

# 涂层硬质合金立铣刀切削TC4 仿真研究\*

Numerical Analysis of Machining TC4 With Coated Cemented Carbide End Mills

山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室 林琪 刘战强  
株洲钻石切削刀具股份有限公司 黄威武 汤爱民 王社权  
湖南大学机械与运载工程学院 肖思来



林琪

山东大学机械工程学院在读硕士,主要从事高速高效切削加工方面的研究。

TC4 是典型的  $\alpha-\beta$  钛合金,具有力学性能好、比强度高、高温低温性能优良、抗腐蚀性能优异等突出特点,已在航空航天、汽车、船舶制造、

\* 山东省自然科学杰出青年基金(JQ200918)、  
“高档数控机床与基础制造装备”科技重大  
专项(2010ZX04017-012、2011ZX04016-031、  
2009ZX04012-031)资助。

选择合理的刀具涂层材料及涂层厚度可有效克服干切削中刀-屑接触面摩擦和切削温度增加的缺点,是提高钛合金加工效率的有效途径。

生物学等领域得到广泛应用。但是从切削加工性能看,TC4 低的热传导率、高的切削温度使得刀具磨损加快、刀具寿命缩短、加工效率降低。研究表明加工时加入切削液可提高刀具使用寿命<sup>[1]</sup>,但是使用切削液会增加加工成本,加重环境污染<sup>[2]</sup>,因此常采用干切削加工方式。选择合理的刀具涂层材料及涂层厚度可有效克服干切削中刀-屑接触面摩擦和切削温度增加的缺点,是提高钛合金加工效率的有效途径。

刀具涂层工艺主要采用 PVD 或 CVD 2 种技术。常用的涂层材料包括 TiN、TiCN、TiAlN 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。很多学者通过切削试验或有限元仿真研究了涂层对刀具切削性能的影响。张士军<sup>[3]</sup>采用解析方法揭示了涂层材料及涂层厚度对刀具切削温度的影响规律,计算结果表明涂层材料

的热传导率越小、涂层厚度越大,涂层刀具的切削温度就越低。T. Ozel 等<sup>[4]</sup>采用切削试验及三维有限元仿真方法研究了未涂层、TiAlN 涂层及 TiAlN/CBN 涂层硬质合金刀具对 TC4 加工时的切削力、切削温度及刀具磨损的影响,研究发现 TiAlN 涂层刀具的切削性能最佳。M. Nouari 等<sup>[2]</sup>采用切削试验方法研究了未涂层和多层涂层(TiC、TiN 及 TiCN 交替涂层,9 层共 10 $\mu$ m 厚)硬质合金刀具干切削钛合金时的刀具寿命和加工表面质量,得到了刀具使用寿命最长时的切削速度范围,同时使用有限元分析法模拟了 2 种刀具加工钛合金时的切削温度分布云图。Irfan 等<sup>[5]</sup>采用未涂层及不同涂层材料(TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)刀具切削加工时的切削力、切削温度,结果显示 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层刀具的切削温度

最低。

本文首先利用有限元分析软件 AdvantEdge 建立立铣刀三维铣削模型,然后将铣削 TC4 试验得到的切削力与有限元模拟结果对比以验证三维铣削模型的正确性,最后通过有限元分析硬质合金立铣刀的涂层厚度(1 $\mu\text{m}$ 、2 $\mu\text{m}$ 、2.5 $\mu\text{m}$ 、3 $\mu\text{m}$ 、4 $\mu\text{m}$ )及涂层材料对刀具切削温度、切削力及单位切削能的影响规律。涂层材料分为 5 种:未涂层、TiAlN(4 $\mu\text{m}$ )、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4 $\mu\text{m}$ )、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN(2 $\mu\text{m}$ /2 $\mu\text{m}$ )、TiAlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN(2 $\mu\text{m}$ /1 $\mu\text{m}$ /1 $\mu\text{m}$ ),编号依次为 I、II、III、IV、V。

