

超低温冷却铣削钛合金刀 - 屑界面摩擦特性研究

阳 平

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年8月17日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月18日

摘 要

针对TC4钛合金铣削过程中切削温度高、刀屑 - 界面黏结严重、摩擦状态复杂等问题, 本文开展超低温冷却条件下铣削摩擦特性研究。以TC4钛合金为工件材料, 采用硬质合金铣刀进行不同冷却条件下的铣削试验, 测量切削力和切削温度, 观察切屑形貌、刀具磨损形貌及已加工表面形貌, 并根据切削力分解方法计算刀 - 屑界面平均摩擦因数。结果表明, 超低温冷却可显著降低切削区温度, 减弱刀 - 屑界面黏结和扩散作用, 使前刀面粘附物减少, 刀屑接触长度缩短, 摩擦因数降低。但由于低温条件下钛合金材料强度和硬度升高, 剪切变形抗力增大, 局部切削力可能出现上升。超低温冷却对切削变形区摩擦行为的影响是降低界面黏结摩擦与增强材料低温硬化效应共同作用的结果。

关键词

超低温冷却, 切削变形区, 摩擦因数

Study on Tool-Chip Interface Friction Characteristics in Cryogenic Cooling Milling of Titanium Alloy

Ping Yang

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: August 17, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 18, 2026

Abstract

To address the problems of high cutting temperature, severe tool-chip interfacial adhesion, and complex frictional conditions during the milling of TC4 titanium alloy, the friction characteristics of

文章引用: 阳平. 超低温冷却铣削钛合金刀-屑界面摩擦特性研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(9): 52-64.

DOI: 10.12677/mos.2026.159133

cryogenic milling were investigated. TC4 titanium alloy was used as the workpiece material, and milling experiments were conducted using a cemented carbide milling cutter under different cooling conditions. The milling forces and cutting temperatures were measured, while the chip morphology, tool wear morphology, and machined surface morphology were examined. The average friction coefficient at the tool-chip interface was calculated using a cutting-force decomposition method. The results show that cryogenic cooling can significantly reduce the temperature in the cutting zone, weaken adhesion and diffusion at the tool-chip interface, decrease adhered material on the rake face, shorten the tool-chip contact length, and thereby reduce the friction coefficient. However, under low-temperature conditions, the strength and hardness of the titanium alloy increase, leading to greater resistance to shear deformation and a possible local increase in cutting forces. Therefore, the effect of cryogenic cooling on frictional behavior in the cutting deformation zones results from the combined effects of reduced interfacial adhesive friction and enhanced low-temperature hardening of the workpiece material.

Keywords

Cryogenic Cooling, Cutting Deformation Zone, Friction Coefficient

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、耐热性能优良和生物相容性良好等特点，在航空航天、能源装备、船舶制造及生物医疗等领域得到广泛应用。然而，钛合金导热系数低、弹性模量小、化学活性高，在铣削过程中产生的热量难以及时传出，容易在刀具-切屑接触区形成局部高温。同时，钛合金在高温、高压条件下易与刀具材料发生黏着和材料转移，导致铣削力增大、刀具磨损加剧以及加工表面质量下降，属于典型的难加工材料。

史方[1]通过 Ti-6Al-4V 高速切削有限元分析指出，材料本构关系、刀具-切屑摩擦模型和切削参数均会直接影响切削力、切削温度及切屑形态的预测结果。苗典远等[2]建立了基于 ABAQUS 的三维微细铣削有限元模型，对铣削过程中的切屑形成、应力、温度和切削力进行了仿真分析。王海艳等[3]基于斜角切削理论建立了钛合金螺旋铣孔切削力模型，验证了理论建模方法对切削力变化规律的预测能力。Hong 等[4]系统研究了 Ti-6Al-4V 低温加工中的冷却方式与切削温度问题，指出低温介质的喷射位置及作用区域会直接影响切削区的传热状态。李晓晨等[5]建立了考虑刀-屑变摩擦因数的铣削力预测模型，提高了铣削力计算结果与试验结果的一致性。张强等[6]在铣削力模型中同时考虑了前刀面、后刀面和刃口钝圆区域的摩擦作用。张程焱等[7]通过刀-屑局部摩擦因数建模及试验研究，指出刀-屑接触区不同位置的摩擦状态存在差异，局部摩擦因数受到接触应力和滑移状态的影响。谢娜等[8]进一步考虑了接触应力和温度对刀-屑摩擦因数的耦合作用。李娜[9]利用有限元方法研究了刀-屑接触区黏结区与滑移区的分布，以及温度和应力对界面摩擦状态的影响。王飞杰等[10]采用车削试验法评价刀具摩擦性能，说明可利用切削分力关系反求刀具-切屑界面的等效摩擦因数。岳彩旭等[11]对钛合金铣削过程中刀具前刀面磨损进行了建模分析，揭示了刀具磨损与界面温度、接触应力及材料滑移之间的关系；陈燕等[12]采用有限元方法研究了 TC4 钛合金高速切削过程中的刀具磨损，为通过数值模拟预测刀具载荷和磨损行为提供了方法基础；Hong 等[13]进一步研究了低温加工 Ti-6Al-4V 过程中的摩擦与切削力，表明低温环境会同时改变材料力学性能和刀-屑界面摩擦状态，摩擦因数与切削力之间并非简单的线性对应关系。王相宇

等[14]采用试验和仿真相结合的方法研究了钛铝合金低温切削温度,揭示了低温冷却对刀具、切屑和工件温度分布的影响。王海双等[15]建立了微量液氮流动、对流换热与切削过程相结合的仿真模型,分析了不同液氮喷射参数下的冷却效果、切削力和切削温度,为降低液氮消耗和优化低温冷却参数提供了理论依据。

