基于近场动力学的微结构铣刀破损预测与优化设计

任仲伟[1]， 邓 静[2]， 蒋宏婉[1,2]， 袁 森[1,2]， 田初春[2]， 邹中妃[1,2]
（1. 贵州理工学院 机械工程学院，贵阳 550003；2. 贵州大学 机械工程学院，贵阳 550025）

摘 要：针对切削加工H13模具钢过程中，刀具易出现磨损加剧、热变形等导致刀具发生破损失效的问题，提出基于微槽结构参数优化的刀具性能提升方法。以刀具综合性能为优化目标，对刀具微槽结构的关键几何参数进行优化设计，并优选出最佳微槽结构方案。同时，采用近场动力学理论，对优化前后刀具进行了微观破损问题的数值分析。数值分析结果和物质点位移趋势与正交仿真一致，表明近场动力学模拟在刀具脆性破损方面具有一定的准确性和可靠性。对刀具关键位置的信息追踪结果显示：Y_1 刀具的3个标记物质点合位移大小分别减少了28.43%、33.16%、31.63%；Y_2 刀具合位移大小分别减少了26.27%、32.62%、28.70%，表明在相同工况下，优化后刀具的物质点位移显著小于原刀具，抗破损能力更强。此外，Deform仿真结果进一步证实，优化后的刀具综合性能更优异。

关键词：近场动力学；铣刀；微槽；性能优化；破损
DOI：10.15938/j.jhust.2026.04.004
中图分类号：TG714 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2026)04-0028-13

Damage Analysis and Optimal Design of Micro-structure Milling Cutter Based on Peridynamics

REN Zhongwei[1], DENG Jing[2], JIANG Hongwan[1,2], YUAN Sen[1,2], TIAN Chuchun[2], ZOU Zhongfei[1,2]
(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;
2. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: H13 die steel is a typical difficult-to-process material with the characteristics of high hardness, strong toughness and good heat resistance. In the cutting process, it is easy to aggravate tool wear and thermal deformation, resulting in tool damage and failure. However, the comprehensive performance of the tool can be effectively improved by rational design of the micro-groove structure. In this study, by optimizing the parameters of the micro-groove structure of the tool, the best scheme of the tool is selected, and the overall performance of the tool is improved. At the same time, the Peridynamics theory is used to numerically analyze the microscopic damage problem. The results of numerical analysis and material point displacement are consistent with the orthogonal simulation, which shows that the Peridynamics simulation has certain accuracy and reliability in the brittle damage of the tool. The tracking results of key positions on the cutting tools show that the combined displacement of the three marked material points on the Y1 tool decreased by 28.43%, 33.16%, and 31.63%, respectively. For the Y2 tool, the combined displacement decreased by 26.27%, 32.62%, and 28.70%, respectively. These results indicate that, under the same working conditions, the displacements of the material points on the optimized tools are significantly smaller than those on the original tools, demonstrating that the optimized tools have stronger resistance to damage. Furthermore, Deform simulation results further confirm that the optimized tools exhibit superior comprehensive performance.

Keywords: peridynamics; milling cutter; micro-groove; performance optimization; damage

收稿日期：2024-12-30
基金项目：国家自然科学基金(52265055,52005118)；贵州省“百”层次创新型人才(黔科合平台人才-GCC[2023]054)；贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]重点026)；贵阳市科技计划项目(筑科合同[2022]2-2号)；贵州省高等学校工程研究中心项目(黔教技[2023]040号)；贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2022]359号).
作者简介：任仲伟(1979—)，男，副教授，硕士研究生导师；
邓 静(1998—)，男，博士研究生.
通信作者：蒋宏婉(1988—)，女，教授，硕士研究生导师，E-mail：hwjiang@git.edu.cn.

0　引　言

难加工材料[1]具有比强度高、耐磨性好等优良力学性能,在切削加工中易使刀具提前失效[2-5],可降低刀具使用寿命。作为典型难加工材料的 H13 钢,刀具在铣削加工时承受着高温、高压、大切削力[6-7]及断续切削[8]的影响,刀具表面时常伴随着裂纹、崩刃、破损等现象[9-10],对主要受热载荷与机械载荷的切削刃近域的影响最大,使得切削刃抗破损能力显著下降。

国内外学者研究发现:在刀具表面置入一定形状与尺寸的微纳结构可有效增强刀具性能[11-12]。WU 等[13]对前刀面微结构刀具与常规刀具进行对比分析发现,微结构刀具表面温度得到有效降低。XING 等[14]利用纳秒激光器在陶瓷刀具上制备微通道,并通过车削实验对其性能进行了评估,发现这种方法可有效降低切削过程中的切削温度和切削力。符永宏等[15]在硬质合金刀具上加工具有一定尺寸和分布的仿生凹槽结构,有效提高了刀具的切削效率。

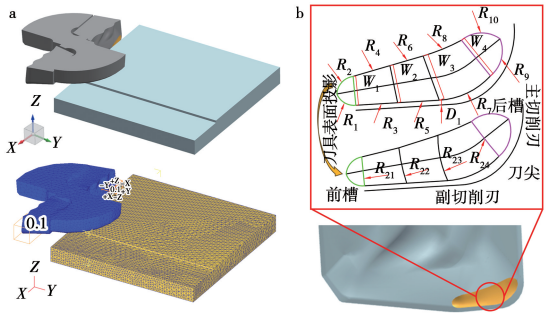
刀具的结构优化设计常借助有限元进行,然而在分析破损、裂纹等情况时,分析结果往往对网格的划分具有强烈的依赖性[16],难以处理多裂纹间存在的相互交叉与连通问题[17]。近场动力学(peridynamics,PD)的出现可以很好地解决此类问题,其用物质点间"键"的作用来实现模型的无网格化,具有分子动力学、无网格化、无奇异性等优点,在分析裂纹的产生与扩展等领域具有较大的应用前景。XU 等[18]对立方碳化硅压痕损伤进行建模,并研究了凹槽两侧自由基裂纹的产生情况,实验结果证实了 PD 理论可用于描述脆性材料的划痕损伤。刘宁等[19]借助近场动力学理论建立了分离式霍普金森杆冲击单裂纹圆孔板动力学模型,计算出裂纹的起裂韧度。仉文岗等[20]采用随机 PD 方法,模拟具有缺陷岩石的裂纹扩展过程。刘浩等[21]建立了适用于 Ti2AlNb 切削仿真研究的常规态型 PD 数值模型。结果表明,近场动力学仿真可准确模拟 Ti2AlNb 切削切屑形成过程中材料变形和损伤演化规律。蒋宏婉[22]基于 PD 理论,探究了突变载荷作用下微槽车刀的抗脆性破损性能。研究结果表明:相较于无微槽的原车刀,微槽车刀的裂纹萌生时间显著延迟,裂纹扩展速度明显降低,抗破损性能显著提升。

然而,目前针对具有复杂几何轮廓,尤其是复杂曲面微结构刀具的近场动力学研究仍较为匮乏。其中 Ren 等[23]借助有限元仿真对铣刀微槽结构进行了优化设计,并基于 PD 理论预测了不同微槽刀具的抗破损性能,建立了刀具微槽结构与破损程度之间的关联模型。研究结果表明:优化后的微槽结构刀具表现出更强的抗破损性能,且不同位置位移的变化量与裂纹萌生时间各不相同。

基于上述研究背景,本研究借助 PD 理论,在有限元仿真的基础上,开展了复杂曲面微结构刀具切削刃近域裂纹的形成、分布、变化趋势的研究。对 UG 软件进行二次开发,将具有复杂几何形状的刀具实体模型离散为一系列包含三维信息的原始物质点,并将其作为 PD 仿真的初始条件。引入体积缩减因子,假设冲击载荷平均作用于受载区内,进行了基于 PD 理论的复杂曲面刀具切削刃近域裂纹演变过程的数值分析。

