

高温合金喷丸工艺表面完整性及其疲劳性能 研究进展

孙蕴齐^{1,2} 姚倡锋^{1,2,3*} 孙换凤⁴ 谭靛^{1,2,3}

1. 西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安, 710072
2. 西北工业大学航空发动机先进制造技术教育部工程研究中心, 西安, 710072
3. 硬质合金全国重点实验室(西北工业大学), 西安, 710072
4. 中国航发动力股份有限公司, 西安, 710072

摘要: 高温合金是航空发动机关键构件的重要材料, 喷丸加工是叶片类零件工艺过程的关键环节, 通过弹丸在工件表面的高速撞击, 能够在表层引入残余压应力, 从而抵消部分工作载荷, 提高构件的疲劳性能, 因此, 研究高温合金喷丸工艺对改善航空发动机关键构件的服役性能与可靠性有重要意义。针对喷丸工艺模拟方法、高温合金喷丸表面完整性和高温合金喷丸疲劳性能三方面的研究成果, 介绍了高温合金喷丸工艺的研究现状, 分析了现有研究存在的一些不足, 并指出了未来的研究方向。

关键词: 高温合金; 喷丸工艺; 表面完整性; 疲劳性能

中图分类号: TG506

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2026.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progresses of Surface Integrity and Fatigue Performance for High-temperature Alloy Shot Peening Processes

SUN Yunqi^{1,2} YAO Changfeng^{1,2,3*} SUN Huanfeng⁴ TAN Liang^{1,2,3}

1. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072
2. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Aero Engine, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072
3. State Key Laboratory of Cemented Carbide, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072
4. AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an, 710072

Abstract: High temperature alloys were important materials for key components of aircraft engines, and shot peening was a critical step in the manufacturing process of blade parts. Through the high-speed impact of the projectile on the surfaces of the workpieces, residual compressive stress might be introduced to the surfaces, thereby offsetting some working loads and improving the fatigue performance of the components. Therefore, studying the shot peening processes of high-temperature alloys was of great significance for improving the service performance and reliability of key components in aircraft engines. This paper introduced the research status of high-temperature alloy shot peening processes in terms of simulation methods, surface integrity of high-temperature alloy shot peening, and fatigue performance of high-temperature alloy shot peening. Finally, the shortcomings of existing research and future research directions were analyzed.

Key words: high temperature alloy; shot peening; surface integrity; fatigue performance

0 引言

航空发动机关键转动构件在服役过程中, 典型的失效形式是疲劳破坏。机械构件失效中, 疲劳失效占 50%~90%, 其中航空构件占 80% 以

上。当构件的几何形状确定之后, 其疲劳性能取决于表面变质层状况。表面完整性是指控制加工工艺方法造成的损伤或强化的表面状态, 是制造加工过程中构件表面材料可能产生的各种改变及其对构件服役性能影响的总描述和控制, 主要包括几何、物理以及金相特征等。

在航空发动机常用的高性能金属材料中已经证明, 表面完整性对构件的疲劳性能有着重要影

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(92360309, 92160301); 陕西省重点研发计划(2024PT-ZCK-63)

响,应当作为评价零件加工质量的重要指标^[1-2]。高温合金作为航空发动机热端关键转动构件的常用材料,具有良好的热稳定性和耐腐蚀性能。但是高强度合金往往具有较高的应力集中敏感性,切削加工残留的痕迹所引发的应力集中有可能导致以承受疲劳载荷为主的转动构件疲劳失效,故强化工序是其必不可少的一个环节。常用的强化方法有喷丸强化、激光冲击强化、滚压强化、超声滚压强化、空化水喷丸强化等。其中,喷丸工艺通过弹丸高速撞击,使得被加工材料表层产生复杂演变,最终导致表层材料的特性产生不同于基体材料的改变,是制造工艺中广泛应用的强化方法。本文针对高温合金的喷丸工艺模拟方法、喷丸表面完整性和喷丸疲劳性能三个方面,介绍高温合金喷丸工艺的研究现状,总结当前存在的问题并为未来研究方向提供参考。

1 喷丸工艺模拟方法

喷丸强化原理如图1所示^[3]。切削加工中,刀具与工件之间具有严格的几何位置关系,而喷丸过程中弹丸与工件之间的相互作用有较大的随机性。弹丸的快速撞击带来的表层材料的复杂变化,以及加工环境的恶劣,使得观测其塑性变形机理更加困难,故当前相关的研究更多地依赖于模拟方法计算机技术的高速发展使喷丸过程的模拟方法得到了快速的进步,常用的模拟方法有有限元方法(finite element method, FEM)、Python二次开发方法以及离散元(discrete element method, DEM)耦合法等。

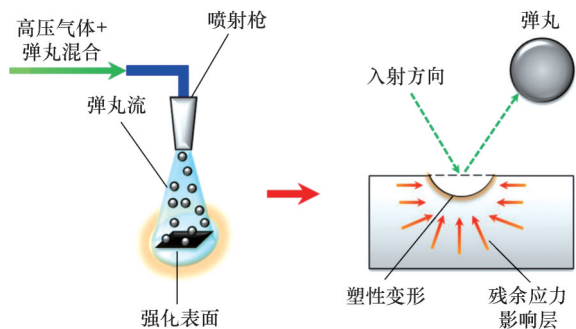


图1 喷丸强化原理^[3]

Fig.1 Schematic of shot peening strengthening^[3]

1.1 FEM方法

有限元方法作为高温合金喷丸模拟的传统方法,得到了广泛应用^[3-4],该方法将喷丸过程作为弹丸与工件表面的快速碰撞接触问题,通过应力应变将喷丸的加工效果可视化。有限元方法能够分析喷丸处理的过程,无需进行大规模物理试验

就能够预测喷丸后的材料状态,能够设计获得所需应力分布的喷丸工艺,并模拟对施加了额外载荷或处理的材料进行喷丸处理的后果。GHASEMI等^[5]使用喷丸的随机冲击模拟研究了瑞利阻尼、网格尺寸和目标尺寸对残余应力分布的影响,与传统的有限元模型相比,计算时间缩短了25%,所需的随机存储容量减少了80%,而计算的残余应力和由此产生的表面粗糙度与试验结果较为一致。图2所示^[5]为1、2、42和420次冲击后等效塑性应变的变形轮廓。

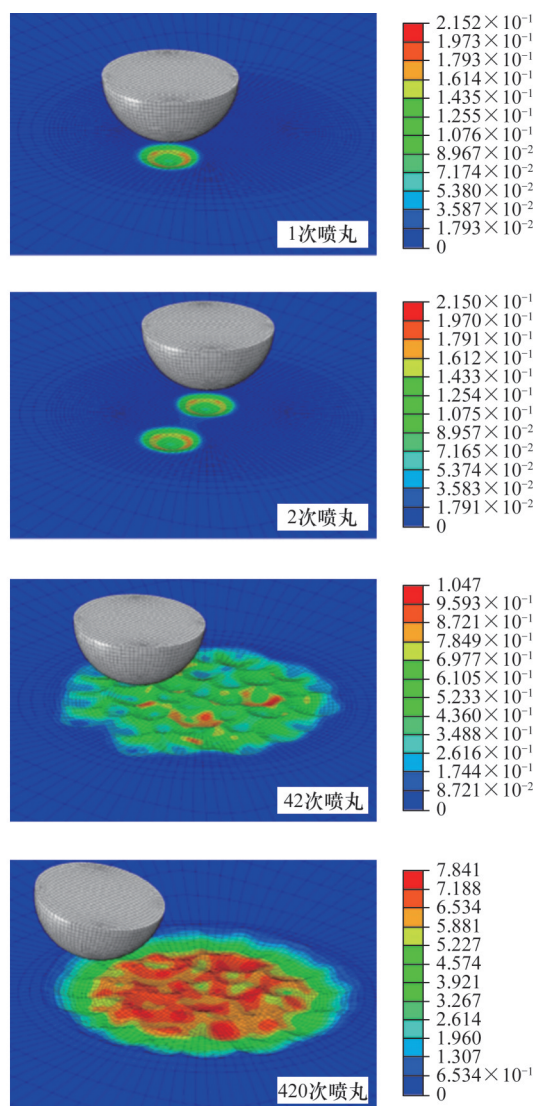


图2 喷丸覆盖率对表面变形状况的影响^[5]

Fig.2 The influence of shot peening coverage on surface deformation condition^[5]

WANG等^[6]基于从对称单元模型输出的动态应力和残余应力,通过正态分布评估对应于全覆盖的残余应力。相对于四个角点的预测节点动应力表明,等双轴应力状态只存在于第一次冲击过程中。随着弹丸数量的增加,多次弹丸撞击的相互作用使节点动应力在一个几乎相同的值上下

波动越来越明显。随着喷丸次数的增加,残余应力的平均值和标准差逐渐趋于稳定。在第三次喷丸处理之后,每个角点处的平均值几乎相同,这意味

着实现了与喷丸处理的100%覆盖率相对应的等双轴应力状态。在200%喷丸覆盖率下,预测的残余应力分布与实验结果非常吻合,见图3^[6]。

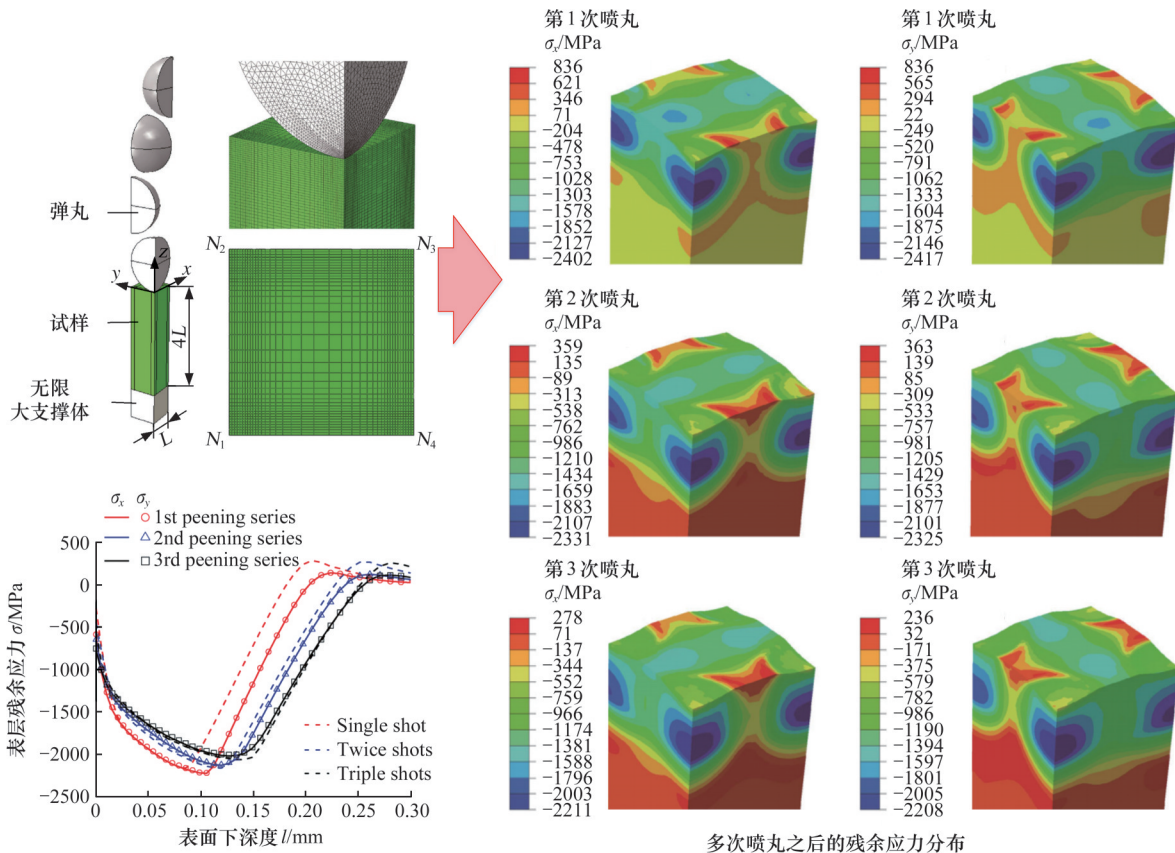


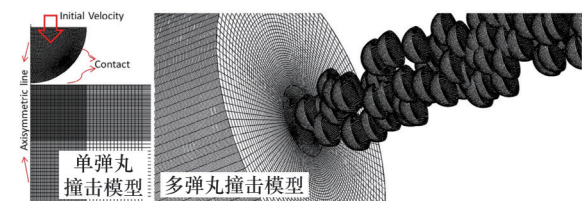
图3 多次喷丸的有限元模拟^[6]