现有研究已在低温冷却、切削力建模、有限元仿真、刀-屑摩擦模型及刀具磨损等方面取得了较多成果,但仍存在以下不足:一是部分低温切削研究主要关注切削温度、刀具磨损或表面质量,对不同冷却温度下刀-屑等效摩擦因数的变化规律研究相对不足;二是传统有限元模型常将摩擦因数设为固定值,难以反映温度、应力和切削参数共同作用下的实际接触状态;三是低温环境下切削力与摩擦因数可能呈现不同的变化趋势,两者之间的作用关系及物理机制仍需通过试验与仿真相结合的方法进一步分析。因此,本文以 TC4 钛合金为研究对象,以冷却温度、主轴转速和每齿进给量为试验因素,设计四因素水平组合的正交试验,并建立相应的低温铣削有限元仿真模型。通过获取径向力 F_x 、切向力 F_y 、轴向力 F_z ,比较试验结果与仿真结果,采用极差分析方法评价各工艺参数的影响程度。在此基础上,结合钛合金热软化、低温强化、刀-屑黏着、刃口挤压和犁削等作用,分析低温条件下摩擦因数与三向切削分力的变化机理。研究结果可为 TC4 钛合金低温铣削摩擦模型建立、有限元仿真参数设置及加工工艺优化提供理论参考。

2. 切削变形与刀-屑界面摩擦理论

2.1. 切削变形机制

图 1 所示为对工件进行传统铣削加工过程中某一点切屑流动及形成的过程,可以看出,切屑的流动轨迹大致可分为 3 个变形区域:第一变形区(I)位于 OA 线与 OM 线之间。刀齿切入工件后,刀尖前方材料受到强烈挤压,金属晶粒沿剪切方向发生滑移,并产生显著的塑性变形。材料由工件基体向切屑过渡的过程中,流动方向逐渐改变,其中靠近 OA 线处的变形程度较大。第二变形区(II)位于 OM 线以上的切屑与前刀面接触区域。经第一变形区剪切形成的切屑沿刀具前刀面向上流出。由于切屑底层与前刀面之间经历由高压紧密接触到逐渐分离的过程,在靠近 OM 线及刀尖的位置仍承受较大的法向挤压力和切向摩擦力。在挤压与摩擦的共同作用下,切屑底层材料发生二次塑性变形,原有晶粒被进一步拉长,并沿切屑流动方向呈现纤维化特征。第三变形区(III)位于切削刃 O 点与已加工表面之间。由于实际切削刀具具有一定的钝圆半径, O 点附近未被直接剪切去除的材料会受到刃口钝圆部分的挤压和犁削作用,从而产生剪切变形和塑性变形。材料越过切削刃后,又与刀具后刀面发生摩擦接触,使已加工表层晶粒进一步拉长,并形成不同程度的加工硬化。当材料与后刀面分离后,受压表层会发生一定的弹塑性恢复,进而在已加工表面及其近表层形成残余应力和局部应力集中。

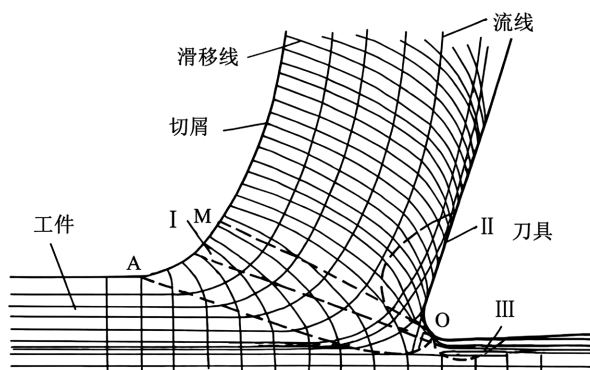


Figure 1. Three deformation zones in metal cutting

图 1. 金属切削过程中的 3 个变形区

2.2. 刀-屑界面平均摩擦因数模型建立

在低温铣削钛合金过程中, 刀具前刀面与切屑之间存在明显的挤压和滑移作用, 二者共同构成刀-屑界面摩擦行为。为了描述刀-屑界面的摩擦特性, 将铣削过程中单个刀齿的瞬时切削微元视为正交切削, 如图 2 所示建立刀-屑受力模型。图中, F_r 为刀-屑界面合力; F_n 为前刀面法向力; F_f 为前刀面摩擦力; β 为摩擦角; ϕ 为剪切角; γ_0 为刀具前角; F_c 为切削速度方向上的切削分力; F_p 为垂直于切削速度方向的背向力; a_c 为切削厚度; a_w 为切削宽度。

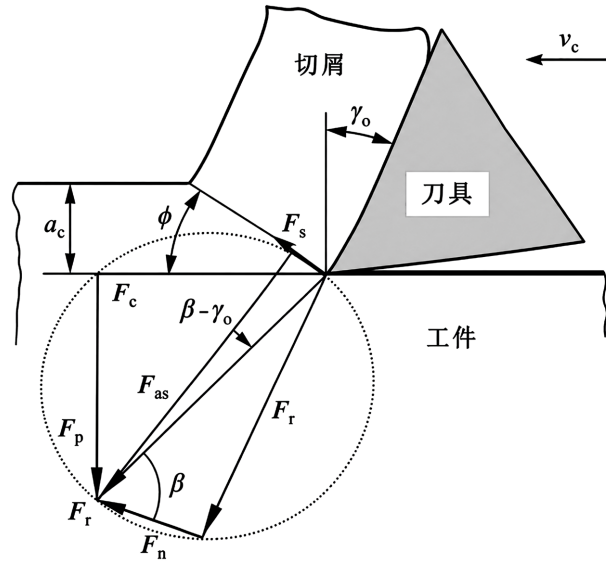


Figure 2. Relationship between cutting forces and angles
图 2. 切削时力与角度的关系

设切削层截面积为

$$A_c = a_c a_w$$

剪切面面积为

$$A_s = \frac{A_c}{\sin \phi}$$

若 τ_s 表示剪切面上的平均剪应力, 则剪切力 F_s 可表示为

$$F_s = \tau_s A_s = \frac{\tau_s A_c}{\sin \phi}$$

又由受力几何关系可得

$$F_s = F_r \cos(\phi + \beta - \gamma_0)$$

因此

$$F_r = \frac{F_s}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)} = \frac{\tau_s A_c}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (1)$$