1　基于有限元法的切削刃近域微结构设计

本文的主要任务是验证刀具在冲击载荷下的抗破损性。然而,在铣削实验中,难以准确地获得冲击载荷的持续时间,也很难精确地控制冲击载荷的大小,无法通过实验验证仿真与实际的差异。因此,本文采用 NX 三维建模和 Deform 有限元分析软件相结合的方法,通过 NX 软件将实体模型另存为 .stl 格式,并导入 Deform－2D/3D Pre 前处理中,构建理想状态下的有限元铣削模型,以研究刀具在理想状态下受到冲击载荷作用时的抗破损能力。在前处理过程中,为了提高计算精度并保证仿真的可靠性,选择了易于重划分的四面体单元,并采用了绝对网格对工件进行划分,工件的最小尺寸为 0.1 mm,尺寸比为 6。采用相对网格对刀具进行划分,单元网格数量为60 000,尺寸比同样为 6。此外,为了更好地分析铣刀微槽,进行了局部细化处理,细化比例为 0.1。图 1 为模型结构与网格划分示意图。



(a) 实体模型与Deform网格划分　(b) 刀具模型和微槽微结构

图 1　模型—网格划分

Fig. 1　Model and mesh generation

本文所研究微结构刀具的材料为 WC 硬质合金,长 11 mm,宽 7 mm,厚 3.5 mm,净宽 6.25 mm,具有2 个齿。工件材料为模具钢 H13,长 20 mm,宽 20 mm,高 2.3 mm 的方形板。在前期大量工作的基础上,本文在特定工况下对不同曲率半径(R_1、R_9、R_{22}、R_{24})进行了研究。具体工况为铣削速度 150 $m\cdot min^{-1}$,切削深度 0.3 mm,切削宽度 8 mm,进给量 0.8 $mm\cdot r^{-1}$,总进给 8 mm。对最大冲击载荷(F_M)、平均切削力(F_A)和刀具表面平均温度(T_A)进行了综合评估,采用加权分析方法,根据各因素仿真实验的差异性分配权重。为兼顾各因素差异程度对评价结果的影响,对差异性较大的因素 F_M 和 F_A 赋予较高权重,差异性较小的因素 T_A 赋予较低权重,以确保分析结果的科学性和合理性。据此,F_M、F_A 和 T_A 的权重分别为 0.45、0.45 和 0.1,其中 F_M 和 F_A 包含 3 个方向分量($F_{M,I}$、$F_{A,I}$,$I=X,Y,Z$),各方向分量的权重在所属因素内平均分配均为 0.15。在 Deform 铣削仿真中,为确保计算结果的良好收敛性,本文采用了共轭梯度法求解器,并使用直接迭代法进行计算。同时,为减少计算过程中的失真问题,选用拉格朗日求解类型[24],以便更好地进行网格重划分。刀具与工件间的摩擦类型设为剪切摩擦,摩擦系数为 0.4。在刀具磨损类型上,采用了在铣削加工中表现良好的 Usui 模型,并根据经验设置了校正因子 $a=0.000\,01$ 和 $b=1\,000$。Deform 铣削仿真设置的具体参数如表 1 所示。

不考虑交互作用的影响[25-27],正交表选用 $L_9(3^4)$。表 2 为 Deform 正交铣削仿真方案及实验仿真结果。

表 1 Deform 仿真主要参数设置

Tab.1 Main parameter settings in Deform simulation

环境温度/℃	刀具	刀屑摩擦系数	热传导系数($W\cdot(m\cdot℃)^{-1}$)	热对流系数($W\cdot(m^2\cdot℃)^{-1}$)
20	WC	0.4	1 200	10 000
线速度($mm\cdot s^{-1}$)	工件	计算步长	单步耗时/s	转速($rad\cdot s^{-1}$)
39.81	AISI-H-13	5 000	$4.019\,2\times10^{-5}$	312.64

表 2 正交实验结果

Tab.2 Orthogonal simulation results

编号	结构参数				铣削结果						
	R_1/mm	R_9/mm	R_{22}/mm	R_{24}/mm	$F_{M,X}$	$F_{M,Y}$	$F_{M,Z}$	$F_{A,X}$	$F_{A,Y}$	$F_{A,Z}$	T_A/℃
0	0.224	0.412	0.579	2.61	1 558	2 572	2 191	221	213	180	439
1	0.240	0.612	0.659	3.61	1 700	1 847	1 434	230	209	126	421
2	0.240	0.812	0.739	4.61	1 569	1 759	1 695	243	238	151	441
3	0.240	1.012	0.819	5.61	1 466	2 207	1 517	234	238	127	450
4	0.256	0.612	0.659	4.61	1 378	2 076	1 827	221	224	132	445
5	0.256	0.812	0.739	5.61	1 828	2 120	1 875	209	223	127	416
6	0.256	1.012	0.819	3.61	1 671	1 498	1 959	223	200	148	474
7	0.272	0.612	0.739	3.61	1 781	2 047	1 208	225	211	138	409
8	0.272	0.812	0.819	4.61	1 363	2 080	940	227	202	129	413
9	0.272	1.012	0.659	5.61	1 411	1 913	1 527	216	203	127	425

3 个评价指标的重要性不同,根据权重比例转化各实验指标隶属度[28],F_M、F_A 和 T_A 优化情况分别用 O_1、O_2、O_3 表示,其方向分量分别为 $O_{1,I}$、$O_{2,I}$($I=X,Y,Z$)隶属度分别用 M_1、M_2、M_3 表示,其方向分量分别为 $M_{1,I}$、$M_{2,I}$($I=X,Y,Z$)计算实验综合分数,结果如表 3 所示。

表 3　综合评分

Tab. 3　Comprehensive evaluation scores

编号	$O_{1,X}$/%	$O_{1,Y}$/%	$O_{1,Z}$/%	$O_{2,X}$/%	$O_{2,Y}$/%	$O_{2,Z}$/%	O_3/%	$M_{1,X}$	$M_{1,Y}$	$M_{1,Z}$	$M_{2,X}$	$M_{2,Y}$	$M_{2,Z}$	M_3	综合分
1	-9.11	28.19	34.55	-4.07	1.88	30.00	4.10	0.28	0.51	0.52	0.38	0.76	1.00	0.82	0.60
2	-0.71	31.61	22.64	-9.95	-11.74	16.11	-0.46	0.56	0.63	0.26	0.00	0.00	0.00	0.51	0.27
3	5.91	14.19	30.76	-5.88	-11.74	29.44	-2.51	0.78	0.00	0.43	0.26	0.00	0.96	0.37	0.40
4	11.55	19.28	16.61	0.00	-5.16	26.67	-1.37	0.97	0.18	0.13	0.65	0.37	0.76	0.45	0.50
5	-17.33	17.57	14.42	5.43	-4.69	29.44	5.24	0.00	0.12	0.08	1.00	0.39	0.96	0.89	0.47
6	-7.25	41.76	10.59	-0.90	6.10	17.78	-7.97	0.34	1.00	0.00	0.59	1.00	0.12	0.00	0.46
7	-14.31	20.41	44.87	-1.81	0.94	23.33	6.83	0.10	0.23	0.74	0.53	0.71	0.52	1.00	0.52
8	12.52	19.13	57.10	-2.71	5.16	28.33	5.92	1.00	0.18	1.00	0.47	0.95	0.88	0.94	0.77
9	9.44	25.62	30.31	2.26	4.69	29.44	3.19	0.90	0.41	0.42	0.79	0.92	0.96	0.75	0.74

对综合分数进行极差分析,计算结果如表 4 所示。

表 4　极差分析

Tab. 4　Range analysis

项目	因素			
	R_1/mm	R_9/mm	R_{22}/mm	R_{24}/mm
K_1	1.27	1.62	1.84	1.58
K_2	1.43	1.51	1.26	1.54
K_3	2.03	1.60	1.62	1.61
极差 R	0.76	0.12	0.57	0.08
因素主次	$R_1R_{22}R_9R_{24}$			
优方案	$(R_1)_3(R_{22})_1(R_9)_1(R_{24})_3$			

