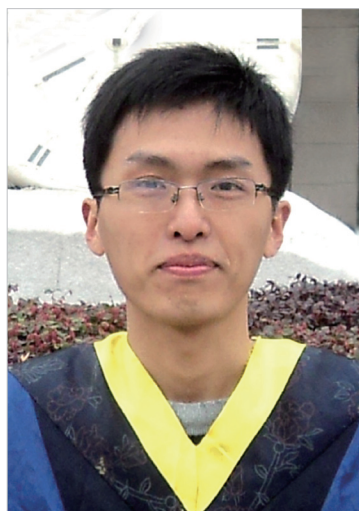


阻燃钛合金Ti40铣削加工性研究

Research on Machinability of Burn-Resistant Titanium Alloy Ti40

南京航空航天大学机电学院 刘玉庆 徐九华 丁文锋 吕东升



刘玉庆
硕士研究生,研究方向为难加工材料切削加工技术。

本文以钛合金 Ti40 作为工件材料,主要以刀具耐用度作为材料切削加工性的衡量指标,在切削油冷却条件下,采用硬质合金刀具以及顺铣试验方法,分析了该材料的铣削加工性能,研究了刀具失效形式和磨损机理,并与钛合金 TC4 进行了切削加工性的对比。

是一种单一 β 相钛合金, β 相稳定元素含量高达 40%,高温性能良好,长时间工作温度在 500℃左右。其作为我国自主研发的阻燃钛合金已研究多年,并在有关此合金的制备工艺、阻燃性能和阻燃机理、热处理工艺、热稳定性及高温变形和蠕变机理等方面都有了一定的研究成果^[5-9],但未见关于其切削加工性等基本问题的相关研究与报导。生产实践发现,钛合金不适合在干切削条件下加工,且 Ti40 是一种单一 β 相钛合金,对 β 钛合金来说,切削加工性较差,刀具寿命短,生产效率低^[10-11]。本文以钛合金 Ti40 作为工件材料,主要以刀具耐用度作为材料切削加工性的衡量指标,在切削油冷却条件下,采用硬质合金刀具以及顺铣试验方法,分析了该材料的铣削加工性能,研究了刀具失效形式和磨损机理,并与钛合金 TC4 进行了切削加工性的

对比。

试验条件和方法

1 试验材料与性能

试验材料选用尺寸为 240mm×90mm×50mm 的钛合金 Ti40,其名义成分为 Ti-25V-15Cr-0.2Si,热处理状态为淬火、高温回火后固溶时效处理,其与 TC4 的成分和性能参数对比分别见表 1^[12]和表 2^[9,12]。从表 1 可以看出,与 TC4 相比, Ti40 是一种高合金化的单一 β 相钛合金, β 相稳定元素 V 和 Cr 含量高达近 40%,较 TC4 具备更好的力学性能。材料经过切割、镶样、粗抛和精抛,采用金相腐蚀液配比为 2%HF+4%HNO₃+94%H₂O (体积比),得到其与 TC4 的金相组织形貌显微照片如图 1 (a)和(b)所示。可以看出, Ti40 金相组织为等轴晶粒,晶粒粗大,尺寸在 50~200 μm 左右,大

钛合金因优异的物理力学和化学特性(如密度低、比强度高、耐腐蚀性好等特点)而被广泛应用于航空航天等领域^[1]。虽然其综合机械性能良好,但其可燃性却极大地限制了其在一些苛刻环境条件下的应用,如高性能航空发动机的高温、高压气流环境等,在这样的背景下,阻燃钛合金应运而生^[2-3]。20世纪90年代,国际上已研制出多种阻燃钛合金,如美国的 Alloy C 合金、俄罗斯的 BTT-1 和 BTT-3 合金。国内也于 1993 年研制成功阻燃钛合金 Ti40 和 Ti14。其中, Ti40 具备更好的综合力学性能^[4],它

