

精密车削镍基单晶高温合金去除机理仿真与实验

周云光, 王书海, 陈 晗, 李 明

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了探究精密车削镍基单晶高温合金微观尺度去除机理, 首先, 基于大规模原子/分子并行模拟器的分子动力学仿真法对仿真体系物理特性进行分析后, 建立了金刚石刀具车削镍基单晶的车削仿真模型, 并利用开源可视化工具分析得到了镍基单晶仿真车削过程中车屑的形成机制. 然后, 进行了镍基单晶高温合金车削去除机理实验研究, 通过对车削镍基单晶高温合金亚表面微观组织的透射形貌和衍射分析, 证实了去除机理仿真分析所得结果的准确性. 仿真和实验结果表明, 镍基单晶高温合金车削塑性去除机理为非晶演变型结构损伤、位错趋稳层错结构损伤和多晶相变结构损伤.

关 键 词: 镍基单晶高温合金; 精密车削; 去除机理; 分子动力学仿真; 结构演变

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)10-1452-07

Simulation and Experiment of Removal Mechanism of Nickel-based Single Crystal Superalloy in Precision Turning

ZHOU Yun-guang, WANG Shu-hai, CHEN Han, LI Ming

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: ZHOU Yun-guang, E-mail: zhouyunguang@neuq.edu.cn)

Abstract: To explore the micro-scale removal mechanism of precision turning nickel-based single crystal superalloy, the simulation model of nickel-based single crystal turning by the diamond tool was firstly established after an analysis of the simulated physical characteristics based on the molecular dynamics simulation method by large-scale atomic/molecular parallel simulators, and the chip formation mechanism during the simulation process of nickel-based single crystal turning was analyzed by using an open visualization tool. Then the experimental research on the removal mechanism of nickel-based single crystal superalloy was carried out. The accuracy of the removal mechanism simulation results is confirmed by the transmission morphology and diffraction analysis of the subsurface microstructure of nickel-based superalloy. The simulation and test results indicated that the mechanisms of plastic removal in the process of turning nickel-based single crystal superalloy are structural damage to amorphous evolution, structural damage to dislocation stabilised stacking faults and structural damage to polycrystalline phase transition.

Key words: nickel-based single crystal superalloy; precision turning; removal mechanism; molecular dynamics simulation; structural evolution

镍基单晶高温合金^[1]凭借其独特的元素组成和稳定的面心立方单晶结构, 在高温条件下不仅具有高温合金优异的抗疲劳和耐热腐蚀的性能, 同时还拥有面心立方单晶材料良好的抗拉伸和高剪切强度的特点, 成为了制造航空发动机涡轮

盘的关键材料^[2]. 镍基单晶高温合金涡轮盘的制造通常先采用整体铸造, 零件最终功能表面的生成则是依靠车削加工工艺去除铸造时产生的多余材料来实现的, 因此在加工航空发动机涡轮盘时车削是必不可少的工艺. 但镍基单晶高温合金

属于典型加工性低的材料,使其在车削制造镍基单晶高温合金涡轮盘的过程中易发生表面/亚表面损伤,降低零件的服役性能和寿命^[3].镍基单晶高温合金车削去除过程对车削表面/亚表面的损伤形式起着决定性作用,所以为实现镍基单晶高温合金零件车削高效低损伤加工的目标,对镍基单晶高温合金车削去除机理进行研究十分必要.

