

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.01.039

镶嵌固体润滑剂的自润滑刀具切削温度研究*

宋文龙 邓建新 吴泽 颜培 张辉

(山东大学机械工程学院, 济南 250061)

【摘要】 在刀具前刀面月牙洼磨损区域加工装填 MoS_2 固体润滑剂的微孔, 制备了一种镶嵌固体润滑剂的自润滑刀具 (SLT-1), 并与前刀面有孔但无固体润滑剂的刀具 (SLT-2) 以及传统刀具 (SLT-3) 进行切削对比试验。用 TH5104 红外热像仪测试了 3 种刀具切削 45 号淬火钢的切削温度变化规律。结果表明: SLT-1 自润滑刀具的切削温度明显降低, 比传统刀具 SLT-3 降低 15% ~ 20%, SLT-2 刀具比 SLT-3 降低 5% ~ 10%。通过切削温度理论分析表明, 由于自润滑刀具 SLT-1 在前刀面形成润滑膜, 降低了前刀面剪切应力以及减少了刀屑接触面积, 使得切削温度显著降低。

关键词: 干切削 切削温度 自润滑刀具 摩擦磨损特性

中图分类号: TH117.1; TG501.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0205-06

Cutting Temperature of Cemented Carbides Base Self-lubricated Tool Embedded with Solid Lubricants

Song Wenlong Deng Jianxin Wu Ze Yan Pei Zhang Hui

(Department of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract

Microholes were made on the rake of the cemented carbide tools and MoS_2 solid lubricants were embedded into the microholes to form self-lubricated tools (SLT-1). Dry machining tests on hardened steel were carried out with the self-lubricated tool, the tool with microholes on the rake without solid lubricants (SLT-2) and the conventional tool (SLT-3). The variation of cutting temperature for 45[#] hardened steel cutting with the three cutting tools were tested by the TH5104 thermo tracer. The result shows that the cutting temperature of SLT-1 self-lubricated tool decreased obviously. It decreased 15% ~ 20% than that of SLT-3. And the cutting temperature of SLT-2 decreased 5% ~ 10% than that of SLT-3. Through the analysis of cutting temperature distribution, it was observed that the cutting temperature decreased and the raked face resistance was improved since self-lubricating film on the rake face decreased the shear stress and the contact length between chip and tool.

Key words Dry machining, Cutting temperature, Self-lubricated tool, Friction and wear property

引言

随着社会环境保护和可持续发展意识的提高, 人们对切削液的使用所带来的负面效应越来越关注^[1-3]: 污染环境, 危害工人身体健康, 切削液的处

理增加企业的生产成本等。因此, 有必要加强绿色干切削技术的研究, 消除切削液所造成的负面作用。但由于干切削加工过程中没有切削液的冷却润滑作用, 切削条件更加恶劣, 刀具与工件、刀具与切屑之间发生强烈的摩擦, 产生大量的切削热, 使刀具的摩

收稿日期: 2009-04-30 修回日期: 2009-07-24

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA044303)、泰山学者专项基金项目 and 山东省杰出青年基金资助项目(JQ200917)

作者简介: 宋文龙, 博士生, 主要从事润滑刀具的制备及性能研究, E-mail: wlsong@mail.sdu.edu.cn

通讯作者: 邓建新, 教授, 博士生导师, 主要从事切削加工及刀具设计与开发研究, E-mail: jxdeng@sdu.edu.cn

擦状态和磨损机理发生改变,刀具磨损更加严重,导致刀具耐用度下降及工件加工质量变差。

通常采用提高刀具基体性能,诸如研制新型刀具材料为开发干切削刀具技术的主要途径。但由于干切削尤其是高速干切削加工过程中的摩擦非常严重,切削温度非常高,刀具耐用度甚低。因此,针对干切削加工的特点,对刀具进行合理的摩擦学设计,使刀具具备自润滑功能,以减少切削热的产生,降低切削温度^[4-5]。

镶嵌自润滑材料^[6-11]是一种工程常用的复合材料,其摩擦副部件由固体润滑剂和其他填料组成。通过合理设计该材料可兼顾基体材料的物理机械性能及固体润滑剂的优良摩擦学特性。

