

研究综述

高温合金磨削热力耦合及其对 表面完整性的影响研究现状

刘颖^{a,b}, 徐佳玉^a, 肖贵坚^{a,b}, 周坤^{a,b}, 李少川^a, 黄云^{a,b}

(重庆大学 a.机械与运载工程学院 b.机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 高温合金具有耐热性、耐腐蚀性等优良性能, 被广泛应用于航空发动机的精密制造与修复。磨削能够提高部件的加工精度和表面完整性, 是加工高温合金材料的重要方法。在磨削过程中, 高温合金因材料的高强韧性, 使得磨具磨损严重, 并且磨削时冷却液难以进入磨削弧区, 导致高温合金的磨削力和磨削温度较高。在多刃磨削加工下, 复杂的热-力耦合过程对高温合金表面完整性有着重要影响, 表面完整性直接影响服役性能。从产生机理、表征方法及控制等方面阐述了磨削热和磨削力的研究现状, 首先介绍了高温合金磨削热及磨削力产生的机理及原因, 进而从刚性磨削和柔性磨削的角度综述了磨削温度和磨削力的预测模型及方法, 从冷却润滑、工艺参数优化及砂轮结构改进等方面调研了磨削温度和磨削力的控制策略。从间接耦合法的角度介绍了磨削热-力耦合建模过程。最后, 在概述磨削热力耦合的基础上, 总结了在磨削热力耦合作用下高温合金的表面粗糙度、表面形貌、组织结构及残余应力等方面的研究成果, 并对高温合金磨削热力耦合作用的研究方向进行了展望。

关键词: 高温合金; 磨削; 热力耦合; 表面完整性

中图分类号: TG580.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)03-0001-18

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.001

Research Status of Superalloy Grinding Thermal Mechanical Coupling and Their Effects on Surface Integrity

LIU Ying^{a,b}, XU Jia-yu^a, XIAO Gui-jian^{a,b}, ZHOU Kun^{a,b}, LI Shao-chuan^a, HUANG Yun^{a,b}

(a. College of Mechanical and Vehicle Engineering, b. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Superalloys are widely used in precision manufacturing and repair of aero-engines because of their excellent properties in heat resistance and corrosion resistance. As the last process of machining, grinding can improve the machining

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-05-10

Received: 2022-02-10; Revised: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金 (U1908232); 中国博士后基金面上项目 (2021M700586); 国家科技重大专项 (2017-VII-0002-0095)

Fund: National Natural Science Foundation of China (U1908232); China Postdoctoral Science Foundation (2021M700586); National Science and Technology Major Project (2017-VII-0002-0095)

作者简介: 刘颖 (1973—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能制造及装备。

Biography: LIU Ying (1973-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: intelligent manufacturing and equipment.

通讯作者: 肖贵坚 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高性能表面磨削加工。

Corresponding author: XIAO Gui-jian (1986-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: high performance surface grinding.

引文格式: 刘颖, 徐佳玉, 肖贵坚, 等. 高温合金磨削热力耦合及其对表面完整性的影响研究现状[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 1-18.

LIU Ying, XU Jia-yu, XIAO Gui-jian, et al. Research Status of Superalloy Grinding Thermal Mechanical Coupling and Their Effects on Surface Integrity[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 1-18.

accuracy and surface integrity of components. It is an important method to process superalloy materials. In the grinding process of superalloys, the grinding force and grinding temperature of superalloys are high due to the high strength and toughness of materials, serious wear of abrasives in the grinding process, and the difficulty of coolant entering the grinding contact arc area. The complex thermal-mechanical coupling process in multi-edge grinding has an important impact on the surface integrity of superalloys. The surface integrity directly affects the service performance of components.

Therefore, the research status of grinding heat and grinding force was introduced from three aspects: generation mechanism, characterization method, and control method. Firstly, the generation mechanism of superalloy grinding heat and grinding force, the detection method of grinding temperature, the reasons for high superalloy grinding temperature and grinding force, and the conduction of grinding temperature were introduced. Furthermore, the prediction models and methods of grinding temperature and grinding force were summarized from the perspective of rigid grinding and flexible grinding. The research on the modeling of grinding temperature and grinding force under rigid contact was sufficient, while the modeling of grinding temperature and grinding force under flexible contact did not consider the elasticity adequately or ignored the elasticity, therefore, the accuracy of the prediction results of grinding temperature and grinding force under flexible contact was affected. The control strategies of grinding temperature and grinding force were investigated from the aspects of cooling lubrication, optimization of process parameters, and improvement of grinding wheel structure, so as to provide guidance for reducing grinding temperature and grinding force.

The modeling process of grinding thermal-mechanical coupling was introduced from the perspective of the direct coupling method and indirect coupling method. Although the direct coupling method can directly add load, the process was too complex. Scholars mainly modeled and simulated the thermal-mechanical coupling from the perspective of the indirect coupling method. On the basis of summarizing the research on grinding heat and grinding force, the research on the surface burn, metallurgical structure, and residual stress of superalloy under grinding thermal-mechanical coupling was summarized, and the generation, detection, and control methods of grinding burn were introduced in detail. The changes of metallurgical structure (plastic deformation, white layer, etc.) caused by grinding temperature and grinding force were introduced: the main manifestations of plastic deformation of superalloy, the generation and inhibition methods of white layer, and the influence law of grinding temperature and grinding force on work hardening; Then the changes of residual stress caused by grinding heat and grinding force were introduced from the prediction method of residual stress based on thermal-mechanical coupling model, and the control of residual stress and grinding surface modification through the control of grinding heat. Finally, according to the research progress of superalloy grinding force, grinding heat, and their effects on the surface, the research direction of superalloy grinding thermal-mechanical coupling was prospected.

KEY WORDS: superalloy; grinding; thermal mechanical coupling; surface integrity

高温合金具有优异的耐高温、抗腐蚀等性能,被广泛应用于航空、航天等重要领域中^[1-2]。作为航空发动机的关键材料,涡轮发动机的转子叶片、涡轮盘、高压涡轮外环和燃烧室壁等都使用高温合金材料进行制造及修复^[3],这些部件的制造和修复是国家重大需求之一。磨削加工作为一种多刃加工方式,能够提高零部件的加工精度和表面完整性,且具有较高的加工效率,对于高温合金材料制成的零部件的精密加工至关重要^[4]。

由于高温合金具有较高的屈服强度^[5],因此在磨削高温合金时需要消耗较高的能量。另外,由于高温合金具有低导热性^[6],导致磨削过程中的热量极易聚集。尤其表现在成型磨削加工等情况下,容易在磨削表面形成局部高温,且磨削过程中的加工硬化现象较严重,容易造成工件表面出现烧伤或龟裂现象。高温合金磨削极易发生磨具黏附现象,在高硬度下磨具磨

损较严重,磨削温度较高,导致磨具的使用寿命较短。

高温合金具有热导率低、断裂韧性高等特点,在磨削时磨具黏附严重,冷却液难以进入磨削弧区,导致高温合金的磨削力和磨削温度较高。有研究表明,高温合金的磨削力达到 200 N 以上^[7],磨削温度达到 950 ℃ 以上^[8],而磨削加工的热-力耦合过程对高温合金的表面形貌、组织结构及残余应力等表面完整性有着复杂的影响关系,表面完整性直接影响工件的服役性能^[9]。

文中从产生机理、表征方法及优化控制等方面阐述了磨削热和磨削力的研究现状,并从直接耦合法和间接耦合法的角度阐述了磨削热-力耦合建模过程。在概述磨削过程中产生温度和力的基础上,总结了基于磨削热-力耦合作用下高温合金的表面粗糙度、表面形貌、组织结构及残余应力等方面的研究成果,并对高温合金的磨削热、磨削力及表面完整性的研究及发

展方向进行了展望。

1 高温合金磨削热

1.1 磨削热的形成

磨削加工是一个复杂的过程。在磨削过程中, 磨粒前刀面与磨屑表面和工件表面不断地摩擦, 摩擦力不断做功, 并以一定的转化效率生成摩擦热, 涉及切削、滑擦、犁耕 3 个阶段, 导致的塑性变形、材料去除等会引起磨削的生热和传热。

在加工高温合金材料时, 由于高温合金中含有 Cr、Co、W、Ti、Mo、Al 等元素, 这些元素在高温合金中起到了强化作用^[10], 因此能够大幅提升合金的热稳定性和热强性, 在金属中形成化合物。这有利于提高高温合金的强度和抗磨能力^[11], 因此材料的强度较大。同时也导致磨削过程中的能耗较大, 产热较多。由于高温合金材料的导热系数较低, 因此其导热性较差。在进行高温合金磨削时, 即使采用刚玉、CBN 超硬磨料及金刚石磨料等, 都会伴随着强烈的黏附现象, 如图 1 所示^[12]。磨料的黏附导致磨削过程中的磨削温度急剧升高, 并且在磨削过程中磨具的高速旋转使得周围产生气障作用, 导致冷

却液难以进入磨削弧区^[10]。当膜沸腾现象出现时, 会影响对流换热^[13], 因此磨削高温合金材料时往往会产生较高的磨削温度。

1.2 磨削温度的表征

在磨削过程中, 温度信号会受到其他信号的干扰, 这对于磨削温度的检测是一个难题。目前较常用的检测方法包括热电偶检测和红外热成像仪检测, 它们的测温原理如图 2 所示^[14-15]。红外热像仪检测方法为非接触式检测, 对工件无损伤, 但无法测量接触点的温度。热电偶测温为接触式测量, 能够测量接触点的温度, 测量精度较高, 但会对工件造成破坏, 且只能测量磨削点温度, 无法测量磨削温度场。由此可见, 在工程中需要根据实际要求选择合适的测量方式。

由于磨削温度对表面完整性具有较大的影响, 因此磨削温度预测被广泛研究。磨削温度主要依据移动热源理论进行运算, 得到有关磨削温度函数形式的解。其中磨削产生的总热通量可以分为传入工件的热通量 q_w 、传入磨具的热通量 q_s 、冷却液带走的热通量 q_f 及磨屑带走的热通量 q_{ch} , 如图 3 所示^[16], 可由式 (1) 计算。

$$q_t = q_w + q_{ch} + q_s + q_f \quad (1)$$

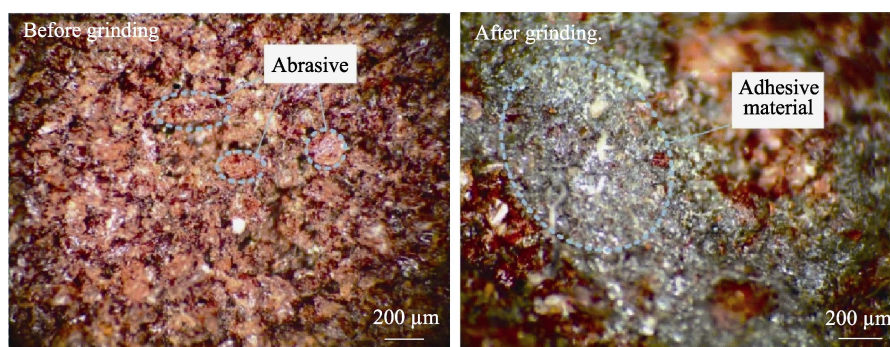


图 1 砂轮磨削高温合金前后的表面形貌^[12]

Fig.1 Surface morphology before and after grinding superalloy with grinding wheel^[12]