国内外学者对高温合金车削进行了研究. Saleem 等^[4]为探究植物油对高温合金精密加工性能的影响,设计了向日葵油和蓖麻油 2 种不同植物油润滑条件下镍基高温合金 Inconel 718 正交阵列车削实验,发现蓖麻油润滑时进给速率对表面粗糙度的影响程度最大. Hood 等^[5]评估了不同切削速度对镍基高温合金 RR1000 车削表面完整性的影响情况,实验结果表明,在切削速度小于 $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,车削镍基高温合金 RR1000 能够获得完整性较好的切削表面. Pan 等^[6]采用期望函数法优化了镍基高温合金 GH4169 的切削参数,获得了粗糙度较小的车削加工表面. Tasbasi 等^[7]探究了最小量润滑、低温液氮和二氧化碳 3 种不同冷却条件对镍基高温合金 Inconel X-750 车削表面完整性的影响情况,经过表面粗糙度结果对比,表明了低温二氧化碳冷却可以提供最佳的表面质量. Luo 等^[8]在无润滑条件下车削镍基高温合金 GH909,得到切削速度在 $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右时,可以获得良好质量的加工表面. 李福稼等^[9]将车削 GH4169 镍基高温合金锥面外圆表面作为研究对象,通过正交实验法,探究了切削参数对表面粗糙度的影响规律,然后利用反向传播(back propagation, BP)神经网络预测法建立了能够精准预测粗糙度的经验模型,发现刀具圆弧半径较大时,车削表面粗糙度较小. Günay 等^[10]为了消除在镍基高温合金车削过程中使用矿物油润滑剂给生物和环境带来的有害后果,使用硬质合金刀具在液氮、干冰、纳米流体、植物油等不同的环保切削环境下对镍基高温合金 Nimonic 80A 进行车削实验,经过对车削表面质量的评估,表明植物油条件不仅能够减小润滑剂对环境的危害,还能有效降低车削表面的粗糙度. Oschelski 等^[11]研究了切削速度、切削深度和冷却条件对高温合金 Hastelloy X 车削表面粗糙度影响的显著性,结果表明切削速度和车削深度的影响最显著. Şirin 等^[12]研究了不同混合切削环境对高温合金 Haynes 25 表面质量的影响,经过表面粗糙度的

对比,证明与干式车削条件相比,掺杂了石墨烯的单纳米流体和气态基混合切削条件下的表面质量更好. 武导侠等^[13]通过车削高温合金 GH4169 实验,在切削速度和车削深度不变的条件下研究了进给速度对车削表面完整性的影响规律,实验结果发现随着进给速度的增大,表面犁沟的间距会明显增大,加工表面平整性变差,通过此实验现象说明了在车削镍基高温合金 GH4169 时,表面质量会随着进给量的增大而降低.

通过对国内外高温合金车削研究现状的梳理可知,目前关于车削高温合金的研究,从材料角度看,主要集中在多晶高温合金领域,并且研究内容多集中在切削条件对表面质量影响,缺少与之存在结构差异的镍基单晶高温合金领域中决定表面质量微观角度的车削去除机理研究,所以在实际车削镍基单晶高温合金时会因缺少相关机理指导,限制零件加工表面质量的提升. 本文以基于大规模原子/分子并行模拟器(large-scale atomic/molecular massively parallel simulator, LAMMPS)的分子动力学仿真(molecular dynamics simulation, MDS)方法和车削实验对镍基单晶高温合金车削去除机理进行探究.

1 镍基单晶高温合金去除机理仿真

1.1 分子动力学切削仿真模型的构建

由于镍基单晶高温合金的强化相 γ' 形成的方式是从基体相 γ 中共格析出,并且在它形成后会嵌入基体相中,因此干涉现象严重^[14],所以在构建切削工件的物理模型时异常困难,考虑材料微观结构和微观粒子相互作用类型的近似程度,将镍基单晶高温合金模型合理简化为具有面心立方结构并且镍元素含量极高的镍基单晶模型. 图 1 为车削镍基单晶分子动力学仿真模型. 该模型一部分是车削使用的金刚石刀具,另一部分为车削所用的镍基单晶工件. 仿真模型中金刚石刀具是由 1 121 个碳原子构成的. 镍基单晶工件 y 轴方向的长度为 16 nm , x 轴方向的宽度为 11 nm , z 轴方向的厚度为 4 nm ,它可以被划分为 3 层. 位于边缘且内部包含 14 340 个镍原子部分是防止车削过程中工件受力发生移动,起固定作用的边界原子层. 位于中间且内部含有 9 090 个镍原子部分是在真空的仿真环境下模拟实际车削加工

时切削热向空气中逸散过程,功能为起热传导作用的导热原子层,仿真过程中设置此层温度维持在 300 K 不变.位于内侧包含 39 360 个镍原子部分是进行实际车削去除模拟并受牛顿第二运动定律支配的切削原子层.