K_i:表示任一列上水平号为 $i(i=1,2,3)$ 时,所对应的分析结果之和,R 为极差。极差分析结果表明,各因素对刀具综合性能影响的主次顺序为:圆弧曲率 R_1 影响最为显著,其次为槽深曲率 R_{22},再次为圆弧曲率 R_9,槽深曲率 R_{24}影响最小。根据极差分析结果,按因素主次顺序选取各因素的最优水平,得到最优方案为 $(R_1)_3(R_{22})_1(R_9)_1(R_{24})_3$。由于槽深曲率 R_{24}的极差最小,其水平变化对刀具综合性能的影响最弱,因此该因素的水平选择对最优方案的影响较小。本研究中 R_{24}因素各水平的 K 值大小关系为 $K_2 < K_1 < K_3$,且指标要求越大越好,故在确定次优方案时,该因素选取次优水平 K_1,其余因素保持最优水平,最终得到次优方案为 $(R_1)_3(R_{22})_1(R_9)_1(R_{24})_1$。

2　近场动力学数学模型

2.1　PD 理论基础

近场动力学理论最早于 1944 年由美国 Sandia 国家实验室的 Silling 教授提出,是一种将空间求导转化为空间积分的新兴非局部作用理论。最初的 PD 理论被称为“键型(bond-based)”理论,即键基近场动力学理论。随着研究的深入,进一步衍生出“态型(state-based)”近场动力学理论。作为 PD 理论的基础,本研究采用键基近场动力学理论模型作为研究对象。PD 思想假设物体处在假想的空间域 R 内,该空间域内的各物质点在以近场范围 δ 为半径的子域 R^0 内存在相互作用力 f,如图 2 所示。借助牛顿第二定律可确定出物质点处于 t 时刻的“本构力函数”方程[29]:

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = \int_{R^0} f[x,x',u(x,t),u(x',t),t]\mathrm{d}V_{x'} + b(x,t) \tag{1}$$

式中:u 与 u' 分别为 t 时刻物质点 x 与 x' 的位移;$\ddot{u}(x,t)$ 为 t 时刻物质点 x 的加速度;ρ 为材料密度;b 为外载荷密度;$\mathrm{d}V_{x'}$ 为物质点 x' 的体积。

$$R^0 = R^0(x',\delta) = \{x' \in R, \| x' - x \| \leqslant \delta\} \tag{2}$$

设 $L_u(x,t)$ 为空间域 R 内 x 与 x' 处于近场范围内,相互作用之间引起的内部作用力,则:

$$L_u(x,t) = \int_{R^0} f[x,x',u(x,t),u(x',t),t]\mathrm{d}V_{x'} \tag{3}$$

此时引入 2 个物理量 ξ 和 η，定义 $\xi = x' - x$ 为物质点 x 与 x' 变形前的相对位置，$\eta = u' - u$ 为物质点 x 与 x' 经过时间 t 后的相对位移[30]，物质点间运动状态如图 3 所示，由式(1)、(3) 得到：

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = L_u(x) + b(x,t) = \int_{R^0} f(\eta,\xi)\mathrm{d}V_{x'} + b(x,t) \tag{4}$$

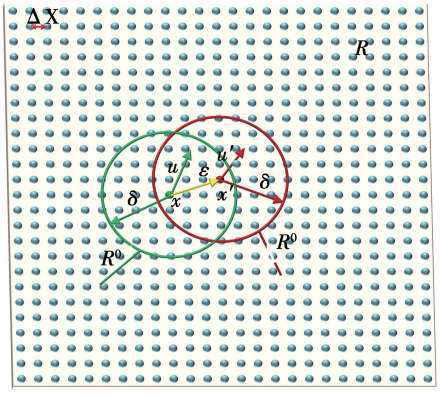


图 2 物质点间的相互作用力

Fig. 2 Interaction forces between material points

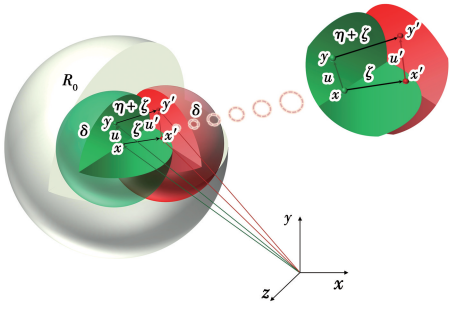


图 3 物质点间运动状态关系

Fig. 3 Motion state relationship between material points

研究对象为微弹性材料时，其“本构力函数” 可表示为

$$f(\eta,\xi) = \frac{\eta+\xi}{|\eta+\xi|} cs(\eta,\xi)\mu(\xi,t) \tag{5}$$

式中 c 为刚度系数，其数值与体积模量 K 与近场范围 δ 和圆周率 π 有关，在三维空间中 c 有如下定义[31]：

$$c = \frac{18K}{\pi\delta^4} \tag{6}$$

$s(\eta,\xi)$ 为物质点间“键” 的伸长率[32]：

$$s = \frac{|\eta+\xi| - |\xi|}{|\xi|} \tag{7}$$

$|\eta+\xi|$ 表示相对位移与相对位置的绝对值，$|\xi|$ 为相对位置的绝对值。用 $\mu(\xi,t)$ 表示物质点间的破坏情况

$$\mu(\xi,t) = \begin{cases} 1 & s < s_0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{8}$$

式中 s_0 为两物质点间“键” 的极限伸长率，当两物质点间“键” 的伸长率大于 s_0 时，该点对间“键” 发生破坏。s_0 的大小与材料能量极限释放率 G_0[33] 有关，有以下表示：

$$s_0 = \sqrt{\frac{5G_0}{9K\delta}} \tag{9}$$

当两物质间“键” 发生断裂时，所处 x 点的破损可定义为

$$\varphi(x,t) = 1 - \frac{\int_{R^0}\mu(\xi,t)\mathrm{d}V_{x'}}{\int_{R^0}\mathrm{d}V_{x'}} \tag{10}$$

式中：$\varphi(x,t)$ 为物质点 x 在 t 时刻的破损程度。$0 \leqslant \varphi \leqslant 1$，当 $\varphi = 0$ 时，该物质点无损伤；当 $\varphi = 1$ 时，物质点 x 处的“键” 完全断裂。

据 PD 基本理论，2 个物质点的相互作用可通过“键” 在以 δ 为半径的近场范围内建立联系。然而，构建 PD 模型时通常只考虑中心节点坐标位于近场范围 δ 的情况，而忽略了局部区域内节点坐标位于近场范围 δ 以外的局部区域。为此，引入了体积缩减因子 β 以减少误差[34]，如下：

$$\beta = \begin{cases} 1 & |\xi| \leqslant \delta - 0.5\Delta x \\ \dfrac{\delta + 0.5\Delta x - |\xi|}{\Delta x} & \delta - 0.5\Delta x < |\xi| \leqslant \delta + 0.5\Delta x \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{11}$$

式中 Δx 为物质点间距，在引入体积缩减因子 β 后，“本构力函数” 可表示为

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = \int_{R^0} \frac{\eta+\xi}{|\eta+\xi|} cs(\eta,\xi)\mu(\xi,t)\beta\mathrm{d}V_{x'} + b(x,t) \tag{12}$$

2.2 冲击载荷区域的确定与数值计算

冲击载荷区可被视为具有特定尺寸的面接触区域。通过将 Deform 的仿真结果与工具本身的结构特征相结合，可将该区域简化为一定尺寸的矩形，如图 4 所示。

将刀具受力区域的物质点数量定义为 P，将仿真实验中采集到的最大冲击载荷视为 F，并将之作为 PD 数值分析中受到的外载荷，该外载荷均匀作用于受力区域内的所有物质点上。相反地，受力区域外的物质点所受外载荷为零。在 $t = 0$ 时，受力区域内的各物质点 x 初始受力情况 f_x 为

$$f_x = \frac{F}{P} \tag{13}$$

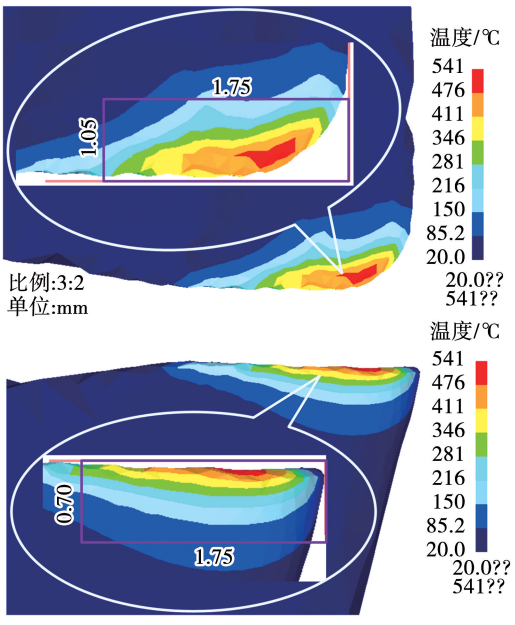


图 4　铣刀冲击载荷受力区域

Fig. 4　Load-affected regions on milling cutter under impact load

由式(1)可求出受力区域内物质点的初始加速度:

$$\ddot{u}(x)=\frac{f_x}{\rho dV_x} \tag{14}$$

相应物质点 x 的初始速度 v_x 与位移 s_x 为

$$v_x=\frac{f_x}{\rho dV_x}\Delta t \tag{15}$$

$$s_x=\frac{f_x}{2\rho dV_x}\Delta t^2 \tag{16}$$

以初始加速度作为初始状态,通过设定时间步长控制迭代次数,进行循环迭代求解,从而获得铣刀所有物质点的运动情况,并输出各物质点在各时间步长下的三维位移坐标。PD 数值分析程序流程如图 5 所示。

