

冷风油雾润滑对 TC4 铣削过程刀-屑摩擦的影响

王宁昌¹, 程鑫¹, 姜峰¹, 谢鸿²

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;
2. 东方汽轮机股份有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 通过钛合金 TC4 的铣削实验,研究冷风油雾润滑介质特性及其施加方式对刀具-切屑摩擦行为的影响.冷风油雾喷嘴布置在刀具将要切入工件前的空行程中,其润滑效果最好.当出油量增加到一定值(约 12 mL·h⁻¹)时,刀具-切屑平均摩擦系数不再发生明显变化.随着钛合金 TC4 铣削速度的提高,冷风干切削的平均摩擦系数增大,而冷风油雾切削的平均摩擦系数变化不明显,且远低于冷风干切削的平均摩擦系数.结果表明:油雾载体速度和刀具转速存在一定的匹配关系,使润滑效果达到最优.

关键词: 钛合金; 铣削; 冷风油雾; 润滑; 摩擦系数; 喷嘴; 出油量

中图分类号: TG 74 **文献标志码:** A

在钛合金加工中,冷却润滑介质的合理使用十分重要^[1-3].目前,钛合金加工主要通过大量浇注冷却液降温,但由于切削液的膜态沸腾作用和切屑的阻挡^[4],刀具-切屑接触时(工作行程)的冷却效果较差.当刀具-工件脱离时(空行程),冷却效果突然增强,极易造成刀具,特别是涂层刀具的热疲劳破损^[5].因此,新型冷却介质和冷却方法在钛合金加工中的应用成为研究的热点^[6].微量润滑技术是最接近实际生产应用的一种冷却润滑方法.这种技术将润滑介质颗粒混入带有一定压力的气流载体中,形成气液两相流体喷向切削区域.研究人员对其应用效果进行了大量的实验研究,分析不同加工工艺参数对冷却润滑效果的影响^[7].在采用微量润滑技术加工钛合金过程中,切削区的高温导致润滑介质颗粒到达切削区的难度增加,润滑油的粘度降低,从而降低了润滑效果^[8].因此,很多研究人员利用冷风、氮气等具有保护性质的载体输送润滑介质颗粒,可以获得较好的冷却和润滑效果^[9-10].现有的研究主要集中在加工工艺参数对微量润滑效果的影响,而微量润滑系统的相关参数(如喷嘴布置、出油量、载体速度、载体温度等)对微量润滑效果的影响研究较少.本文通过钛合金 TC4 的铣削实验,研究冷风油雾润滑介质特性及其施加方式对刀具-切屑摩擦行为的影响.

1 实验部分

1.1 实验材料

作为工件材料的钛合金 TC4 是一种 $\alpha+\beta$ 双相钛合金,由于其优越的物理力学性能,该合金的使用量为 75%~85%.在钛合金 TC4 中,Al, V 的质量分数分别为 5.5%~6.75%,3.5%~4.5%;Fe 的质量分数小于 0.25%;O 的质量分数小于 0.2%;剩余的成分为 Ti.参考 GB/T 3621—1994《钛及钛合金板材》的技术要求,钛合金 TC4 采用冷轧退火处理.在热处理条件下,TC4 基本物理力学参数如下:密度为 4.42 g·cm⁻³;热导率为 6.7 W·(m·K)⁻¹;比热容为 526.3 J·(kg·℃)⁻¹;最大工作温度为 315℃;屈服强度为 880 MPa;抗拉强度为 950 MPa;弹性模量为 114 GPa;泊松比为 0.342.

收稿日期: 2014-12-18
通信作者: 姜峰(1981-),男,副教授,博士,主要从事切削过程数值仿真技术,精密、复杂切削刀具设计技术,材料动态力学性能测试及表征技术,复杂表面几何、物理特性评价技术的研究. E-mail:jiangfeng@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475173); 国家科技重大专项(2013ZX04009022); 福建省高校产学研合作科技重大项目(2014H6018); 华侨大学青年教师科研提升资助计划项目(13J0521)

1.2 冷风油雾润滑系统

油雾发生器采用 TL3000 型雾化器(无锡市江苏亚大集团公司),出油量为 $0\sim 20\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,可调. 采用 CTY-B 型低温切削油,最低使用温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. 冷风载体为 CTL-40/0.5 型冷风机(重庆市成田低温加工技术有限公司),额定流量为 $500\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,额定冷风压力为 0.15 MPa ,双管喷射. 由于冷风载体的温度和速度随着输送距离的增加而增加,因此,通过 KA33 型热丝风速风温计(日本加野公司)测量不同额定冷风压力下,冷风载体的温度(θ)和速度(v_1)的变化情况,测量结果如图 1 所示.

