引文格式：魏子佳, 王金栋, 王富, 等. 镍基高温合金拉削表面曲率与微动磨损关联模型[J]. 航空制造技术, 2026, 69(21): 26020062.
WEI Zijia, WANG Jindong, WANG Fu, et al. Correlation model between broaching surface curvature and fretting wear of nickel-based superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(21): 26020062.

镍基高温合金拉削表面曲率与微动磨损关联模型

魏子佳[1]，王金栋[1]，王　富[1]，杨智远[1]，李　珂[2]，谢成胜[1]，张政浩[1]，蔡振兵[2]
（1. 西南交通大学机械工程学院，成都 610031；
2. 西南交通大学摩擦学研究所，成都 610031）

［摘要］ 针对GH4169镍基高温合金曲面构件拉削加工，探究了拉削表面曲率对构件表面完整性及其微动磨损行为的系统影响。通过设计不同曲率的拉刀，结合多组拉削深度开展加工试验，探究曲率半径－拉削深度组合下的表面完整性演化规律。构建以曲率半径和拉削深度为输入、表面完整性为输出的Kriging模型；进一步开展微动磨损试验，将表面完整性参数与曲率因子共同作为输入，构建“曲面结构参数–表面完整性–微动磨损性能”的全链路关联模型。表面完整性模型预测精度R^2=0.90，微动磨损模型预测精度R^2=0.81。曲面曲率的变化一方面导致拉削表面残余应力分布发生改变，另一方面引起微动磨损表面接触形式的改变，两种变化共同影响磨损体积的大小。拉削加工曲面通过曲率半径与不同拉刀齿升量搭配，可实现初期微动磨损体积降低25%~30%的目标。

关键词：GH4169；拉削；微动磨损；Kriging模型；曲面加工
中图分类号：V25；TG57　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.16080/j.issn1671-833x.26020062

Correlation Model Between Broaching Surface Curvature and Fretting Wear of Nickel-Based Superalloy

WEI Zijia[1], WANG Jindong[1], WANG Fu[1], YANG Zhiyuan[1], LI Ke[2], XIE Chengsheng[1],
ZHANG Zhenghao[1], CAI Zhenbing[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[ABSTRACT] This study investigates the systematic effects of broached surface curvature on the surface integrity and corresponding fretting wear behavior of curved GH4169 nickel-based superalloy components during the broaching process. By designing broaching tools with different curvatures and conducting machining experiments under multiple broaching depths, the evolution of surface integrity under various combinations of curvature radius and broaching depth was explored. A Kriging model was established with curvature radius and broaching depth as inputs and surface integrity parameters as outputs. Subsequently, fretting wear tests were performed. Using both the surface integrity parameters and the curvature factor as inputs, a full-chain correlation model linking “curvature surface geometry parameters-surface integrity-fretting wear performance” was developed. The surface integrity model achieves a prediction accuracy of R^2= 0.90, while the fretting wear model attains an accuracy of R^2=0.81. Variations in surface curvature lead, on one hand, to changes in the residual stress distribution on the broached surface, and on the other hand, to alterations in the contact form of the fretting wear surface; both of the changes synergistically affect the wear volume. By appropriately matching the curvature radius with different tooth rise amounts per tooth during the broaching of curved surfaces, an initial reduction in

收稿日期：2026-03-02；**退修日期：**2026-04-09；**录用日期：**2026-04-30
通信作者：王金栋，副教授，博士，研究方向为精密制造与测量。

fretting wear volume of 25%–30% can be achieved.

Keywords: GH4169; Broaching; Fretting wear; Kriging model; Curved surface machining

航空发动机涡轮盘榫头榫槽作为飞行器动力系统的关键承力部件，长期服役于高温、高压等极端工况环境中，多采用GH4169合金精密拉削成形制造[1–4]。该技术因在批量生产条件下能有效平衡加工效率与成形精度，而获得广泛应用[5–7]。拉削加工工艺参数及刀具几何特征决定了已加工表面的完整性状态[8–10]，这些表面完整性参数对涡轮盘榫头榫槽的微动磨损行为产生决定性影响[11–12]，进而制约部件的服役可靠性与寿命[13–15]。因此，系统解析拉削工艺参数与表面完整性指标间的映射关系，并建立此映射关系与微动磨损性能的关联模型，对保障航空发动机高温合金部件的服役性能与寿命具有重要的工程价值[16]。

当前，国内外学者针对加工表面完整性及其对磨损性能的影响已开展了大量研究。Telesman等[17]采用正交试验方法，揭示了拉削参数对表面残余应力分布的影响规律。Thakur等[18]阐明了切削速度通过热力耦合机制主导表面粗糙度形成的作用机理。金洁茹等[19]揭示了热力耦合机制主导GH4169加工时表面完整性的形成。刘维伟等[20]发现，GH4169高速车削中切削速度与进给量对表面粗糙度产生显著交互作用。Yao[21]和Tan[22]等针对复杂构件加工，提出了基于工艺链协同优化的表面形貌调控方法。Wang等[23]系统表征了镍基高温合金加工硬化层与白层演变等表面硬化特征。Chen等[24]的研究证实，切削液技术可有效改善镍基高温合金的已加工表面质量。

表面完整性的工艺遗传特性是连接工件加工过程与工件表面微动磨损性能的“桥梁”。Li等[25]通过有限元模拟揭示了残余应力对材料耐磨性能的强化机制。Li等[26]阐释了GH4169合金单一表面完整性参数影响微动磨损行为的作用机理。然而，大多数研究聚焦平面试样，对于具有曲面特征的涡轮盘榫槽，其拉削表面的性能不仅取决于工艺参数，还受到拉削表面曲率的显著影响[27]，这导致现有的工艺–性能关联模型难以直接应用于真实曲面构件。

对于曲面接触副，曲率直接决定了初始接触应力分布与接触区域几何形式，是影响微动磨损行为的关键因素。在榫槽结构中，接触应力与曲率变化密切相关，并且会影响滑移区的分布与磨损机制的变化[28–29]。在构建预测模型时，现有研究未能将表面完整性多参数与宏观接触条件作为耦合输入，导致模型泛化能力受限，难以指导复杂曲面构件的抗微动磨损工艺设计[30–32]。

鉴于此，本研究以GH4169合金为对象，聚焦拉削表面曲率这一关键几何特征，旨在构建一个考虑曲率半径影响的“曲面结构参数–表面完整性–微动磨损性能”全链路关联模型。通过设计不同曲率拉刀，结合不同拉削深度进行工艺试验，表征不同曲率与深度组合下的表面完整性。引入Kriging模型，建立以拉削表面曲率与拉削深度为输入、表面完整性为输出的预测模型。在加工表面开展微动磨损试验，以磨损体积作为最终的性能评价指标。将表面完整性参数与曲率作为输入，利用Kriging模型建立面向微动磨损体积的预测模型，最后，通过耦合两个模型实现从拉削工艺到最终使役性能的定量关联。本研究旨在揭示曲面拉削加工中几何特征–表面完整性–微动磨损性能的内在关联，为航空发动机涡轮盘榫槽等关键曲面构件的抗磨损设计制造提供新的理论依据与技术途径。

1 试验过程

1.1 拉削刀具设计

为完成不同曲面的加工，设计了一种可以用在加工中心刀柄上的单齿拉刀刀杆及刀片，刀片可按照具体要求进行设计与改制，整体刀杆及所使用的刀片如图1所示。

1.2 拉削加工试验及表征

镍基高温合金GH4169的化学成分如表1所示。试验材料选取轧制GH4169合金板材，通过线切割工艺加

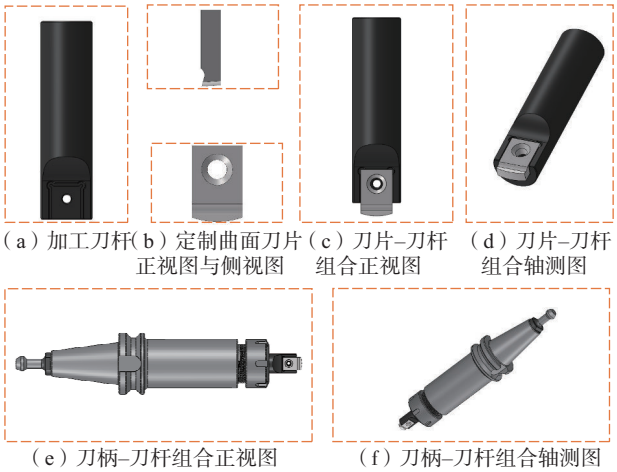


图1 加工刀具设计

Fig.1 Design of machining tool

工制成标准试样（12 mm×10 mm×6 mm）。加工试验在GA–MV850五轴联动高精度立式加工中心进行，其拉削刀具、工件及加工设备如图2所示，所用刀具为图1所示的定制化单齿拉削刀具系统。

