

高速铣削淬硬钢的刀具破损试验及其力热耦合特性分析^①

刘广军^{②*} 谭光宇^{**} 胡海鹤^{*} 李广慧^{**}

(^{*} 同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

(^{**} 广东海洋大学工程学院 湛江 524005)

摘 要 针对高速铣削淬硬钢的刀具破损问题,进行了硬质合金立铣刀高速铣削 T10 淬硬模具钢的破损试验,通过观察发现刀具的破损形态为崩刃,并对刀具的破损机理进行了初步讨论。建立了刀具切削过程的力热耦合方程,分析了切削力、切削热和力热耦合对刀具的影响,详细讨论了力、热单一物理场及其耦合场对刀具结构及刀具破损的作用机理。分析结果表明,刀具失效机理为力冲击引起的破损失效,切削力是造成刀具破损的主要因素;机械应力的数值远远大于热应力数值,热力耦合的综合应力稍大于机械应力;机械变形、热变形和综合变形的数值接近;力热耦合作用下,存在复杂的应力和变形机理,综合应力与变形是拉应力、压应力等各种因素耦合作用的结果。

关键词 高速铣削, 淬硬钢, 铣刀, 破损, 力热耦合

0 引言

破损(fracture)是高速铣刀的主要失效形式之一,多发生在高速断续切削情况下。在高速铣削难加工材料过程中,刀具不仅受到切削力的冲击作用,同时也受到高周循环的热应力冲击作用,极易出现早期破损现象^[1]。高速铣刀的早期破损不同于磨损引起的后期破损,是典型的随机现象,严重影响工件表面加工质量、生产效率及生产安全,已成为影响自动化生产的重要问题^[2,3]。

高速铣削时,刀具在恶劣的断续切削条件下工作,切削温度及热应力对刀具磨损破损的影响会明显逐渐增大^[1]。刀具在高速切入切出过程中受到周期性的热应力和机械应力的冲击作用,热力耦合形成的不均匀应力场最终会导致刀具失效^[4]。尽管已有学者认识到力热耦合是引起高速刀具最终失效的深层原因,但当前关于力热耦合对刀具失效的作用机理还缺乏系统的研究与分析。同时,目前的高速铣削刀具破损研究多是针对后期破损,对刀具早期破损的试验和分析研究尚较少见有公开报道,对高速铣削难加工材料中的刀具破损问题研究也较少。同普通合金钢的加工过程相比,难加工材料的

高速铣削过程中刀具所受的切削力和切削热冲击更大^[5],刀具更易破损。因此,本研究面向高速铣刀的早期破损问题,采用 4 刃整体硬质合金立铣刀,进行了铣削 T10 淬硬模具钢的刀具破损试验,观察和讨论了刀具的破损形态与破损机理;分析了单一物理场作用和力热耦合作用对刀具的影响,对高速铣刀的力热耦合特性进行了分析和讨论。

1 高速铣削刀具破损试验

1.1 试验条件

在 XH714D 三轴加工中心上进行高速铣削的槽铣试验,采用测力仪采集铣削力,实验设备如图 1 所示。



图 1 实验设备图

① 国家自然科学基金(50975053, 51175096)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

② 男, 1979 年生, 博士, 副教授; 研究方向: 高速切削技术, 微机电系统; 联系人, E-mail: gjliu@126.com (收稿日期: 2011-09-14)

试验所用刀具为 4 刃整体硬质合金立铣刀,前角 $\gamma = 15^\circ$, 直径 $\phi = 10\text{mm}$ 。

工件材料为 T10 淬硬模具钢, 硬度为 40HRC, 工件尺寸为 $200\text{mm} \times 120\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。

铣削方式为干式顺铣, 采用的切削参数如表 1 所示。

表 1 试验中采用的切削参数

切削参数	数值
径向切深 a_e (mm)	2
轴向切深 a_p (mm)	0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5
切削速度 v_c (m/min)	74, 102, 136, 167, 202, 232
每齿进给量 f_z (mm)	0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14

