

切削 SiC 增强铝基复合材料时刀具的磨损形态及机理^①

王大镇^{②*} 冯培锋^{③*} 李 波^{*} 刘华明^{**}

(^{*}集美大学机械工程学院 厦门 361021)

(^{**}哈尔滨工业大学机电学院 哈尔滨 150001)

摘 要 为研究切削 SiC 增强铝基复合材料时刀具的磨损形态和机理,采用硬质合金和聚晶金刚石(PCD)刀具进行了各切削工况下的切削试验。用爆炸式快速落刀装置获取切屑根,研究了前刀面的磨损部位。借助扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM),检测分析了前、后刀面的磨损形态和成分组成,并进一步研究了磨损机理。结果表明:切削刀具的主要磨损部位发生在后刀面,磨损机理是磨料磨损;前刀面靠近刃口区域首先产生由 SiC 增强相引起的磨料磨损,该区域随后由机械镶嵌生成积屑瘤,积屑瘤脱落后导致产生黏结磨损。黏结磨损的程度较轻,没有形成月牙洼型。前刀面离刃口稍远的区域(积屑瘤尾部后面)会同时产生由切屑底层 SiC 增强相引起的再次磨料磨损,磨料磨损的主要机理是“微切削”。

关键词 SiC 增强相,铝基复合材料,刀具磨损,磨料磨损,微切削

0 引 言

碳化硅晶须(silicon whisker of carbide, SiC_w)和碳化硅颗粒(silicon particle of carbide, SiC_p)增强铝基复合材料具有多种优异性能,比如强度和比刚度高、耐高温、耐磨损、线膨胀系数小且可调以及尺寸稳定性好等^[1,2],已成为航天、航空工业中钛合金和有毒铍合金的最佳替代材料^[3]。但由于 SiC_w 和 SiC_p 陶瓷增强相的高硬度,使该类铝基复合材料的切削加工变得极为困难^[4,5]。主要表现在采用高速钢和硬质合金刀具切削时,极短的时间内就会使刀具产生严重的磨损^[6,7],导致切削力迅速增大^[8-10],并使工件的精度和表面质量严重下降^[11,12]。因此,切削该类材料需要用超硬的金刚石刀具等,这已成为目前国内外研究这一问题的人员(为数不多)中的多数人的共识^[8,13,14]。

目前,国内外关于切削该类材料时刀具磨损的研究还很少,现有的研究得出的一般都是在某些具体的实验条件下的刀具磨损结果。如 Cronjager 等^[3]得出了高速钢(high speed steel, HSS)刀具不能用于切削该类复合材料的结论,Weinert 等^[5]主要研究了

增强相颗粒的粒度和尺寸对硬质合金刀具和聚晶金刚石(polycrystalline diamond, PCD)刀具的磨损影响, Luliano 等^[10]研究发现切削该类材料时刀具会快速地磨损和破损,并着重研究了切削速度和进给量等切削参数对刀具磨损的影响;而 Gallab 等^[6,11]研究得出 PCD 刀具比硬质合金刀具更耐磨,硬质合金涂层刀具比非涂层刀具寿命更长的结论,且推断刀具的磨损可能是磨料磨损。Gallab 还发现,从普通的切削速度(20m/min)到较高的切削速度(894m/min)的工况范围内,切削该类材料时在刀具前刀面上都会生成积屑瘤(built-up edge, BUE),积屑瘤保护了刀具免受进一步的磨损。但 Gallab 并没有给出相关的积屑瘤扫描图像,因此一些研究者建议对在各种工况下都能观察到的积屑瘤现象及其对刀具磨损的影响进行更深入的研究^[2,13]。上述研究者都没有给出刀具磨损区域清晰的微观形态图像和成分组成,也没有分析其磨损机理。

本文在粗加工、半精加工、精加工和超精密切削工况下,采用硬质合金和 PCD 刀具切削该类铝基复合材料,研究了刀具前、后刀面的磨损形态和机理,为科研和生产中合理选择刀具提供参考。

① 863 计划(2006AA050203)和福建省自然科学基金(E0640012)资助项目。

② 男,1962 年生,博士,教授;研究方向:难加工材料的高效精密加工技术;E-mail: clazhenwang@163.com.cn

③ 通讯作者, E-mail: pufeng@163.com.cn

(收稿日期:2009-06-09)