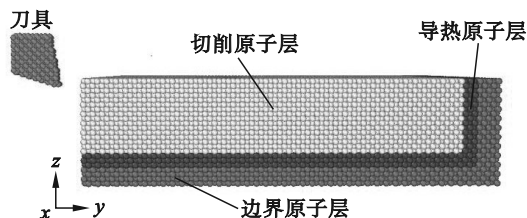


图 1 车削镍基单晶分子动力学仿真模型

Fig. 1 Molecular dynamics simulation model for nickel-based single crystal turning

1.2 仿真条件及加工参数的设定

1.2.1 分子动力学仿真平台

分子动力学仿真过程主要由数据计算和可视化 2 部分构成,其中数据计算选用的是拥有良好并行运算能力、可以计算大规模微观粒子体系仿真的 LAMMPS.为了便于观察分析模拟数据计算输出的结果需要经可视化后处理转变成视频或图片,开源可视化工具(open visualization tool, OVITO)是分子动力学领域比较成熟的后处理可视化开源免费软件.综上所述,本文分子动力学仿真使用的是 LAMMPS 和 OVITO.

1.2.2 运动方程的求解

分子动力学仿真结果呈现出的众多宏观特性,本质是大量粒子运动状态的综合体现,因此确定合适的运动方程,尽可能准确地描述微观粒子的运动规律和轨迹至关重要.综合考虑仿真效果和仿真模拟计算时运行稳定,本文基于 Verlet 算法求解牛顿运动方程,并将求解结果作为分子动力学仿真描述微观粒子运动的运动学方程,其简要求解过程如下:

式(1)是基于牛顿力学原理构建的表述系统内粒子运动学关系的方程.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 r_i(t)}{\partial t^2} &= \frac{1}{m_i} \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_i(r_{ij}), \\ \mathbf{F}_i &= -\nabla_i U(r_1, r_2, \dots, r_n), \\ \frac{d(r_i(t))}{dt} &= \mathbf{v}_i(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: \mathbf{F}_i 为第*i*个粒子所受的力,N; r_{ij} 为粒子*i*和粒子*j*之间的距离,nm; r_i 为第*i*个粒子的位置坐标,nm; \mathbf{v}_i 为粒子*i*的速度,nm·ps⁻¹; m_i 为粒子*i*的质量,g·mol⁻¹; n 为系统自由度; t 为粒子瞬时位置

对应的时刻; $\nabla_i U$ 为由粒子总数*i*构成系统势能函数的梯度求解.

式(2)是经 Verlet 算法求解并优化的最终粒子运动方程.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}(t+h) &= \mathbf{r}(t) + \mathbf{v}(t)h + \mathbf{a}(t)h^2/2, \\ \mathbf{v}(t+h/2) &= \mathbf{v}(t) + \mathbf{a}(t)h/2, \\ \mathbf{a}(t+h) &= -\nabla V(\mathbf{r}(t+h))/m, \\ \mathbf{v}(t+h) &= \mathbf{v}(t+h/2) + \mathbf{a}(t+h)h/2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: \mathbf{r} 为粒子瞬态位置,nm; \mathbf{v} 为粒子瞬时速度,nm·ps⁻¹; h 为时间间隔,ps; \mathbf{a} 为粒子瞬时加速度,nm·ps⁻²; V 为物理保守仿真体系对应的势能函数; m 为微观粒子的质量.

1.2.3 势函数的选择

粒子间相互作用形成的原子力是分子动力学模拟时重要的参数,通常用势函数表示.根据使用的广泛程度和本次仿真研究需求,工件内部 Ni-Ni 之间的相互作用关系选用式(3)所示的嵌入原子法(embedded atom method, EAM)势函数表示,切削过程中刀具 C 原子与工件 Ni 原子之间的相互作用关系,采用式(4)所示的 Morse 势函数表示,函数关系式中的各参量取值见表 1.由于金刚石刀具莫氏硬度远大于工件的硬度,且本次研究不需对刀具进行分析,所以固化处理金刚石刀具,刀具内 C 原子之间可视为无相互作用关系,无需选择势函数表达.

$$E_i = \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \phi_{ij}(r_{ij}) + Q_i \left(\sum_{j \neq i} \rho_j(r_{ij}) \right), r_{ij} < r_c. \quad (3)$$

式中: E_i 为粒子*i*受其他粒子作用产生的总能量; ϕ_{ij} 为粒子*i*和粒子*j*之间的对势,eV; Q_i 为粒子*i*的嵌入能,eV; ρ_j 为粒子*j*的电子云密度,g·cm⁻³; r_c 为截断半径,nm.

$$E(r_{ij}) = D_0 \left[e^{-2\alpha(r_{ij}-r_0)} - 2e^{-\alpha(r_{ij}-r_0)} \right], r_{ij} < r_c. \quad (4)$$

式中: D_0 为粒子间结合能,eV; α 为势能曲线梯度系数; r_0 为平衡态粒子间距离,nm; $E(r_{ij})$ 为粒子*j*对粒子*i*作用时产生的能量.