1.2 刀具破损的宏观过程

刀具破损问题是概率事件, 需要做大样本的试验。在表 1 进行的各组试验中, 在其中一组试验中发现了刀具的早期破损现象, 其切削参数值如下: 轴向切深 $a_p = 0.5\text{mm}$, 切削速度 $v_c = 230\text{m/min}$, 每齿进给量 $f_z = 0.08\text{mm}$, 径向切深 $a_e = 2\text{mm}$ 。刀具破损后切削力将发生突变, 在上述切削条件下, 铣削试验进行约 69350 次循环后, 发现切削力产生突变, 因此判定刀具出现破损。停机后取下刀具观察, 发现切削刃出现较大的缺口, 即崩刃, 如图 2 所示。崩刃是刀具的脆性破损, 也是一种非正常的磨损现象, 也称作早期破损, 在较脆的刀具材料断续铣削情况下较为常见^[6]。

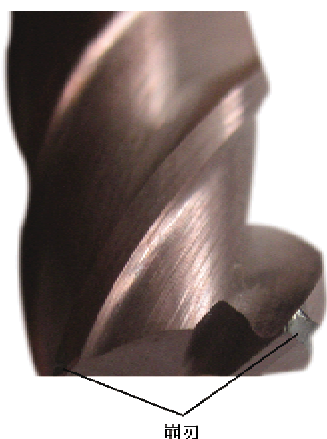


图 2 立铣刀前刀面崩刃

铣削是典型的断续切削, 刀具处在非稳态的温度场中, 由于切入切出对刀具的高频热冲击与拉、压交变应力的相互作用, 刚开始切削时在刀具前刀面会造成磨损, 产生较小的凹坑。随着切削的进行, 冲

击和拉、压交变应力的作用愈发明显, 造成刀具前刀面的部分剥落, 这样破损将不断继续, 进而使刀具崩刃甚至完全失效。

破损过程的特征是伴随着较大的铣削力波动和较高的切削温度, 根据相关文献^[7-9], 硬质合金刀具加工淬硬钢时, 刀屑接触区的瞬态温度超过 800°C , 力热的耦合冲击作用将最终导致刀具破损。研究高速铣削难加工材料时的力热耦合现象, 是揭示刀具破损机理、提高刀具加工性能的基础。

2 高速铣削刀具的力热耦合特性分析

2.1 刀具的力热耦合方程

在不考虑材料蠕变的情况下, 刀具弹塑性区域的总应变分量 $d\epsilon$ 可以表示为

$$d\epsilon = d\epsilon_e + d\epsilon_p + d\epsilon_\theta \quad (1)$$

式中, $d\epsilon_e$ 为弹性应变增量; $d\epsilon_p$ 为塑性应变增量; $d\epsilon_\theta$ 为热应变增量。式(1)表示刀具的变形考虑切削力和切削温度的综合作用。

高速铣削过程的热-弹塑性本构方程为^[10]

$$d\sigma = [D_\varphi](d\epsilon - d\epsilon_\theta) + \frac{[D_e] \frac{\partial f}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial R}{\partial \dot{\epsilon}} d\dot{\epsilon} + \frac{\partial R}{\partial T} dT \right)}{H' + \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T [D_e] \frac{\partial f}{\partial \sigma}} \quad (2)$$

式中, σ 为应力; D_φ 为弹塑性矩阵; D_e 为弹性矩阵; f 为塑性势; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; R 为屈服面的幅值; T 为瞬时温度, 且有 $T = T(x, y, z, t)$, 其中 x, y, z, t 分别为 X, Y, Z 方向的坐标和时间; H' 为应变硬化率。

基于虚功原理和大变形理论, 建立金属切削加工过程的热-弹塑性控制方程为^[10,11]

$$(K_\varphi + K_G) \{\dot{d}\} = \int_V [D_\varphi] \{\dot{\epsilon}\} dV - \int_V [B_e] \{\dot{R}_{\bar{T}}\} dV - \{\dot{F}_0\} \quad (3)$$

式中, K_φ 为弹塑性刚度矩阵; K_G 为几何刚度矩阵; $\dot{d}$ 为节点速度; B_e 为应变转换矩阵; $\dot{R}_{\bar{T}}$ 是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。