研究选用 MoS_2 作为固体润滑剂, YTi14 硬质合金作为基体制备镶嵌固体润滑剂的自润滑刀具 (SLT-1)。在刀具前刀面月牙洼磨损部位加工一定尺寸、阵列、形状的装有润滑剂的微细小孔,制备自润滑刀具,并与 SLT-2 刀具(前刀面加工小孔,但不装填固体润滑剂的刀具)以及传统刀具 SLT-3 对 45 号淬火钢进行干切削对比试验。研究该自润滑刀具在干切削过程中的切削温度变化规律,通过对切削温度理论进行分析,探讨该自润滑刀具降低切削温度的原因。

1 刀具制备和试验方法

1.1 润滑刀具的制备

润滑刀具的小孔在 DZW-10 微细电火花加工试验机上加工,基体选择 YTi14 硬质合金刀具。小孔位于前刀面靠近刀尖的月牙洼磨损区域,孔径为 $\phi 0.15 \sim 0.20 \text{ mm}$,孔深约为 0.4 mm 。小孔的直径和深度尺寸的确定,一方面是为了能够填装相对较多的固体润滑剂,另一方面要保证刀尖足够的强度,图 1 为前刀面小孔装填固体润滑剂和不填润滑剂的形貌,分别记为 SLT-1 和 SLT-2。

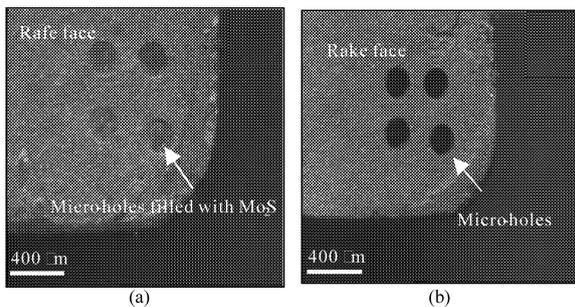


图 1 前刀面小孔装填和不装填固体润滑剂的形貌

Fig. 1 Microholes in the rake face filled with and without MoS_2

(a) SLT-1 (b) SLT-2

1.2 切削试验

切削试验在 CA6140 型车床上进行,工件材料为 45 号钢 (HRC35), 刀具主要几何参数为:前角 $\gamma_0 = 10^\circ$, 后角 $\alpha_0 = 5^\circ$, 主偏角 $\kappa_r = 45^\circ$ 。所采用的刀具为前刀面小孔装填固体润滑剂的刀具 SLT-1, 前刀面小孔不装填固体润滑剂的刀具 SLT-2 以及传统刀具 SLT-3, 切削试验采用干切削方式, 进给量 f 为 0.1 mm/r , 切削深度 a_p 为 0.2 mm , 切削时间 t 为 5 min 。用 TH5104 型红外热像仪测量切削温度, 扫描电子显微镜 (SEM) 观察分析刀具磨损形貌, X 射线能谱仪 (EDS) 分析研究刀具前刀面磨损区域元素成分。

2 结果分析

2.1 切削温度

图 2 为采用 TH5104 型红外热像仪测量的切削温度分布图, 图 3 为测量的切削温度随切削速度的变化曲线。可见, 切削过程中切削温度随着切削速度的增大而增加。其原因为: 当切屑沿前刀面流出时, 切屑底层与前刀面发生强烈的摩擦, 产生很多的热量。如果切削速度提高, 则摩擦热在很短时间内生成, 而产生的切削热向切屑内部传导需要一定的

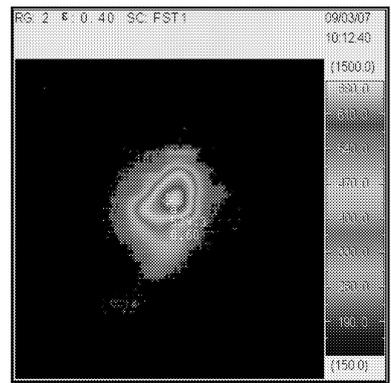


图 2 切削温度分布图 ($a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm/r}$, $v = 100 \text{ m/min}$)

Fig. 2 Distribution of cutting temperature ($a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm/r}$, $v = 100 \text{ m/min}$)