刀具在切削速度方向和法向方向上的分力分别为

$$F_c = F_r \cos(\beta - \gamma_0)$$

$$F_p = F_r \sin(\beta - \gamma_0)$$

将式(1)代入上式, 可得

$$F_c = \frac{\tau_s A_c \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (2)$$

$$F_p = \frac{\tau_s A_c \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)相除得

$$\frac{F_p}{F_c} = \tan(\beta - \gamma_0)$$

$\tan \beta$ 即等于前刀面的平均摩擦因数 μ , 则根据切削力分量求取刀 - 屑界面摩擦因数的计算模型。

$$\mu = \frac{F_p + F_c \tan \gamma_0}{F_c - F_p \tan \gamma_0} \quad (4)$$

3. 仿真模型建立

3.1. 有限元模型建立

采用三维建模软件 SolidWorks 构建刀具与工件的几何模型, 将 SolidWorks 中完成建模的刀具及工件几何模型导出为 STL 格式, 随后导入 ABAQUS 有限元仿真软件, 仿真模型如图 3 所示。将刀具定义为刚体, 模拟仿真中选用直径为 8 mm、螺旋角为 35°的硬质合金四刃铣刀, 工件几何尺寸设定为长 100 mm、宽 50 mm、高 10 mm, 钛合金工件模型为长方体, 采用六面体结构化网格划分方式。通过全局布种与边界布种相结合的方式对网格密度加以控制, 表 1 和表 2 为 TC4 钛合金和刀具材料的有关参数。

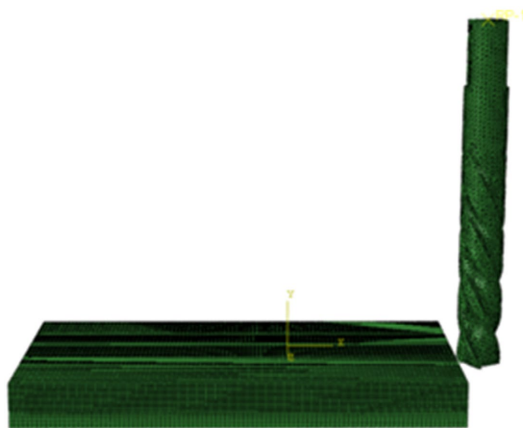


Figure 3. Three-dimensional finite element model of milling
图 3. 三维铣削有限元模型

Table 1. Material parameters of TC4 titanium alloy
表 1. TC4 钛合金材料参数

密度 kg/m ³	弹性模量 MPa	传热系数 W/(m ² ·°C)	泊松比	比热容 J/(kg·°C)
4430	112,000	7.0	0.34	0.565e-9

Table 2. Tool material parameters
表 2. 刀具材料参数

密度 kg/m ³	弹性模量 MPa	传热系数 W/(m·°C)	泊松比	比热容 J/(kg·°C)
14,850	640,000	79.6	0.22	0.8e-9

3.2. 仿真方案

为分析低温环境和铣削参数对 TC4 钛合金刀-屑界面摩擦行为、切削力的影响,采用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验(表 3)开展低温铣削试验。试验选取冷却温度、主轴转速和每齿进给量作为主要影响因素,分别记为 A、B 和 C,每个因素设置 4 个水平。

Table 3. $L_{16}(4^3)$ orthogonal simulation test scheme

表 3. $L_{16}(4^3)$ 正交仿真试验方案

水平	A 冷却温度 $T/(^{\circ}\text{C})$	B 主轴转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	C 每齿进给量 $f_z/(\text{mm}/z)$
1	20	1500	0.01
2	-80	2000	0.02
3	-130	2500	0.03
4	-190	3000	0.04

4. 低温铣削试验

通过超低温液氮冷却环境下研究 TC4 钛合金低温铣削的摩擦,实验装置如图 4 所示。铣削实验中的工件采用 TC4 钛合金,尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的长方体,实验加工设备采用 VMC1160 数控加工中心,刀具选用 YG6X 硬质合金直柄立铣刀,刀刃为整体式四刃铣刀,刀刃长度 20 mm ,刀具直径为 8 mm ,全长 60 mm 。铣削力测量所用仪器包括 Kister9625B 三向压电式测力仪、Kistler5223B 电荷放大器、动态数据采集器、电脑、数据线等。将 Kister9625B 三向压电式测力仪安装在机床夹具上,采集切削力数据,其力信号采集流程示意图如图 5 所示。温度测量仪器则包括 UTi260E 热成像仪、JK808 多路温度测试仪如图 6 所示,实验采用的是 DPL450-175-2.3 型自增压绝热液氮罐,其最大容积达 175 L ,工作压力为 1.3 MPa 。液氮喷嘴口与切削区域的夹角设定为 45° ,喷嘴口内径为 7 mm 。为获得不同低温冷却工况,采用 UTi260E 热成像仪和 JK808 多路温度测试仪对低温区域进行温度监测,其中以热电偶方式配合 JK808 多路温度测试仪作为局部冷却温度的主要测量手段。铣削试验前,在保持液氮供给压力、喷射角度和喷嘴直径等参数不变的条件下,将热电偶测温端布置于刀尖对应位置附近,通过改变喷嘴出口与刀尖之间的距离调节局部冷却强度,并记录不同喷嘴-刀尖距离下的温度变化。当测量温度达到相对稳定状态后,确定喷嘴-刀尖距离与局部冷却温度之间的对应关系,以此获得 20°C 、 -80°C 、 -130°C 和 -190°C 四种冷却工况。

5. 结果与分析

5.1. 铣削力试验与仿真结果及极差分析

根据 $L_{16}(4^3)$ 正交表,利用 ABAQUS 软件进行仿真试验,在稳定情况下去除突变数据后分别取各方向峰值力的平均值作为该方向的切削力结果;从 DynoWare 软件中提取不同低温条件下 TC4 铣削过程中的切削力,采集每组的稳定切削阶段的峰值数据,并对采集到的各个铣削力数据进行处理并计算其平均值,通过仿真和试验中获得主切削力和切深抗力,由公式(4)计算得出试验和仿真的刀-屑界面平均摩擦因数。实验仿真结果如表 4,铣削分力 F_x 、 F_y 、 F_z 极差分析表分别如表 5~7。

