

6005A 铝合金高速铣削加工 数值模拟研究

Numerical Simulation Study on High-Speed Milling for 6005A Aluminum Alloy

大连交通大学机械工程学院 王 春 苏 彬 汤武初
唐山轨道客车有限责任公司 程 浩



王 春

大连交通大学机械工程学院副教授,主要研究方向为数控及数字化技术与系统、复杂曲面测量与加工。已发表论文 17 篇。

目前,国内对于 6005A 铝合金大型薄壁中空结构件的高速数控加工存在诸多问题,如数控加工效率较低、刀具损耗大、铣削速度较高时出现崩刃、打筋等,这些问题严重影响了企业生产效益。因此,研究 6005A 铝合金的高速铣削加工机理,以解决生产中出现的现实

意义。目前,国内对于 6005A 铝合金大型薄壁中空结构件的高速数控加工存在诸多问题,如数控加工效率较低、刀具损耗大、铣削速度较高时出现崩刃、打筋等,这些问题严重影响了企业生产效益。因此,研究 6005A 铝合金的高速铣削加工机理,以解决生产中出现的现实意义。

意义。

在铣削加工过程中,切削力决定切削热的产生,并影响刀具使用寿命、加工精度和加工表面质量,研究切削力的规律和计算方法有助于分析铣削机理。解析法和实验法是研究切削力的主要方法,但随着计算机技术的发展,有限元数值模拟方法为研究切削过程中的切削力提供了新的方法。国内外学者在二维、三维正交切削数值模拟方面做了很多的工作,取得了丰硕的成果^[1-3],然而针对 6005A 铝合金的高速数控铣削加工的研究还未见报道。因此本课题采用三维斜角切削数值模拟的方法,对 6005A 铝合金高速铣削过程中的切削力变化规律进行探讨,为优选和优

化高速铣削 6005A 铝合金结构件的刀具几何参数提供依据。

6005A 铝合金材料特性

6005A 合金是在 6005 合金的基础上发展的一种中等强度 Al-Mg-Si 系合金,具有优良的挤压性、焊接性和耐腐蚀性,广泛应用于地铁和巴士车体结构件、铁塔平台、管道设施等。6005A 铝合金的主要化学成分和材料基本性能参数如表 1 和表 2 所示。

有限元模型建立

1 热力耦合有限元控制方程

在金属切削加工时,随着刀具的进给,材料应力不断增加。当应力超出弹性范围时,材料发生塑性变形。

表1 6005A 铝合金的主要化学成分

%

牌号	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	其他	Al
6005A	0.5~0.9	0.4~0.7	0.35	0.30	0.50	0.30	0.20	0.10	1.50	余量

注: Cr+ Mn 在 0.12%~0.5% 之间。

表2 6005A基本性能参数

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	热导率/(w·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	热导系数/K	抗拉强度/Pa	屈服强度/Pa	比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
70	0.33	2710	188	2.4×10 ⁻⁵	297×10 ⁶	260×10 ⁶	890

塑性变形功和刀屑之间的摩擦功转变成热而引起温度的升高,从而由于温度的升高产生热应变。在不考虑弹性蠕变的情况下,弹塑性区域的总应变分量 $d\varepsilon$ 可以表示为:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_{el} + d\varepsilon_{pl} + d\varepsilon_T \quad (1)$$

式中, $d\varepsilon_{el}$ 为弹性应变增量; $d\varepsilon_{pl}$ 为塑性应变增量; $d\varepsilon_T$ 为热应变增量。

基于虚功原理和大应变、大变形理论,在不考虑体力的情况下,建立热-力耦合弹塑性控制方程^[4]:

$$\begin{aligned} &([K_{ep}] + [K_G])\{\dot{d}\} = \\ &\int [B_\varepsilon]^T [D_{ep}]\{\dot{\varepsilon}'\} dV - \\ &\int [B_\varepsilon]^T \{R_{\varepsilon T}\} dV + \{\dot{F}_0\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $[K_{ep}]$ 为弹塑性刚度矩阵; $[K_G]$ 为几何刚度矩阵; $\{\dot{d}\}$ 为节点速度; $\{R_{\varepsilon T}\}$ 为相对温度和等效应变率的变化率; $\{\dot{F}_0\}$ 为外部载荷的变化率,包括实际载荷变化率和由变形体形状改变引起的载荷变化率。