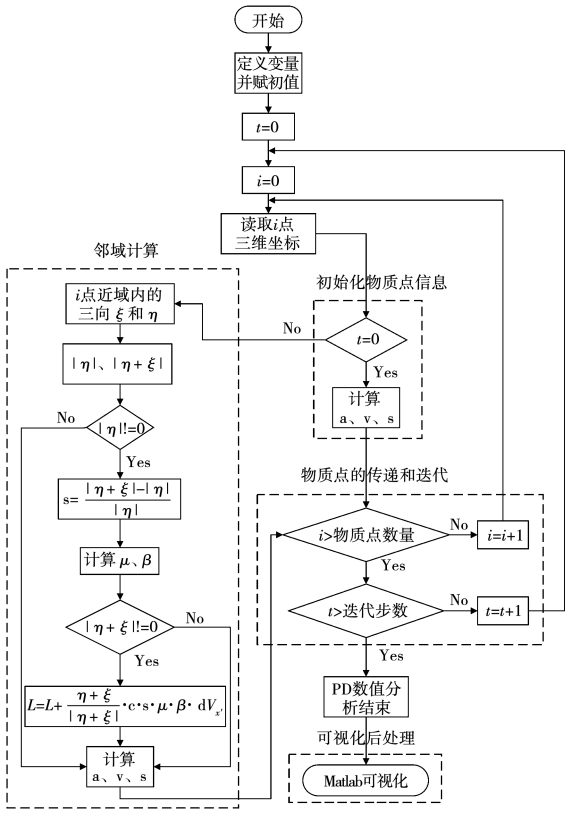


图 5　PD 数值分析流程

Fig. 5　PD numerical analysis procedure

3　Visual Studio 环境下的 PD 破损裂纹数值分析

3.1　PD 参数的确定

采用相同方法分别对原刀具(Y 刀具)、优方案刀具(Y_1 刀具)和次优方案刀具(Y_2 刀具)进行 PD 破损裂纹数值分析,以 Deform 仿真中的最大冲击载荷作为 PD 分析中铣刀所受外力的大小,研究铣刀处于极限工况时的破损情况,分析 3 种刀具的抗破损能力,Deform 仿真结果与部分关键 PD 参数如表 5 所示。

表 5　PD 仿真关键参数

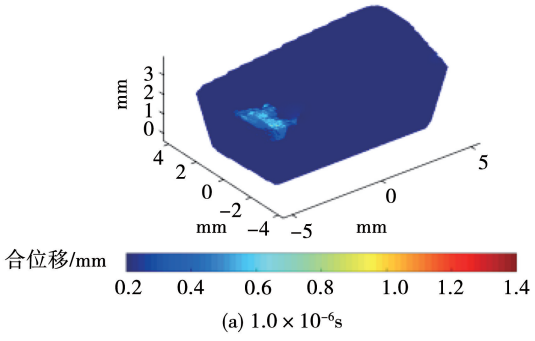
Tab. 5　Key parameters in PD simulation

刀具	F_{MX}/N	F_{MY}/N	F_{MZ}/N	F_{AX}/N	F_{AY}/N	F_{AZ}/N	T_A/℃	铣刀密度/cm^3	体积模量/Gpa	Δx、Δy、Δz/mm	δ	$V_{x'}$/mm^3	dt/s
Y	2 191	1 558	2 572	180	221	213	439						
Y_1	545	1 388	1 428	115	214	196	416	14.5	550	0.07	$3\Delta x$	3.43×10^{-4}	5.0×10^{-9}
Y_2	565	1 414	1 527	110	187	220	425						

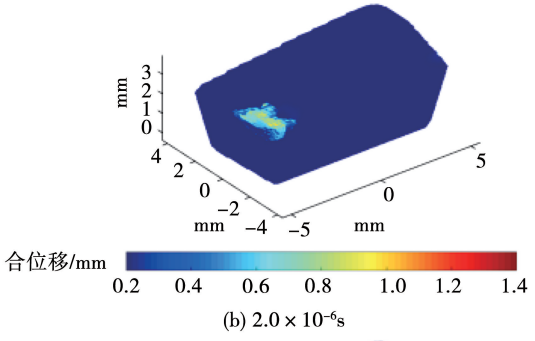
3.2　PD 破损可视化分析

由式(7)~(8)可知,物质点间“键”的伸长率与相对位置和相对位移矢量有关,合位移的幅值直接决定了“键”的伸长率,是“键”断裂的驱动因素,

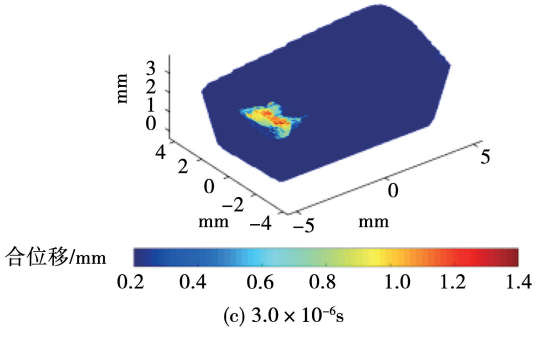
影响着裂纹的萌生与扩展。本文借助 Matlab 可视化模块,研究了物质点合位移的变化情况,以物质点发生位移的大小表征裂纹。当刀具表面出现肉眼可见的宏观裂纹时,刀具的性能、使用寿命及安全性将受到显著影响。因此,为了清晰展示刀具优化前后破损的差异,并观察到刀具表面的宏观裂纹,设定合位移的大小超过 0.2 mm 的阈值时[35],即可在刀具表面观察到裂纹的产生。图 6 ~ 8 为不同刀具在不同时间下产生的裂纹大小与变化过程。



(a) 1.0×10^{-6}s



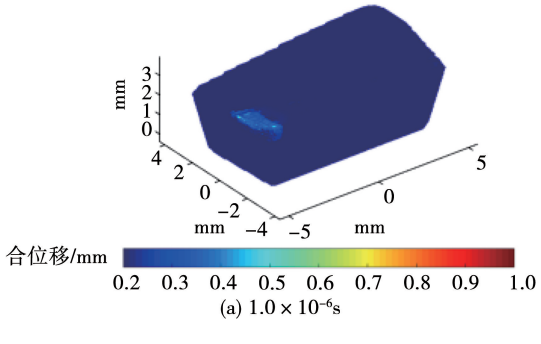
(b) 2.0×10^{-6}s



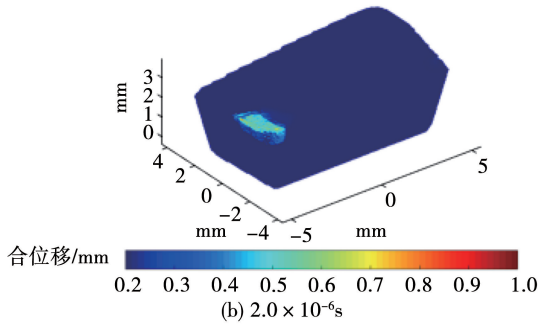
(c) 3.0×10^{-6}s

图 6 Y 刀具合位移随时间变化关系

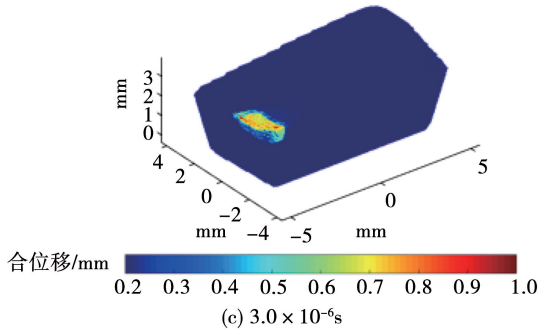
Fig. 6 Combined displacement of cutter Y versus time