采用多维度检测方法系统表征试件的加工表面完整性特征参数，如图3所示。采用X射线衍射法分析试件的残余应力；采用KELITI–000ZB型超显微维氏硬度计测试试件的微观硬度；采用白光干涉仪计算试件的表面粗糙度参数S_a及微动磨损体积。

1.3 微动磨损试验

采用课题组自主研发的切向微动磨损试验装置对GH4169合金的拉削加工表面进行微动磨损试验，试验装置结构示意和试验装置实物分别如图4所示，试验装置的主要技术参数如表2所示，具体试验参数见表3。试验过程中，法向载荷采用砝码分级加载机制，切向位移幅值通过高精度音圈电机实现精确调控。

在室温条件下对曲面拉削加工后的试样进行系统的微动磨损试验。在拉削加工后，将试样表面的完整性参数及表面曲率半径作为关键输入变量建立后续模型，深入揭示拉削加工曲率对材料微动磨损行为的影响机制。

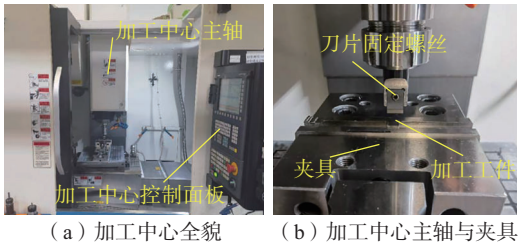
1.4 模型选择

代理模型作为一种数据驱动的数学模型，通过少量

表1 GH4169高温合金化学成分（质量分数）

Table 1 Chemical composition of GH4169 superalloy (mass fraction) %

Al	Si	Ti	Nb	Mo	Cr	Fe	Ni
0.13	0.04	0.58	0.71	0.44	15.05	18.11	余量

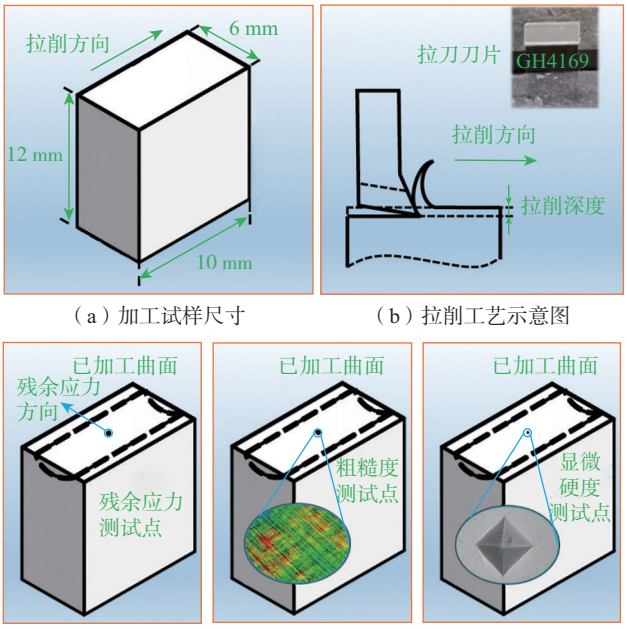


（a）加工中心全貌 （b）加工中心主轴与夹具

（c）加工中心主轴与夹具（放大图） （d）凹曲面刀片（e）凸曲面刀片

图2 拉削刀具、工件与加工设备

Fig.2 Broaching tool, workpiece and machining setup

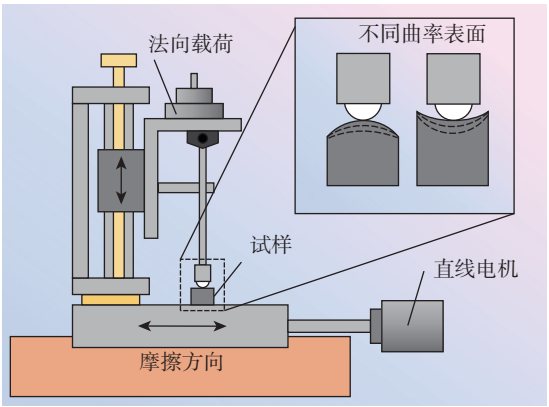


（a）加工试样尺寸 （b）拉削工艺示意图

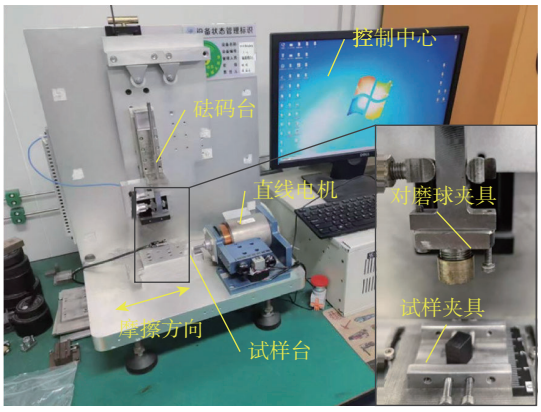
（c）残余应力测量 （d）表面粗糙度测量 （e）微观硬度测量

图3 试件的加工表面完整性检测示意图

Fig.3 Schematic of machining surface integrity characterization of specimen



（a）示意图



（b）实物图

图4 微动磨损试验机的示意图和实物图

Fig.4 Schematic diagram and physical photograph of fretting wear tester

表2　微动磨损设备主要技术参数

Table 2　Main technical specifications of fretting wear testing apparatus

设备总体尺寸/mm	载荷范围/N	切向位移幅值/μm	力传感器分辨率/N	切向力测量范围/N	位移分辨率/μm	最大运行频率/Hz
400×400×600	10~100	5~500	≤0.2	≥100	≤1	50

样本点逼近输入变量与输出响应之间的映射关系，可在保证计算精度的前提下大幅提升优化效率。目前，广泛应用于工程设计领域的代理模型主要有多项式响应面模型（RSM）、Kriging模型、径向基函数（RBF）和神经网络（NN）等。RSM采用低阶多项式进行全局拟合，难以精确通过样本点且对强非线性的适应能力弱；RBF具有非线性插值能力，但缺乏概率框架和参数优化准则；NN通常需要大量训练数据以防止过拟合。相比之下，Kriging模型具有精确插值、非线性自适应、小样本鲁棒等优势，因此本文选用Kriging模型建立曲率参数与表面完整性及微动磨损性能之间的映射关系。

Kriging模型假设输出响应y与输入参数$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}}$之间存在如下关系：

$$y(\boldsymbol{X})=\mu+Z(\boldsymbol{X}) \tag{1}$$

式中，μ为全局趋势项（常数）；$Z(\boldsymbol{X})$是均值为0、方差为σ^2的平稳高斯过程，其协方差由相关函数$R(\boldsymbol{X}_i,\boldsymbol{X}_j)$决定。本研究选用高斯相关函数，其表达式为

$$R(\boldsymbol{X}_i,\boldsymbol{X}_j)=\exp\left[-\sum_{k=1}^{n}\theta_k\,(x_{i,k}-x_{j,k})^2\right] \tag{2}$$

式中，n为输入变量维度；θ_k为待估计的超参数，通过极大似然法确定。

2　表面完整性关联模型

2.1　拉削加工与模型构建

为涵盖不同曲率半径的拉削曲面特征，共设计加工了10把单齿拉刀刀片，包括曲面半径分别为10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm的外凸圆弧与内凹圆弧刀片各一把。试验选取拉削深度0.02 mm、0.04 mm和0.06 mm 3个水平，采用全因素试验设计，共形成30组加工参数组合。在此基础上开展拉削试验，获取不同曲率与深度组合下的表面完整性样本。加工试验参数如表4所示，所有试验均在拉削速度40 mm/s、单次拉削的条件下完成。试验结果用于分析拉削表面曲率和拉削深度对表面完整性特征参数的主效应及交互效应，为后续Kriging模型的构建提供数据支撑。

