

超硬刀具高速切削钛合金 研究进展

Advances in High Speed Machining of Titanium Alloys With
Superhard Cutting Tools

南京航空航天大学机电学院 徐九华 刘 鹏 傅玉灿



徐九华

教育部长江学者特聘教授,南京航空航天大学教授、博士生导师。主要从事高性能切削/磨削、超精密加工和抗疲劳制造技术研究。主持承担了国家级和省部级科研项目30余项。获国家科学技术进步奖二等奖1项,省部级科技进步奖8项。发表学术论文170余篇,授权国家发明专利7项。

在航空工业中,大型框、梁和壁板类钛合金零件得到广泛应用,这些零件的余量通常是采用铣削加工方式来去除。目前国内航空企业常用硬质合金刀具来铣削加工钛合金,而当切削速度升高以后会导致硬质合金

国内要在超硬刀具高速切削钛合金关键技术方面取得突破,须通过进一步合理地选择刀具材料及几何参数,优选切削用量,针对不同的加工对象制定相应的加工工艺规范,最终高效率地加工出表面完整性优异的航空零件。

刀具的磨损加剧,为了保证刀具的耐用度,钛合金零件的铣削加工往往是在较低切速(粗加工30m/min,精加工100m/min)下进行的,加工效率低(材料去除率3~13cm³/min)。因此,在钛合金零件的制造过程中切削加工性很差,具体表现为:(1)加工效率低;(2)刀具磨损严重;(3)加工精度和表面质量不稳定。因此,寻求一种高效率、低成本的加工方法已成为目前关注的研究热点。

超硬刀具高速切削钛合金的 国内外研究现状

超硬刀具材料具有高热导率、高硬度、高耐磨性等优点,合理利用超硬材料刀具会显著改善钛合金材料的切削加工性,在生产中有着广阔的应用前景。目前,在我国超硬刀具材料主要用于汽车和木材加工领域,在航空航天领域应用较少。近年来国

外已开展超硬刀具高速切削钛合金的研究,国内相关研究报道甚少。

1998年,意大利学者E. Kuljanic利用 $\phi 32\text{mm}$ 的PCD机夹刀具铣削TC4钛合金材料,研究了钛合金切屑形态、刀具耐用度以及表面质量。文献指出:(1)切屑形状为典型的层状切屑;(2)没有发现月牙洼或后刀面磨损;(3)在以上切削用量下,切削108min时,刀具基本上没有磨损的痕迹,刀具耐用度 T 为381min。如此长时间的刀具耐用度是因为在PCD刀具的表面形成TiC薄膜,防止了刀具的磨损;(4)表面粗糙度与有无冷却液没有太大关系,表面粗糙度最小值 $R_a=0.9\mu\text{m}$,最大值 $R_a=3.8\mu\text{m}$,平均值 $R_a=1.4\mu\text{m}$ 。当刀具磨损后,随着自激振动的出现,表面粗糙度值变大^[1]。

2000年,印度学者Z.A. Zoya评价了PCBN刀具高速车削 $\alpha+\beta$ 型钛合金(含Al 4.5%, Mn 4.5%)时的刀

具切削性能。研究表明:(1)切削温度在700℃左右为一个临界值,高于700℃时刀具耐用度明显下降;(2)在切削速度 $v=220\text{m/min}$ 时,PCBN刀具能发挥比较稳定的切削性能,而在 $v=185\text{m/min}$ 时,加工表面的表面质量最好,因此推荐PCBN车削钛合金的切削速度为185~220m/min^[2]。

2001年,英国学者Farhad Nabhani进行了PCBN、PCD和涂层硬质合金刀具加工TA48(质量分数%):Al:5;Mo:4;Sn:2~2.5;Si:6~7;Fe:2max;H:0.015;O:0.25;N:0.05;Ti:其余。钛合金的常规车削试验对刀具磨损进行了研究,当 $v=75\text{m/min}$ 、 $f=0.25\text{mm/r}$ 、 $a_p=1\text{mm}$ 时,切削过程中不使用切削液。硬质合金上的涂层没有有效的保护作用,涂层很快就被磨损掉。在硬质合金和PCBN刀具上观察到严重的扩散磨损,PCD刀具则没有明显的扩散磨损。PCBN刀具与硬质合金刀具相比,磨损率较低,表面质量较高。PCD的磨损率最低,加工出的表面质量最好,并指出PCD刀具是非常适合加工钛合金的刀具材料^[3]。