(a) 1.0×10^{-6}s



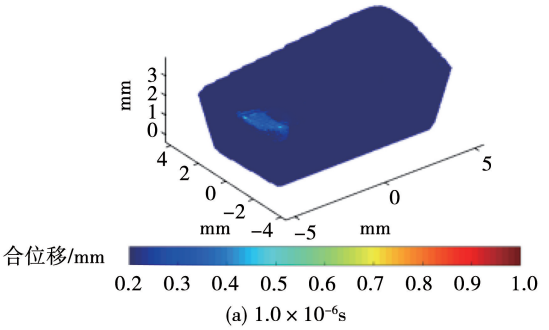
(b) 2.0×10^{-6}s



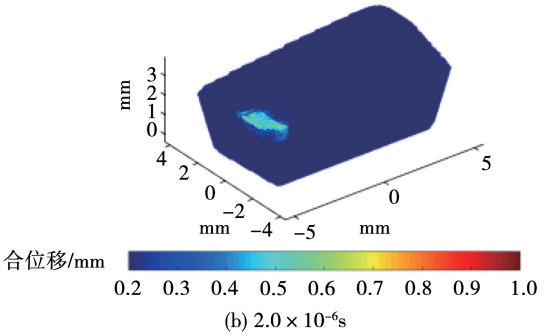
(c) 3.0×10^{-6}s

图 7 Y_1 刀具合位移随时间变化关系

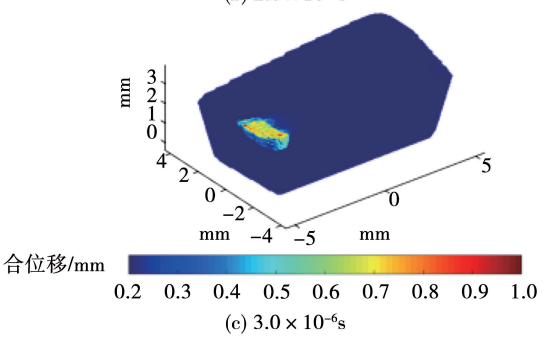
Fig. 7 Combined displacement of cutter Y_1 versus time



(a) 1.0×10^{-6}s



(b) 2.0×10^{-6}s



(c) 3.0×10^{-6}s

图 8 Y_2 刀具合位移随时间变化关系

Fig. 8 Combined displacement of cutter Y_2 versus time

对图 6 ~ 8 合位移云图进行分析可知,Y_1 和 Y_2 刀具的最大合位移明显低于 Y 刀具。在较大合位移区域(红色区域)中,Y_1 和 Y_2 刀具的分布显著少于 Y 刀具,并且主要集中在主切削刃的近域,从主切削刃向前刀面扩散,前刀面的位移分布较为广泛。这是因为主切削刃作为刀具的主要切削部分,直接参与切削工作,承受更大的切削力和应力,相较于其他部分更容易产生裂纹。前刀面与切屑直接接触,容易受到瞬时高应力的影响,加速刀具的疲劳,增加破裂风险。由于产生裂纹所需的能量远大于裂纹扩展所需的能量,主切削刃近域更容易形成裂纹扩散,最终导致刀具破裂,从而降低刀具的使用寿命。

3.3　刀具关键位置分析

从合位移云图中可知,切削刃近域的物质点产生了最大的合位移。因此,对优化前后的刀具主切削刃、主切削刃靠近前刀面及主后刀面这 3 个关键位置上的物质点进行了信息追踪,并分别标记为物质点 1、物质点 2 及物质点 3,结果如图 9 ~ 13 所示。

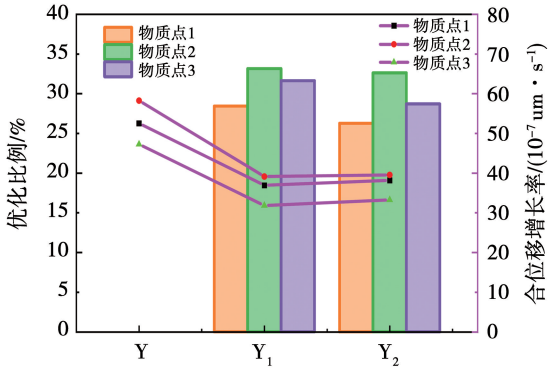


图 9　3.0×10^{-6} s 下各物质点间合位移的变化

Fig. 9　Variation of combined displacement among material points at 3.0×10^{-6} s

由图 9 可知,当 PD 仿真时间达到 3.0×10^{-6} s 时,3 个标记物质点中,后刀面处合位移变化率最小,为 47.232 $10^7\,\mu m\cdot s^{-1}$,而其余标记物质点的合位移变化率均超过 50 $10^7\,\mu m\cdot s^{-1}$。图 6 中 Y 刀主切削刃靠近前刀面处物质点的合位移变化量超过 1 mm,意味着该区域发生了不可逆的形变,加剧了应力集中,导致内部结构的破坏,促使裂纹的形成[36]。表明在该时刻容易引起裂纹的进一步扩展,从而导致刀具表面出现明显的裂纹现象。因此,本文将该时间段视为冲击载荷作用的关键时刻,以观察刀具在此时刻发生裂纹的情况。在该时刻,同一刀具的合位移增长率的大小关系为:主切削刃靠近前刀面处最大、主切削刃处次之、主后刀面处最小。对比 3 种刀具在同一标记点处的合位移可知:Y 刀具的合位移最大、Y2 刀具次之、Y1 刀具合位移最小。这表明 Y_1 刀具的优化效果最好,Y_2 刀具次之。不同位置刀具的优化幅度依次为:主切削刃靠近前刀面 > 主后刀面 > 主切削刃。优化后的刀具中,主切削刃靠近前刀面和主切削刃的合位移增长率较为接近。其中,Y_2 刀具两者合位移增长率分别为 39.514 $10^7\,\mu m\cdot s^{-1}$ 和 38.172 $10^7\,\mu m\cdot s^{-1}$,Y_1 刀具 3 个标记物质点位移分别降低了 28.43%、33.16% 和 31.63%;Y_2 刀具分别降低了 26.27%、32.62% 和 28.70%。表明 Y_1 刀具优化幅度大于 Y_2 刀具,同时,优化后的刀具有效抑制了裂纹的扩展,PD 仿真结果与优选方案一致。