利用上述试验获取的表面完整性数据构建Kriging模型，该模型可输出每个预测点的预测方差（MSE），用以量化预测不确定性。对于凸曲面表面完整性参数，在

表3　微动磨损试验参数

Table 3　Fretting wear testing parameters

法向力	位移幅值	循环次数	频率
10 N	100 μm	1×10^4	5 Hz

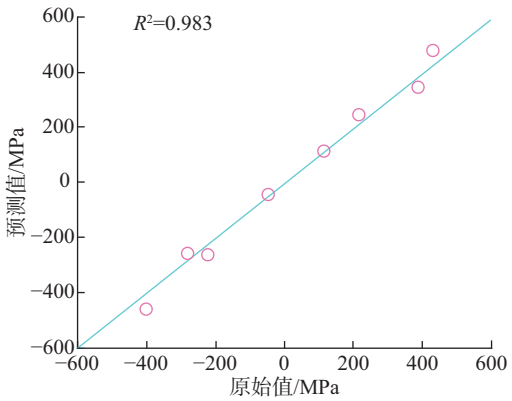
表4　拉削加工参数

Table 4　Broaching process parameters

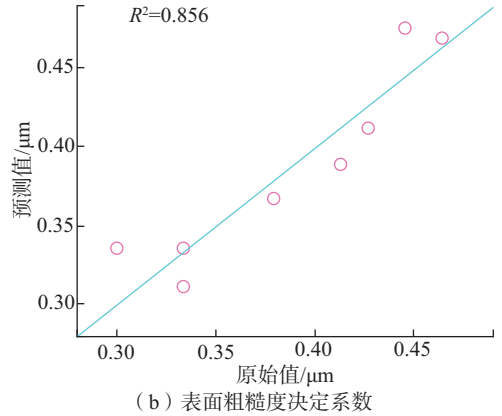
序号	拉削深度/mm	拉削速度/（mm·s^{-1}）	凹曲面半径/mm	凸曲面半径/mm
1	0.02	40	10	无
2	0.04	40	10	无
3	0.06	40	10	无
		⋮		
28	0.02	40	无	50
29	0.04	40	无	50
30	0.06	40	无	50

整个预测空间内，残余应力的最大MSE为17774.8 MPa^2，粗糙度的最大MSE为0.00224 μm^2，硬度的最大MSE为437.8HV^2，分别仅占对应训练数据方差的29.7%、31.5%和37.0%。对于凹曲面表面完整性参数，残余应力、粗糙度、硬度的最大MSE分别占训练数据方差的比例为48.4%、77.8%和48.3%。上述最大值均出现在参数空间的边界或样本稀疏区域，而训练数据点附近的MSE趋近于0。即使在缺少样本点的区域，模型估计的方差仍明显小于训练数据的整体波动，验证了Kriging模型不确定性估计的合理性与可控性。

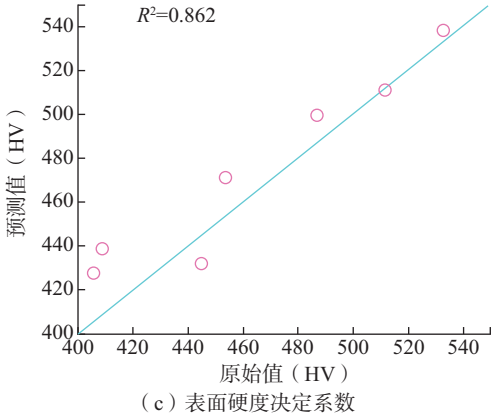
同时，为确保Kriging模型的准确性，选取8组不属于原抽样点的参数进行加工试验，进一步计算均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）以评价模型的确定性预测精度。对于凸曲面表面完整性参数，残余应力的RMSE为37.47 MPa，MAE为32.32 MPa；粗糙度的RMSE为0.02107 μm，MAE为0.01791 μm；硬度的RMSE为17.90HV，MAE为15.51HV。选用该模型常用的决定系数R^2与最大相对误差评估模型精度，所得结果如图5所示，R^2下限为0.8，最大相对误差上限为20%。多指标综合评价表明所建立的Kriging模型具有良好的预测精度与泛化能力，能够满足表面完整性参数定量预



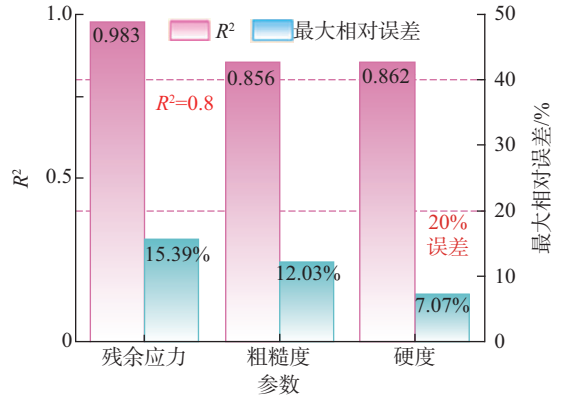
（a）表面残余应力决定系数



（b）表面粗糙度决定系数



（c）表面硬度决定系数



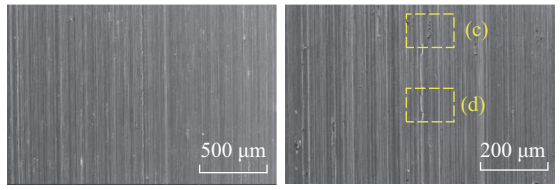
（d）R^2与最大相对误差对比

图5　响应模型误差

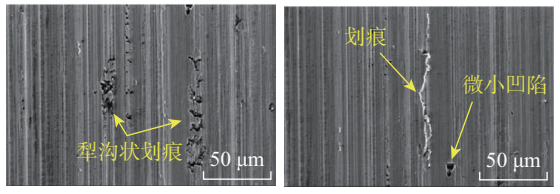
Fig.5　Error analysis of the response model

测的要求。

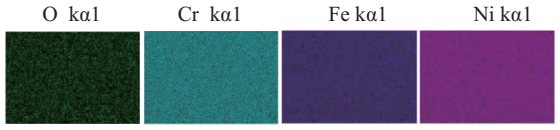
不同曲率拉削加工表面的微观形貌呈现出显著差异。图6和7分别为凹曲面与凸曲面在拉削速度40 mm/s、拉削深度0.04 mm条件下的扫描电镜（SEM）照片及面元素分布。两种曲率表面的主要元素含量（O、Cr、Fe、Ni）未见显著差异。凹曲面由于几何约束较



（a）凹曲面SEM照片（×200）（b）凹曲面SEM照片（×500）



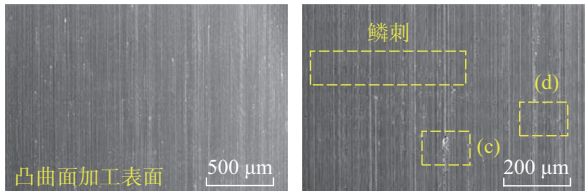
（c）凹曲面划痕部位SEM照片（×2000）　（d）凹曲面划痕及凹陷部位SEM照片（×2000）



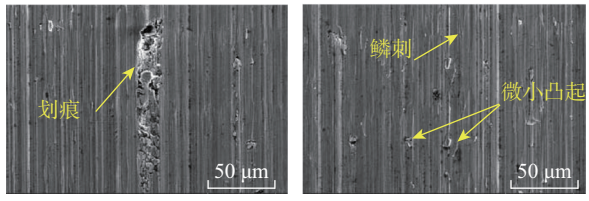
（e）主要元素面分布图

图6　凹曲面拉削加工表面微观缺陷及元素变化

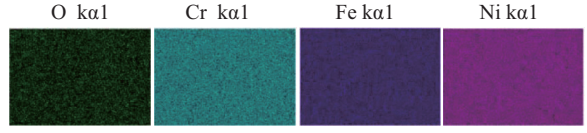
Fig.6　Surface micro-defects and elemental variations of concave curved surfaces after broaching



（a）凸曲面SEM照片（×200）（b）凸曲面SEM照片（×500）



（c）凸曲面划痕部位SEM照片（×2000）　（d）凸曲面鳞刺及凸起部位SEM照片（×2000）



（e）主要元素面分布图

图7　凸曲面拉削加工表面微观缺陷及元素变化

Fig.7　Surface micro-defects and elemental variations of convex curved surfaces after broaching