1 试验部分

1.1 车削试验

试验在普通车床 CA6140 和哈尔滨工业大学精密工程研究所研制的 HCM-I 型超精密数控车床上进行。

试验材料采用 SiC_w 和 SiC_p 增强的铝基复合材料,其性能参数见表 1。

刀具采用英国 Contour 公司生产的 PCD 车刀,几何参数:前角 $\gamma_0 = 0^\circ$,后角 $\alpha_0 = 5^\circ$,主偏角 $K_r = 45^\circ$,副偏角 $K'_r = 45^\circ$,刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ$,长 0.3mm 的直线形修光刃。试验前刀具的刀刃为新磨刀刃,用原子力显微镜(AFM)测得其切削前刃口钝圆半径为 1 μ m;硬质合金 K10 固定刀片,几何参数: $\gamma_0 = 6^\circ$, $\alpha_0 = 14^\circ$, $K_r = 45^\circ$, $K'_r = 45^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$;硬质合金 YT15 固定刀片,几何参数: $\gamma_0 = 6^\circ$, $\alpha_0 = 14^\circ$, $K_r = 45^\circ$, $K'_r =$

45° , $\lambda_s = 0^\circ$ 。

切削条件为干切。

1.2 切屑根制取

采用哈尔滨工业大学研制的爆炸式快速落刀装置获取切屑根,该装置切屑根获取率高(达 95%以上),加速度大($2.5 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ 以上),当切削速度超过 300m/min 时仍能得到满意结果。将获取的切屑根用 XQ-2 型金相镶嵌机制备金相磨片,砂纸打磨后抛光,再用 5% HNO₃ + 3% HF + 92% H₂O 的溶液浸蚀 10h,用 HITACHI HUS-5GB 型蒸镀机蒸金 2.5 ~ 3h。

1.3 检测仪器及方法

用带探针的 X-650 型扫描电子显微镜(SEM)及用美国 Digital Instruments 公司生产的 NanoscopeIIIa MultiMode 型 AFM 对切屑根的形态、刀具磨损前及磨损后的刀面进行检测和分析。AFM 的针尖采用氮化硅 Si₃N₄ 针尖,针尖半径 10 ~ 20 nm,针尖锥角 35°,采用接触工作模式进行 AFM 检测。

表 1 试验材料的物理及力学性能

试验材料	体积分数 φ (%)	密度 ρ (g/cm ³)	抗拉强度 σ_b (MPa)	比强度 σ_b/ρ (m ² /s ²)	弹性模量 E (GPa)	比刚度 E/ρ (m ² /s ²)	SiC 颗粒/晶须尺寸 (μ m)	延长率 δ (%)
SiC _w /2024	20	2.80	625	223×10^3	110.0	39.3×10^6	$d = 0.1 \sim 1, l = 10 \sim 100$	2.5
SiC _p /2024	15	2.76	498	180×10^3	90	31.8×10^6	$d = 2 \sim 3$	1.8
SiC _p /2024	20	2.76	498	180×10^3	93	33.7×10^6	$d = 2 \sim 3$	1.6
SiC _p /2024	25	2.77	500	180.5×10^3	95	34.3×10^6	$d = 2 \sim 3$	1.5
SiC _p /2024	36	2.80	507	181×10^3	102	36.4×10^6	$d = 2 \sim 3$	0.8

2 结果与讨论

2.1 磨损模型

图 1 所示为切削 SiC 增强铝基复合材料时的刀具磨损模型。

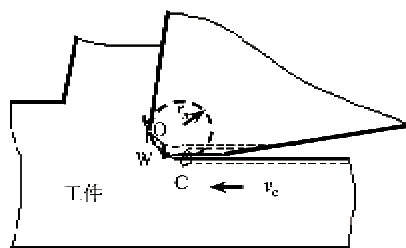


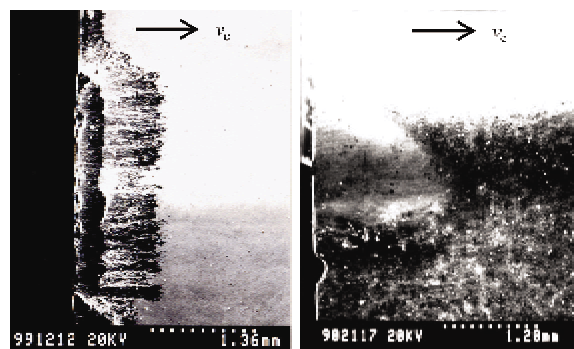
图 1 磨损模型

图 1 中的 O 点是切削材料在刀具刃口处断裂形成切屑和加工表面的分流点, W 表示在分流点被切断的碳化硅晶须 SiC_w (或颗粒 SiC_p) 增强相,且下半部分仍镶嵌在铝基体中。C 代表 SiC_w 或 SiC_p 碎块、