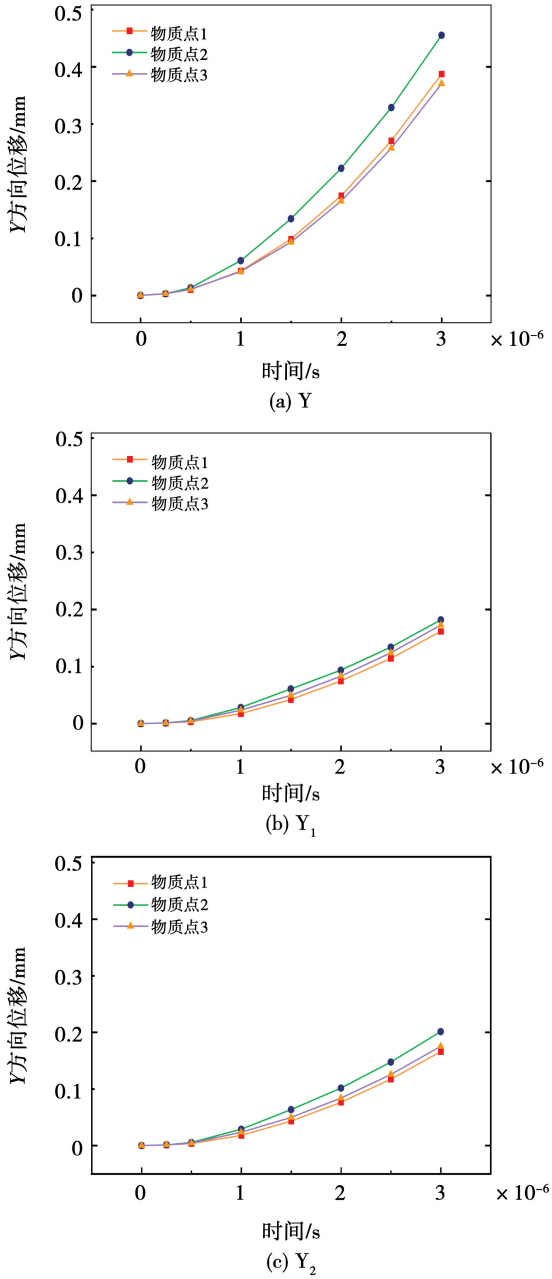


图 10　Y、Y_1 和 Y_2 刀具标记物质点在切深方向的位移随时间变化

Fig. 10　Displacement versus time in depth of cut direction for marked material points on cutters Y, Y_1, and Y_2

由图 10 可知,随着时间的推移,切深方向上 Y 刀具的标记物质点位移量最大,Y 和 Y_2 刀具主切削刃靠近前刀面处的物质点位移量明显大于另外 2 个标记物质点,Y_1 刀具的 3 个标记物质点之间位移量的差异较小。优化后,刀具标记的物质点位移量得到了有效减少。

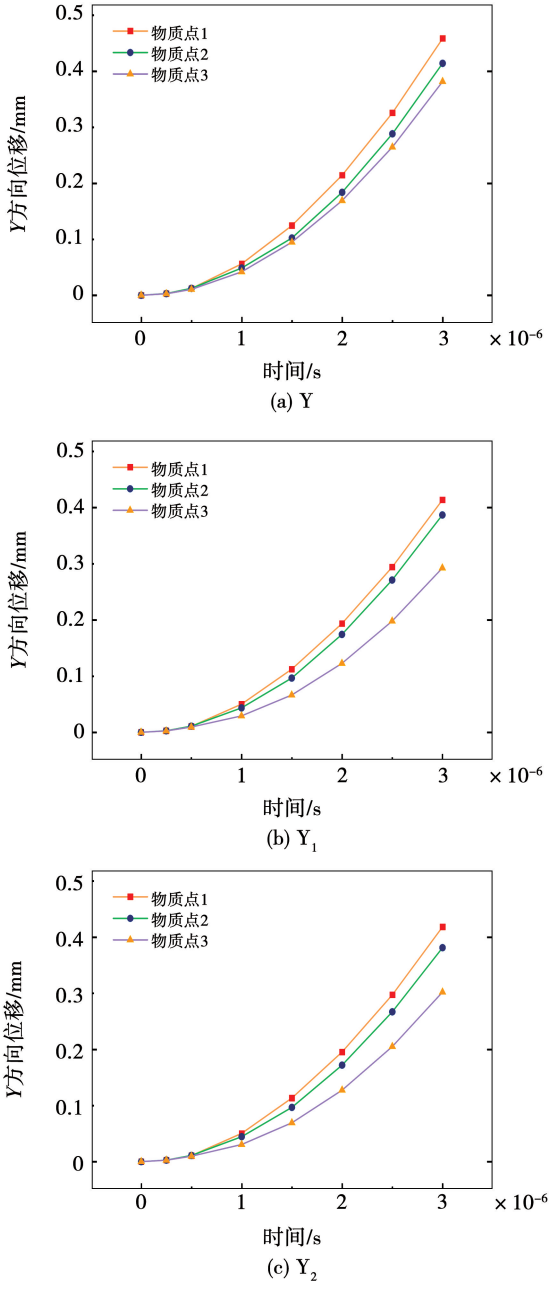


图 11 Y、Y_1 和 Y_2 刀具标记物质点在进给方向的位移随时间变化

Fig. 11 Displacement versus time in feed direction for marked material points on cutters Y, Y_1, and Y_2

由图 11 可知,在 $t = 1.0 \times 10^{-6}$ s 时刻,刀具关键位置处标记物质点的位移响应开始分化。三种刀具中,主切削刃处位移梯度最大,主切削刃靠近前刀面处次之,后刀面最小;经优化后,刀具各部位的位移量得到了不同程度的降低。

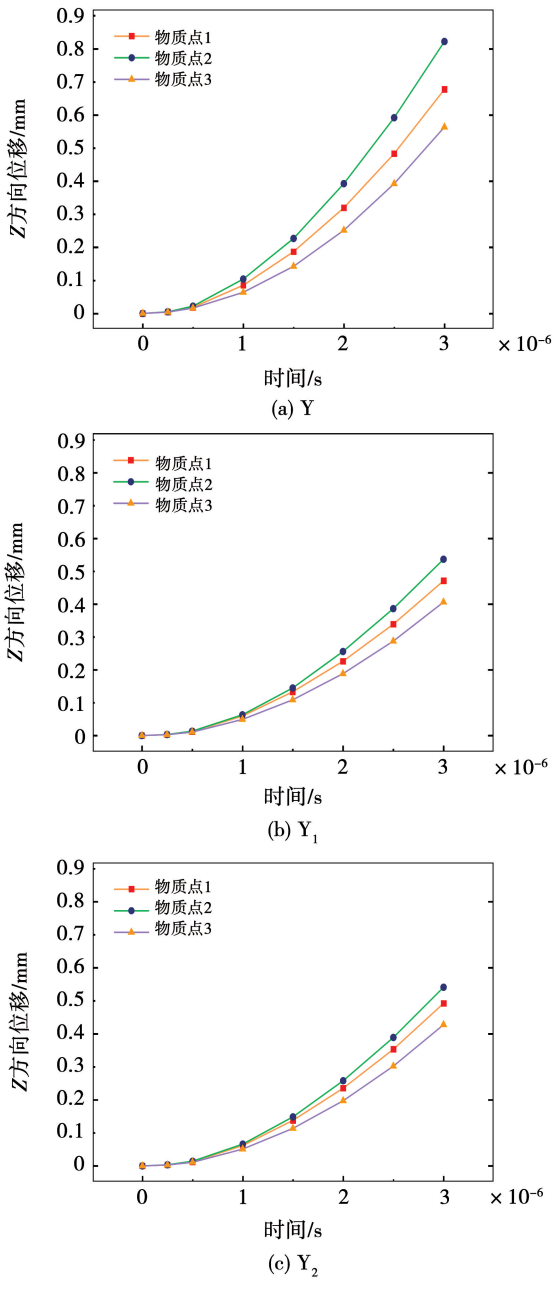
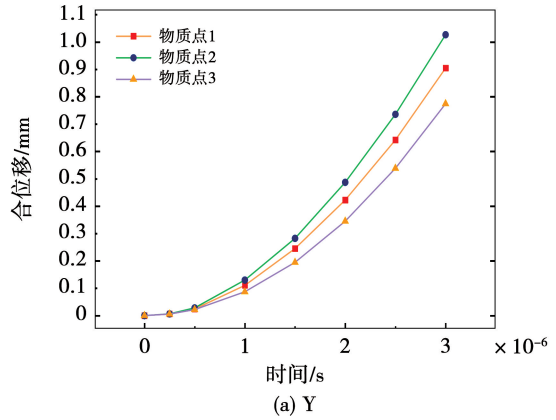


图 12 Y、Y_1 和 Y_2 刀具标记物质点在主切削方向的位移随时间变化

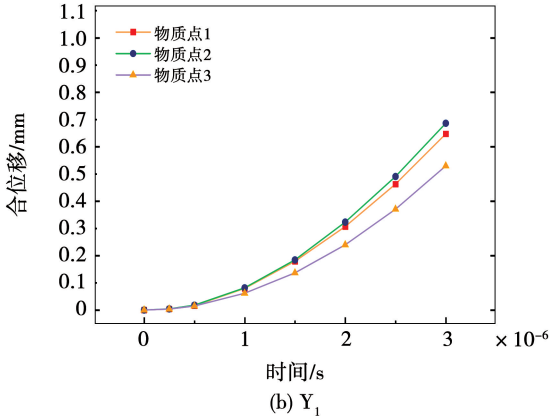
Fig. 12 Displacement versus time in main cutting direction for marked material points on cutters Y, Y_1, and Y_2