2 几何模型

车辆铝合金 6005A 是易切削但容易产生加工缺陷的材料,一般采用 2 或 3 齿的螺旋立铣刀进行高速数控铣削加工。立铣刀是双切削刃刀具,圆柱面上的切削刃是主切削刃,端面上的切削刃是副切削刃,一般情况下主、副切削刃同时参与材料去除。根据文献[5],铣削加工过程可以看作是沿切削刃许多微小斜角切削过程的综合作用。因此,本课题采用斜角切削模型对切削力进行分

析,更有助于铣削加工过程中刀具参数对切削力影响规律的理解,同时也简化了有限元数值计算模型。利用有限元软件本身所拥有的 3D 建模功能,分别建立刀具和工件的几何模型,并在装配模块下定义其装配关系。

3 材料模型

材料模型的正确定义是金属切削过程数值模拟成功的一个关键因素。有限元软件用一系列直线段连接给定的真实应力-应变数据对来形成连续的、分段线性的塑性曲线,可以用任意多的数据对来逼近实际

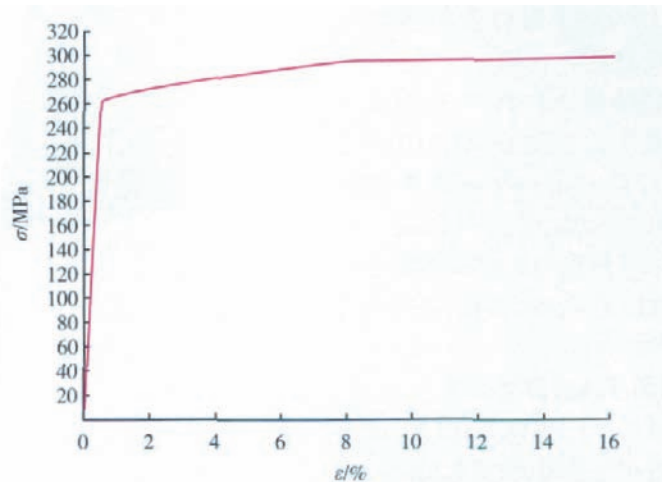


图1 6005A铝合金工程应力-应变曲线

表3 6005A铝合金材料的真实应力-应变

真实应变	真实应力/MPa	塑性应变	弹性应变
0	264.3264576	0	0.0037760600
0.0236286000	280.5513400	0.0196207300	0.0040079000
0.0411515402	295.3577345	0.0369321440	0.0042193962
0.0615935640	308.9980062	0.0571793068	0.0044257230
0.0772110090	319.8139335	0.0726422390	0.0045687705
0.1075082077	329.6516750	0.1027988980	0.0047093096
0.1235441861	336.7570300	0.1187333714	0.0048108147
0.1429741690	344.2640800	0.1380561107	0.0049180583
0.1500565962	346.7225790	0.1451034165	0.0049531797

的材料行为,从而可得到近似于真实材料的塑性行为。图1为通过拉伸试验得到的6005A铝合金的工程应力-应变曲线。

通过拉伸试验得到工程应力-应变数据,需要转换为真实应力-应变。真实应力-应变和工程应力-应变的转换关系为:

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}), \quad (3)$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{nom}). \quad (4)$$

式中, σ 为真实应力; σ_{nom} 为名义应力; ϵ 为真实应变; ϵ_{nom} 为名义应变。

试验数据中得出的应变为总体应变,因此将总体应变分解为弹性应变和塑性应变分量。弹性应变等于真实应力与杨氏模量的比值,则塑性应变等于总体应变减去弹性应变。表3为经过数据整理计算后得到的6005A铝合金的真实应力-应变数据。在有限元软件中,输入材料的塑性参数时,初始真实应变必须为0。通过在ABAQUS有限元软件包Property模块中选择Mechanical → Plasticity → Plastic,输入表3中所给出的6005A铝合金的真实塑性应力-应变数据,来描述实际的材料行为。