## 立铣刀三维铣削有限元模型及试验验证

### 1 TC4 材料本构模型

有限元分析中,在高应变率条件下输入精确的材料流动应力模型是描述工件材料本构行为的有效方法<sup>[6]</sup>。工件材料的流动应力通常定义为应变、应变率和温度的函数。AdvantEdge 软件中本构方程的幂指数材料模型如式(1)所示:

$$\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T) = g(\varepsilon^p) \cdot \Gamma(\dot{\varepsilon}) \cdot \Theta(T), \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon^p$  是塑性应变,  $g(\varepsilon^p)$  是应变硬化函数;  $\dot{\varepsilon}$  是应变率,  $\Gamma(\dot{\varepsilon})$  是应变率敏感系数;  $T$  是温度,  $\Theta(T)$  是热软化系数,本文仿真时采用 AdvantEdge 软件材料库中有关 TC4 的本构方程系数。

工件材料 TC4 钛合金的化学成分如表 1 所示。工件材料 TC4 钛合金的物理性质包括:弹性模量  $E=114\text{GPa}$ ,热传导率  $\lambda=7.05\sim 16.24\text{W/m}\cdot\text{C}$ ,比热容  $C_p=2.27\sim 3.81\text{J/mm}^2\cdot\text{C}$ ,泊松比  $\nu=0.34$ ,密度  $\rho=4428\text{kg/m}^3$ ,热扩散系数  $\alpha=9.6\times 10^{-6}/\text{C}$ <sup>[4,6]</sup>。

试验采用刀具涂覆 TiAlN 涂层,且厚度为 5 $\mu\text{m}$ ,TiAlN 的热传导率如表 2 所示,弹性模量  $E=380\text{GPa}$ ,微硬度为 3300HV。

### 2 立铣刀三维铣削有限元模型

使用有限元分析软件 AdvantEdge 模拟分析立铣刀三维铣削钛合金 TC4 的加工过程。边界条件定义为刀具绕 Z 轴的旋转运动和直线进给运动,使用拉格朗日方法进行计算。采用网格重划分、自适应网格技术及网格收敛技术以获得最优的网格(图 1)。刀具及工件的网格类型均为 4 节点 12 自由度的四面体单元。工件的最大及最小单元尺寸分别为 2mm、0.15mm,刀具的最大及最小单

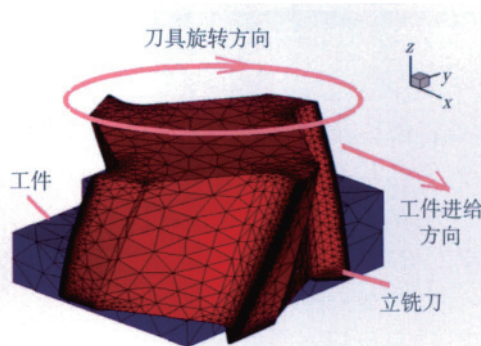


图1 立铣刀铣削模型及有限元网格划分

元尺寸分别为 1mm、0.1mm。

### 3 铣削试验验证

有限元软件的分析精度很大程度上依赖于所建立的三维模型及使用的材料本构模型的准确性和精确性。本文通过将试验所得切削力与仿真分析所得切削力对比以验证所建立的三维模型及材料本构模型的准确性和精确性,即有限元仿真分析的有效性。铣削试验采用 DAEWOO ACE-V500 立式加工中心,最高转速为 10000r/min,功率为 15kW;使用 Kistler-9275 A 测力仪测量铣削过程切削力;使用的刀具为整体硬质立铣刀,刀具参数及切削参数见表 3、表 4。

仿真中刀具几何参数如表 3 所示,设置刀具绕 Z 轴旋转 720°,模拟切削时间 0.06s,试验与模拟得到的 X、Y、Z 方向切削力对比如图 2 所示。图中各项目的切削条件如下:

表1 TC4的化学成分(质量分数) %

| Al   | Cu    | Fe   | Mn  | N    | Ni    | O    | S     | Si   | V    | Zn    |
|------|-------|------|-----|------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 5.75 | 0.044 | 0.01 | 0.2 | 0.01 | 0.025 | 0.02 | 0.001 | 0.03 | 4.33 | 0.005 |