Fig.3 Finite element simulation of multiple shot peening^[6]

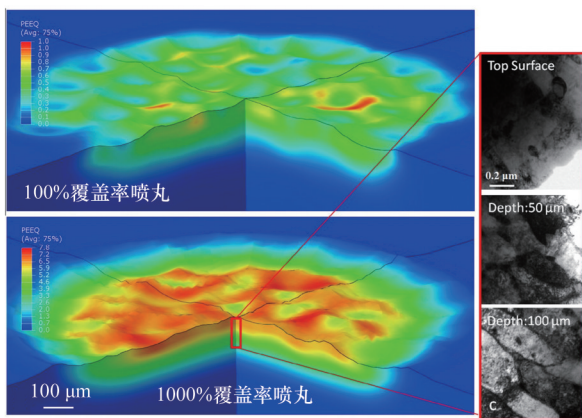
PHAM等^[7]提出了用于喷丸过程模拟的全覆盖估计方法,利用有限元法并借助MATLAB程序建立了喷丸过程的动态塑性模型。GARIÉPY等^[8]基于获得的关于弹丸尺寸和弹坑尺寸的实验数据,结合有限元方法和Monte Carlo模拟法,对弹丸尺寸和弹丸速度分布进行了评估和建模,发现当考虑速度的不均匀性时,残余压应力的深度增加了10%,而最大残余压应力值没有显著变化。PUROHIT等^[9]利用ABAQUS建立了喷丸过程的伪动态显式模型,模型包含应变率效应和压力相关性并且忽略了弹丸撞击后的惯性效应。贺占蜀等^[10]针对复合喷丸工艺,运用ABAQUS建立单弹丸和双弹丸的有限元模型,研究了弹丸速度、弹丸半径及靶材几何特征对残余应力场的影响规律。随着弹丸速度和弹丸半径的增大,表面残余压应力、残余压应力最大值及残余压应力层深度均增大。单丸粒喷丸强化不同几何特征靶材表面时的强化效果从大到小依次为凹槽面、平面、圆柱面和球面。

材料的本构模型在有限元仿真中具有十分重

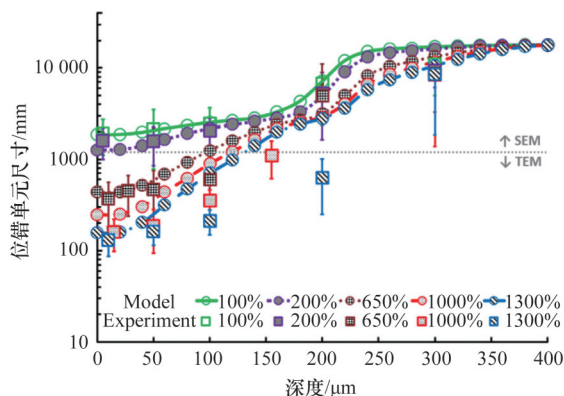
要的作用,决定了仿真结果的准确性。有限元中使用的本构模型往往为理想模型,如何让本构模型更精确地反映受喷丸材料的真实状态、内在缺陷等固有特性,是高温合金喷丸仿真重要的发展方向。FRIJA等^[11]将弹丸假设为刚性球体并综合考虑了Lemantre和Chaboche损伤模型,通过在镍基合金Waspaloy上进行标准喷丸处理的应用,验证了该模型的可行性,除了残余应力和塑性变形的梯度分布,该方法还能预测表面损伤。WANG等^[12]建立了单次喷丸冲击和多次喷丸冲击的三维有限元模型,研究了强喷丸强化引起的晶粒细化,提出了一种将微观位错密度和宏观塑性理论相结合的多尺度本构模型,以表征位错胞结构的形成和演化。HASSANI-GANGARAJ等^[13]将严重喷丸处理的有限元模拟与累积塑性应变引起的位错密度演化联系起来,能够预测表面层中产生的晶粒/晶胞尺寸梯度,所提框架建立了从加工参数(例如介质尺寸、速度和喷丸覆盖范围)到最终结构的物理联系,为通过设计严格的表面喷丸工艺以获得期望的纳米结构创造了可能性,如图4所示。



(a) 单弹丸与多弹丸撞击模型



(b) 不同覆盖率喷丸处理等效塑性应变的表面和深度分布



(c) 位错胞尺寸沿深度方向的变化

图4 不同覆盖率的喷丸有限元模拟^[13]

Fig.4 Finite element simulation of shot peening with different coverage rates^[13]

喷丸覆盖率是喷丸效果的表征,过喷与欠喷均会对强化效果造成不良影响。Avrami方程作为估计喷丸覆盖率的经典方法,在有限元仿真中也得到了应用。GANGARAJ等^[14]采用随机有限元方法模拟实际的喷丸覆盖状况,研究发现在模拟中应用Avrami方程会导致在全覆盖水平上过高估计撞击数,当被处理区域的半径至少是单个压痕半径的10倍时才可以此方程。LIN等^[15]建立了包含位错密度本构方程的随机多弹丸喷丸模型,从残余应力、表面粗糙度和位错胞尺寸等方面分析了喷丸速度、喷丸覆盖率和二次喷丸对表面完整性的影响。使用直径 $d=0.6\text{mm}$,喷丸速度分别为55、105、155、205 m/s时达到完全覆盖所需的撞击次数符合正态分布,在仿真中使用统计方法和Avrami方程对覆盖率的两个估计

结果较为吻合。SHERAFATNIA等^[16]研究表面初始条件(初始应力场、初始硬度分布)对喷丸残余应力场的影响,利用Hertz接触理论和弹塑性评价方法获得了喷丸冲击和回弹过程中发生屈服后的残余应力分布。考虑Bauschinger效应,采用不同的硬化模型进行弹塑性计算。使用的模型考虑了靶面的初始条件,能够预测喷丸过程中残余应力的重新分布。通过测量近表面层的残余应力和硬度分布,考虑了先前表面处理产生的初始应力分布和屈服应力变化。通过参数分析研究了表面预处理引起的初始条件对喷丸残余应力场的影响。

有限元方法作为长期广泛使用的喷丸仿真方法,能够有效地获取喷丸表层的状态,尤其是残余应力的提取较为方便,但其在大数量随机分布弹丸生成能力方面尚存在不足,采用二次开发或耦合仿真的方法能够结合仿真方法之间的优势,提高仿真的效率与精确度。

1.2 FEM+Python二次开发

有限元方法能够直观地表现喷丸过程,但其仿真设置往往过于理想化,弹丸数量的增加、弹丸分散位置的随机化都对仿真方法提出了更高的要求。针对用户不同需求,有限元软件的二次开发也得到了广泛应用。大型通用非线性有限元软件Abaqus为用户提供开放的二次开发接口,基于Python语言的脚本接口便于用户根据自身需求开发前、后处理工具(GUI程序),或者辅助用户实现参数化建模和数据处理。张颖琳等^[17]采用Python脚本语言对Abaqus前处理的建模过程进行了二次开发,利用“random.uniform”函数生成空间随机分布的弹丸,建立了图5所示的空间随机分布的多弹丸模型。提取的仿真数据中,残余应力数值与实测值具有良好的一致性,最大残余应力的误差仅2.1%。

陈飞等^[18]使用Python对Abaqus软件的前、后处理模块进行二次开发,所开发的插件可以自动快速实现Abaqus的前处理操作,包括几何建模、网格划分和初始应力施加等,该插件可在Abaqus后处理中自动输出结构件沿半径方向的最大位移,该位移可视作喷丸强化引起的变形。LIN等^[19]使用有限元方法与Python创建多弹丸喷丸模型,研究喷丸覆盖率对残余应力、塑性应变和表面形貌的影响,如图6所示,随着喷丸覆盖率从100%增加到400%,最大残余应力和塑性应变

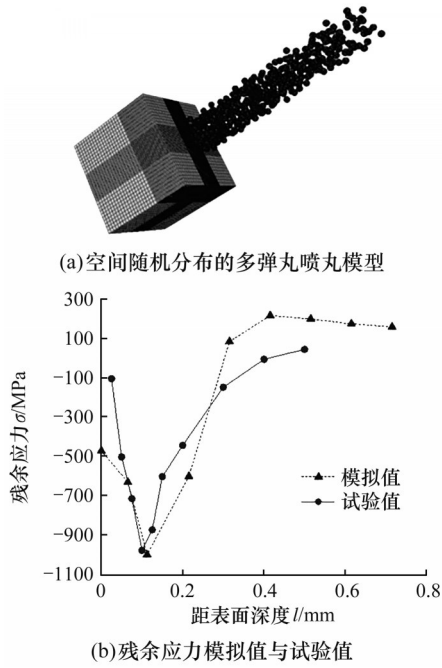


图5 基于Abaqus-Python二次开发的喷丸有限元模型^[17]

Fig.5 Finite element model of shot peening based on Abaqus-Python secondary development^[17]

将逐渐增大。Python二次开发方法能够生成一定数量空间随机分布的弹丸,使仿真更加贴合实际,但在运算速度与存储空间占用方面没有明显的优点,大数量的随机弹丸会增加计算负荷,增加计算时长。

1.3 FEM+DEM耦合仿真

相较于Python二次开发方法,离散元方法(DEM)与有限元方法(FEM)相结合能够更快更高效地生成随机分布的弹丸颗粒,建立更加符合实际的仿真模型。有限元方法是模拟和研究连续介质的强大高效的方法,主要研究材料应变与应力的情况,而离散元方法将离散系统的物体用特定形状的离散单元来代替,其主要研究颗粒与颗粒之间、或者颗粒与边界之间的接触作用,以及整个离散系统的宏观运动情况^[20]。离散单元法由

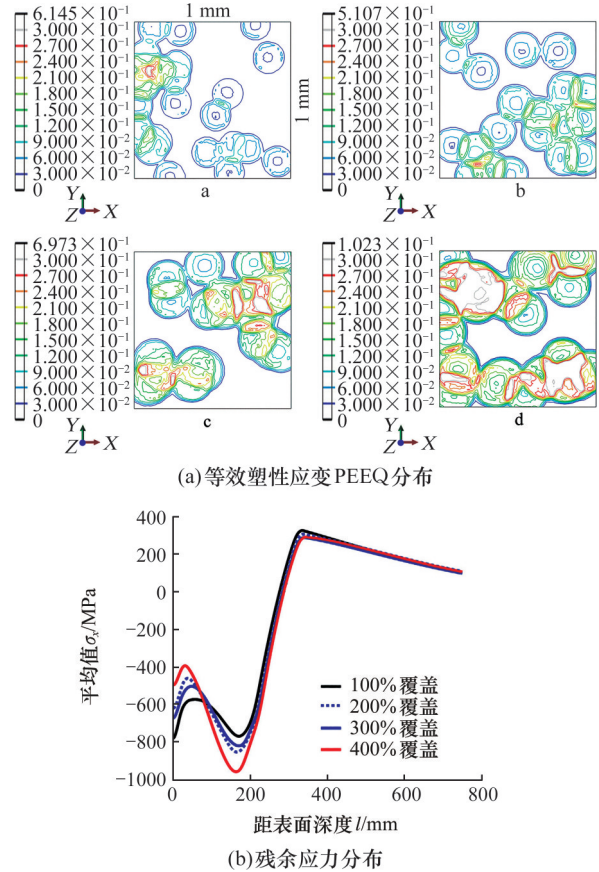


图6 不同喷丸覆盖率对表面质量的影响^[19]