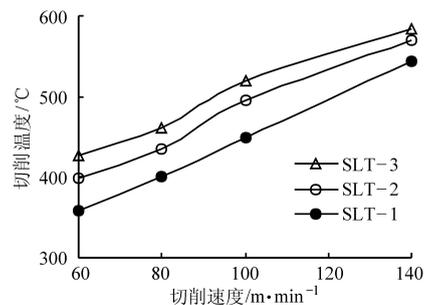


图 3 切削温度随切削速度的变化曲线

Fig. 3 Cutting temperature of SLT series tools vs cutting speed

时间。因此,速度提高导致摩擦热来不及向切屑内部传导而大量积聚在前刀面接触区域,使得切削温度提高。另外,从图 3 可见,SLT-1 刀具的切削温度相对最小,较 SLT-3 降低 15% ~ 20%,而 SLT-2 刀具切削温度较 SLT-3 降低 5% ~ 10%。

2.2 前刀面磨损

图 4 为 SLT-1、SLT-2 以及 SLT-3 刀具的前

刀面磨损形貌(切削速度 v 为 100 m/min,进给量 f 为 0.1 mm/r,切削深度 a_p 为 0.2 mm,切削时间 t 为 5 min)。刀具前刀面出现了明显的粘结磨损以及磨粒磨损,其中 SLT-3 刀具磨损最为严重;由于切削过程前刀面刀屑接触区域具有较高的切削应力以及切削温度,SLT-2 刀具前刀面的小孔挤进较多的切屑;SLT-1 的耐磨性则表现最好,磨损最轻微。

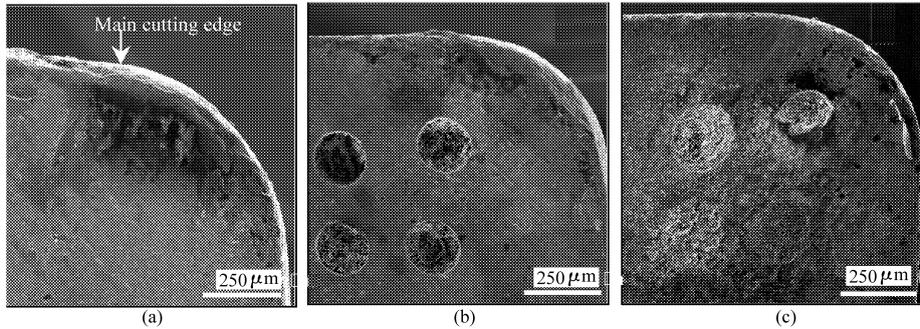


图 4 前刀面磨损形貌 ($a_p = 0.2$ mm, $f = 0.1$ mm/r, $v = 100$ m/min, $t = 5$ min)

Fig. 4 SEM micrograph of worn rake face of the tools ($a_p = 0.2$ mm, $f = 0.1$ mm/r, $v = 100$ m/min, $t = 5$ min)

(a) SLT-3 (b) SLT-2 (c) SLT-1

图 5 为 SLT-1 润滑刀具前刀面磨损形貌及 S、Mo 元素分布图。可以看出前刀面沿着切屑滑动的痕迹上有明显的 MoS_2 元素,可能是在切削过程中受到切屑摩擦挤压或者受热膨胀, MoS_2 固体润滑剂从孔中挤出,并在前刀面表面拖覆,从图 5b、5c 元素

分布可以看出微孔周围有大量的固体润滑剂成分存在。但由于切削过程中刀屑接触区域具有较高的接触应力以及切削温度,不同的位置 MoS_2 固体润滑剂分布相差很大,有些位置含量较高,如图 6a 所示,但有些位置可能含量极低甚至没有,如图 6c 所示。