表 1 Ni 原子和 C 原子之间 Morse 势函数参量取值
Table 1 Parameter values of Morse potential function between nickel atom and carbon atom

| 参量 | D_0/eV | α/nm^{-1} | r_0/nm |
|----|-----------------|-------------------------|-----------------|
| 取值 | 0.270 | 7.600 | 0.376 |

1.2.4 截断半径与边界条件的选择

粒子间势函数选定并施加后,仿真模型内粒子的相互作用力便出现了,理论上为了精准确定各个粒子的受力情况,需要分别以每个粒子为中

心粒子,其他单独粒子与之匹配,从而计算不同粒子对之间的势能,但势能是随着与中心粒子之间的距离增大而减小的,因此距离中心粒子稍远的粒子群对其产生极其微弱的力或不产生力的作用,这个不产生作用力的临界距离就是截断半径.它的选择要兼顾模拟精度和计算机性能,通常使用如图2所示的近邻列表对其进行控制.另外,分子动力学仿真时模拟系统中粒子数量在一定程度上决定着仿真工件模型与实际材料性质之间差异的大小,但受限于计算机存储和运算能力,无法对过多粒子构成的模拟系统进行数据处理,所以模拟系统边界条件的选择极其重要.根据镍基单晶模型的特点,在刀具和工件的 x 轴方向上采用周期性边界条件,在 y 轴和 z 轴方向上选择自由边界条件.

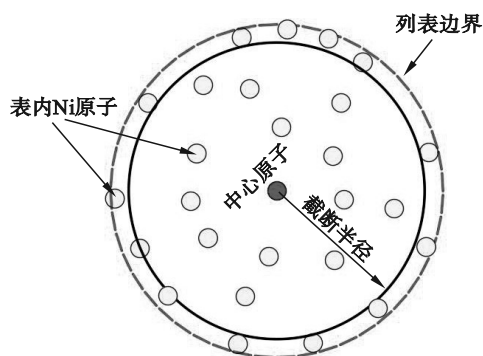


图2 近邻列表示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the proximity list

1.2.5 系综的选择与仿真前预处理

分子动力学模拟系统存在非平衡状态和平衡状态,车削加工仿真过程是在平衡状态下进行模拟的,建模时微观粒子可能受系统或人为因素影响先进入非平衡态,此时会对仿真结果造成干扰,需要对仿真系统进行弛豫处理从而达到平衡态.本文中模拟系统无论在非平衡状态还是在平衡状态下,都选用了等温等压系综对体系的原子数量 N 、压强 p 、温度 T 等宏观参数进行综合约束,以期达到模拟环境尽可能贴近真实实验环境进而实现仿真探究去除机理的目标.图3为仿真模型在弛豫处理过程中体系的势能与时间的变化关系曲线,通过此图可以看出,随着时间的增加体系势能逐渐降低,并且在大于30 ps时体系能量曲线和横坐标轴趋于平行,此现象说明了之前仿真参量设置的合理性,表明仿真系统在30 ps时达到了平衡状态,满足了仿真探究车削去除机理的前期必要需求.

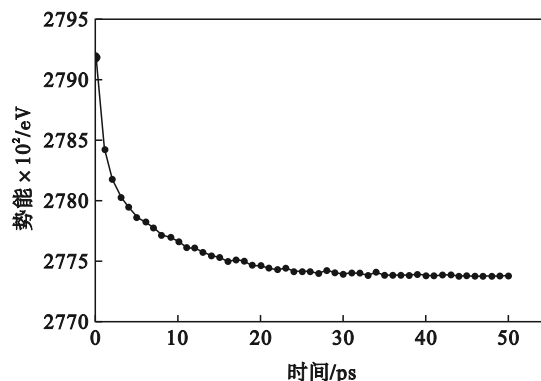


图3 仿真体系势能变化

Fig. 3 Potential energy change of the simulation system

1.2.6 仿真加工参数的设定

在搭建完工件和刀具的仿真几何模型并且定义微观粒子间力学属性之后,按照表2中设定的车削加工仿真参数对镍基单晶工件进行平衡状态下的仿真车削加工.