脱落的积屑瘤及材料中的其他硬质点,磨损时发生滚动。

2.2 后刀面磨损形态

图 2(a)和图 2(b)分别是 K10 和 YT15 硬质合金刀具切削磨损后的后刀面磨损形态。



(a) K10 刀具

(b) YT15 刀具

图 2 后刀面磨损形态的 SEM 图像

从图 2 中可见,后刀面磨损带上分布着许多磨损沟痕,有深有浅、有宽有窄、有长有短,但共同特点是所有的沟痕都平行于切削方向,即平行于切削速度方向,分析后认为该磨损为磨料磨损。

为了进一步找到磨料磨损的证据,除观察后刀面的磨损形态外,还可比较其磨损沟槽中的化学元素变化情况。为此,以 YT15 硬质合金刀具为例研究磨损沟槽中的化学成分变化。图 3 和图 4 所示分别是切削 $\text{SiC}_w/2024$ 复合材料前和切削后,采用配有电子探针的扫描电镜扫描获得的后刀面微观形态和该部位的化学元素能谱。

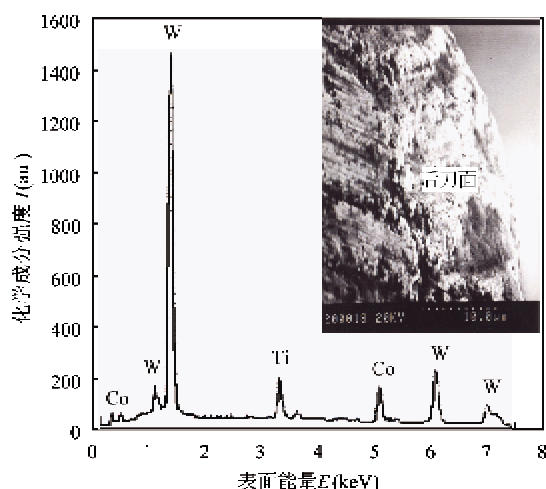


图 3 切削前 YT15 刀具后刀面微观形态及元素能谱

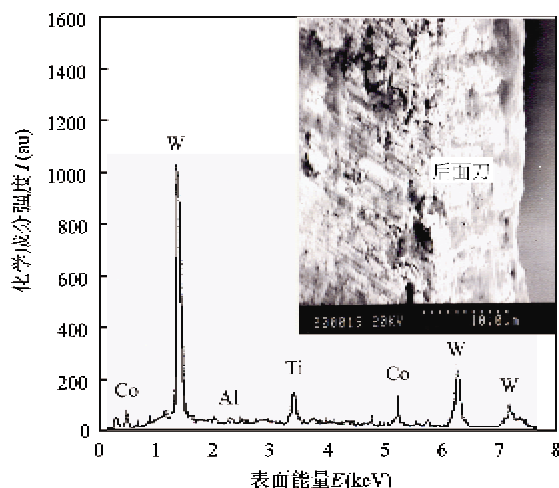


图 4 切削后 YT15 刀具后刀面微观形态及元素能谱

从图 3 可知, YT15 硬质合金刀具切削前所含的主要元素为钨(W)、钴(Co)、钛(Ti),且 W、Ti 元素分别以 WC 、 TiC 硬质颗粒的形式存在,而钴(Co)元素以黏结剂的形式存在。比较图 3 和图 4 可以发现,

磨损后刀具后刀面中 W 元素的能谱强度有很大降低, Ti 元素的能谱强度也有所降低,表明后刀面中的 WC 、 TiC 颗粒与 SiC_w 、 SiC_p 磨料相互摩擦、冲击而脱落。后刀面沟槽中还发现了 Al 元素,但在能谱曲线中没有观察到 Si 元素(来自 SiC 增强相),这是因为 Si 元素和 W 元素的能谱非常接近,分别为 1.28keV、1.26keV,故曲线图中含量相对较少的 Si 元素被 W 元素的能谱掩盖了。