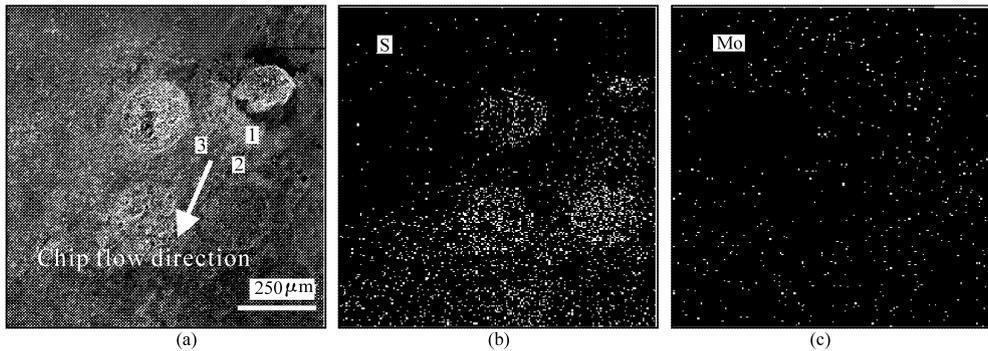


图 5 SLT-1 刀具前刀磨损形貌及 S 和 Mo 元素分布 ($a_p = 0.2$ mm, $f = 0.1$ mm/r, $v = 100$ m/min, $t = 5$ min)

Fig. 5 SEM and S and Mo element distribution on the worn surface of SLT-1 tool ($a_p = 0.2$ mm, $f = 0.1$ mm/r, $v = 100$ m/min, $t = 5$ min)

(a) SEM (b) S 元素分布 (c) Mo 元素分布

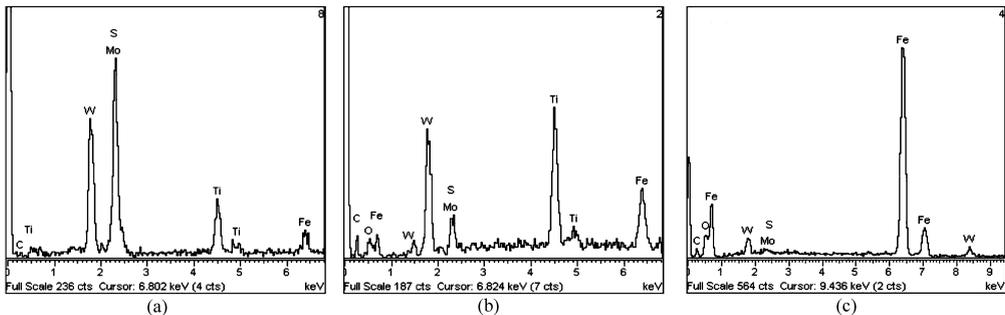


图 6 图 5a 中各点的 EDS 分析

Fig. 6 EDS analysis of points in Fig. 5a

(a) 点 1 (b) 点 2 (c) 点 3

2.3 讨论

2.3.1 切削温度理论分析

在金属切削过程中,切削热来源主要有3方面^[11]:切屑的弹性和塑性变形,切屑与刀具前刀面以及工件与后刀面的摩擦。对于磨损量小的刀具,后刀面与工件的摩擦力较小,一般忽略不计,切削过程中产生的热量分配情况如图7所示。由于切削温度分布的复杂性,通常用前刀面与切屑接触区域的平均温度来表示切削温度,而前刀面的平均温度近似地认为工件剪切面的平均温度与刀屑接触面摩擦温升之和^[11-13],即

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f$$

式中 $\bar{\theta}_t$ ——切削温度

$\bar{\theta}_s$ ——剪切面的平均温度

$\bar{\theta}_f$ ——前刀面因刀屑摩擦造成的温升

求出 $\bar{\theta}_s$ 和 $\bar{\theta}_f$ 即可求出前刀面的平均温度。

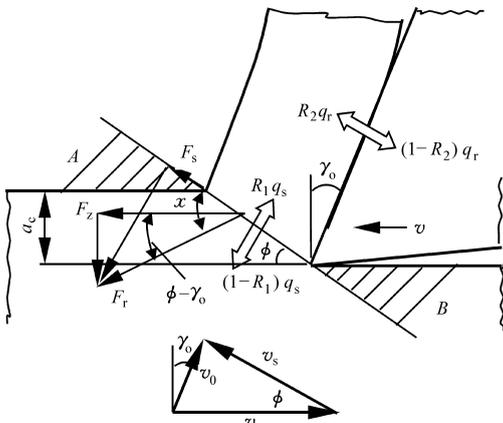


图7 切削过程中产生的热量分配示意图

Fig.7 Heat distribution during cutting process

2.3.2 剪切面的平均温度

设剪切面上流入切屑中的热量为 $R_1 q_s$, q_s 为单位时间单位面积的热量, R_1 为剪切面产生的热量流入切屑的比率,则剪切面上流入工件的热量为 $(1 - R_1) q_s$,如图7所示。如不计热量的损失,则工件在剪切面的平均温度 $\bar{\theta}_s$ 应为