表2 涂层材料的热性质<sup>[4,5,7]</sup>

| 涂层材料   | WC/Co(未涂层)                   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiN                           | TiAlN                           |
|--|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 涂层厚度/ $\mu\text{m}$                                    | -                            | 1~4                            | 1                             | 1~4                             |
| 热传导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$ | 30(30 $^{\circ}\text{C}$ )   | 33(50 $^{\circ}\text{C}$ )     | 20(40 $^{\circ}\text{C}$ )    | 12.27(40 $^{\circ}\text{C}$ )   |
|  | 32(100 $^{\circ}\text{C}$ )  | 28(90 $^{\circ}\text{C}$ )     | 21(100 $^{\circ}\text{C}$ )   | 12.76(100 $^{\circ}\text{C}$ )  |
|  | 34(300 $^{\circ}\text{C}$ )  | 19(300 $^{\circ}\text{C}$ )    | 22(300 $^{\circ}\text{C}$ )   | 14.38(300 $^{\circ}\text{C}$ )  |
|  | 37(500 $^{\circ}\text{C}$ )  | 13(500 $^{\circ}\text{C}$ )    | 23.5(500 $^{\circ}\text{C}$ ) | 16(500 $^{\circ}\text{C}$ )     |
|  | 44(1000 $^{\circ}\text{C}$ ) | 7(1000 $^{\circ}\text{C}$ )    | 26(1000 $^{\circ}\text{C}$ )  | 20.05(1000 $^{\circ}\text{C}$ ) |

表3 整体硬质合金立铣刀参数

| 刀具型号                    | 齿数/齿 | 螺旋角/ $(^{\circ})$ | 基体材料     | 涂层    |
|-------------------------|------|-------------------|----------|-------|
| KENNA F4AS1000AWL38R100 | 4    | 38                | 硬质合金 K30 | TiAlN |

表4 切削参数

| 切削速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ | 每齿进给量 $f_z/(\text{mm}\cdot\text{Z}^{-1})$ | 径向切削深度 $a_e/\text{mm}$ | 轴向切削深度 $a_p/\text{mm}$ | 铣削方式  |
|---|---|------------------------|------------------------|-------|
| 60,90                                   | 0.05,0.1,0.15                             | 2,3                    | 1,3,5                  | 干式、顺铣 |

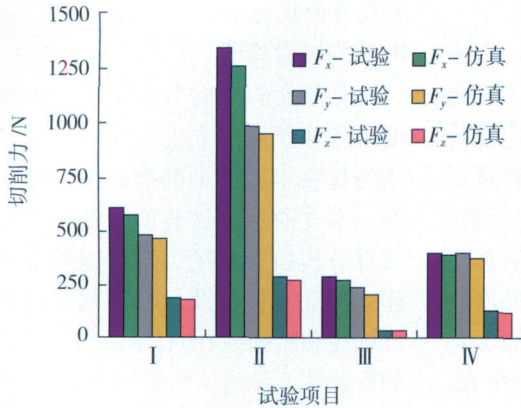


图2 试验与仿真切削力结果

表5 切削条件设置

| 切削速度 / (m·min <sup>-1</sup> ) | 每齿进给量 / (mm·Z <sup>-1</sup> ) | 径向切削深度 /mm | 轴向切削深度 /mm | 铣削方式  |
|-------------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------|
| 60                            | 0.1                           | 2          | 5          | 干式、顺铣 |

I:  $v=60\text{m/min}$ ,  $f_z=0.1\text{mm/Z}$ ,  $a_e=2\text{mm}$ ,  $a_p=3\text{mm}$ ;

II:  $v=60\text{m/min}$ ,  $f_z=0.15\text{mm/Z}$ ,  $a_e=3\text{mm}$ ,  $a_p=5\text{mm}$ ;

III:  $v=90\text{m/min}$ ,  $f_z=0.05\text{mm/Z}$ ,  $a_e=3\text{mm}$ ,  $a_p=5\text{mm}$ ;

IV:  $v=90\text{m/min}$ ,  $f_z=0.15\text{mm/Z}$ ,  $a_e=2\text{mm}$ ,  $a_p=1\text{mm}$ 。

由图2可知,试验测得的切削力与仿真分析得到切削力具有相同的变化趋势:切削速度为90m/min时的各向切削力明显小于切削速度为60m/min时的各向切削力;切削速度相同时,各向切削力随每齿进给量、切削深度的增加而升高。铣削条件相同时,试验与仿真得到的X、Y、Z方向切削力最大误差分别为7%、14%、14%,试验结果与仿真结果吻合良好,验证了立铣刀三维铣削有限元模型的正确性。