4 刀具切屑接触摩擦特性

金属切削过程即刀具与工件相互运动并相互作用,使切削层金属与工件母体金属分离开来。切削层金属在刀具刃口和前刀面的挤压、摩擦作用下发生剪切滑移变形和摩擦变形而形成切屑。前刀面和切屑的接触区域分为滑移区和黏结区。在黏结区,切削时产生的高温和高压使得切屑底层材料软化,切屑底层的金属材料黏嵌在前刀面上,实际上是金属内部的剪切滑移,刀屑接触点处的摩擦剪应力等于临界剪切流动应力^[6]。在滑移区服从库仑摩擦定律。刀屑摩擦特性表示为:

$$\tau = \begin{cases} \mu\sigma_n & (\sigma_n < \tau_p/\mu) \\ \tau_p & (\sigma_n \geq \tau_p/\mu) \end{cases} \quad (5)$$

式中, τ 为摩擦应力; τ_p 为材料的最大剪切应力; σ_n 为前刀面正应力; μ 为摩擦系数^[17]。

但是滑移区的摩擦系数是要通过分析刀具前面的应力分布情况计算出来,因此本课题采取平均摩擦系数的方法,把摩擦系数设置为0.3,最大剪应力设为205MPa。

5 网格划分

工件和刀具均采用8节点六面体热力耦合线性减缩积分单元C3D8RT进行网格划分,采用增强沙漏控制。为了提高数值模拟精度和减少计算机时,只对切屑层和刀尖处进行了网格细化。因为刀具和工件

的硬度相差很大,所以分析时视刀具为刚体,刀刃绝对锋利。工件共划分8280个单元,刀具共划分480个单元,有限元模型如图2所示,其中工件尺寸为5mm × 1mm × 1mm。

数值模拟结果及分析

利用ABAQUS有限元软件对车辆铝合金材料6005A高速铣削加工进行了数值模拟,模拟时刀具从图2所示位置开始切削,沿X方向做进给运动,边界条件如图2所示,约束工件底面6个自由度,刀具除X方向移动自由度外,其余全部受到约束。刀具材料选择硬质合金立铣刀,牌号为

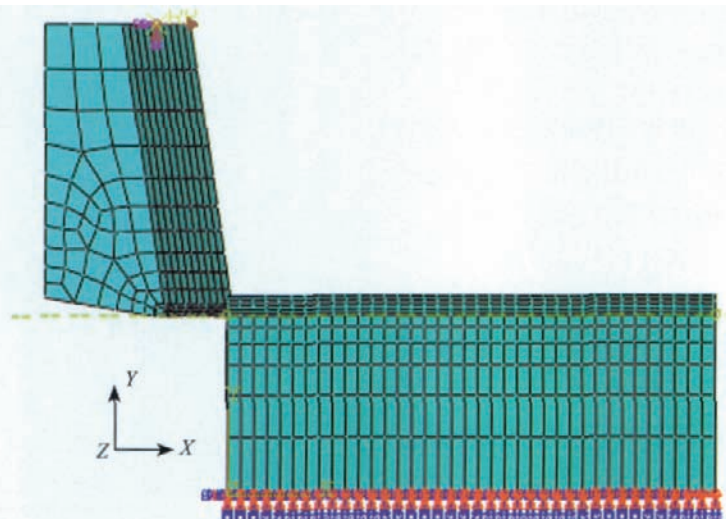


图2 斜角切削有限元模型

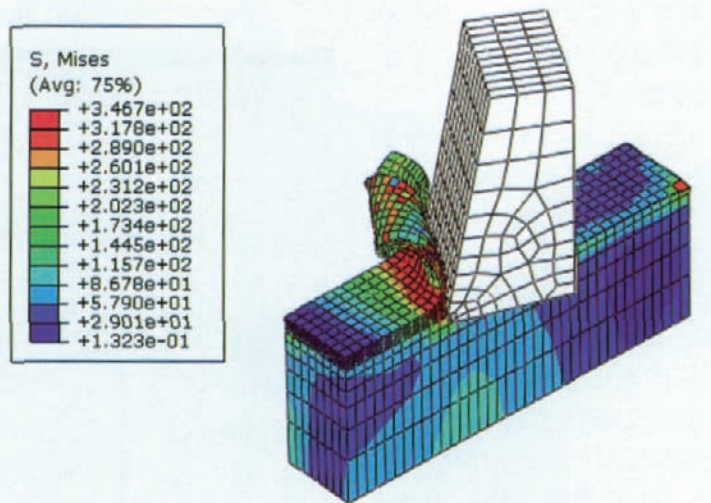


图3 切削过程中的Mises应力分布

表4 数值模拟条件

组别	前角/(°)	后角/(°)	圆角半径/mm	刃倾角
1	10, 12, 15, 18, 20	8	0.1	30
2	15	13	0.1	35, 30, 28, 25, 23, 20