$$\bar{\theta}_s = \frac{R_1 q_s}{c_1 \rho_1 v \sin \phi} + \theta_0 = \frac{R_1}{c_1 \rho_1 v \sin \phi} \frac{F_s v_s}{a_c a_w} \sin \phi + \theta_0 = \frac{R_1}{c_1 \rho_1 v} \frac{v_s}{a_c a_w} \frac{\tau_s a_c a_w}{\sin \phi} + \theta_0 = \frac{R_1 v_s \tau_s}{c_1 \rho_1 v \sin \phi} + \theta_0 \quad (1)$$

式中 c_1 —— $\theta_0 \sim \bar{\theta}_s$ 间材料的平均温度的比热容

ρ_1 ——工件材料的密度

a_c ——切削厚度, m

F_s ——剪切面上的剪切应力

a_w ——切削宽度, m

v ——切削速度, m/s

v_s ——剪切速度, m/s ϕ ——剪切角

τ_s ——剪切应力 θ_0 ——环境温度

2.3.3 前刀面的平均温度

假设前刀面上单位时间单位面积产生的热量为 q_r , 则

$$q_r = \frac{F_f v_{ch}}{l_f a_w} \quad (2)$$

其中 $v_{ch} = v/\xi$

式中 F_f ——前刀面摩擦力, N

v_{ch} ——切屑速度, m/s

l_f ——刀屑接触长度, m

设 u_r 为单位切削体积的摩擦功, 则

$$u_r = \frac{F_f v_{ch}}{v a_c a_w} \quad (3)$$

将式(3)代入(2), 可得

$$q_r = \frac{u_r v a_c}{l_f} \quad (4)$$

若流入切屑中的热量为 $R_2 q_r$, R_2 为前刀面产生的热量流入切屑的比率(流入率)。若将切屑看成是半无限体, 则由摩擦引起的在刀屑接触面上的平均温度 $\bar{\theta}_f$, 可计算为

$$\bar{\theta}_f = 0.754 \frac{q l}{k \sqrt{L}} \quad (5)$$

将相应的值代入式(5), 得

$$\bar{\theta}_f = \frac{0.7524 R_2 q_r}{k_2 \sqrt{L_2}} \frac{l_f}{2} \quad (6)$$

其中 $L_2 = \frac{v_{ch} l_f / 2}{2 \omega_2}$ $\omega_2 = \frac{k_2}{c_2 \rho_2}$

式中 k_2 ——温度为 $\bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f$ 时切屑的导热系数

L_2 ——热源宽度

ω_2 ——温度为 $\bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f$ 时切屑的导温系数

ρ_2 ——温度为 $\bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f$ 时切屑的密度

c_2 ——温度为 $\bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f$ 时切屑的比热容

所以由摩擦引起的切屑表面的平均温升为

$$\bar{\theta}_f = \frac{0.7524}{k_2 \sqrt{L_2}} \frac{l_f}{2} R_2 q_r = 0.7524 R_2 \tau_c \sqrt{\frac{k_2 v a_w l_f}{c_2 \rho_2 \xi}} \quad (7)$$

式中 ξ ——变形系数

τ_c ——前刀面平均剪切应力

最后得到切削温度 $\bar{\theta}_t$ 为

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f =$$

$$\frac{R_1 v_s \tau_s}{c_1 \rho_1 v \sin \phi} + \theta_0 + 0.7524 R_2 \tau_c \sqrt{\frac{k_2 v a_w l_f}{c_2 \rho_2 \xi}} \quad (8)$$