约为 TC4 中 α 相晶粒大小的 10~20 倍。

2 试验方法与过程

铣削试验在 XS5040 型立式铣床

表1 钛合金Ti40与TC4成分质量分数 %

元素	Al	V	Cr	Fe	Si	Ti
Ti40	—	24~28	13~17	0.2	0.2	余量
TC4	5.5~6.8	4.0~5.5	—	0.3	0.15	余量

表2 室温下 (20℃) 钛合金Ti40与TC4的性能参数

材料	Ti40	TC4
密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	5.18	5.6
热导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	5.6	7.95
抗拉强度 / MPa	980	950
屈服强度 / MPa	940	860
延伸率 / %	8	15
弹性模量 / GPa	104	110
熔点 / °C	1630	1400
硬度 HRC	36	30

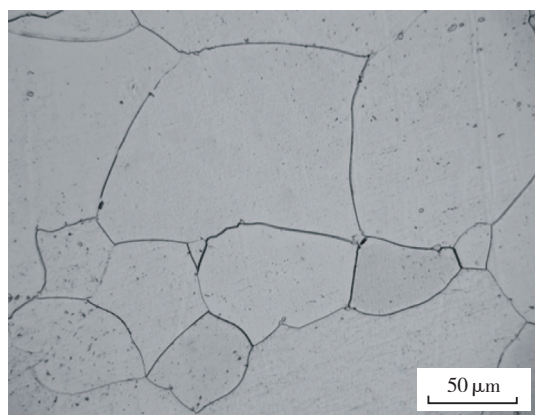
上进行,该铣床电机功率 13kW,最高转速 2500r/min,工作台横向最大进给速度为 2500mm/min,工作台尺寸为 1600mm×400mm;工件材料为钛合金 Ti40 和 TC4。

结合 3 种不同涂层硬质合金刀具的试验结果,如表 3 所示, Ti (C, N)- Al_2O_3 涂层刀具表现出较好的切削性能,故刀具耐用度试验选取 Ti (C, N)- Al_2O_3 多层 CVD 涂层机夹式硬质合金可转位刀片(规格为 XOEX120431R-M07, MS2500), 配合使用相应刀柄(规格为 R217.69-2525.3-12-3A)进行单齿顺铣加工,

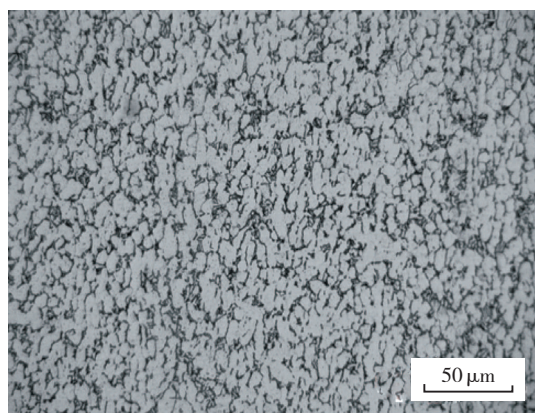
削温度进行试验研究,固定轴向切深 $a_p=3\text{mm}$,径向切宽 $a_e=1\text{mm}$,每齿进给量 $f_z=0.1\text{mm/z}$,切削温度采用夹丝(康铜)半人工热电偶法进行测量,并结合 Ti40-康铜热电偶温度标定曲线,得到切削温度的实际数值,进而分析不同切削速度条件对刀具耐用度、磨损形式和切削温度的影响规律,图 3 和图 4 分别为 Ti40 铣削加工测温现场、测温所用温度采集卡和测温原始信号。为增大材料去除率,提高加工效率,选用粗加工用量为:切削速度 $v=30\text{m/min}$,轴向切深 $a_p=1.5\text{mm}$,径向切宽选为全刀

表3 不同涂层硬质合金刀具铣削Ti40试验结果

切削参数	涂层	试验结果
切削速度 $v=60\text{m/min}$,轴向切深 $a_p=3\text{mm}$,径向切宽 $a_e=1\text{mm}$,每齿进给量 $f_z=0.1\text{mm/z}$	无	刀片发红,耐用度不足 3min
	TiN	刀具破损快,耐用度 14min 左右
	Ti (C, N)- Al_2O_3	刀具耐用度 25min