### 涂层厚度及涂层材料三维铣削有限元仿真模型

我们通过建立三维铣削有限元模型研究涂层材料及其涂层厚度(未涂层、TiAlN (4 $\mu\text{m}$ )、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4 $\mu\text{m}$ )、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (2 $\mu\text{m}$ /2 $\mu\text{m}$ )、TiAlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (2 $\mu\text{m}$ /1 $\mu\text{m}$ /1 $\mu\text{m}$ ))对硬质合金立铣刀加工TC4时的切削力、切削

温度及单位切削能的影响。涂层材料的热传导率如表2所示。模型中,刀具直径为10mm,齿数为4,径向前角为10°,螺旋角为30°,径向后角为12°,轴向后角为1.5°,切削参数设置如表5所示。

## 结果与讨论

单位切削能是去除单

位体积工件材料消耗的总能量。当采用单位切削能作为判断切削加工性能的指标时,单位切削能越高意味着切削性能越低<sup>[8]</sup>。

立铣刀铣削过程中,由于铣削厚度随着刀具旋转角度的变化而变化(图3),因此单位切削能不能直接用切削力与切削面积的商直接表征。W. Polini等<sup>[9]</sup>认为单位切削能是切向切削力的函数,单位切削能可由式(2)得到:

$$E_c = \frac{F_c \cdot v_t}{v_a \cdot a_p \cdot a_e} \quad (2)$$

式中, $E_c$ 是单位切削能, $F_c$ 是切向切削力, $v_t$ 是切削速度, $v_a$ 是每齿进给速度, $a_p$ 是轴向切削深度, $a_e$ 是径向切削深度。

根据图3所示的几何关系,切向切削力及法向切削力可由式(3)计算得出:

$$\begin{aligned} F_c &= F_r \sin \delta \\ F_t &= F_r \cos \delta \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$\delta = \tan^{-1}(F_y/F_x) - \frac{1}{2} \cos^{-1}(1-2a_p/D),$$

$F_x$ 、 $F_y$ 分别是x、y方向切削力, $D$ 是刀具直径; $F_c$ 是切向切削力; $F_t$ 是法向切削力; $F_r$ 是切削合力。

### 1 涂层厚度对切削力、单位切削能及刀具切削温度的影响

在相同的刀具几何参数和切削用量条件下,采用不同涂层厚度立铣刀切削TC4时刀具切削温度、切削力及单位切削能的模拟分析结果分别如图4~图6所示。

由图4可知,涂层刀具的切削温度小于未涂层刀具,且随着涂层厚度的增加刀具切削温度逐渐降低。这表明涂层具有热障作用,其较低的热

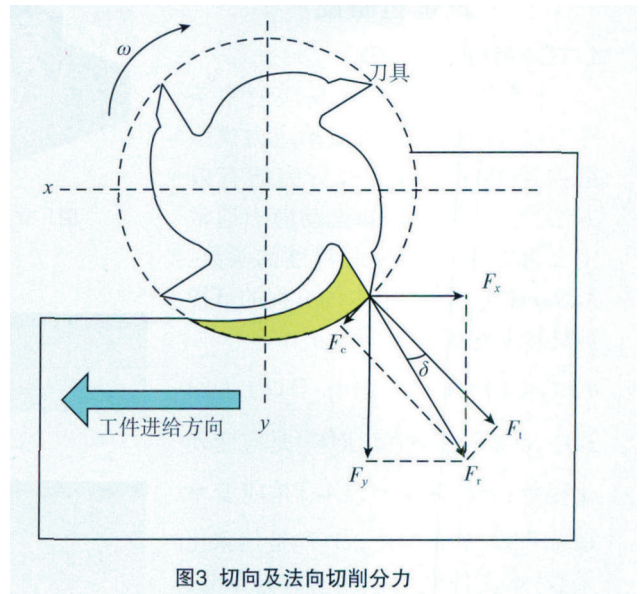


图3 切向及法向切削分力

传导率可阻止热量流向刀具。张士军<sup>[3]</sup>研究表明涂层材料的厚度越大,前刀面温度越高,进而由切屑带走的热量更多。因此涂层越厚,传入刀具的热量越少,刀具切削温度越低。