2.2 刀具的力热耦合特性分析

根据试验所用铣刀的几何尺寸, 建立铣刀的三维模型, 采用有限元方法分析刀具破损时的力热耦合特性, 并做如下假设:

- (1) 刀具材料的物理特性是均匀的;
- (2) 切削的初始温度为室温, 此处为 20°C ;
- (3) 刀具力热耦合特性分析是针对每一个切

入、切出达到稳定状态后的分析;

(4) 刀具一旦切出工件,就处于空气冷却状态。

图3为铣刀结构示意图,图中用A、B、C、D表示铣刀表面的不同区域,以区分不同的边界条件:A为铣刀的螺旋面,B为铣刀上部表面,C为切削区,D为辅助结构。铣刀在切入时,铣刀上部B被夹紧,与空气绝缘;螺旋面A和辅助区D绝大多数面积暴露于空气中,切削区C则与工件、切屑紧密接触。铣刀在切出时,C与空气发生对流换热,迅速冷却。铣刀切入时边界条件如下:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n_i} = \alpha_i(T - T_0) & (\text{面 A}) \\ T = T_0 & (\text{面 B 和 D}) \\ T = f(t) & (\text{面 C}) \end{cases} \quad (4)$$

以铣刀刚切入工件时刀具表面最高温度为初始条件,温度随时间近似看作线性关系变化,对有限元模型施加动态温度载荷,然后进行求解后处理,获得铣刀的瞬态温度场。

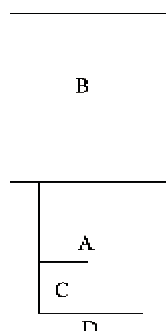


图3 铣刀结构示意图

在有限元分析中,单元类型的选择将直接影响到网格划分和计算精度。本文结构分析选用单元类型为ANSYS的SOLID95,热分析选择与SOLID95单元对应的单元SOLID90。SOLID95和SOLID90单元类型能够容许不规则形状而精度没有损失,其偏移形状的兼容性较好,特别适合边界为曲线的模型;单元由20个节点定义,每个节点有三个自由度^[12]。从精度角度看,20节点单元要比4节点单元和8节点单元精度高得多,而在相同精度的条件下,使用20节点单元所用的节点数目要比另外两种单元少得多。此外,SOLID95单元有塑性、蠕变、应力刚度、大变形以及大应变能力。所以20节点六面体单元SOLID95和SOLID90保证了求解精度又减少了单元数量,同时还能满足实际求解情况,在金属切削仿真中应用较为广泛^[13-16]。

3 分析结果与讨论

3.1 刀体的机械应力与变形

对刀具刀屑接触部分加载动态切削力和相应的边界条件,进行有限元分析,得到从切入到切出过程刀屑接触区某点的机械应力变化如图4所示。当刀具切入工件后,刀尖处应力由200 MPa迅速上升到800 MPa,随着切削的进一步深入,切削趋于稳态。在切出之前,切屑已接近分离工件,此时刀具受力减小,应力开始大幅下降,直至切出,然后进入下一个切削循环。

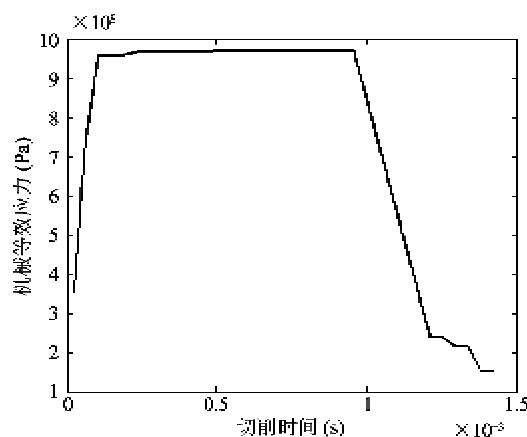


图4 机械应力-时间变化图

由图4可见,切削达到稳态后,机械应力也达到最大并处于相对稳定的状态,取稳态切削时的刀具应力分布和变形分别图5和如图6所示。

由图5和图6可见,稳态时的最大应力达到了971 MPa,最大应力值出现于主切削刃附近,小于刀具材料的强度。但高速铣削加工属于断续加工,刀具反复受到高频应力作用,较强的冲击应力极易造成刀具破损。同时,如果频繁的切入-切出过程使应力达到疲劳极限,也将导致切削刃的疲劳破损。稳

