

# 难加工金属材料切削表面完整性预测与调控

刘战强<sup>1,2,4</sup> 赵永耀<sup>1,2,3\*</sup> 王兵<sup>1,2</sup> 赵金富<sup>1,2</sup> 刘安南<sup>1,3</sup> 姚龙旭<sup>1,3</sup>

1. 山东大学机械工程学院, 济南, 250061

2. 山东大学金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室, 济南, 250061

3. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南, 250061

4. 山东大学机电与信息工程学院, 威海, 264209

**摘要:** 切削表面完整性是已加工表面层几何、物理、化学和机械性能的综合体现, 由切削过程中的力热载荷及材料去除模式调控, 直接影响零部件产品服役性能及寿命, 深入研究调控策略对切削表面完整性的影响机制, 是实现高完整性表面加工的基础, 对优化难加工金属材料的切削工艺具有重要意义。从几何特征、微观组织结构和表面层力学特性的角度对难加工金属材料切削表面完整性指标进行分类, 综述切削表面完整性预测模型建立的方法。阐述难加工金属材料切削表面完整性调控方法的研究进展, 比较刀具优化、工艺优化、多能场辅助加工和预处理等对切削表面完整性的影响机制差异。对切削表面完整性预测模型的机制以及调控策略的通用性进行探讨, 展望切削表面完整性未来研究重点。

**关键词:** 难加工金属; 已加工表面完整性分类; 表面完整性预测模型; 表面完整性调控策略

**中图分类号:** TG506

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Prediction and Conditioning of Surface Integrity for Cutting Difficult-to-machine Metallic Materials

LIU Zhanqiang<sup>1,2,4</sup> ZHAO Yongyao<sup>1,2,3\*</sup> WANG Bing<sup>1,2</sup> ZHAO Jinfu<sup>1,2</sup> LIU Annan<sup>1,3</sup>  
YAO Longxu<sup>1,3</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, 250061

2. State Key Laboratory for High-end Equipment and Advanced Technology of Metal Forming, Shandong University, Jinan, 250061

3. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan, 250061

4. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong University, Weihai, Shandong, 264209

**Abstract:** Machined surface integrity, a composite reflection of the geometric, physical, chemical, and mechanical properties of the machined surface layers, is dictated by the thermo-mechanics loads and material removal modes inherent to the cutting processes. This integrity directly governed the in-service performance and lifespan of engineered components. A thorough investigation into how conditioning strategies influenced surface integrity was therefore fundamental to realize high-integrity surfaces, and was critically important for optimizing the machining of difficult-to-cut metallic materials. This review began by categorizing the metrics of machined surface integrity for these materials based on three aspects: geometric features, microstructural evolution, and surface-layer mechanical properties, while also summarizing the approaches for developing predictive models. Subsequently, it elucidated research advancements in machined surface integrity conditioning strategies of difficult-to-cut metallic materials, critically comparing the distinct influence mechanisms of tool and process optimization, multi-energy field assisted machining, and workpiece pre-treatment on machined surface integrity. Finally, this paper explored the prediction accuracy of current models and the general applicability of conditioning strategies, offering an outlook on future research priorities.

**Key words:** difficult-to-cut metal; classification of machined surface integrity; surface integrity prediction model; surface integrity control strategy

### 0 引言

表面完整性定义为通过机械加工过程或表面

生成操作产生的表面固有或增强状态<sup>[1]</sup>。表面完整性不仅包括加工工件表面的几何特征, 还涉及表面和亚表面的微观结构演变与力学特性。典型的表面完整性包括塑性变形、微裂纹、相变、硬度变化、与积屑瘤形成有关的撕裂和叠层、残余应力分布等<sup>[2]</sup>。表面完整性涵盖多个概念, 可分类如

收稿日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(92360311); 山东大学公共技术平台仪器设备能力提升项目(ts20230104)

下:①几何特征,如表面粗糙度、表面缺陷;②微观组织结构演变,如晶粒细化、相变;③表面力学特性,如残余应力、应变硬化<sup>[3]</sup>。

金属切削加工表面具有不同尺度的几何特征,加工表面的凹凸形貌导致局部应力集中与温度梯度;形貌凹槽底部与凸峰处切削力集中引起强烈塑性变形,同时摩擦热在形貌凸峰处积累形成非均匀温度场。力-热耦合作用使表层金属产生差异化晶格畸变与位错密度分布,为晶粒细化与固态相变提供条件。晶粒细化现象导致纳米或亚微米级晶粒形成,同时致使位错密度急剧上升,形成硬化层。相变层与硬化层弹塑性差异进一步导致表面与基体产生梯度应力场,形成加工残余应力。表面完整性特征形成几何特征驱动微观组织结构演化,微观组织结构演化决定表层力学特性的关系。现代机械工程,尤其是航空航天、汽车和国防等前沿领域,广泛应用钛合金<sup>[4]</sup>、镍基高温合金<sup>[5]</sup>等难加工金属材料。与传统的金属材料相比,难加工金属材料通常表现出更高的强度、更高的硬化系数以及更低的热导率<sup>[6]</sup>。高强度与高硬化系数导致刀-工界面剪切力集中,产生严重的塑性变形,进而形成应变硬化层,并转化为残余应力。低热导率使得材料在切削时热量难以迅速消散,大量集中于工件表面,导致表面区域温度急剧升高,促进白层产生与相变发生。这些特性导致材料加工难度较大,严重影响切削表面完整性。

切削表面完整性直接影响产品的疲劳强度、耐腐蚀性能和抗磨损能力,决定产品服役性能<sup>[7]</sup>。其中,表面粗糙度不佳会引起应力集中,在循环载荷作用下加速疲劳裂纹的萌生与扩展;而加工诱导的晶粒细化效应能有效减小晶粒尺寸,提高材料的耐腐蚀能力,并显著改善零件的耐磨性能。由此可见,切削表面完整性不仅影响工件的加工质量,还对产品服役性能与服役寿命起决定性作用,因此,深入研究难加工金属切削表面完整性具有重要的理论与工程应用价值。

本文从加工表面宏观几何特征、微观组织演化和表面力学性能的角度综述表面完整性预测建模研究进展;围绕表面完整性调控方法阐明刀具优化、工艺优化、多能场辅助加工和表面预处理等技术对加工表面的调控机制;对切削表面完整性预测模型和调控技术的未来发展和重点研究方向进行了展望。

## 1 切削表面完整性预测模型

### 1.1 已加工表面层几何特征建模方法

在宏观层面,表面完整性研究主要聚焦于已加工表面几何特征。表面轮廓是已加工表面几何特征的重要体现,其形成可从运动学、动力学以及几何学角度分析。运动学方面,刀具与工件相对运动形成表面轮廓,通过分析相对运动轨迹可实现对表面轮廓的建模<sup>[8]</sup>。动力学在运动学之外引入切削力、振动、机床刚性等因素,这些因素影响加工表面轮廓的形态。几何学基于工具与工件几何特性,通过刀具几何参数实现对表面轮廓的分析<sup>[8]</sup>。

表面粗糙度作为表征表面轮廓的核心参数,已被广泛用于评价切削表面的质量和性能。已有大量学者开展构建已加工表面几何特征预测模型的研究。预测表面粗糙度所用建模方法通常为基于物理模型的解析建模与数值建模、基于经验模型的实验建模以及混合方法建模。

加工表面任意位置的表面粗糙度是刀具运动轨迹、机床振动等因素共同作用下形成的轮廓在该位置叠加干涉的结果<sup>[8]</sup>,如图1所示。通过解析刀具切削运动轨迹及其振动特性等因素的数学模型,可实现金属切削加工表面粗糙度预测。计算表面轮廓的核心为刀具轨迹方程,其次考虑刀具振动、刀具轮廓等问题。BOUGHARRIOU等<sup>[9]</sup>采用解析建模方法,考虑切削参数、刀具几何形状、工件和刀具材料以及振动现象预测车削表面粗糙度。该研究在模型中引入轴向和径向误差,

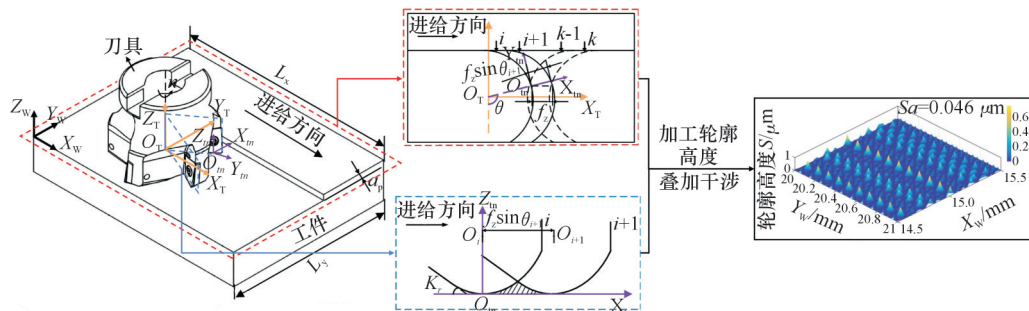


图1 切削过程表面粗糙度形成机制<sup>[8]</sup>

Fig.1 Formation mechanism of surface roughness in milling process<sup>[8]</sup>

考虑刀具初始位置以及刀具振动引起的误差,在不同加工条件下,计算由刀具几何参数影响的轨迹方程,最终得到表面粗糙度。SONG等<sup>[10]</sup>创新性地考虑当前加工的前一步工序对当前已加工表面的影响,采用数值建模方法建立两步铣削加工表面粗糙度预测模型。该研究将前一步加工产生的加工硬化层对切削过程的影响转换为对切削力的影响,提出变力系数切削力模型并建立了刀具运动轨迹方程,将切削力模型与轨迹方程结合仿真,建立表面粗糙度预测模型。

除表面粗糙度的解析建模方法外,基于实验数据的多元回归数据分析建模方法同样可以建立工艺参数-表面粗糙度映射关系<sup>[11]</sup>,但预测结果缺乏机理支撑。ALAUDDIN等<sup>[12]</sup>建立了一阶与二阶模型预测端铣镍基高温合金的表面粗糙度,研究基于响应面法进行实验,采用线性回归处理数据,建立了切削速度、进给速度与表面粗糙度的关系方程。MANSOUR等<sup>[13]</sup>采用相似的方法建立EN32M渗碳钢的一阶与二阶模型。

近年来,随着人工智能技术的发展,机器学习方法逐渐应用于建立表面粗糙度预测模型。机器学习通常与实验相结合,构建表面粗糙度与切削速度、进给速度等加工参数的映射关系,根据多种加工参数建立不同的表面粗糙度预测模型。SUDHEER KUMAR VARMA等<sup>[14]</sup>设计全因子实验,采用神经网络和自适应神经模糊推理系统方法,基于切削速度、切削深度和进给速度等输入参数,预测 Inconel 800 合金表面粗糙度。SVALINA等<sup>[15]</sup>提出自适应神经模糊推理系统(ANFIS),构建主轴转速、每齿进给量和切削深度与平均表面粗糙度  $Ra$  的关系,预测表面粗糙度。然而,考虑加工参数的机器学习方法需要大量数据进行训练,依赖于预先定义参数集,缺乏灵活性与适应性,同时,不当的参数设置会导致结果偏差,影响预测精度<sup>[16]</sup>。为进一步提高预测精度,提出了结合图像处理的机器学习方法(图2<sup>[16-18]</sup>)。JOSHI等<sup>[19]</sup>采用基于机器视觉的机器学习方法,通过含反向传播的多层反馈人工神经网络和特征选择技术,将表面粗糙度与基于视觉的纹理参数进行拟合,实现对加工表面粗糙度的预测。LIU等<sup>[20]</sup>提出基于红、绿颜色空间的彩色分布统计矩阵,研究响应重叠度指标与表面粗糙度的关系,建立基于彩色图像重叠度的表面粗糙度预测模型。深度学习在快速发展中展现出强大的特征提取与端到端学习能力,在预测表面粗糙度方面表现出

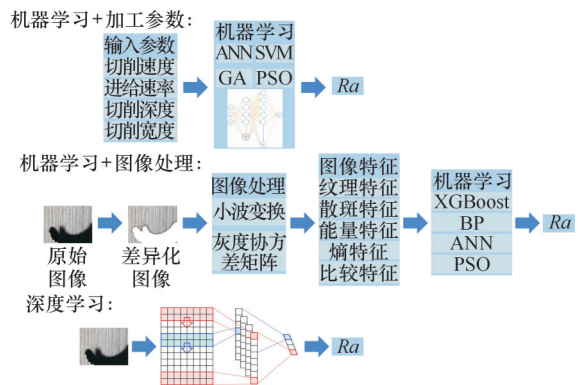


图2 预测表面粗糙度的人工智能方法<sup>[16-18]</sup>

Fig.2 Artificial intelligence method for predicting surface roughness<sup>[16-18]</sup>

独特优势。深度学习通过构建自动学习高级特征的深度神经网络,可对表面粗糙度进行准确预测。ZENG等<sup>[17]</sup>提出基于物理深度学习的铣削表面粗糙度预测模型,构建物理引导的损失函数指导深度学习训练过程,以卷积神经网络-门控循环单元模型为铣削表面粗糙度预测主要模型,同时引入双向门控循环单元和多头自注意机制以增强数据相关性。