2.3 前刀面磨损形态

切削 SiC 增强铝基复合材料时,在粗加工、半精加工、精加工和超精密加工的工况范围内,刀具前刀面都会产生积屑瘤^[6],且具有如下特点^[15]:(1)外形呈楔形,且高度很小。(2)切屑流过楔形积屑瘤背部后再度与前刀面接触,然后再排出。如图 5(a)、图 5(b)所示,切屑流过积屑瘤背部尾端后,在 P 点再度与刀具前刀面接触摩擦。(3)积屑瘤生成的机理是前刀面刃口部位的凹凸不平处的机械镶嵌。

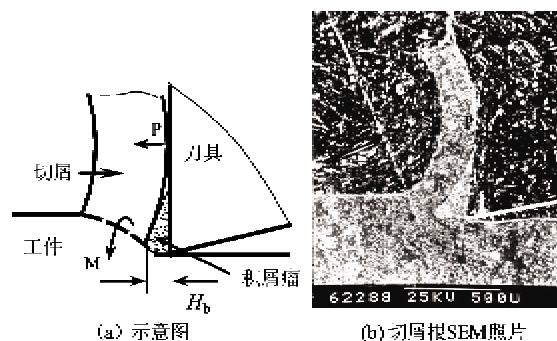


图 5 切削区形态

从图 1 可知,新刀具开始切削后在材料的断裂分流点 O 处,会形成无数把镶嵌在铝基体中的 SiC 增强相断头,随切屑底层的流动滑向前刀面,使前刀面发生剧烈的磨料磨损。在刀具前刀面摩擦磨损的过程中,“微切削刀具”—— SiC_w 或 SiC_p 增强相断头自身也在不断地破碎、解理而滞留在前刀面因“微切削”产生的沟槽中。之后不久就会在前刀面上形成楔型积屑瘤(见图 5(b)),从而阻断了前刀面的进一步磨损。

为证实楔型积屑瘤底部确实曾产生过大量的磨料磨损,通过比较前刀面沟槽中的 Si 元素(来自 SiC 增强相)的含量与积屑瘤内部 Si 元素含量的差异就可说明问题。

尽管在楔型积屑瘤不断的生长过程中,上述“微切削”过程仍在进行,使得积屑瘤内部的 Si 元素含量高于复合材料中的 Si 元素含量,但由于积屑瘤的

平均显微硬度要远小于硬质合金刀具,且分布不均,故因“微切削”而滞留在积屑瘤内部的 Si 元素要少于前刀面沟槽中的 Si 元素含量。图 6 所示是前刀面沟槽中(积屑瘤底面)及积屑瘤内部的 Si 元素含量电子探针线扫描图。

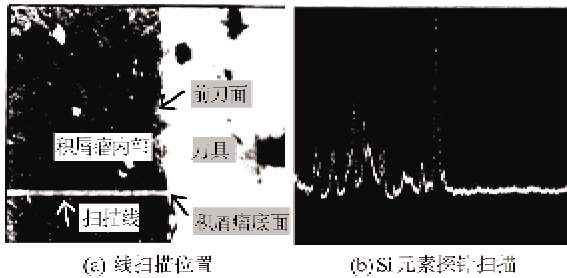


图 6 积屑瘤内部及前刀面沟槽 Si 元素探针扫描

观察图 6(b)可发现,前刀面沟槽中的 Si 元素含量比积屑瘤内部 Si 元素含量平均高出数倍,这证明在切削初期前刀面上的确存在着大量的磨料磨损。

为清楚地观察前刀面上的磨损形态,可将前刀面上的楔形积屑瘤去掉。为此,首先用 3% 的 HF 酸溶液腐蚀积屑瘤 10~20s,然后再采用抛光法直至将积屑瘤等黏结物完全清除为止,拍摄 SEM 照片,如图 7 所示。