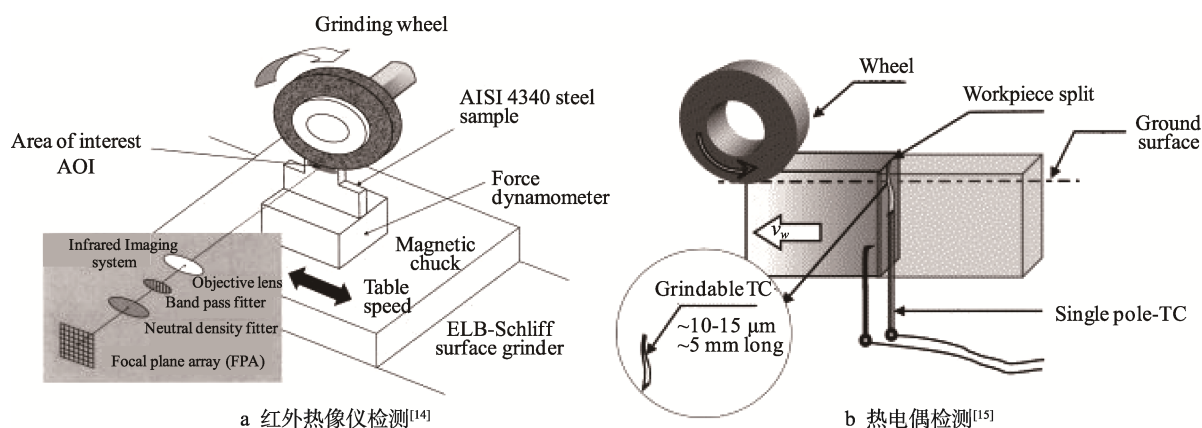
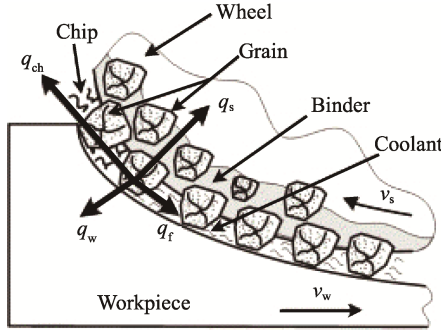


图 2 测温原理

Fig.2 Principle of temperature measurement: a) infrared thermal imager temperature measurement^[14]; b) thermocouple temperature measurement^[15]

图3 磨削温度的产生及传导^[16]Fig.3 Generation and transmit of grinding temperature^[16]

磨削区域总热通量 q_t 的求解见式（2）。

$$q_t = \frac{F_t v_s}{S} \quad (2)$$

式中： F_t 为磨削切向力； v_s 为磨具线速度； S 为接触面积。

冷却液带走的热通量可由式（3）进行计算^[17]。

$$q_f = h \Delta T \quad (3)$$

式中： h 为热传导系数； ΔT 为迭代确定的接触区域最大温升。

磨屑的热通量主要与材料的比热容、密度、砂轮特性系数及磨削深度有关，可由式（4）进行计算^[17]。

$$q_{ch} = \frac{c_w \cdot \rho_w \cdot T \cdot d \cdot f}{L_c} \quad (4)$$

式中： c_w 、 ρ_w 分别为工件的比热容和密度； T 为工件融化温度； d 和 L_c 分别为切削深度和宽度； f 为热源移动速度。

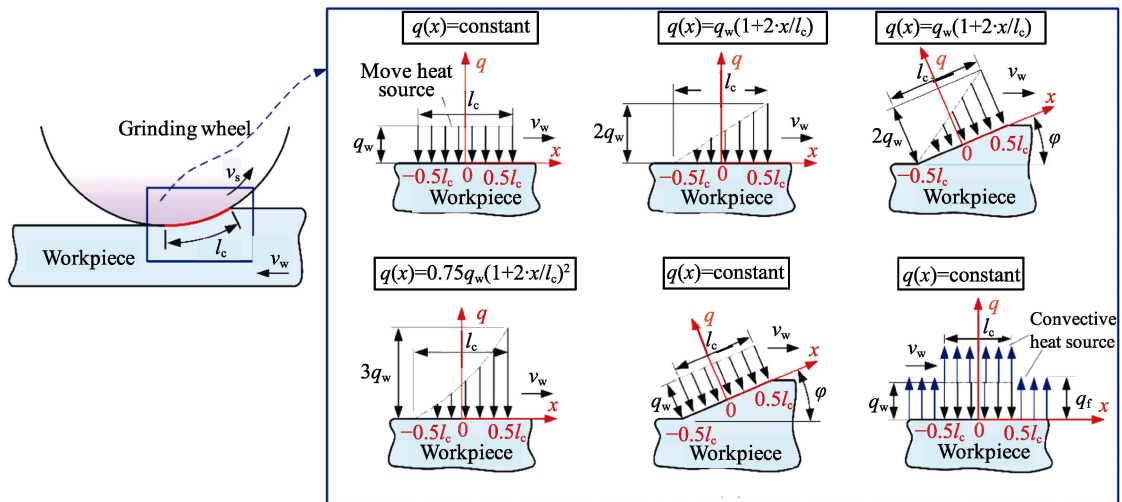
工件与磨具的热分配比 R_w 可以通过磨粒与工件的热分配比进行计算^[18]，见式（5）。

$$R_w = \frac{1}{1 + \frac{0.974 k_g}{\sqrt{k_w \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot r_0 \cdot v_s}}} \quad (5)$$

式中： k_g 为磨粒导热系数； r_0 为磨粒有效切入半径，其值主要与磨具粒度相关。

根据进入磨屑的热量、冷却液带走的热量，以及磨具和工件的热量分配比得到进入工件的热量。流入工件的热源强度模型被等效成不同类型的热源，不同磨削情况对应的热源如图4所示^[19]。其中，矩形均匀热源模型^[20]、三角形热源模型^[21]及抛物线热源模型^[22]最为常用。

砂轮磨削是高温合金常用的加工方式，国内外学者对砂轮磨削高温合金的磨削性能^[23-24]、表面完整性^[25-27]、磨粒磨损等进行了研究。关于砂轮磨削温度预测也同样进行了较多研究，由于砂轮磨削材料的去除量较大，且为刚性接触，因此磨削温度较高。国内外学者对砂轮磨削温度进行了建模与仿真，Dai等^[28]建立了风力机叶片杯型砂轮磨削过程中的温度场模型，通过计算磨削过程中材料的去除深度，建立了平面磨削热源模型，并对不同磨削工艺参数下的温度进行了数值模拟，所建模型与试验温度之间的误差较小。连美娟等^[21]根据磨削过程中的热传导规律，采用三角形热源模型对磨削温度进行了数值计算，通过建立磨削有限元模型对数值计算结果进行了验证。为了进一步提高预测模型的准确性，Jiang等^[29]在前人工作的基础上，建立了磨削接触区磨粒与工件的微观相互作用模型，该模型描述了任意尺寸、任意突出高度和任意位置下磨粒相互作用的磨削温度模型，提高了预测模型的精度。Li等^[19]建立了磨削温度场模型，考虑了磨粒-工件微观交互作用（即划擦、犁耕和切削），建立了随机磨粒离散温度模型（SGDTM），得到了具有局部热信息的完整2D/3D温度图，并且包含磨粒尺度（即每个磨粒引起的温度），使得预测模型精度进一步提升，预测过程如图5所示。Jamshidi等^[17]在磨削温度的建模过程中，考虑了砂轮的振荡特性及工件侧面的热对流边界条件，从而提高了预测模型的准确性。

图4 磨削热源模型^[19]Fig.4 Grinding heat source model^[19]

成形磨削是砂轮磨削中的一种特殊类型, 成形磨削冷却液较难进入磨削弧区, 所产生的温度相对较高, 因此成型磨削温度的计算也是一个热点问题。成型磨削温度需要考虑多个热源之间的相互影响。Miao 等^[13]根据砂轮与工件的能量分配比, 在有限元软件中设定了材料特性、几何参数和热边界(如图 6 所示), 将热源模型简化为三角形热源, 建立了 Inconel 718 涡轮叶片叶根蠕变进给磨削过程的有限元热模型, 并进行了验证。同时基于该模型, 讨论了叶根轮廓和叶根几何形状对磨削温度的影响。郭国强等^[30]在平面磨热源模型和温度传导模型的基础上, 构建了成形磨削温度的数值计算模型, 分别考虑了 1 个平面热源和 2 个斜面热源条件下的工件表面磨削温度情况, 对成形磨削温度进行了预测。

由于砂带磨削等柔性磨削具有弹性变形作用, 在加工过程中能够适应各种形状的工件, 同时能够保证较高的加工效率, 因此广泛应用于形状复杂、难加工高温合金的试件加工中^[31-33]。高温合金的柔性磨削同样能够达到很高的温度^[8], 因此国内外一些学者对柔性磨削温度进行了理论建模。王文玺等^[34]针对砂带磨削原理, 基于赫兹接触理论计算了接触压力, 根据库仑摩擦定律计算了热源分布情况, 并以单颗磨粒分布温度场推算了整体温度场的分布情况, 建立了采用单个接触轮和多个接触轮时的钢轨打磨温度模型, 并与其他有限元模型进行了比较。王军伟^[35]基于移动热源法, 建立了机器人砂带磨削高温合金磨削温度模型, 基于此对烧伤进行预测, 但未考虑对流换热和热辐射, 将外部边界条件设置为绝热条件。Fan 等^[36]建立

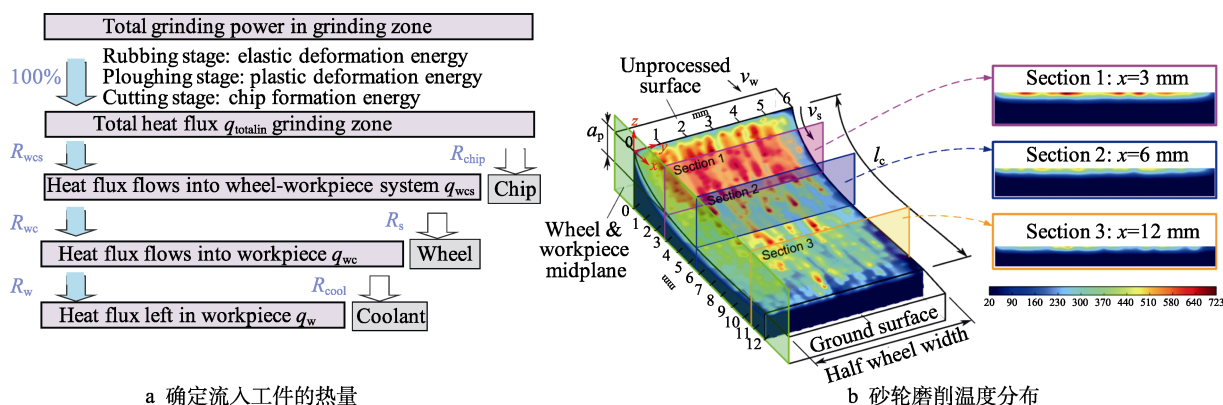


图 5 基于移动热源法的磨削温度分布仿真^[19]

Fig.5 Simulation of grinding temperature distribution based on moving heat source method^[19]: a) calculation of heat flux into workpiece; b) simulation of wheel grinding temperature

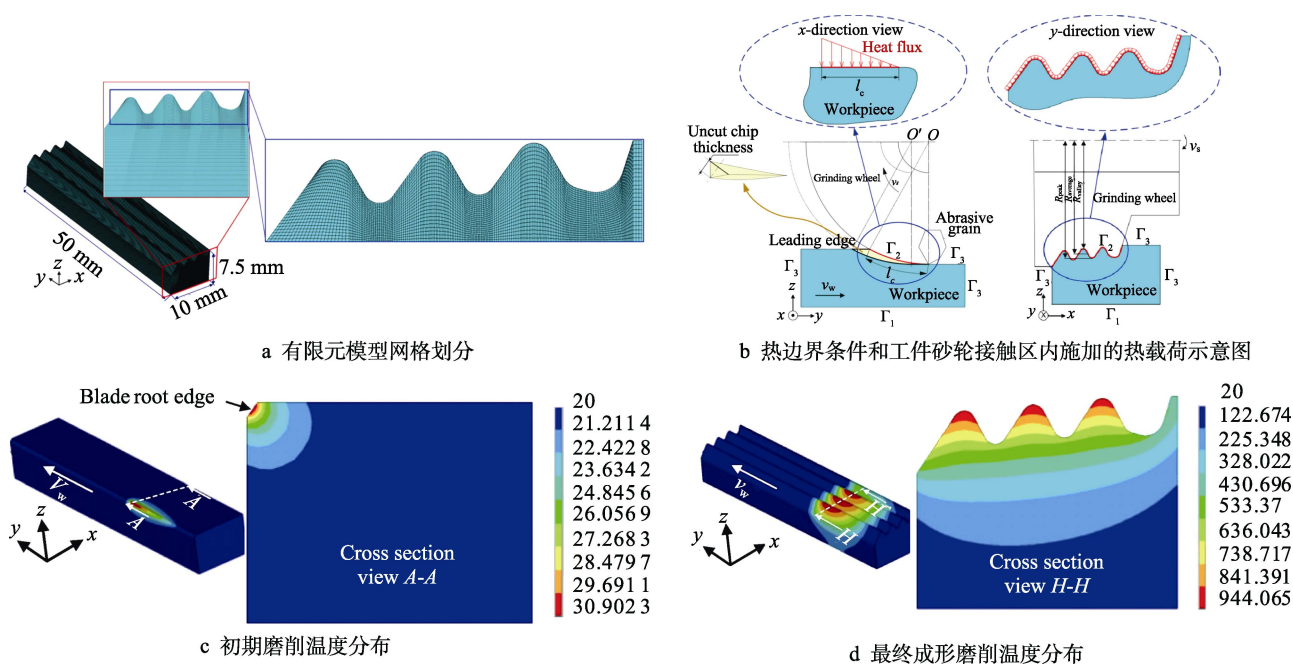


图 6 成形磨削温度场计算^[13]