(a) Ti40



(b) TC4

图1 钛合金Ti40和TC4的金相组织



(a) 硬质合金机夹式可转位刀片



(b) 刀柄

图2 试验所用刀具和刀柄

刀片和刀柄见图 2。切削油选用 30# 润滑油;刀柄直径 $D=25\text{mm}$,刀具安装角度为前角 22° 、后角 12° ,刃倾角 11° 、刀尖圆弧半径 3.1mm 。

采用切削速度单因素试验法对刀具耐用度和切

宽 $a_e=D=25\text{mm}$,每齿进给量 $f_z=0.1\text{mm/z}$,同时在同样的参数下铣削加工 TC4,以对比两种材料的切削加工性能。利用光学显微镜观察刀具刃口形貌以及前、后刀面的磨损形态,通过刀具磨损测量软件测量后刀面磨损平均值 VB 和最大值 VB_{\max} ,精加工和粗加工分别以 VB 和 VB_{\max} 作为刀具磨钝的评判标准,规定当 $VB=0.2\text{mm}$ 和

$VB_{\max}=0.6\text{mm}$ 时即认为刀具失效。同时借助日本电子公司 Hitachi S-3400 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线能谱仪 (EDS) 观察刀具磨损形态,分析刀具表面材料成分,以分析刀具磨损机理。

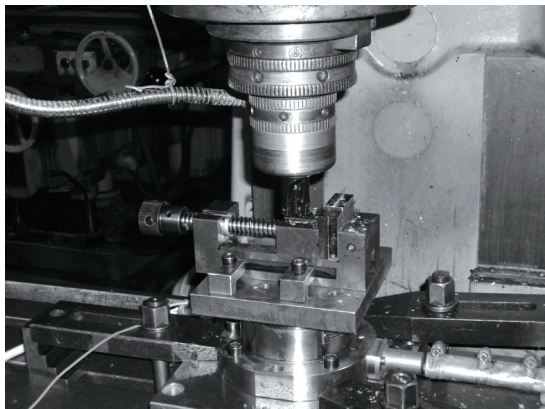


图3 Ti40铣削温度测量现场图

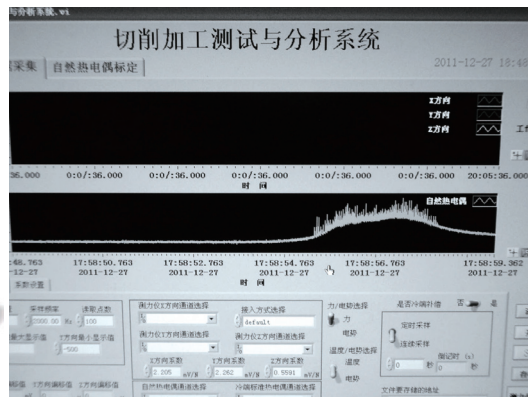


图4 温度数据采集卡和测温原始信号图

试验结果与分析

1 刀具磨损与耐用度

刀具耐用度是衡量材料切削加工性的主要指标,试验中对刀具磨损过程进行跟踪,得到在 $v=30\text{m/min}$ 、 60m/min 、 80m/min 、 100m/min 4种切削速度条件下的刀具磨损曲线如图5所示。可以看出,一方面,刀具耐用度随着切削速度的提高而显著下降,另一方面,当后刀面均匀磨损达到约 0.14mm 时刀具产生剧烈磨损,甚至是在初期磨损阶段就在前刀面或切削刃处产生剥落或微崩刃,进而在短时间内产生不同程度的破损。在切削速度更高的条件下甚至产生严重的沟槽,刀具材料的粘结撕裂引起了大面积剥落,同时切削加工过程中切削温度高,刀片整体发红,切削油因高温蒸发而产生大量的油雾。由于刀具破损严重,切削过程已变为单纯的刀具与工件的摩擦挤压,切削过程难以进行。在切削速度为 $v=100\text{m/min}$ 条件下达到了最高为 $375\text{mm}^3/\text{min}$ 的材料去除率,但较低的耐用度显然还远远无法满足材料切削加工的要求。严重的刀具破损情况反映了 Ti40 钛合金较差的切削加工性。