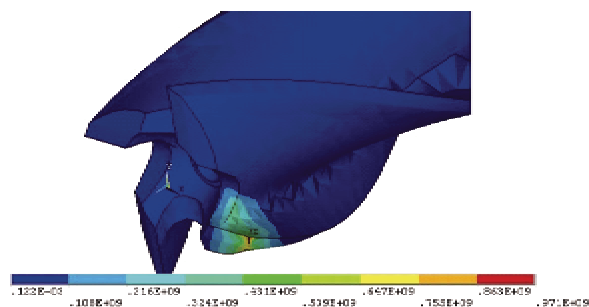


图5 稳态时的机械应力分布(单位:Pa)

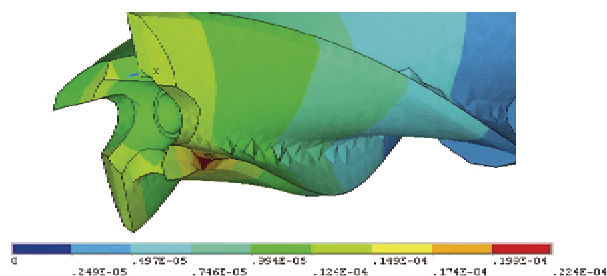


图 6 稳态时的机械变形(单位: μm)

态切削时的刀具机械变形最大达 $22.4\mu\text{m}$, 最大变形出现在刀尖处, 总体上看变形分布较均匀。试验中所用硬质合金刀具材料的抗弯强度为 1500MPa , 其抗拉强度为抗弯强度的 $0.6 \sim 0.7$ 倍, 即 $900 \sim 1050\text{MPa}$ 。由分析结果可以看到, 机械应力的幅值已经接近抗拉强度最大值。

3.2 刀体的温度分布与热应力、热变形

铣削中的温度是一个上升过程, 切削温度随着切削的进行而不断升高, 并在切出之前达到最大值, 此时的热变形和热应力也会达到最大值, 因此, 取切出之前的温度场做分析。文献[7,8]列出的部分切削试验条件与本文试验相似, 均为无冷却条件下的顺铣、槽铣, 且采用了相近的切削参数; 同时参考文献[9]高速铣削淬硬钢的温度测量结果, 将上述文献的温度数据作为已知边界温度加载, 温度随时间变化曲线近似看作线性关系变化, 分析得到刀具切出时的温度分布、热应力分布和热变形分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

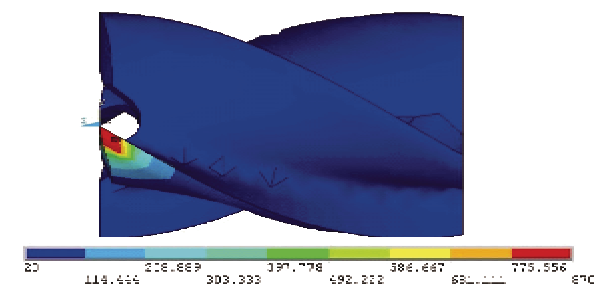


图 7 切出时的温度分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

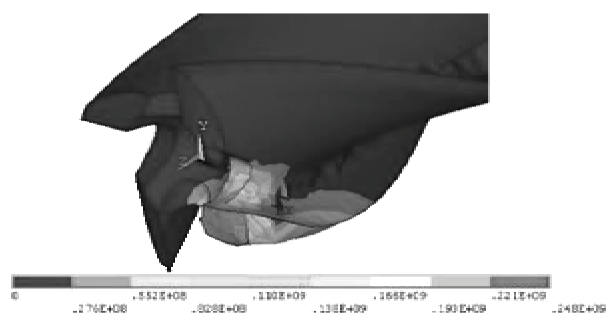


图 8 切出时的热应力分布(单位: Pa)