1.3 铣削试验

铣削实验在 DAEWOO V500 加工中心上进行. 刀具及刀片规格分别为 Seco R215. 17-2020-16, TPUN 160308 HX;刀具的前角为 0° ;后角为 11° ;刀尖圆弧半径为 0.8 mm ;刃口钝圆半径为 0.02 mm . 铣削试验现场如图 2 所示.

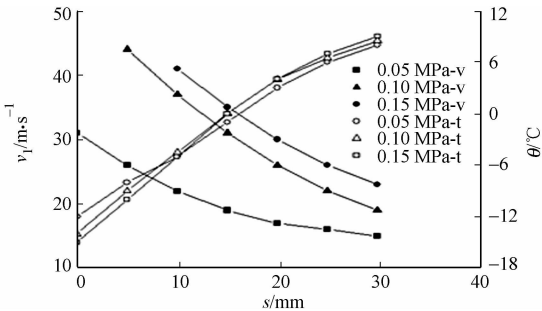


图 1 不同距离和压力对喷雾温度和喷雾速度的影响
Fig. 1 Effect of different distances and pressures on the spray temperature and the spray speed



图 2 铣削试验现场
Fig. 2 Milling test site

微量润滑喷嘴到刀具的距离为 10 mm ;冷风载体到达刀具处的最低温度约为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$;冷风载体的速度分别为 $40, 20, 30, 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;微量润滑系统的出油量分别为 0 (只有冷风), $6, 12, 18\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$. 使用两个油雾喷嘴对加工区域进行冷却润滑. 喷嘴的布置方式,如图 3 所示. 图 3 中:指向后刀面的喷嘴位置保持不变,其轴线为刀具切入点 A 和切出点 B 的连线,主要对加工过程中后刀面进行润滑冷却;另一个喷嘴的位置分别布置在刀具切削过程中(布置方式 1),刀具空行程中(布置方式 2),刀具切入前(布置方式 3). 为减小刀尖圆弧半径对切削力的影响,将工件预切为槽型结构(图 2). 试验采用侧壁顺铣的方法进行. 为了计算不同切削条件下的平均摩擦系数,使用 9275B 型测力仪(德国 Kistler 公司)测量 X, Y 两向切削力(由于刀具的螺旋角为 0° ,且采用侧壁铣削, Z 向力可忽略). 其中, X 向是刀具的进给方向; Y 向是刀具的径向;测力仪的采样频率为 $5\text{ }000\text{ Hz}$. 加工工艺参数:每齿进给量为 $0.1\text{ mm}\cdot\text{tooth}^{-1}$;轴向切深为 1.6 mm ;径向切深为 10 mm ;切削速度分别为 $40, 60, 80, 100, 120\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

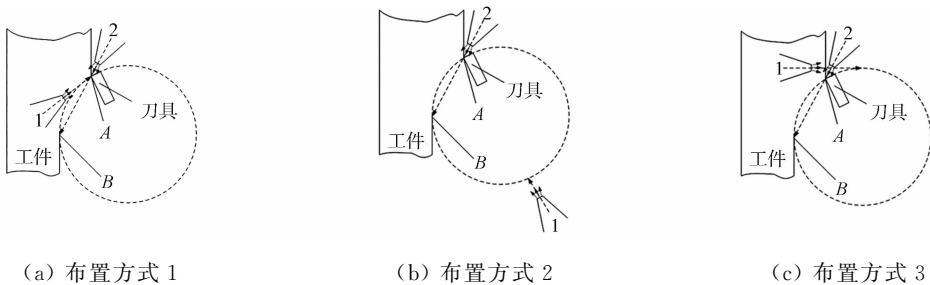


图 3 不同的喷嘴布置方式
Fig. 3 Different nozzle arrangements

2 摩擦系数模型

2.1 铣削力坐标变换

铣削力坐标转换,如图 4 所示. 实验过程中,测力系统可获得工件坐标系下的切削力,如图 4(a)所示. 摩擦系数 μ 则与刀具坐标系下的主切削力 F_R 和吃刀抗力 F_T 相关,有

$$\mu = \tan(\alpha + \arctan(F_R/F_T)). \tag{1}$$

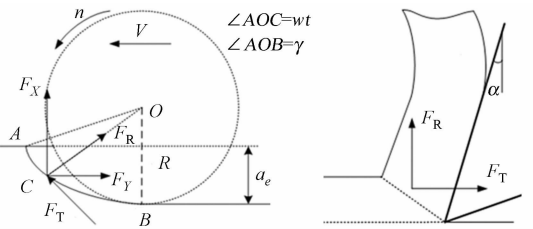
式(1)中: μ 为平均摩擦系数; α 为刀具前角; F_T 为吃刀抗力; F_R 为主切削力.力的坐标转换可表示为