假设 R_1 、 R_2 不变, 则由式(8)可知各因素对切削温度的影响。

很显然, 如果工件材料、刀具结构及切削条件不

变,降低前刀面摩擦副平均剪切应力 τ_c ,可以明显降低因摩擦引起的切屑表面温度 $\bar{\theta}_s$;若增加剪切角 ϕ 则会降低剪切面的平均温度 $\bar{\theta}_s$;若降低刀屑接触长度 l_f ,可降低切屑摩擦表面平均温度 $\bar{\theta}_f$ 。

2.3.4 切削试验结果分析

图5表明在切削过程中,微孔中的固体润滑剂能够被拖覆在前刀面表面,在前刀面形成润滑膜。但由于切削过程中刀屑接触区域具有较高的接触应力以及切削温度,即使固体润滑剂在前刀面表面拖覆,也很难形成一层均匀的固体润滑膜(图6),有些位置含量较高,有些位置含量极低甚至可能不存在。故可认为前刀面刀屑摩擦副为边界润滑状态,其摩擦因数 μ 表示为^[12]

$$\mu = \tau_c / \sigma_r = [k\tau_m + (1-k)\tau_f] / \sigma_r \quad (9)$$

式中 k ——接触面上发生固体接触部分所占比例

τ_m ——工件材料的剪切应力

τ_f ——润滑膜的剪切应力

σ_r ——压缩应力

MoS₂ 固体润滑剂为六方层状结构,具有较低的剪切强度。当刀具前刀面摩擦副间拖覆 MoS₂ 时,由于 $\tau_f \ll \tau_m$,前刀面刀屑摩擦副的平均剪切应力 τ_c 变小,摩擦副由干摩擦转变为边界摩擦,摩擦因数 μ 明显降低,摩擦角 β 减小。由李和谢弗的剪切角公式^[11] $\phi + \beta - \gamma = \pi/4$ 可知,在前角保持不变的情况下,摩擦角 β 减小,剪切角 ϕ 随之增加,由式(8)可知剪切面平均温度 $\bar{\theta}_s$ 和刀屑摩擦表面温度 $\bar{\theta}_f$ 降低,总切削温度随之降低。假设刀屑真实接触部分比例 k 为80%,有20%的刀屑接触区域形成膜润滑,则形成润滑膜后的平均剪切应力与无润滑膜的平均剪切应力比为 $[(0.8\tau_m + 0.2\tau_f) / \tau_m] \times 100\% \approx 80\%$ 。即若其他参数不变的情况下,由式(8)可知仅20%接触区域存在润滑膜时,前刀面刀屑摩擦表面温度 $\bar{\theta}_f$ 至少降低20%(即 $\bar{\theta}_f \propto \tau_c$)。况且形成润滑膜后剪切角增加,又能降低剪切面平均温度 $\bar{\theta}_s$,故前刀面的剪切应力对切削温度影响非常大。SLT-1 刀具实际的切削温度降低约15%左右。

另外,由于前刀面刀屑接触区域的小孔能够降低刀屑接触面积,即降低刀屑接触长度 l_f ,故可减少切屑对前刀面的摩擦,降低前刀面切削热的产生,从而降低前刀面的平均温度 $\bar{\theta}_f$ 。一般刀屑接触长度 l_f 为0.8~1.0 mm,孔径约为0.2 mm,假设只有一个孔处于刀屑接触区域,刀屑接触距离至少降低20%,则由式(8)知前刀面刀屑摩擦表面温度 $\bar{\theta}_f$ 降低为原来的 $(0.8^{1/2}/1^{1/2}) \times 100\% \approx 89.4\%$ (假设其他参数变化可忽略, $\bar{\theta}_s \propto (l_f)^{1/2}$),即降低约10%。这从切削温度随切削速度变化曲线(图3)可以看出,SLT-2 刀具由于前刀面刀屑摩擦区域微孔的存在,实际的切削温度 $\bar{\theta}_f$ 比SLT-3 传统刀具降低约5%。

因此,可以认为在切削过程中,SLT-1 润滑刀具降低切削温度的原因是:降低前刀面摩擦副的剪切应力,同时降低摩擦因数,增大剪切角;降低刀屑接触长度。但从理论分析以及试验测得的切削温度变化曲线来看,前者的作用更大一些,即SLT-1 由于具有润滑性能而具备更低的切削温度和更好的耐磨性能。