表2 车削加工仿真参数
Table 2 Simulation parameters of turning

| 位置 | 深度/nm | 速度/(nm·ps ⁻¹) | 时间步长/ps |
|---------|-------|---------------------------|------------------|
| (100)晶面 | 1.0 | 1.0 | 10 ⁻³ |

1.3 仿真结果与分析

对于镍基合金材料切屑形成过程,从宏观角度看是塑性变形程度突破了属于金属材料固有特性的剪切强度,导致一部分金属材料在切削力的作用下从加工表面剥离的现象.由此可知,塑性变形是导致金属塑性车削去除的主要机制.然而塑性变形产生车屑的过程从微观本质来看则是加工过程中被加工材料在外力作用下引起的晶格畸变造成材料内部的微观损伤结构脱离基体材料而被去除,所以为了获得镍基合金车削去除机理,就需对各种引起塑性变形的微观损伤进行准确识别与分析.

图4是当车削路程为4 nm,面心立方(FCC)结构的镍基单晶工件模型分子动力学(molecular dynamics, MD)车削仿真形成车屑时,利用晶体结构识别技术共近邻分析(common neighbor analysis, CNA)得到的晶体结构损伤情况.从此图可知,镍基单晶工件中的面心立方结构在车削过程中先转变为图4虚线圈内的非晶结构,之后在刀具的主切削运动影响下出现了车屑,在成屑的瞬时状态下,非晶结构原子数量占比如图5所示,约为13.9%.这种由工件内晶体结构出现非晶转

变形成车屑可能的原因是在 MD 仿真车削镍基单晶时金刚石刀具会对车削加工表面产生强烈的挤压和摩擦作用,这两种作用产生的能量较大,使被车削镍基单晶工件靠近加工表面的亚表层中部分 Ni 原子在吸收此能量后变得极其活跃,因此原子间的结合键被拉长甚至被拉断,导致原子间的相互约束减弱,最终引起个别镍基单晶原子面内原子距离的异常增大,原子面解体破裂,形成众多原子无序排列的非晶结构,从而发生了非晶转化形式的晶格畸变结构损伤,易于塑性变形车屑的产生。

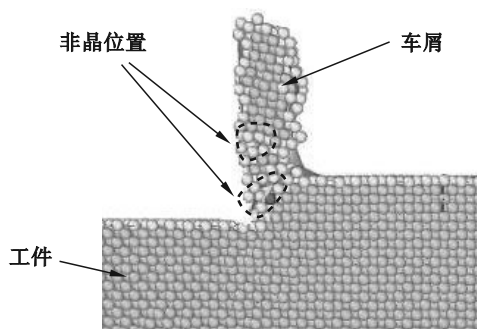


图4 非晶结构位置

Fig. 4 Location of the amorphous structure

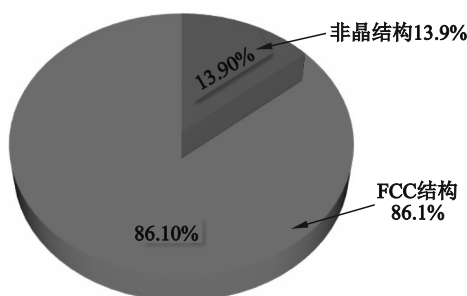


图5 非晶结构原子数量占比

Fig. 5 Atom percentage of the amorphous structure

图6是在镍基单晶车削仿真过程中使用后处理 OVITO 软件监测到晶体结构内部出现了层错 (stacking fault, SF) 的损伤形式,该层错结构损伤由两层平行且紧密排列的原子面构成.出现层错结构损伤的原因是在车削加工镍基单晶的过程中后刀面会对工件车削表面产生挤压和摩擦,造成热应力和组织应力集中,此集中应力足够大但不足以大规模破坏原子键,使局部区域的晶体发生相对滑移错动,造成程度较大的晶格畸变.晶格畸变区体系能量变高且不稳定,此时会通过分解滑移错动量的方式降低体系局部畸变能.如图7所示,使用汤普森(Thompson)四面体可对立方晶系中这一体系趋稳过程进行说明,其中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$