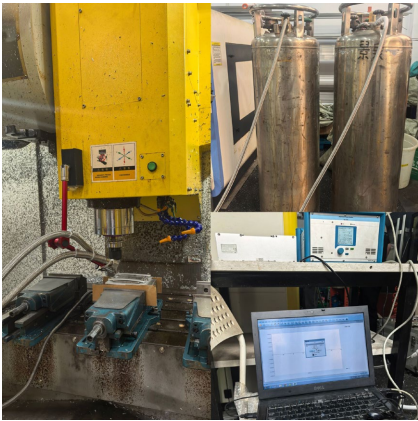


Figure 4. Experimental setup diagram
图 4. 试验装置图

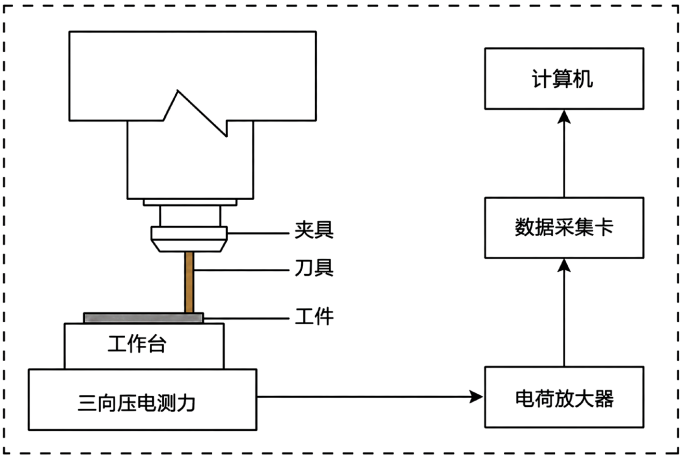


Figure 5. Schematic diagram of the force signal acquisition system
图 5. 力信号采集工作原理图



Figure 6. Temperature measurement instruments
图 6. 温度测量仪器

Table 4. Experimental and simulation results of milling forces of titanium alloy
表 4. 钛合金低温铣削力试验与仿真结果

序号	水平组合	F_x/N	F_y/N	F_z/N	摩擦因数 μ
1	A1B4C4	255/263	630/643	251/257	0.755/0.760

续表

2	A2B3C4	256/264	650/662	261/267	0.740/0.747
3	A3B2C4	254/262	650/664	266/273	0.736/0.741
4	A4B1C4	239/246	550/560	261/267	0.795/0.802
5	A1B3C3	229/236	550/562	214/219	0.770/0.775
6	A2B4C3	254/261	690/702	274/281	0.706/0.711
7	A3B1C3	205/212	450/460	214/219	0.824/0.832
8	A4B2C3	250/258	710/724	289/296	0.685/0.690
9	A1B2C2	196/201	450/458	172/176	0.796/0.801
10	A2B1C2	167/172	350/357	167/171	0.854/0.861
11	A3B4C2	247/255	750/764	297/304	0.655/0.661
12	A4B3C2	245/254	770/787	307/315	0.641/0.647
13	A1B1C1	125/128	250/255	120/123	0.887/0.890
14	A2B2C1	203/209	510/519	195/200	0.745/0.752
15	A3B3C1	228/236	670/684	260/267	0.669/0.675
16	A4B4C1	235/243	810/825	320/327	0.605/0.611

Table 5. F_x range analysis table表 5. F_x 极差分析表

切削力/N	ki	A 冷却温度 T	B 主轴转速 n	C 每齿进给量 f_z
F_x	k1	201.31/207.00	184.04/189.50	197.77/204.05
	k2	220.10/226.52	225.72/232.48	213.69/220.52
	k3	233.49/241.28	239.51/247.50	234.52/241.71
	k4	242.27/250.23	247.76/255.53	251.03/258.73
	R	41.00/43.25	63.75/66.00	53.25/54.75

Table 6. F_y range analysis table表 6. F_y 极差分析表

切削力/N	ki	A 冷却温度 T	B 主轴转速 n	C 每齿进给量 f_z
F_y	k1	470.02/479.50	400.00/408.00	560.02/570.73
	k2	550.06/560.00	580.12/591.26	580.00/591.53
	k3	630.10/643.00	660.03/673.74	600.21/612.00
	k4	710.12/724.10	720.10/733.54	620.42/632.25
	R	3	5	9

Table 7. F_z range analysis table表 7. F_z 极差分析表

切削力/N	ki	A 冷却温度 T	B 主轴转速 n	C 每齿进给量 f_z
F_z	k1	189.25/193.75	190.50/195.00	223.72/229.25
	k2	224.25/229.78	230.48/236.25	235.78/241.54
	k3	259.20/265.71	260.51/267.00	247.76/255.75
	k4	294.23/301.24	285.46/292.25	259.80/266.00
	R	105.00/107.50	95.00/97.25	36.00/36.75

5.2. 冷却温度对铣削力的影响

根据极差分析结果, 绘制在不同冷却温度下对三向切削力的影响规律图, 如图 7 所示, 随着冷却温度降低, 试验与仿真所得三向铣削分力整体呈增大趋势。其中, F_z 对冷却温度最为敏感, 试验值由 20℃ 下的 189.25 N 增加至 -190℃ 下的 294.23 N, 仿真值由 193.75 N 增加至 301.24 N, 相对增幅达到 55.48%。随着冷却温度降低, TC4 钛合金切削区的热软化作用受到抑制, 材料流动应力及塑性变形抗力提高, 使第一变形区内材料发生剪切滑移和塑性变形所需的载荷增加。同时, 低温条件下材料塑性流动能力降低, 切削刃附近的挤压、犁削作用及切屑底层的二次剪切作用增强。因此, 低温条件下三向铣削分力整体升高。尤其是 F_z 增幅最大, 说明冷却温度对刀具轴向载荷和界面法向挤压作用的影响更为显著。