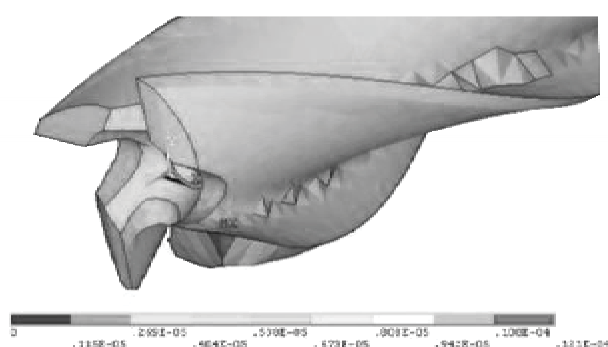


图 9 切出时的热变形(单位: μm)

由图 7 可见, 最高温度集中在主切削刃和侧刃处, 可达 870°C , 刀尖处和刀屑接触区温度较高, 其余部位温度值较低。由图 8 可见, 刀具的热应力比机械应力要小很多, 最大热应力出现在主切削刃上, 为 248MPa 。热应力呈不规则的条块状分布, 在刀尖附近既存在由于膨胀而产生的拉应力, 又有因收缩而产生的压应力。从热应力分布图上看, 切削区域的热应力大小在 138MPa 至 248MPa 之间。

尽管热应力比机械应力的数值小, 但其最大应力数值 248MPa 已足够对刀具造成很大的影响, 极有可能会造成刀具在热疲劳冲击作用下的失效。由图 9 可见, 刀具在切出时的热变形已经达到 $12.1\mu\text{m}$, 热变形对刀具和加工过程的影响不可忽视。

刀屑接触区与刀体内部形成了较大的温度梯度, 而刀屑接触区的温度变化幅度明显超过刀体内部, 造成了较大幅度的交变热应力, 热应力的幅值可达 248MPa 。随着刀具的高频切入-切出, 这种交变热应力不断对刀体尤其是切削刃造成高频高幅热冲击, 造成较大的热变形, 热冲击会使切削刃表面产生裂纹, 在切削力冲击的综合作用下, 最终导致切削刃的表层剥落或崩刃。

3.3 刀体的力热耦合综合变形与综合应力

由上述分析可知, 机械应力和温度、热变形、热应力均在切出时达到最大值, 因而切出时的力热耦合场具有典型的代表性, 切出时的力热耦合综合应力与综合变形分别如图 10 和图 11 所示。

切出时的综合应力最大为 987MPa , 刀体最大变形为 $22.7\mu\text{m}$, 均出现在主切削刃附近, 分析结果对比如表 2 所示。力热耦合作用下的等效应力稍大于机械应力, 而刀体变形则与机械变形和热变形很接近。这是因为切削热使刀体膨胀变形, 而切削力则可使刀具发生弯曲变形、扭转变形和压缩变形^[17], 呈现拉压混合状态, 使得刀具的最终等效应力在数

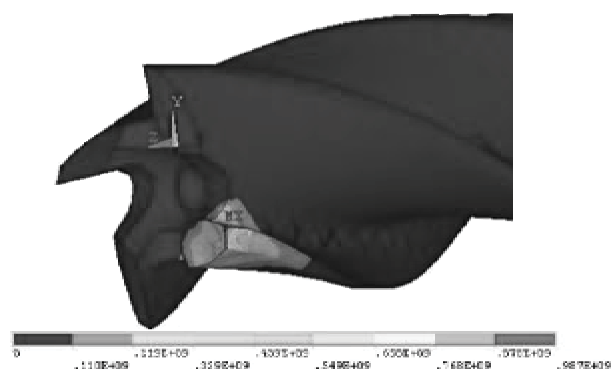


图 10 切出时的综合应力(单位:Pa)

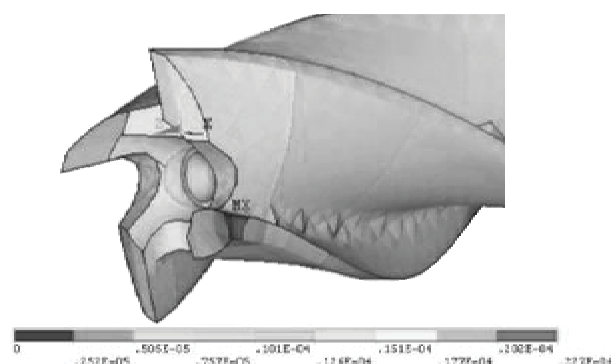


图 11 切出时的综合变形(单位:μm)