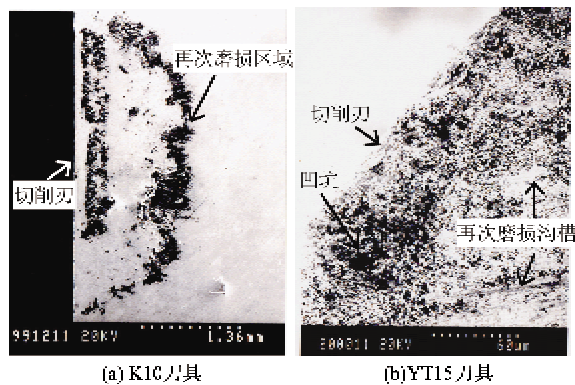


图 7 刀具前刀面磨损形态 SEM 照片

观察图 7(a)可以发现,切削该类材料时,首先在刀具刃口附近区域产生磨料磨损,形成凹凸不平的沟槽,然后由机械镶嵌作用在沟槽中生成楔形积屑瘤^[15],积屑瘤脱落后导致产生黏结磨损,在刃口附近区域形成凹坑,但黏结磨损的程度较轻,没有形成月牙洼型(见图 7(b))。前刀面离刃口稍远的区域(积屑瘤尾部后面)存在着再次由切屑底层 SiC 增强相引起的磨料磨损(见图 7(a)和图 7(b))。

2.4 刃口破损形态

切削 SiC 增强铝基复合材料时,由于前刀面刃口附近区域的磨料磨损和黏结磨损,极大地削弱了切削刃的强度。在进一步的切削过程中,刃口不断地受到 W 和 C 的冲击和碰撞(见图 1 磨损模型),会导致刀具产生掉尖、崩刃等破损失效,对高硬度材料的切削刀具(如 PCD)有时会成为主要的失效形式,如图 8 所示。

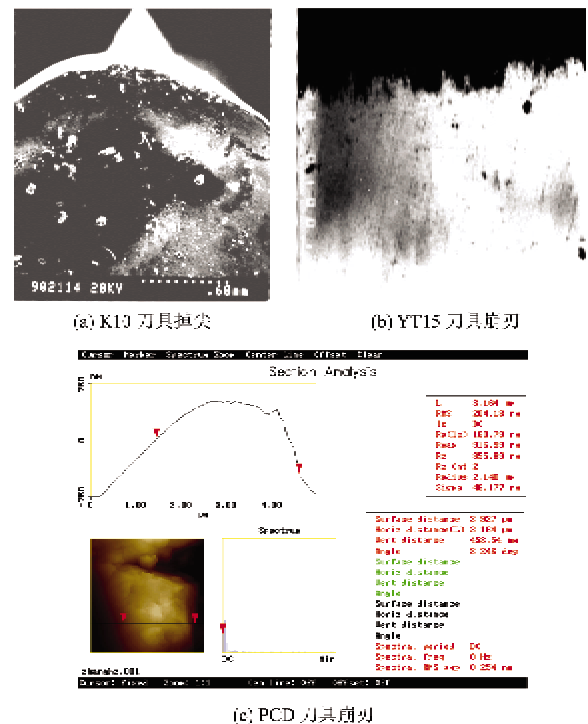


图 8 刀具破损形态

从图 8(c)可见,崩刃后的 PCD 刀具刃口钝圆半径已从加工前的 $1\mu\text{m}$ 增大到了 $1.6\sim 2.0\mu\text{m}$ 。

2.5 磨料磨损机理

2.5.1 微切削

切削该类铝基复合材料时,磨料(模型中的 W)在摩擦表面上存在着法向力和切向力两个分力,法向力的作用是使磨料压入刀具摩擦表面,切向力使磨料向切削方向推进。对后刀面上的磨料磨损来说,其法向力的主要来源是铝基体材料弹性变形后的恢复力,切向力主要是主切削力及摩擦力。对前刀面上的磨料磨损来说,其法向力的主要来源是主切削力沿垂直于前刀面方向的分力及铝基体材料弹性变形后的恢复力,而切向力主要为切削力沿平行于前刀面方向的分力及摩擦力。切削过程中,磨损模型中的 W 镶嵌在弹塑性变形恢复中的铝基体

中,当磨料的形状、位向、切削角度等适当时,磨料类似于一把“微型切削刀具”,对加工刀具的前刀面和后刀面进行微切削,并产生很小的切屑,如图 9 所示。从图中可发现磨损表面上存在着许多平行于切削方向的“微切削”沟槽。

2.5.2 多次塑变(微观犁皱)导致断裂

切削过程中,除了有“微切削刃”(模型中的 W)进行微切削外,还存在着许多发生滚动的磨料(模型中的 C),这些磨料多数具有副前角及较圆钝的特征。滚动过程中伴随着压入和犁皱,使磨损表面发生很大的变形,致使形成密麻的压坑和唇形凸缘,或沟槽两边和前缘的凸脊(见图 9)。这些变形遭到来自分流点 O 处的源源不断的反复塑性变形,导致材料加工硬化或其他变化,使裂纹逐渐成核和扩展,最终造成材料从表面脱落。