强，切屑排出阻力大，易产生划痕与凹坑缺陷，凸曲面因接触应力集中，更易诱发鳞刺与塑性突起。上述微观形貌特征的变化对拉削加工表面的微动磨损性能具有直接影响。

2.2 加工曲率对表面残余应力的影响

基于Kriging模型构建了拉削加工表面完整性的响应曲面，图8系统展示了在拉削表面曲率半径与拉削的深度耦合作用下，凹曲面与凸曲面残余应力的空间分布特征。在GH4169的加工过程中，机械塑性变形倾向诱发表层压应力，而热输入增强则促进拉应力形成，二者的竞争关系决定最终应力符号与大小[33–34]。对比凹凸两类曲面的残余应力分布（图8(a)和(b)）可知，凹曲面条件下残余应力主要受曲率半径主导，深度影响相对较弱；凸曲面条件下曲率与深度呈现出更强的交互耦合作用，残余应力对二者都很敏感，非线性特征更显著。以拉削深度0.04 mm为界，凹曲面与凸曲面的残余应力分别呈现整体下降与小范围波动两种不同的变化规律。上述差异源于凹凸曲面在拉削过程中热力载荷边界条件的不同，凹曲面几何约束较强，塑性流动受限，残余应力以热应力为主；凸曲面因接触应力集中，机械载荷效应更突出。在GH4169热–力耦合有限元研究及多参数耦合下残余应力响应特征的研究中也存在类似结果[34–35]。

2.3 加工曲率对表面粗糙度的影响

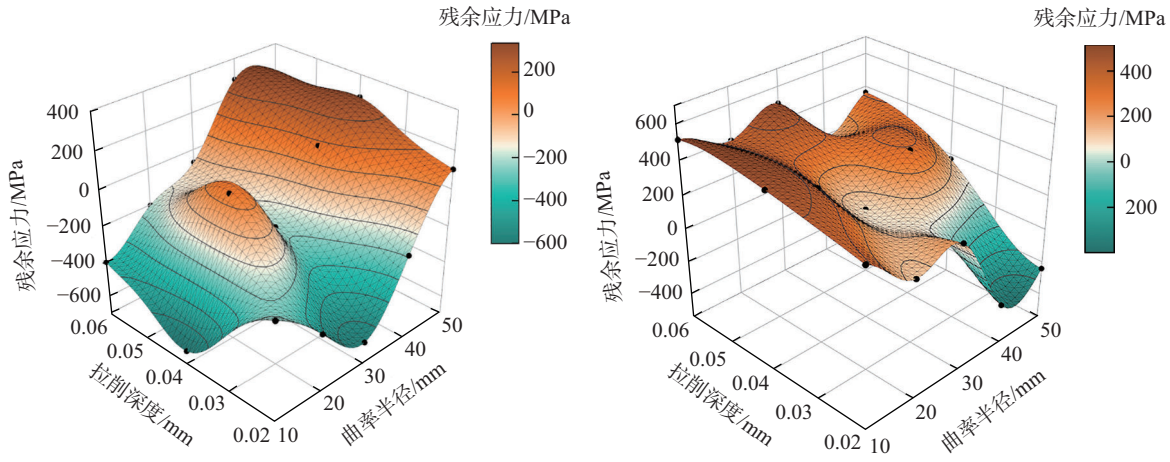
图9为基于Kriging模型构建的粗糙度响应曲面，展示了曲率半径与拉削深度耦合作用下凹曲面与凸曲面粗糙度的分布特征。凹曲面条件下粗糙度的响应更为敏感，凸面整体波动较小，仅在大于0.04 mm加工深度的特定组合下出现局部峰值（图9(a)）。凹曲面几何约束较强，切屑排出阻力大，易造成已加工表面的二次划伤与缺陷，导致粗糙度波动剧烈。Liu等[36]指出，当切削深度接近临界尺度时，表层易出现塑性堆积与微裂纹，这种效应在大曲率区域更为显著。凸曲面区域接触应力集中，在较大切削负荷下易形成鳞刺与塑性隆起，产生局部粗糙度峰值（图9(b)）。此类表面形貌特征将协同残余应力影响试件的微动磨损性能[37]。

2.4 加工曲率对表面硬度的影响

图10为基于Kriging模型构建的显微硬度响应曲面，展示曲率半径与拉削深度耦合作用下凹曲面与凸曲面硬度的分布特征。凹曲面条件下硬度变化相对集中（图10(a)），存在较为连续的强化区域。凸曲面条件下表现出更显著的差异性（图10(b)），以拉削深度0.04 mm为界，随加工半径增大，凸曲面的响应曲面产生单峰、多峰两种变化。在切削过程中，GH4169合金的表层显微硬度受等效塑性应变与热输入耦合作用控制[38]，当刀具与工件接触区域受均匀几何约束时，应变场分布趋于均匀，加工硬化层厚度和硬度梯度变化较为平缓。在曲率较大的表面区域，接触应力集中和材料侧向流动增强，导致试件的局部塑性变形程度增加，从而形成显著的硬度差异[39]。随着切削深度增加，热软化影响增强，使得试件的硬度分布趋于稳定[40]。凹凸曲面的显微硬度分布差异可归因于几何曲率及热–力耦合效应的协同调控作用。

3 微动磨损性能关联模型

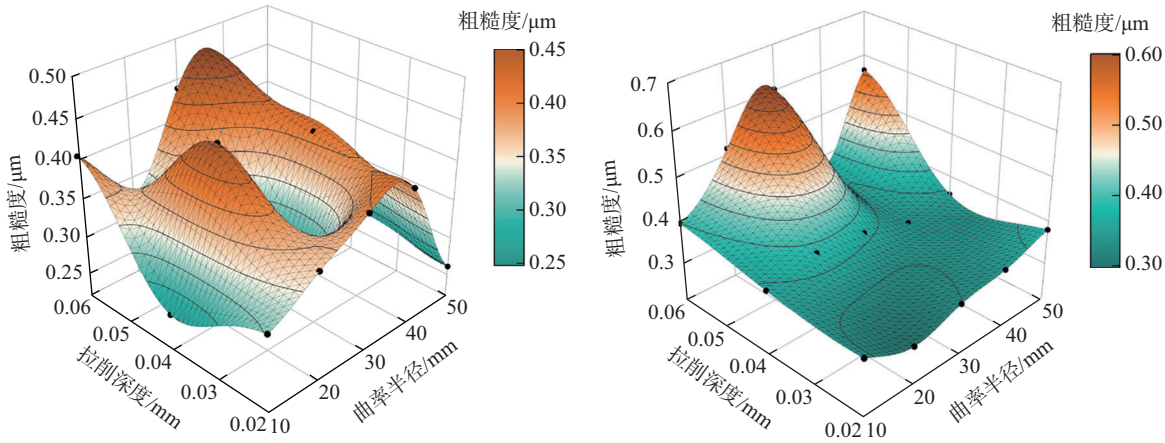
基于前述30组拉削试验样本开展微动磨损试验，以磨损体积作为性能评价指标。将拉削加工曲面曲率与完整性参数作为输入变量，微动磨损体积作为输出响应，构建Kriging模型，建立表面完整性与微动磨损性能的定量映射关系。



（a）凹曲面残余应力响应面　　（b）凸曲面残余应力响应面

图8 残余应力的Kriging模型响应曲面图

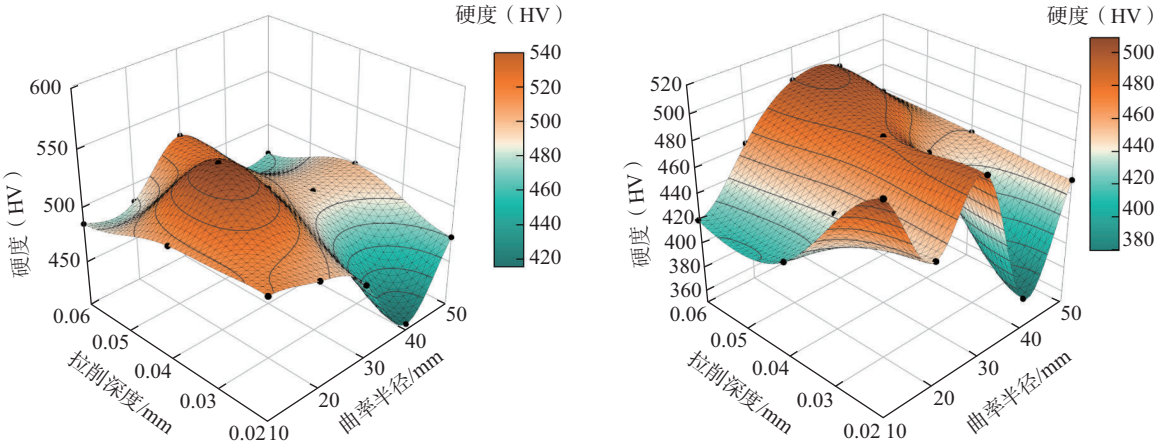
Fig.8 Response surface plots of Kriging model for residual stress