2003年,法国Corduan等分别采用PCD、PCBN、TiB₂涂层硬质合金刀具高速车削钛合金TC4,采用扫描电镜观察刀具磨损形貌,探讨了3种刀具的磨损机理。在 $v=120\text{m/min}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ 、 $a_p=1\text{mm}$ 条件下,PCBN刀片的前后刀面均出现沟槽且有黏结层。在 $v=250\text{m/min}$ 、 $f=0.15\text{mm/r}$ 、 $a_p=0.94\text{mm}$ 条件下,PCD前刀面上有黏结层但没有PCBN刀片严重。在 $v=100\text{m/min}$ 、 $f=0.15\text{mm/r}$ 、 $a_p=0.9\text{mm}$ 条件下,刀具表面无沟纹,但有后刀面磨损和月牙洼磨损。

磨损沟纹的产生机理:切削区的区域温度高,压力小,极易发生相变。PCD刀具中的金刚石易石墨化,PCBN刀具中CBN转变为HBN。这就使得刀具材料的力学性能大为下降,刀具出现沟纹。用拉曼谱定性分

析刀具表面沟槽,证实沟纹中含石墨和HBN相。

月牙洼磨损产生机理:TC4与刀片相互扩散,刀具化学降解,黏结层产生,随后刀具中材料颗粒脱落,黏结层逐渐消失。以此循环,产生月牙洼磨损^[4]。

2005年,新加坡学者A. Rahmath Zareena利用BCBN、PCBN、PCD3种刀片对钛合金TC4进行了高速铣削对比试验,对刀具磨损进行了研究。指出普通PCBN刀具的主要磨损原因为扩散磨损。高温下PCD刀片会与钛合金材料发生化学反应,刀具材料中的C元素和Co元素会扩散到切屑中,从而影响刀具耐用度。BCBN中没有易与钛合金发生反应的Co元素,切屑中没有发现刀具材料中元素的扩散,使得BCBN刀具有更长的刀具耐用度。高压冷却液对刀屑接触面起到润滑和冷却作用,防止了刀屑间的焊接和积屑瘤的产生,从而提高了刀具耐用度和表面质量^[5-6]。

2005年,英国学者E.O. Ezugwu利用不同CBN含量的PCBN刀具以及未涂层硬质合金刀具车削Ti-Al6-V4,重点研究了刀具磨损和刀具耐用度,切削过程中使用普通和高压冷却液。结果表明:(1)PCBN刀具的切削性能比硬质合金刀具的切削性能还差,随着CBN含量的增加,加剧了缺口磨损,导致刀具的切削性能越来越差;(2)CBN含量较低的刀具对冷却液更加敏感,随着冷却液的增加刀具耐用度得到提高;(3)CBN含量低的刀具和硬质合金刀具刀尖磨损比较严重,而CBN含量较高的刀具边界磨损和崩刃现象比较严重;(4)PCBN刀具对表面质量没有不利效果^[7]。

2007年,马来西亚A.K.M Nurul Amin利用 $\phi 32\text{mm}$ 的未涂层WC-Co和PCD机夹刀具进行了钛合金切削对比试验,对刀具磨损和表面质量进行了研究。研究表明:(1)同样的磨损标准($VB=0.3\text{mm}$)下,PCD刀片

的材料去除量比WC-Co刀片高。试验表明其他切削用量不变的条件下,WC-Co在 $v=40\text{m/min}$ 时的金属去除量最高,PCD刀片在 $v=120\text{m/min}$ 时的金属去除量最高,此时,PCD刀片的金属去除量是WC-Co刀片的2倍左右;(2)在给定的切削用量下,硬质合金刀片适用的切削速度在40m/min左右,PCD刀片适用的切削速度在120m/min左右,超过这个速度,刀具剧烈磨损;(3)PCD刀片加工时的平均表面粗糙度低于硬质合金刀具,这是由于PCD刀具的磨损率比较低、颤振较小。PCD刀具切削速度达到160m/min,硬质合金刀具的切削速度达到120m/min时,表面质量接近于抛光;(4)综合考虑金属去除量和表面质量,推荐硬质合金刀具的切削速度范围为40~80m/min,PCD刀具的切削速度范围为120~160m/min^[8]。