3 结论

(1) 在相同的切削条件下,SLT-1 自润滑刀具具有最低的切削温度,较SLT-3 传统刀具降低15%~20%,具有更好的摩擦磨损特性,切削性能表现最好。SLT-2 刀具切削性能介于SLT-1 自润滑刀具与SLT-3 刀具之间,切削温度较SLT-3 降低5%~10%。

(2) SLT-1 自润滑刀具降低切削温度的原因主要有两方面:一方面在切削过程中,润滑刀具小孔中的固体润滑剂受热膨胀以及切屑的摩擦挤压作用,被拖覆在刀具表面,形成固体润滑膜,减少前刀面平均剪切应力 τ_c ,降低前刀面的摩擦因数,增加剪切角,减少切削热的产生,降低切削温度;另一方面由于减小前刀面刀具/切屑摩擦副的接触长度 l_f ,降低刀屑摩擦表面温升。其中前者占主要作用。

参 考 文 献

- 1 刘志峰,张崇高,任家隆. 干切削加工技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 2 王西彬. 绿色切削加工技术的研究[J]. 机械工程学报,2000,36(8):6~14.
Wang Xibin. Green machining technology in metal cutting[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000,36(8):6~14. (in Chinese)
- 3 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- 4 邓建新,葛培琪,艾兴. 切削加工润滑技术及展望[J]. 摩擦学学报,2003,23(6):546~550.
Deng Jianxin, Ge Peiqi, Ai Xing. Development and perspective of lubricating techniques in metal cutting[J]. Tribology, 2003,23(6):546~550. (in Chinese)

- 5 邓建新, 曹同坤, 艾兴. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$ 自润滑陶瓷刀具切削过程中的减摩机理[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 109 ~ 113.
Deng Jianxin, Cao Tongkun, Ai Xing. Friction reducing mechanisms of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$ self-lubricating ceramic tool in machining processes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 109 ~ 113. (in Chinese)
 - 6 石森森. 固体润滑技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
 - 7 阎逢元, 林新华, 周惠梯, 等. 铝基镶嵌材料的磨损特性及耐磨机理[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(3): 271 ~ 274.
Yan Fengyuan, Lin Xinhua, Zhou Huiti, et al. The wear behaviors and anti-wear mechanism of aluminum based embedded composites[J]. Tribology, 1999, 19(3): 271 ~ 274. (in Chinese)
 - 8 刘如铁, 李溪滨, 熊拥军, 等. 镶嵌 PTFE 镍基固体自润滑材料的研究[J]. 润滑与密封, 2005(6): 55 ~ 57.
Liu Rutie, Li Xibin, Xiong Yongjun, et al. Study on nickel base solid self-lubricating materials studded with PTFE[J]. Lubrication Engineering, 2005(6): 55 ~ 57. (in Chinese)
 - 9 Jaydeep K, Ioan N, Efsthios I M. Sliding wear behavior of PTFE composites[J]. Wear, 2002, 252(5 ~ 6): 361 ~ 369.
 - 10 Broshcheva P N, Okhlopko A A, Yuchyugyavea T S. The effect of natural zeolite rock on the tribological behavior of polytetrafluorethylene[J]. Friction and Wear, 2001, 22(1): 58 ~ 61.
 - 11 Deng J X, Song W L, Zhang H. Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(1): 66 ~ 72.
 - 12 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
 - 13 [日]中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 李云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
 - 14 [日]白井英治. 金属加工力学[M]. 廉云国, 徐东安, 陈振孟, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.
-

(上接第 225 页)

- 5 Quan Yanmin, Yu Qixun, Xie Lijing. Study on the adaptability of thick film diamond tool to cutting composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(4): 501 ~ 504.
- 6 Chan K C, Cheung C F. A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/ SiC_p metal matrix composite[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(9): 2 047 ~ 2 068.
- 7 常兴, 庞学慧, 陈五一. 自滚切端铣刀[J]. 工具技术, 1995, 29(11): 2 ~ 8.
Chang Xing, Pang Xuehui, Chen Wuyi. Self-propelled rotary face milling tool[J]. Tool Technology, 1995, 29(11): 2 ~ 8. (in Chinese)
- 8 中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 李云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985: 10 ~ 130.