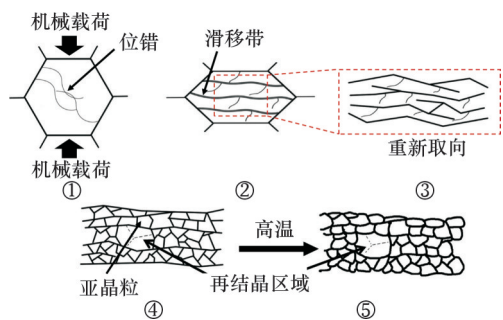
基于物理的解析建模与数值建模从原理角度预测加工表面粗糙度,通过分析刀具与工件的相对运动轨迹方程得到表面粗糙度。该方法基于表面轮廓形成原理,方便理解表面粗糙度形成原因。但该方法建模计算复杂,耗时较长。基于实验数据的多元回归数据分析建模方法在实验给出的条件下通常准确度较高,但超出实验范围后准确度无法保证。结合人工智能的混合建模方法准确度更高,可用于更复杂的非线性问题,但该方法中模型开发较为复杂,耗时较长。

### 1.2 已加工表面层微观组织结构演化建模方法

基于加工表面几何特征,进一步从微观角度探讨切削表面完整性。加工表面微观组织结构演化是微观角度下表面完整性的具体体现,包括晶粒细化现象与相变。

#### 1.2.1 切削表面晶粒细化建模方法

加工中应变导致原始晶粒位错变形形成亚晶粒,随着应变增大,亚晶粒发生旋转增大取向差角,最后大应力导致大量再结晶晶粒生成,发生晶粒细化现象<sup>[21]</sup>。DING等<sup>[22]</sup>通过模型描述应变和应变率较大时的晶粒细化机制,如图3所示。在该模型中晶粒细化分为5个步骤:①原始晶粒因机械载荷发生位错;②原始晶粒通过滑移带或位错沿剪切方向变形或拉长;③晶粒内部重新取向;④原始晶粒被位错壁或滑移带分割为细长的亚晶

图3 晶粒细化机制<sup>[22]</sup>Fig.3 Grain refinement mechanism<sup>[22]</sup>

粒;⑤若温度足够高,则发生动态再结晶。

通过构建工艺参数(如切削速度、切削深度等)与晶粒细化之间的关系,建立基于实验数据的晶粒细化预测模型。然而,该方法需要大量实验积累,成本较高,也无法给出晶粒细化具体的演变过程<sup>[23]</sup>。数值建模方法基于基础的材料物理本质,能够在显著降低实验成本的同时实现对晶粒细化现象的高精度预测。因此,数值建模方法现阶段被广泛应用于建立晶粒细化预测模型。

材料本构模型是模拟切削作用下材料变形和剪切去除响应的核心部分,直接影响模拟准确与适用性,因此,针对具体材料特性或加工条件改进本构模型是提高模型反应能力的重要手段。IMBROGNO等<sup>[24]</sup>提出一种基于物理的本构模型,假设宏观流动应力由长程、短程以及晶粒尺寸(霍尔-佩奇效应)共同组成,他们在有限元(FE)软件中采用改进的本构模型进行基于有限元物理的正交切削模拟,采用镍基高温合金正交切削实验验证模型准确性,结果表明,模型预测晶粒细化层深度与实验结果较为吻合,晶粒细化层形貌与实验结果基本一致,该模型可从晶粒细化层深度与形貌方面准确预测晶粒细化现象。YANG等<sup>[25]</sup>基于有限元模拟的时间离散特性,提出JMAK模型增量形式,构建可用于动态加载条件下的JMAK模型。

在FE方法中,微观组织预测模型通常采用简化处理以降低计算复杂度。尽管简化模型能够实现位错密度与晶粒尺寸分布的预测,但难以准确描述微观组织演化过程。为更全面地模拟微观组织演变行为,元胞自动机(cellular automaton, CA)方法被提出。在CA方法中,同时考虑位错密度与动态再结晶(DRX)过程。MECKING等<sup>[26]</sup>提出CA中常用位错密度演化模型之一的KM模型,具体如下:

$$\frac{d\rho_{i,j}}{d\varepsilon} = k_1\sqrt{\rho_{i,j}} - k_2\rho_{i,j} \quad (1)$$

式中: $\rho_{i,j}$ 为位错密度, $i,j$ 用于区分不同滑移系与晶粒; $k_1$ 为加工硬化系数; $k_2$ 为动态软化系数。

GOETZ等<sup>[27]</sup>提出CA方法中对DRX建立模型分为两步:①创建初始微观结构;②晶胞到达临界位错密度时,开始DRX过程。

连续动态再结晶(CDRX)与非连续动态再结晶(DDRX)是DRX的两个机制。DDRX的形成基于以晶粒位错密度差异为驱动力的边界迁移行为,迁移率取决于变形温度。高应变速率和非高温条件无法为DDRX形核机制提供足够的时间,此时以CDRX为主要机制<sup>[28]</sup>。同时,在部分难加工材料(如Ti6Al4V)切削过程中,CDRX被证实为主要晶粒细化机制<sup>[29]</sup>。因此,仅考虑DDRX行为的CA方法在高应变速率和大变形高速加工情况下存在局限性。ZHANG等<sup>[30]</sup>采用基于CDRX与DDRX混合机制的CA方法预测晶粒细化现象。然而该方法简化了CDRX模型,忽视了亚晶粒的旋转过程。LIU等<sup>[28]</sup>在上述建立的框架基础上,提出基于物理的CDRX改进CA模型,研究将每个晶粒分为3个亚晶粒,当亚晶粒的取向差由于位错增加到 $\theta_c$ 时,该亚晶粒转变为再结晶晶粒;当再结晶晶界的迁移距离超过一个晶胞的边长时,该晶胞有一定概率变为其相邻晶胞之一。该模型用于预测Ti6Al4V加工晶粒细化现象,可准确预测平均晶粒尺寸。

对于FE与CA方法的耦合,通常使用FE软件模拟切削过程,得到温度、应变等参数。将FE模拟输出参数作为CA方法输入参数导入CA模型进行计算,最终得到预测模型。YAO等<sup>[31]</sup>将FE与CA方法耦合,采用FE方法预测温度和应变分布,再输入CA模型中计算位错密度分配,最终得到高热磨削和剧烈塑性变形条件下40Cr材料的晶粒细化预测模型。XU等<sup>[32]</sup>发现FE模拟在宏观展示不同区域晶粒尺寸上效果更好,CA方法则更好地展示了某一点的微观组织形貌。因此将FE模拟晶粒细化结果与CA方法预测晶粒细化结果结合,对高速加工Ti6Al4V晶粒细化进行多尺度预测。LIU等<sup>[21]</sup>通过FE模拟应变、应变率、温度场和位错密度,将模拟输出参数输入CA模型更新晶粒尺寸与取向,并且该研究在FE和CA中使用同一种模型描述材料行为,减小因使用不同材料模型导致的误差。类似地,DUAN等<sup>[33]</sup>将FE模拟得到的物理场数据输入CA模型中以模拟动态再结晶过程中的晶粒形核与长大,建立FE-CA跨尺度晶粒细化预测模型。

相较于只使用FE方法,将FE与CA结合的

方法对金属加工中晶粒细化现象预测更为准确,同时能够更好地表现晶粒细化过程。然而,该方法计算量较大,对计算设备要求较高。

### 1.2.2 切削表面固态相变建模方法

在加工中,切削热和切削应力等因素引起工件材料晶格发生变化,进而导致切削表面组织发生相变。热诱导相变模型与应力诱导相变模型被广泛应用于预测金属加工中的相变现象。

热诱导相变动力学通常用于描述相体积、相塑性和体积膨胀演变。在该框架下,奥氏体体积分数与时间-温度转变行为和 Avrami 模型相关。其中适用于描述奥氏体体积分数的 Avrami 模型如下所示<sup>[34]</sup>:

$$V_A = 1 - \exp\left(A\left(\frac{T - T_i}{T_c - T_i}\right)^D\right) \quad (2)$$

式中: $V_A$ 为体积分数; $T$ 为当前温度; $T_i$ 为起始温度; $T_c$ 为临界温度; $A$ 、 $D$ 为常数。

该模型被广泛应用于描述快速加热过程中奥氏体相的体积分数<sup>[35-37]</sup>。WANG 等<sup>[35]</sup>使用数值建模方法建立高速加工 Ti6Al4V 的相变预测模型,分别考虑了快速加热与快速冷却中的相变过程。快速加热过程使用 Avrami 模型确定  $\beta$ -Ti 体积分,采用克劳修斯-克拉佩龙方程建立应力与温度之间的关系。RAMESH 等<sup>[38]</sup>基于热驱动相变动力学,使用数值建模方法,建立预测热主导切削条件下 52100 钢正交加工中的马氏体相变和白层有限元模型。该模型模拟热弹塑性材料行为的同时考虑相变效应,耦合相变效应与材料行为。在该模型中提出两个关键点:①被分析的物质点的温度超过奥氏体转变温度( $A_s$ ),该点被称为转变物质点;②转变物质点的温度低于马氏体转变温度。考虑 FE 程序增量方法,使用增量方法计算相变分数。通过实验验证,白层预测厚度与实验测量结果吻合,尤其在高速进给率时一致性更好。该模型表现出良好的预测能力,被应用于多种不同切削案例的相变预测中。

应变诱导相变模型基于应变诱导相变动力学,强调应变速率对相变的主要影响。OLSON 等<sup>[39]</sup>基于应变诱导马氏体相变形成核位置为剪切带交叉点的假设,建立剪切带形成速率与应变速率的关系式:

$$\dot{f}_{sb} = (1 - f_{sb})\alpha(\theta)\dot{\epsilon}_p \quad (3)$$

式中: $\dot{f}_{sb}$ 为剪切带体积增速; $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变率; $1 - f_{sb}$ 为剪切带自由体积; $\alpha(\theta)$ 为温度函数。

STRINGFELLOW 等<sup>[40]</sup>定义马氏体体积增速,建立相变与剪切带形成速率的关系,结合文献<sup>[39]</sup>

的研究,将相变与应变速率关联,奠定应变诱导相变模型基础。ZAERA 等<sup>[41]</sup>考虑高应变速率下的绝热温升,修改温度函数  $\alpha(\theta)$ 。基于此,ZHANG 等<sup>[42]</sup>建立了应变诱导马氏体相变的解析模型,该研究考虑应变诱导马氏体相变动力学形核温度限制  $T_m$ (443 K),将切削过程马氏体相变分为两个阶段:第一阶段为切削温度尚未达到温度限制时的塑性加载过程,第二阶段为切削温度降至上限以下的卸载过程,如图 4 所示;将两阶段积分结果相加,得到最终马氏体体积分。

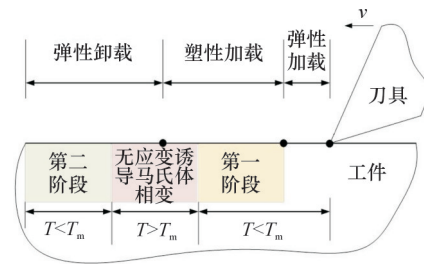


图 4 应变诱导马氏体相变的两个阶段<sup>[42]</sup>

Fig.4 Two stages of strain-induced martensitic transformation<sup>[42]</sup>

热驱动相变模型的优点是能够考虑表面微观结构的变化,例如奥氏体、马氏体等。同时,该模型另一个优点为基于 Avrami 模型,公式较简单。然而该模型在同时涉及应力影响显著的情况下准确性较差。应力诱导相变模型考虑应力与相变之间的关系,准确性较热驱动相变模型更高。然而该模型较为复杂,实验验证难度较大。

### 1.3 已加工表面力学特性建模方法

切削表面微观结构演化与微观组织演变影响金属切削表面力学特性,本节聚焦于切削表面残余应力和切削表面应变硬化的预测建模方法。

#### 1.3.1 切削表面残余应力建模方法

切削表面残余应力是由材料内部不均匀变形、温度场变化及组织结构改变等因素引起、在外载卸除后仍存在于工件的自平衡应力。切削加工中残余应力形成机制主要有两种,分别为非均匀塑性变形(机械效应)<sup>[43]</sup>和热梯度(热效应)。这两种机制通过不同的方式导致材料内部的应力分布不均,进而形成残余应力。非均匀塑性变形是加工残余应力产生的核心机制之一。当材料在加工中承受超过其屈服强度的机械载荷时,内部发生塑性变形。内部塑性变形分布不均匀导致内部应力不平衡,在去除外力后产生残余应力。QI 等<sup>[44]</sup>指出,累计塑性应变是决定工件表面残余应力性质和主要因素。当进给方向累计塑性应变大于零时,残余应力在进给方向和切削宽度方向

表现为压应力；当进给方向累计塑性应变小于零时，残余应力在进给方向和切削宽度方向表现为拉应力。温度梯度是加工残余应力产生的重要机制。机械加工过程中产生热量，致使工件局部升温，形成温度梯度。材料冷却时，不均匀收缩导致残余应力的产生。机械加工过程中，热梯度与机械载荷并非单独作用，而是相互耦合共同产生残余应力<sup>[44]</sup>。