Fig.6 Calculation of temperature field in form grinding^[13]: a) meshing of finite element model; b) schematic diagram of thermal boundary conditions and thermal load applied in workpiece grinding wheel contact zone; c) distribution of initial grinding temperature; d) distribution of final form grinding temperature

了开式砂带钢轨打磨过程多磨料划擦温度场模型,结果表明,温度场由矩形状变为带状,磨削力的变化对幅值和面积产生了影响。张毅等^[37]从磨削接触区域弹性入手,建立了砂带恒压磨削有限元模型,探究了恒压磨削过程中热源分布规律,并通过热电偶露头埋设和浅埋设2种测温方式对磨削过程进行测温,有限元模型与试验测得温度基本吻合。杨天勇^[38]依据磨削功率及砂带与工件的接触状态建立了磨削总热源模型,依据热量分配比,得出了传导至工件的热量,最后依据移动热源法建立了工件磨削温度场模型。张帅^[39]考虑了磨削过程中的热对流、热辐射及热传导,将砂带与工件之间的摩擦生热用摩擦因数表示,对磨削过程中的温度场进行了仿真。Ren等^[40]考虑了动态特性,建立了砂带磨削过程中的热量分配模型,考虑了工件热积累及与温度相关的力学性能,建立了磨削过程中的热量分配模型,计算了工件温度,并进行了验证。Volkov等^[41]探究了砂带磨削过程中磨削温度场的变化规律,采用有限差分法对磨削温度场进行了仿真,计算了整个叶片磨削过程中的最大接触温度及温度变化情况,并进行了验证。

关于磨削温度的预测取得了一定的进展,预测模型的准确性较高,但所建立的模型较少考虑磨粒磨削点的温度,即磨削过程中的闪温。在磨削过程中,磨粒磨削点的温度往往更高,因此也会对工件表面完整性产生影响。此外,目前研究的新型磨削液(如植物油等)被广泛用于高温合金磨削加工中,需要根据磨削液的特性考虑磨削液带走的热量,以提高预测结果的准确性。此外,在进行砂带等柔性接触下的磨削温度建模时,对弹性的考虑不充足,这会影响温度预测结果的准确性。

1.3 磨削热的控制

在磨削过程中产生的高温会导致砂轮磨损严重,甚至烧伤工件表面^[42],因此通常需要对磨削温度进行控制。常用的磨削温度控制方法主要有优化磨削工艺参数、润滑及自冷却砂轮。

在高温合金磨削过程中,磨削深度、砂轮线速度

的增加及工件进给速度的减小会引起磨削温度的增大^[43-45],如图7所示。其中,相较于工件进给速度,磨削深度和砂轮线速度对磨削温度的影响更为显著,因此可以采用减小磨削深度、砂轮线速度的方式降低磨削温度。研究表明^[11],当磨削线速度超过30 m/s时,容易在砂轮磨粒中出现严重的黏附现象,恶化砂轮表面,降低工件的表面完整性,因此在磨削高温合金时通常选择线速度不超过30 m/s。当磨削参数相同时,选择CBN等具有较强切削能力的超硬磨料能够降低磨削温度。

为了降低磨削温度,需要在磨削过程中进行冷却润滑。常见的润滑方式主要有浇注润滑、微量润滑^[46]等。张高峰等^[47]对常温干磨、浇注磨削、低温冷风微量润滑(CMQL)及低温纳米微量润滑(Nano-CMQL)4种方式下的磨削温度进行了比较(如图8a所示),结果表明,采用纳米流体润滑冷却时温度最低。为了进一步提升冷却效果,王晓铭等^[48]对比了低温风冷、纳米流体润滑,以及低温风冷与纳米流体润滑相结合等3种条件下的磨削温度(如图8b所示),研究发现,当冷却条件为低温风冷与纳米流体微量润滑相结合时,能够大幅度降低磨削温度。

目前,常用的磨削润滑油分为水性磨削液和油性磨削液2种。其中,油基磨削液通常用于加工表面精度高的场合或成形加工,油基磨削液的润滑作用较好,能够显著减小磨具与工件之间的摩擦作用。由于油基磨削液的冷却能力较差,因此一般用于成形磨削精加工等磨削余量小、温度较低的场合,能够获得较好的表面质量,并且能够避免机床生锈。与油基磨削液相比,水基磨削液具有更好的冷却特性,通常在磨削温度较高的场合下进行,水基磨削液需要增加添加剂,以达到良好的润滑特性,且不易污染。在进行高温合金磨削过程中,通常选用水基乳化液^[13,44,49-51],它不仅具有很好的冷却特性,同时也有很好的润滑特性。特别需要注意的是,在使用CBN砂轮磨削高温合金过程中,CBN材料在高温下容易与水发生反应,这会加速CBN磨料的磨损,因此在进行CBN砂轮磨削高温合金时,应当根据要求合理选择磨削液。在磨

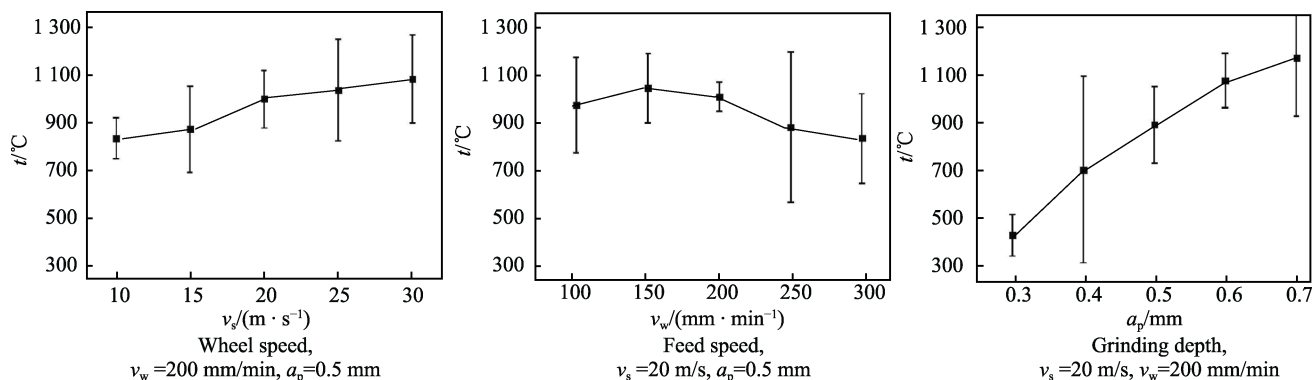


图7 磨削工艺参数对磨削温度的影响规律^[45]

Fig.7 Effects of grinding process parameters on grinding temperature^[45]

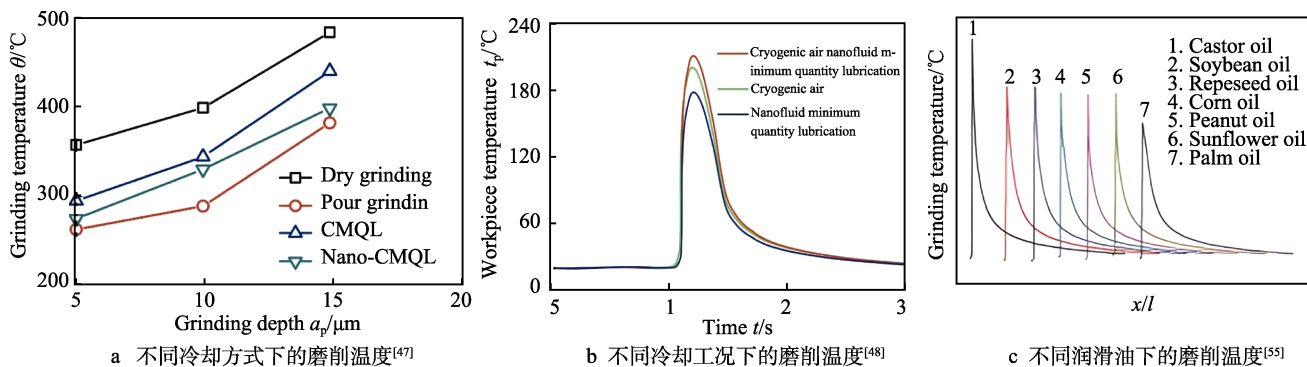


图 8 不同冷却条件下的磨削温度

Fig. 8 Grinding temperature under different cooling conditions: a) different cooling methods^[47]; b) different cooling conditions^[48]; c) different lubricating oil^[55]

削过程中, 由于传统磨削液中常含有对环境及人体健康有害的添加剂^[52], 因此许多研究者针对磨削液存在的问题研发了新型磨削液。例如, 彭锐涛等^[53]制备了水基 ILs-MWCNTs/MoS₂ 纳米流体, 并将其作为内冷却砂轮磨削冷却液, 它在磨削 GH4169 过程中能够起到润滑作用, 结果表明, 与传统磨削液相比, 其表面质量、摩擦因数等都得到改善。吴艳萍^[54]制备了 Al₂O₃ 纳米流体, 并将其应用于高温合金磨削加工中, 结果表明, Al₂O₃ 纳米流体能够获得更好的表面质量。也可以在磨削过程中采用植物油进行冷却润滑, LI 等^[55-56]采用微量润滑的方式进行冷却, 将传统润滑油换成不同种类的植物油, 并对不同植物油下高温合金的 MQL 磨削温度进行了分析 (如图 8c 所示)。为了更好地提高冷却换热效果, 他引入了导热性较好的纳米粒子, 在微量润滑磨削加工时将纳米粒子加入微量润滑基液中, 制成纳米流体, 提高了微量润滑条件下的冷却换热效果, 显著降低了磨削温度。

虽然采用浇注润滑、微量润滑及纳米流体微量润滑等冷却方法能够在一定程度上降低磨削温度, 但是由于在磨削过程中磨削周围容易形成气障层, 冷却液难以进入磨削弧区, 因此难以保证冷却液的换热效率。采用内冷却砂轮能够改善这一情况, LI^[57]设计了一种自吸式内冷却杯形砂轮, 其结构如图 9a 所示, 高温合金磨削实验结果表明, 采用自吸式内冷却砂轮能

够显著降低磨削温度。加压内冷却砂轮^[58-59]结构如图 9b 所示, 这种砂轮在依靠砂轮离心力对冷却液进行控制的同时, 通过加压方式向冷却液中注入压力, 能够改善磨削液的换热效果。彭锐涛等^[59]研究表明, 在磨削 GH4169 过程中, 当磨削参数相同时, 加压内冷却砂轮能够明显降低磨削温度。Nadolny^[60]采用离心式供液系统内冷却砂轮进行磨削, 这种砂轮的具体结构如图 9c 所示, 研究表明, 离心式供液系统内冷却砂轮能够提高冷却液的利用率, 并且降低了磨削温度。

2 高温合金磨削力

2.1 磨削力的形成

在磨削过程中, 由于磨粒的出刃高度不同, 因此磨削过程中存在滑擦、犁耕、切削 3 种情况^[61-62], 如图 10 所示。对于单颗磨粒, 当磨削深度大于临界磨削深度时, 磨粒起到切削作用; 当磨削深度小于临界切深时, 磨粒起到滑擦或犁耕作用, 工件材料被参与切削的磨粒去除, 参与滑擦和犁耕的磨粒引起工件表面发生塑性和弹性变形。