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\gamma - \omega t) & -\cos(\gamma - \omega t) \\ \cos(\gamma - \omega t) & \sin(\gamma - \omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix}. \tag{2}$$

式(2)中: γ 为切入角; ω 为角速度; t 为切削时间.

2.2 平均摩擦系数计算

切削速度为 $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 铣削过程摩擦系数的计算,如图 5 所示.利用式(2)将铣削力的测量结果(图 5(a))转化到直角切削坐标系下(图 5(b)),再利用式(1)计算得到整个铣削历程的摩擦系数变化(图 5(c)),由此得到平均摩擦系数(μ),并将其作为评价润滑冷却条件的指标.



(a) 铣削过程切削力 (b) 正交平面切削力
图 4 铣削力坐标转换

Fig. 4 Milling force coordinate transformation

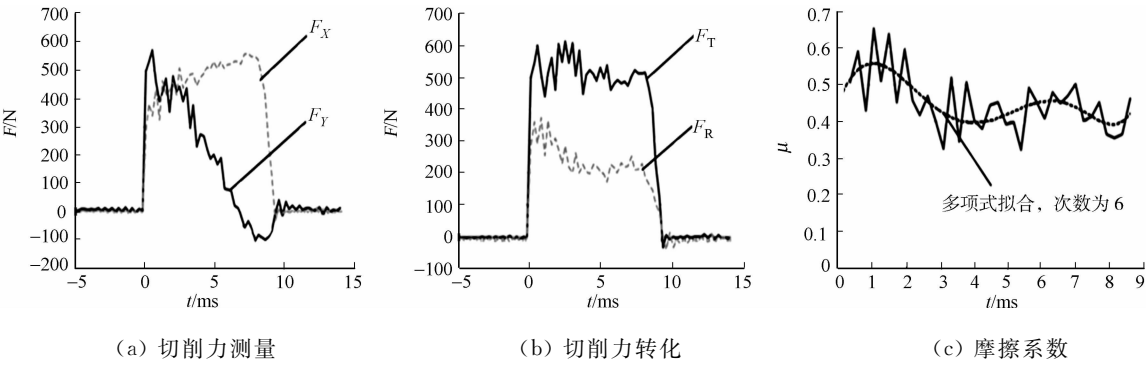


图 5 铣削过程的摩擦系数计算

Fig. 5 Friction coefficient calculation of the milling process

3 结果与分析

3.1 喷嘴布置方式对刀具-切屑摩擦行为的影响

在切削过程中,油雾很难到达前刀面,因此,油雾喷嘴布置的主要目的是使刀具在旋转过程中前刀面可以滞留更多的油雾.在油雾液滴喷出到达刀具表面的过程中,存在液滴破碎的现象.液滴在喷出过程中,内部的动力大于液体表面的张力,或者液滴受到撞击形状发生改变后,大液滴会变为小液滴,表面能增加^[11].在这个过程中,速度越快对液滴的破碎作用越有利,所以合理布置喷嘴,使刀具前刀面和油雾的冷风载体有最大的相对速度,对提高油雾的滞留有很大帮助.

将喷嘴出油量调至最大,刀具处冷风风速调至约 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,进行不同切削速度和喷嘴布置形式条件下的铣削试验.刀具-切屑的平均摩擦系数,如表 1 所示.表 1 中: v_2 为切削速度; μ 为平均摩擦系数.