由图 12 可见,三种刀具标记物质点在进给方向的位移幅度最大,其中 Y 刀具在进给方向上的位移显著大于主切削方向及切深方向。这表明进给方向的位移对裂纹的萌生与扩展路径具有主导性影响。该现象主要归因于切入瞬态下进给方向承受了最大

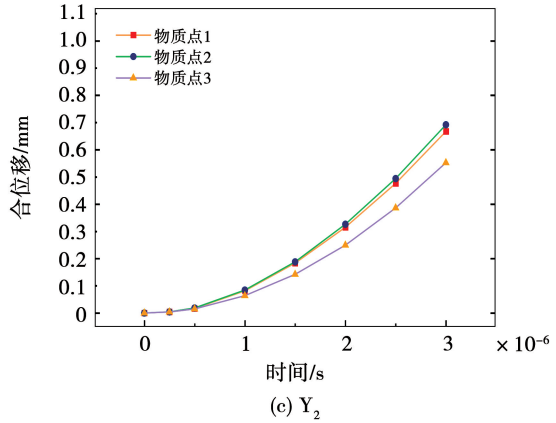
的冲击峰值载荷,侧面印证了位移场与外载荷分布的一致性。经优化处理后,Y_1 与 Y_2 刀具的位移响应较原始 Y 刀具显著降低。



(a) Y



(b) Y_1



(c) Y_2

图 13　Y、Y_1 和 Y_2 刀具标记物质点在切深方向的位移随时间变化

Fig. 13　Displacement versus time in depth – of – cut direction for marked material points on cutters Y, Y_1, and Y_2

图 13 为刀具合位移图。由图可见,主切削刃和主切削刃靠近前刀面区域合位移大小相近,且显著大于主后刀面区域的合位移。对于同一刀具标记的物质点,合位移的大小关系为:主切削刃靠近前刀面 > 主切削刃 > 主后刀面。这一规律与主切削方向趋势一致,进一步表明主切削方向的影响大于其他 2 个方向。对于同一标记物质点,3 种刀具之间的合位移大小关系为:$Y > Y_2 > Y_1$。这表明 Y_1 刀具的抗破损能力最强,Y_2 刀具次之,而 Y 刀具的抗破损能力最弱。

分析图 10 ~ 13 可知,Y_1 和 Y_2 刀具标记的物质点所产生的位移明显小于 Y 刀具。3 种刀具物质点位移量的大小关系为:Y 刀具最大,Y_2 次之,Y_1 最小。因此,可以预测在相同的切削环境下,Y 刀具将最早失效,其次是 Y_2 刀具,而 Y_1 刀具的失效时间则最晚。此外,3 个方向对物质点位移量的影响程度由大到小依次为:进给方向最为显著、主切削方向次之、切深方向影响最小,影响显著性与三向冲击载荷的大小趋势高度吻合。这一分布特征主要是因为切入瞬间,刀具刃口钝圆效应引发的犁削抗力及切屑变形抗力导致进给方向的瞬态峰值冲击载荷占据主导地位,进而诱发该方向产生最大的位移响应。相比之下,主切削方向承载剪切变形力次之,切深方向主要承受轴向约束力,故其位移响应极值最小。该现象从侧面印证了位移场演变与外部载荷矢量分布的一致性,进一步说明了 PD 仿真结果与有限元仿真之间的一致性,具有一定的可靠性。

4　结　论

本文对铣刀微槽结构进行了优化设计,获得了刀具优方案,并建立了基于近场动力学(PD)理论的铣削仿真模型。通过该模型成功实现了 H13 钢在铣削过程中受冲击载荷影响下的近场动力学数值模拟。研究得出以下主要结论:

1)基于 PD 理论模拟了刀具在铣削过程中受冲击载荷作用下的裂纹演变过程,并对优化前后铣刀的裂纹扩展情况进行了对比分析。结果表明:在研究的 3 个关键位置中,主切削刃近域最易产生裂纹并形成裂纹扩散,而优化后的刀具显著抑制了裂纹的形成。

2)各刀具标记的物质点在不同方向上的位移变化趋势与各方向冲击载荷的大小趋势一致。其中,进给方向的冲击载荷最大,物质点位移量也相应最大,从而导致进给方向上刀具的破损最为显著。

3)通过 PD 仿真分析,3 种刀具中同一标记物质点的位移量大小关系为 $Y > Y_2 > Y_1$,表明 Y_1 刀具的抗破损能力最强,Y_2 次之,而 Y 刀具抗破损能力最

弱。在 Deform 仿真中,Y_1 的综合评分高于 Y_2,表明 Y_1 的综合性能优于 Y_2。PD 仿真结果与 Deform 仿真结果一致,侧面验证了该评价方法选取的次优方案具有一定的准确性和可行性。

针对近场动力学模拟刀具破损的问题,今后可从以下方面开展研究:

1)可控区域内热力耦合状态下刀具的破损。构建高效的多尺度热 - 力耦合 PD 仿真模型,深入分析热 - 力耦合效应对刀具破损的影响,揭示刀具在高温、高压环境下材料的微观结构演变与损伤积累的过程。为提高刀具在极端工况下的抗破损性能与设计优化提供理论支持。

2)刀具切削稳态下的多次热 - 力冲击破损仿真。针对刀具在稳态切削过程中受到的周期性热 - 力冲击作用,引入断裂力学等理论,多学科交叉模拟刀具在多次热 - 力冲击下的破损机制,建立高精度的 PD 多冲击下的热 - 力耦合仿真模型。重点关注裂纹的萌生、扩展及最终失效行为,揭示刀具破损的临界条件与裂纹萌生规律,为刀具寿命预测提供理论依据。

3)多元复合涂层界面间的破坏关系。利用 PD 理论非局部连续体的特性,建立多元复合涂层界面的破坏模型,模拟涂层界面在不同载荷条件(如机械载荷、热冲击、循环载荷)下的损伤演化过程,揭示界面破坏的微观机制与临界条件,特别是残余应力对裂纹扩展路径和速度的影响。此外,研究高温对界面结合强度的影响规律,分析高温状态下界面结合力的变化趋势,验证涂层界面在极端工况下的可靠性。

参 考 文 献:

[1] 宦海祥, 罗韬, 徐文强, 等. PCD 刀具超声振动辅助切削 TiCp/TC4 材料表面缺陷[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(6): 672.
HUAN Haixiang, LUO Tao, XU Wenqiang, et al. Surface Defects in Ultrasonic Vibration Assisted Cutting of TiCp/TC4 with PCD Tool[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(6): 672.

[2] 范舒瑜, 匡同春, 林松盛, 等. WC - Co 硬质合金/CVD 金刚石涂层刀具研究现状[J]. 材料导报, 2023, 37(8): 28.
FAN Shuyu, KUANG Tongchun, LIN Songsheng, et al. Research Progress on Cutting Tools Made from WC - Co Cemented Carbide Substrates and Coated with CVD Diamond[J]. Materials Reports, 2023, 37(8): 28.

[3] 安庆龙, 涂禄强, 陈明. 镍基高温合金切削刀具磨损表/界面特性研究现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2026, 31(2): 1.
AN Qinglong, TU Luqiang, CHEN Ming. Recent Advances in the Tool Wear Surface/Interface Characteristics during the Cutting of Nickel-based Superalloys[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2026, 31(2): 1.

[4] 程耀楠, 丁娅, 盖小羽, 等. 刀具磨损监测技术及其在重型切削中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(1): 79.
CHENG Yaonan, DING Ya, GAI Xiaoyu, et al. Tool Wear Monitoring Technology and Its Application in Heavy Cutting[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(1): 79.

[5] 赵彪, 雷小飞, 陈涛, 等. 面向航空航天难加工材料磨削过程的模拟与智能控制[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(2): 127.
ZHAO Biao, LEI Xiaofei, CHEN Tao, et al. Simulation and Intelligent Control during Grinding Process for Difficult-to-machine Materials in Aerospace[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(2): 127.