代表面心,初始产生的滑移错动矢量为 \overrightarrow{BC} ,体系趋稳后的滑移错动量则变成了2个滑移错动分矢量 $\overrightarrow{B\delta}$ 和 $\overrightarrow{\delta C}$,由于此过程发生在 FCC 结构的镍基单晶中,所以趋稳过程发生的具体位置是在汤姆森四面体的 ABC 面上.在此车削镍基单晶的仿真过程中 ($\overrightarrow{BC} \rightarrow \overrightarrow{B\delta} + \overrightarrow{\delta C}$) 的转变,在后处理所得的图8中发现 $\overrightarrow{BC} = \frac{1}{2}[\bar{1}10]$, $\overrightarrow{B\delta} = \frac{1}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$, $\overrightarrow{\delta C} = \frac{1}{6}[\bar{2}11]$,用判别式(5)验证了此趋稳过程在镍基单晶车削过程中发生的合理性,所以镍基单晶仿真车削过程中趋稳过程可表达为 $\frac{1}{2}[\bar{1}10] \rightarrow \frac{1}{6}[\bar{1}2\bar{1}] + \frac{1}{6}[\bar{2}11]$.

$$\left. \begin{aligned} |\overrightarrow{BC}|^2 &> |\overrightarrow{B\delta}|^2 + |\overrightarrow{\delta C}|^2, \\ \overrightarrow{BC} &= \overrightarrow{B\delta} + \overrightarrow{\delta C}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

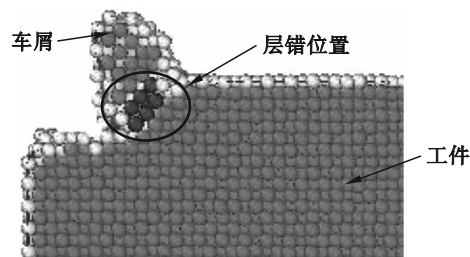


图6 层错结构形貌及位置

Fig. 6 Morphology and location of the stacking fault structure

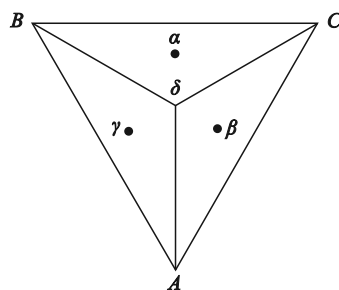


图7 汤普森四面体

Fig. 7 Thompson tetrahedron

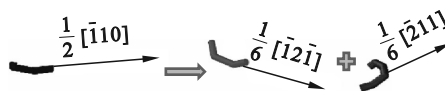


图8 趋稳演变过程

Fig. 8 Stabilised evolution process

畸变趋稳过程中镍晶体在 $[111]$ 方向上原子堆垛的正常次序将遭到破坏,由“123123123”变成“12313123”,产生缺失型层错结构损伤生成剪切滑移塑性变形车屑。

如图9a所示,镍基单晶的晶体内部原本没有晶

界的存在,通常情况下整个晶体由一个完整晶粒构成.然而在镍基单晶车削仿真的过程中,在图 9b 中发现了镍基单晶晶粒破碎重组现象,形成了具有一定取向差的晶粒 1 区域和晶粒 2 区域,出现了多晶化的演变趋势.镍基单晶车削多晶化现象的出现有利于塑性切削去除多余材料.晶粒出现多晶化趋势主要的原因是在车削去除的过程中,镍基单晶晶格内部分原子面受车削力作用发生撕裂或扭转现象形成了半原子面缺失或平行原子面间异位匹配的线缺陷(位错),位错形成后会在切应力的作用下发生滑移运动,使晶粒产生塑性变形,晶粒出现破碎现象.此外,位错会在破碎后细小的晶粒周围发生交互塞积,这不仅增强了破碎所形成细化晶粒的剪切强度,阻止了它们进一步碎裂细化,还会造成破碎晶粒的扭转,产生破碎晶粒间的取向差,出现多晶化相变形成车屑的趋势.

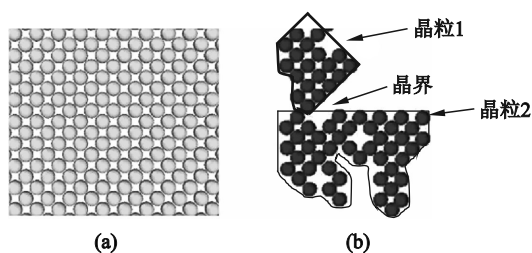


图 9 镍基单晶晶粒形貌变化

Fig. 9 Grain morphological change of the nickel-based single crystal

(a)—单晶原子排列;(b)—多晶原子排列.