Fig.6 The influence of different coverage rates on surface quality^[19]

Cundall和Strack引入,是离散系统分析的重要工具。研究离散系统与连续系统之间的相互作用,可以利用FEM-DEM耦合模型(图7)。喷丸问题的研究具有时间方面与计算机算力需求方面的特殊性。由于喷丸过程建模复杂,涉及金属表面与大量极小直径弹丸的相互作用,所涉及的喷丸次数和真实加工中为达到100%覆盖所需的喷丸量,使得有限元方法会使用相当长的时间。在有限元模型中利用来自离散元模拟的力随时间变化的空间信息,可将喷丸问题作为瞬态问题来解决。

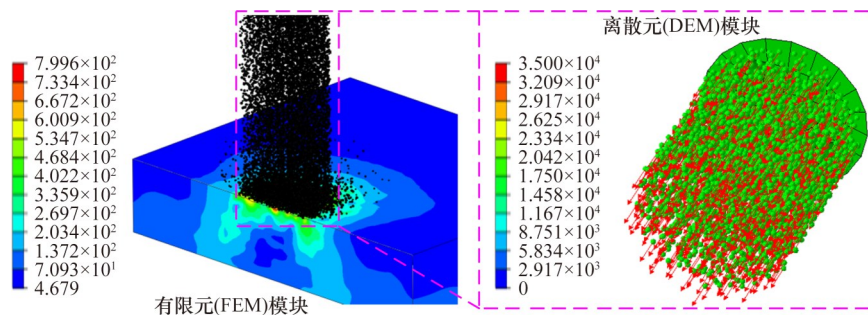


图7 FEM-DEM耦合喷丸模拟方法^[20]

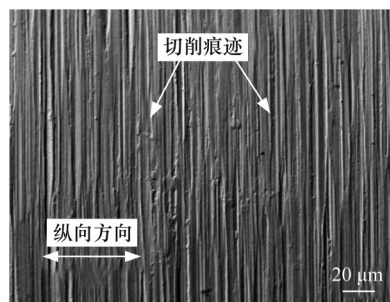
Fig.7 FEM-DEM coupled shot blasting simulation method^[20]

BHUVARAGHAN等^[21]利用DEM方法获取弹丸喷射过程中的相关信息,将随机冲击产生的接触力应用于有限元模型从而获得更加真实的残余应力,计算得到的残余应力梯度分布与单独使用FEM方法模拟的分布基本一致。TU等^[22]结合FEM与DEM方法,针对喷丸过程进行仿真,根据获得的表面粗糙度与残余应力梯度分布评价加工效果,通过DEM方法模拟弹丸射流,并在喷丸过程中通过调整弹丸与工件表面的接触恢复系数来表现加工过程中的表面硬化。MURUGARATNAM等^[23]将DEM方法和FEM方法相结合,使用刚体动力学方法模拟了弹丸与弹丸之间、弹丸与工件表面之间相互作用以及整个喷丸过程。考虑到材料硬化的影响,同样使用了代码动态调整同一点上的CoRs值。将DEM模拟的输出与FEM相结合,确定喷丸角度以及初始速度和质量流率的组合对残余应力分布状况的影响。HONG等^[24]提出了喷丸强化过程的计算模型,用FEM研究了喷丸冲击金属靶的弹塑性动力学过程,用DEM研究了多粒子动力学。结果表明,该方法能够捕捉真实的行为,包括弹丸入射和弹丸反弹之间的相互作用。MARINI等^[25]尝试模拟了喷丸在边缘部位的加工效果。DEM方法与FEM方法相结合,充分发挥了两种方法各自的优点,提高了仿真的效率,获得了更为准确的场量分布特征。

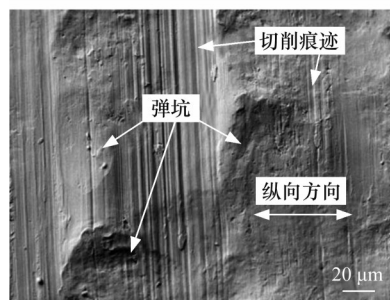
2 喷丸对高温合金表面完整性的影响

2.1 喷丸对表面形貌的影响

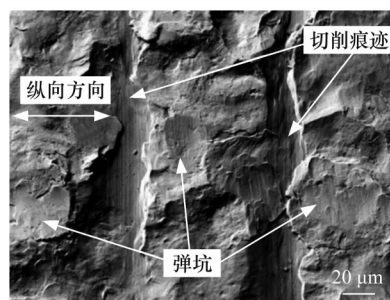
针对典型塑性金属喷丸表面形貌的研究表明,表面形貌的形成是由于弹丸高速撞击样品表面引起的塑性流动与材料堆积。弹坑的最低点和塑性流动材料的最高点组成了重构后的新形貌^[26]。KLOTZ等^[27]针对Inconel718喷丸后的表面形貌进行了研究,图8a所示为喷丸前的表面状态;由图8b可以观察到,直径0.59 mm的S230弹丸在4 mm·A喷丸强度下产生的凹痕仅部分消除了车削过程中产生的加工痕迹,最大峰谷距离 Rt 值略微增至8.65 μm ,直径0.36 mm的CW14弹丸在相同强度下使 Rt 值增至11.90 μm ;图8c所示扫描电镜观察仍显示存在剩余的加工痕迹,表面比S230弹丸喷丸获得的变形程度更严重;如图8d所示,当CW14弹丸以8 mm·A的强度喷丸时,机械加工痕迹被完全覆盖。此外,表面的变形程度比在其他情况下更为显著。



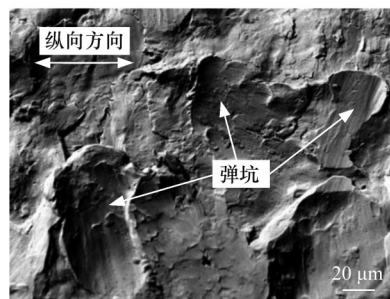
(a)车削表面



(b)S230弹丸喷丸



(c)CW14-4 mm·A强度喷丸



(d)CW14-8 mm·A强度喷丸

图8 喷丸后样品表面的扫描电镜照片^[27]

Fig.8 Scanning electron microscopy images of the sample surface after shot peening^[27]

WU等^[28]研究了GH4169高温合金车削后喷丸的表面形貌。车削工艺 $Ra=0.431 \mu\text{m}$ 。表面可清晰地观察到整齐排列的车削刀痕。经过喷丸强化工艺后,试件表面发生了明显的变化。以0.1 mm·A喷丸强度喷丸后,试件表面上可见明显的致密坑状和堆积痕迹。这些小的致密的弹坑由铸钢弹丸高速撞击试样表面引起,而弹坑周围的堆积则是由于金属从弹坑向四周流动而形成。喷丸强化后,试件表面弹坑的最低点和弹坑周围

堆积的最高点分别成为表面的新的波谷和波峰。喷丸表面的堆积导致 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{A}$ 试样的表面粗糙度增加到 $0.898 \mu\text{m}$ 。当喷丸强度增大到 $0.15 \text{ mm} \cdot \text{A}$ 时,喷丸引起的弹坑直径增大,而车削加工刀痕依然没有完全消失。弹坑和塑性堆积程度的增加导致产生了更高的表面粗糙度 $1.399 \mu\text{m}$ 。以 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{A}$ 强度喷丸工艺获得的试样表面起伏明显,具有最大的表面粗糙度 $2.423 \mu\text{m}$,同时车削加工刀痕完全消失。LIN 等^[15]使用仿真方法研究了喷丸速度与多次喷丸对表面粗糙度的影响,如图 9 和图 10 所示,使用 0.6 mm 弹丸,随着弹丸的速度从 55 m/s 增加到 205 m/s ,表面粗糙度增加;当使用 0.3 mm 弹丸、以 225 m/s 的速度进行第二次喷丸后,表面粗糙度略有降低。

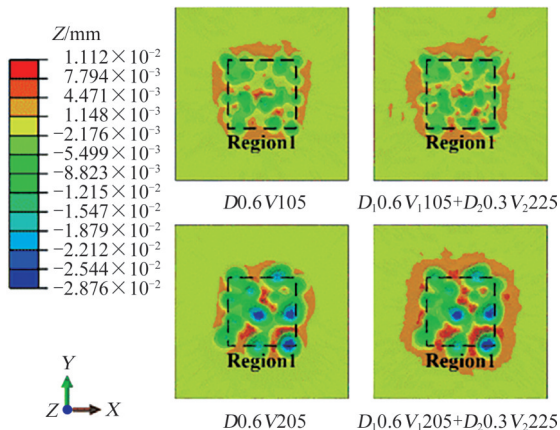


图 9 单次喷丸与多次喷丸后的表面形貌

Fig.9 Surface morphology after the single shot peening and multiple shot peening

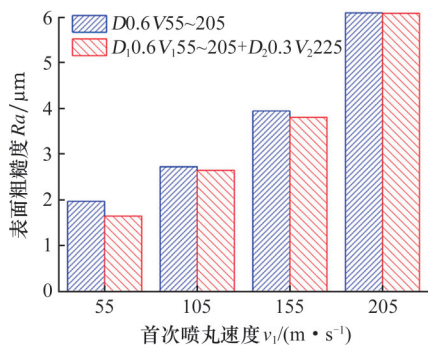


图 10 单次喷丸与多次喷丸后表面粗糙度的比较

Fig.10 Comparison of surface roughness between the single shot peening and multiple shot peening

喷丸表面形貌重构以表面材料的塑性变形为主,喷丸强度是决定塑性变形程度的重要因素。对喷丸过程中一些参数(如喷丸速度、弹丸直径、喷丸强度等)之间的相互作用关系没有深入探讨,只是单独说明各参数对表面形貌和粗糙度的影响。在描述研究结果时,主要以实验现象和数据为主,缺乏对其背后物理机制的深入分析。

2.2 喷丸对微力学特征的影响

喷丸后的残余应力是影响疲劳性能的关键因素,高温合金喷丸后,表面变质层中存在较高水平的残余压应力。表层残余应力最大值出现在近表层,然后在深处降低。喷丸强度越高,残余压应力越大,应力最大值位置越深,应力松弛速率越慢。从微观结构上看,高微观应变提高了位错密度水平,减缓了位错滑移,导致形变层中的结构强化^[29]。在针对喷丸强化工艺对微力学分布状态影响规律的研究中,PARK 等^[30]使用 X 射线衍射(HEXD)和双尺度优化方法(BSOM)评估喷丸后 Inconel100 合金的残余应力,发现喷丸后表层产生了约 1 mm 厚的残余应力层,塑性变形随着深度的增大而降低。王欣等^[31]采用铸钢丸、陶瓷丸和复合喷丸的方法对 FGH95 合金进行喷丸强化,表面残余压应力为 $800 \sim 1150 \text{ MPa}$,残余应力场深度约 $120 \sim 250 \mu\text{m}$;喷丸后表面硬度由基体材料的 $480 \sim 510 \text{ HV}0.2$ 上升到 $575 \sim 625 \text{ HV}0.2$,硬化层深度达到 $175 \sim 250 \mu\text{m}$ 。SALVATI 等^[32]对激光熔融增材制造的 Inconel718 合金进行了喷丸处理,通过对喷丸前后的试件分别进行残余应力测试,发现喷丸会导致材料内部有可能萌生裂纹的危险位置产生高强度的残余拉应力,增加裂纹萌生的危险性,弱化抗疲劳性能。除采用对喷丸工艺参数进行控制的方法外,在喷丸工艺前对工件表面施加预应力也可以使喷丸残余应力的水平得到进一步的优化。WU 等^[33]研究了预应力喷丸 Inconel625 合金的表层特性,在与传统喷丸强度相同的情况下,证明了预应力喷丸能进一步优化残余压应力的分布。施加的预应力水平越高,晶粒细化和微应变产生的效果越明显,残余压应力、细晶区和较高的微应变强化了预应力喷丸的效果,使 Inconel625 合金的显微硬度和屈服强度进一步提高,如图 11 所示。