残余应力的建模方法主要包括实验建模、解析建模和数值建模，如图5所示<sup>[45-50]</sup>。早期研究主要集中于实验建模，通过大量实验获取残余应力分布规律；随后，基于力学理论的解析模型被提出，用以揭示残余应力形成的基本机理；近年来，随着计算技术的发展，数值建模方法因其较高的预测精度与较少的实验次数被广泛应用于残余应力的预测与分析。

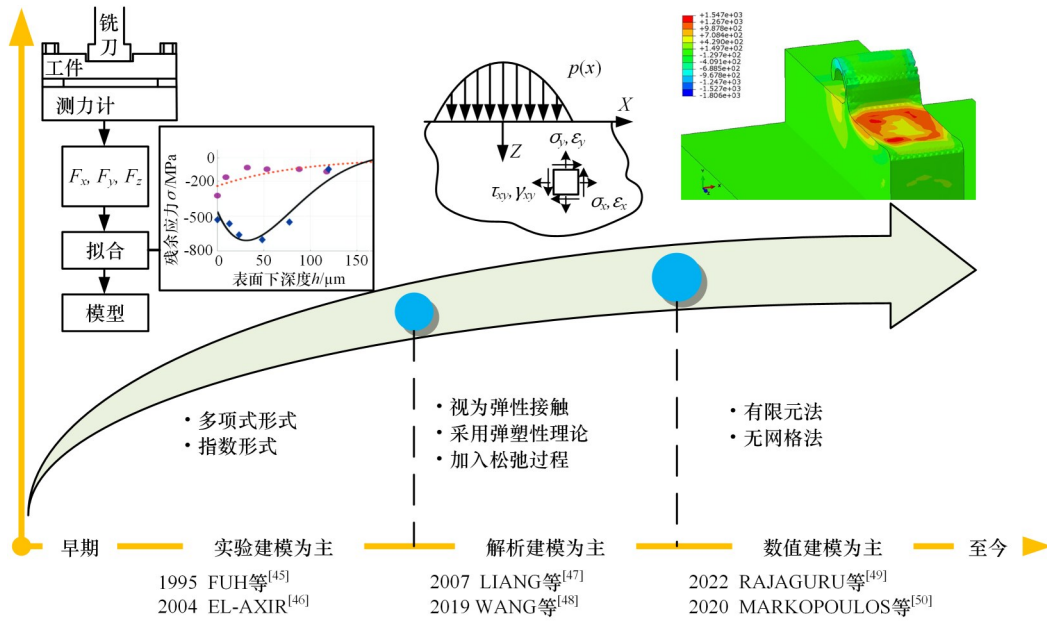


图5 切削表面残余应力建模方法

Fig.5 Modeling methods of residual stress on machined surface

实验建模方法是最早的残余应力预测方法。该方法通过一系列实验测量残余应力，采用统计学方法建立预测模型。FUH等<sup>[45]</sup>考虑切削条件（切削速度、进给量和切削深度）和刀具几何形状（刀尖半径和后刀面磨损）等因素，使用响应曲面法(RSM)和Takushi实验方法建立多项式形式的模型预测残余应力：

$$\sigma = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i + \sum_{i=1}^5 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1, j \neq i}^5 b_{ij} x_i x_j + e \quad (4)$$

式中： $\sigma$ 为残余应力； $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ 分别为切削速度、进给量、切削深度、后刀面宽度和刀尖圆弧半径； $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$ 为相应的系数； $e$ 为实验误差。

相似地，EL-AXIR<sup>[46]</sup>使用RSM设计实验，考虑切削速度、进给速度和工件材料抗拉强度。该研究提供加工参数对最大残余应力的影响，并确定最大残余应力的位置和深度。

多项式形式预测模型能在确定项数方面有一定自由度，然而，当考虑的因素增加时，模型也会更复杂。ULUTAN等<sup>[51]</sup>使用正弦衰减函数对加工中的残余应力建模。该模型为固定项数，不会

随着考虑因素的增加而变得复杂。相似地，TAN等<sup>[52]</sup>使用指数衰减函数构建压缩残余应力的模型：

$$\sigma(h) = A_1 e^{-\lambda_1 h} \quad (5)$$

式中： $\sigma$ 为残余应力； $h$ 为表面下的深度； $A_1$ 为指数衰减的幅度； $\lambda_1$ 为铣削过程引起的压缩残余应力的指数。

实验建模建立经验模型只是简单拟合特定情况下实验结果。然而，影响残余应力的因素较复杂，无法给出考虑所有因素的通用模型，存在较大局限性。为得到可以广泛应用的通用模型，围绕残余应力产生机理展开研究，建立预测解析模型。LIANG等<sup>[47]</sup>采用解析建模方法，提出一种预测正交切削残余应力的模型。该研究将接触行为视为滚动/滑动接触，综合考虑犁耕区域与剪切区域机械应力。JOHNSON<sup>[53]</sup>考虑弹性接触，通过弹性接触引起瞬时应力预测残余应力。该研究采用经典赫兹理论得出弹性解，计算得到弹性应力：

$$\sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)^2}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds - \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)^3}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds \quad (6)$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-b}^a \frac{\rho(s)}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds - \frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds \quad (7)$$

$$\tau_x = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{\rho(s)(x-s)}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds - \frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{q(s)(x-s)^2}{[(x-s)^2 + z^2]^2} ds \quad (8)$$

式中： $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 $x, y, z$ 方向的应力； $\rho(s), q(s)$ 为表面牵引力函数， $s$ 为表面某微元位置； $a, -b$ 为表面上施力（或接触）区间的两端。

此模型可计算较复杂和非对称接触区域，后续解析建模方法基本采用此模型。

弹塑性理论通常用于分析某一特定点的塑性行为，对于塑性加载过程中的材料行为，大量研究采用McDowell模型<sup>[47,54]</sup>。该模型引入混合函数，能够在各种循环塑性应变负载条件下对残余应力进行准确预测<sup>[55]</sup>。考虑到应力加载后所得到的残余应力并非实际情况值，需要加入松弛过程。MERWIN等<sup>[56]</sup>提出一种松弛过程计算方法，该方法规定边界条件如下：

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{xx} = 0 \quad \epsilon_{yy} = 0 \quad \epsilon_{zz} = f_3(z) \\ \sigma_{xx} = f_1(z) \quad \sigma_{yy} = f_2(z) \quad \sigma_{zz} = 0 \\ \tau_{xz} = 0 \quad \gamma_{xz} = f_4(z) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： $f_n(z)$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )代表与 $z$ 方向相关的参数； $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$ 分别为 $x, y, z$ 方向的正应变； $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 分别为 $x, y, z$ 方向的正应力； $\tau_{xz}$ 为 $xz$ 平面切应力； $\gamma_{xz}$ 为 $xz$ 平面剪应变。该松弛过程被大量研究应用<sup>[48,57]</sup>。SHAN等<sup>[57]</sup>采用松弛过程建立正交切削残余应力预测模型。该研究同时考虑机械应力与热应力，最后加入应力加载与松弛过程建立改进的残余应力预测模型。WANG等<sup>[48]</sup>在采用松弛过程的基础上，结合径向返回(RR)法建立正交切削残余应力预测模型。该研究使用隐式计算方法，应力更新满足一致性原则。

虽然解析模型适用性广、结果准确，但也存在许多缺点。所有解析模型都是建立在假设之上。同时，解析模型主要涉及金属弹塑性理论和切削力学，刀具几何形状和工件-刀具接触情况通常被简化。近年来，随着仿真技术的发展，数值建模方法被广泛应用。数值建模方法主要包括有限元法(FEM)以及无网格法。FEM可模拟复杂过程的切削过程，获取较高精度的切削表面残余应力预测结果。RAJAGURU等<sup>[49]</sup>采用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法建立超级双相不锈钢的切削表面残余应力预测模型，如图6所示。PAN等<sup>[58]</sup>考虑到传统JC模型未包含反映微观组织特征的变

量而难以准确表征流动应力与微观结构耦合关系，引入动态晶粒尺寸演化和相变行为对材料流变响应的影响，以此为核心构建简化形式的Ti6Al4V车削残余应力预测模型。然而，FEM在平衡多尺度精度与过多网格划分的问题上面临挑战，因此提出无网格方法，包括光滑粒子流体动力学(SPH)、粒子有限元法(PFEM)、离散元法(DEM)和分子动力学(MD)<sup>[50]</sup>。BALBAA等<sup>[59]</sup>采用SPH方法模拟正交切削过程，然后采用隐式拉格朗日模型对松弛过程建模，得到718镍基高温合金正交切削表面残余应力预测模型。

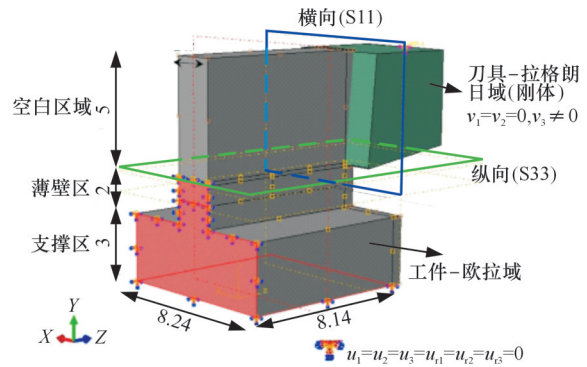


图6 超级双相不锈钢的CEL模型<sup>[49]</sup>

Fig.6 CEL model of super duplex stainless steel<sup>[49]</sup>

### 1.3.2 切削表面应变硬化建模方法

硬度是硬化主要表征指标之一，大量研究基于硬度计算与预测建立应变硬化预测模型。ULLAH等<sup>[60]</sup>基于结合Hall-Petch(HP)方程的FE铣削模型，实现对Ti6Al4V高速铣削加工硬化后显微硬度的预测；考虑到简化加工减少网格复杂度与计算时间，将3D铣削系统简化为2D铣削过程建立简化FE铣削模型；采用HP方程估算显微硬度(HV)，结合FE模型得到应变硬化预测模型；模型误差控制在4%以内，预测精度较高。LU等<sup>[61]</sup>采用解析建模方法计算硬度值，建立微铣削718镍基高温合金应变硬化预测模型，此研究基于微铣削力模型计算某点处应力值；然后通过Hollomon方程得到应力-应变关系，计算得出应变值；最后基于718镍基高温合金塑性应变与硬度关系，加入难以测量因素引起的修正项，得到微铣削表面应变硬化预测模型；微铣削实验测量表面硬度与预测模型得到硬度进行对比，结果显示最大误差不超过1.8%，平均误差为0.953%，模型具有较好的预测效果。MOHAMMADI等<sup>[62]</sup>基于解析建模方法，建立适用于2205双相不锈钢铣削过程的表面加工硬化预测模型，考虑铣削过程中未加工表面任一点在被刀具直接切削前就已受应力场作用而产生塑性变形，根据每齿进给量计

算任意点发生塑性变形次数,绘制强度曲线;每条曲线都对应一次该点之前的加工过程,基于应力场与温度场计算加工路径每个点的强度,最终得到加工硬化预测模型。

部分研究围绕硬度之外的参数(如加工硬化分布)进行预测模型的建立。CHEN等<sup>[63]</sup>采用解析建模方法,基于改进的本构模型预测 Ti6Al4V 合金加工硬化效应,研究发现加工硬化速率具有温度依赖性,为表征该效应,在传统 JC 模型中引入温度函数;同时为更好地表征温度效应,在传统 KHL 模型中加入与温度相关的加工硬化函数;基于改进 JC 模型与 KHL 模型建立加工硬化预测模型。

#### 1.4 多指标耦合建模方法

切削表面完整性指标间存在耦合关系,仅预测单一表面完整性指标模型的精度与适用范围往往受到限制,因此,考虑多指标耦合作用的综合预测建模方法被提出。

REN等<sup>[64]</sup>在镍基高温合金车削中提出热力学耦合与微观组织结构演化的仿真框架,在 Abaqus 中耦合机械载荷与热载荷,同时结合微观组织结构演化模型,在应力场与温度场同步求解完成后更新微观组织结构变量,建立晶粒细化、残余应力与应变硬化的多指标耦合预测模型。LIU等<sup>[65]</sup>采用欧拉-拉格朗日的有限元方法建立考虑残余应力与表面粗糙度的多指标耦合预测模型,研究发现分段切屑形成导致切削表面机械载荷与热载荷的周期性变化,通过载荷变化预测表面粗糙度与表面层残余应力,建立镍基高温合金切削后表面残余应力与表面粗糙度耦合模型。ARISOY等<sup>[66]</sup>和 ÖZEL等<sup>[67]</sup>考虑晶粒细化与应变硬化的耦合,分别建立车削 Ti6Al4V<sup>[66]</sup>和车削镍基合金<sup>[67]</sup>的多指标耦合模型,将 FEM 模拟结果输入微观组织演化模型,得到晶粒尺寸分布,随后结合霍尔-佩奇方程得到表面层显微硬度分布,建立“微观组织结构决定表面层力学特性”的耦合预测模型。