表 2 分析结果对比

分析类型	最大应力(MPa)	最大变形(μm)
机械应力作用	971	22.4
热应力作用	248	24.8
耦合应力作用	987	22.7

值的表现仅仅是稍大于机械应力,刀具的变形也不是机械变形和热变形的绝对值相加,各种拉应力和压应力的综合作用使得刀具的综合变形在数值上的表现小于机械变形和热变形。

刀具的应力、变形量大小主要是切削力作用的结果,切削力所造成的变形是弯曲、扭转和压缩等一系列变形的综合结果,其大小与刀具材料的属性和刀具结构等诸多因素有着密切关系。而由于切削热的存在,刀具表面因约束、结构、边界条件的不同,所产生的变形与应力的方向和大小也大不同,因此在力热耦合的条件下,二者所造成的应力、变形在某种程度上叠加或抵消,最终的综合应力与变形则是这种耦合作用的在数值上的表现。切削力与切削热相互影响,导致刀具受到各种复杂因素的综合影响。

刀屑接触区某点的力热耦合综合等效应力随时间的变化如图 12 所示。对比图 4 可以看到,综合应

力的数值在初始阶段与机械应力相差不多,但是随着切削进行,切削温度升高导致温度升高,热应力的影响变得显著,因而在稳态切削时,综合应力要高于机械应力。

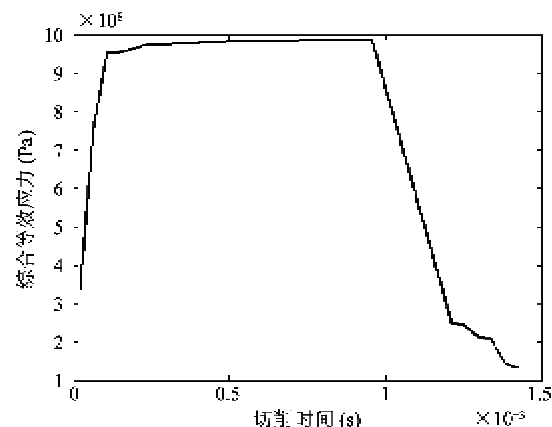


图 12 综合等效应力-时间变化图

如前所述,刀具材料的抗拉强度为 900 ~ 1050MPa,由分析结果可以看到,综合应力的幅值已经超过抗拉强度最小值,接近抗拉强度极限,因此可认为破损主要是由于冲击引起。从数值上看,切削力的影响要大于切削热的影响,机械冲击造成的应力幅值接近 1000MPa,是造成刀具破损的主要因素;但切削热的影响也不可忽视,幅值达 248MPa 的高频热冲击极易造成刀具的热裂纹,热裂纹在高周循环的机械冲击作用下会迅速扩展,最终导致刀具的剥落或崩刃。此外,在切出后,由于刀具急速冷却,温差变化大,刀具表面产生的拉应力会促使应力场反向,使应力场恶化更为严重,加大了切出破损的可能性。

4 结论

本研究进行了硬质合金立铣刀的破损试验,建立了力热耦合方程,设定了分析条件,详细分析了切削力、切削热和力热耦合对刀具的影响及刀具的应力、变形规律。分析结果表明:(1)机械应力最大可达 971MPa,热应力最大可达 248 MPa,力热耦合的综合应力最大为 987MPa,机械变形、热变形与综合变形数值上较为接近,机械应力对刀具破损影响更为显著;但热应力的作用不可忽视,高周循环的热应力不但会造成热裂纹,还会加大刀具切出破损的可能性。(2)刀具的机械应力和力热耦合应力数值上已经接近刀具材料的抗拉强度最大值,可认为刀具的破损是由冲击引起,属于早期破损,切削力(机械

应力)是导致刀具破损的主要因素。(3)刀具破损过程中,力热耦合作用使得刀具表现出复杂的应力和变形机理,综合应力与变形是拉应力、压应力等各种因素综合作用的结果,切削力和切削热所造成的应力、变形在某种程度上叠加或抵消,使得最终的综合应力与变形不是切削力作用与切削热作用的简单相加。