区别于传统的机械式喷丸,近年来激光喷丸技术得到了较快的发展,它能够带来较深的残余压应力层,并且可以对较小的区域进行精准的强化,目前已经在高温合金微力学改善过程中得到了应用。BUGAYEV 等^[34]认为激光喷丸用于 Inconel600 合金能成功地诱导残余压缩应力。RAMKUMAR 等^[35]对 Inconel625 和 uns32205 异种合金脉冲钨极气体保护焊接头焊缝的焊帽和焊根区域的熔合区进行了双丸激光冲击喷丸,结果表明,在焊件的焊帽和焊根区域进行双丸激光冲击喷丸处理后,焊接接头的屈服强度和抗拉强度

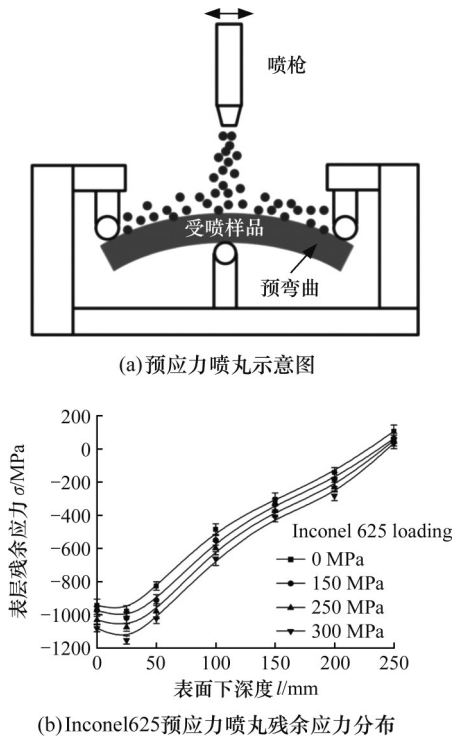


图 11 Inconel625 合金的预应力喷丸^[33]

Fig.11 Pre-stress shot peening of Inconel625 alloy^[33]

都有较大的提高。采用 X 射线衍射法对不同试样进行了残余应力分析,经双面双丸激光冲击喷丸处理后,熔合区受到残余压应力的作用,使用低能量激光束进行喷丸可获得较好的抗拉强度。

喷丸强化工艺在多晶材料中能够有效地诱导残余应力,在主要依靠组织特性获得优良使用性能的单晶高温合金中同样有效,喷丸强化工艺对其表面同样能够诱导出残余压应力。MORAN-CAIS 等^[36]对镍基单晶试样在平行于(100)平面的表面上,用超声波技术对进行了喷丸处理,喷丸处理在厚度约 130 μm 的表面层中引起残余压应力,在表面下 17 μm 处达到 1100 MPa 的最大值。CHEN 等^[37]研究了镍基单晶晶体取向对喷丸样品表面变形层残余应力分布和微观组织演化的影响,发现单晶[111]取向样品的取向随机化和压缩残余应力值相对高于[001]取向样品。单晶合金喷丸虽然提高了表面的残余应力水平,但会改变单晶组织的有序分布,将单晶组织变成多晶状态,这对其使用性能产生的影响有很大的不确定性。

已有的研究成果尚存在不足,需进一步探究高温合金喷丸微力学特征产生、分布与演化的微观机制,尤其是喷丸过程中材料微观结构变化与残余应力之间的复杂关系,明确位错运动、晶粒细化等因素对残余应力的定量影响,为喷丸工艺优化提供更坚实的理论基础。面向多因素协同优化,系统研究喷丸方式与工艺参数(如弹丸类型、

尺寸、速度、喷丸强度、覆盖率等)、材料特性(成分、组织结构)与预应力条件之间的协同作用,建立综合考虑多因素的残余应力调控模型,实现更精准的高温合金表层微力学特征控制。

2.3 喷丸对微结构特征的影响

弹丸的高速撞击导致金属表面产生微观结构变化,其性能的提高得益于喷丸表层结构变化附加的晶界强化与位错强化,微结构晶粒细化导致显微硬度的提高。王琨等^[38]研究了喷丸对 DD412 单晶合金表层微观组织的影响,铸钢丸喷丸试样显示,随着喷丸强度的增大,同深度的 γ' 相变形程度增大,这与表面硬度及硬化层深度随喷丸强度的变化规律一致;陶瓷丸喷丸试样显示,采用更大尺寸弹丸和更高喷丸强度的试样表面塑性变形程度更大,如图 12 所示。

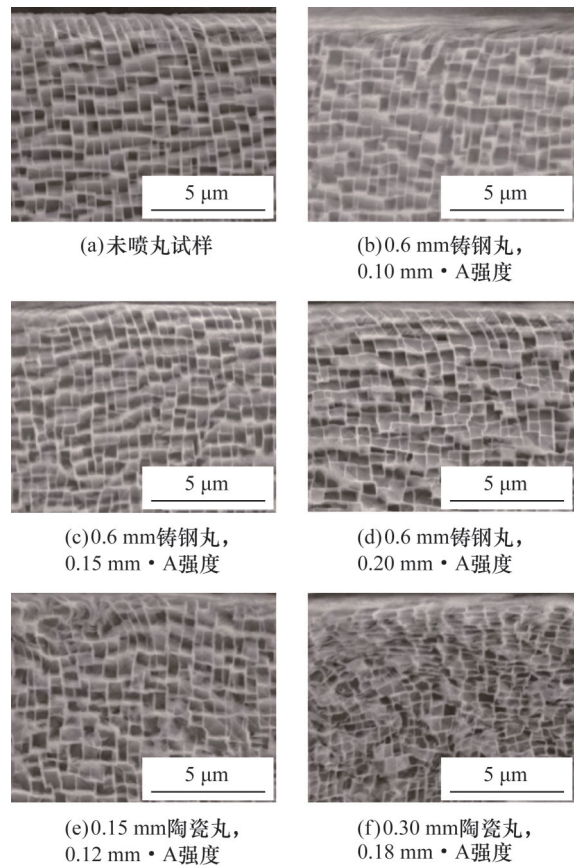


图 12 喷丸状态试样的表层微观组织^[38]

Fig.12 Surface microstructure of shot-peened specimens^[38]

GILL 等^[39]采用电子背散射衍射、纳米压痕和微柱压缩试验,研究了镍基合金激光喷丸超塑性成形 Inconel718 合金的局部化塑性变形和硬化状况。激光喷丸后塑性变形表现为低角度取向的分数增加和亚晶界的形成。冯帅等^[40]对 GH4169 进行高能喷丸表面纳米化试验,测试了不同喷丸时间后的表面层晶粒尺寸,在初始进行

喷丸的 30 min 之内, 表面层晶粒尺寸从 58.25 nm 降至 21.41 nm, 当喷丸时间增加至 120 min 时, 晶粒尺寸降至 20.27 nm, 下降速率减缓, 表面硬度由 HV480 增加至 HV600, 变形层深度由 8 μm 增加至 40 μm 。KUMAR 等^[41]研究了激光喷丸对 Inconel718 合金激光烧结试样的影响, 显微组织呈椭圆形, 形成新的晶界, 表面宏观硬度提高了 13%, 由于沉淀硬化形成的硬化基体和激光冲击强化引起的晶粒细化的影响, 材料亚表面的显微硬度增加了 17%, SEM 分析显示较大的晶粒被细化。KLOTZ 等^[27]研究了 IN718 不同工艺水平喷丸后的微观组织, 在加工后的样品表面观察到损坏的 NbC 碳化物, 加工后的横截面上没有观察到塑性变形的迹象, S230 弹丸、4A 强度喷丸和 CW14 弹丸、8A 强度喷丸样品在表面下 10 μm 和 25 μm 分别观察到连续的滑移带特征, 使用 CW14 弹丸进行 8A 强度喷丸后的样品, 表面可以观察到严重的塑性变形, 较高的弹丸动能导致更多的塑性变形。CHAMANFAR 等^[42]对 Inconel718 工业燃气涡轮盘上的榫槽进行了拉削和喷丸处理, 并对表面和亚表面进行了冶金和力学表征。朱立华等^[43]对 FGH4113A 高温合金进行了喷丸处理, 合金亚表层产生位错塞积, 诱发晶粒内形成变形孪晶, 并且变形孪晶数量随喷丸强度的增大而增大。另外, 喷丸强化引入的位错使变形层存在大量的小角晶界, 从而发生晶粒细化, 提高了合金硬化效果, 如图 13 所示。

研究成果指明了高温合金喷丸微观机制深入研究的方向, 应当进一步探究不同材料在喷丸过程中微观结构变化的详细机制, 明确晶界强化、位错强化与性能提高之间的定量关系, 例如研究不同类型位错和晶界对材料硬度、强度等性能的具体贡献, 为喷丸工艺优化提供更精准的理论指导。此外, 高温合金喷丸在服役过程中的微结构稳定性与使用性能密切相关, 研究喷丸处理后材料微观组织和性能的长期稳定性, 例如在不同环境条件(高温、腐蚀等)下的变化规律, 评估喷丸处理对材料长期服役性能的影响, 为实际工程应用提供更可靠的依据。

3 高温合金喷丸表面完整性与疲劳性能

喷丸表面的高残余压应力水平与微结构特性的改变是高温合金喷丸强化后抗疲劳机制的主导因素。SUN 等^[44]研究了喷丸后 GH4169G 叶片的疲劳失效行为, 结果表明采用陶瓷丸进行 0.15

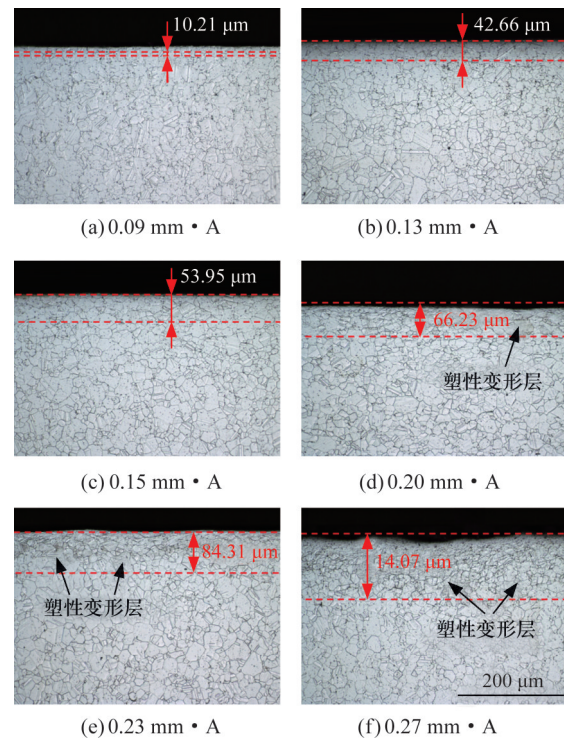


图 13 不同喷丸强度下 FGH4113A 高温合金亚表层的金相组织^[43]

Fig.13 Metallographic structure of sub surface layer of FGH4113A high-temperature alloy under different shot peening intensities^[43]

mm·A 强度喷丸后的叶片寿命相较于未强化叶片提高了一个数量级, 强化后的叶片疲劳源从表面转移至叶背最大应力位置的表层。张宁等^[45]对铣削状态的镍基高温合金 Allvac 718Plus 进行喷丸强化, 发现相较于铣削试样, 喷丸后的寿命提高了 13.46~25.41 倍, 疲劳源从表面转移至表层。潘一帆等^[46]对 GH4169 进行了喷丸与振动光饰的复合处理, 并进行升降法试验获取其在室温与高温 500 $^{\circ}\text{C}$ 下的疲劳强度, 在 90% 置信度、10% 失效概率下, GH4169 高温合金复合处理之后的疲劳强度为 740.8 MPa, 与基材的疲劳强度 609.237 MPa 相比提高了 21.6%; 在 500 $^{\circ}\text{C}$ 环境中加热 100 h 后, 复合处理 GH4169 高温合金的疲劳强度为 696.3 MPa, 与加热处理前的疲劳强度 740.8 MPa 相比降低了 6%; 与 GH4169 高温合金基材的疲劳强度 609.3 MPa 相比提高了 14.29%, 常温与高温的疲劳强度试验均证明了喷丸与振动光饰的复合处理能够有效提高 GH4169 高温合金的抗疲劳性能, 如图 14 所示。

