基于DAMASK软件的磨削仿真模型研究

袁振宇

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年5月24日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月24日

摘要

在现代材料加工领域, 磨削作为一种重要的加工工艺,其相关研究具有关键意义。然而,目前关于磨削 的实验研究数量有限,由于实验条件的复杂性、高成本以及耗时性等因素,使得全面深入地探究磨削过 程面临诸多挑战。为弥补实验研究的不足,借助晶体塑性模型仿真技术对磨削结果进行模拟分析成为一 种可行且必要的途径。晶体塑性模型能够有效描述材料在微观尺度下的塑性变形行为,通过对磨削过程 中材料的力学响应、微观组织演变等关键因素进行精确建模与仿真,可以为深入理解磨削机理、优化磨 削工艺参数提供重要的理论支持与指导,从而推动磨削技术的进一步发展与应用。

关键词

微观组织, **磨削工艺**, 塑性变形, 力学响应

Research on Grinding Simulation Model Based on DAMASK Software

Zhenyu Yuan

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 24th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jun. 24th, 2025

Abstract

In the field of modern materials processing, grinding, as an important machining process, is of key significance for its related research. However, the number of experimental studies on grinding is limited, and the complexity, high cost and time-consuming experimental conditions make it challenging to explore the grinding process comprehensively. In order to compensate for the lack of experimental studies, it is feasible and necessary to simulate and analyze the grinding results with the help of crystal plasticity model simulation. The crystal plasticity model can effectively describe the plastic deformation behavior of the material at the microscopic scale, and by accurately modeling and simulating

the mechanical response of the material, microstructure evolution and other key factors in the grinding process, it can provide important theoretical support and guidance for the in-depth understanding of the grinding mechanism and optimization of the grinding process parameters, so as to promote the further development and application of grinding technology.

Keywords

Microstructure, Grinding Process, Plastic Deformation, Mechanical Response

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

磨削作为一种在众多工艺流程终端普遍采纳的高效精加工技术,其卓越的性能使其成为确保加工部 件达到预期使用效能、尺寸精确度以及形状精度的关键手段,特别是在高强度特殊钢材的精细加工领域 中,展现了其无可替代的价值与广泛应用。而磨削过程中的高温、深入探讨高应变率与多重磨粒共同作 用下的机械挤压及剪切机理,这一过程显著促进了被加工材料表面微观结构的动态演化。微观结构的这 种演变,通过调节切屑形成周期中的流动应力分布,直接影响了磨削力、热能与相变负荷的动态平衡。 这一动态平衡进一步塑造了残余应力的分布模式,从而对工件的整体使用寿命以及其在实际应用中的性 能产生深远影响。

鉴于实验检测位错密度存在成本高、耗时长的问题。众多研究者致力于构建适用于不同磨削环境和 方式的物理模型,以实现对磨削过程中力热载荷的预测与控制。章海明[1]团队构建包含位错密度的全局 晶体塑性模型,研究发现先进高强度钢(AHSS)中的 DP980 钢板与传统体心立方(BCC)钢板相比,Lankford 系数更小,强度各向异性更弱,揭示了位错密度对强度的影响。张旭团队通过力学性能测试、电子背散 射衍射(EBSD)表征和原位电子沟道衬度成像(*in-situ* ECCI)观察,研究 TRIP 钢的位错密度演变,并建立考 虑位错滑移和马氏体相变机制的多机制晶体塑性本构模型,通过谱求解方法实现模型,结果显示在较高 应变幅下,试样位错密度变化显著。刘贵森团队引入孪晶晶界迁移率各向异性,建立耦合晶体塑性有限 元 - 相场(CPFE-PF)模型,该模型具备预测孪晶形貌、生长及位错密度的能力,并进一步用于研究孪晶相 关的六方金属位错密度演变和力学行为。Su [2]对 Al-Zn-Mg 合金热变形行为和位错密度演变展开研究, 通过重构损伤部位变形梯度,建立耦合位错密度晶体塑性(CP)模型和相场法(PFM)的完整尺度本构模型, 实验和模拟结果表明,Al-Zn-Mg 合金在热拉伸载荷下,晶粒细化使晶界密度增加,进而导致位错密度快 速上升,损伤分布更均匀,加工硬化能力增强。