## 2 加工表面完整性调控

金属加工过程中,表面完整性的调控对提高零件的服役性能和使用寿命至关重要。为优化加工表面质量并减少不良加工效应,提出并发展了多种调控策略,主要包括刀具优化、工艺优化(加工参数优化、冷却润滑技术、后处理)、多能场辅助加工以及表面预处理。不同方法在调控效果和调控机理上各具特点,如表1所示。

表1 不同表面完整性调控方法的调控效果与调控机理  
Tab.1 Effects and mechanisms of different surface integrity regulation methods

调控方法		调控效果	调控机理
刀具优化	刀具纹理改善	降低表面粗糙度,增大应变硬化程度,增大残余应力	改变加工过程中刀具与工件摩擦学行为
	刀具深冷处理	调控表面粗糙度	提高刀具耐磨性,减小刀具磨损
工艺优化	加工参数优化	调控表面粗糙度,调控残余应力,调控应变硬化	基于加工参数与表面完整性映射关系,优化加工参数
	冷却润滑技术	降低表面粗糙度,减小晶粒细化程度,减小应变硬化程度	冷却技术抑制刀具磨损与加工表面热变形,同时抑制晶粒的生长;润滑技术降低加工摩擦
	后处理	调控表面粗糙度,增大晶粒细化程度,增大应变硬化程度	喷丸引起晶粒破裂,在后续车削加工中位错迅速积累,导致晶粒细化程度更高;抛光处理去除车削产生的塑性变形层;滚压压力导致塑性变形
多能场辅助加工	激光辅助加工	调控表面粗糙度,增大晶粒细化程度,增大压缩残余应力	激光引起材料软化,切削力进而减小,导致工件表面微观组织结构变化减少;激光功率影响刀具磨损,调控表面粗糙度
	超声辅助加工	调控表面粗糙度,增大应变硬化程度	超声振动导致断续切削,同时刀具持续冲击工件,加剧应变硬化
	超声激光辅助加工	降低表面粗糙度	超声激光耦合减小刀具磨损,同时实现脆性材料的延性切削
表面预处理		降低表面粗糙度,减小应变硬化	Rehbinder效应

### 2.1 刀具优化

加工刀具性能与设计直接影响加工过程中力学和热学特性,进而影响最终表面完整性。为更高效地调控表面完整性,许多研究从简单的参数优化转向加工刀具的改善。

刀具表面纹理是影响刀具与工件相互作用的重要因素,大量研究围绕刀具表面纹理的改善进行。该方法的本质是通过改变刀具表面纹理来改变加工过程中刀具与工件摩擦学行为<sup>[3]</sup>。GUP-TA等<sup>[68]</sup>分析刀具纹理在车削 Inconel 718 合金过程中的摩擦学行为,并观察表面粗糙度与显微硬度的变化,结果表明,相较于传统刀具,带纹理刀具能够降低表面粗糙度并提高显微硬度。HAN等<sup>[4]</sup>提出球头铣刀变分布密度微纹理概念,进行钛合金铣削实验,得到多种微纹理参数(黏结区微纹理直径  $d_1$ 、黏结区微纹理间距  $l_1$ 、黏结区偏转角  $\theta'$ 、滑移区微纹理直径  $d_2$ 、滑移区微纹理间距  $l_2$ 、滑移区偏转角  $\beta'$ 、距切削刃距离  $l$ )对加工表面完整性的影响规律,如图7所示。对实验结果进行极

差分析,得到影响表面粗糙度的主要参数为 $l$ 、 $\theta'$ 和 $l_2$ ;影响残余应力的主要参数为 $l_1$ 、 $d_1$ 和 $l_2$ ;影响加工硬化程度的主要参数为 $l$ 、 $\beta'$ 和 $l_1$ 。通过调整刀具微纹理参数,实现对表面粗糙度、残余应力以及应变硬化的调控。

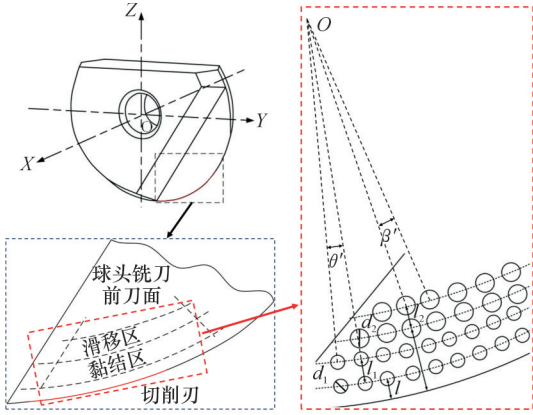


图7 球头铣刀前刀面微结构参数<sup>[4]</sup>

Fig.7 Micro-texture parameters of the rake face of ball-end milling cutter<sup>[4]</sup>

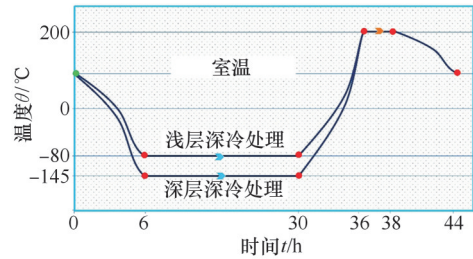
对刀具进行深冷处理(将刀具在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度中放置一段时间)可对加工中表面完整性进行调控<sup>[69]</sup>。由于该方法相较于其他刀具改善方法成本较低,因此也得到广泛应用。ALTAS等<sup>[70]</sup>分别使用经过深冷处理与未经处理的刀具进行镍钛形状记忆合金铣削实验,得到经过深冷处理的刀具可降低加工表面粗糙度的结论。相似地,ÇIÇEK等<sup>[71]</sup>对 AISI 304 与 316 不锈钢进行钻孔实验,结果显示经过深冷处理的钻头可降低工件表面粗糙度。他们将该现象归因于深冷处理提高了刀具耐磨性,减小了刀具磨损。深冷处理方法根据冷却温度、冷却速度与持续时间不同,可分为深层深冷处理与浅层深冷处理。AKINCIOĞLU<sup>[72]</sup>通过哈氏合金 C22 车削实验研究不同深冷处理工艺对加工工件表面粗糙度的影响,如图 8 所示。实验结果表明,深层深冷处理刀具相较于浅层深冷处理刀具可以得到更低的表面粗糙度。由此可得,通过改变刀具深冷处理工艺,可实现对加工表面粗糙度的调控。深冷处理温度越低,对表面粗糙度的改善效果越强。

## 2.2 工艺优化

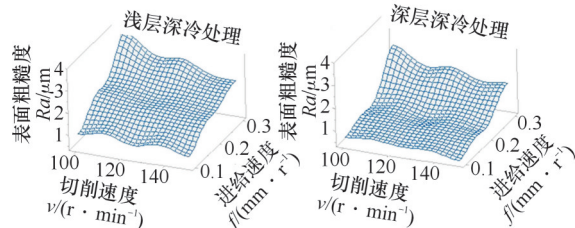
加工工艺直接影响工件加工过程,优化加工工艺是调控金属加工表面完整性的重要方法。本节围绕加工参数、冷却润滑技术和后处理,综述从工艺优化角度调控加工表面完整性的研究进展。

### 2.2.1 加工参数

通过调控加工参数优化切削加工过程中的切



(a) 深冷处理工艺



(b) 不同深冷处理工艺下表面粗糙度

图8 不同深冷工艺对表面粗糙度的影响<sup>[72]</sup>

Fig.8 Effect of different cryogenic processes on surface roughness<sup>[72]</sup>

削力、切削热输入,改善材料去除机制,进而改善金属切削加工表面完整性(如表面粗糙度<sup>[73-77]</sup>、微观结构<sup>[76,78]</sup>和力学效应<sup>[73-74,76,79]</sup>)。通过实验构建切削参数与机械加工中表面完整性的映射关系,根据映射关系优化参数,可实现表面完整性的调控。REN等<sup>[80]</sup>通过车削高温合金确定加工硬化与切削速度的关系,结果显示,加工硬化程度随切削速度的增大而增大。YILDIRIM等<sup>[75]</sup>在3种冷却润滑条件下车削镍基合金,发现 $50\sim 100\text{ m/min}$ 切削速度下,表面粗糙度随着切削速度的增大先减小再增大,如图9所示。因此提出选择中等切削速度可以将表面粗糙度控制在较小的范围。TOMAZ等<sup>[81]</sup>以方差为评价指标对实验数据进行分析,发现影响表面粗糙度与残余应力最重要因素为每齿进给量。

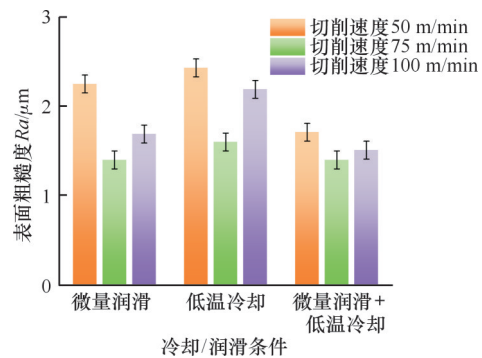


图9 不同条件下表面粗糙度随切削速度变化趋势<sup>[75]</sup>

Fig.9 Trend of surface roughness with cutting speed under different conditions<sup>[75]</sup>

为建立应用范围更广泛的模型,同时减少所需实验数据量,人工智能(AI)技术被应用于表面

完整性调控研究<sup>[3]</sup>。ZHOU等<sup>[82]</sup>在灰色关联分析(GRA)中加入径向基函数(RBF)神经网络与粒子群优化(PSO)算法,开发了一种新型优化算法,并将其应用于多轴球头铣削 Inconel 718 表面粗糙度与残余应力的优化。通过采用该调控方法组合最佳加工参数,可以减小  $Ra$  值为  $0.2073\ \mu\text{m}$ 。考虑到加工参数可以实时调整, MOREIRA等<sup>[83]</sup>基于神经模糊和模糊逻辑控制器(FLC)设计监控控制器,用于加工表面粗糙度的调控。该控制器能够监控铣削过程,实时调整加工参数(主轴转速和进给速度),控制表面粗糙度误差在  $0.02\%\sim 4\%$  以内,保证表面粗糙度符合技术要求。

### 2.2.2 冷却润滑技术

加工过程中刀-工接触界面的摩擦热对切削热-力载荷分布及材料去除行为影响显著。高温引起工件表层塑性变形和固态相变,摩擦则直接影响表面粗糙度、硬化层特征与残余应力分布。控制加工区域温度与摩擦性能可有效改善热效应与摩擦效应,调控工件表面完整性。冷却润滑技术采用乳化切削液或低温流体等介质对刀具与工件接触界面进行冷却和润滑。在加工中采用冷却润滑技术可以改善加工工件表面完整性<sup>[84-87]</sup>。

冷却润滑技术包括溢流冷却、微量润滑(MQL)技术、高压射流、低温冷却等。其中,溢流冷却技术通过向加工区域泵送大流量切削液实现刀具与工件的冷却与润滑。近年来,切削液对环境与人体健康的影响受到人们关注<sup>[88]</sup>,因此需要使用大量切削液的溢流冷却技术也受到质疑。该技术正被其他更高效的冷却润滑技术(低温冷却技术、MQL)所替代。

低温冷却技术是指将超冷气/液介质(如液氮  $\text{LN}_2$ 、液态二氧化碳  $\text{LCO}_2$ )作为冷却剂覆盖加工区域,可大幅降低切削温度<sup>[89]</sup>。KE等<sup>[90]</sup>在 Ti6Al4V 高速加工中采用  $\text{LN}_2$  作为冷却介质,观察到表面粗糙度降低  $93.7\%$ 。ZHAO等<sup>[91]</sup>采用  $\text{LN}_2$  冷却技术辅助铣削 Ti6Al4V,还观察到表面显微硬度增大与残余压应力增加。表面粗糙度的降低归因于低温条件下刀具磨损与加工表面热变形被抑制,微观组织结构与表面层力学特性的演变则是因为低温条件抑制晶粒的生长<sup>[86]</sup>。SHAH等<sup>[92]</sup>采用  $\text{LCO}_2$  作为冷却介质辅助钻削钛合金。相较于采用  $\text{LN}_2$ ,采用  $\text{LCO}_2$  冷却能够产生更小的表面粗糙度与更低的显微硬度,如图 10 所示。通过采用不同冷却液与冷却温度可实现对表面完整性的灵活调控。

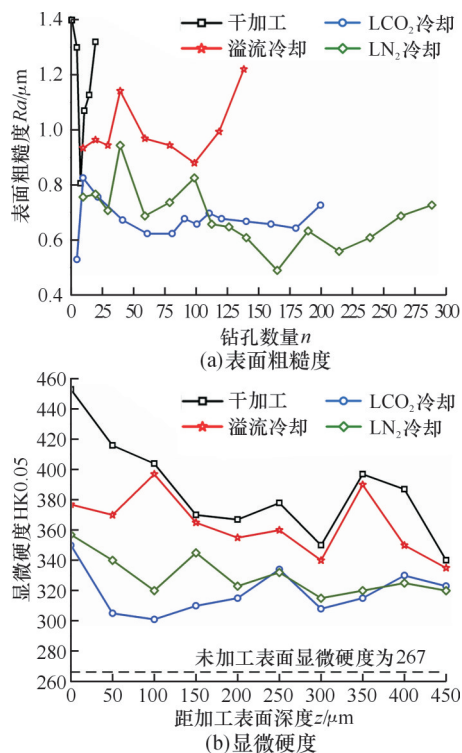


图 10 LCO<sub>2</sub>与LN<sub>2</sub>冷却辅助钻削钛合金对比<sup>[92]</sup>

Fig.10 Comparison of LCO<sub>2</sub> and LN<sub>2</sub> cooling-assisted drilling of titanium alloy<sup>[92]</sup>