磨削力对磨料磨损、工件表面质量等有着很大的影响。磨削力通常容易测量和控制, 根据磨削阶段可以分为滑擦力 (滑擦阶段)、犁耕力 (犁耕阶段) 和

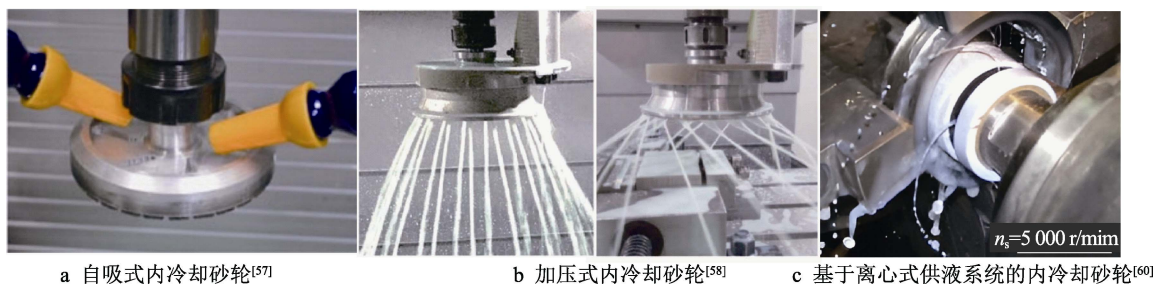
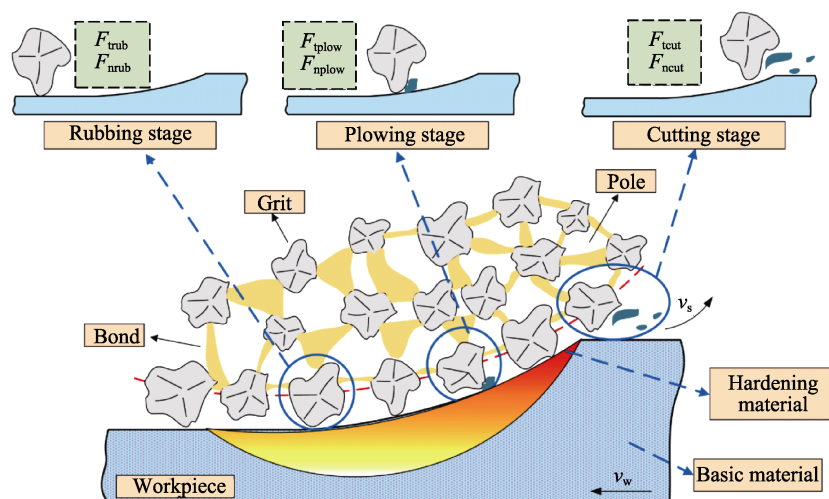


图 9 不同结构类型的内冷却砂轮

Fig. 9 Internal cooling grinding wheels with different structure types: a) self-inhaling internal cooling wheel^[57]; b) pressurized internal cooling grinding wheels^[58]; c) internal cooling grinding wheels with a centrifugal coolant provision system^[60]

图 10 滑擦力、犁耕力、切削力及其临界深度^[62]Fig.10 Sliding force, ploughing force, cutting force and their critical depth^[62]

切削力（切削阶段）^[61-62]。在磨削高温合金时，由于它具有高强韧特性，磨具黏附严重，磨削液难以进入磨削弧区，材料的弹性模量较低，导致变形较大，磨料与工件的接触面积较大，因此在磨削过程中所产生的磨削力较大。

2.2 磨削力的表征

砂轮磨削是高温合金的常用加工方式之一，国内外学者对砂轮磨削力展开了研究。学者将磨削力主要分为划擦力、犁耕力、切削力等进行求解^[62-64]，得出模型的误差在 20% 内。为了增加磨削力预测模型的准确性，Durgumahanti 等^[65]考虑了摩擦因数随工艺参数的变化情况，对摩擦因数进行了修正。通过检测法向磨削力和切向磨削力，并与预测模型结果进行了比较，研究发现，它们在定量上具有较好的一致性。Jamshidi 等^[66]在磨削力模型中考虑了金属死区和磨损这 2 个因素，提高了预测模型的准确性，模型的平均偏差约为 11%。Zhang 等^[67]提出了一种考虑材料去除和塑料堆积机理的改进理论模型，极大地提高了磨削力预测模型的准确性，法向力分量和切向力分量的平均误差分别为 4.19% 和 4.31%。

砂带磨削与砂轮磨削不同，砂带磨削的柔性特性给砂带磨削力的建模带来了一定的困难。关于砂带磨削力的建模，杨龙^[68]以砂带线速度、进给速度及法向力为初始条件，采用剪切滑移理论计算切向力，采用摩擦二项式理论计算滑擦力，采用单颗磨粒实验求得犁耕力系数，计算了犁耕力，最终得到砂带切向磨削力模型。黄智等^[69]基于有限元模型研究了砂带与工件之间的接触面积，根据砂带磨粒的分布规律及单位面积磨粒的数量，并将磨削力分为摩擦力和切屑变形力，建立了砂带磨削力预测模型。He 等^[70]考虑了工件的本构模型，并结合相关材料特性，采用应力积分法建立了砂带在磨削过程中单颗磨粒的磨削力模型，结合滑擦实验建立了单颗磨粒磨削力模型，并验证了

模型的准确性。Yan 等^[71]针对砂带磨削过程中的过切和欠切现象，建立了滑擦、犁耕及切削组成的磨削力微尺度模型，并验证了模型的有效性和实用性。Wang 等^[72]利用工件与砂带之间的相互二维作用力，根据砂带本身特性、砂带的张力及接触状态，建立了三维模型，以估计工件与砂带之间产生的法向力，并对建模结果进行了验证，结果表明，该模型能够很好地预测砂带与工件之间的法向力。

目前，在磨削力的预测方面取得了一定的进展，预测准确性较高，但在磨削力预测模型中往往将磨粒的形状简化为规则的圆锥形或球形磨粒，较少考虑真实磨粒形状对磨削力的影响。此外，冷却液的类型等也会对磨削力产生一定的影响，在对砂带磨削等柔性接触下的磨削力进行建模时，过于简单地考虑弹性，或忽略了弹性特性，这些都影响了磨削力预测结果的准确性。

2.3 磨削力的控制

针对磨削工艺参数对磨削力的影响，国内外学者进行了很多探究^[45, 64, 73]，工艺参数与磨削力的关系如图 11 所示。随着线速度的增加，进给速度和磨削深度减小，磨削力逐渐降低。与工件进给速度相比，线速度和磨削深度对磨削力的影响最为显著，因此可以采用提高线速度、降低工件进给速度、降低磨削深度等方式来降低磨削力。同时采用超硬磨料进行磨削，也能在一定程度上降低磨削力。

冷却润滑能够在降低磨削温度的同时降低磨削力。张高峰等^[47]探究了相同工艺参数、不同润滑方式下的磨削力（如图 12a 所示），结果表明，干式磨削产生的磨削力最大，浇注润滑与干式磨削力相差不大，低温冷风微量润滑方式能够在一定程度上降低磨削力，低温纳米粒子润滑能够显著降低磨削力。Li 等^[55]采用微量润滑对磨削镍基高温合金进行冷却，所选用的润滑剂为绿色润滑油，结果表明，采用蓖麻油

作为冷却液时磨削力最小, 如图 12b 所示。此外, 复合磨削加工工艺也能降低磨削力, 是加工高温合金的有效方法之一。如图 13a 所示, 与传统磨削 (CG) 相比, 超声振动磨削辅助磨削能够在降低磨削力的同时保证较高的材料去除率^[74]。如图 13b 所示, 电解磨

削 (ECG) 能够同时降低磨削力和磨削温度, 保证较高的表面质量^[75]。电火花辅助磨削 (EDDG) 能够显著降低磨削力, 但容易产生较高的磨削温度, 从而影响磨削表面质量。这些研究为实现磨削力的控制提供了参考。

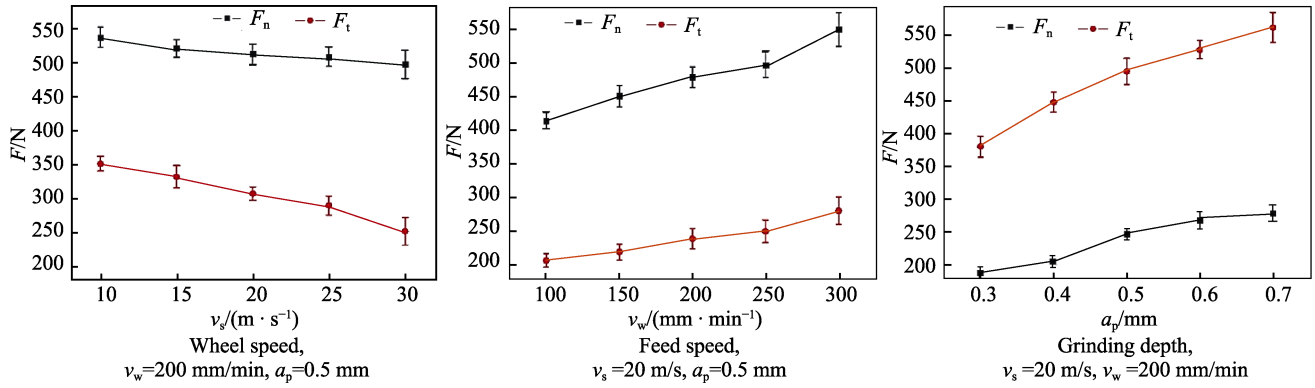
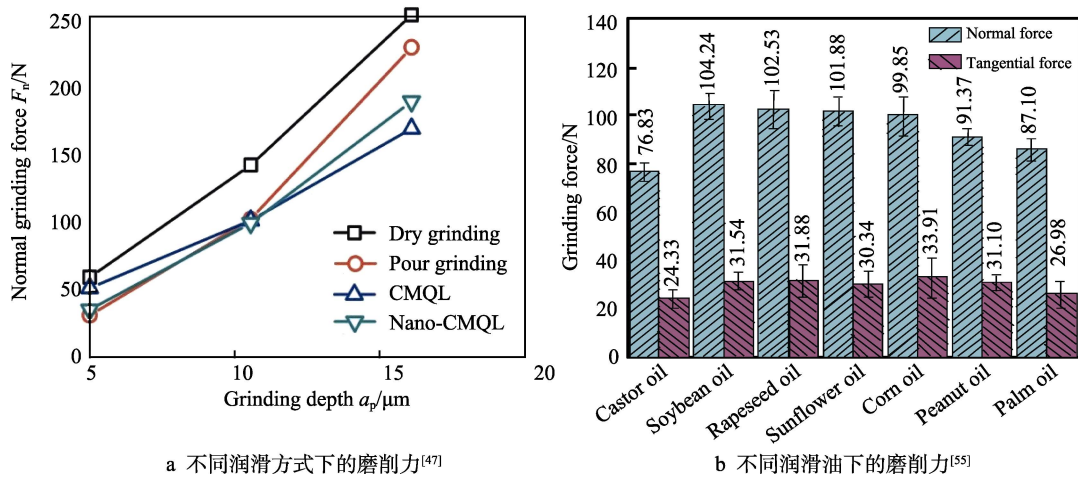


图 11 磨削工艺参数对磨削力的影响规律^[45]

Fig.11 Effects of grinding process parameters on grinding force^[45]

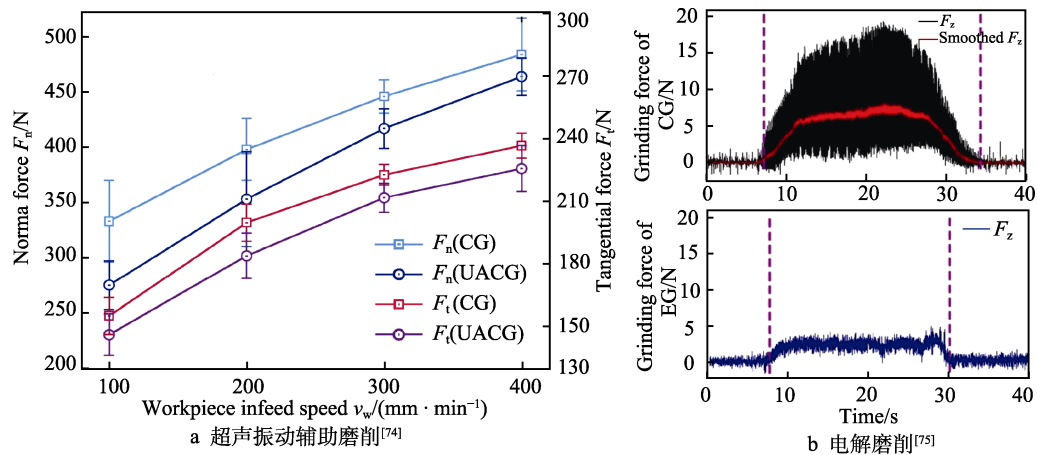


a 不同润滑方式下的磨削力^[47]

b 不同润滑油下的磨削力^[55]