试验发现,4种不同速度条件以及全刀宽条件下刀具的耐用度较低,失效形式以破损为主,见表4。在 $v=30\text{m/min}$ 的低速条件下,刀具后刀面磨损相对均匀,但在距离刀尖为

3mm ,即切深线位置,磨损严重,见图6(a);随着速度的增加,刀耐用度急剧下降,一般不超过 25min ,速度达到 100m/min 后,破损现象更为严重,见图6(b),此时耐用度较 $v=30\text{m/min}$ 下降了 55% 。全刀宽铣削条件下,严重的沟槽磨损使刀具耐用度甚至低于 5min ,如图7所示。

2 铣削温度

试验中用夹丝半

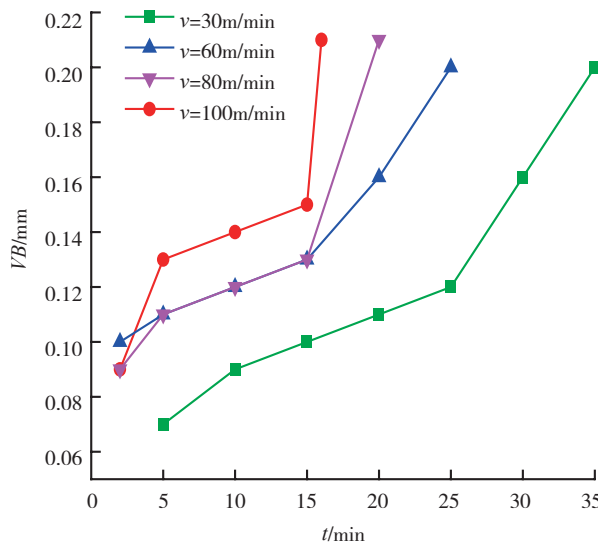


图5 不同切削速度条件下后刀面磨损曲线 ($a_e=1\text{mm}$, $a_p=3\text{mm}$, $f_z=0.1\text{mm/z}$)

表4 多层CVD涂层刀具耐用度与失效形式

$v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	a_e/mm	a_p/mm	$f_z/(\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	t/min	失效形式
30	1	3	0.1	35	磨损
60	1	3	0.1	25	破损
80	1	3	0.1	20	破损
100	1	3	0.1	16	破损
30	25	1.5	0.1	5	破损

人工热电偶法对不同速度下的铣削温度进行了测量,发现在切削速度为 30m/min 时铣削温度已达到了近 360°C ,速度增加到 100m/min 时温度上升到了 560°C ,如图8所示。根据耿国盛研究^[13]可知,钛合金 TC4 在相同加工条件下,在速度为 100m/min 时,切削温度约为 $150\sim 200^\circ\text{C}$,远

低于 Ti40 合金的切削温度。高的切削温度一方面是由于刀具与工件摩擦系数大,切屑流经前刀面时所做的摩擦功大,使其接触表面温度更高;另一方面,材料热传导率低,切削过程产生的切削热积聚于切削刃附近不易散发,造成温度在切削区域附近快速上升。而且,工件弹性模量小会