K20,弹性模量为600GPa,泊松比为0.25。模拟采用的切削参数:进给速度为3m/min,切削深度为0.2mm,切削宽度为1mm。

在切削参数一定的情况下,模拟不同刀具前角和刃倾角情况下的斜角切削过程,分析刀具几何角度变化对切削力的影响。表4给出了2组模拟条件。在高速切削的条件下,刀具前角对切削过程的影响更大,因此在第一组的模拟条件中,变化刀具前角,后角和刃倾角为目前正在使用的刀具的参数一致。在第二组的模拟条件中,在高速铣削时,为了减小刀

具——工件之间的摩擦,综合考虑可以将后角选为12°以上,本课题选择13°进行模拟,分析刃倾角对切削力的影响^[8]。

图3是高速切削过程中Mises应力分布图,从中可以看出刀尖和工件接触区的Mises应力最大,最大值为346.7MPa。图4是第一组在改变刀具前角的条件下,仿真计算得到的切削力曲线。

从图4中可知,在同等切削条件下,随着刀具前角的增大,主切削力 F_x 逐渐减小,符合金属切削理论。在前角从10°增大20°时,主切削力

F_x 从92N减小到83N,大约减少了10%,这符合文献[8]中在高速切削条件下,前角每减少1°,则切削力约增加1%的结论。图中,在一开始进入切削时,切削力急剧增大,在0.02s时达到峰值,趋于稳定,进入平稳切削。在平稳切削阶段可以看出,切削力曲线呈锯齿状,主要是因为切削仿真过程中,切屑与工件母体单元分离瞬间所造成的切削力波动,另外在仿真过程中,切屑螺旋卷起之后与未加工区域的瞬间接触,也是造成切削力波动的主要原因之一。

图5是第二组模拟条件下得出的不同刃倾角下切削的切削力曲线。由图5的切削力曲线可以看出,主切削力 F_x 随着刀具刃倾角的变化变化很小,在稳定切削阶段,基本处于89N上下,而吃刀抗力 F_z 则随着刃倾角的减小而减小,由刃倾角为