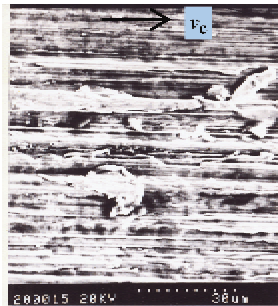


图 9 K10 刀具微切削表面

2.5.3 微观脆性断裂(剥落)

磨损过程中,由于磨料压入材料表面具有静态的应力状态,多数材料都会发生塑性变形。但较脆的刀具材料可能是断裂机理占主导地位,发生断裂磨损时,压痕周围的材料都会被磨损剥落。图 10 所示是 PCD 刀具刃口部位的微观脆性剥落。

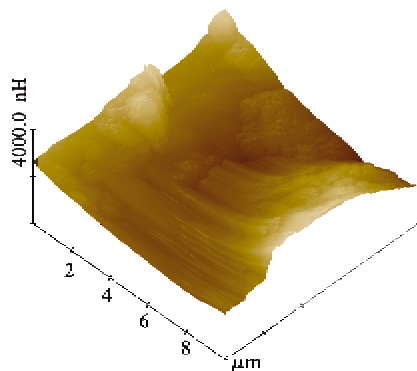


图 10 PCD 刃口微观脆性剥落

2.5.4 磨料磨损的影响因素

在 SiC 增强铝基复合材料的实际切削过程中,

上述三种机理同时对磨料磨损起作用,但同一时刻会存在一个主要的磨损机理,一般认为“微切削”起主要作用。

刀具磨料磨损的程度除受到材料内部组织和性能及外部磨损条件的影响外,还严重受控于刀具刃口钝圆半径 r_n 的大小。若 r_n 较大,磨损的程度就较严重。原因是:(1)此时,当切削材料经过断裂分流点 O 之后,铝基体材料会产生较大的弹塑性变形。变形恢复后,镶嵌在铝基体中的“微切削刀具”的裸露部分更大,且有更多数量的增强相按其非解理面进行断裂,导致微切削刃会更锋利。(2)弹性恢复所产生的压入力也更大,磨料会更深地切削到刀具的磨损部位,即相当于“微切削”的切削深度更大。(3)会产生更多数量的 SiC_w 或 SiC_p 碎块(见模型中的 C),增加了磨料的数量。

2.6 黏结磨损机理

从图 7(a)和图 7(b)可发现,在前刀面距离刃口约 0.05 ~ 0.30mm 的区域内存在着由黏结磨损产生的凹坑,黏结的机理是机械镶嵌。支持该观点的证据是:(1)切削时首先会在前刀面刃口附近产生剧烈的磨料磨损,导致前刀面的保护膜被去除,并进一步产生许多磨损沟槽,为接下来的黏结磨损创造了条件。(2)铝基体材料塑性较大,铝(Al)元素的化学活性较强,切削过程中切屑底层会不断有新鲜的表面产生,该表面具有很大的表面能,与刀具材料的亲和性很强。(3)切削该类铝基复合材料时多数情况下会产生节状切屑^[15],该类切屑的特点之一是切屑与刀具的接触区较短,故刀-屑接触区内存在着较大的压力和适当的温度。但温度不高,不足以产生冷焊作用。例如在精密切削工况下($v_c = 125\text{m/min}$, $f = 2\mu\text{m}$, $a_p = 3\mu\text{m}$),对于 K10 刀具切削温度可通过采用该刀具切削该类铝基复合材料时,用自然热电偶法测量得出的经验公式^[15]

$$\theta = 34.6 v_c^{0.4038} f^{0.1107} a_p^{0.104} \quad (1)$$

进行计算。式中, θ 为切削温度, v_c 为主切削速度, f 为进给速度, a_p 为背吃刀量。将工况代入式(1),计算得出切削温度为 66.42℃,显然不足以发生冷焊。在黏结物(即积屑瘤)剪切拉断而脱落的过程中,由于刀具组织的缺陷将刀具材料一同被带走便留下了小坑,形成了黏结磨损。