2007年,Ezugwu等还采用PCD刀具对TC4进行了高速精车试验,比较了高压冷却液与传统冷却液冷却条件下的表面完整性。指出高压射流辅助切削加工表面粗糙度 R_a 均小于 $1.6\mu\text{m}$,且得到的刀具耐用度更长。无论是传统冷却还是高压射流冷却,没有物理损伤,如裂纹、撕裂、黏结等。精车后微观组织没有观察到塑性变形。采用高压射流辅助切削能明显减小加工硬化效应。传统冷却方式,冷却无规则,加工硬化效应显著。这与E. Kuljanic的研究结果相一致^[9]。

2008年,山东大学刘战强等^[10]采用PCBN刀具对钛合金TC4进行了高速车削试验,对刀具的磨损机理进行了研究。在 $v=80\text{m/min}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ 、 $a_p=0.25\text{mm}$ 时,刀具前刀面上存在白色层状物,能谱分析显示刀具前刀面上还存在氧元素,故刀具主要磨损机理为黏结磨损和氧化磨损,且PCBN刀具相对未涂层和涂层硬质合金刀具寿命最高^[10]。

以上对超硬刀具高速切削钛合金的研究主要集中在切屑形成、刀具

磨损和表面质量等方面,重点研究了超硬刀具的耐用度和刀具磨损,得出在钛合金精加工时,超硬刀具能在较高的切削速度下切削钛合金材料。下文将重点阐述南京航空航天大学在超硬刀具高速铣削钛合金方面关于刀具设计、切削力、切削温度、刀具磨损和加工表面完整性等的研究。

超硬刀具在钛合金高速切削中的应用研究

1 高速铣削钛合金时超硬刀具的损伤与设计

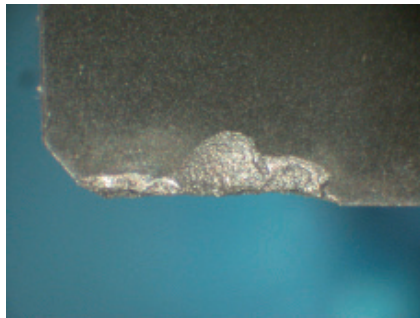
刀具是高速切削加工中最活跃的因素之一,它直接影响着加工效率、制造成本和产品的加工精度。刀具在高速加工过程中要承受高温、高压、摩擦、冲击和振动,因此其硬度和耐磨性、强度和韧性、耐热性、工艺性能和经济性等基本性能是实现高速加工的关键因素。刀具的正确选择要考虑刀具与工件的合理匹配、切削加工方式和加工参数等因素的影响。

最初研究选用PCD机夹刀具, $\gamma_o=11^\circ$, $\alpha_o=24^\circ$, 在 $v=250\text{m/min}$ 、 $f_z=0.05\text{mm/z}$ 、 $a_e=0.5\text{mm}$ 、 $a_p=3\text{mm}$ 、顺铣、空气油雾冷却条件下,刀具耐用度为39min,刀具失效形式以崩刃为主。图1为刀具达到磨钝标准时的图片,可以看出,PCD刀具整个刀刃失效,这主要因PCD刀具前角和后角过大,刀具强度不够而导致的严重崩刃现象。

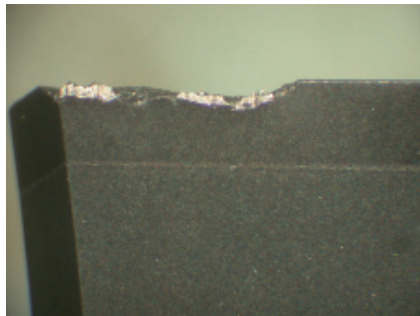
经过改进刀具几何参数,选用刀具 $\gamma_o=0^\circ$, $\alpha_o=8^\circ$, PCD材料为CTB010,粒度 $10\mu\text{m}$,基体为硬质合金。在相同切削参数、顺铣和空气油雾冷却条件下,PCD刀片切削30min后,刀具磨损形态,如图2所示。由图2可以看出,PCD刀片的切削刃没有出现崩刃现象。