有针对性的晶体塑性模型建模方法至关重要,而一些辅助方法也为研究材料位错密度演变提供了新 方向。Tarek Hussein 利用 DREAM.3D 软件构建包含材料位错密度的虚拟 RVE (代表性体积元素),并借 助 DAMASK 进行数值模拟,获取局部应力、应变和位错密度演化情况。目前,纤维增强复合材料、多晶 材料等具有重要技术意义的材料,其宏观本构行为受位错密度影响较大。为更精准地预测位错密度, Gierden [3]等人引入基于有限元(FE)的双尺度计算建模方法,该方法已成为跨尺度建模复杂材料的有效精 准工具。由于位错密度对材料残余应力有影响,晶体塑性模型也可用于模拟残余应力形成。Grill [4]提出 单元消除和再激活方法,模拟热流体流动、晶粒生长时的温度分布和晶粒结构,并植入晶体塑性模型, 研究平行和垂直于激光扫描方向的残余应力。Li [5]对均匀细晶和毫米级粗晶(MCG)混合组织开展微观变 形不均匀性试验,结合拉伸试验、光学显微镜(OM)观察、EBSD 试验以及晶体塑性(CP)模拟,发现细晶 粒与粗晶粒的位错密度变化规律存在差异。

基于物理机制的晶体塑性模型可从多维度研究微尺度变形(如位错滑移)和微观结构演化(如位错增殖、 湮灭及马氏体相变)。此外, CP 模型擅长描述单个晶粒的力学响应, 将宏观力学行为与微观结构根源相联 系,常被用于预测织构演变、力学各向异性以及晶粒间相互作用。采用先进的全场 CP 模型,无论是利用 有限元求解器(即 CPFEM)还是基于快速傅里叶变换的谱方法求解器,对微米级晶体结构进行模拟在计算 上均具有可行性。与传统基于平均场 CP 的方法相比,全场 CP 模型考虑由多个元素组成的物质点,具有 以下优势: (1) 满足晶界的应力平衡和应变相容性; (2) 若 RVE 建模分辨率足够高,可呈现更真实的晶 粒形貌;(3)考虑与塑性变形相关的局部晶粒相互作用和晶粒内的不均匀性。晶体塑性模型已被证实能准 确描述马氏体合金钢晶粒尺度的变形机制。Li 等人运用三维 CPFEM 方法研究马氏体合金钢热压缩变形 行为,发现热变形过程中晶体取向和晶粒转动对热变形不均匀性影响显著,随着变形程度增加,Goss 织 构比例上升。Pinna [6]等人采用 CPFE 模型对 AA5052 铝合金热变形过程中织构和组织演化进行数值模 拟,研究表明,晶界运动方向与加载方向一致时,会促使局部变形带形成。基于物理的晶体塑性模型能 够直接追踪变形过程中微观结构的演化,材料参数具有物理解释性,有望提升对仿真结果的预测能力。 在多数研究中,位错密度作为内部变量用于表征材料微观结构,其演化通常可基于位错的储存和湮灭过 程进行模拟。早期开发硬化模型的研究采用单位位错密度解释材料微观结构状态。Edward [7]等人基于位 错和微观组织演化的应变硬化模型,模拟马氏体合金钢在不同变形温度下的硬化规律,发现温度超过200℃ 时,溶质 Mg 原子扩散促使晶界溶解,导致马氏体合金钢的位错平均自由程突然增大。

综上所述,鉴于实验检测力热载荷存在成本高、耗时长且操作繁琐复杂等问题,制作晶体塑性模型 能很好地解决这些问题。对于不同的晶体,需要选取有针对性地晶体塑性模型建模方法,同时还需要选 择辅助软件例如 Dream.3D、DAMASK [8]等来制作 RVE 模型来辅助求解晶体塑性模型中微观组织定量 参数地演化结果。该模型已被证实能准确描述马氏体合金钢等材料的微观参数演化机制,基于物理的晶 体塑性模型因能跟踪微观结构演化且材料参数具有物理解释,有望提升仿真结果预测能力。

2. 基础磨削实验

实验采用高强度马氏体钢 17-4PH 为研究对象。马氏体钢 17-4PH 的化学成分和材料性能如表 1 和表 2 所示。

		H) 10 5 /////							
С	Mn	Р	S	Si	Ni	Cr	Cu	Nb	Fe
0.04	0.28	0.027	0.021	0.51	4.15	16.5	3.4	0.3	余量