（a）凹曲面粗糙度响应面　　（b）凸曲面粗糙度响应面

图9　粗糙度的Kriging模型响应曲面图

Fig.9　Response surface plots of Kriging model for surface roughness



（a）凹曲面硬度响应面　　（b）凸曲面硬度响应面

图10　显微硬度的Kriging模型响应曲面图

Fig.10　Response surface plots of Kriging model for surface microhardness

3.1　模型构建与验证

拉削加工后，试件的完整性参数与微动磨损体积结果如表5所示。

对于磨损体积的Kriging模型，在整个输入参数空间内，凸曲面的最大MSE为2.47×10^7 μm^6，凹曲面的最大MSE为8.83×10^7 μm^6，对应的训练数据方差分别为2.48×10^7 μm^{6}和9.39×10^7 μm^6，计算得到最大MSE占训练数据方差的比例：凸曲面为99.6%，凹曲面为94.0%。最大值均出现在输入空间的边界或数据稀疏区域，而训练样本点附近的MSE趋近于0。由于表面完整性参数在样本空间内随机分布，所以会存在样本点较为稀疏的区域。磨损体积Kriging模型在部分样本点稀疏区域的不确定性接近训练数据的整体波动水平，模型的不确定性估计仍处于可控范围内，未出现严重发散。

基于独立测试集计算磨损体积预测的RMSE和MAE分别为707.21 μm^{3}和629.38 μm^3，同时模型决定系数R^2=0.81，最大相对误差为3.79%。响应目标的R^2大于0.80，最大相对误差小于20%，表明模型的确定性预测精度较高，符合精度检验目标。

3.2　曲率与表面完整性对微动磨损性能的影响

图11和12为不同曲率半径及拉削深度组合下，凹凸曲面微动磨损表面的白光干涉形貌。由图11可知，凹曲面曲率半径对曲面微动磨损区域的几何形态具有显著影响。在10 mm的大曲率条件下，磨损区域呈现“左右窄、上下宽”的椭圆形态，沿对磨球往复运动方向的尺寸较小；随曲率半径增大，曲率减小，磨损区域接近平面微动磨损特征，呈现“左右宽、上下窄”的椭圆形态。由图12可知，凸曲面各条件下的磨损区域内部均接近

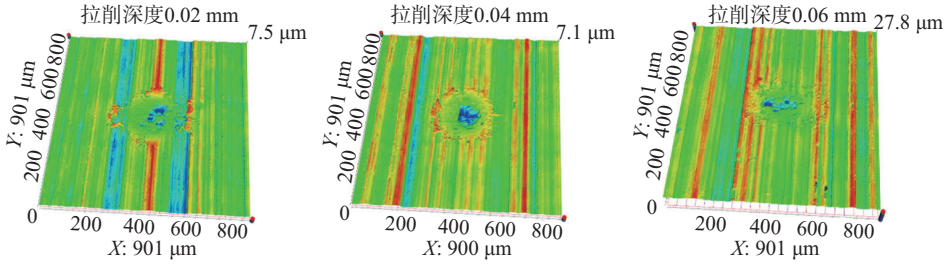
正圆形，但磨屑堆积位置的分布存在差异。

在固定其他工艺参数的条件下，分别分析单一表面完整性参数与加工半径对微动磨损体积的协同影响。图13和14分别为凹曲面和凸曲面磨损体积随表面完整性参数及加工半径变化的响应曲面，揭示了各因素间的协同作用规律。由图13(a)可知，在固定硬度和粗糙度条件下，磨损体积主要受残余应力调控，加工半径的整体影响较小。图13(b)为磨损体积随粗糙度与加工半径的变化，整体分布特征与图13(a)相似，加工半径同样在粗糙度0.30~0.35 μm区间内产生较大影响，对其他区域的影响有限。由图13(c)可知，磨损体积随硬度与加工半径的变化趋势与图13(a)和(b)所示趋势存在一定差异，但加工半径的影响规律基本一致，在硬度450HV~550HV区间内加工半径的影响显著，而在其他区间的影响较小，磨损体积整体随硬度增大先减小后增大。上述结果说明，在凹曲面条件下，加工半径并不直接决定磨损体积，而是主要在表面完整性状态的特定参数区间内对磨损行为产生调控作用。

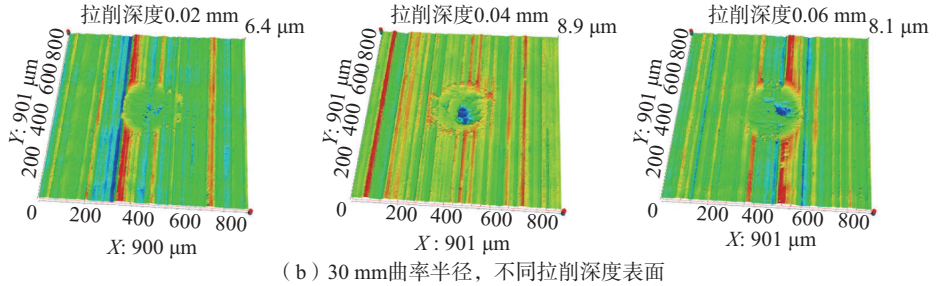
表5　表面完整性与微动磨损体积

Table 5　Surface integrity parameters and corresponding fretting wear volume

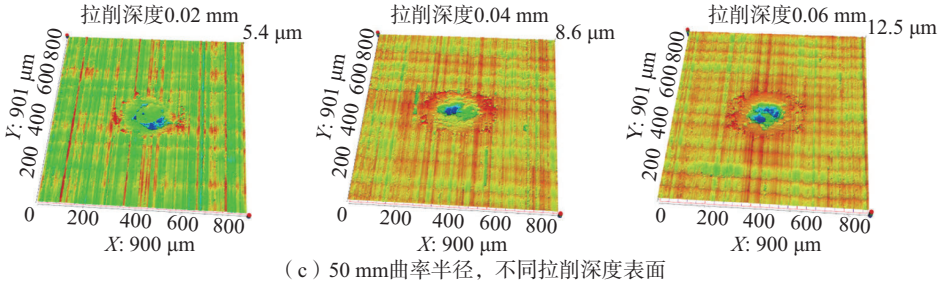
序号	凹曲面半径/mm	拉削深度/mm	凸曲面半径/mm	残余应力/MPa	S_a/μm	硬度(HV)	磨损体积/μm^3
1	10	0.02	无	−165.65	0.320	514.9	28814
2	10	0.04	无	−627.9	0.268	509	27134
3	10	0.06	无	−403.25	0.405	484.35	30810
⋮							
28	无	0.02	50	−241.95	0.379	450.25	34723
29	无	0.04	50	171.45	0.356	454.5	32720
30	无	0.06	50	362.25	0.564	458.1	36593