低温冷却技术可有效降低加工区域温度,但该技术难以在刀-屑、刀-工件接触位置提供较好的润滑效果<sup>[93]</sup>,为此提出了微量润滑(MQL)技术。YAZID等<sup>[94]</sup>在3种切削条件(干式加工、MQL 50mL/h和MQL 100mL/h)下车削 Inconel 718 材料,研究发现,采用MQL可以降低加工表面粗糙度,降低应变硬化程度;在较低切削速度(90 m/min、120 m/min)下,采用MQL 50mL比采用MQL 100mL得到的表面粗糙度更小,在较高切削速度下(150m/min)则相反。与以冷却为主要目的的低温冷却技术不同,MQL通过高压空气将少量切削液雾化为微小液滴,由喷嘴将液滴覆盖至加工区域,改善加工中的润滑条件<sup>[95]</sup>。MQL所用切削液可分为水基切削液与油基切削液。水基切削液因为其润滑效果较差,在MQL中应用有限。油基切削液作为MQL最常用的切削液类型,又分为矿物油基、合成酯油和植物油基。RAHIM等<sup>[96]</sup>分别采用合成酯油和棕榈油作为润滑剂,发现以棕榈油为润滑剂加工 Ti6Al4V 时得到更小的表面粗糙度与显微硬度。SALEEM等<sup>[97]</sup>采用两种植物油基切削液辅助车削镍基高温合金,实验结果表明,基于菜籽油切削液的MQL得到的表面粗糙度更低。

为进一步加强MQL的冷却润滑作用,各种

添加剂(如纳米颗粒、抗氧化剂等)被广泛应用<sup>[98]</sup>,其中添加纳米颗粒的植物油表现出更好的润滑性和导热性,可降低加工表面粗糙度<sup>[99-100]</sup>。然而,ROSNAN等<sup>[101]</sup>将氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )纳米颗粒加入水溶性切削油,发现表面粗糙度增大,研究认为该现象由 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒对工件表面的摩擦作用引起。

考虑到低温冷却技术良好的冷却效果与MQL良好的润滑效果,两种技术结合可以得到更好的冷却润滑效果。YILDIRIM<sup>[102]</sup>将多种冷却润滑技术组合,辅助车削Inconel 625。实验结果显示,在采用 $\text{LN}_2$ 的低温冷却技术结合采用纳米流体的MQL条件下可得到最小的表面粗糙度。STERLE等<sup>[103]</sup>将采用 $\text{LCO}_2$ 的低温冷却技术与MQL结合,对Inconel 718进行铣削实验。该研究设置了不同切削条件进行对比:干式加工、溢流冷却、 $\text{LCO}_2$ 、 $\text{LCO}_2$ 结合MQL(润滑油)、 $\text{LCO}_2$ 结合MQL( $\text{MoS}_2$ ),结果表明, $\text{LCO}_2$ 结合MQL( $\text{MoS}_2$ )条件下加工表面粗糙度最小,而 $\text{LCO}_2$ 结合MQL(润滑油)条件下加工表面粗糙度最大。在研究中将该现象解释为油和工件材料不相容。

### 2.2.3 后处理

后处理是在加工完成后对工件进行处理,直接调控表面完整性,主要包括喷丸、抛光和滚压技术。喷丸技术利用高速粒弹丸、颗粒等能量源撞击工件表面,使表面产生一定程度的弹塑性变形,产生压缩残余应力并形成应变强化层<sup>[104]</sup>。XU等<sup>[105]</sup>采用喷丸技术对加工后的齿轮钢进行处理,观察到晶粒尺寸减小,晶粒细化程度更高,但工件在喷丸处理后表面粗糙度增大。由于大量的弹丸冲击和相互叠加会在材料表面形成不均匀凹坑,改变材料的表面形貌,因此表面粗糙度增大<sup>[106]</sup>。抛光技术是通过机械、化学或物理方法去除工件表面不平整,以调控表面完整性的技术。抛光处理可去除加工过程中产生的纹理,因此能够减小加工表面粗糙度<sup>[107-108]</sup>。同时,有许多研究观察到抛光处理对加工表面微观组织和力学效应也有调控作用<sup>[107-109]</sup>。YAO等<sup>[107]</sup>在钛合金铣削后进行抛光处理,观察到晶粒尺寸减小,晶粒细化程度增大,相应地应变硬化程度增大,表面显微硬度从354HV0.025增至386HV0.025。WU等<sup>[109]</sup>对车削后镍基合金进行表面抛光处理后观察到残余应力减小,认为出现该现象的原因是抛光处理去除车削产生了塑性变形层。LIN等<sup>[108]</sup>对TC4钛合金进行抛光处理,表面残余应力从483 MPa减小

到397 MPa,同时表面显微硬度提高18HV。滚压是通过球或滚柱在材料表面滚动,施加滚动压力的处理技术<sup>[110]</sup>。许多研究观察到滚压处理后材料表面压缩残余应力增大<sup>[111-112]</sup>,HUA等<sup>[111]</sup>指出这是由滚压压力导致的塑性变形引起的。由于塑性变形的产生,滚压处理也会导致材料表面晶粒细化现象更明显,应变硬化程度增大<sup>[111,113]</sup>。LUO等<sup>[114]</sup>、DANDE等<sup>[115]</sup>通过观察材料表面粗糙度 $R_a$ 值发现,滚压处理后材料表面粗糙度降低。

### 2.3 多能场辅助加工

多能场辅助加工将传统加工与激光、超声等外部物理场耦合,利用多场协同作用调控材料的切削变形响应,实现表面完整性调控,见图11。

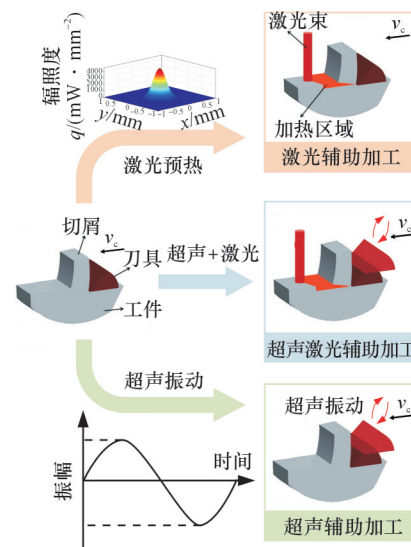


图11 耦合超声、激光的多能场辅助加工

Fig.11 Multi-energy field assisted processing by coupling ultrasound and laser

激光辅助加工将激光技术与传统加工结合,通过聚焦于加工刀具前方的激光束实现材料软化。相较于传统加工表面,激光辅助加工表面晶粒尺寸更大,晶粒细化程度较轻<sup>[116-117]</sup>。SHANG等<sup>[118]</sup>指出这是由激光引起材料软化,切削力降低,导致工件表面微观组织结构变化减少引起的。对比传统加工,激光辅助加工会降低加工表面粗糙度。DING等<sup>[119]</sup>分别采用激光辅助加工与传统加工方法车削淬硬钢,发现在低进给率下,传统加工由于犁耕效应表面粗糙度增大;在采用激光辅助加工后,表面粗糙度从 $0.34\ \mu\text{m}$ 降至 $0.2\ \mu\text{m}$ 。然而当激光功率过大时,加工表面粗糙度可能会增大。VENKATESAN<sup>[120]</sup>采用激光辅助车削718镍基高温合金,观察到激光功率从1200 W增大到1300 W时,表面粗糙度出现增大

趋势。研究指出该现象产生原因为激光功率增大引起刀具磨损增加,导致表面粗糙度增大。同时DING等<sup>[119]</sup>研究表明激光辅助加工比传统加工能产生更均匀的环向残余应力,并在轴向上增大压缩残余应力。

超声振动辅助加工是一种在传统加工的基础上引入高频超声振动的技术,如图12所示<sup>[121]</sup>。超声振动作用于工件表面,导致刀具进行断续切削,对表面粗糙度产生影响<sup>[122-127]</sup>。PATIL等<sup>[124]</sup>对Ti6Al4V进行超声辅助车削,观察到 $R_a$ 值比传统车削降低40%。断续切削减少刀具与工件接触时间,改变材料变形过程<sup>[125]</sup>,导致切削温度与刀具磨损降低,最终降低表面粗糙度<sup>[124]</sup>。HE等<sup>[126]</sup>在超声辅助车削镍基高温合金时,观察到随着切削速度的增大,超声辅助车削对表面粗糙度的改善效果减小。KANG等<sup>[127]</sup>在进行GH4068高温合金车削实验时也观察到相似的现象,将该

现象归因于切削速度的增大减弱刀具与工件的分离效果。此外,SCHUBERT等<sup>[128]</sup>指出,超声振动方向也对超声辅助加工过程中表面粗糙度的改善具有显著作用。该研究分别采用3种不同振动方向(径向、切削方向、进给方向)的超声辅助车削方法,观察到径向振动模式下表面粗糙度高于传统车削,而切削方向和进给方向振动模式下的超声辅助车削对表面粗糙度影响较小,仅在沿径向方向振动时,超声振动辅助车削才会对表面粗糙度产生明显影响。除表面粗糙度,超声辅助加工还会影响表面微观组织、应变硬化、残余应力等切削表面完整性特征。PENG等<sup>[129]</sup>在钛合金车削实验中观察到超声辅助加工增大加工表面显微硬度,并增大压缩残余应力。SUÁREZ等<sup>[130]</sup>在实验中发现超声辅助铣削工件表面硬度比传统铣削工件高3.79%,认为该现象是超声波的应用使刀具对工件持续冲击,加剧加工硬化导致。

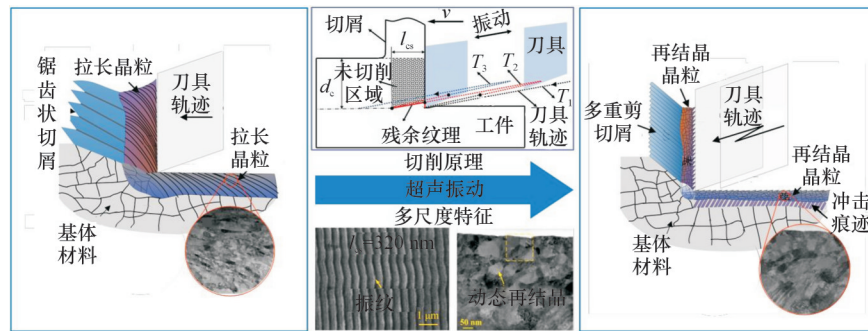


图12 超声振动辅助加工切削原理以及对切削表面的影响<sup>[121]</sup>

Fig.12 Ultrasonic vibration assisted machining cutting principle and its influence on cutting surface<sup>[121]</sup>

超声激光辅助加工结合超声振动辅助加工与激光辅助加工,将工件材料通过激光加热后采用超声振动辅助切削去除材料。相较于传统加工,超声激光辅助加工后表面粗糙度更低。HSU等<sup>[131]</sup>首次研究镍基高温合金热加工与超声辅助混合铣削,发现表面粗糙度在超声辅助加工与热加工结合后进一步降低。LIN等<sup>[132]</sup>分别采用传统车削、激光辅助车削、超声振动辅助车削和超声激光辅助车削加工镍基高温合金,观察到采用超声激光辅助加工的工件表面粗糙度低于其他加工方法。DOMINGUEZ-CABALLERO等<sup>[133]</sup>发现在不同的进给量和切削速度下,采用超声激光辅助车削获得的表面粗糙度总是最小的。JIAO等<sup>[134]</sup>指出超声激光辅助加工减小刀具磨损,并实现脆性材料的延性切削,因此降低切削后表面粗糙度。

## 2.4 表面预处理

预处理是在机械加工前对工件表面进行优

化,以改善材料性能或表面状态,从而影响后续加工过程,实现间接调控表面完整性。

预处理通过物理、化学和电化学手段在机械加工前对工件表面进行优化,改善材料性能或表面状态,旨在优化后续加工过程的界面结合性能,实现间接调控表面完整性。作为预处理方法之一的活性介质涂覆技术可通过在表面引入功能性化学基团或催化活性层,实现界面性能优化和后续工艺适配性提高,从而调控表面完整性。

REHBINDER<sup>[135]</sup>提出的强度削弱理论(即Rehbinder效应)中指出,将活性介质涂覆于加工表面能够降低原材料强度和硬度,促进固体表面微裂纹成核和扩展<sup>[136]</sup>。在金属加工中应用Rehbinder效应可以控制工件材料表面变形行为,实现表面完整性的调控。基于活性介质与金属工件表面作用特性,可以将其分为四类:强物理吸附性介质(如胶水、油墨等)、有化学亲和性的介质(如乙醇、丁醇等)、导热活性介质和其他类似相互