2 切削力和切削温度

切削力和切削温度试验在Mikron UCP710五坐标高速加工中心上进行,采用Kistler9265B动态测力仪对切削力进行测量,采用夹丝半人

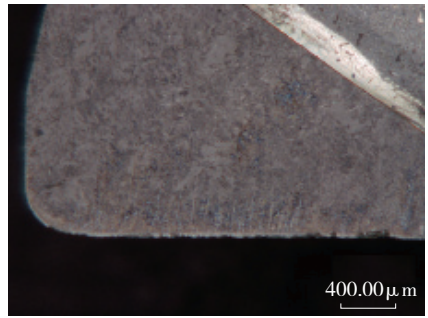


(a)前刀面

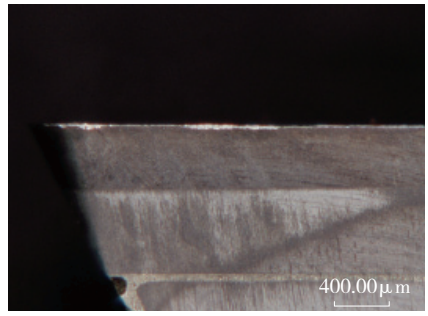


(b)后刀面

图1 PCD刀具损伤形态



(a)前刀面



(b)后刀面

图2 改进的PCD刀片前后刀面磨损形态

工热电偶方法对铣削温度进行测量。试验用刀具为改进的PCD机夹刀片,工件材料为钛合金TA15(退火状态),其名义成分为Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V。采用单因素试验,考察不同铣削速度下切削力和切削温度的变化规律,其他切削参数同上。图3为刀具磨损初期PCD刀具铣削TA15钛合金时的动态切削力。

当 $v=200\sim 600\text{m/min}$ 时,PCD刀具的 F_y 和 F_z 均变化不大,而 F_x 在 $v<300\text{m/min}$ 时切削力随着切削速度的提高有较明显的升高,当 $v>300\text{m/min}$ 时,随着切削速度的增加,切削力呈现下降趋势,如图4所示。这主要是因为:一方面,由于切削速度的增大,工件材料的应变硬化程度增加,剪切区的变形抗力增大;另一方面,由于铣削时断续切削过程,其产生的动态切削力和切削力冲击会增大。这两方面的综合作用使得切削力呈增大趋势。与此同时,随着切削速

度的增加,切削温度会升高,从而对工件材料产生软化作用,致使切削力下降;另一方面,切削速度提高导致的切削温度上升也会使被加工材料软化,摩擦系数减小,致使切削力减小。所以,切削速度对切削力的影响是两方面综合作用的结果。在 $100\sim 300\text{m/min}$ 速度范围内,应变和应变率强化对切削力的影响大于热软化对切削力的作用,因而切削力呈增大趋势。对TA15的铣削温度测量表明,当 v 从 300m/min 增大到 600m/min 时,其相应的铣削温度大约从 400°C 增加到