（a）10 mm曲率半径，不同拉削深度表面



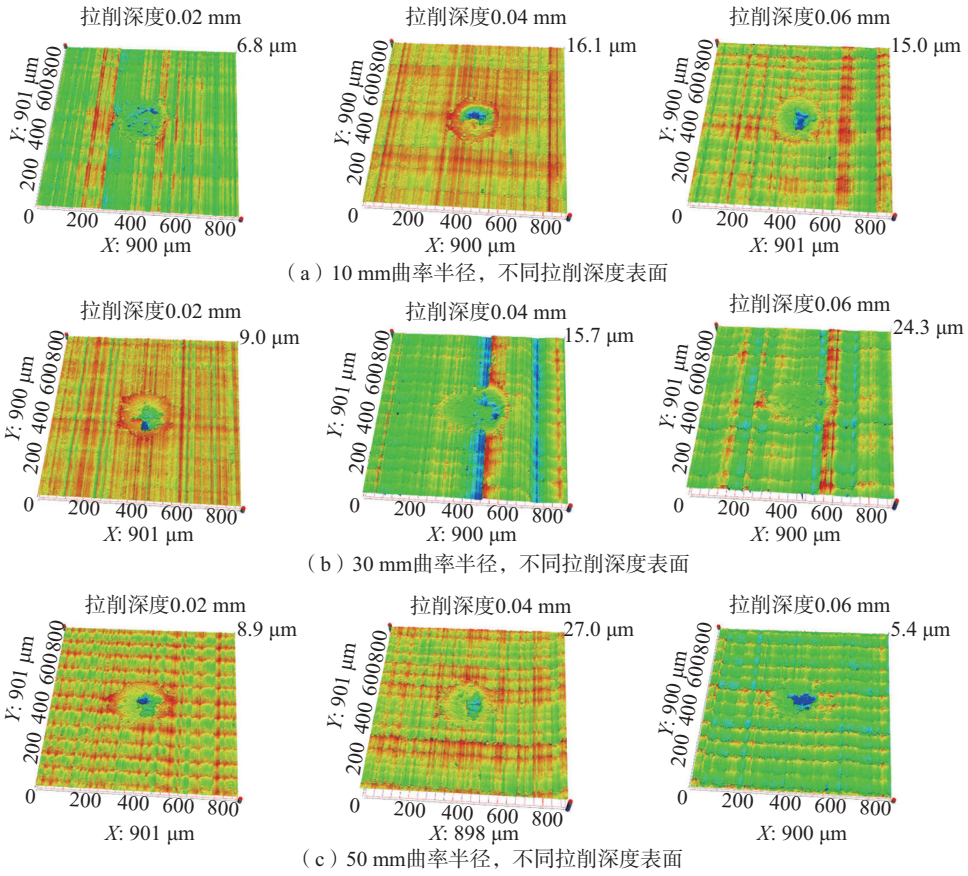
（b）30 mm曲率半径，不同拉削深度表面



（c）50 mm曲率半径，不同拉削深度表面

图11　凹曲面拉削微动磨损表面白光干涉图

Fig.11　White light interferometry images of fretting wear surfaces on concave broached surfaces



（a）10 mm曲率半径，不同拉削深度表面

（b）30 mm曲率半径，不同拉削深度表面

（c）50 mm曲率半径，不同拉削深度表面

图12　凸曲面拉削微动磨损表面白光干涉图

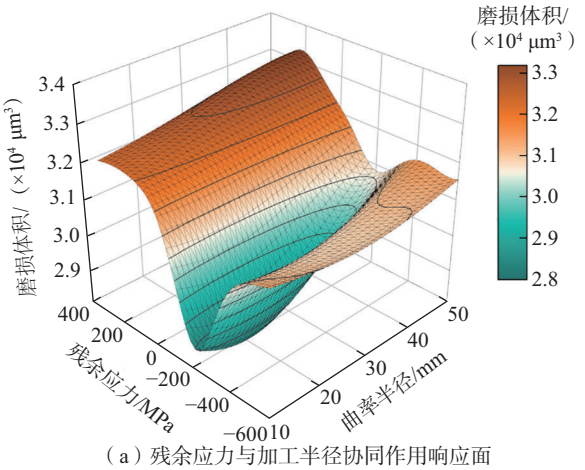
Fig.12　White light interferometry images of fretting wear surfaces on convex broached surfaces

由图14可知，在凸曲面条件下，3组响应曲面均出现更明显的局部峰值或谷值，说明凸曲面微动磨损对加工半径更敏感。图14(a)中，在加工半径15 mm、残余应力约400 MPa处形成明显的微动磨损体积谷值，并随加工半径增加逐渐增大，残余应力200~600 MPa区间为加工半径影响较大的区域。图14(b)中，在加工半径50 mm、粗糙度0.35~0.40 μm处出现磨损体积极大值，并向四周逐渐递减，粗糙度0.32~0.40 μm区间为加工半径影响较大区域，其余区间磨损体积变化平缓。图14(c)中，在加工半径30 mm、硬度约490HV处出现磨损体积极大值，并向两侧递减；硬度大于450HV时加工半径的影响显著，磨损体积随半径增大先增后减。尽管3组曲面的极值位置不同，但共同特征在于，在凸曲面条件下，加工半径将显著改变表面完整性参数对磨损体积的作用强度，从而导致局部极值的出现。

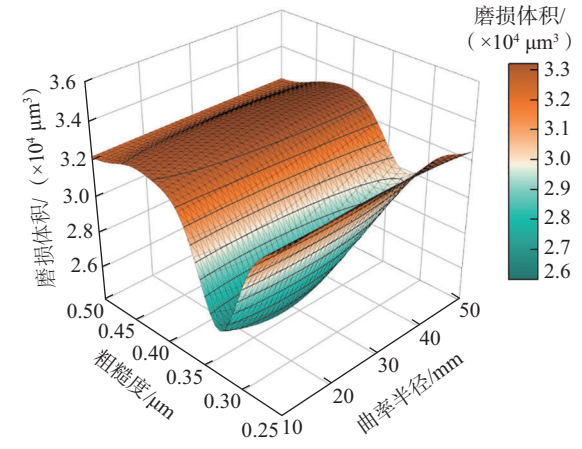
上述结果表明，GH4169合金的微动磨损行为本质上受表面完整性参数与曲率几何特征的耦合调控，这种调控作用在凹曲面与凸曲面条件下的表现不同。从已有研究可知，残余应力对微动损伤具有主导作用，尤其是表层残余压应力，能够延缓裂纹萌生并降低磨损体积，而拉应力则加速表层材料剥落[41]。因此，当残余应力位于特定参数区间时，加工半径对接触应力分布的影响会被显著放大，从而形成明显的极值区域。粗糙度与显微硬度通过改变真实的加工接触面积和局部塑性变形能力，进一步影响微动磨损机制。另有研究指出，表层加工硬化能够提高抗微动损伤能力，但过高硬度导致脆性剥落的风险增大[42]；曲率半径改变了接触应力集中程度及应力梯度分布，不同曲面状态下的应力场重分布机制存在差异[43]。因此，图13和14反映的并非单一因素的线性作用规律，而是曲率与表面完整性参数的协同作用机制。凹曲面条件下，加工半径呈弱“敏感性”，其作用局限于特定参数区间；凸曲面条件下，加工半径与表面完整性参数协同作用明显，二者主导形成了微动磨损体积的局部峰谷变化。在工程应用中，曲面半径的变化主要在于改变接触状态及表层应力分布，从而影响表面完整性参数对微动磨损体积的作用强度。因此，在设计加工中应协同考虑曲率与加工参数的配合，获得更优的残余应力、粗糙度和硬度组合，以实现微动磨损性能的改善。

3.3　曲率半径–微动磨损耦合模型集成搭建与分析

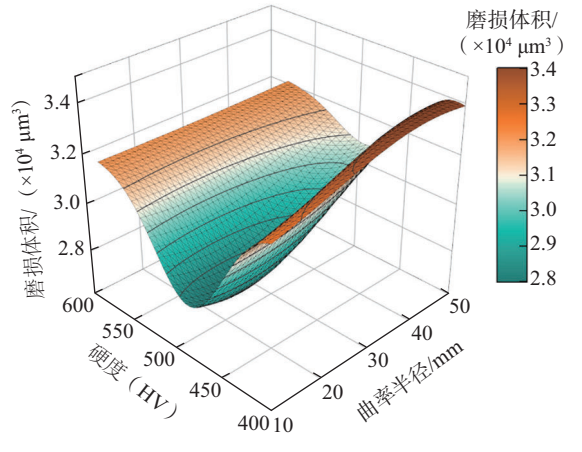
基于多维度建模思想，建立以表面完整性为纽带的曲率半径与微动磨损全链路关联模型，将第1个模型的