由图5可知,未涂层刀具的各向切削分力均大于涂层刀具,且切削力随涂层厚度的增加先略微增加后保持稳定,说明涂层厚度对切削力影响较小。由图6可知未涂层刀具的单位切削能最小,单位切削能随涂层厚度增加而增加。这是由于随涂层厚度增加,刀具切削温度降低,而传入

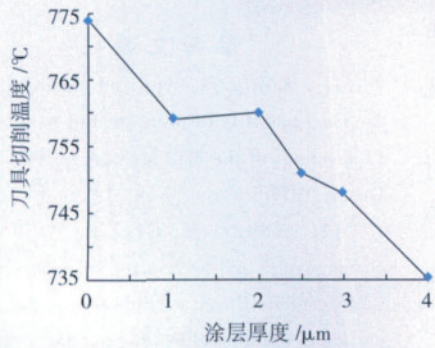


图4 涂层厚度对刀具切削温度的影响(WC/Co+TiAlN)

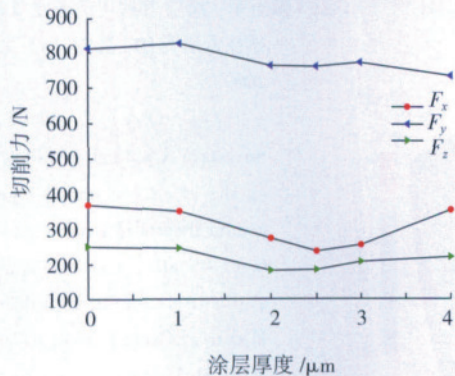


图5 涂层厚度对切削力的影响(WC/Co+TiAlN)

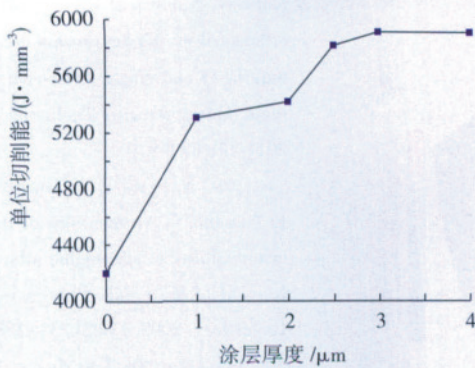


图6 涂层厚度对单位切削能的影响(WC/Co+TiAlN)

工件的热量增多, TC4 软化粘结在前刀面形成积屑瘤, 使切削刃不再锋利, 切削变得困难, 单位切削能增加。

由以上分析可知, 不同涂层厚度涂层刀具的切削温度、各向切削分力均小于未涂层刀具, 因此, 相同切削条件下应用涂层刀具可以提高刀具耐用度。随着涂层厚度的增加, 各向切削分力基本不变、切削温度降低、单位切削能增加, 因此采用合适涂层厚度的涂层刀具可以获得良好的切削加工性能。

## 2 涂层材料对切削力、单位

### 切削能及刀具切削温度的影响

在相同的刀具几何参数和切削用量条件下, 采用不同涂层材料立铣刀切削 TC4 时的切削温度、切削力及单位切削能的模拟分析结果分别如图 7 ~ 图 9 所示, 其中, I 为未涂层; II 为 TiAlN; III 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; IV 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN; V 为 TiAlN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN。图 7 中的切削温度为刀具切削温度分布中的最高温度。

由图 7 可知, 各种涂层材料涂层刀具的切削温度均低于未涂层刀具, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的刀具切削温度最低。这是因为: 切削加工中产生的热量一部分传到工件, 一部分被切屑带走, 一部分传入刀具, 刀具基体材料 WC/Co 的热传导率最大, 因此相同切削条件下传入到未涂层刀具的热量

最大, 导致未涂层刀具的切削温度最高。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的热传导率随温度升高而降低, WC/Co、TiN、TiAlN 的热传导率均随温度升高而增大(表 3), 相同条件下温度越高, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的低热传导率表现越明显。相同切削条件下由于, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的热传导性质导致传入切屑和工件的热量增多, 传导到刀具的热量减少, 因此 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂

层刀具的温度最低。

有限元分析模型预测的刀具切削温度分布如图 10 所示, 刀尖处温度最高, 垂直于刀尖方向温度梯度减小, 因此在基体材料 WC/Co 上涂覆热传导率低的涂层材料可以降低刀具切削温度, 提高刀具使用寿命。

由图 8 可知, 未涂层刀具的切削力最大, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层刀具的切削力最小。这是由于同等条件下基体材料 WC/Co 的热传导率最高, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的热传导率较低且随温度升高降低, 相同切削条件下使用未涂层刀具传入到工件的热量最少, 而使用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层刀具传入到工件的热量最大, 随着切削的进行使用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层

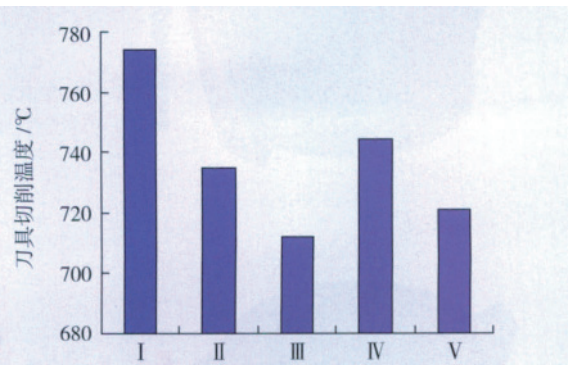


图7 涂层材料对刀具切削温度的影响

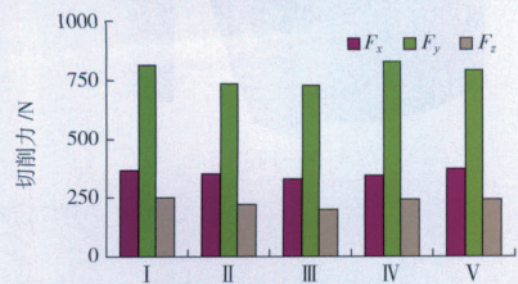


图8 涂层材料对切削力的影响

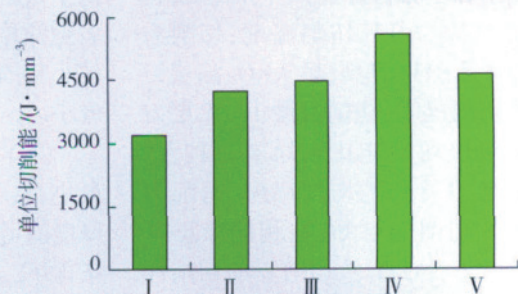


图9 涂层材料对单位切削能的影响

刀具切削工件首先发生软化且软化程度最高,因而更容易切削,切削力最小。

由图9可以看出,单层涂层( $TiAlN$ 、 $Al_2O_3$ )及3层涂层( $TiAlN+Al_2O_3+TiN$ )刀具的单位切削能值近似,未涂层刀具单位切削能最小,这是由于刀具上的涂层使刀具切削刃的圆弧半径增加,刀具不再锋利,从而导致切削变得困难,单位切削能增大。单层涂层、2层涂层与

### 结论

本文建立了硬质合金立铣刀切削TC4钛合金三维铣削有限元模型,研究了涂层材料及涂层厚度变化对刀具切削温度、切削力及单位切削能的影响,得到以下结论:

(1) 涂层刀具的切削温度均低于未涂层刀具;相同涂层材料,涂层厚度越大,刀具切削温度越低;不同涂层材料,热传导率越小,刀具切削

### 参考文献

[1] König. W. Applied research on the machinability of titanium and its alloys. Proceedings of the 47th Meeting of AGARD, London, 1979.

[2] Nouari M, Ginting A. Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy. Surface and Coating Technology, 2006(200): 5663-5676.

[3] 张士军. 涂层刀具切削温度及其测试技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.

[4] Özel T, Sima M, Srivastava A K, et al. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations. Manufacturing Technology, 2010(59):77-82.

[5] Uzun İrfan, Aslantas Kubilay. Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools. Manufacturing Technology, 2011(54): 899-910.

[6] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2):233-253.