图 12 不同冷却条件下的磨削力

Fig.12 Grinding force under different cooling conditions: a) different lubrication modes^[47], b) different lubricating oil^[55]



a 超声振动辅助磨削^[74]

b 电解磨削^[75]

图 13 复合磨削加工与传统磨削加工磨削力对比

Fig.13 Comparison of grinding force between compound grinding and traditional grinding: a) grinding force under ultrasonic vibration assisted grinding and conventional grinding^[74], b) grinding force under electrolytic grinding and conventional grinding^[75]

3 基于热-力耦合的高温合金表面完整性研究现状

3.1 磨削热力耦合分析方法

国内外学者主要采用直接和间接的方式对热力耦合展开研究。直接耦合法能够直接添加载荷,如田梦^[76]进行了三维螺旋超声振动磨削硬脆材料光滑粒子动力学仿真,对温度场、应力场同时进行求解,将工件内部应力和变形对温度的影响考虑在内。直接耦合法的过程较复杂,因此主要采用间接耦合法对磨削过程进行分析。间接法首先对磨削温度场进行求解,得出温度场的计算结果,并将其转化为整个机械载荷的一部分,然后定义约束和边界条件^[77]。关于间接热力耦合的计算,董华章^[78]对 Inconel 625 磨削过程热行为及力行为进行了分析,基于有限元法和热弹塑性理论,建立了热力耦合过程中的力学和热学模型,探究了生热与变形之间的转换关系,推导出热力耦合系数。Wan 等^[79]通过有限元法建立了热力耦合仿真模型,模拟了磨削过程中工件的亚表面损伤、工件应力及磨削温度,并与纯力学模型进行了比较,验证了热力耦合模型的准确性。Sun 等^[80]探究了盘型磨削过程中动态磨削力热的分布规律,并采用有限元法探究了动态磨削力热耦合下的材料去除机理,通过盘型磨削试验验证了所建模型的有效性。张修铭等^[81]进行了热力耦合仿真,先建立了砂轮磨削温度场模型,然后将温度场载荷施加到工件上得到热应力场,将得到的热应力作为初始条件结合力载荷建立了热力耦合作用下的残余应力预测模型。Nie 等^[82]提出了一种基于磨粒随机分布的磨削残余应力热力耦合建模方法,该耦合模型能够较准确地预测温度和残余应力的多物理场,为磨削残余应力控制提供了一条有效的途径。

3.2 表面粗糙度

表面粗糙度是衡量工件表面完整性的重要参量之一,高温合金零部件的抗疲劳性能与工件表面粗糙度有较大关系^[83]。针对工件表面粗糙度的研究最为广

泛,在磨削过程中表面粗糙度主要采用 Ra 和 Rz 进行表征。表面粗糙度与磨削力和磨削温度具有很大的关系,通常表面粗糙度随着磨削力的增加而增加。当磨削温度较低时,表面粗糙度对磨削温度的变化不敏感。当磨削温度达到一定程度时,磨削温度能够增加材料的塑性,导致表面粗糙度增加。特别是当发生磨削烧伤时,表面粗糙度将急剧增大。Sinha 等^[84]的研究表明,当磨削 Inconel 718 发生磨削烧伤时,其表面粗糙度始终比未发生磨削烧伤的表面粗糙度高,表面粗糙度的急剧增加严重影响了工件的表面完整性。此外,表面粗糙度还受到单颗磨粒切屑厚度的影响。同时,砂轮黏附、冷却状态及工艺参数等都会引起磨削力、磨削温度、切屑厚度的变化^[85-88],进而影响工件的表面粗糙度。

3.3 表面形貌

磨削表面由多颗磨粒在给定的磨削深度下进行切削、划擦、犁耕,并经历热力耦合作用而形成。磨痕通常呈现锥形沟槽形状,且分布较为致密、均匀。常见的高温合金磨削表面缺陷主要有表面烧伤、深沟槽、材料堆积、黏附、脱落、微裂纹等,如图 14 所示^[12,89]。高温合金在磨削过程中出现的表面缺陷与磨削力和磨削温度有着较大的关系。当磨削温度升高时,会加重材料的堆积和黏附现象,同时磨具黏附严重。在磨削过程中,高温导致磨具上黏附的材料脱落到工件表面^[90]。当温度升高到一定值时,会引起磨削烧伤、微裂纹等。同时,当发生磨粒脱落时,在磨削法向力的作用下继续磨削工件表面,会形成很深的划痕^[91]。

最值得注意的是,磨削烧伤对零部件的性能有着较大的影响,烧伤是磨削表面过热而发生的损伤,高温合金对于磨削烧伤更为敏感。磨削烧伤与未烧伤表面如图 15 所示^[84],当产生轻度烧伤时,工件表面会产生氧化物薄膜;当烧伤严重时,会使工件表层组织结构发生变化,产生变质层,甚至出现白层^[92]。同时,当工件表面的热力剧烈时,会引起工件微结构的改变,从而产生内应力,引发微裂纹^[93]。磨削烧伤会严

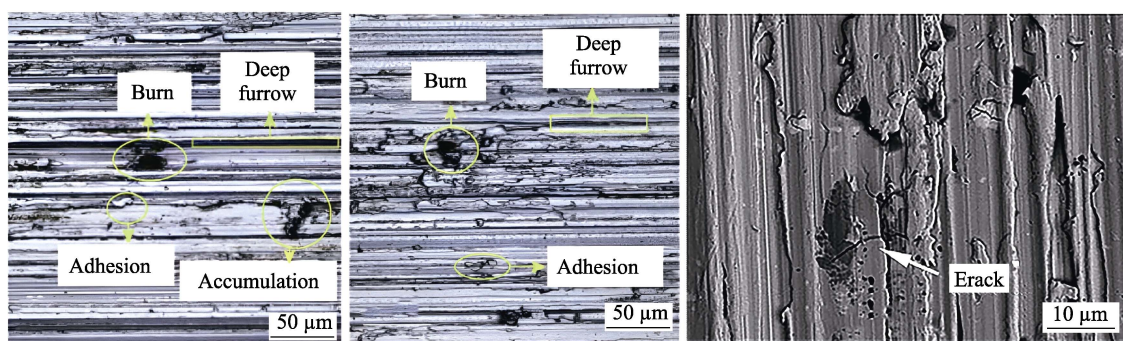
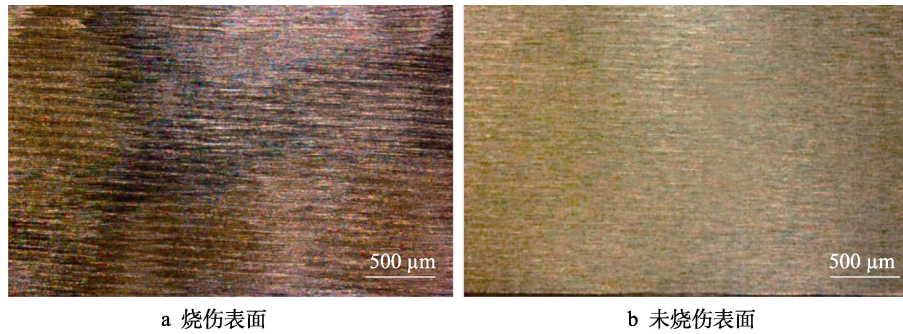


图 14 高温合金磨削表面形貌典型缺陷^[12,89]
Fig.14 Typical surface defects in superalloy grinding^[12,89]



a 烧伤表面

b 未烧伤表面

图 15 Inconel 718 磨削烧伤表面和未发生烧伤表面^[84]Fig.15 Grinding burned and unburned surfaces of Inconel 718^[84]: a) burned surface; b) unburned surface

重影响工件的表面质量。DAI 等^[94]研究发现,当采用砂轮高效深磨削 Inconel 718 高温合金时,在磨削温度达到 900 ℃时工件表面出现了烧伤现象,磨削表面变暗,并存在局部暗条,工件表面区域出现了融化现象,表面被严重损坏。

磨削烧伤是学者们广泛关注的问题之一,国内外学者对于磨削烧伤的检测做了很多的研究工作。目前,主要通过表面形貌观测^[94-95]、硬度测试^[96]、金相组织变化检测^[97]、声发射检测^[98-100]等方法辨别磨削烧伤。徐西鹏等^[95]在磨削 K417 合金时发现,随着温度的升高,高温合金表面依次出现淡黄色、黄褐色、紫褐色、紫黑色的烧伤。应当注意的是,虽然从烧伤的程度能够通过颜色来判断是否发生烧伤,但是表面未发生颜色变化并不代表烧伤未发生。当磨削烧伤发生时,硬度会显著降低,金相组织会发生变化。由此可见,可以通过检测磨削表面的金相组织来判断是否发生磨削烧伤^[101-102]。该检测方法较为准确,但是需制备材料,因此其检测过程较为烦琐。声发射检测是最有前景的检测方法之一,Chen 等^[99,103-104]将声发射应用到磨削烧伤的检测中,并针对声发射中磨削烧伤信号较弱,提出利用小波包变换成功地提取出磨削烧伤声发射特征,并利用模糊模式识别优化特征,成功识别了磨削状态。同时,当发生磨削烧伤时,磨削温度剧烈增加,但烧伤发生后温度的变化幅度较小,法向和切向的磨削力变化幅度较大,法向磨削力的变化比切向磨削力的变化更大,因此当磨削烧伤发生时,磨削力比产生了较大的变化^[105]。

烧伤主要与磨削温度相关,因此需要建立磨削温度、磨削工艺参数等与磨削烧伤的映射关系。于洪方^[106]进行了 GH698 高温合金磨削,当温度为 825~855 ℃时,出现了淡黄色烧伤;当温度为 930~970 ℃时,出现了黄色烧伤;当温度为 1 160~1 200 ℃时,出现了紫色烧伤。苏旭峰^[107]探究了高温合金涡轮叶片在磨削过程中工艺参数与磨削烧伤的关系。王军伟^[35]研究发现,在磨削 Inconel 718 时,当温度高于 580 ℃时会出现烧伤,并且随着磨削温度的升高,烧伤程度逐渐加深。为了避免磨削过程中磨削烧伤的发生,需要

控制磨削温度。

当磨削温度达到一定程度时,磨削工件表面会产生裂纹,裂纹主要可以分为磨削裂纹和淬火裂纹。当磨削温度升高时,表层材料出现热膨胀现象,产生了拉应力。同时,在磨削力的作用下进行磨粒切削时,也会产生拉应力,这两部分叠加超过抗拉强度时便会产生磨削裂纹^[107-108],并且磨削裂纹的方向一般垂直于工件的进给速度方向^[108-109]。在进行磨削液的浇注或其他冷却条件下,磨削表面迅速冷却,而亚表层仍处于热膨胀状态,这个过程可能会产生淬火裂纹。由于冷却产生的应力具有不确定性,因此产生的淬火裂纹的方向不固定^[108-109]。

3.4 组织结构

在磨削过程中产生的剧烈热力,会使工件发生塑性变形,以及发生白层等组织结构的变化,导致工件表层显微硬度发生变化^[110]。在磨削过程中组织结构的变化如图 16 所示。工件的表面组织与工件的性能之间密切相关。塑性变形是磨削高温合金常见的组织变化之一,主要表现为晶格发生滑移、畸变和歪曲,以及晶粒被拉长歪曲^[111]等,如图 16a 所示。白层具有硬脆的特点,极易导致裂纹的产生和扩张,其结构如图 16b 所示,因此应当尽量避免白层的发生。有研究表明,白层产生的主要原因是磨削过程中产生的高温及工件材料的导热能力较差。白层一般距离磨削表面 5~20 μm,磨削温度的升高会导致白层厚度的增加。