2 镍基单晶高温合金去除机理实验

2.1 实验条件与方案

为了验证镍基单晶高温合金材料去除机理仿真分析的结果是否正确,本文设计了镍基单晶高温合金车削去除机理验证实验.首先利用型号为 CAK5058 的数控车床中的车削加工区对外圆直径为 15 mm、长为 77 mm 的棒状镍基单晶高温合金 DD98 工件进行车削加工.然后使用型号为 Helios Nanolab 600i 的聚焦离子束系统(FIB),先在车削后的镍基单晶高温表面喷涂保护金属铂层,防止高能离子束取样和减薄的操作对截面组织微观结构的影响.最后使用型号为 Tecnai G2 F20 点分辨率可低于 0.24 nm 并且最小线分辨率可达 0.102 nm 的透射电子显微镜对镍基单晶高温合金车削截面微观组织进行观察.在使用透射电镜观察镍基单晶高温合金车削截面时,为了保

证晶面在倒位空间对称且清晰分布,使用双倾样品杆上样,并在设备完全抽真空后再进行形貌观察和衍射分析测试.

2.2 实验结果与分析

图 10a 中平行直线之间的区域是使用透射电子显微明场成像模式在距离喷涂金属铂保护层上界面最近位置观察到的镍基单晶高温合金切深方向截面微观组织非晶区.为了进一步获得非晶区内部显微结构,对图 10a 中框选的 b 区域进一步放大观察与分析,从图 10b 中可以看出非晶区域内镍基单晶高温合金车削截面的微观组织分布杂乱无章呈现明显的絮状非晶状态,证实了镍基单晶车削去除机理仿真分析时部分晶体结构发生了面心立方(FCC)到非晶结构的转变进而产生了塑性去除车屑的合理性.

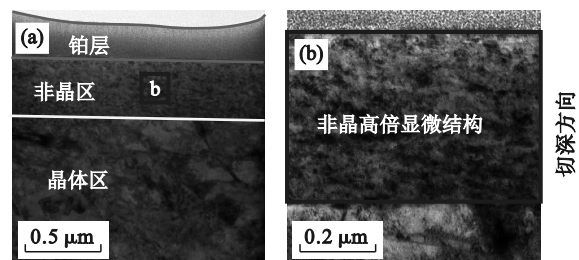


图 10 镍基单晶高温合金非晶转变形貌

Fig. 10 Morphology of the nickel-based single crystal superalloy amorphous transformation

(a)—明场低倍非晶区;(b)—选区非晶高倍形貌.

图 11a 是将透射电子显微镜发射电子束平行于镍基单晶高温合金[011]晶向时获得的(111)晶面的微观组织形貌,在图 11a 中标注的 4 个椭圆圈内较为明显地发现了边界轮廓呈现不规则形状的衬度差异区,为了得到此衬度差异区内显微组织的结构信息进而确定晶体结构损伤类型,给出椭圆圈区域的高分辨透射电子显微图像,发现低倍时的不规则形状显微组织是如图 11b 所示的层错,说明了镍基单晶车削去除机理仿真分析时得到的层错损伤形成车屑去除机理的可信性.

图 12a 是使用透射电镜得到的车削截面形貌图,由图可知,在镍基单晶高温合金车削实验后完整晶体内部出现了晶粒破碎现象,形成了众多具有取向差异的细小晶粒.图 12b 是使用透射电镜的衍射模式对此区域内晶体结构进行衍射分析得到的晶粒倒易空间图像,衍射图谱的中心衍射斑明亮而外围斑点呈现明显的环状分布特征,进一步说明了在镍基单晶高温合金去除材料形成车屑的过程中晶体内部出现了晶粒破碎、多晶化

的结构损伤,从而有利于细小晶粒塑性变形运动形成车屑,证明了镍基单晶仿真探究车削去除机理分析时得到的多晶化塑性去除机理的正确性.

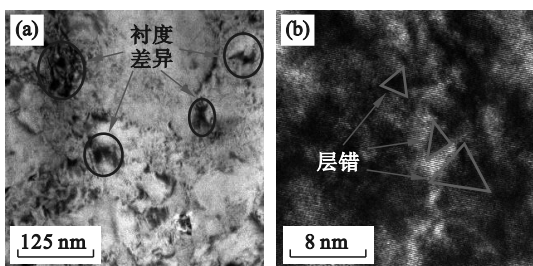


图 11 镍基单晶高温合金车削截面层错形貌

Fig. 11 Stacking fault morphology in the turned section of the nickel-based single crystal superalloy
(a)—衬度差异组织形貌;(b)—衬度差异区内显微结构.