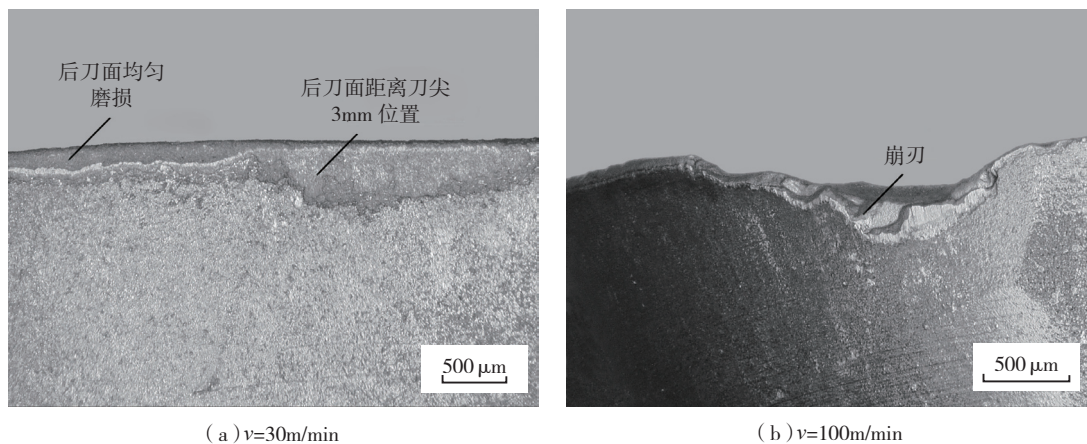


图6 不同切削速度条件下后刀面磨损破损形貌 ($a_e=1\text{mm}$, $a_p=3\text{mm}$, $f_z=0.1\text{mm/z}$)

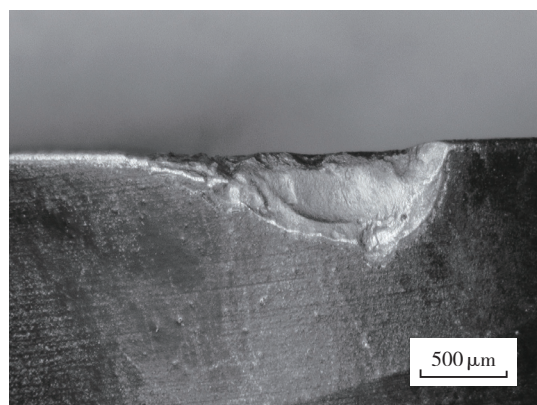


图7 全刀宽铣削条件下刀具后刀面磨损形貌 ($v=30\text{m/min}$, $a_e=25\text{mm}$, $a_p=1.5\text{mm}$, $f_z=0.1\text{mm/z}$)

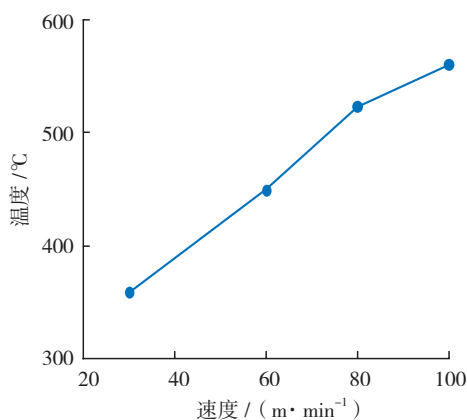


图8 切削温度随切削速度的变化曲线

面发生摩擦刻划,使得此处磨损最为严重,沟槽磨损的产生加快了刀具磨损速度,很大程度上降低了耐用度。同时硬质合金刀片硬度高、脆性大,组织上可能不均匀,在加工硬化以及交变的应力作用下,会在内部晶界处产生微裂纹,并逐步扩展,见图10。裂纹的形成使刀具在局部形成应力集中,进而造成刀具材料剥落和崩刃,最终使刀具失效。

热应力产生的裂纹是刀具失效的原因之一。除此之外,工件材料在刀具表面的粘结也是引起刀

导致已加工表面回弹,使刀具后刀面与工件摩擦更为严重。同时, Ti40 是一种高温钛合金,高温性能好,比普通钛合金在高温条件下更能保持较高的强度,而此时,刀具材料会相应地发生软化,切削过程转变成切削刃与工件的挤压过程,造成刀具材料会在摩擦力的作用下容易被剥离刀具基体,见图9。

3 刀具磨损机理分析

铣削加工作为断续切削产生的振动和冲击使刀具表面受到交变的应力作用和

切屑的周期性击打、摩擦升温 and 空切冷却,在切削油的冷却作用下,刀具表面急剧变热和变冷,从而受到反复的热应力、摩擦应力。对于切削刃上切深线的位置,在加工过程中产生持续的应力集中,切削刃不断与工件表