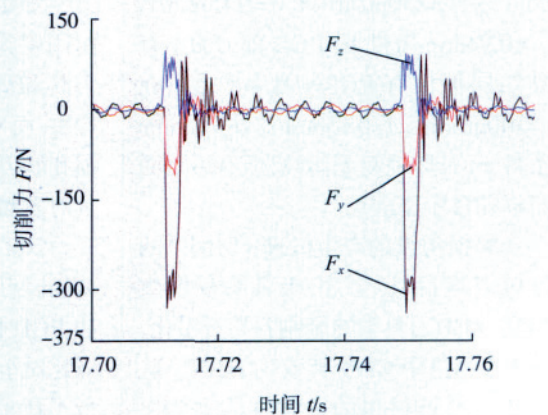


图3 切削力原始信号图

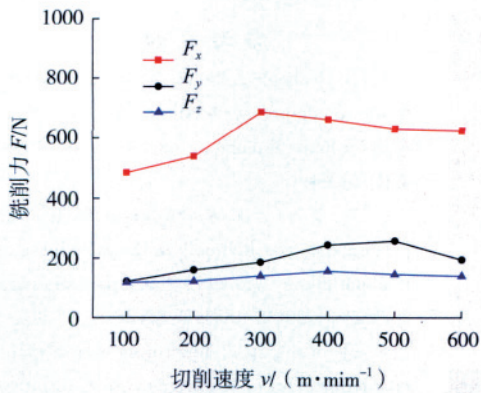


图4 切削速度与切削力关系

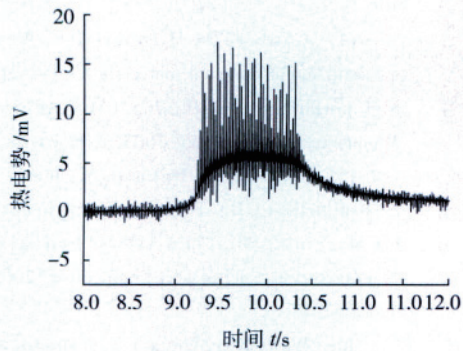


图5 热电势原始信号

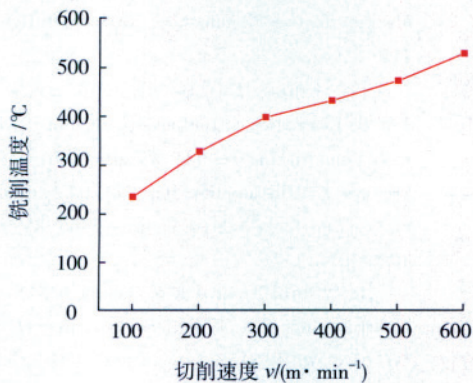


图6 切削速度与切削温度关系

约 550℃。此时其强度极限 σ_b 将下降到 100MPa 左右^[11]。所以,随着切削速度的增加,超过 300m/min 时,切削温度的升高所致的钛合金软化呈主要趋势,而应变硬化和动态切削力的增加相对较弱,导致切削力减小。

图 5 为半人工夹丝自然热电偶法所测得的切削温度的原始信号图。本文取热电势最大值对应的温度值作为切削温度值。在 200~600m/min 速度范围内,PCD 刀具切削温度随着

切削速度的增加而增加,如图 6 所示。随着切削速度的提高,切削所做的功增多,在单位时间内切削产生的热量增加,从而使得切削温度升高;另一方面,由于切削速度增大,后刀面与已加工表面以及前刀面与切屑之间的摩擦热增加,从而使得切削温度升高。与此同时,切削速度的提高会使得切削层金属来不及变形,变形程度降低,故切削温度并不随切削速度的提高而成比例升高。

3 刀具耐用度

利用改进后的刀具与硬质合金刀具进行钛合金高速对比切削试验,切削参数为 $v=250\text{m}/\text{min}$ 、 $350\text{m}/\text{min}$ 、 $f_z=0.08\text{mm}/z$ 、 $a_e=1\text{mm}$ 、 $a_p=3\text{mm}$,其他试验条件同上。

PCD 刀具和硬质合金刀具的磨损曲线,如图 7 所示。PCD 刀具在 $v=250\text{m}/\text{min}$ 时的 $T=60\text{min}$ 、 $v=350\text{m}/\text{min}$ 时 $T=85\text{min}$ 。这是因为切削速度达到 350m/min 后,切削温度升高,刀具与工件之间的摩擦系数下降,切屑变形系数减小,使得切削力有下降的趋势;切削速度提高以后,PCD 刀具的切削稳定性提高,切削过程中的微崩刃现象明显减少,导致刀具磨损减缓。