作用介质(如液态金属、水等)。

SHAW<sup>[137]</sup>将四氯化碳( $\text{CCl}_4$ )作为活性介质,观察到表面光洁度得到改善,认为原因为 $\text{CCl}_4$ 在刀-屑接触位置形成润滑层。然而KOH<sup>[138]</sup>通过研究发现, $\text{CCl}_4$ 对剪切区域变形影响更大,否定刀-屑接触区域的润滑效应。UDUPA等<sup>[139]</sup>将胶水作为活性介质涂覆于工件表面,加工后得到的表面粗糙度减小一个数量级。研究认为活性介质作用于工件材料表面产生机械化学效应,导致在切削中局部塑性变形模式由波状流动转变为以周期性断裂为特征的分段流动,进一步导致切削力减小,从而减低表面粗糙度。CHAUDHARI等<sup>[140]</sup>在多种金属切削实验前将永久性金属标记墨水作为活性介质涂覆于表面,观察到表面粗糙度降低。该研究认为活性介质-工件界面阻碍位错运动,导致晶粒内部位错堆积,发生应力集中,如图13所示。应力集中促进微裂纹的产生,进一步导致切削力减小。减小后的切削力不足以将硬质沉淀物颗粒从工件材料脱离,从而降低表面粗糙度。YIN等<sup>[141]</sup>在镍基合金表面涂覆导热活性介质(SACM),观察到加工表面粗糙度降低,应变硬化程度减小。高导热性的SACM对切削温度的影响称为传热效应,结合Rehbinder效应影响切削力与切削温度,调控加工表面完整性。

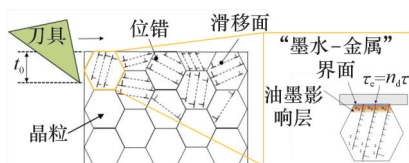


图13 墨水-金属界面引起的晶粒内部位错堆积<sup>[140]</sup>

Fig.13 Dislocation accumulation inside grains caused by ink-metal interface<sup>[140]</sup>

### 3 总结与展望

#### 3.1 总结

切削表面完整性是连接切削加工过程与零部件服役性能的关键桥梁,研究切削表面完整性对产品的可靠性保障和质量控制具有重要意义。基于几何特征-微观组织-力学特性的角度,建立了几何特征驱动微观组织结构演化、微观组织结构演化决定表层力学特性的关系,综述了切削表面完整性预测模型建立方法,阐述了切削表面完整性的调控策略,揭示了调控方法对切削表面完整性的作用机理,主要结论如下:

1)切削表面完整性的评价指标主要包括已加工表面层几何特征、微观组织结构演化和力学特

性。几何特征形成可从运动学、动力学以及几何学角度分析,本质为刀具与工件相对运动轨迹与振动、误差等因素共同作用下形成的表面轮廓,以表面粗糙度为核心表征参数。微观组织结构演化由加工过程热-力耦合作用引起,包括晶粒细化和固态相变等。力学特性的形成基于晶粒细化层的硬化效应及细化层与相变层的弹塑性差异,包括残余应力与应变硬化等。特征参数之间存在耦合影响,受加工参数、刀具状态及材料物理性能等多因素影响。

2)切削表面粗糙度预测模型建立方法包括解析建模、数值建模、实验建模与混合方法建模。基于物理规律的解析和数值建模通过计算刀具轨迹与振动特性等因素,从原理角度构建预测模型。基于经验模型的实验建模方法通过实验数据建立工艺参数-表面粗糙度映射关系,构建表面粗糙度预测模型。数据驱动的混合方法建模通过结合实验与机器学习,构建精确度更高的预测模型。

3)切削表面晶粒细化预测模型主要采用数值建模方法。相较于基于单一模拟方法进行数值建模,耦合有限元模拟与元胞自动机的数值建模可实现精度更高的预测效果。固态相变预测模型包括热驱动相变模型与应力诱导相变模型,以数值和解析建模为主。

4)切削表面残余应力预测模型由以实验建模为主逐步过渡到以解析建模为主,并最终发展为以数值建模为主。实验建模采用统计学建立多项式形式或函数形式模型;解析建模围绕残余应力产生机理建立预测模型;数值建模包含有限元法与无网格法,模拟切削加工过程,建立预测模型。

5)切削表面完整性调控方法主要包括刀具优化、工艺优化、多能场辅助加工和表面预处理。其中工艺优化包括加工参数优化、冷却润滑技术和后处理等方法,多能场辅助加工包括激光辅助加工与超声辅助加工等。刀具优化围绕刀具纹理与刀具深冷处理展开,通过改变刀-工摩擦学行为与刀具耐磨性,调控表面粗糙度与表面层力学特性。加工参数优化建立加工参数与表面完整性映射关系,调控表面粗糙度与力学特性。冷却润滑技术改善刀-工界面加工条件,调控表面粗糙度、晶粒细化与应变硬化。后处理技术主要包括喷丸、抛光和滚压,可调控表面粗糙度、晶粒细化与应变硬化。激光辅助加工通过改变工件与刀具材料属性调控表面粗糙度、晶粒细化与残余应力;超声辅助加工通过断续切削调控表面粗糙度与应变

硬化。活性介质涂覆技术通过 Rehbinder 效应调控表面粗糙度与应变硬化。

### 3.2 不足与展望

近年来表面完整性领域取得了诸多进展,预测模型与调控策略得到持续发展,然而在以下几个方面仍显不足:

1) 高应变率下,晶粒细化预测模型出现偏差。在高速切削等高应变率环境下,动态再结晶机制与孪晶机制相互拮抗。同时,高应变率环境下动态再结晶机制从热激活主导转变为位错密度主导。现有晶粒细化模型对复杂机制的简化假设存在差异,导致在不同环境下模型预测能力出现显著差异。

2) 多能场耦合机制量化描述困难。超声、激光等多能场对切削区域微观组织与应力场叠加呈现高度非线性,求解复杂且计算量较大。同时,刀-工界面相变、摩擦等行为的本构关系与边界条件缺失,难以建立预测模型。

针对以上不足之处,未来研究可从以下几个方面深入:

1) 强化微观机制研究,发展基于晶体塑性、相场法等理论的跨尺度模型。通过模拟位错、相变等微观层面动态演化,同时耦合热、力等多场效应,深入揭示加工诱导的固态相变、晶粒细化等微观过程与表面性能演化的内在关系,进一步发展可解释性更强的解析模型,增强预测模型的准确性。

2) 发展多指标耦合的物理-数据融合模型。将机器学习与物理建模深度结合,同时对表面粗糙度、残余应力、相变等多指标协同预测,构建具备泛化能力与物理一致性的混合模型。

3) 提高预测模型通用性,探索跨材料调控策略的迁移学习方法。构建覆盖钛合金、铝合金等多种材料体系的结构化知识库,利用迁移学习,使预测模型与调控方法在少量实验数据下快速适配至新材料或新工艺。

#### 参考文献:

- [1] JAWAHIR I S, BRINKSMEIER E, M' SAOUBI R, et al. Surface Integrity in Material Removal Processes; Recent Advances[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(2): 603-626.
- [2] ASTAKHOV V P. Surface Integrity—Definition and Importance in Functional Performance[M]//*Surface Integrity in Machining*. London: Springer London, 2010: 1-35.
- [3] SARIKAYA M, GUPTA M K, TOMAZ I, et al. A State-of-the-art Review on Tool Wear and Surface Integrity Characteristics in Machining of Superalloys[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35: 624-658.
- [4] HAN Pei, YANG Shucai, TONG Xin. Study on Surface Integrity Enhancement of Titanium Alloy Milling with Ball End Mill by Micro-texture[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125 (11): 5697-5712.
- [5] ATTIA H, TAVAKOLI S, VARGAS R, et al. Laser-assisted High-speed Finish Turning of Superalloy Inconel 718 under Dry Conditions[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59 (1): 83-88.
- [6] UNIVERSITY L P N, STUPNYTSKY V, SHE Xian-ning, et al. Research and Simulation of the Machining Process of Difficult-to-cut Materials[J]. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 2020, 6(3/4): 41-50.
- [7] LA MONACA A, MURRAY J W, LIAO Zhirong, et al. Surface Integrity in Metal Machining—Part II: Functional Performance[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 164: 103718.
- [8] LIU Dewei, LI Changhe, DONG Lan, et al. Kinematics and Improved Surface Roughness Model in Milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(5): 2087-2108.
- [9] BOUGHARRIOU A, BOUZID W, SAÏ K. Analytical Modeling of Surface Profile in Turning and Burnishing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1): 547-558.
- [10] SONG Wengang, LIU Zhanqiang, YAO Gonghou, et al. Effect of Workpiece Work Hardening on Machined Surface Topography Generated in Two-step Milling Process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 77: 348-360.
- [11] PASHMFOROUSH F, DELIR BAGHERINIA R. Influence of Water-based Copper Nanofluid on Wheel Loading and Surface Roughness during Grinding of Inconel 738 Superalloy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 363-372.
- [12] ALAUDDIN M, BARADIE M AEL, HASHMI M S J. Optimization of Surface Finish in End Milling Inconel 718[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 56 (1/2/3/4): 54-65.
- [13] MANSOUR A, ABDALLA H. Surface Roughness Model for End Milling: a Semi-free Cutting Carbon Case-hardening Steel (EN32) in Dry Condition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 124(1/2): 183-191.
- [14] SUDHEER KUMAR VARMA N, VARMA I R P K, RAJESH S, et al. Prediction of Surface Roughness and MRR in Grinding Process on Inconel 800 Alloy Using Neural Networks and ANFIS[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 5445-5451.
- [15] SVALINA I, ŠIMUNOVIĆ G, ŠARIĆ T, et al. Evolutionary Neuro-fuzzy System for Surface Roughness Evaluation[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 52: 593-604.
- [16] YANG Huguang, ZHENG Han, ZHANG Taohong. A Review of Artificial Intelligent Methods for Machined Surface Roughness Prediction[J]. *Tribology International*, 2024, 199: 109935.
- [17] ZENG Shi, PI Dechang, ZENG Shi, et al. Milling Surface Roughness Prediction Based on Physics-informed Machine Learning[J]. *Sensors*, 2023, 23(10): 4969.
- [18] CHEN Wei, ZOU Bin, LI Yishang, et al. A Study of a Rapid Method for Detecting the Machined Surface Roughness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(9): 3115-3127.
- [19] JOSHI K, PATIL B. Evaluation of Surface Roughness by