表 1 不同的喷嘴布置方式下的平均摩擦系数

$v_2/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	μ		
	布置方式 1	布置方式 2	布置方式 3
40	0.312 0	0.301 0	0.311 0
60	0.309 0	0.294 0	0.288 0
80	0.307 0	0.312 0	0.306 0
100	0.331 0	0.315 0	0.320 0
120	0.325 0	0.321 0	0.304 0
平均值	0.316 8	0.308 6	0.305 8

由表 1 可知:油雾喷嘴不同的布置方式对摩擦系数有一定的影响,布置方式 1 的润滑效果最差,布置方式 3 略好于布置方式 2,主要有以下 4 个原因.1) 由于切屑阻挡作用,布置方式 1 喷向前刀面的喷嘴喷出的油雾并不能很好地到达刀具前刀面,影响了刀具带入到切削区域的油雾量.2) 在刀具切削过程中,布置方式 1 刀具表面的温度很高,接触到刀具前刀面的油雾很快被气化.3) 与布置方式 2 相比,

布置方式 3 刀具和喷嘴的相对速度高, 由于液滴的破碎作用, 刀具前刀面油雾的粘附效果好. 4) 布置方式 3 选择在刀具切入工件的时候供油, 此时刀具表面温度最低, 油雾的吸附效果好.

上述研究从侧面说明: 在最小微量润滑 (MQL) 加工中, 起润滑作用的油雾主要是由刀具带入切削区域的, 而在切削过程中, 油雾很难渗入到切削区域. 后续切削实验的 MQL 施加均选用布置方式 3.

3.2 出油量对刀具-切屑摩擦行为的影响

将喷嘴设置为布置方式 3, 设定不同的出油量, 冷风风速约为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在不同的切削速度 (v_2) 下测定平均摩擦系数, 考察出油量对平均摩擦系数 (μ) 的影响, 结果如图 6 所示. 由图 6 可知: 当雾化器出油量约为 $12\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 继续增加出油量对平均摩擦系数的影响有限. 主要原因是出油量增加到一定值后, 油雾液滴在刀具表面的粘附达到饱和, 继续增加出油量对油雾液滴的粘附作用有限, 但是会浪费切削油, 并增加工作场所的可吸入有害颗粒. 因此, 后续切削试验的出油量均设为 $12\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$. 当冷风干切削时, 平均摩擦系数随着切削速度的增加而显著增加; 当 MQL 切削时, 平均摩擦系数变化不显著.

3.3 油雾载体速度对刀具-切屑摩擦行为的影响

由图 6 还可知: 当油雾载体速度约为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 平均摩擦系数在切削速度为 $40\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时达到最小值. 因此, 将油雾载体速度分别设置为 $10, 20, 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 观察不同切削的速度 (v_2) 下平均摩擦系数 (μ) 的变化情况, 如图 7 所示.

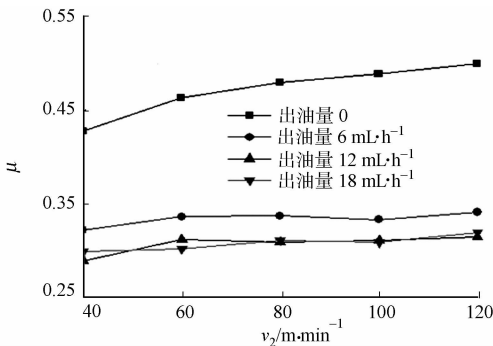


图 6 不同的出油量对平均摩擦系数的影响
Fig. 6 Influence of different spray quantities on the average friction coefficient

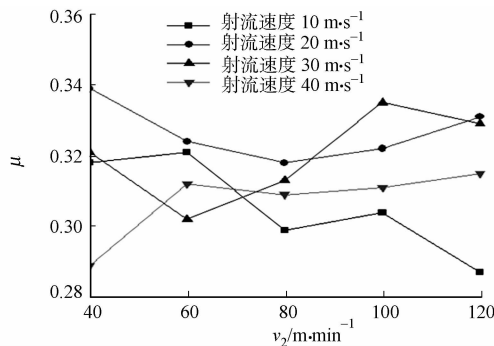


图 7 不同的油雾载体速度对平均摩擦系数的影响
Fig. 7 Influence of different oil mist carrier speeds on the average friction coefficient

由图 7 可知: 切削速度提高时, 油雾载体速度需要降低才能达到较好的润滑效果, 切削速度和油雾载体速度之间存在一定的匹配关系; 不同油雾载体速度对平均摩擦系数的影响无明显规律. 这主要是油雾液滴发生破碎后, 形成的小液滴与刀具表面发生高速碰撞后出现回弹现象^[11], 影响了油雾在刀具表面的滞留. 同时, 油雾载体速度和切削速度的变化影响了切削区固-液两相流场的变化^[12], 切削区域不同位置的液体滞留和热对流现象都有可能发生明显变化, 影响了刀具和切屑之间的润滑性能. 因此, 在 MQL 加工过程中, 油雾载体的速度并非越高越好, 油雾载体速度要与切削速度相匹配, 而这个匹配机理还需要借助流体力学等方法进行深入研究.