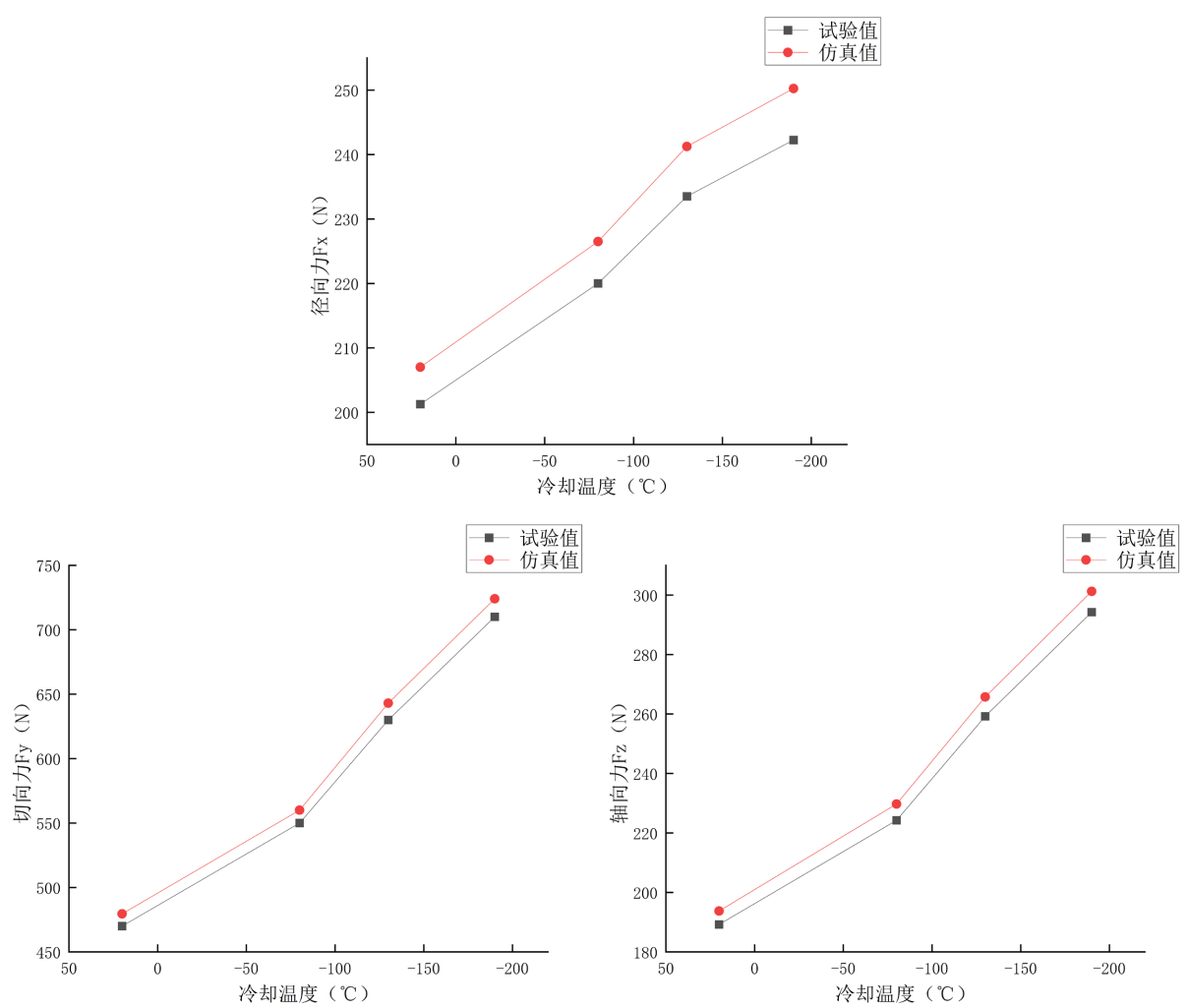


Figure 7. Variation trend chart of milling force with cooling temperature
图 7. 铣削力随冷却温度的变化趋势图

5.3. 主轴转速对铣削力的影响

如图 8 表示的是在不同冷却温度下三向铣削力随主轴转速的变化趋势图, 随着主轴转速由 1500 r/min 提高至 3000 r/min, 试验与仿真所得三向铣削分力均呈增大趋势, 其中 F_y 增幅最为明显。试验结果中, F_y 由 400.00 N 增加至 720.10 N; 仿真结果中由 408.00 N 增加至 733.54 N, 主轴转速提高后, 刀具切入

工件的频率和刀-屑界面相对滑动速度增加,材料在第一变形区内的应变速率提高。TC4 钛合金具有一定的应变速率强化特征,在低温冷却条件下,超低温冷却降低了加工区域的整体热环境,使材料热软化作用受到一定程度的抑制,材料仍保持较高的强度和塑性变形抗力,因此切屑形成和材料去除所需载荷增加。同时,主轴转速提高使单位时间内参与切削的刀齿次数增加,在每齿进给量不变时,实际进给速度和材料去除率也随之提高,从而使三向铣削分力整体增大。当主轴转速进一步提高至较高水平后,材料变形状态及刀-屑接触过程逐渐趋于稳定,同时切屑流动和排出条件有所改善。这些作用能够部分抵消应变速率提高和材料去除率增加引起的增力效应,因此三向铣削分力在 2500~3000 r/min 范围内的增长幅度趋于减缓。