- Machine Vision Using Neural Networks Approach[C]//Recent Advances in Mechanical Infrastructure. Singapore: Springer, 2020: 25-31.
- [20] LIU Jian, LU Enhui, YI Huaian, et al. A New Surface Roughness Measurement Method Based on a Color Distribution Statistical Matrix[J]. *Measurement*, 2017, 103: 165-178.
- [21] LIU Hongguang, ZHANG Jun, XU Binbin, et al. Prediction of Microstructure Gradient Distribution in Machined Surface Induced by High Speed Machining through a Coupled FE and CA Approach[J]. *Materials & Design*, 2020, 196: 109133.
- [22] DING Rengen, KNAGGS C, LI Hangyue, et al. Characterization of Plastic Deformation Induced by Machining in a Ni-based Superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 778: 139104.
- [23] ZHU Huajia, CHEN Fei, ZHANG Haiming, et al. Review on Modeling and Simulation of Microstructure Evolution during Dynamic Recrystallization Using Cellular Automaton Method[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(3): 357-396.
- [24] IMBROGNO S, RINALDI S, UMBRELLO D, et al. A Physically Based Constitutive Model for Predicting the Surface Integrity in Machining of Waspaloy[J]. *Materials & Design*, 2018, 152: 140-155.
- [25] YANG Peiqiang, ZHANG Xueping, YAO Zhenqiang, et al. Evolution of Grain Refinement and Phase Transformation Based on Stress-strain Induced Incremental Model in Machining of Titanium Alloy[C]//International Manufacturing Science and Engineering Conference. New Brunswick, 2023: V002T06A017.
- [26] MECKING H, KOCKS U F. Kinetics of Flow and Strain-hardening[J]. *Acta Metallurgica*, 1981, 29(11): 1865-1875.
- [27] GOETZ R L, SEETHARAMAN V. Modeling Dynamic Recrystallization Using Cellular Automata[J]. *Scripta Materialia*, 1998, 38(3): 405-413.
- [28] LIU Guangxin, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng. Investigation of the Grain Refinement Mechanism in Machining Ti-6Al-4V: Experiments and Simulations[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 94: 479-496.
- [29] XU Xiang, ZHANG Jun, LIU Hongguang, et al. Grain Refinement Mechanism under High Strain-rate Deformation in Machined Surface during High Speed Machining Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 752: 167-179.
- [30] ZHANG Jun, XU Xiang, OUTEIRO J, et al. Simulation of Grain Refinement Induced by High-speed Machining of OFHC Copper Using Cellular Automata Method[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2020, 142(9): 091006.
- [31] YAO Yunlong, SUN Cong, XIU Shichao, et al. Study on Dynamic Recrystallization-based Microstructure Evolution Mechanism of 40Cr during Strengthening Grinding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 309: 117754.
- [32] XU Xiang, ZHANG Jun, OUTEIRO J, et al. Multiscale Simulation of Grain Refinement Induced by Dynamic Recrystallization of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Alloy during High Speed Machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 286: 116834.
- [33] DUAN Chunzheng, ZHANG Fangyuan, QIN Siwei, et al. Modeling of Dynamic Recrystallization in White Layer in Dry Hard Cutting by Finite Element—Cellular Automaton Method[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(9): 4299-4312.
- [34] AVRAMI M. Kinetics of Phase Change. II Transformation-time Relations for Random Distribution of Nuclei[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1940, 8(2): 212-224.
- [35] WANG Qingqing, LIU Zhanqiang, YANG Dong, et al. Metallurgical-based Prediction of Stress-temperature Induced Rapid Heating and Cooling Phase Transformations for High Speed Machining Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Materials & Design*, 2017, 119: 208-218.
- [36] ULLAH I, AKINLABI E T, SONGMENE V. Thermo-metallurgical-mechanical Based Phase Transformation Modeling for High-speed Milling of Ti-6Al-4V through Stress-strain and Temperature Effects[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 894-909.
- [37] LI Binxun, ZHANG Song, ZHANG Qing, et al. Modeling of Phase Transformations Induced by Thermo-mechanical Loads Considering Stress-Strain Effects in Hard Milling of AISI H13 Steel[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149: 241-253.
- [38] RAMESH A, MELKOTE S N. Modeling of White Layer Formation under Thermally Dominant Conditions in Orthogonal Machining of Hardened AISI 52100 Steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(3/4): 402-414.
- [39] OLSON G B, COHEN M. Kinetics of Strain-induced Martensitic Nucleation[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1975, 6(4): 791-795.
- [40] STRINGFELLOW R G, PARKS D M, OLSON G B. A Constitutive Model for Transformation Plasticity Accompanying Strain-induced Martensitic Transformations in Metastable Austenitic Steels[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992, 40(7): 1703-1716.
- [41] ZAERA R, RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ J A, CASADO A, et al. A Constitutive Model for Analyzing Martensite Formation in Austenitic Steels Deforming at High Strain Rates[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 29: 77-101.
- [42] ZHANG Wenqian, WANG Xuelin, HU Yujin, et al. Predictive Modelling of Microstructure Changes, Microhardness and Residual Stress in Machining of 304 Austenitic Stainless Steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 130/131: 36-48.
- [43] SOORI M, AREZOO B. A Review in Machining-induced Residual Stress[J]. *Journal of New Technology and Materials*, 2022, 12(1): 64-83.
- [44] QI Zhaoxu, LI Bin, XIONG Liangshan. The Formation Mechanism and the Influence Factor of Residual Stress in Machining[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2014, 9(3): 265-269.
- [45] FUH K H, WU C F. A Residual-stress Model for the Milling of Aluminum Alloy (2014-T6)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 51(1/2/3/4): 87-105.
- [46] EL-AXIR M H. A Method of Modeling Residual Stress Distribution in Turning for Different Materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(9): 1055-1063.
- [47] LIANG S Y, SU J C. Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 65-68.
- [48] WANG S Q, LI J G, HE C L, et al. An Analytical Model of Residual Stress in Orthogonal Cutting Based on the Radial Return Method[J]. *Journal of Materials Processing*

- Technology, 2019, 273: 116234.
- [49] RAJAGURU J, DWIVEDI M, NATARAJAN S, et al. Machining Induced Residual Stress Prediction during Orthogonal Cutting of Super Duplex Stainless Steel Using CEL Approach[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 82: 474-487.
- [50] MARKOPOULOS A P, KARKALOS N E, PAPAZOGLU E L. Meshless Methods for the Simulation of Machining and Micro-machining: a Review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, 27(3): 831-853.
- [51] ULUTAN D, ARISOY Y M, ÖZEL T, et al. Empirical Modeling of Residual Stress Profile in Machining Nickel-based Superalloys Using the Sinusoidal Decay Function [J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 365-370.
- [52] TAN Liang, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Evolution and Empirical Modeling of Compressive Residual Stress Profile after Milling, Polishing and Shot Peening for TC17 Alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 155-165.
- [53] JOHNSON K L. *Contact Mechanics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 18-21.
- [54] SHARMA M K, ALKHAZALEH HALI, ASKAR S, et al. FEM-supported Machine Learning for Residual Stress and Cutting Force Analysis in Micro End Milling of Aluminum Alloys[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2024, 20(5): 1077-1098.
- [55] MCDOWELL D L. An Approximate Algorithm for Elastic-Plastic Two-dimensional Rolling/Sliding Contact [J]. *Wear*, 1997, 211(2): 237-246.
- [56] MERWIN J E, JOHNSON K L. An Analysis of Plastic Deformation in Rolling Contact[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, 177(1): 676-690.
- [57] SHAN Chenwei, ZHANG Menghua, ZHANG Shengnan, et al. Prediction of Machining-induced Residual Stress in Orthogonal Cutting of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(5): 2375-2385.
- [58] PAN Zhipeng, LIANG S Y, GARMESTANI H. Finite Element Simulation of Residual Stress in Machining of Ti-6Al-4V with a Microstructural Consideration[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, 233(4): 1103-1111.
- [59] BALBAA M A, NASR M N A. Prediction of Residual Stresses after Laser-assisted Machining of Inconel 718 Using SPH[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 31: 19-23.
- [60] ULLAH I, AKINLABI E T, SONGMENE V, et al. A Multiscale Finite Element Modeling for Predicting the Surface Integrity Induced by Thermo-mechanical Loads during High-speed Milling of Ti-6Al-4V [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2024, 52: 246-263.
- [61] LU Xiaohong, JIA Zhenyuan, YANG Kun, et al. Analytical Model of Work Hardening and Simulation of the Distribution of Hardening in Micro-milled Nickel-based Superalloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(9): 3915-3923.
- [62] MOHAMMADI Y, AMIRABADI H. Analytical Modeling of Work Hardening of Duplex Steel Alloys in the Milling Process[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(3): 1437-1449.
- [63] CHEN Guang, CAUDILL J, REN Chengzu, et al. Numerical Modeling of Ti-6Al-4V Alloy Orthogonal Cutting Considering Microstructure Dependent Work Hardening and Energy Density-based Failure Behaviors[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 82: 750-764.
- [64] REN Xiaoping, LIU Zhanqiang. A Simulation Model for Predicting Surface Integrity Coupled Thermal - Mechanical Effect in Turning of Inconel 718 Super Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(5): 1825-1837.
- [65] LIU Yang, AGMELL M, XU Dongdong, et al. Numerical Contribution to Segmented Chip Effect on Residual Stress Distribution in Orthogonal Cutting of Inconel718[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(3): 993-1005.
- [66] ARISOY Y M, ÖZEL T. Prediction of Machining Induced Microstructure in Ti - 6Al - 4V Alloy Using 3-D FE-based Simulations: Effects of Tool Micro-geometry, Coating and Cutting Conditions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 1-26.
- [67] ÖZEL T, ARISOY Y M. Experimental and Numerical Investigations on Machining Induced Surface Integrity in Inconel-100 Nickel-base Alloy[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 302-307.
- [68] GUPTA M K, SONG Qinghua, LIU Zhanqiang, et al. Tribological Behavior of Textured Tools in Sustainable Turning of Nickel Based Super Alloy[J]. *Tribology International*, 2021, 155: 106775.
- [69] AKINCIOĞLU S, GÖKKAYA H, UYGUR İ. A Review of Cryogenic Treatment on Cutting Tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9): 1609-1627.
- [70] ALTAS E, ALTIN KARATAS M, GOKKAYA H, et al. Surface Integrity of NiTi Shape Memory Alloy in Milling with Cryogenic Heat Treated Cutting Tools under Different Cutting Conditions[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(12): 9426-9439.
- [71] ÇİÇEK A, KIVAK T, UYGUR I, et al. Performance of Cryogenically Treated M35 HSS Drills in Drilling of Austenitic Stainless Steels[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(1): 65-73.
- [72] AKINCIOĞLU G. Investigation of the Effect of Cryogenic Treatment Cubic Boron Nitride Turning Insert Tools[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(2): 1280-1288.
- [73] ŞİRİN Ş, SARIKAYA M, YILDIRIM Ç V, et al. Machinability Performance of Nickel Alloy X-750 with Si-AlON Ceramic Cutting Tool under Dry, MQL and hBN Mixed Nanofluid-MQL [J]. *Tribology International*, 2021, 153: 106673.
- [74] YANG Houchuan, CHEN Zhitong, ZHOU Zitong. Influence of Cutting Speed and Tool Wear on the Surface Integrity of the Titanium Alloy Ti-1023 during Milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5): 1113-1126.
- [75] YILDIRIM Ç V, KIVAK T, SARIKAYA M, et al. Evaluation of Tool Wear, Surface Roughness/Topography and Chip Morphology when Machining of Ni-based Alloy 625 under MQL, Cryogenic Cooling and CryoMQL [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 2079-2092.
- [76] HASSANPOUR H, RASTI A, SADEGHI M H, et al. Investigation of Roughness, Topography, Microhardness, White Layer and Surface Chemical Composition in High Speed Milling of Ti-6Al-4V Using Minimum Quantity Lu-

- brication[J]. *Machining Science and Technology*, 2020, 24(5): 719-738.
- [77] GUO Yuebin, KLINK A, FU Chenhao, et al. Machinability and Surface Integrity of Nitinol Shape Memory Alloy [J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(1): 83-86.
- [78] XU Dongdong, LIAO Zhirong, AXINTE D, et al. A Novel Method to Continuously Map the Surface Integrity and Cutting Mechanism Transition in Various Cutting Conditions [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 151: 103529.
- [79] THAKUR D G, RAMAMOORTHY B, VIJAYARAGHAVAN L. Effect of Cutting Parameters on the Degree of Work Hardening and Tool Life during High-speed Machining of Inconel 718[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(5): 483-489.
- [80] REN Xiaoping, LIU Zhanqiang. Influence of Cutting Parameters on Work Hardening Behavior of Surface Layer during Turning Superalloy Inconel 718[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5): 2319-2327.
- [81] TOMAZ Í V, PARDAL J M, FONSECA M C. Influence of Minimum Quantity Lubrication in the Surface Quality of Milled Maraging Steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9): 4301-4311.
- [82] ZHOU Jinhua, REN Junxue, YAO Changfeng. Multi-objective Optimization of Multi-axis Ball-end Milling Inconel 718 via Grey Relational Analysis Coupled with RBF Neural Network and PSO Algorithm [J]. *Measurement*, 2017, 102: 271-285.
- [83] MOREIRA L C, LI W D, LU X, et al. Supervision Controller for Real-time Surface Quality Assurance in CNC Machining Using Artificial Intelligence[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 158-168.
- [84] ROTELLA G, DILLON O W, UMBRELLO D, et al. The Effects of Cooling Conditions on Surface Integrity in Machining of Ti6Al4V Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1): 47-55.
- [85] UMBRELLO D, MICARI F, JAWAHIR I S. The Effects of Cryogenic Cooling on Surface Integrity in Hard Machining: a Comparison with Dry Machining[J]. *CIRP Annals*, 2012, 61(1): 103-106.
- [86] KAYNAK Y, LU Tao, JAWAHIR I S. Cryogenic Machining-induced Surface Integrity: a Review and Comparison with Dry, MQL, and Flood-cooled Machining[J]. *Machining Science and Technology*, 2014, 18(2): 149-198.
- [87] PU Z, OUTEIRO J C, BATISTA A C, et al. Enhanced Surface Integrity of AZ31B Mg Alloy by Cryogenic Machining towards Improved Functional Performance of Machined Components [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 17-27.
- [88] DEBNATH S, REDDY M M, YI Q S. Environmental Friendly Cutting Fluids and Cooling Techniques in Machining: a Review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 83: 33-47.
- [89] SHOKRANI A, DHOKIA V, MUNOZ-ESCALONA P, et al. State-of-the-art Cryogenic Machining and Processing [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2013, 26(7): 616-648.
- [90] KE Yinglin, DONG Huiyue, LIU Gang, et al. Use of Nitrogen Gas in High-speed Milling of Ti-6Al-4V[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(3): 530-534.
- [91] ZHAO Wei, REN Fei, IQBAL A, et al. Effect of Liquid Nitrogen Cooling on Surface Integrity in Cryogenic Milling of Ti-6Al-4 V Titanium Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(3): 1497-1508.
- [92] SHAH P, KHANNA N, CHETAN. Comprehensive Machining Analysis to Establish Cryogenic LN<sub>2</sub> and LCO<sub>2</sub> as Sustainable Cooling and Lubrication Techniques [J]. *Tribology International*, 2020, 148: 106314.
- [93] YILDIRIM Ç V. Investigation of Hard Turning Performance of Eco-friendly Cooling Strategies: Cryogenic Cooling and Nanofluid Based MQL [J]. *Tribology International*, 2020, 144: 106127.
- [94] YAZID M Z A, CHEHARON C H, GHANI J A, et al. Surface Integrity of Inconel 718 when Finish Turning with PVD Coated Carbide Tool under MQL[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 19: 396-401.
- [95] SHAH P, GADKARI A, SHARMA A, et al. Comparison of Machining Performance under MQL and Ultra-high Voltage EMQL Conditions Based on Tribological Properties [J]. *Tribology International*, 2021, 153: 106595.
- [96] RAHIM E A, SASAHARA H. Investigation of Tool Wear and Surface Integrity on MQL Machining of Ti-6Al-4V Using Biodegradable Oil [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, 225(9): 1505-1511.
- [97] SALEEM M Q, MEHMOOD A. Eco-friendly Precision Turning of Superalloy Inconel 718 Using MQL Based Vegetable Oils: Tool Wear and Surface Integrity Evaluation [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 73: 112-127.
- [98] GAURAV G, SHARMA A, DANGAYACH G S, et al. Assessment of Jojoba as a Pure and Nano-fluid Base Oil in Minimum Quantity Lubrication (MQL) Hard-turning of Ti-6Al-4V: a Step towards Sustainable Machining [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122553.
- [99] SHOKRANI A, BETTS J, JAWAHIR I S. Improved Performance and Surface Integrity in Finish Machining of Inconel 718 with Electrically Charged Tungsten Disulphide MQL [J]. *CIRP Annals*, 2022, 71(1): 109-112.
- [100] KILINCARSLAN E, KABAVE KILINCARSLAN S, CETIN M H. Evaluation of the Clean Nano-cutting Fluid by Considering the Tribological Performance and Cost Parameters [J]. *Tribology International*, 2021, 157: 106916.
- [101] ROSNAN R, MURAD M N, AZMI A I, et al. Effects of Minimal Quantity Lubricants Reinforced with Nanoparticles on the Performance of Carbide Drills for Drilling Nickel-Titanium Alloys [J]. *Tribology International*, 2019, 136: 58-66.
- [102] YILDIRIM Ç V. Experimental Comparison of the Performance of Nanofluids, Cryogenic and Hybrid Cooling in Turning of Inconel 625 [J]. *Tribology International*, 2019, 137: 366-378.
- [103] STERLE L, MALLIPEDDI D, KRAJNIK P, et al. The Influence of Single-channel Liquid CO<sub>2</sub> and MQL Delivery on Surface Integrity in Machining of Inconel 718 [J]. *Procedia CIRP*, 2020, 87: 164-169.
- [104] ZHAO Chunmei, GAO Yukui, GUO Jing, et al. Investigation on Residual Stress Induced by Shot Peening [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(3): 1340-1346.
- [105] XU Chunling, WANG Xin, GENG Yongxiang, et al. Ef-