 Table 1. Chemical composition of martensitic steel 17-4PH

 表 1. 马氏体钢 17-4PH 的化学成分

 Table 2. Physical property parameters of martensitic steel 17-4PH

 表 2. 马氏体钢 17-4PH 的物理性能参数

物理量描述	物理量符号	数值
杨氏模量	Е	2.04E5 MPa
密度	$ ho_{ m W}$	7780 kg/m ³
泊松比	V	0.291
屈服强度	σs	1235 MPa

续表		
抗拉强度	<i>о</i> b	1425 MPa
伯格斯矢量	b	0.249 nm
熔点	Tm	1693 K
初始晶粒尺寸	D0	2.56 μm

图 1 呈现了磨削实验系统的结构示意。块状工件通过定制夹具,以螺栓连接方式稳固安装于 Kistler-9139A 三向测力计之上,而该测力计同样借助螺栓紧固,定位在机床的移动工作台上。



Figure 1. Grinding experiment system 图 1. 磨削实验系统

马氏体时效钢广泛应用于航空关键构件的生产制造领域。除了对加工精度要求极高的平面结构件外, 各类曲面及复杂薄壁结构件也对马氏体时效钢有着大量需求。本研究聚焦于马氏体时效钢的高精度平面 磨削加工,该加工过程只需维持较低的材料去除率,重点在于防止因切削深度过大,引发磨削力与磨削 温度升高,进而影响加工表面质量。由于马氏体时效钢具备高强度和良好塑性的特性,在磨削过程中, 工件表面极易发生塑性变形,切屑形成困难。并且,当进给速度和砂轮线速度较高时,增大的磨削负荷 会产生高温,导致工件与砂轮之间出现粘附问题。在相关影响因素中,砂轮线速度、进给量和切削深度 是主要变量。为便于开展实验研究,本文选取对目标位错密度影响最为显著的两个变量,即砂轮线速度 和切削深度进行探究,将进给速度固定为1m/min。同时,综合考量马氏体时效钢的加工特性,以及砂轮 和机床的性能参数,最终确定的磨削加工工艺参数组合详见表 3。

如图 2 所示,为工件磨削处,可以清晰看出砂轮磨削处,中间黑色小孔为磨削热电偶放置处,当砂轮经过此处时,热电偶对磨削温度进行感应。

参数	取值
砂轮线速度 vs (m/s)	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
工件进给速度 vw (m/min)	1
切深 ap (μm)	4

Table 3. Combination of grinding process parameters 表 3. 磨削加工工艺参数组合



Figure 2. 17-4ph before and after grinding 图 2. 17-4ph 磨削前后图

磨削温度是后续仿真研究中所需要的一个重要参数,因此,需要对磨削温度进行测量。在磨削加工 过程中,由于磨削力的作用以及砂轮与工件之间的摩擦,会产生大量的热量。这些热量集中在磨削区域, 使该区域的温度急剧升高,从而形成磨削温度。本研究使用图 3 所示的 DAQ 助手结合 NI-9315 温度采集 卡采集热电偶节点的温度信号,从而得到磨削过程中的温度曲线。



Figure 3. Force signal acquisition device 图 3. 力信号采集装置

在本研究中,采用热电偶对磨削过程中的热载荷实施测量。热电偶的构造包含热电极、绝缘材料、 保护管及接线盒等核心组件。其中,热电极由两种不同材质的金属导体构成,通过与被测对象直接接触, 实时感知温度变化并产生对应的热电势信号。为保障测量精度,在热电极外部包覆绝缘材料,以此隔绝 两根热电极间以及热电极与保护管间的电导通,避免短路现象干扰热电势的准确测量。保护管的设置旨 在为热电极和绝缘材料提供防护屏障,有效抵御被测介质的化学腐蚀、机械冲击及各类外界干扰因素。 而位于热电偶末端的接线盒,则承担着连接热电极与外部测量电路的关键功能,便于实现信号的高效传 输与便捷连接操作。如图 4 所示。

在磨削作业进程中,为精确获取磨削接触弧区域内的温度数据,需借助 NI-9315 温度采集卡对热电 偶节点的温度信号实施采集操作。其中,将采样频率设定为 100 Hz,不同磨削工艺下的磨削温度结果如 表 4 所示,考虑到采样速率的适配性,热电偶自身的响应时间一般处于几十毫秒至几百毫秒区间。