在高温合金磨削过程中,加工硬化是一种极为常见的现象。目前,磨削过程产生的加工硬化已作为加工表面强化手段被广泛应用。磨削力和磨削温度对磨削加工过程中加工硬化现象的影响极为显著。当采用导热性较好的磨料磨削,磨削过程中产生的磨削力和磨削温度较低时,工件表层硬度会增加^[112],如图 17a 所示。当采用普通磨料磨削,磨削过程中产生的磨削力和磨削温度剧烈时,工件表层可能会出现热软化现象,工件表层的硬度降低,硬度影响层的深度约为 50~100 μm^[113],如图 17b 所示。为了进一步探究显微硬度的变化规律,Wu 等^[114]探究了磨削温度对高温合

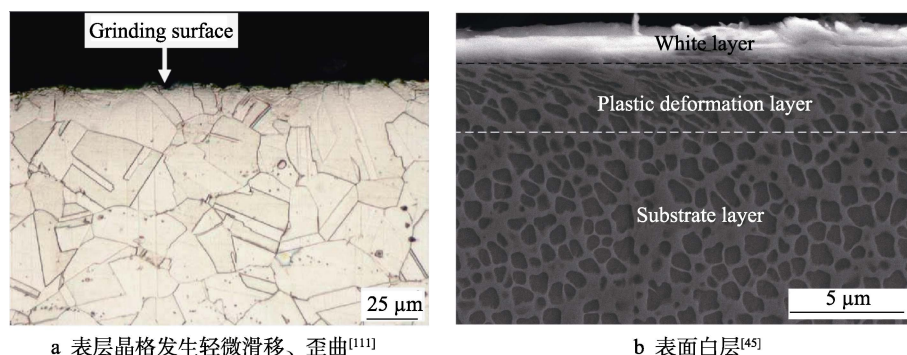


图 16 工件组织结构的变化

Fig.16 Change of metallographic structure: a) slight slipping and distortion of surface lattice^[111]; b) surface white layer^[45]

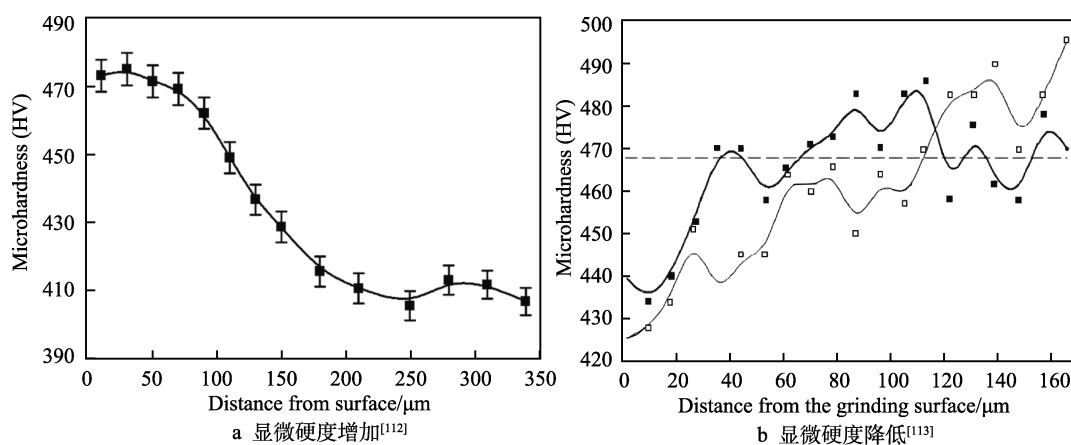


图 17 显微硬度的变化

Fig.17 Change of microhardness: a) microhardness increase^[112]; b) microhardness decrease^[113]

金硬度的影响规律,温度会影响高温合金相变,相变与磨削温度呈正相关,当发生相变时工件的表层硬度得到提升。Ortega 等^[115]建立了磨削硬化和高温软化模型,对磨削硬化和高温软化耦合作用下磨削硬化层的深度进行了预测,预测结果与实验结果的误差较小。

3.5 残余应力

磨削过程中产生的剧烈热力会产生距表层一定深度的残余应力。通常磨削热会导致磨削表面产生残余拉应力,磨削过程产生的塑性变形会导致磨削表面产生残余压应力,同时表面组织的变化也会对残余应力产生影响,三者的综合作用共同影响磨削表面的应力状态。磨削热和磨削力对残余应力的产生起着主要作用,残余压应力能够提升构件的疲劳强度和抗腐蚀性能,残余拉应力则会降低构件的服役性能。

磨削残余应力的建模与预测是一个重要问题。Kuang 等^[77]建立了考虑工件和磨粒相互作用的热力耦合有限元模型,以此预测 DD6 单晶镍基合金涡轮叶片根部磨削残余应力,模型的误差在 20%以内。Sun 等^[62]提出了一种综合考虑动态特性、热力耦合作用和相变效应的残余应力预测模型,提高了磨削残余应力的预测精度。郑华林等^[116]建立了热力耦合有限

元模型,实现了残余应力的预测,揭示了残余应力的产生、分布及变化规律。Wang 等^[117]基于磨粒工件的相互作用,通过对相互作用应力和热流分布进行建模,最终得到热-力耦合残余应力分析数值模型。

通过对磨削过程中热力的控制,能够实现在磨削后的工件表面形成残余压应力,从而实现磨削表面的改性。磨削热会产生残余拉应力,降低构件的服役性能,所以应降低磨削热。采用合理的工艺参数对残余应力进行控制,增大磨削深度会增大磨削温度,导致塑性变形。同时,增大进给速度(恒深度磨削时)和线速度会引起磨削温度的升高,但是当进给速度足够大时,反而降低了磨削热对残余应力的影响。这是因为当进给速度足够大时,热源移动速度加快^[11]。采用合适的砂轮、增加磨削过程中的冷却润滑、合理选择冷却液等都能够降低磨削温度,减小残余拉应力。

由于残余应力受到多种因素的共同影响,目前针对残余应力仍然缺乏有效的建模表征方法,导致所建残余应力模型的误差较大,且在实验过程中检测残余应力存在较大误差,这些都给残余应力的研究带来了较大的困难。由此可见,在高温合金磨削研究中建立准确的残余应力模型,准确预测复杂形状(如叶片等)零部件的残余应力,以及减小残余拉应力等仍旧是研究难题。

4 结语

磨削加工是改善高温合金加工表面完整性的重要工序之一, 由于加工过程中产生的磨削力和温度较高, 因此研究磨削力、温度及其耦合作用对提高磨削表面质量具有重要意义。文中从产生机理、表征方法及优化控制 3 个方面阐述了磨削热和磨削力的研究现状, 并基于直接耦合法和间接耦合法阐述了磨削热-力耦合建模过程。在概述磨削过程中产生热力的基础上, 总结了基于磨削热力耦合模型下的表面形貌、组织结构及残余应力等方面的研究成果, 后续研究可以基于以下几个方面。

1) 开发响应快、精度高的检测装置及检测技术, 优化磨削温度和磨削力的检测方法, 实现准确高效的力和温度监控与在线检测, 并建立反馈系统, 采用智能优化算法对磨削工艺参数进行优化, 以便合理控制磨削力和磨削温度。

2) 柔性磨削能够适应多种复杂高温合金零部件的加工和修复, 但柔性磨削过程中的弹性接触等因素制约了柔性磨削在高温合金磨削加工中的应用, 因此针对柔性磨削应从多尺度考虑弹性变形对磨削力和磨削温度的影响, 修正磨削力和磨削温度的预测模型。在磨削力和磨削温度的预测模型中, 充分考虑温度和力对高温合金材料特性的影响, 以提高预测模型的精度。

3) 探究热力耦合作用下高温合金磨削表面完整性形成机理及特征, 从表面形貌、组织结构及应力状态 3 个方面探究磨削热力耦合与表面完整性的映射关系, 建立基于表面完整性的磨削热力耦合控制模型。在提升加工效率的同时合理控制磨削力和温度, 提高工件的表面完整性。探究表面完整性与疲劳寿命的映射关系, 提高工件的服役性能。

4) 采用绿色磨削技术在保证健康的同时能够显著降低磨削力和磨削温度, 在高温合金磨削加工中具有广泛的应用前景。目前的研究技术条件仍旧存在盲区, 尚未完全揭示其在高温合金磨削加工中的磨削效果, 因此需要从工艺机理、研制技术及磨削效果 3 个角度对冷却润滑技术进行研究, 促进其在高温合金磨削加工中的应用。

参考文献:

- [1] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展[J]. 航空发动机, 2005, 31(3): 1-7.
HU Zhuang-qi, LIU Li-rong, JIN Tao, et al. Development of the Ni-Base Single Crystal Superalloys[J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 1-7.
- [2] 黄小康, 任绪凯, 陈华斌, 等. 高温合金机器人柔性磨削表面完整性研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 38-52.
- [3] ASPINWALL D K, SOO S L, CURTIS D T, et al. Profiled Superabrasive Grinding Wheels for the Machining of a Nickel Based Superalloy[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 335-338.
- [4] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 119-134.
GUO Dong-ming, SUN Yu-wen, JIA Zhen-yuan. Methods and Research Progress of High Performance Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 119-134.
- [5] 卢守相, 郭塞, 张建秋, 等. 高性能难加工材料可磨削性研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 12-42.
LU Shou-xiang, GUO Sai, ZHANG Jian-qiu, et al. Grindability of High Performance Difficult-to-Machine Materials[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 12-42.
- [6] 王科昌, 易鹏, 朱烨均, 等. 镍基高温合金 K4125 磨削性能与参数优化研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 81-87.
WANG Ke-chang, YI Peng, ZHU Ye-jun, et al. Grinding Performance and Parameter Optimization of Nickel-Based Superalloy K4125[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7): 81-87.
- [7] TSO P L. Study on the Grinding of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55(3/4): 421-426.
- [8] 杜随更, 姜哲, 张定华, 等. GH4169 合金磨削表面塑性变形层的微观结构[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 63-68.
DU Sui-geng, JIANG Zhe, ZHANG Ding-hua, et al. Microstructure of Plastic Deformation Layer on Grinding Surface of GH4169 Alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 63-68.
- [9] LI Xun, GUAN Chun-ming, ZHAO Peng. 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.
- [10] 丁文锋, 苗情, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 189-215.
DING Wen-feng, MIAO Qing, LI Ben-kai, et al. Review on Grinding Technology of Nickel-Based Superalloys Used for Aero-Engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 189-215.
- [11] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 273-279.
REN Jing-xin, HUA Ding-an. Principle of Grinding[M]. Electronic Industry Press, 2011: 273-279.
- [12] 黄保腾, 张彦彬, 王晓铭, 等. SG 砂轮磨削镍基合金