硬质合金刀具在 $v=250\text{m}/\text{min}$ 时, $T=40\text{min}$; 在 $v=350\text{m}/\text{min}$ 时, $T=5\text{min}$ 。同样的切削条件下,PCD 刀具的寿命要明显高于硬质合金刀具。这主要是因为与硬质合金刀具相比,PCD 刀具具有极高的硬度和耐磨性,在高速切削钛合金时能够减缓刀具的磨损;与硬质

合金相比,所有金刚石刀具材料均毫无例外地为热的良导体。因此金刚石刀具材料在切削过程中能迅速地将热量从刀具的尖端传递到刀体内部,从而有效减少金刚石出现热损伤的可能性^[12]和降低切削温度。因此硬质合金刀具切削温度要高于 PCD 的切削温度,容易发生热化学磨损,从而加剧硬质合金刀具的磨损。

4 加工表面完整性

PCD 刀具高速切削钛合金时表面粗糙度随切削速度的变化曲线,如图 8 所示,可以看出随着切削速度的增加,表面粗糙度呈先增大后减小的趋势。这主要由于随着切削速度的提高,切削振动减小,切削过程平稳,切削温度升高,切削力减小,工件的塑性变形减小,因而表面粗糙度值减小。在刀具磨损不严重的情况下,试验范围内 PCD 刀具高速切削钛合金 TA15 的表面粗糙度是比较低的, R_a 不超过 $0.3\mu\text{m}$ 。

图 9 为 PCD 刀具切削钛合金时,不同速度下的加工硬化情况。试验中所用 TA15 钛合金母材的硬度大约在 HV330~360 之间。由图可以看出,无论是低速还是高速下,所产生的加工硬化不明显,切削速度的提高,并不会对材料的加工硬化产生显著影响。不同每齿进给量下加工硬化的变化趋势与切削速度下的基本一致,每齿进给量的变化不会对加工硬化产生

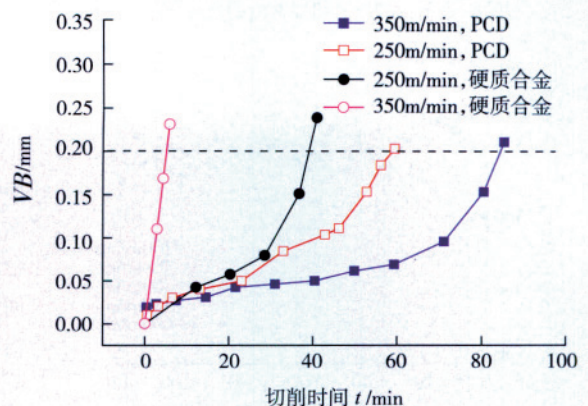


图7 PCD与硬质合金刀具的磨损曲线

显著影响。刀具磨损后,表面层有轻微的加工硬化现象,随着刀具磨损加剧,加工硬化有增大趋势。

刀具磨损初期,PCD 铣削钛合金时钛合金的显微组织,如图 10 所示。由图可以看出,钛合金表层显微组织未发现撕裂、相变、以及晶粒沿进给方向上的扭曲等现象。图 11 为 $VB=0.25\text{mm}$ 时,PCD 铣削钛合金时的钛合金金相显微组织,由图可以看出随着刀具磨损的加剧,钛合金表层的金相组织变化比较明显,沿进给方向晶粒表现为扭曲状态,刀具磨损越严重,晶粒的扭曲越明显,且晶粒的扭曲带越宽,当刀具达到磨钝标准以后,晶粒的扭曲带宽度大约为 $40\mu\text{m}$ 。这主要是由于刀具磨损增加导致切削力增大,切削热增加,二者的共同作用使得工件表层的塑性变形加剧。