许春玲等^[47]发现, DD6 单晶合金在喷丸后, 550~760 $^{\circ}\text{C}$ 的疲劳极限提高 9% 以上, 且在全应力区域单晶合金的疲劳寿命都得到了提高, 但喷丸处理对拉伸强度、屈服强度、拉伸塑性和光滑持

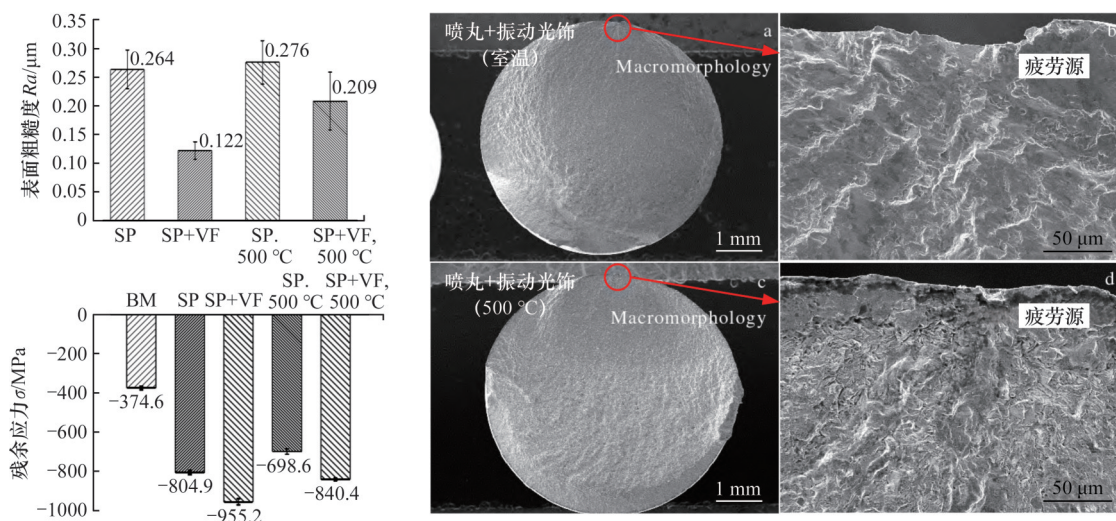


图 14 喷丸与振动光饰复合处理 GH4169 高温合金的疲劳断口形貌^[46]

Fig.14 Fatigue fracture morphology of GH4169 high-temperature alloy treated with shot peening and vibration finishing decoration composite^[46]

久性能无明显影响。王欣等^[48-51]针对 DZ125 定向凝固合金^[48]、单晶合金^[49]、FGH96 粉末高温合金^[50]等高温合金均进行了喷丸工艺研究,其中,通过选用不同喷丸强度对 FGH96 合金进行强化,研究其对疲劳性能应力集中敏感性的影响。结果表明,在 650 °C 试验条件下,当试样的应力集中系数 K_t 由 1 提高到 1.7 时,FGH96 合金磨削状态疲劳极限由 583 MPa 下降到 465 MPa,经过高强度喷丸后, $K_t=1.7$ 试样的疲劳极限恢复到 530 MPa,低强度喷丸强化对 $K_t=1.7$ 试样的疲劳极限无增益作用,如图 15 所示。高强度喷丸强化消除了加工刀痕,表面粗糙度略有增大,引入了深度达 100 μm 的残余应力场。在 600 MPa 下疲劳源萌生于次表层,呈单源疲劳模式。小强度喷丸强化无法消除加工刀痕,在 600 MPa 下疲劳源萌生于表层,呈多源疲劳模式。他们还研究了不同喷丸强度下 GH4169 光滑旋转弯曲疲劳试样的表面粗糙度、表面残余应力和高温疲劳寿命^[51],结果表明,喷丸后表面粗糙度随着喷丸强度的增大而上升,当喷

丸强度达到 0.15 $\text{mm}\cdot\text{A}$ 以上时,表面粗糙度显著变大,喷丸后表面残余应力均为压应力,GH4169 合金表面残余压应力随喷丸强度的增大而减小,GH4169 合金的疲劳寿命随喷丸强度的增大而增大。

相较于单一的喷丸强化,喷丸与其他工艺的复合制造方法能够结合不同工艺的特点,针对性地提高构件的疲劳性能。胡殿印等^[52]以 GH2787 压气机叶片为研究对象,提出激光-喷丸复合强化工艺新方案,兼顾了激光强化在残余应力层深度上的突出优势,以及喷丸强化表层残余应力水平高、可抑制表面缺陷敏感性的技术特点,从而实现叶片表面完整性的综合改善;对强化后叶片表面完整性及疲劳强度开展测试,结果表明:激光-喷丸复合强化对压气机叶片疲劳强度的提高效果最为显著,相比于无强化叶片,疲劳强度提高 20.6%;配合抛光处理后,疲劳强度增幅进一步提高至 28.1%,显著高于单独采用喷丸强化的 15.9% 和单独采用激光强化的 18.3%。罗学昆等^[53]对 K4169 合金旋转弯曲疲劳缺口试样进行了激光冲击/喷丸复合强化处理,考察其高温疲劳性能,结果表明,在 647 °C 环境与 450 MPa 应力水平下,复合强化疲劳寿命优于单一喷丸。复合强化后,疲劳裂纹源的数量下降,主裂纹源的萌生位置从表层转移至次表层,疲劳裂纹扩展速率下降。对 FGH95 合金进行了四种不同的复合加工(磨削、磨削+铸钢丸喷丸、磨削+陶瓷丸和磨削+复合喷丸),并对应力集中系数 $K_t=1.7$ 的试样进行了 650 °C 下的旋弯疲劳试验^[54],断口分析表明,喷丸加工后的疲劳试样多由多源起始转为单源起

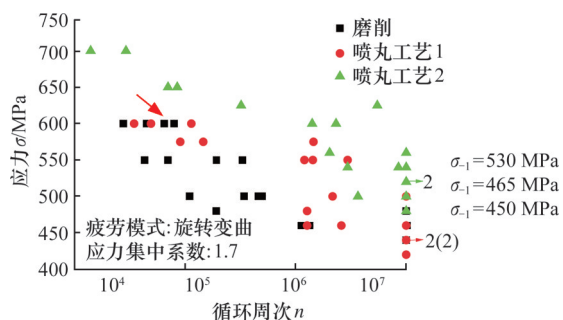


图 15 磨削/喷丸状态下 FGH96 合金缺口试样疲劳强度^[50]

Fig.15 Fatigue strength of FGH96 alloy notch specimen in grinding/shot peening state^[50]

始,疲劳寿命随着喷丸强度的增加而增加;经铸钢丸和陶瓷丸复合强化后,高温疲劳寿命达到未喷丸试样的26.3倍以上。WU等^[28]研究了GH4169高温合金在抛光、抛光+低强度喷丸、抛光+中等强度喷丸、抛光+高强度喷丸、抛光+高强度喷丸+抛光五种不同集成工艺下的表面完整性,并进行了旋转弯曲疲劳试验,结果表明喷丸可大幅度提高试样的疲劳寿命,最高可达365%,疲劳寿命的提高主要与喷丸形成的残余应力、塑性变形和加工硬化有关,喷丸后进行抛光处理可使疲劳寿命进一步提高。KLOTZ等^[27]对喷丸后的IN718合金分别进行低周疲劳和高周疲劳试验,发现在低周疲劳中,表面粗糙度为影响疲劳寿命的主要因素,在高周疲劳中,残余应力为影响疲劳寿命的主要因素;在低周疲劳中,喷丸的残余应力在第一次加载循环中重新分布,变成对疲劳寿命有害的残余拉应力,无论表面缺陷和残余应力分布如何,材料倾向于在微观结构薄弱处和大晶粒处产生裂纹,如图16所示。此外,针对喷丸处理的Inconel718在高周和低周疲劳试验下不同的裂纹起始位置和机制,以及喷丸的大范围疲劳寿命,开发了一个将Navarro模型和de los Rios裂纹扩展模型与Chen裂纹萌生模型相结合的模型,用于预测喷丸处理和未喷丸处理的Inconel718试样在室温下高周和低周疲劳试验中的裂纹起始位置和疲劳寿命^[55]。

CHEN等^[56]对铣削后的IN718合金进行喷丸处理,发现喷丸可以完全消除IN718干切削时表面产生的残余拉应力并引入高水平的残余压应力。LIU等^[57]对FGH96板状试样和棒状试样分别进行了喷丸与疲劳寿命试验,发现喷丸后两种形状的试样疲劳寿命的平均值相当,但板状试样的疲劳寿命的分散性较大。喷丸后,板状试样由于边缘部分喷丸效果差,裂纹萌生点常出现于此。GHORASHI等^[58]进行单轴疲劳试验,研究喷丸处理对恢复激光熔覆IN718试样疲劳性能的有效性。在疲劳试验的最大应力值较高时,观察到这种退化的显著程度约为40%,进行喷丸处理后,性能的退化得以恢复。ZHAO等^[59]研究了喷丸处理对GH4169合金在20、350、650℃空气中疲劳性能的影响。喷丸处理可以大大提高喷丸试样的疲劳性能,特别是在低外应力和试验温度(20℃和350℃)下。疲劳性能的改善主要归因于诱导的纳米晶和变形孪晶,以及表层的应变硬化和压缩残余应力。吴培松等^[60]发现在0.3~0.6MPa的喷丸压力范围内,GH3535合金疲劳寿命

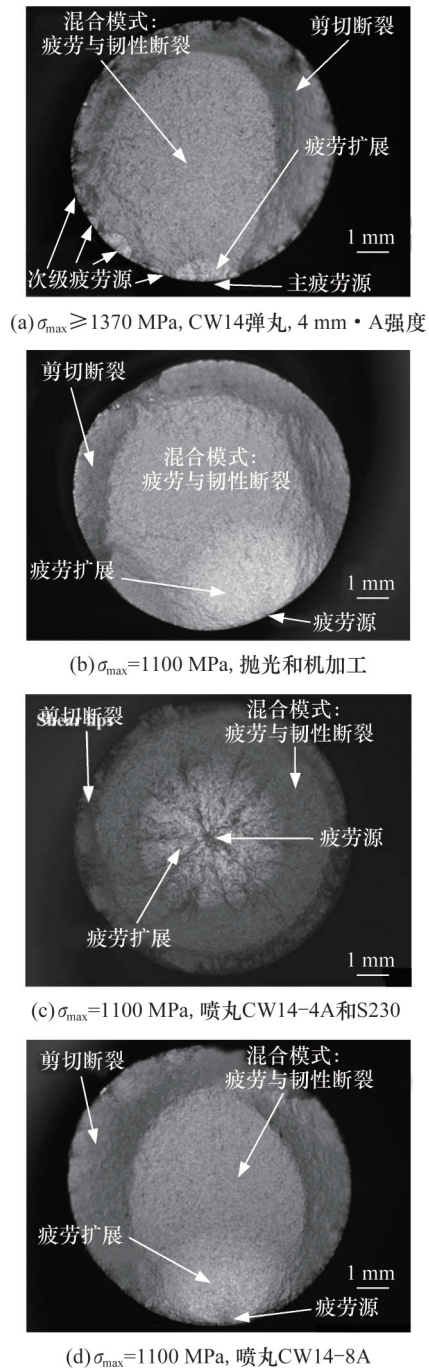


图16 IN718疲劳试样断口表征^[27]