在后续的仿真研究进程中,磨削力是不可或缺的关键参数,必须对其开展精准测量。为获取不同



Figure 4. Thermal signal acquisition diagram 图 4. 热信号采集图

Table	4. Temperature results for different grinding processes
表 4.	不同磨削工艺下的温度结果

实验序号	砂轮线速度 vs (m/s)	工件速度 vw (m/min)	磨削深度 ap (μm)	磨削温度 (℃)
1	10	1	4	40.6
2	15	1	4	51.2
3	20	1	4	60.4
4	25	1	4	69.8
5	30	1	4	76.4

磨削工况下的磨削力数据,采用 Kistler-9139A 测力仪与力信号采集器相连接,对各磨削工艺组合产生的 磨削力信号实施采集。将测量时长设定为 20 秒,采样频率设置为 2500 Hz,采集工作完成后,运用 Dyno Ware 软件对磨削力信号进行后处理,以此消除干扰信号的影响。通过对采集到的磨削力信号施加截止频 率为 10 Hz 的低通滤波处理,最终得到各工艺组合下的平均磨削力数值。

固定进给速度为1m/min,对表中的磨削工件参数进行正交实验,实验结果如表5所示。

实验序号	砂轮线速度 vs (m/s)	工件速度 vw (m/min)	磨削深度 ap (μm)	磨削温度 (℃)	法向磨削力 (N)	切向磨削力 (N)
1	10	1	4	40.6	9.16	5.13
2	15	1	4	51.2	7.43	4.51
3	20	1	4	60.4	6.16	4.38
4	25	1	4	69.8	5.03	3.33
5	30	1	4	76.4	4.61	2.68

Table	5. Experimental test results
表 5.	实验检测结果

3. 仿真模型的构建

代表性体积单元是指材料体系中能够表征整体材料平均特性的最小体积单位。这一体积单元的尺寸 需满足特定条件,既要足够微小,以充分展现材料微观结构的细致特征,又要具备适当规模,确保其统 计平均特性与宏观材料的性能表现相契合。图 5 展示了利用 Dream.3D 软件,基于原始 EBSD 数据进行 代表性体积单元构建的具体操作流程。



不同的微观结构特征,如晶粒尺寸、相分布、缺陷密度等,会在 RVE 中体现出不同的响应,进而影响材料的宏观性能。这为材料的优化设计和性能改进提供了理论依据。确定一个合适的 RVE 需要有很多流程。通常需要考虑材料微观结构的复杂性和随机性。对于具有规则微观结构的材料,如某些单晶材料或周期性排列的复合材料,确定 RVE 相对容易,可根据其微观结构的周期性特征来选取。而对于微观结构复杂且无明显周期性的材料,如多晶金属,则需要采用统计分析方法。研究人员通常会从材料中选取多个不同的体积单元,对其性质进行测量和分析,通过统计手段判断何时这些体积单元的平均性质趋于稳定,此时的体积单元即可视为 RVE。在实际应用中,RVE 广泛应用于材料性能预测和多尺度建模,在性能预测方面,基于 RVE 建立的模型能够准确预测材料在不同工况下的宏观响应,如在机械载荷、热载荷下的行为。在多尺度建模中,RVE 作为微观尺度与宏观尺度之间的过渡单元,将微观结构信息传递到宏观模型中,使得能够从原子尺度到宏观尺度全面理解材料的行为。Dream.3D 软件能够利用高分辨率显微镜图像来生成 RVE。通过对材料微观结构图像的采集和预处理,软件可以识别不同的相、晶粒边界等特征。然后,根据设定的规则和算法,从图像中提取出具有代表性的体积单元。在金属材料的微观结构分析中,软件可以准确识别出不同取向的晶粒,并将包含多个典型晶粒及其边界的体积区域定义为 RVE。这种基于图像的生成方法直观且能够真实反映材料的实际微观结构状态,如图 6 所示。

除了基于实际图像, Dream.3D 还可以通过数值模拟方法生成 RVE, 在这种方式下, 软件利用特定 的模型和算法来构建虚拟的材料微观结构。对于多晶材料, 可以通过模拟晶粒的成核、生长过程来生 成具有统计代表性的微观结构,并从中确定 RVE。这种方法的优势在于可以灵活地控制微观结构参数, 如晶粒尺寸分布、相的比例等, 便于研究不同微观结构特征对材料性能的影响。如图 7 所示为建模具 体过程。