3 结论

本文首先建立了一个切合实际的 SiC 增强铝基

复合材料的切削模型,在该模型指导下对切削刀具后刀面和前刀面的磨损状况进行了研究。发现切削该类复合材料时刀具后刀面是主要的磨损区域,磨损机理为磨料磨损,且磨料磨损是“微切削”、“多次塑变(微观犁皱)”、“微观脆性断裂(剥落)”三种机理在同时起作用,但“微切削”起主要作用;切削开始后,首先在前刀面刃口附近由磨料磨损产生沟槽,随后由机械镶嵌作用生成积屑瘤,积屑瘤脱落时引起刀具前刀面的黏结磨损。黏结磨损的程度较轻,没有形成月牙洼型。刃口附近的黏结磨损削弱了切削刃,在加工表面上 SiC 增强相的冲击作用下较易导致切削刀具崩刃,对高硬度脆性材料刀具(如 PCD),这是主要的失效形式。切屑在擦过较小的积屑瘤背部尾端后,在离切削刃稍远处会再次与前刀面发生磨料磨损。

参考文献

- [1] Palanikumar K, Muthukrishnan N, Hariprasad K S. Surface roughness parameters optimization in machining A356/SiC/20p metal matrix composites by PCD tool using response surface methodology and desirability function. *Machining Science and Technology*, 2008, 12(4): 529-545
- [2] Ozben T, Kilickap E, Cakir O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1-3): 220-225
- [3] Cronjager L. Machining of fibre and particle-reinforced aluminium. *Annals of the CIRP*, 1992, 41(1): 63-66
- [4] Wang D Z, Han R D, Liu H M, et al. Wear model and characteristics between cutting tool and chips in ultraprecision machining of SiC reinforced aluminium composites. *Tribology*, 2005, 25(6): 569-573
- [5] Weinert K A. Consideration of tool wear mechanism when machining metal matrix composites (MMC). *Annals of the CIRP*, 1993, 42(1): 95-98
- [6] Gallab M E, Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites Part I: Tool performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 83: 151-158
- [7] Hooper R M, Henshall J L, Klopfer A. The wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1999, 17: 103-109
- [8] Kilichap E, Cakir O, Aksoy M A, et al. Study of wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. *Journal of material processing technology*, 2005, (164-165): 862-867
- [9] Cheung C F, Chan K C, Lee W B. Surface characterization in ultra-precision machining of Al/SiC metal matrix composites using data dependent system analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140: 141-146
- [10] Luliano L, Settineri L, Gatto A. High-speed turning experiments on metal matrix composites. *Composites Part A*, 1998, 29A: 1501-1509
- [11] Gallab M E, Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites part III: comprehensive tool wear models. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 101: 10-20
- [12] Caroline J, Andrews E, Feng H Y, et al. Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts. *Journal of material processing technology*, 2000, 102: 25-29
- [13] Cool W W. Machining MMC engineering components with polycrystalline diamond and diamond grinding. *Material Science and Technology*, 1998, 14: 892-895
- [14] Tomac N, Tonessen K. Machinability of particulate aluminum matrix composites. *Journal of CIRP*, 1992, (41): 55-58
- [15] 王大镇, 韩荣第, 刘华明等. 切削 SiC_w/LD_2 (SiC_w/LD_2) 复合材料时的楔形积屑瘤研究. 高技术通讯, 2001, 11(9): 93-96

Tool wear appearance and mechanism when cutting SiC reinforced aluminum matrix composites

Wang Dazhen*, Feng Peifeng*, Li Bo*, Liu Huaming**

(* College of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021)

(** College of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

For the wear appearance and mechanism of tools used in the turning of SiC reinforced aluminum matrix composites, a series of turning tests were performed by using carbide tools and polycrystalline diamond (PCD) tools. The root of the chip was obtained using a quick-stop cutting device for the study of the wear on the rake face of the tools. The wear appearance and its chemical composition on the rake face and the flank face of the tools were examined using a scanning electron microscope (SEM) and an atom force microscope (AFM) for the study of wear mechanism. The results indicated that the main wear area was on the flank face of the tools and the wear mechanism was abrasive wear. Abrasive wear was first caused by SiC reinforcements near the cutting edge on the rake face of the tools, the built-up edge was produced subsequently by mechanical enmeshing at the same region, and the falling off of the built-up edge resulted in felted wear. Since the felted wear was light, crater wear was not formed. Secondary abrasive wear was caused simultaneously by SiC reinforcements of the bottom of the chip at the region not far from the cutting edge on the rake face of the tools (that is, behind the back of the chip). The main mechanism of abrasive wear is micro-cutting.

Key words: SiC reinforcements, aluminum matrix composite, tool wear, abrasive wear, micro-cutting