Fig.16 Fracture characterization of IN718 fatigue specimens

对喷丸压力的变化比较敏感,疲劳寿命随着喷丸压力的增大而提高,其中,当喷丸压力为0.6MPa时,喷丸效果最优,疲劳寿命提高了471.1%,如图17所示。赵辛雨等^[61]发现喷丸后,在632℃、450MPa条件下K4169合金的中值疲劳寿命由未喷丸试样的 7.7×10^4 周次提高至喷丸试样的 $8.64 \times 10^5 \sim 3.461 \times 10^6$ 周次范围,提高了10.2~43.9倍,即较高的喷丸强度获得了较高的疲劳寿命。

方修洋等^[62]开展了不同载荷下不同表面改性技术处理后10705BX铁基高温合金榫结构微动

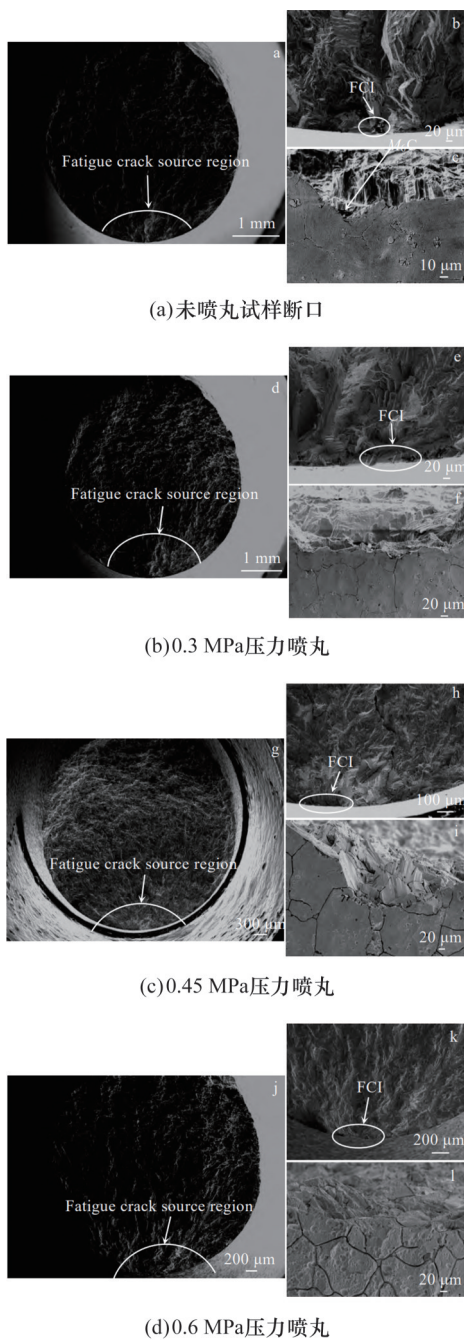


图 17 不同喷丸压力下试样的高周疲劳寿命与断口形貌^[60]

Fig.17 High cycle fatigue life and fracture morphology of specimens under different shot peening pressures^[60]

疲劳试验研究,分别对原始未处理、喷丸处理及喷丸与CuNiIn涂层复合处理的10705BX铁基高温合金榫结构试样的微动疲劳性能进行测试分析,在微动疲劳试验前后,对原始、喷丸处理及复合处理后的10705BX铁基高温合金的表截面形貌、断口形貌及力学性能进行表征分析,结果表明未处理试样、喷丸处理试样和复合处理试样表面粗糙度分别为0.08、3.38、13.65 μm。喷丸处理后表面硬度提高了16%,加工硬化层深度约80 μm,微动疲劳寿命较原始试样提高了7.8倍。

实践证明,喷丸工艺能够有效地提高构件的疲劳性能,当前的研究成果普遍认为喷丸能够增强疲劳性能的机制主要有以下三个方面:①弹丸的撞击能够显著改变工件的表面形貌,将切削加工中产生的尖锐的几何特征变成具有光滑圆弧特征的喷丸表面,降低表面应力集中程度。但这一影响具有两面性,当喷丸强度选择过大时,容易造成表面材料折叠、裂纹等缺陷,反而降低了疲劳性能;当喷丸强度过小或表面覆盖率不足时,表面原始几何形状无法覆盖,强化能力被削弱。②通过表面层产生塑性变形,位错大量聚集,晶粒细化,大量晶界与位错均能对疲劳裂纹的扩展产生阻碍作用。③在表层深度方向引入残余应力和显微硬度的梯度分布,能够有效降低裂纹扩展阶段的应力强度因子,从而提高疲劳寿命。

高温合金转动构件工作的环境往往伴随着高温与振动,即高水平的热载荷与机械载荷。喷丸过程中产生的残余应力在热机耦合疲劳过程中可能不会保持稳定。静态机械载荷、重复循环载荷、热暴露和裂纹扩展都会引起残余应力的再分布和松弛,这一松弛现象使构件的疲劳性能成为随时间变化的量,裂纹扩展时的应力强度因子也会随之发生变化。KHADHRAOUI等^[63]研究了Inconel718合金在两种喷丸强度(6 mm·A, 12 mm·A)下产生的残余应力及其在600℃和650℃不同暴露时间(10 h和100 h)后的松弛。在暴露时间的第一阶段,观察到初始应力值显著减小,随后减缓并保持稳定。结果表明,最大松弛量发生在表面,较高的温度产生较大的松弛行为,但对应力梯度分布状况没有显著影响。HOFFMEISTER等^[64]针对静态加载和循环加载对喷丸Inconel718合金的残余应力状态的改变进行了研究,在静态载荷作用下,随着应变率的增大,表面残余压应力减小,直到形成残余拉应力。

高温导致的热松弛是由位错与晶体空位相互

作用的湮灭机制引起的,高温作用恢复重组晶体中的缺陷,改变材料的性质,从而导致残余应力的松弛。WU等^[65]使用X射线衍射法研究了双喷丸加工后Inconel625合金近表层残余应力和显微组织的热松弛行为。在500、600、700℃的高温下,表面的残余应力在最初的15 min内显著减小,然而,在表层深度方向仍有很大的残余压应力。考虑显微组织的演化和显微硬度的松弛后,认为高水平的残余压应力和位错密度导致双喷丸处理的Inconel625合金的机械性能得以保留。TELANG等^[66]采用激光冲击喷丸、空化喷丸和超声纳米晶表面改性对Inconel718试样进行了表面改性处理,将样品暴露在550~650℃的温度下,比较不同表面处理后试样的热松弛行为,结果表明,三种表面处理方法产生的表面残余压应力在初始松弛后的高温下是稳定的。

周期性机械载荷下喷丸表层的变化则由两个连续阶段组成:弹性阶段(初始残余应力的重新分布,而不显著改变喷丸材料的应力-应变规律)和松弛阶段(由于材料的循环软化,残余应力随着循环次数的增加而缓慢减小)。MEGUID等^[67]使用有限元方法模拟了喷丸在枞树型涡轮盘组件上引入的残余应力分布状况,并研究了残余应力对接触界面处循环热机械载荷响应的稳定性,结果表明,由于材料屈服强度降低和塑性变形的共同作用,热机械过载可以在第一次循环中几乎完全释放喷丸残余应力。SEDDIK等^[68]针对Inconel718合金在喷丸后在力、热和热力耦合作用下残余应力的重新分布和松弛现象进行了研究,试验结果表明,随着工作温度的升高(500、650、800℃),残余应力松弛程度增加;随着工作应力的增加(450、600、900 MPa),残余应力松弛程度同样增加;当同时施加热载荷与力载荷时,残余应力的松弛程度高于任一种载荷的单独作用。FOSS等^[69]研究了喷丸镍基合金RR1000因热暴露和蠕变疲劳引起的残余应力松弛,发现700℃的热暴露减小了合金中的残余应力和加工硬化效应,但表面下仍处于有益的压缩状态,氧化环境导致近表面再结晶,但不影响残余应力松弛行为,蠕变疲劳导致残余应力几乎在所有深度都恢复到零。BUCHANAN等^[70]提出模拟高温载荷下喷丸后Inconel100残余应力松弛的模型,模型包含了主要的蠕变变形机制、蠕变模型和塑性模型之间的耦合以及先前塑性应变的影响。JOHN等^[71]使用该模型模拟喷丸后IN100超高真空中残余应力松弛。即使在

热暴露于650℃下300 h后,仍保留了显著的残余应力,仅在整个应力分布的初始加载-卸载循环中出现了松弛,在均匀施加应力的情况下,大于1 GPa的应力会发生残余应力逆转。在具有陡峭梯度的几何形状(例如凹口)中,即使局部应力超过屈服应力,在表面附近也会保留显著的压缩残余应力。

高温合金喷丸疲劳性能的研究多集中于喷丸参数(如喷丸强度、压力、弹丸类型等)、材料特性(成分、组织结构)、服役环境(温度、振动、载荷等)以及表面处理复合工艺等多因素对高温合金疲劳性能和残余应力松弛的定性影响分析,应当深入研究喷丸后材料微观结构(位错、晶界、孪晶等)与疲劳性能之间的定量关系,以及残余应力松弛的微观机制,建立更完善的理论模型和预测方法,促进定性分析向定量分析转变。结合实验测试和数值模拟,开发更准确的疲劳寿命预测模型,考虑残余应力松弛、表面缺陷、材料微观结构变化等因素,提高构件在复杂服役环境下的可靠性评估水平。

4 未来发展趋势

1)高温合金喷丸的多尺度模拟和数据驱动方法的研究方面。随着计算机技术的发展,多尺度模拟方法(如结合有限元和离散元的耦合模拟)将为喷丸工艺研究提供新的视角。同时,可以引入人工智能、大数据等技术,挖掘喷丸工艺参数与构件性能之间的深层联系,为未来的强化工艺设计提供数据驱动的支持。

2)复杂结构件高温合金喷丸研究方面。当前多使用标准疲劳试样对强化高温合金的疲劳行为的研究,少有针对实际结构件的研究。与传统标准试样相比,复杂几何构件(如航空发动机叶片)在实际服役中承受多轴应力和动态载荷,制备与实际一致的模拟件,并在真实工况下进行性能考察,深入探讨不同结构下的高温合金喷丸表面完整性与疲劳性能所具有的不同性能特点,具有重要的现实意义。

3)在单晶高温合金喷丸工艺研究方面。当前针对单晶材料强化的研究报道较少,强化机理研究不深入,很少涉及强化处理过程中能量的分布及传递特点,强化过程中表层材料塑性变形及流动的精确定义模型与应力应变关系模型尚未建立。从机理上对表面强化过程中的能量分布传递、应力应变关系进行研究,建立精确的强化区域

材料塑形流动模型,探索残余应力分布状态、表面微观形貌与表层塑性变形之间的关联以及对构件宏微观变形的影响规律,揭示强化工艺参数、残余应力分布、表面宏微观变形的影响机制,是今后研究的趋势。

4)在喷丸工艺对高温合金疲劳性能的影响机制方面。现有研究已经认识到,制造表层中的微观组织、残余应力与显微硬度的梯度变化对疲劳性能有重要的影响,但其变化对疲劳性能的影响规律和机理研究属于探索性试验研究,多为定性描述,深入揭示喷完表面完整性抗疲劳机制,建立可靠的、具有普适性的表面完整性与疲劳性能的映射模型,是通过工艺方法形成高质量表面完整性、获取具有优良服役性能构件的关键,也是研究的难点所在。

5)喷丸工艺参数的优化与精细化控制方面。喷丸强度、覆盖率及弹丸材质等参数显著影响喷丸强化效果,但目前对这些参数的优化多依赖经验或试验,缺乏系统性的理论指导。未来研究应基于先进的有限元和离散元模拟技术,结合机器学习等数据分析工具,实现喷丸参数的智能化优化,从而获得均匀且稳定的残余应力分布和显微硬度梯度。