参考文献

- [1] 万熠,艾兴,刘战强等. 高速铣削航空铝合金 7050-T7451 时刀具的磨损机理. 机械工程学报,2007,43(4):103-108
- [2] 王海丽,马春翔,邵华等. 车削过程中刀具磨损和破损状态的自动识别. 上海交通大学学报,2006,40(12):2058-2062
- [3] 陈涛,刘献礼,罗国涛. PCBN 刀具切削淬硬钢时倒棱参数对切削过程的影响. 农业机械学报,2008,39(11):169-171,175
- [4] 万熠. 高速铣削航空铝合金刀具失效机理及刀具寿命研究:[博士学位论文]. 济南:山东大学机械工程学院,2002. 64-65
- [5] 龙震海,王西彬,刘志兵. 高速铣削难加工材料时硬质合金刀具前刀面磨损机理及切削性能研究. 摩擦学学报,2005,25(1):83-87
- [6] 舒彪,何宁. 无污染切削介质下钛合金铣削刀具磨损机理研究. 机械科学与技术,2005,24(4):454-457,461
- [7] Dewes R C. A review of ultra high speed milling of hardened steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 69(1-3): 1-17
- [8] Tonshoff H K, Arendt C, Amor R B. Cutting of hardened steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2000, 49(2): 547-566
- [9] 林金萍. 淬硬模具钢高速加工中切削温度的研究. 广西轻工业,2007,23(5):41-42,87
- [10] Lin Z C, Lin Y Y. Fundamental modeling for oblique cutting by thermo-elastic-plastic FEM. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41(8): 941-965
- [11] 黄志刚,柯映林,王立涛. 金属切削加工的热力耦合模型及有限元模拟研究. 航空学报,2004,25(3):317-320
- [12] 何永强,曹岩. 铝合金薄壁件侧壁加工变形有限元分析. 现代制造工程,2011,(3):58-61
- [13] 布光斌. 铝合金整体叶轮数控铣削加工增效关键技术研究:[博士学位论文]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2010. 60-61
- [14] 李鑫,马咏梅,丁行武. 基于 ANSYS 的有机玻璃加工用钻头的优化设计. 工具技术,2010,44(9):57-59
- [15] 梅中义,王运巧,范玉青. 飞机结构件数控加工变形控制研究与仿真. 航空学报,2005,26(2):234-239
- [16] 林剑峰,闫明,郑鹏等. 直驱式 A/C 轴双摆角铣头模态分析. 机械传动,34(4):61-63
- [17] 张松,艾兴,李剑峰等. 高速整体硬质合金铣刀的变形与应力分析. 中国机械工程,2005,16(18):1681-1684

Fracture experiment on milling cutters for high-speed machining of hardened steel and analysis of their thermo-mechanical coupling characteristics

Liu Guangjun^{*}, Tan Guangyu^{**}, Hu Haihe^{*}, Li Guanghui^{**}

(^{*} College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

(^{**} Engineering College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524005)

Abstract

Focusing on the tool fracture in high-speed milling of hardened steel, a fracture experiment on a cemented carbide milling cutter for high-speed milling of T10 hardened mould steel was conducted. It was observed that the fracture mode of the tool was tipping, and the fracture mechanism was initially discussed. The thermo-mechanical coupling equations of the cutting process were built. The effects of the cutting force, cutting temperature, and thermo-mechanical coupling on the tool were analyzed. The mechanism of the single physical field and thermo-mechanical coupling to the tool structure and fracture were discussed. The analysis results show that the failure mechanism is the fracture caused by force impact, and the cutting force is the main factor of tool fracture. The mechanical stress is much larger than the thermal stress. The thermo-mechanical coupling stress is a little larger than the mechanical stress. The mechanical deformation and thermal deformation approach the thermo-mechanical coupling deformation. The mechanism of stress and deformation is complex due to the effects of thermo-mechanical coupling. The comprehensive stress and deformation are the coupling effects of tensile stress and compressive stress.

Key words: high-speed milling, hardened steel, milling cutter, fracture, thermo-mechanical coupling