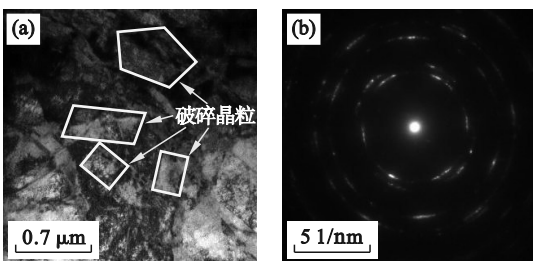


图 12 镍基单晶高温合金多晶化形貌和结构衍射

Fig. 12 Polycrystalline morphology and structural diffraction of the nickel-based single crystal superalloy
(a)—多晶化形貌;(b)—多晶化结构衍射.

3 结 论

1) 镍基单晶高温合金在车削过程中会出现晶态转变为非晶态的现象,从而产生非晶演变型结构损伤,造成镍基单晶高温合金的塑性去除.

2) 镍基单晶高温合金车削时,会发生位错趋稳过程,导致晶体结构中出现层错损伤,进而镍基单晶高温合金中部分晶体材料被塑性去除.

3) 镍基单晶高温合金受车削工艺的影响,在晶体内部出现了原本并不含有的晶界,所以出现了多晶化相变结构损伤,发生了镍基单晶高温合金车削塑性去除现象.

参考文献:

- [1] 蔡明, 巩亚东, 冯耀利, 等. 镍基高温合金磨削表面工艺性能试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 234-238.
(Cai Ming, Gong Ya-dong, Feng Yao-li, et al. Experimental

study on grinding surface processing property of nickel-based superalloy [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2019, 40(2): 234-238.)

- [2] Sun D J, Li G Z, Guo L F, et al. Microstructure and high-temperature tensile behavior of superalloy prepared by hot oscillatory pressing [J]. *Materials Characterization*, 2022, 194: 112488.
- [3] Sen B, Yadav S K, Kumar G, et al. Performance of eco-benign lubricating/cooling mediums in machining of superalloys: a comprehensive review from the perspective of triple bottom line theory [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 35: e00578.
- [4] 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.
- [5] Hood R, Soo S L, Aspinwall D K, et al. Tool life and workpiece surface integrity when turning an RR1000 nickel-based superalloy [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98 (9/10/11/12): 2461-2468.
- [6] Pan L, Wu Z R, Fang L, et al. Investigation of surface damage and roughness for nickel-based superalloy GH4169 under hard turning processing [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2020, 234(4): 679-691.
- [7] Tasbasi M, Ay M, Etyemez A. Quality in turning of inconel X-750 superalloy [J]. *Emerging Materials Research*, 2020, 9(4): 1154-1162.
- [8] Luo M, Li H Z. On the machinability and surface finish of superalloy GH909 under dry cutting conditions [J]. *Materials Research-ibero-american Journal of Materials*, 2018, 21(4): e20171086.
- [9] 李福稼, 郭伟, 李振东, 等. 镍基高温合金锥面外圆车削表面粗糙度优化研究[J]. 制造技术与机床, 2018, 678(12): 102-107.
(Li Fu-jia, Guo Wei, Li Zhen-dong, et al. Study on optimization of surface roughness for nickel base super-alloy cone turning [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2018, 678(12): 102-107.)
- [10] Günay M, Korkmaz M E, Yaşar N. Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 678-687.
- [11] Oschelski T B, Urasato W T, Amorim H J, et al. Effect of cutting conditions on surface roughness in finish turning Hastelloy® X superalloy [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 532-537.
- [12] Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 76: 428-443.
- [13] 武导侠, 张定华, 姚倡锋. GH4169 高温合金车削表面完整性对疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 59-67.
(Wu Dao-xia, Zhang Ding-hua, Yao Chang-feng. Effect of surface integrity of turned GH4169 superalloy on fatigue performance [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(6): 59-67.)
- [14] Xia W S, Zhao X B, Yue L, et al. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 44(9): 76-95.