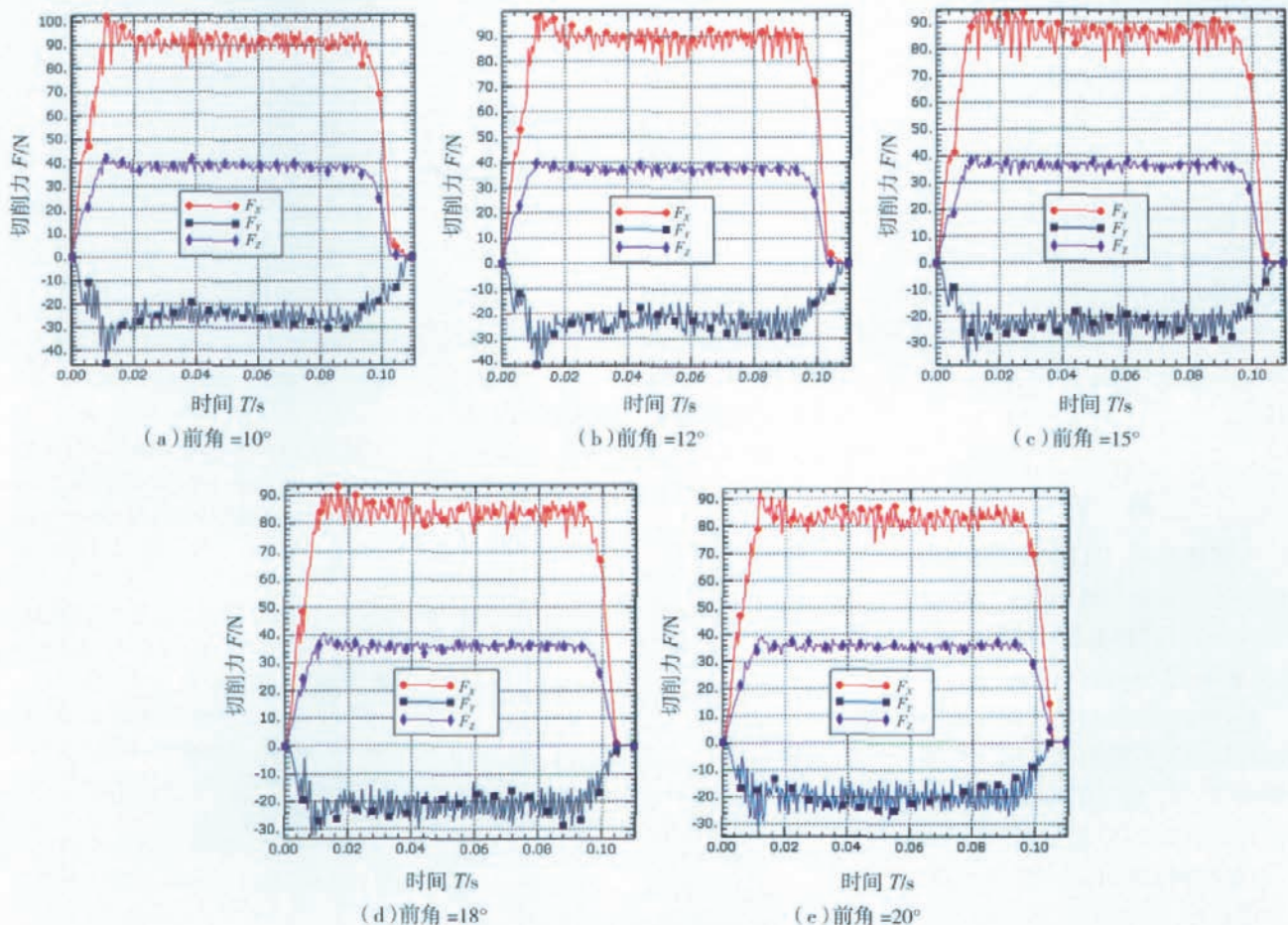


图4 不同前角下的切削力曲线图

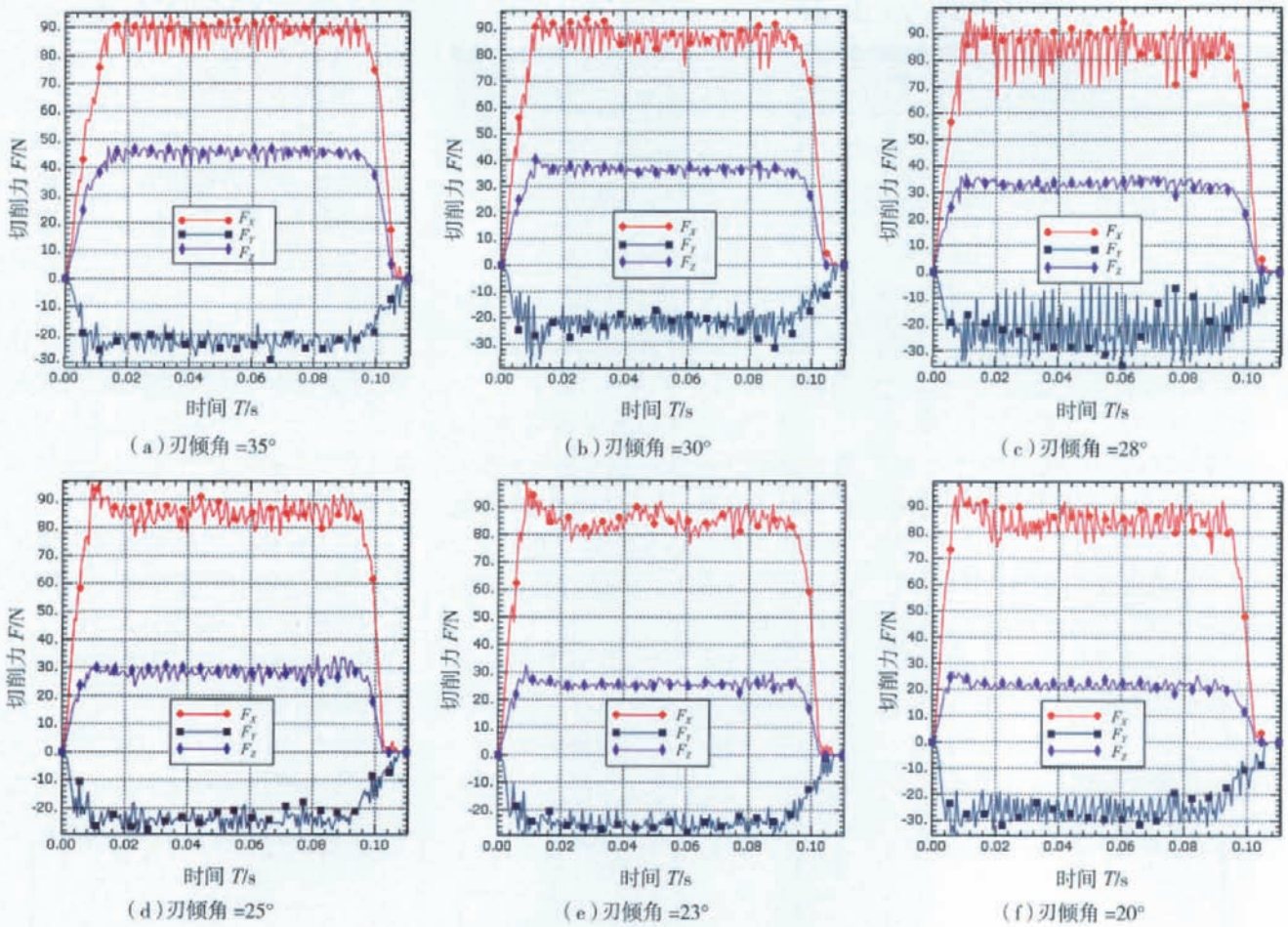


图5 不同刃倾角下的切削力曲线图

35° 时的 44N 减小到刃倾角为 20° 时的 22N。背向力 F_y 则随着刃倾角的减小没有吃刀抗力 F_z 变化那么明显,但也可以看出随着刃倾角的减小而增加的趋势,仿真结果符合金属切削理论。

结论

本课题分析了 6005A 铝合金的材料特性和加工性能,给出了其工程应力应变曲线并描述了材料塑性行为,为有限元分析提供基础。

通过把高速铣削过程简化,建立了斜角切削几何模型和有限元模型。该模型可以用来预测高速切削过程中不同刀具几何参数组合下的切削力,给高速数控铣削过程中的刀具选择提供依据。

在 6005A 铝合金高速铣削过程

中,刀具前角选择 12°~15° 时切削力较小;加工薄壁结构件时,刃倾角较大时,轴向切削力增大,容易对结构件的筋板造成冲击,出现打筋问题;刃倾角较小时,产生的切屑与未加工面接触,引起切削力波动,所以刃倾角选择 25° 左右较为合理。

有限元模拟分析结果为进行高速铣削加工 6005A 铝合金大型薄壁中空结构件的深入研究奠定了基础。

参考文献

[1] Iwata K, Osakada K, Terasaka Y, et al. Process modeling of orthogonal cutting by rigid-plastic finite element. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1984, 106 (2): 132-138.
 [2] Carroll J T, Strenkowski J S. Finite element models of orthogonal cutting with application to single point diamond turning. *Int. J. Mech.Sci.* 1988, 30:899-920.

[3] 方刚,曾攀. 切削加工过程数值模拟的研究进展. *力学进展*, 2001, 31 (3) 394-404.

[4] 唐志涛,刘战强,艾兴,等. 金属切削加工热弹塑性大变形有限元理论及关键技术研究. *中国机械工程*, 2007, 3, 18 (6): 746-750.

[5] Li Shui Jin, Zhou Yun Fei, Jin Ren Cheng, et al. Dynamic force modeling for a ball-end milling cutter based on the merchant oblique cutting Theory. *Int. J. Adv. Manuf. Technical*, 2001, 17:477-483.

[6] 李娜. 金属切削过程刀-屑接触区摩擦状态有限元分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学. 2008.

[7] Jos é L. Alcaraz, Idoia Lorenzo, Luis N. López de Lacalle. Thermo mechanical Analysis of a Chip Machining Process. *ABAQUS Users' Conference*, 2003.

[8] 于信汇,赵仲义,诸乃雄. 铝合金材料的超高速铣削. *机械工艺师*. 1994 (2): 9-12.

(责编 岩石)