图 6. 通过 Dream.3D 软件生成的 RVE 模型



Figure 7. RVE construction process in Dream.3D 图 7. Dream.3D 中 RVE 构建流程

4. 仿真结果

为得到仿真结果,通过应力-应变图,将磨削力转换为应变加载至仿真当中。由于在先前的实验 中可以得出线速度对力热载荷的影响最为明显,且可变范围较大,因此,本文固定进给速度与磨削深 度,仅改变线速度来进行试验,以便之后的工艺反求设计,其中工件进给速度始终为1m/min,磨削 深度选择4µm 与8µm,线速度选择10~50 m/s,每5 m/s递增进行正交实验,实验与仿真结果如表 6所示。

5. 结论

本文重点围绕超高强度钢磨削加工的核心难题,开展关键机理与工艺基础研究,通过 17-4ph 基础

实验序 号	砂轮线速度 vs (m/s)	工件速度 vw (m/min)	磨削深度 ap (μm)	磨削温 度 (℃)	法向磨 削力(N)	切向磨 削力(N)	位错密度(实 验) (e + 15 m/m ²)	位错密度(仿 真) (e + 15 m/m ²)	位错密度 误差(%)
1	10	1	4	40.6	9.16	5.13	2.63	2.83	7.6
2	15	1	4	51.2	7.43	4.51	2.85	2.89	1.4
3	20	1	4	60.4	6.16	4.38	3.26	3.17	2.7
4	25	1	4	69.8	5.03	3.33	3.57	3.46	3.0
5	30	1	4	76.4	4.61	2.68	3.85	3.93	2.0

 Table 6. Force thermal results with different grinding processes

 表 6. 不同磨削工艺下的力热结果

磨削实验,得到了不同磨削工艺下工件所受力热载荷大小通过 Dream.3D 软件制作了一个可以模拟工件 表面代表性体积单元,并使用 DAMASK 软件对其进行 17-4PH 微观组织参数的赋予,并对代表性体积单 元的边长进行了确定。模拟了不同磨削工艺中工件表面所受力热载荷情况,对代表性体积单元进行实验中 检测得到的力热载荷施加,得到位错密度结果,并与实验值进行对比,结果得出平均误差为 5.15%,本研 究解决了以往仿真中无法对磨削过程中力热载荷精确描述的问题,实现了对磨学过程中力热载荷的预测。

参考文献

- Zheng, K., Politis, D.J., Wang, L. and Lin, J. (2018) A Review on Forming Techniques for Manufacturing Lightweight Complex—Shaped Aluminium Panel Components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1, 55-80. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.006</u>
- [2] Ying, L., Liu, W.Q., Wang, D.T., *et al.* (2023) Experimental and Simulation of Damage Evolution Behavior for 7075-T6 Aluminum Alloy in Warm Forming. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **26**, 1383-1390.
- [3] Zheng, Y.L., Yan, C.Q., Si, P.Q., et al. (2021) Microstructure and Performance of Top-Forged Friction Plug Welding Joint of 7075-T6 Aluminum Alloy. Hot Working Technology, 47, 90-93.
- [4] Wang, L., Strangwood, M., Balint, D., Lin, J. and Dean, T.A. (2011) Formability and Failure Mechanisms of AA2024 under Hot Forming Conditions. *Materials Science and Engineering: A*, **528**, 2648-2656. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.084
- [5] Li, N., Shao, Z.T., Lin, J.G. and Dean, T.A. (2016) Investigation of Uniaxial Tensile Properties of AA6082 under HFQ[®] Conditions. *Key Engineering Materials*, **716**, 337-344. <u>https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.716.337</u>
- [6] Zheng, K., Dong, Y., Zheng, J., Foster, A., Lin, J., Dong, H., et al. (2019) The Effect of Hot Form Quench (HFQ®) Conditions on Precipitation and Mechanical Properties of Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 761, Article ID: 138017. <u>https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.06.027</u>
- [7] Mahabunphachai, S. and Koç, M. (2010) Investigations on Forming of Aluminum 5052 and 6061 Sheet Alloys at Warm Temperatures. *Materials & Design* (1980-2015), **31**, 2422-2434. <u>https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.053</u>
- [8] Rasera, J.N., Daun, K.J., Shi, C.J. and D'Souza, M. (2016) Direct Contact Heating for Hot Forming Die Quenching. *Applied Thermal Engineering*, **98**, 1165-1173. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.142</u>