4 结论

- 1) 铣削加工 TC4 钛合金时, 在刀具切入工件前对前刀面进行喷雾给油, 刀具-切屑的平均摩擦系数较小, 冷风油雾润滑效果最佳.
- 2) 铣削加工 TC4 钛合金时, 存在一个极限出油量, 超过此出油量后, 刀具-切屑的平均摩擦系数变化不大, 刀具、切屑间摩擦性能的改善不再明显.
- 3) 随着钛合金 TC4 铣削速度的提高, 冷风干切削的平均摩擦系数持续增大, 而冷风油雾切削的平均摩擦系数变化不明显, 且远低于冷风干切削时的平均摩擦系数.
- 4) 油雾载体速度影响了切削区固-液两相流场的速度分布情况, 进而影响了冷却润滑效果. 对于润滑性能的提升而言, 油雾载体速度并非越高越好, 油雾载体速度和刀具转速存在一定的匹配关系, 使得润滑效果最优, 但其匹配机理还需要深入研究.

参考文献：

[1] COURBON C,PUSAVEC F,DUMONT F,et al. Tribological behaviour of Ti6Al4V and Inconel718 under dry and cryogenic conditions: Application to the context of machining with carbide tools[J]. Tribology International,2013, 66:72-82.

[2] DONG H,BELL T. Enhanced wear resistance of titanium surfaces by a new thermal oxidation treatment[J]. Wear, 2000,238(2):131-137.

[3] MOLINARI A,STRAFFELINI G,TESI B,et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy[J]. Wear, 1997,208(1/2):105-112.

[4] 杨颖. 低温冷风在绿色加工中应用的若干问题研究[D]. 重庆:重庆大学,2004:41-47.

[5] JAHARAH A,CHE H,SITI H,et al. Failure mode analysis of carbide cutting tools used for machining titanium alloy[J]. Ceramics International,2013,39(4):4449-4456.

[6] 姜峰. 不同冷却润滑条件 Ti6Al4V 高速加工机理研究[D]. 济南:山东大学,2009:35-49.

[7] ASIF I,HE Ning,IQBAL K,et al. Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method[J]. Journal of Materials Processing Technology,2008,199(1/2/3):379-390.

[8] RAHIM E A,SASAHARA H. A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys[J]. Tribology International,2011,44(3):309-317.

[9] HONG S Y,DING Yu-cheng,JEONG W. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2001,41(15):2271-2285.

[10] JIANG Feng,LI Jian-feng,RONG Yi-ming,et al. Study of cutting temperature in cold-air milling of Ti6Al4V alloy [C]//41st CIRP Conference on Manufacturing System. Tokyo:[s. n.],2008:371-376.

[11] YULE A,DUNKLEY J. Atomisation of melts for powder production and spray deposition[M]. Oxford:Clarendon Press,1994:30-58.

[12] TOSHIYUKI O,MASASHI Y,KAZUHIRO F. Air jet assisted machining of nickel-base superalloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2012,61:20-26.

Friction Behavior between Tool and Chip during TC4
Milling with Cold Air Oil Mist Lubricant

WANG Ning-chang¹, CHENG Xin¹, JIANG Feng¹, XIE Hong²

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Dong Fang Turbine Company Limited, Deyang 618000, China)

Abstract: Milling experiments of titanium alloy TC4 with cold air oil mist lubricant have been performed. The effect of the lubricant properties and its applying way on friction behavior between the cutting tool and the chip has been studied. The optimal lubrication effect takes place when the cold air oil mist nozzle is set in the idle stroke before cut-in process. When the spray quantity is up to some value (about 12 mL · h⁻¹ in this study), the average friction coefficient between cutting tool and chip has no obvious change. Average friction coefficient increases with the increasing milling speed of the titanium alloy TC4 in the cold air dry cutting, while the average friction coefficient does not change obviously in the cold air oil mist cutting, and it is far lower than the average friction coefficient in the cold air dry cutting. The results show that there is a certain relationship between the spray speed and the milling speed, which makes an optimal lubrication.

Keywords: titanium alloy; milling; cold air oil mist; lubricant; friction coefficients; nozzles; spray quantity

(责任编辑：钱筠 英文审校：杨建红)