- GH4169 砂轮磨损机理与磨削性能的实验评价[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 62-70.
- HUANG Bao-teng, ZHANG Yan-bin, WANG Xiao-ming, et al. Experimental Evaluation of Wear Mechanism and Grinding Performance of SG Wheel in Machining Nickel-Based Alloy GH4169[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 62-70.
- [13] MIAO Qing, LI Hao-nan, DING Weng-feng. On the Temperature Field in the Creep Feed Grinding of Turbine Blade Root: Simulation and Experiments[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118957.
- [14] HWANG J, KOMPPELLA S, CHANDRASEKAR S, et al. Measurement of Temperature Field in Surface Grinding Using Infra-Red (IR) Imaging System[J]. Journal of Tribology, 2003, 125(2): 377-383.
- [15] BATAKO A D, ROWE W B, MORGAN M N. Temperature Measurement in High Efficiency Deep Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(11): 1231-1245.
- [16] YAO Chang-feng, WANG Ting, XIAO Wei, et al. Experimental Study on Grinding Force and Grinding Temperature of Aermet 100 Steel in Surface Grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2191-2199.
- [17] JAMSHIDI H, BUDAK E. A 3D Analytical Thermal Model in Grinding Considering a Periodic Heat Source under Dry and Wet Conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 295: 117158.
- [18] MARINESCU I D. Tribology of Abrasive Machining Processes[M]. Norwich: William Andrew Pub, 2004: 161-173.
- [19] LI Hao-nan, AXINTE D. On a Stochastically Grain-Discretised Model for 2D/3D Temperature Mapping Prediction in Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 116: 60-76.
- [20] 贝季瑶. 磨削温度的分析与研究[J]. 上海交通大学学报, 1964(3): 55-71.
- BEI Ji-yao. Analysis and Research on Grinding Temperature[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1964(3): 55-71.
- [21] 连美娟, 王吉芳. 基于有限元法的钛合金材料磨削热分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 54-57.
- LIAN Mei-juan, WANG Ji-fang. Grinding Thermal Analysis of Titanium Alloy Based on FEM[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2020, 35(1): 54-57.
- [22] 毛聪. 平面磨削温度场及热损伤的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008: 80-96.
- MAO Cong. The Research on the Temperature Field and Thermal Damage in the Surface Grinding[D]. Changsha: Hunan University, 2008: 80-96.
- [23] ZHU Xiao-xiang, WANG Wen-hu, JIANG Rui-song, et al. Performances of Ni_3Al -Based Intermetallic IC10 in Creep-Feed Grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(3): 809-820.
- [24] SHI Ying, WANG Zhi-hui, XU Sheng-zhi, et al. Study on the Grindability of Nano-Vitrified Bond CBN Grinding Wheel for Nickel-Based Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1913-1921.
- [25] 巩亚东, 苏志朋, 孙瑶, 等. 镍基单晶高温合金微磨削形貌仿真及实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(7): 949-954.
- GONG Ya-dong, SU Zhi-peng, SUN Yao, et al. Morphology Simulation and Experimental Study on Micro-grinding of Nickel-Based Single Crystal Superalloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(7): 949-954.
- [26] PENG Rui-tao, ZHAO Lin-feng, TONG Jia-wei, et al. Design and Evaluation of an Internal-Cooling Grooved Grinding Wheel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 1-16.
- [27] WANG Wen-tao, ZHANG Quan-li, CHU Cheng-long, et al. Simulation and Experimental Study of the Ground Surface Topography of GH4169 by Grains Arrayed Brazed Diamond Wheels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(1): 303-317.
- [28] DAI Shi-jie, WANG Xiao-jun, ZHANG Hui-bo, et al. Research on Variation of Grinding Temperature of Wind Turbine Blade Robotic Grinding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(3): 367-377.
- [29] JIANG Jing-liang, GE Pei-qi, SUN Shu-feng, et al. From the Microscopic Interaction Mechanism to the Grinding Temperature Field: An Integrated Modelling on the Grinding Process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 110: 27-42.
- [30] 郭国强, 安庆龙, 林立芳, 等. 成形磨削温度的理论与试验分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 203-215.
- GUO Guo-qiang, AN Qing-long, LIN Li-fang, et al. Analytical and Experimental Investigation of Temperature in Form Grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 203-215.
- [31] 段练. 高温合金叶片机器人砂带磨削关键技术以及表面完整性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 3-4.
- DUAN Lian. Research on Key Technology and Surface Integrity of Superalloy Blade Robotic Belt Grinding[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 3-4.
- [32] ZHU Sheng-wang, XIAO Gui-jian, HE Yi, et al. Tip Vortex Cavitation of Propeller Bionic Noise Reduction Surface Based on Precision Abrasive Belt Grinding[J]. Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 2022, 2(1): 2022003.
- [33] ZHOU Kun, XU Jia-yu, XIAO Gui-jian, et al. A Novel Low-Damage and Low-Abrasive Wear Processing Method

- of C_p/SiC Ceramic Matrix Composites: Laser-Induced Ablation-Assisted Grinding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 302: 117503.
- [34] 王文玺, 李建勇, 樊文刚, 等. 基于赫兹接触的钢轨砂带打磨温度建模研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(7): 141-146.
- WANG Wen-xi, LI Jian-yong, FAN Wen-gang, et al. Modeling and Simulation of Temperature in Abrasive Belt Rail Grinding Process Based on Hertzian Contact Theory[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(7): 141-146.
- [35] 王军伟. 机器人砂带磨削镍基合金 Inconel718 的表面完整性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 77-81.
- WANG Jun-wei. A Study on Surface Integrity of Nickel Based Superalloy Inconel 718 under Robotic Belt Grinding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 77-81.
- [36] FAN Wen-gang, ZHANG Shuai, WANG Jun-da, et al. Temperature Field of Open-Structured Abrasive Belt Rail Grinding Using FEM[J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2020, 19(2): 346-356.
- [37] 张毅, 张伟文, 郭钢. 砂带恒压磨削的有限元热学模型及实验验证[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(6): 238-242.
- ZHANG Yi, ZHANG Wei-wen, GUO Gang. Finite Element Thermal Model and Experimental Verification for Constant Pressure Belt Grinding Process[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(6): 238-242.
- [38] 杨天勇. 钢轨砂带磨削的残余应力及其影响因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 21-25.
- YANG Tian-yong. Research on Residual Stress State and Influence Factors of Rail Grinding with Abrasive Belt[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 21-25.
- [39] 张帅. 基于热力耦合的钢轨开式砂带打磨温度场仿真与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020: 25-33.
- ZHANG Shuai. Simulation and Analysis of Temperature Field for Rail Grinding with the Open Abrasive Belt Based on Thermal-Mechanical Coupling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 25-33.
- [40] REN Xu-kai, HUANG Xiao-kang, CHAI Ze, et al. A Study of Dynamic Energy Partition in Belt Grinding Based on Grinding Effects and Temperature Dependent Mechanical Properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 294: 117112.
- [41] VOLKOV D I, KORYAZHKIN A A. Finite-Difference Calculation of the Temperature in Belt Grinding[J]. *Russian Engineering Research*, 2012, 32(3): 296-298.
- [42] 申龙, 丁文锋, 李征, 等. 缓进深切磨削钛基复合材料磨削温度的研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2016, 36(4): 44-48.
- SHEN Long, DING Wen-feng, LI Zheng, et al. Research on Grinding Temperature of Particle-Reinforced Titanium Matrix Composites in Creep-Feed Deep Grinding[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2016, 36(4): 44-48.
- [43] 张晓阳, 李长河, 张彦彬, 等. 电场参数对雾化特性及微量润滑磨削性能影响的实验研究[J]. *制造技术与机床*, 2018(10): 105-111.
- ZHANG Xiao-yang, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Experimental Study of Effect of Electric Field Parameters on Atomization Characteristics and Grinding Performance of Minimal Quantity Lubrication[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2018(10): 105-111.
- [44] 张帅奇, 杨忠学, 张长春, 等. DD5 镍基单晶高温合金缓进磨削力和温度实验研究[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(4): 80-89.
- ZHANG Shuai-qi, YANG Zhong-xue, ZHANG Chang-chun, et al. Experimental Research on Grinding Forces and Temperature of DD5 Nickel-Based Single Crystal Super-Alloy by Creep-Feed Grinding[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(4): 80-89.
- [45] ZHANG Shuai-qi, YANG Zhong-xue, JIANG Rui-song, et al. Effect of Creep Feed Grinding on Surface Integrity and Fatigue Life of Ni₃Al Based Superalloy IC10[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 438-448.
- [46] LI Ben-kai, MIAO Qing, LI Min, et al. An Investigation on Machined Surface Quality and Tool Wear during Creep Feed Grinding of Powder Metallurgy Nickel-Based Superalloy FGH96 with Alumina Abrasive Wheels[J]. *Advances in Manufacturing*, 2020, 8(2): 160-176.
- [47] 张高峰, 李景焘, 王志刚, 等. 低温冷风纳米粒子微量润滑磨削轴承钢试验研究[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(19): 2342-2348.
- ZHANG Gao-feng, LI Jing-tao, WANG Zhi-gang, et al. Experimental Study on Nano-CMQL Grinding of Bearing Steels[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(19): 2342-2348.
- [48] 王晓铭, 张建超, 王绪平, 等. 不同冷却工况下的磨削钛合金温度场模型及验证[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(5): 572-578.
- WANG Xiao-ming, ZHANG Jian-chao, WANG Xu-ping, et al. Temperature Field Model and Verification of Titanium Alloy Grinding under Different Cooling Conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5): 572-578.
- [49] 张志伟, 徐九华, 傅玉灿, 等. 陶瓷 CBN 砂轮高效磨削的弧区冷却液动压力研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2013, 33(6): 12-16.
- ZHANG Zhi-wei, XU Jiu-hua, FU Yu-can, et al. Study on the Hydrodynamic Fluid Pressure within Grinding Zone with Vitrified CBN Wheel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2013, 33(6): 12-16.
- [50] 吴明阳, 王博, 程耀楠, 等. 高温合金材料特性及加工技术进展[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2015, 20(6): 24-31.
- WU Ming-yang, WANG Bo, CHENG Yao-nan, et al. Development of the Material Properties and Machining Technology of Superalloy[J]. *Journal of Harbin Univ-*

- ersity of Science and Technology, 2015, 20(6): 24-31.
- [51] 顾玉栋. 刚玉砂轮缓进深切磨削加工镍基单晶合金叶片榫头研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 10-12.
- GU Yu-long. Creep-feed Deep Grinding of Nickel-based Single-crystal Superalloy Blade Tenon with Corundum Abrasive Wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 10-12.
- [52] SUN Yao, JIN Li-ya, GONG Ya-dong, et al. Experimental Evaluation of Surface Generation and Force Time-Varying Characteristics of Curvilinear Grooved Micro End Mills Fabricated by EDM[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 799-814.
- [53] 彭锐涛, 彭兴, 童佳威, 等. 水基混合纳米流体对内冷却磨削性能的影响[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13): 1591-1599.
- PENG Rui-tao, PENG Xing, TONG Jia-wei, et al. Effects of Water-Based Hybrid Nanofluids on Internal Cooling Grinding Performance[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(13): 1591-1599.
- [54] 吴艳萍. Al_2O_3 纳米流体的制备及其在内冷却磨削中的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019: 29-40.
- WU Yan-ping. Preparation of Al_2O_3 Nanofluids and Application in the Process of the Internal-Cooling Grinding[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019: 29-40.
- [55] LI Ben-kai, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Grinding Temperature and Energy Ratio Coefficient in MQL Grinding of High-Temperature Nickel-Base Alloy by Using Different Vegetable Oils as Base Oil[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(4): 1084-1095.
- [56] 李本凯. 纳米流体微量润滑磨削温度及对流换热机理分析与实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016: 35-50.
- LI Ben-kai. Theoretical Analysis and Experimental Research of Grinding Temperature and Convective Heat Transfer Mechanism on Nanofluids Minimal Quantities of Lubrication[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2016: 35-50.
- [57] LI Xun. Application of Self-Inhaling Internal Cooling Wheel in Vertical Surface Grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 86-91.
- [58] 彭锐涛, 刘开发, 黄晓芳, 等. 流道结构对加压内冷却开槽砂轮磨削性能的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 212-223.
- PENG Rui-tao, LIU Kai-fa, HUANG Xiao-fang, et al. Effect of Flow Channel Structure on Performance of Pressurized Internal-Cooling Slotted Grinding Wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 212-223.
- [59] 彭锐涛, 李仲平, 黄晓芳, 等. 加压内冷却方法在高温合金磨削中的应用[J]. 中国机械工程, 2017, 28(16): 2008-2015.
- PENG Rui-tao, LI Zhong-ping, HUANG Xiao-fang, et al. Applications of Pressurized Internal Cooling Method in Superalloy Grinding Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(16): 2008-2015.
- [60] NADOLNY K. Small-dimensional Sandwich Grinding Wheels with a Centrifugal Coolant Provision System for Traverse Internal Cylindrical Grinding of Steel 100Cr6[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 93: 354-363.
- [61] LI Lu-feng, REN Xu-kai, FENG Heng-jian, et al. A Novel Material Removal Rate Model Based on Single Grain Force for Robotic Belt Grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1-12.
- [62] SUN Cong, XIU Shi-chao, HONG Yuan, et al. Prediction on Residual Stress with Mechanical-thermal and Transformation Coupled in DGH[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 179: 105629.
- [63] ZHOU Kun, DING Hao-hao, ZHANG Shu-yue, et al. Modelling and Simulation of the Grinding Force in Rail Grinding that Considers the Swing Angle of the Grinding Stone[J]. Tribology International, 2019, 137: 274-288.
- [64] LI Ben-kai, DAI Chen-wei, DING Wen-feng, et al. Prediction on Grinding Force during Grinding Powder Metallurgy Nickel-Based Superalloy FGH96 with Electroplated CBN Abrasive Wheel[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(8): 65-74.
- [65] DURGUMAHANTI U S P, SINGH V, RAO P V. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(3): 231-240.
- [66] JAMSHIDI H, BUDAK E. An Analytical Grinding Force Model Based on Individual Grit Interaction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 283: 116700.
- [67] ZHANG Yan-bin, LI Chang-he, JI He-ju, et al. Analysis of Grinding Mechanics and Improved Predictive Force Model Based on Material-Removal and Plastic-Stacking Mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122: 81-97.
- [68] 杨龙. 机器人砂带磨抛力建模及其在钛合金叶片加工中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 12-21.
- YANG Long. Grinding Force Modeling and Experimental Research in Robot-Assisted Belt Grinding Titanium Alloy Blade[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 12-21.
- [69] 黄智, 董华章, 周振武, 等. 砂带磨削 TC4 磨削力数字建模及其预测[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 250-258.
- HUANG Zhi, DONG Hua-zhang, ZHOU Zhen-wu, et al. Modeling and Prediction of Grinding Force on Belt Grinding TC4[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 250-258.
- [70] HE Zhe, LI Jian-yong, LIU Yue-ming, et al. Single-Grain Cutting Based Modeling of Abrasive Belt Wear in Cylindrical Grinding[J]. Friction, 2020, 8(1): 208-220.
- [71] YAN Si-jie, XU Xiao-hu, YANG Ze-yuan, et al. An Improved Robotic Abrasive Belt Grinding Force Model Considering the Effects of Cut-in and Cut-off[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 496-508.