6)高温和动态载荷下的残余应力稳定性研究方面。航空发动机关键构件在服役中需要经受高温和循环载荷的双重作用,喷丸工艺引入的残余应力可能因热松弛和动态载荷重新分布而逐渐衰减。未来研究应重点关注喷丸残余应力在复杂环境下的演化规律,尤其是高温条件下的位错湮灭和应力松弛机制,并探讨优化喷丸工艺以延缓松弛的方法。这一特点关乎构件的实际使用性能,应当予以重视。

7)新型喷丸技术的应用与拓展方面。传统机械喷丸技术虽然成熟,但在强化效果和工艺灵活性上仍有提高空间。未来可探索如激光喷丸、超声喷丸、滚压强化等新兴技术的组合应用,研究其在高温合金强化中的具体作用机理,进一步拓宽喷丸工艺的适用范围,为实现更加精准和高效的表面强化提供支持。

参考文献:

- [1] WU Daoxia, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng. Effect of Turning and Surface Polishing Treatments on Surface Integrity and Fatigue Performance of Nickel-based Alloy GH4169[J]. *Metals*, 2018, 8(7): 549.
- [2] SUÁREZ A, VEIGA F, de LACALLE L N L, et al. Effects of Ultrasonics-assisted Face Milling on Surface Integrity and Fatigue Life of Ni-alloy 718[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(11): 5076-5086.
- [3] MALEKI E, UNAL O. Optimization of Shot Peening Effective Parameters on Surface Hardness Improvement[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27(9): 3173-3185.
- [4] GALLITELLI D, BOYER V, GELINEAU M, et al. Simulation of Shot Peening: from Process Parameters to Residual Stress Fields in a Structure[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2016, 344(4/5): 355-374.
- [5] GHASEMI A, HASSANI-GANGARAJ S M, MAHMOUDI A H, et al. Shot Peening Coverage Effect on Residual Stress Profile by FE Random Impact Analysis[J]. *Surface Engineering*, 2016, 32(11): 861-870.
- [6] WANG Cheng, HU Jiacheng, GU Zhenbiao, et al. Simulation on Residual Stress of Shot Peening Based on a Symmetrical Cell Model[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(2): 344-351.
- [7] PHAM T Q, KHUN N W, BUTLER D L. New Approach to Estimate Coverage Parameter in 3D FEM Shot Peening Simulation[J]. *Surface Engineering*, 2017, 33(9): 687-695.
- [8] GARIÉPY A, MIAO H Y, LÉVESQUE M. Simulation of the Shot Peening Process with Variable Shot Diameters and Impacting Velocities[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114: 121-133.
- [9] PUROHIT R, VERMA C S, RANA R S, et al. Simulation of Shot Peening Process[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 1244-1251.
- [10] 贺占蜀, 陈雷, 李超, 等. 单丸粒和双丸粒喷丸模型的有限元模拟[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(4): 153-158.
- [11] HE Zhanshu, CHEN Lei, LI Chao, et al. Finite Element Simulation of Single and Double Shot Peening Model[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(4): 153-158.
- [12] FRIJA M, HASSINE T, FATHALLAH R, et al. Finite Element Modelling of Shot Peening Process: Prediction of the Compressive Residual Stresses, the Plastic Deformations and the Surface Integrity[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 426(1/2): 173-180.
- [13] WANG Cheng, WANG Long, WANG Xiaogui, et al. Numerical Study of Grain Refinement Induced by Severe Shot Peening[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 146/147: 280-294.
- [14] HASSANI-GANGARAJ S M, CHO K S, VOIGT H L, et al. Experimental Assessment and Simulation of Surface Nanocrystallization by Severe Shot Peening[J]. *Acta Materialia*, 2015, 97: 105-115.
- [15] GANGARAJ S M H, GUAGLIANO M, FARRAHI G H. An Approach to Relate Shot Peening Finite Element Simulation to the Actual Coverage[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 243: 39-45.
- [16] LIN Qinjie, LIU Huaiju, ZHU Caichao, et al. Effects of Different Shot Peening Parameters on Residual Stress, Surface Roughness and Cell Size[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 398: 126054.
- [17] SHERAFATNIA K, FARRAHI G H, MAHMOUDI A H. Effect of Initial Surface Treatment on Shot Peening Residual Stress Field: Analytical Approach with Experimental Verification[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 137: 171-181.
- [18] 张颖琳, 霍玉鑫, 杨永亮, 等. GH4169高温合金喷丸残余应力有限元分析[J]. *北华航天工业学院学报*, 2024, 34(4): 15-18.

- ZHANG Yinglin, HUO Yuxin, YANG Yongliang, et al. Finite Element Analysis of Residual Stress in Shot Peening of GH4169 Superalloy[J]. *Journal of North China Institute of Aerospace Engineering*, 2024, 34(4): 15-18.
- [18] 陈飞, 王成雨, 李伟刚, 等. Abaqus二次开发在航空弓形结构件喷丸强化模拟中的应用[J]. *计算机辅助工程*, 2020, 29(2): 55-60.
- CHEN Fei, WANG Chengyu, LI Weigang, et al. Application of Abaqus Secondary Development in Shot Peening Strengthening of Aerospace Arc-shaped Frame[J]. *Computer Aided Engineering*, 2020, 29(2): 55-60.
- [19] LIN Qinjie, LIU Huaiju, ZHU Caichao, et al. Investigation on the Effect of Shot Peening Coverage on the Surface Integrity[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 489: 66-72.
- [20] 熊天伦, 鲁录义. FEM-DEM耦合模型在ABAQUS中的实现[C]//中国力学大会-2017暨庆祝中国力学学会成立60周年大会. 北京, 2017: 378-391.
- XIONG Tianlun, LU Luyi. Implementation of the FEM-DEM Coupled Model in ABAQUS[C]//The Chinese Conference on Mechanics 2017 and the 60th Anniversary Celebration of the Chinese Society of Mechanics. Beijing, 2017: 378-391.
- [21] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S M, MAFFEO B, et al. Shot Peening Simulation Using Discrete and Finite Element Methods[J]. *Advances in Engineering Software*, 2010, 41(12): 1266-1276.
- [22] TU Fubin, DELBERGUE D, MIAO Hongyan, et al. A Sequential DEM-FEM Coupling Method for Shot Peening Simulation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 319: 200-212.
- [23] MURUGARATNAM K, UTILI S, PETRINIC N. A Combined DEM - FEM Numerical Method for Shot Peening Parameter Optimisation[J]. *Advances in Engineering Software*, 2015, 79: 13-26.
- [24] HONG T, OOI J Y, SHAW B. A Numerical Simulation to Relate the Shot Peening Parameters to the Induced Residual Stresses[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2008, 15(8): 1097-1110.
- [25] MARINI M, PIONA F, FONTANARI V, et al. A New Challenge in the DEM/FEM Simulation of the Shot Peening Process: The Residual Stress Field at a Sharp Edge[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 169: 105327.
- [26] LIU Y G, LI M Q, LIU H J. Nanostructure and Surface Roughness in the Processed Surface Layer of Ti-6Al-4V via Shot Peening[J]. *Materials Characterization*, 2017, 123: 83-90.
- [27] KLOTZ T, DELBERGUE D, BOCHER P, et al. Surface Characteristics and Fatigue Behavior of Shot Peened Inconel 718[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 110: 10-21.
- [28] WU Daoxia, YAO Changfeng, ZHANG Dinghua. Surface Characterization and Fatigue Evaluation in GH4169 Superalloy: Comparing Results after Finish Turning; Shot Peening and Surface Polishing Treatments[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 113: 222-235.
- [29] WU L H, JIANG C H. Effect of Shot Peening on Residual Stress and Microstructure in the Deformed Layer of Inconel 625[J]. *Materials Transactions*, 2017, 58(2): 164-166.
- [30] PARK J S, YILDIZLI K, DEMIR E, et al. Non-destructive Characterization of Subsurface Residual Stress Fields and Correlation with Microstructural Conditions in a Shot-peened Inconel Component[J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 58(9): 1389-1406.
- [31] 王欣, 王科昌, 罗学昆, 等. 粉末合金FGH95喷丸强化对高温缺口疲劳性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(23): 38-45.
- WANG Xin, WANG Kechang, LUO Xuekun, et al. Effect of Shot-Peening on High-temperature Notched Fatigue Property of FGH95 Powder Metallurgy Superalloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(23): 38-45.
- [32] SALVATI E, LUNT A J G, HEASON C P, et al. An Analysis of Fatigue Failure Mechanisms in an Additively Manufactured and Shot Peened IN 718 Nickel Superalloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 191: 108605.
- [33] WU Lihong, JIANG Chuanhai. Investigation on Surface Layers Characteristics of Pre-stressed Shot Peening Inconel 625[J]. *Materials Transactions*, 2019, 60(12): 2558-2561.
- [34] BUGAYEV A A, GUPTA M C, ORR J, et al. Laser Shot Peening of Inconel 600 and Surface Morphology Characterization[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2004, 850(1): 78-82.
- [35] RAMKUMAR K D, KUMAR P S G, KRISHNA V R, et al. Influence of Laser Peening on the Tensile Strength and Impact Toughness of Dissimilar Welds of Inconel 625 and UNS S32205[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 676: 88-99.
- [36] MORANÇAIS A, FÈVRE M, FRANÇOIS M, et al. Residual Stress Determination in a Shot-peened Nickel-based Single-crystal Superalloy Using X-ray Diffraction[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, 48(6): 1761-1776.
- [37] CHEN Yanhua, JIANG Chuanhai. Effect of Shot Peening on Surface Characteristics of Ni-based Single-crystal Superalloy[J]. *Materials Transactions*, 2013, 54(10): 1894-1897.
- [38] 王琨, 罗学昆, 宋尽霞, 等. 喷丸对DD412单晶高温合金表面完整性和疲劳性能的影响[J]. *材料工程*, 2024, 52(7): 152-161.
- WANG Kun, LUO Xuekun, SONG Jinxia, et al. Effects of Shot Peening on Surface Integrity and Fatigue Properties of DD412 Single Crystal Superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(7): 152-161.
- [39] GILL A S, TELANG A, YE Chang, et al. Localized Plastic Deformation and Hardening in Laser Shock Peened Inconel Alloy 718SPF[J]. *Materials Characterization*, 2018, 142: 15-26.
- [40] 冯帅, 赵秀娟, 陈春焕, 等. GH4169高能喷丸表面纳米化的研究[J]. *新技术新工艺*, 2008(6): 88-90.
- FENG Shuai, ZHAO Xiujuan, CHEN Chunhuan, et al. Research on Surface Nanocrystallization Induced by High Energy Shot Peening GH4169 Superalloy[J]. *New Technology & New Process*, 2008(6): 88-90.
- [41] KUMAR N N, YADAV A C, RAJA K, et al. Study on Effect of Laser Peening on Inconel 718 Produced by DMLS Technique[J]. *SAE Technical Paper 2019-28-0146*, 2019.
- [42] CHAMANFAR A, MONAJATI H, ROSENBAUM A, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Surface and Subsurface Layers in Broached and Shot-peened Inconel-718 Gas Turbine Disc Fir-trees[J]. *Materials Characterization*, 2017, 132: 53-68.
- [43] 朱立华, 肖磊, 郭建政, 等. 喷丸强度对FGH4113A高温合金微观组织的影响及定量表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(7): 2415-2423.
- ZHU Lihua, XIAO Lei, GUO Jianzheng, et al. Effect of Shot Peening Intensity on FGH4113A Superalloy Micro-