具磨损剧烈的重要因素,图11为刀具后刀面粘结物和粘结物 EDS 扫描图。由图11(a)不难看出,钛合金材料在刀具后刀面存在严重的粘刀现象。

试验中钛合金 Ti40 除了含有 Ti

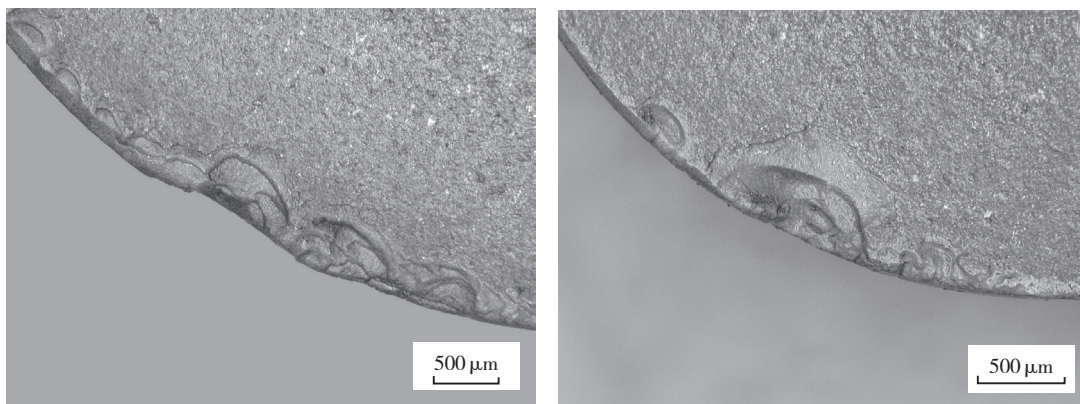


图9 刀具前刀面磨损形貌 ($a_e=1\text{mm}$, $a_p=3\text{mm}$, $f_z=0.1\text{mm/z}$)

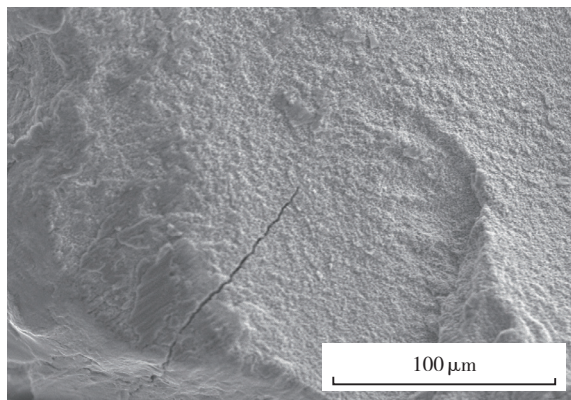
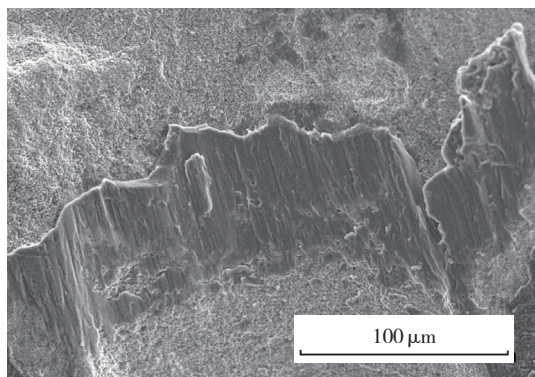
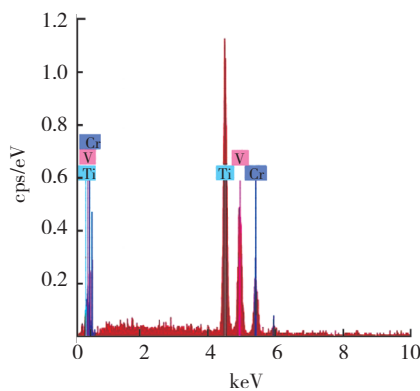