（a）残余应力与加工半径协同作用响应面



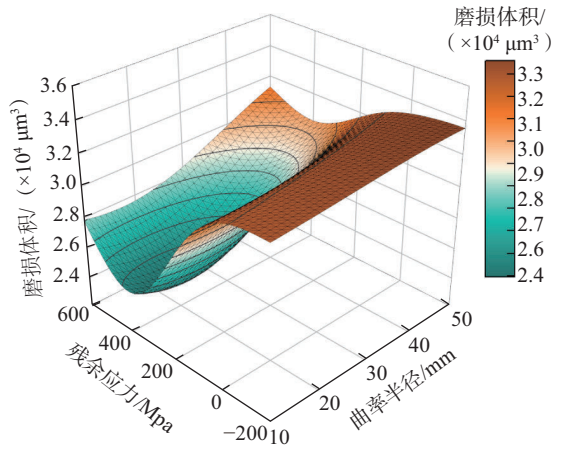
（b）粗糙度与加工半径协同作用响应面



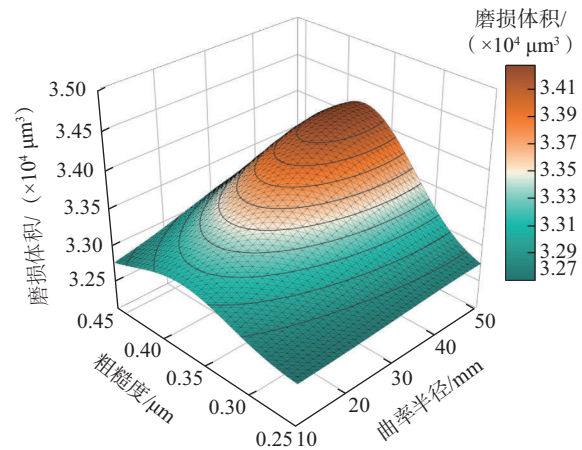
（c）硬度与加工半径协同作用响应面

图13　凹曲面磨损体积随表面完整性与加工半径变化的响应曲面图

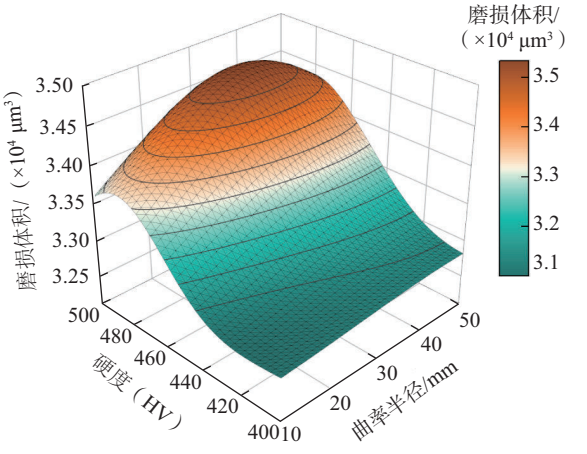
Fig.13　Response surface plots of wear volume on concave surfaces as a function of surface integrity parameters and curvature radius



（a）残余应力与加工半径协同作用响应面



（b）粗糙度与加工半径协同作用响应面

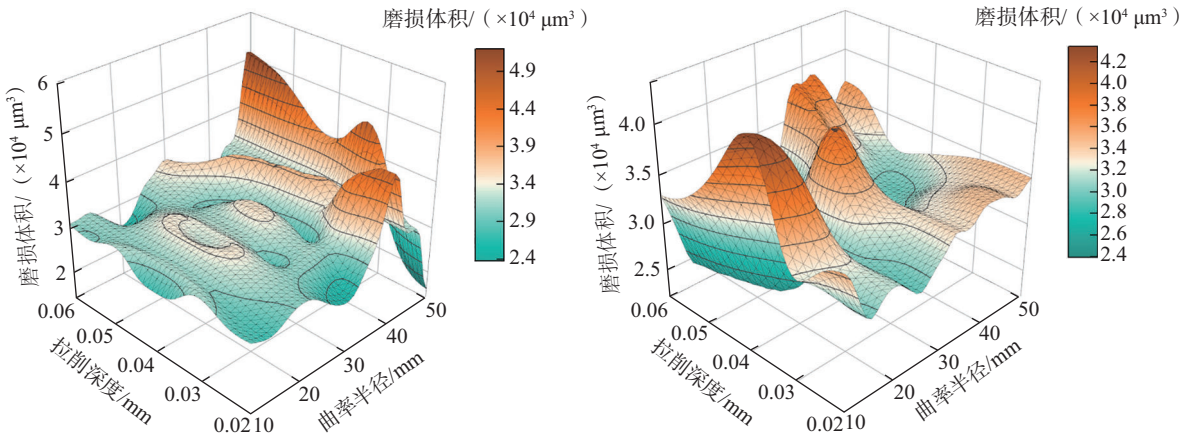


（c）硬度与加工半径协同作用响应面

图14　凸曲面磨损体积随表面完整性与加工半径变化响应曲面图

Fig.14　Response surface plots of wear volume on convex surfaces as a function of surface integrity parameters and curvature radius

输出作为第2个模型的输入，完成拉削加工参数输入到微动磨损体积输出的模型搭建。此方法将结构参数、表面状态及服役性能进行串联表征，相较于传统直接输入/输出的黑箱式预测模型，能够更清晰地揭示曲率与加工参数如何通过表面完整性参数传递并影响磨损行为，为航空发动机关键部件的工艺优化提供理论指导。



（a）凹曲面磨损体积响应面　　（b）凸曲面磨损体积响应面

图15　磨损体积全链路关联模型响应曲面图

Fig.15　Response surface plots of the full-chain correlation model for wear volume

图15为联立后得到的全链路关联模型响应曲面，直接表征了拉削深度与加工半径耦合作用下凹凸曲面的磨损体积变化规律。所示响应曲面为两级模型联立后的综合结果，其变化规律并非单一因素作用下的单调响应，而是曲率半径和拉削深度首先影响表面完整性，再由表面完整性协同曲率进一步作用于微动磨损体积的传递结果。

由图15(a)可知，凹曲面磨损体积响应曲面整体波动范围较小，多参数组合下的磨损体积维持在相对稳定的范围内，仅在大加工半径条件下出现局部极值区域。在加工半径10~35 mm区间内，磨损体积呈波浪形小范围波动，波动幅度约为0.5×10⁴ μm³，表明该参数区域内曲率与拉削深度变化对磨损性能的影响有限。当加工半径增至35 mm以上，响应面局部起伏明显增强，在加工半径40~50 mm附近出现若干峰值和谷值，大半径条件下拉削深度对表面完整性的影响更容易传递并放大到磨损响应中。上述分析表明，凹曲面大部分参数区域内的磨损体积变化较平缓，仅在边界参数组合下出现局部高敏感区域。

由图15(b)可知，凸曲面磨损体积的响应曲面呈现更明显的多峰响应特征，说明凸曲面条件下拉削深度与加工半径之间存在更强的耦合作用。在加工半径较小的区域内，磨损体积出现峰谷交替分布，表明凸曲面对参数变化具有更高敏感性；随着加工半径增大，响应面中持续出现多个局部极大值和极小值，敏感区域并不局限于边界参数范围，而是分布于更宽的参数区域。与凹曲面相比，凸曲面全链路关联模型中局部极值更多、波动范围更广，其微动磨损性能更容易受到曲率与拉削深度的影响。与凹曲面不同，凸曲面不具有大范围稳定的参数区间，其响应曲面呈现对参数变化广泛敏感、并伴有多个局部峰谷分布的特点。

对比可知，凹曲面在大多数参数组合下具有较好的磨损性能，高微动磨损体积主要集中于大半径与特定拉削深度组合形成的区域内；凸曲面则对拉削深度和加工半径的协同变化更敏感，高磨损体积区域分布更广。结果表明，曲面构件的抗微动磨损设计加工不能将结构曲率与加工参数割裂考虑，而应将二者作为协同设计对象。在设计阶段，应结合构件曲率特征识别高磨损区域；在加工阶段，应在既定曲率条件下，通过合理选择拉削深度避开高磨损加工参数，从而实现表面完整性与服役性能的协同优化。通过整体拉刀齿升量（拉削深度）与曲率半径的协同匹配，可实现凹曲面初期微动磨损体积降低约30%，凸曲面初期微动磨损体积降低约25%。

4　结论

通过设计不同曲率半径与拉削深度的拉削试验，结合Kriging模型与微动磨损试验，系统揭示了拉削表面曲率对GH4169镍基高温合金表面完整性及其微动磨损性能的影响机制，构建了“曲面结构参数–表面完整性–微动磨损性能”的全链路关联模型，主要结论如下。

(1)曲面曲率通过改变拉削过程中的热力载荷边界条件，影响表面完整性参数的空间分布特征。凹曲面表面完整性呈现以曲率半径为主导的渐变分布，凸曲面表面完整性表现为曲率与加工深度耦合作用下的分区变化特征。

(2)曲率半径对微动磨损形貌与磨屑堆积行为具有显著调控作用。表面完整性参数与曲率半径的协同作用分析表明，凹曲面条件下磨损体积主要受残余应力调控，加工半径影响局限于特定参数区间，凸曲面条件下各参数影响规律不同，分别在不同参数组合处形成极值

区域。

（3）基于全链路关联模型的磨损体积预测结果表明，在不同曲率条件下，通过协调拉刀齿升量（拉削深度）等加工参数，可使GH4169合金试件的初期微动磨损体积降低25%~30%。该模型能够为曲面构件设计参数与加工参数的协同优化提供参考。

本研究提出的考虑曲率效应的多级关联建模方法，突破了传统平面试件研究的局限性，通过引入曲面几何特征作为关键输入变量，实现了曲面拉削到微动磨损性能的全流程定量表征与预测，为航空发动机涡轮盘榫槽等复杂曲面构件的抗磨损设计制造提供了理论依据与工艺设计基础；所建立的全链路关联模型验证了其在有限样本下的确定性预测能力，后续研究可进一步利用该模型提供的预测方差进行不确定性量化与主动学习采样，以继续提升精度并指导关键区域的工艺优化与试验设计。

参 考 文 献

[1] Agazhanov A S, Samoshkin D A, Kozlovskii Y M. Thermophysical properties of Inconel 718 alloy[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1382(1): 012175.

