造技术, 2026, 47(1): 77-99.
- [34] 刘展瑞, 孟德建, 张世祯, 高云凯. 6082-T4 铝合金各向异性本构模型与防撞梁压弯成形分析[J]. 塑性工程学报, 2026, 33(1): 112-120.
- [35] 吴凡几, 张文沁, 张大鹏, 雷勇军. 基于耗散伪应变能的 NEPE 固体推进剂疲劳损伤演化模型[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(1): 46-55.
- [36] 陈翔, 濮君冉, 邹维谦, 高荣健, 晏中华, 付涛. CoCrFeNi 系高熵合金尺寸效应的晶体塑性有限元分析[J]. 力学学报, 2026, 58(1): 124-142.
- [37] 陶志强, 张鸣, 朱煜, 成荣, 王磊杰, 李鑫. 多轴载荷下基于权平均最大剪切应力临界面的疲劳寿命预测方法[J]. 机械强度, 2021, 43(3): 719-725.
- [38] Liu, Z., Wang, C., Cheng, J. and Guo, J. (2023) An Improved Grain Growth Model and Its Application in Gradient Heat Treatment of Aero-Engine Turbine Discs. *Materials*, **16**, Article No. 6584. <https://doi.org/10.3390/ma16196584>
- [39] Li, D., Zhang, S., Tang, W., Huang, S., Peng, Y., Barlat, F., *et al.* (2010). A Crystalline Plasticity Finite Element Method for Simulation of the Plastic Deformation of AZ31 Magnesium Alloys. *AIP Conference Proceedings*, **1252**, 826-832. <https://doi.org/10.1063/1.3457641>
- [40] Nakamachi, E., Xie, C.L. and Harimoto, M. (2001) Drawability Assessment of BCC Steel Sheet by Using Elastic/Crystalline Viscoplastic Finite Element Analyses. *International Journal of Mechanical Sciences*, **43**, 631-652. [https://doi.org/10.1016/s0020-7403\(00\)00048-5](https://doi.org/10.1016/s0020-7403(00)00048-5)
- [41] 缪勇. 基于晶体塑性理论的镍基合金高温低周疲劳寿命预测方法[J]. 理化检验-物理分册, 2024, 60(4): 25-30.