[6] 林洁琼, 贾茹, 周岩, 等. 切削 SiCp/6005Al 复合材料的 PCD 刀具磨损[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(3): 322.
LIN Jieqiong, JIA Ru, ZHOU Yan, et al. PCD Tool Wear in Cutting SiCp/6005Al Composites[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(3): 322.

[7] 荆成利, 郑光明, 王成, 等. 清洁高速硬切削模具钢的仿真与试验研究[J]. 现代制造工程, 2023(4): 110.
JING Chengli, ZHENG Guangming, WANG Cheng, et al. Simulation and Experiment Research of Clean High Speed Hard-cutting of Die Steel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(4): 110.

[8] ZHAO W, IQBAL A, FANG D, et al. Experimental Study on the Meso-scale Milling of Tungsten Carbide WC - 17.5Co with PCD End Mills[J]. Advances in Manufacturing, 2020, 8(2): 230.

[9] 张博. 基于机器视觉的快速铣刀磨损状态识别研究[D]. 西安: 西京学院, 2019.

[10] 杨小璠, 林海洋, 陈艺聪, 等. 多弧离子镀工艺对硬质合金 PCB 铣刀涂层性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(5): 586.
YANG Xiaofan, LIN Haiyang, CHEN Yicong, et al. Effect of Multi-arc Ion Plating Process on Coating Performance of Cemented Carbide PCB Milling Cutter [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43

(5): 586.

[11] 别文博, 赵波, 陈凡, 等. 超声加工制备表面微织构及使役性能研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(4): 401.
BIE Wenbo, ZHAO Bo, CHEN Fan, et al. Progress of Ultrasonic Vibration-assisted Machining Surface Microtexture and Serviceability [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(4): 401.

[12] 潘承怡, 曹冠群, 童圆栖, 等. 表面微结构参数对轴承钢球展开轮磨损量的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(6): 40.
PAN Chengyi, CAO Guanqun, TONG Yuanqi, et al. Influence of Surface Microstructure Parameters on Wear of Bearing Steel Ball Unfolding Wheel [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(6): 40.

[13] WU Ze, DENG Jianxin, CHEN Yang, et al. Performance of the Self-lubricating Textured Tools in Dry Cutting of Ti-6Al-4V [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9): 943.

[14] XING Youqiang, LIU Lei, WU Ze, et al. Fabrication and Characterization of Micro-channels on Al2O3/TiC Ceramic Produced by Nanosecond Laser [J]. Ceramics International, 2018, 44(18): 23035.

[15] 符永宏, 肖开龙, 华希俊, 等. 表面微沟槽车刀的切削试验与性能分析[J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 106.
FU Yonghong, XIAO Kailong, HUA Xijun, et al. Cutting Trial and Performance Analysis of Surface Microgrooves Turning Tools [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6): 106.

[16] 薛河, 王双, 王正, 等. 基于扩展有限元法的三维裂纹前缘应力强度因子计算方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(3): 1.
XUE He, WANG Shuang, WANG Zheng, et al. XFEM-based Calculation Method for Stress Intensity Factor of Three-dimensional Crack Front [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(3): 1.

[17] 程中宁, 周宇, 李骏鹏, 等. 基于近场动力学的裂纹扩展及轨面剥离掉块成因机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 912.
CHENG Zhongning, ZHOU Yu, LI Junpeng, et al. Crack Propagation and Rail Surface Spalling Mechanism Based on Peridynamics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(6): 912.

[18] XU Yimeng, ZHU Pengzhe. Peridynamic Simulations of Damage in Indentation and Scratching of 3C - SiC [J]. Journal of Materials Research, 2022, 37(23): 4381.

[19] 刘宁, 胡梦凡, 周飞. 基于键基近场动力学理论的单裂纹圆孔板冲击破坏研究[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 9.
LIU Ning, HU Mengfan, ZHOU Fei. The Impacted Damage Study of a Single Cleavage Drilled Compression Specimen Based on bond-based Peridynamics [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 9.

[20] 仉文岗, 孟凡胜, 卢志堂, 等. 含缺陷空间变异性岩体裂纹扩展的近场动力学模拟[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 702.
ZHANG Wengang, MENG Fansheng, LU Zhitang, et al. Peridynamics Simulation of Crack Propagation in Spatially Variable Rock Mass with Defects [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 702.

[21] 刘浩, 王兵, 刘战强, 等. Ti2AlNb 切削切屑形成过程近场动力学仿真及试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 68.
LIU Hao, WANG Bing, LIU Zhanqiang, et al. Peridynamics Simulation and Experimental Investigation of Chip Formation Process during Machining of Ti2AlNb [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(5): 68.

[22] 蒋宏婉. 切削 40CrMnMo 的硬质合金刀具前刀面微槽创新设计研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.

[23] REN Z, DENG J, JIANG H, et al. Damage Analysis and Optimal Design of Micro-structure Milling Cutter Based on Peridynamics [J]. PLoS One, 2024, 19(12): e0307940.

[24] BAUSKAR N, MALI R, GUPTA T. FEA Based Simulation and Experimental Analysis of Forces in Dry Milling of Inconel 718 [C]//Proceedings of the International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016), 2016: 206.

[25] 丁兴江, 章学来, 朱嘉豪, 等. 三水合乙酸钠复合相变材料过冷特性实验统计分析[J]. 化工进展, 2022, 41(11): 5946.
DING Xingjiang, ZHANG Xuelai, ZHU Jiahao, et al. Statistical Analysis for Supercooling Characteristics Experiments of Sodium Acetate Trihydrate Composite Phase Change Materials [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(11): 5946.

[26] 邵伟平, 张韬, 李家成, 等. 金刚石涂层刀具高速铣铝合金平面切削毛刺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2024, 44(2): 221.
SHAO Weiping, ZHANG Tao, LI Jiacheng, et al. Research on Cutting Burrs in High Speed Milling of Aluminum Alloy Plane with Diamond Coated Tools [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2024, 44(2): 221.

[27] 邵伟平, 张韬. 纳米金刚石涂层刀具高速铣削7075铝合金的工艺参数优化[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(4): 473.
SHAO Weiping, ZHANG Tao. Process Parameters Optimization of High-speed Milling 7075 Aluminum Alloy with Nano-diamond Coated Tool [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(4): 473.

[28] 桑卓越, 周志明, 陈建伟, 等. 新能源汽车全空心电机轴径向锻造数值模拟优化[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 202.
SANG Zhuoyue, ZHOU Zhiming, CHEN Jianwei, et al. Numerical Simulation and Optimization of Radial Forging for the Hollow Motor Shaft of New Energy Vehicles[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 202.

[29] LIU Renwei, XUE Yanzhuo, LI Shaofan. A Three-dimensional (3D) Micro-potential-based Peridynamics Model for Deformation and Fracture in Solid Materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 282: 109180.

[30] XIA Yang, WANG Hongshuai, ZHENG Guojun, et al. Discontinuous Galerkin Isogeometric Analysis with Peridynamic Model for Crack Simulation of Shell Structure [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 398: 115193.

[31] GU Xin, LI Xing, XIA Xiaozhou, et al. A Robust Peridynamic Computational Framework for Predicting Mechanical Properties of Porous Quasi-brittle Materials [J]. Composite Structures, 2023, 303: 116245.

[32] ZHOU Xiaoping, SHOU Yundong. Numerical Simulation of Failure of Rock-like Material Subjected to Compressive Loads Using Improved Peridynamic Method [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(3): 04016086.

[33] ZHANG Heng, QIAO Pizhong. A State-based Peridynamic Model for Quantitative Fracture Analysis [J]. International Journal of Fracture, 2018, 211(1): 217.

[34] YU Kebing. Enhanced integration methods for the peridynamic theory[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 26. (建议换文献)

[35] 崔恩照. 高速切削镍基合金用石墨烯/陶瓷复合刀具研制及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

[36] 樊建勋. Inconel 718合金件裂纹产生原因分析[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(5): 296.
FAN Jianxun. Analysis of Crack Generation Reason of Inconel 718 Alloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(5): 296.

(编辑:温泽宇)