- structure and Quantitative Characterization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(7): 2415-2423.
- [44] SUN Yunqi, YAO Changfeng, TAN Liang, et al. Surface Integrity and Fatigue Failure Behavior of Nickel Based Alloy Blades: after Cutting, Vibration Finishing and Shot Peening [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 167: 109034.
- [45] 张宁, 勾睿杰, 姚俊, 等. 基于试件疲劳性能的 Allvac 718Plus 铣削喷丸加工参数优化[J]. *中国表面工程*, 2025, 38(3): 350-360.
- ZHANG Ning, GOU Ruijie, YAO Jun, et al. Optimization of Milling and Shot Peening Parameters for Allvac 718Plus Based on the Fatigue Performance of Specimens [J]. *China Surface Engineering*, 2025, 38(3): 350-360.
- [46] 潘一帆, 刘道新, 刘博, 等. 喷丸与振动光饰复合处理对 GH4169 高温合金疲劳性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(8): 2955-2962.
- PAN Yifan, LIU Daoxin, LIU Bo, et al. Effect of Shot Peening Combined Vibration Finishing on Fatigue Behavior of GH4169 Superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(8): 2955-2962.
- [47] 许春玲, 王欣, 宋颖刚, 等. 喷丸强化对 DD6 单晶合金典型力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2019, 44(增刊1): 634-639.
- XU Chunling, WANG Xin, SONG Yinggang, et al. Effect of Shot Peening on Typical Mechanical Properties of DD6 Single Crystal Superalloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(S1): 634-639.
- [48] 王欣, 杨清, 于鹏, 等. DZ125 定向凝固合金的喷丸工艺[J]. *金属热处理*, 2021, 46(1): 149-153.
- WANG Xin, YANG Qing, YU Peng, et al. Shot Peening Process of Directionally Solidified DZ125 Alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(1): 149-153.
- [49] 王欣, 许春玲, 刘晨光, 等. 喷丸对单晶合金中温疲劳性能的强化机制[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(12): 46-52.
- WANG Xin, XU Chunling, LIU Chenguang, et al. Strengthening Mechanism of Shot-Peening on Medium-temperature Fatigue Property of Single-crystal Superalloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(12): 46-52.
- [50] 王欣, 胡云辉, 王晓峰, 等. 喷丸强化对 FGH96 粉末高温合金疲劳性能应力集中敏感性的影响[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(13): 48-53.
- WANG Xin, HU Yunhui, WANG Xiaofeng, et al. Effect of Shot Peening on Fatigue Performance Stress-concentration Sensitivity of FGH96 Powder Metallurgy Superalloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(13): 48-53.
- [51] 王欣, 胡云辉, 付书红, 等. 喷丸强度对 TC17 及 GH4169 合金表面完整性和高温疲劳性能的影响[J]. *金属热处理*, 2018, 43(1): 67-71.
- WANG Xin, HU Yunhui, FU Shuhong, et al. Effect of Shot Peening Intensity on Surface Integrity and High-temperature Fatigue Performance of TC17 and GH4169 Alloys [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(1): 67-71.
- [52] 胡殿印, 王涛, 杜俊良, 等. GH2787 压气机叶片激光-喷丸复合强化疲劳强度提升方法[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(6): 20240017.
- HU Dianyin, WANG Tao, DU Junliang, et al. Coupled Laser-shot Peening for Fatigue Strength Enhancement Method on GH2787 Compressor Blade [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(6): 20240017.
- [53] 罗学昆, 张文灿, 吴波, 等. 激光冲击/喷丸复合强化对 K4169 铸造合金的表面完整性和疲劳性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(11): 57-62.
- LUO Xuekun, ZHANG Wencan, WU Bo, et al. Effect of Combination of Laser Shock Peening and Shot Peening on Surface Integrity and Fatigue Property of K4169 Casting Alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(11): 57-62.
- [54] 罗学昆, 吴小燕, 王科昌, 等. 表面完整性对 FGH95 合金高温疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(2): 53-60.
- LUO Xuekun, WU Xiaoyan, WANG Kechang, et al. Effect of Surface Integrity Evolution on High-temperature Fatigue Property of FGH95 Alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(2): 53-60.
- [55] KLOTZ T, MIAO H Y, BIANCHETTI C, et al. Analytical Fatigue Life Prediction of Shot Peened Inconel 718 [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 113: 204-221.
- [56] CHEN Z, PENG R L, MOVERARE J, et al. Effect of Cooling and Shot Peening on Residual Stresses and Fatigue Performance of Milled Inconel 718 [J]. *Residual Stresses*, 2016 (2017): 13.
- [57] LIU Xinling, ZHAO Kai, LIU Chunjiang. Fatigue Behavior and Surface Sensitivity of Board-shaped Sample of Powder Metallurgy FGH 96 [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 891/892: 1723-1728.
- [58] GHORASHI M S, FARRAHI G H, MOVAHHEDI M R. Effect of Severe Shot Peening on the Fatigue Life of the Laser-cladded Inconel 718 Specimens [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5): 2619-2631.
- [59] ZHAO Xiaohui, ZHOU Hongyang, LIU Yu. Effect of Shot Peening on the Fatigue Properties of Nickel-based Superalloy GH4169 at High Temperature [J]. *Results in Physics*, 2018, 11: 452-460.
- [60] 吴培松, 张继祥, 周伯谋, 等. 喷丸压力对 GH3535 合金表面状态及疲劳性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(12): 4610-4617.
- WU Peisong, ZHANG Jixiang, ZHOU Bomou, et al. Effect of Shot Peening Pressure on the Surface State and Fatigue Properties of GH3535 Alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(12): 4610-4617.
- [61] 赵辛雨, 田凯, 罗学昆, 等. 喷丸表面完整性对 K4169 合金高温疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(3): 42-48.
- ZHAO Xinyu, TIAN Kai, LUO Xuekun, et al. Effect of Surface Integrity Induced by Shot Peening on High-temperature Fatigue Property of K4169 Alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(3): 42-48.
- [62] 方修洋, 宫健恩, 曹晓英, 等. 喷丸与 CuNiIn 涂层复合处理对高温合金榫试样微动疲劳性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(4): 89-97.
- FANG Xiuyang, GONG Jian'en, CAO Xiaoying, et al. Effect of Shot Peening and CuNiIn Coating Composite Treatment on Fretting Fatigue Properties of Superalloy Tenon Specimens [J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(4): 89-97.
- [63] KHADHRAOUI M, CAO W, CASTEX L, et al. Experimental Investigations and Modelling of Relaxation Behaviour of Shot Peening Residual Stresses at High Temperature for Nickel Base Superalloys [J]. *Materials Science and Technology*, 1997, 13(4): 360-367.
- [64] HOFFMEISTER J, SCHULZE V, HESSERT R, et al. Residual Stresses under Quasi-static and Cyclic Loading in Shot Peened Inconel 718 [J]. *International Journal of Materials Research*, 2012, 103(1): 66-72.

- [65] WU Lihong, JIANG Chuanhai. Effect of Thermal Relaxation on Residual Stress and Microstructure in the Near-surface Layers of Dual Shot Peened Inconel 625[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(10): 1687814018800530.
- [66] TELANG A, GILL A S, MANNAVA S R, et al. Effect of Temperature on Microstructure and Residual Stresses Induced by Surface Treatments in Inconel 718 SPF[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 93-101.
- [67] MEGUID S A, MARICIC L A. Finite Element Modeling of Shot Peening Residual Stress Relaxation in Turbine Disk Assemblies[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2015, 137(3): 031003.
- [68] SEDDIK R, SEDDIK M, ATIG A, et al. Thermo-mechanical Relaxation of Compressive Residual Stresses Induced by Shot Peening[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 2182-2189.
- [69] FOSS B J, GRAY S, HARDY M C, et al. Analysis of Shot-peening and Residual Stress Relaxation in the Nickel-based Superalloy RR1000[J]. Acta Materialia, 2013, 61(7): 2548-2559.
- [70] BUCHANAN D J, JOHN R, BROCKMAN R A. Relaxation of Shot-Peened Residual Stresses under Creep Loading[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2009, 131(3): 031008.
- [71] JOHN R, BUCHANAN D J, CATON M J, et al. Stability of Shot Peen Residual Stresses in IN100 Subjected to Creep and Fatigue Loading [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1887-1893.
- (编辑 陈勇)
-
- 作者简介:**孙蕴齐,男,1994年生,博士研究生。研究方向为整体叶盘多工艺复合加工表面完整性控制。E-mail: yqsun@mail.nwpu.edu.cn。姚倡锋*(通信作者),男,1975年生,教授、博士研究生导师。研究方向为航空发动机关键零部件表面完整性控制及抗疲劳制造。E-mail: chfyao@nwpu.edu.cn。
- 本文引用格式:**
孙蕴齐,姚倡锋,孙换凤,等. 高温合金喷丸工艺表面完整性及其疲劳性能研究进展[J]. 中国机械工程, 2026, 37(2): 315-331.
SUN Yunqi, YAO Changfeng, SUN Huanfeng, et al. Research Progresses of Surface Integrity and Fatigue Performance for High-temperature Alloy Shot Peening Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 315-331.
-
- (上接第 314 页)
- [15] KIM J K, KIM H E, JUNG J Y, et al. Relation between Pressure Variations and Noise in Axial Type Oil Piston Pumps [J]. KSME International Journal, 2004, 18(6): 1019-1025.
- [16] MANDAL N P, SAHA R, SANYAL D. Effects of Flow Inertia Modelling and Valve-plate Geometry on Swash-plate Axial-piston Pump Performance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2012, 226(4): 451-465.
- [17] PETTERSSON M. Design of Fluid Power Piston Pumps: with Special Reference to Noise Reduction [D]. Norrköping: Linköpings Universitet, 1995.
- [18] MANRING N D. Valve-plate Design for an Axial Piston Pump Operating at Low Displacements [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(1): 200-205.
- [19] JIN Dingcan, RUAN Jian, LI Sheng, et al. Modelling and Validation of a Roller-cam Rail Mechanism Used in a 2D Piston Pump [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2019, 20(3): 201-217.
- [20] XING Tong, XU Yezhou, RUAN Jian. Two-dimensional Piston Pump: Principle, Design, and Testing for Aviation Fuel Pumps [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4): 1349-1360.
- [21] 金丁灿, 阮健. 二维燃油泵的设计与研究 [J]. 航空学报, 2019, 40(5): 422730.
JIN Dingcan, RUAN Jian. Design and Research of Two-dimensional Fuel Pump [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(5): 422730.
- [22] WANG Heyuan, DING Chuan, HUANG Yu, et al. Design and Research of 2D Piston Pumps with a Stacked Cone Roller Set [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(5): 2128-2146.
- [23] ZHANG C, ZANG Y, WANG H, et al. Theoretical and Experimental Investigation on the Efficiency of a Novel Roller Piston Pump [J]. Journal of Zhejiang University—Science A, 2023, 24(9): 762-781.
- [24] 叶绍干. 轴向柱塞泵声振特性预测及面向降噪的结构优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
YE Shaogan. Prediction of Vibro-acoustic Characteristics and Structure Optimization for Noise Reduction of Axial Piston Pumps [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [25] LAUNDER B E, SPALDING D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [M] // Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion. Amsterdam: Elsevier, 1983: 96-116.
- [26] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51.
- [27] EDGE K A, JOHNSTON D N. The ‘Secondary Source’ Method for the Measurement of Pump Pressure Ripple Characteristics Part 1: Description of Method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 1990, 204(1): 33-40.
- [28] EDGE K, XIAO S, BURROWS C R, et al. Flow Visualization of Cavitation in a Reciprocating Plunger Pump Using High-speed Cinematography [C] // Fourth Triennial International Symposium on Fluid Control, Fluid Measurement, Fluid Mechanics, Visualization. 1994: 1101-1106.
- (编辑 陈勇)
-
- 作者简介:**张晨晨*(通信作者),女,1996年生,讲师、博士。研究方向为流体传动与控制。E-mail: zhangchenchen@nbut.edu.cn。
- 本文引用格式:**
张晨晨,阮健,李胜. 滚子柱塞泵的流量脉动与出口压力的数值模拟及实验验证 [J]. 中国机械工程, 2026, 37(2): 304-314.
ZHANG Chenchen, RUAN Jian, LI Sheng. Numerical Simulation and Experimental Verification of Flow Pulsation and Outlet Pressure of Roller Piston Pump [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 304-314.