- [72] WANG Yu-hsun, LO Yuan-chieh, LIN Pei-chun. A Normal Force Estimation Model for a Robotic Belt-Grinding System[C]// 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Boston, MA, USA. IEEE, 2020: 1922-1928.
- [73] 李奇林, 徐九华, 苏宏华, 等. 高速磨削用单层钎焊 CBN 砂轮及其磨削性能[J]. 工具技术, 2016, 50(10): 15-18.
- LI Qi-lin, XU Jiu-hua, SU Hong-hua, et al. Development and Performance of Brazed CBN Wheel for High Speed Grinding[J]. Tool Engineering, 2016, 50(10): 15-18.
- [74] CAO Yang, ZHU Ye-jun, DING Wen-feng, et al. Vibration Coupling Effects and Machining Behavior of Ultrasonic Vibration Plate Device for Creep-Feed Grinding of Inconel 718 Nickel-Based Superalloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(2): 332-345.
- [75] FAN Kang-nan, JIN Zhu-ji, ZHU Xiang-long. Investigation on Electrochemical Grinding (ECG) of Pure Iron Material[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(1): 885-896.
- [76] 田梦. 三维螺旋超声振动磨削硬脆材料的热力耦合作用机理 SPH 仿真研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 64-66.
- TIAN Meng. Thermal-Mechanical Coupling Simulation Research in Three Dimensional Spiral Ultrasonic Vibration Assisted Grinding of Hard and Brittle Materials by Using SPH Method[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 64-66.
- [77] KUANG Wei-jie, MIAO Qing, DING Wen-feng, et al. Residual Stresses of Turbine Blade Root Produced by Creep-Feed Profile Grinding: Three-Dimensional Simulation Based on Workpiece-Grain Interaction and Experimental Verification[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 67-79.
- [78] 董华章. Inconel 625 高温合金砂带磨削热-力耦合建模与表面质量预测[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 9-27.
- DONG Hua-zhang. Research of Thermal-Mechanical Coupling Model and Surface Quality Prediction for Abrasive Belt Grinding Inconel 625[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 9-27.
- [79] WAN Lin-lin, LI Le, DENG Ze-hui, et al. Thermal-Mechanical Coupling Simulation and Experimental Research on the Grinding of Zirconia Ceramics[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 41-51.
- [80] SUN Cong, LU Yue, XIU Shi-chao, et al. Analysis on the Removal Mechanism of Disc Grinding Based on Dynamic Thermal-Mechanical Coupling[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2021, 17(4): 831-853.
- [81] 张修铭, 刘莉娟, 修世超, 等. 基于热-力耦合磨削表层残余应力的仿真分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(12): 1758-1762.
- ZHANG Xiu-ming, LIU Li-juan, XIU Shi-chao, et al. Simulation Analysis of Ground Surface Residual Stress with Thermal-Mechanical Coupling Principle[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(12): 1758-1762.
- [82] NIE Zhen-guo, WANG Gang, WANG Li-ping, et al. A Coupled Thermomechanical Modeling Method for Predicting Grinding Residual Stress Based on Randomly Distributed Abrasive Grains[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(8): 081005.
- [83] HUANG Qi, REN Jing-xin. Surface Integrity and Its Effects on the Fatigue Life of the Nickel-Based Superalloy GH33A[J]. International Journal of Fatigue, 1991, 13(4): 322-326.
- [84] SINHA M K, SETTI D, GHOSH S, et al. An Investigation on Surface Burn during Grinding of Inconel 718[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 124-133.
- [85] 丁文锋, 奚欣欣, 占京华, 等. 航空发动机钛材料磨削技术研究现状及展望[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 022763.
- DING Wen-feng, XI Xin-xin, ZHAN Jing-hua, et al. Research Status and Future Development of Grinding Technology of Titanium Materials for Aero-Engines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 022763.
- [86] IKARI T, KITAJIMA T, YUI A. Effect of Types of Grinding Fluid on Grinding Characteristics of CMSX4[J]. International Journal of Automation Technology, 2022, 16(1): 43-51.
- [87] DE SOUZA RUZZI R, DE PAIVA R L, GELAMO R V, et al. Study on Grinding of Inconel 625 and 718 Alloys with Cutting Fluid Enriched with Multilayer Graphene Platelets[J]. Wear, 2021, 476: 203697.
- [88] DE SOUZA RUZZI R, DA SILVA R B, DA SILVA L R R, et al. Influence of Grinding Parameters on Inconel 625 Surface Grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55: 174-185.
- [89] ZENG Quan-ren, LIU Geng, LIU Lan, et al. Investigation into Grindability of a Superalloy and Effects of Grinding Parameters on Its Surface Integrity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(2): 238-250.
- [90] 张曦, 李本凯, 丁文锋. 钎焊 CBN 砂轮与陶瓷 CBN 砂轮磨削粉末冶金高温合金的加工性能对比研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(4): 64-71.
- ZHANG Xi, LI Ben-kai, DING Wen-feng. Comparative Study on Machining Behavior of Brazed CBN Wheel and Vitrified CBN Wheel during Grinding Powder Metallurgy Superalloy[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(4): 64-71.
- [91] 周坤. 钢轨打磨过程中材料去除规律及机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020: 46-48.
- ZHOU Kun. Research on the Rules and Mechanisms of Material Removal during Rail Grinding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020: 46-48.

- [92] 薄鑫涛. 磨削裂纹的产生与防止[J]. 热处理, 2019, 34(2): 21.
BO Xin-tao. Generation and Prevention of Grinding Cracks[J]. Heat Treatment, 2019, 34(2): 21.
- [93] 郑伟生. TC4 钛合金微磨削表面质量影响因素研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013: 14-15.
ZHENG Wei-sheng. Research on Surface Quality in Micro-Grinding of TC4 Materials[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013: 14-15.
- [94] DAI Chen-wei, DING Wen-feng, XU Jiu-hua, et al. Effects of Undeformed Chip Thickness on Grinding Temperature and Burn-out in High-Efficiency Deep Grinding of Inconel718 Superalloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5): 1841-1852.
- [95] 徐西鹏, 徐鸿钧, 张幼楨. K417 合金缓进磨削烧伤表面形貌及形成机理[J]. 南京航空航天大学学报, 1992, 24(4): 377-386.
XU Xi-peng, XU Hong-jun, ZHANG You-zhen. Appearances and Formation Mechanisms of Burnt Workpiece Ground Surface during Creep Feed Grinding of Alloy K417[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1992, 24(4): 377-386.
- [96] ZHAO Zheng-cai, FU Yu-can, XU Jiu-hua, et al. An Investigation on High-Efficiency Profile Grinding of Directional Solidified Nickel-Based Superalloys DZ125 with Electroplated CBN Wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1): 1-11.
- [97] DING Wen-feng, XU Jiu-hua, CHEN Zhen-zhen, et al. Grindability and Surface Integrity of Cast Nickel-Based Superalloy in Creep Feed Grinding with Brazed CBN Abrasive Wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(4): 501-510.
- [98] MEI Yi-ming, YU Zhong-hua, YANG Zhen-sheng. Experimental Investigation of Correlation between Attrition Wear and Features of Acoustic Emission Signals in Single-Grit Grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5): 2275-2287.
- [99] CHEN Xun, GRIFFIN J, LIU Qiang. Mechanical and Thermal Behaviours of Grinding Acoustic Emission[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2007, 12(1/2/3): 184.
- [100] 朱欢欢, 迟玉伦, 闻章, 等. 断续磨削表面烧伤机理与在线监测方法研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 379-389.
ZHU Huan-huan, CHI Yu-lun, WEN Zhang, et al. Research on Burn Mechanism of Intermittent Grinding Surface and Online Monitoring Method[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 379-389.
- [101] SU Jian-xin, ZHANG Yan-zhen, DENG Xiao-zhong. Analysis and Experimental Study of Cycloid Gear Form Grinding Temperature Field[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(3): 949-965.
- [102] WANG Long, TANG Xiu-jian, WANG Liu-ying, et al. Mechanism of Grinding-Induced Burns and Cracks in 20CrMnTi Steel Gear[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(10): 1143-1150.
- [103] LIU Qiang, CHEN Xun, GINDY N. Investigation of Acoustic Emission Signals under a Simulative Environment of Grinding Burn[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3/4): 284-292.
- [104] LIU Qiang, CHEN Xun, GINDY N. Fuzzy Pattern Recognition of AE Signals for Grinding Burn[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(7/8): 811-818.
- [105] 李晓天, 陈明, 孙方宏, 等. DZ4 材料的磨削烧伤机理[J]. 航空制造技术, 2001, 44(6): 22-24.
LI Xiao-tian, CHEN Ming, SUN Fang-hong, et al. Burn Mechanism of Superalloy DZ4 Workpiece in Grinding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001, 44(6): 22-24.
- [106] 于洪方. 镍基高温合金磨削烧伤机理[J]. 常州工业职业技术学院学报, 1996, 9(2): 55-57.
YU Hong-fang. Mechanism of Grinding Burn of Nickel-Based Superalloy[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 1996, 9(2): 55-57.
- [107] 苏旭峰. 高温合金涡轮叶片缓进磨削工艺研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 33-35.
SU Xu-feng. Study of Creep Grinding on Superalloy for Turbine Blade[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 33-35.
- [108] XI Xin-xin, ZHU Ye-jun, CHEN Tao, et al. Surface Burn Behavior in Creep-Feed Deep Grinding of Gamma Titanium Aluminide Intermetallics: Characterization, Mechanism, and Effects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(3): 985-996.
- [109] 张朋鑫. 磨削裂纹产生的原因及预防措施[J]. 金属加工(冷加工), 2022(1): 42-46.
ZHANG Peng-xin. Causes of Grinding Cracks and Preventive Measures[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2022(1): 42-46.
- [110] XU Yun-chao, GONG Ya-dong, WANG Zhong-xu, et al. Experimental Study of Ni-Based Single-Crystal Superalloy: Microstructure Evolution and Work Hardening of Ground Subsurface[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(2): 43.
- [111] 陈珍珍. 多孔复合结合剂立方氮化硼砂轮高效磨削研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 99-100.
CHEN Zhen-zhen. High-Efficiency Grinding with Porous Composite-Bonded CBN Wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 99-100.
- [112] WANG Jun-wei, XU Ji-jin, WANG Xiang-fei, et al. A Comprehensive Study on Surface Integrity of Nickel-Based Superalloy Inconel 718 under Robotic Belt Grinding[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(1): 61-69.