[7] Rao R, Dandekar C R, Shin Y C. An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool performance and surface integrity. Journal of Materials Processing Technology, 2011(211): 294-304.

[8] Bayoumi A E, Yucasan G, Hutton D V. On the closed form mechanistic modeling of milling: Specific cutting energy, torque, and power. Journal of Materials Engineering and Performance, 1994, 3(1): 151-158.

[9] Polini W, Turchetta S. Force and specific energy in stone cutting by diamond mill. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(11):1189-1196.

(责编 夏宛)

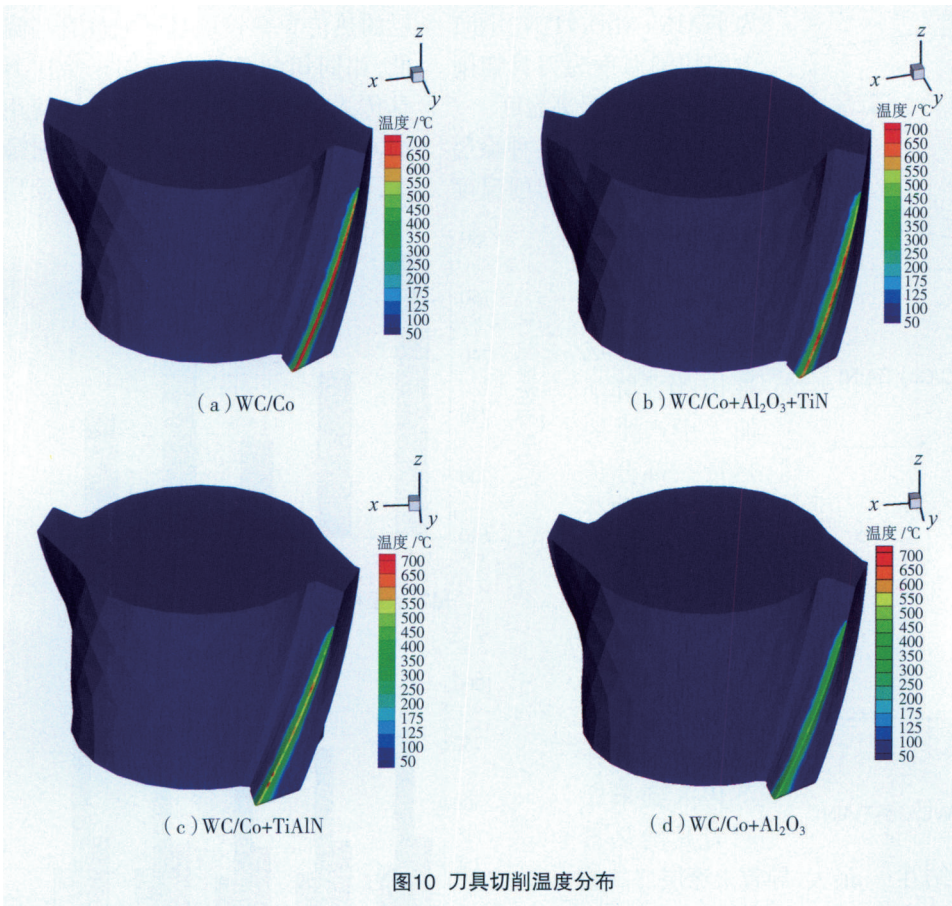


图10 刀具切削温度分布

未涂层刀具的单位切削能分别相差26%、28%。

由以上分析可知,不同涂层材料涂层刀具的刀具切削温度、切削力均小于未涂层刀具,且 $Al_2O_3$ 涂层刀具的切削温度、切削力最小;涂层刀具的单位切削能比未涂层刀具大。综合考虑刀具的切削温度、切削力和单位切削能可知,在相同涂层厚度条件下, $Al_2O_3$ 涂层刀具的切削性能最优。

温度越低。

(2) 涂层刀具的各向切削力均低于未涂层刀具。X、Y、Z方向切削力随涂层厚度及涂层材料的改变在较小范围内变化,涂层对切削力影响较小。

(3) 未涂层刀具的单位切削能最小,涂层刀具的单位切削能随涂层厚度的增加而增加,在相同涂层厚度条件下, $Al_2O_3$ 涂层刀具的切削性能最优。