经测试,加工后的试件表层呈现残余压应力,残余应力绝对值在 $300\sim 800\text{MPa}$ 之间。随着切削速度的

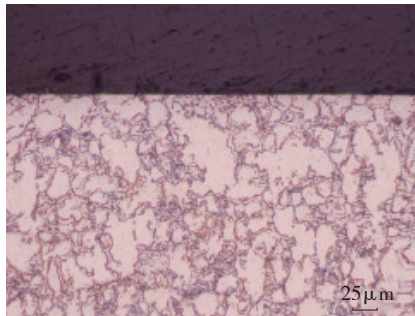


图10 刀具磨损初期的钛合金金相显微组织

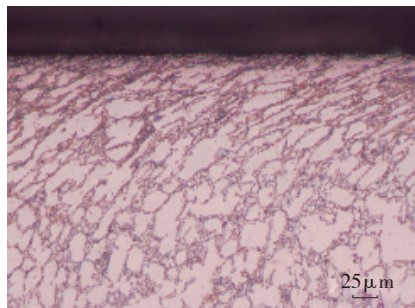


图11 $VB=0.25\text{mm}$ 时的钛合金金相显微组织

增加,残余应力绝对值都呈先减小后增大的趋势。这有利于提高零件的抗疲劳性能。

参考文献

- [1] Kuljanic E,Fioretti M,Miani F. Milling titanium compressor blades with PCD cutter. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 61-64.
- [2] Zoya Z A, Krishnamurthy R. The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(1-3): 80-86.
- [3] Nabhani F. Machining of aerospace titanium alloys. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17(1-2): 99-106.
- [4] Corduan N, Hirnbert T S. Wear mechanisms of new tool materials for Ti6Al4V high performance machining. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2003, 52(1): 73-76.
- [5] Zareena R, Rahman M, Wong Y S. Binderless CBN Tools, a Breakthrough for Machining Titanium Alloys. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(2): 277-279.
- [6] Wang Z G, Wong Y S, Rahman M. High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(1): 105-114.
- [7] Ezugwu E O, Da Silva R B, Bonney J, et al. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9): 1009-1014.
- [8] Nurul Amin A K M, Ismail A F, Nor Khairussima M K. Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy—Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193: 147-158.
- [9] Ezugwu E O, Bonney J. Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(6): 884-891.
- [10] 李甜甜. PCBN 高速切削钛合金实验的研究[D]. 山东: 山东大学, 2008.
- [11] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [12] Clark I E, Sen P K. 超硬刀具材料的研究进展. 工业金刚石评论, 1999, 1: 16-20.

(责编 小城)

结束语

作为典型的难加工材料,钛合金的加工技术能反映一个国家的航空制造技术水平。目前国内主要使用钨钴类硬质合金刀具和高速钢刀具中低速切削加工钛合金;而国外,主要使用细晶粒高性能硬质合金刀具切削加工钛合金,且已经开始使用高性能涂层刀具和超硬刀具进行高速高效切削钛合金的研究与应用。

国内要在超硬刀具高速切削钛合金关键技术方面取得突破,须通过进一步合理地选择刀具材料及几何参数,优选切削用量,针对不同的加工对象制定相应的加工工艺规范,最终高效率地加工出表面完整性优异的航空零件。

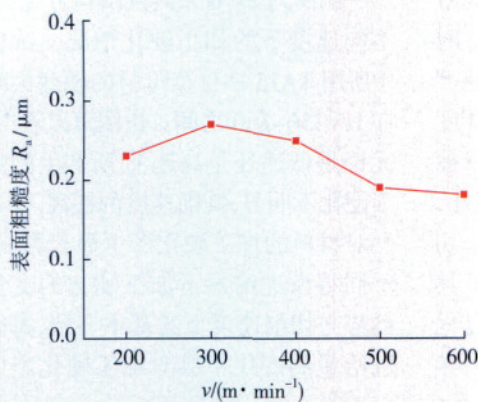


图8 表面粗糙度随切削速度的变化曲线

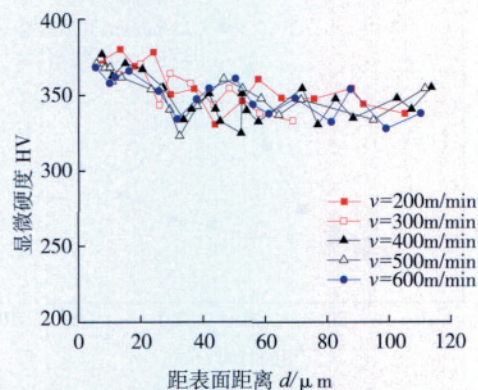


图9 PCD刀具铣削钛合金时不同速度下的加工硬化