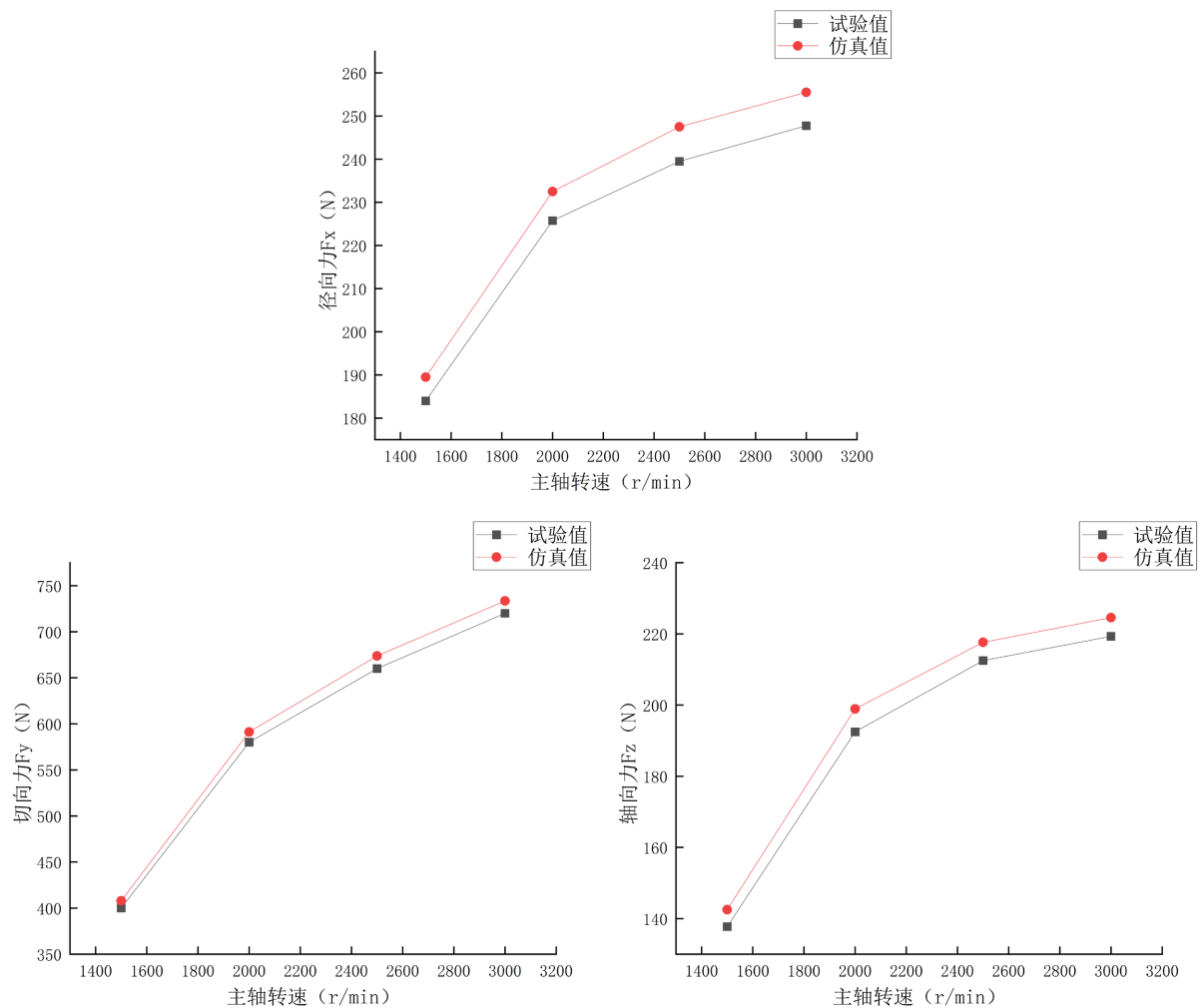


Figure 8. Variation trend chart of milling force with spindle speed
图 8. 铣削力随主轴转速的变化趋势图

5.4. 每齿进给量对铣削力的影响

由图 9 可知,随着每齿进给量由 0.01 mm/z 增大至 0.04 mm/z,在低温铣削条件下,随着每齿进给量增加,三个方向的铣削分力总体呈增大趋势。每齿进给量增大后,单齿未变形切屑厚度和瞬时切削面积随之增加,刀具在单位时间内需要去除的材料体积增大,从而提高材料剪切变形阻力及刀具-工件接触载荷,最终导致铣削力整体增大。与常温铣削相比,低温冷却会抑制切削区的温升和材料热软化,使 TC4

钛合金材料在切削过程中保持较高的强度、硬度和流动应力。因此，在低温条件下，切削区温升受到抑制，TC4 钛合金的热软化作用减弱，材料保持较高的强度和流动应力。因此，每齿进给量增加所引起的切屑厚度效应不能通过明显的热软化得到充分抵消，使铣削分力随进给量增加呈现较稳定的上升规律。