[2] De Bartolomeis A, Newman S T, Jawahir I S, et al. Future research directions in the machining of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117260.

[3] 李承昊. 航空发动机用高温合金材料的应用及发展情况[J]. 中国战略新兴产业, 2017(44): 60.

Li Chenghao. Application and development of superalloy materials for aero-engines[J]. China Strategic Emerging Industry, 2017(44): 60.

[4] Arrazola P J, Rech J, M'Saoubi R, et al. Broaching: Cutting tools and machine tools for manufacturing high quality features in components[J]. CIRP Annals, 2020, 69(2): 554–577.

[5] Zha X M, Chen F B, Jiang F, et al. Correlation of the fatigue impact resistance of bilayer and nanolayered PVD coatings with their cutting performance in machining Ti6Al4V[J]. Ceramics International, 2019, 45(12): 14704–14717.

[6] Mo S P, Axinte D A, Hyde T H, et al. An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(3): 382–389.

[7] 李晨熙, 何恩球, 白俊峰, 等. 镍基高温合金材料加工工艺方法现状与发展趋势[J]. 机电工程技术, 2025, 54(24): 7–13.

Li Chenxi, He Enqiu, Bai Junfeng, et al. Current status and development trends of processing methods for nickel-based superalloy materials[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54 (24): 7–13.

[8] Lla Monaca A, Murray J W, Liao Z R, et al. Surface integrity in metal machining — Part II: Functional performance[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 164: 103718.

[9] Choi Y. Effects of cutting speed on surface integrity and fatigue performance of hard machined surfaces[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(1): 139–146.

[10] Liao Z R, la Monaca A, Murray J, et al. Surface integrity in metal machining — Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 162: 103687.

[11] Li Y L, Qiao L J, Dang X F, et al. Surface integrity evolution and fretting wear improvement of DD6 single-crystal superalloy via laser shock peening and laser shock peening without coating[J]. Metals, 2025, 15(8): 889.

[12] Sharman A R C, Hughes J I, Ridgway K. An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718™ when turning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(3): 359–367.

[13] 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.

[14] 赖建华, 王石莉, 刘嘉, 等. GH4169涡轮盘榫槽电解拉削仿真及其试验研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2024, 56 (1): 44–54.

Lai Jianhua, Wang Shili, Liu Jia, et al. Simulation and experimental study on electrochemical broaching of GH4169 turbine disk slot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2024, 56(1): 44–54.

[15] 徐岩, 张川. 拉刀设计对航空发动机涡轮盘榫槽型面的影响[J]. 航空制造技术, 2010, 53(15): 50–52.

Xu Yan, Zhang Chuan. Influence of broach design on aeroengine turbine disk fir tree groove[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(15): 50–52.

[16] M'Saoubi R, Axinte D, Soo S L, et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 557–580.

[17] Telesman J, Gabb T P, Kantzos P T, et al. Effect of broaching machining parameters, residual stresses and cold work on fatigue life of Ni-based turbine disk P/M alloy at 650 ℃[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 150: 106328.

[18] Thakur D G, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning[J]. Materials & Design, 2009, 30(5): 1718–1725.

[19] 金洁茹, 张显程, 涂善东, 等. 车削速度对GH4169加工表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 108–113.

Jin Jieru, Zhang Xiancheng, Tu Shandong, et al. Effects of cutting speed on machining surface integrity of GH4169[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 108–113.

[20] 刘维伟, 李晓燕, 万旭生, 等. GH4169高速车削参数对加工表面完整性影响研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(8): 1093–1097.

Liu Weiwei, Li Xiaoyan, Wan Xusheng, et al. The effects of turning parameters on machining surface integrity in high speed turning GH4169[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(8): 1093–1097.

[21] Yao C F, Wu D X, Jin Q C, et al. Influence of high-speed

milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 650–660.

[22] Tan L, Yao C F, Zhang D H, et al. Evolution of surface integrity and fatigue properties after milling, polishing, and shot peening of TC17 alloy blades[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136: 105630.

[23] Wang B, Liu Z Q, Cai Y K, et al. Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 166: 103744.

[24] Chen S Q, Yan P, Zhu J Y, et al. Effect of cutting fluid on machined surface integrity and corrosion property of nickel based superalloy[J]. Materials, 2023, 16(2): 843.

[25] Li L, Kang L, Ma S Y, et al. Finite element analysis of fretting wear considering variable coefficient of friction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(5): 758–768.

[26] Li K, Chen B W, Luo Y F, et al. Physical-data-driven fretting wear rate prediction model for GH4169 alloy milling surfaces[J]. Wear, 2025, 566: 205797.

[27] Yuan Y B, Zhao G, Zhao X Y, et al. Contact stress prediction and fretting wear measurement of aeronautic crowned involute splines[J]. Tribology International, 2024, 193: 109407.

[28] Fang X Y, Wang Z, Abdel Wahab M, et al. Fretting wear mechanism of GH4169 dovetail joint specimens treated with hybrid laser shock peening[J]. Tribology International, 2025, 209: 110740.

[29] Almeida G M J, Cardoso R A, Chassaing G, et al. Fretting fatigue of Inconel 718 at room and elevated temperatures considering both constant and cyclic normal contact loads[J]. Tribology International, 2023, 183: 108382.

[30] Wang J C, Yao L, Zheng X Y, et al. Finite element analysis of fretting fatigue properties of GH4169 superalloy considering the surface treatments[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 183: 108266.

[31] Xiao G J, Chen B Q, Li S C, et al. Surface integrity and fatigue performance of GH4169 superalloy using abrasive belt grinding[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106764.

[32] Yao J, Li X, Du B R, et al. Research status of influence mechanism of surface integrity on fatigue behavior of metal workpieces: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(7): 3401–3419.

[33] Umbrello D. Investigation of surface integrity in dry machining of Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9): 2183–2190.

[34] Outeiro J C, Umbrello D, M'Saoubi R, et al. Evaluation of present numerical models for predicting metal cutting performance and residual stresses[J]. Machining Science and Technology, 2015, 19(2): 183–216.

[35] Feng J B, Liu X P, Li Z Y, et al. Optimization of cutting parameters and simulation study for outer diameter turning of nickel-based superalloy GH4169[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026, 35(3): 2993–3011.

[36] Liu W G, Meng Z, Ni J, et al. Investigation on the microstructural evolution of machined surface for broaching GH4169 under critical State[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2026, 142(7): 4145–4157.

[37] Liu S S, Yang Z H, Zeng Q F, et al. Fretting operating behavior and damage mechanism evolution of GH4169 superalloy at high temperature[J]. Tribology International, 2026, 216: 111568.

[38] Pawade R S, Joshi S S, Brahmankar P K. Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(1): 15–28.

[39] Fabián Pérez-Salinas C, Fernández-Lucio P, del Olmo A, et al. The influence of cutting edge microgeometry on the broaching of Inconel 718 slots[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2023, 48: 101563.

[40] Lu X H, Jia Z Y, Wang H, et al. The effect of cutting parameters on micro-hardness and the prediction of Vickers hardness based on a response surface methodology for micro-milling Inconel 718[J]. Measurement, 2019, 140: 56–62.

[41] Luo Y F, Li K, Wei Z J, et al. Effect of milling on fretting wear performance of GH4169 superalloy[J]. Materials Today Communications, 2025, 44: 111845.

[42] Akhtar W, Sun J F, Chen W Y. Effect of machining parameters on surface integrity in high speed milling of super alloy GH4169/Inconel 718[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(5): 620–627.

[43] Li X, Guan C M, Zhao P. Influences of milling and grinding on machined surface roughness and fatigue behavior of GH4169 superalloy workpieces[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(6): 1399–1405.

（责编 向阳）