图10 刀具前刀面形成的裂纹



(a)后刀面工件材料粘附现象



(b)粘附处 EDS 分析图

图11 刀具后刀面粘附磨损现象图

之外,还含有 V 和 Cr 等主要元素。图 11 (b) 为图 11 (a) 中粘附物的 EDS 能谱分析结果。粘附处能谱分析的结果表明,刀具表面含有大量的 Ti、V 与 Cr 元素,且由表 5 可见,扫描区域元素含量与 Ti40 名义成分 (Ti-25V-15Cr) 非常相近,说明刀具前后刀面均粘附有工件材料。切削过程中,粘附是材料发生塑性变形而产生的所谓冷焊现象,主要发生在足够大的压力和足够高的温度作用下。由于钛合金较高的化学活性,在一定的高温范围内,工件材料与刀具材料发生较强的亲和作用,刀具中的晶粒会粘附到切屑和工件当中,进而被切屑和工件材料带走,造成粘附磨损。随着切削速度的提高,刀具与工

表5 扫描点元素质量百分比 %

元素	Ti	V	Cr
质量百分比	63	23	14

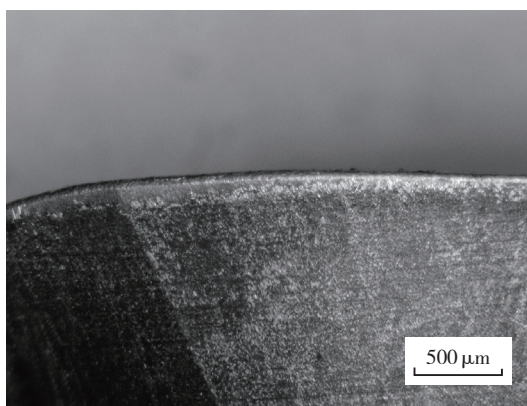


图12 全刀宽铣削Ti40刀具后刀面磨损形貌
($v=30\text{m/min}$, $a_e=1\text{mm}$, $a_p=1\text{mm}$, $f_z=0.1\text{mm/z}$, $t=30\text{min}$)

同样的切削参数和冷却条件下对钛合金 TC4 进行了全刀宽加工。结果表明,刀具在切削进行 30min 后后刀面磨损仅为 0.1mm,刀具还处于初期磨损阶段,且切削过程温度较低,刀具磨损均匀,均无破损现象发生,如图 12 所示,显示出 Ti40 的切削加工性远差于 TC4。

件相对运动加剧,切削温度升高,刀具材料中的粘结剂在高温下粘结强度下降,刀具材料相应发生软化,碳化钨等粒子易于分离出刀具基体,造成更为严重的粘结,使刀具耐用度进一步降低。

为了对比不同材料的加工性,研究中在

结 论

本文采用涂层硬质合金刀具对新型阻燃 β 型钛合金 Ti40 进行了铣削加工性研究,采用刀具磨损测量系统和扫描电镜及能谱分析等手段,同时与钛合金 TC4 进行对比研究,分析刀具失效形式及磨损形态、机理。研究发现阻燃钛合金 Ti40 切削加工性远差于钛合金 TC4,涂层硬质合金刀具耐用度低,主要失效形式为

破损,同时剥落和崩刃现象显著。刀具磨损过程中,磨损带非均匀发展,且沟槽磨损严重,普遍在初期磨损之后进入剧烈磨损阶段,仅在切削速度很低的条件下表现出正常磨损,提高切削速度和全刀宽切削条件会显著加剧刀具磨损,降低刀具寿命;另一方面, Ti40 材料铣削加工过程中温度高,是常规 $\alpha + \beta$ 型钛合金 TC4 同等加工条件下的 3~4 倍。温度冲击使刀具内部应力过大而产生裂纹,进而造成刀具材料脱落。

综上所述,可以发现,现有试验条件下,较高切削速度及全刀宽不适合加工钛合金 Ti40,适宜切削速度为 60m/min 以下。加工效率低和刀具破损严重是 Ti40 铣削加工存在的主要问题。鉴于此,后续研究中有必要在已有研究

成果基础之上,从优化刀具几何参数和改善冷却条件入手,优化切削用量,以提高生产效率。

本文共有参考文献 13 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)