- fect of Shot Peening on the Surface Integrity and Fatigue Property of Gear Steel 16Cr<sub>3</sub>NiWMoVNbE at Room Temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 172: 107668.
- [106] CHENG Yongjie, WANG Yanshuang, LIN Jianghai, et al. Research Status of the Influence of Machining Processes and Surface Modification Technology on the Surface Integrity of Bearing Steel Materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(7): 2897-2923.
- [107] YAO Changfeng, WU Daoxia, MA Lufei, et al. Surface Integrity Evolution and Fatigue Evaluation after Milling Mode, Shot-peening and Polishing Mode for TB6 Titanium Alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 387: 1257-1264.
- [108] LIN Xiaojun, WU Dongbo, SHAN Xiufeng, et al. Flexible CNC Polishing Process and Surface Integrity of Blades [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(6): 2735-2746.
- [109] WU Daoxia, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Effect of Turning and Surface Polishing Treatments on Surface Integrity and Fatigue Performance of Nickel-based Alloy GH4169[J]. *Metals*, 2018, 8(7): 549-565.
- [110] PREVÉY P S, CAMMETT J. Low Cost Corrosion Damage Mitigation and Improved Fatigue Performance of Low Plasticity Burnished 7075-T6[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001, 10(5): 548-555.
- [111] HUA Yang, LIU Zhanqiang, WANG Bing, et al. Surface Modification through Combination of Finish Turning with Low Plasticity Burnishing and Its Effect on Fatigue Performance for Inconel 718[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 375: 508-517.
- [112] EL-KHABEERY M M, EL-AXIR M H. Experimental Techniques for Studying the Effects of Milling Roller-burnishing Parameters on Surface Integrity [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(12): 1705-1719.
- [113] TUGAY I O, HOSSEINZADEH A, YAPICIG G. Hardness and Wear Resistance of Roller Burnished 316L Stainless Steel[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 2405-2409.
- [114] LUO Hongyun, LIU Jianying, WANG Lijiang, et al. Investigation of the Burnishing Process with PCD Tool on Non-ferrous Metals[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(5): 454-459.
- [115] DANDE K K, PRASAD K E. Application of Roller Burnishing Process for Final Machining of Cylindrical Surface [J]. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2015, 12(1): 01-07.
- [116] XU Dongdong, LIAO Zhirong, AXINTE D, et al. Investigation of Surface Integrity in Laser-assisted Machining of Nickel Based Superalloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 194: 108851.
- [117] KALANTARI O, JAFARIAN F, FALLAH M M. Comparative Investigation of Surface Integrity in Laser Assisted and Conventional Machining of Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 90-98.
- [118] SHANG Zhendong, LIAO Zhirong, SARASUA J A, et al. On Modelling of Laser Assisted Machining: Forward and Inverse Problems for Heat Placement Control[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 138: 36-50.
- [119] DING Hongtao, SHIN Y C. Laser-assisted Machining of Hardened Steel Parts with Surface Integrity Analysis[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(1): 106-114.
- [120] VENKATESAN K. The Study on Force, Surface Integrity, Tool Life and Chip on Laser Assisted Machining of Inconel 718 Using Nd: YAG Laser Source[J]. *Journal of Advanced Research*, 2017, 8(4): 407-423.
- [121] LIANG Xiaoliang, ZHANG Canbin, CHEUNG C F, et al. Micro/Nano Incremental Material Removal Mechanisms in High-frequency Ultrasonic Vibration-assisted Cutting of 316L Stainless Steel [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 191: 104064.
- [122] BUI A T, TRAN T V C, NGUYEN K H, et al. The Future of Ultrasonic-assisted Turning: Development Directions and Research Prospects[C]//EAI International Conference on Renewable Energy and Sustainable Manufacturing. Cham: Springer, 2024: 281-296.
- [123] PUGA H, GRILO J, CARNEIRO V H, et al. Ultrasonic Assisted Turning of Al Alloys: Influence of Material Processing to Improve Surface Roughness [J]. *Surfaces*, 2019, 2(2): 326-335.
- [124] PATIL S, JOSHI S, TEWARI A, et al. Modelling and Simulation of Effect of Ultrasonic Vibrations on Machining of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(2): 694-705.
- [125] NATH C, RAHMAN M. Effect of Machining Parameters in Ultrasonic Vibration Cutting[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(9): 965-974.
- [126] HE Yu, ZHOU Zhongming, ZOU Ping, et al. Study of Ultrasonic Vibration-assisted Thread Turning of Inconel 718 Superalloy[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(10): 1687814019883772.
- [127] KANG Renke, ZHANG Pengnan, WEI Zhaocheng, et al. Experimental Study on Ultrasonic Assisted Turning of GH4068 Superalloy[J]. *Materials*, 2023, 16(9): 3554.
- [128] SCHUBERT A, NESTLER A, PINTERNAGEL S, et al. Influence of Ultrasonic Vibration Assistance on the Surface Integrity in Turning of the Aluminium Alloy AA2017 [J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2011, 42(7): 658-665.
- [129] PENG Zhenlong, ZHANG Xiangyu, ZHANG Deyuan. Improvement of Ti-6Al-4V Surface Integrity through the Use of High-speed Ultrasonic Vibration Cutting[J]. *Tribology International*, 2021, 160: 107025.
- [130] 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.
- [131] HSU C Y, HUANG C K, WU C Y. Milling of MAR-M247 Nickel-based Superalloy with High Temperature and Ultrasonic Aiding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(9): 857-866.
- [132] LIN S Y, YANG B H. Experimental Study of Cutting Performance for Inconel 718 Milling by Various Assisted Machining Techniques [J]. *Solid State Phenomena*, 2019, 294: 129-134.
- [133] DOMINGUEZ-CABALLERO J, AYVAR-SOBERANIS S, KIM J, et al. Hybrid Simultaneous Laser- and Ultrasonic-assisted Machining of Ti-6Al-4V Alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(3): 1903-1916.
- [134] JIAO Feng, NIU Ying, ZHANG Mingjun, et al. Research on Characteristics of Tool Wear in Laser Heating

- and Ultrasonic Vibration Cutting of Tungsten Carbide[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8 (11): 1687814016679786.
- [135] REHBINDER P. New Physico-Chemical Phenomena in the Deformation and Mechanical Treatment of Solids[J]. Nature, 1947, 159(4052): 866-867.
- [136] 王红, 王兵, 刘战强, 等. 表层改性处理改善难加工材料切削加工性的研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59 (15): 311-332.
- WANG Hong, WANG Bing, LIU Zhanqiang, et al. Research Progress on Machinability Improvement of Difficult-to-machine Materials with Surface Modification Methods [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (15): 311-332.
- [137] SHAW M C. On the Action of Metal Cutting Fluids at Low Speeds[J]. Wear, 1959, 2(3): 217-227.
- [138] KOHN E M. A Theory on the Role of Lubricants in Metal Cutting at Low Speeds and in Boundary Lubrication[J]. Wear, 1965, 8(1): 43-59.
- [139] UDUPA A, VISWANATHAN K, DAVIS J M, et al. A Mechanochemical Route to Cutting Highly Strain-hardening Metals[J]. Tribology Letters, 2018, 67(1): 4.
- [140] CHAUDHARI A, SOH Z Y, WANG Hao, et al. Rehbinder Effect in Ultraprecision Machining of Ductile Materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 133: 47-60.
- [141] YIN Qingan, LIU Zhanqiang, WANG Bing. Machinability Improvement of Inconel 718 through Mechanochemical and Heat Transfer Effects of Coated Surface-active Thermal Conductive Mediums[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 876: 160186.

(编辑 王旻玥)

**作者简介:**刘战强,男,1969年生,教授、博士研究生导师。主要研究方向为切削加工理论。E-mail: melius@sdu.edu.cn。  
赵永耀\*(通信作者),男,2002年生,硕士研究生。研究方向为金属切削加工。E-mail: sduzhaoyongyao@mail.sdu.edu.cn。

**本文引用格式:**

刘战强,赵永耀,王兵,等. 难加工金属材料切削表面完整性预测与调控[J]. 中国机械工程,2026,37(3):509-527.

LIU Zhanqiang, ZHAO Yongyao, WANG Bing, et al. Prediction and Conditioning of Surface Integrity for Cutting Difficult-to-machine Metallic Materials [J]. China Mechanical Engineering, 2026,37(3):509-527.

## 2026工业母机产业链高质量发展大会(一号通知)

工业母机技术密集、产业链关联度强,是高端装备制造的核心基础,已成为制造强国之间科技竞争的关键领域,具有重要的战略基础地位。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》提出,将完善新型举国体制,采取超常规措施,全链条推动包括工业母机在内的重点领域关键核心技术攻关取得决定性突破。为集中展示我国在这一领域的重大技术突破与创新成果,搭建“产学研用金政”一体化的高端交流平台,促进技术合作、产业协同和区域发展。经研究,拟举办“2026工业母机产业链高质量发展大会”。现将相关事项通知如下:

一、时间地点

时间:2026年9月29—30日

地点:浙江嘉兴·乌镇 互联网之光博览中心

二、组织机构

主办单位:中国机械工程学会;国际智能制造联盟

承办单位:嘉兴市机床工具与智能装备协会;北京中机天达科技发展有限责任公司

协办单位:嘉兴大学;中国机械工程学会生产工程分会;中国机械工程学会设备智能运维分会;中国机械工程学会铸造分会;中国机械工程学会塑性工程分会;中国机械工程学会焊接分会;中国机械工程学会流体传动与控制分会;(协办单位、支持单位更新中)

三、主要活动单元

(一)2026工业母机产业链高质量发展大会

1)大会开幕式

邀请院士、专家学者、企业领袖等嘉宾出席,并发布重

要科技成果。

2)特邀主旨报告

围绕全球产业链重塑、智能制造与工业母机融合、关键零部件研制等技术发展趋势与中国机遇等议题,邀请行业权威专家进行主旨演讲与技术交流。

(二)2026工业母机关键零部件展览会

包括技术成果展示与交易、AI+装备、关键零部件、工装夹具配套等展区。展览面积12 000平方米,参展商200~300家。

(三)专题活动

1)第七届长三角智能制造协同发展大会。

2)2026年中国机械工程学会设备智能运维学术年会。

3)工业母机标准体系建设与高质量发展论坛。

4)中国机械工程学会嘉兴科技服务站—工业母机产业对接会。

5)AI赋能机床数字化设计与制造技术交流会。

6)高端工业母机流体传动与控制前沿技术论坛。

7)“好设计奖”项目评选,项目路演,专题调研,技能大赛,大学生大赛等。

(其他议题更新中)

四、联系方式

会议通知及报名通道:<https://www.cmcs.org/hdyg/f58a0b654c254613b47808aaa93ba5a0.html>

(工作总部)