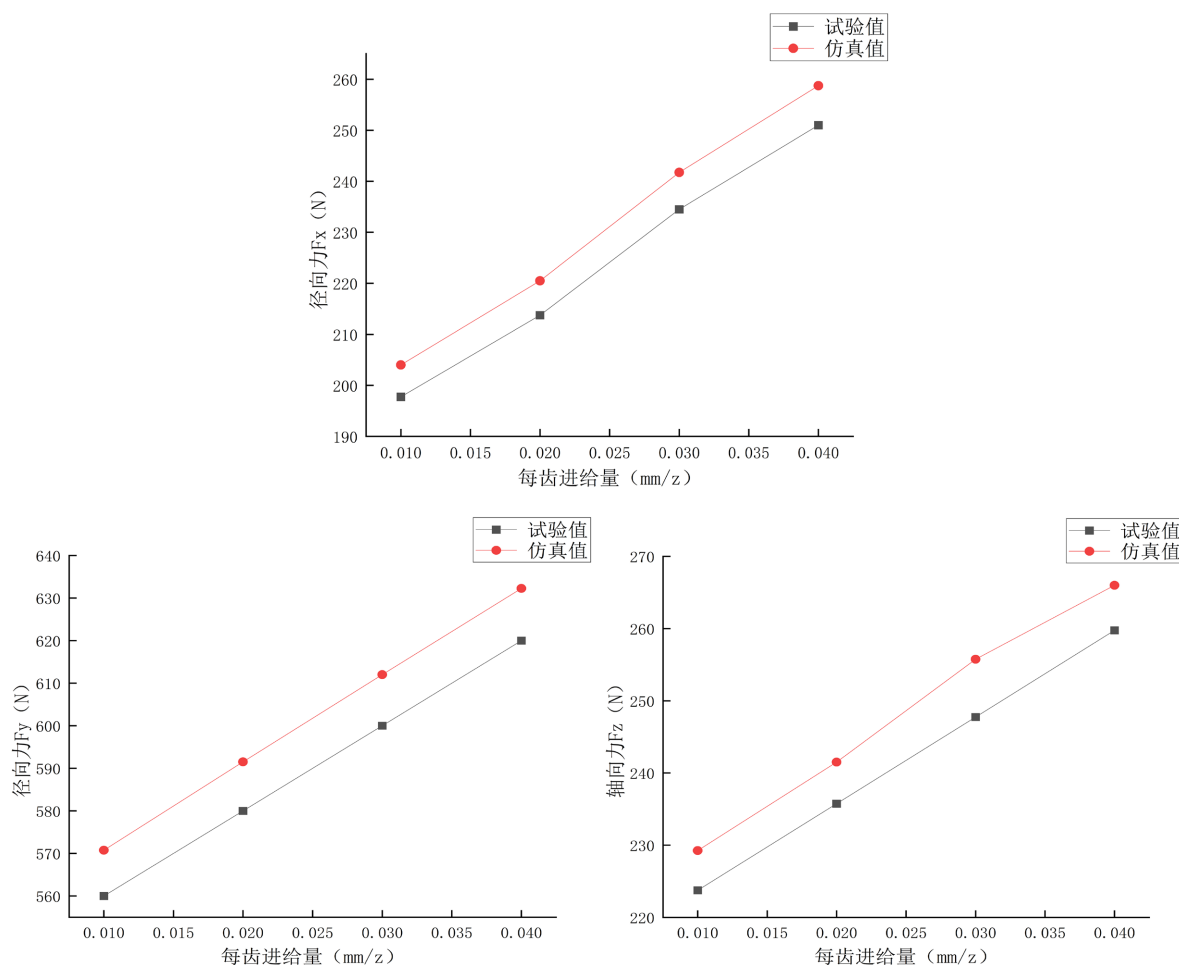


Figure 9. Variation trend chart of milling force with feed per tooth

图 9. 铣削力随每齿进给量的变化趋势图

6. 工艺参数对刀 - 屑界面平均摩擦因数的影响

图 10 反映了不同冷却温度、主轴转速和每齿进给量条件下低温铣削钛合金摩擦因数的变化规律。冷却温度对摩擦因数的影响呈明显的非单调特征。随着冷却温度降低，刀 - 屑接触区的温度受到抑制，TC4 钛合金与刀具前刀面之间的化学活性、黏着倾向及材料转移程度减弱，从而降低了黏着摩擦和黏结撕裂作用。同时，低温冷却有利于减小切屑在前刀面上的黏附范围，改善切屑沿前刀面的流动状态，因此刀 - 屑界面的平均摩擦因数逐渐减小。

主轴转速提高后，刀具与切屑之间的相对滑动速度增加，单个刀齿与切屑的接触时间缩短，有利于切屑及时排出并减弱材料在前刀面上的黏附。同时，较高的切屑流出速度有利于切屑及时脱离前刀面，使刀 - 屑有效接触长度及持续接触程度减小，因而平均摩擦因数随主轴转速提高而下降。当主轴转速达到较高水平后，刀 - 屑接触状态及局部温度逐渐趋于稳定，因此继续提高转速对摩擦因数的影响有所减弱。

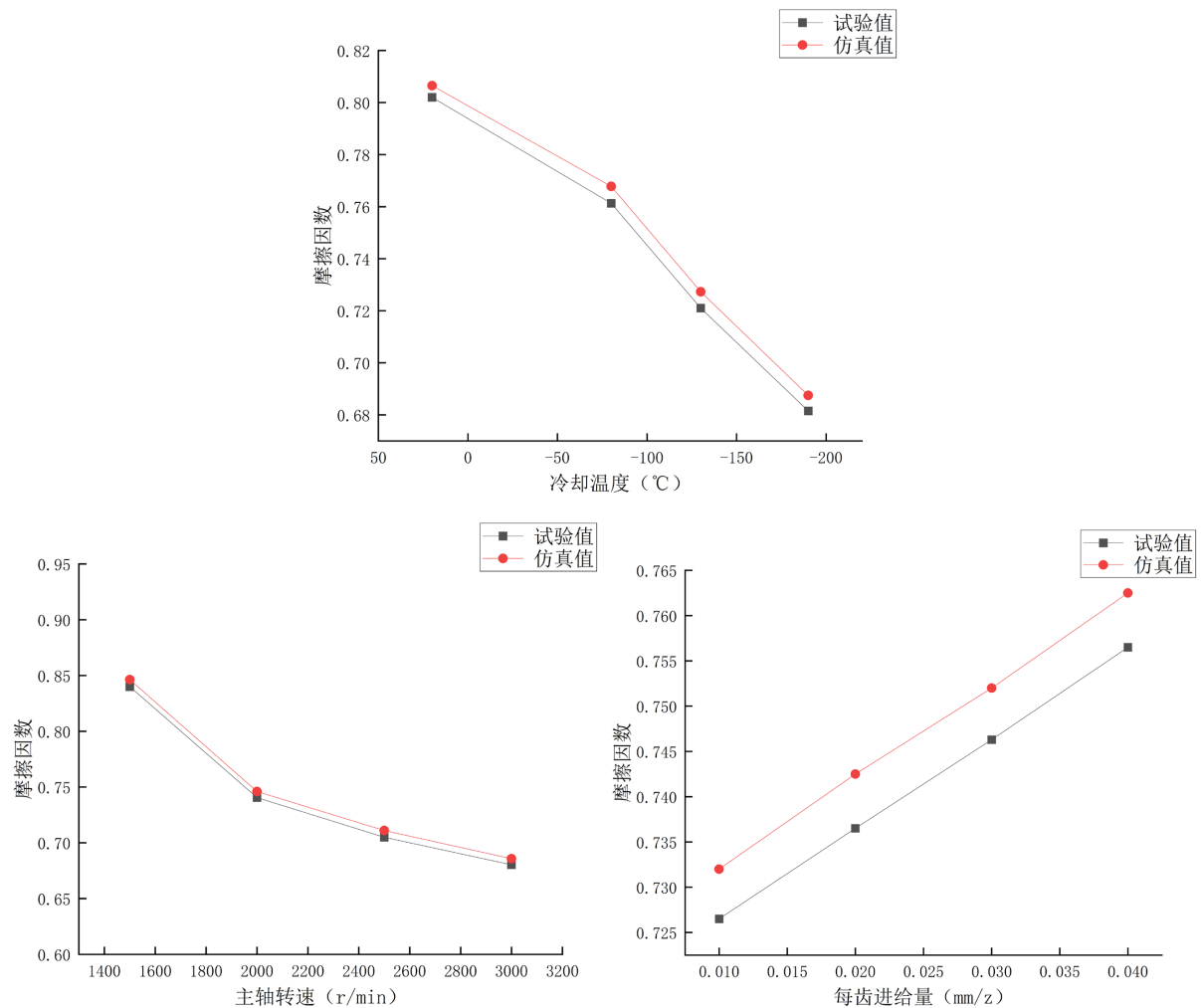


Figure 10. Variation trend chart of average friction coefficient

图 10. 平均摩擦因数变化趋势图

每齿进给量增加后, 单齿未变形切屑厚度和瞬时切削面积增大, 使单齿切削载荷及刀-屑界面的法向接触载荷提高。与此同时, 切屑底层材料在第二变形区内的二次剪切作用增强, 切屑沿前刀面滑动所需克服的界面阻力增加, 从而使平均摩擦因数缓慢升高。但由于每齿进给量主要影响切屑厚度和材料去除载荷, 其对刀-屑界面黏着状态的直接影响相对有限, 因此摩擦因数的变化幅度较小。

7. 结论

本文以 TC4 钛合金为研究对象, 通过 ABAQUS 有限元仿真与低温铣削试验, 研究冷却温度、主轴转速和每齿进给量对刀-屑界面平均摩擦因数的影响。根据仿真和试验结果, 可得到以下结论。

- 1) 随着冷却温度由 20°C 降低至 -190°C, 三向铣削力整体呈增大趋势。这是因为低温冷却抑制了切削区材料的热软化, 提高了 TC4 钛合金的强度、硬度和塑性变形抗力, 从而增加了材料剪切变形及刀具挤压所需的载荷。
- 2) 随着主轴转速由 1500 r/min 提高至 3000 r/min, 三向铣削力整体增大, 主轴转速提高后, 刀-屑界面相对滑移速度和材料变形速率增加; 在低温条件下, 材料热软化受到抑制, 使切屑形成及材料去除所需载荷增加。

3) 随着每齿进给量由 0.01 mm/z 增大至 0.04 mm/z, 三向铣削力总体增大。每齿进给量增大使未变形切屑厚度和瞬时切削面积增加, 进而提高材料剪切变形抗力及刀具承受的切削载荷。

4) 低温冷却条件下, 刀-屑界面平均摩擦因数随冷却温度降低和主轴转速提高而减小, 随每齿进给量增加而增大, 试验与仿真结果具有较好的一致性。各因素对摩擦因数的影响程度依次为主轴转速、冷却温度和每齿进给量。降低局部冷却温度可抑制刀-屑界面黏附和材料转移; 提高主轴转速可缩短刀-屑接触持续时间并改变界面接触状态; 增大每齿进给量则会提高切屑厚度、接触载荷和界面剪切阻力。低温铣削摩擦行为是界面减摩、材料低温强化及刀-屑动态接触状态共同作用的结果, 摩擦因数与铣削力之间不具有简单的线性对应关系。

参考文献

- [1] 史方. Ti6Al4V 的高速切削加工的有限元分析及摩擦模型的研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [2] 苗典远, 国宪孟, 张帅, 等. 基于 ABAQUS 的三维微细铣削有限元仿真分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(8): 172-175.
- [3] 王海艳, 周秩同, 武晔, 等. 基于斜角切削理论的钛合金螺旋铣孔切削力建模[J]. 中国机械工程, 2023, 34(2): 142-147.
- [4] Hong, S.Y. and Ding, Y. (2001) Cooling Approaches and Cutting Temperatures in Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41**, 1417-1437. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(01\)00026-8](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(01)00026-8)
- [5] 李晓晨, 岳彩旭, 刘献礼, 等. 考虑刀-屑变摩擦因数的铣削力预测[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(3): 580-587.
- [6] 张强, 卓旭. 考虑前后刀面及刃钝圆摩擦的铣削力模型[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 190-194.
- [7] 张程焱, 卢继平. 刀-屑局部摩擦因数建模及实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(9): 899-904.
- [8] 谢娜, 岳彩旭, 李晓晨, 等. 考虑接触应力和温度的刀-屑摩擦因数建模[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(6): 821-826.
- [9] 李娜. 金属切削过程刀-屑接触区摩擦状态有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- [10] 王飞杰, 刘润爱, 白小云, 等. 基于车削试验法的刀具摩擦性能研究[J]. 机电工程, 2020, 37(3): 288-294.
- [11] 岳彩旭, 杜延杰, 李晓晨, 等. 钛合金铣削过程刀具前刀面磨损解析建模[J]. 机械工程学报, 2021, 57(23): 232-240.
- [12] 陈燕, 杨树宝, 傅玉灿, 等. 钛合金 TC4 高速切削刀具磨损的有限元仿真[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2230-2240.
- [13] Hong, S.Y., Ding, Y. and Jeong, W.C. (2001) Friction and Cutting Forces in Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41**, 2271-2285. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(01\)00029-3](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(01)00029-3)
- [14] 王相宇, 仇文豪, 牛金涛, 等. 钛铝合金低温切削加工温度的实验和仿真研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(19): 318-331.
- [15] 王海双, 王利虎, 王利梅, 等. 微量液氮低温冷却切削加工钛铝合金仿真分析[J]. 工具技术, 2025, 59(9): 60-69.