

钛合金 TC4 电火花诱导可控烧蚀高效磨削技术研究

王琳, 刘志东*, 邱明波, 田宗军, 于建元

南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016

摘要: 利用大部分金属尤其是难加工金属的可燃特性, 开发一种针对难加工金属材料的新加工工艺——电火花(EDM)诱导可控烧蚀高效磨削技术。采用开槽导电砂轮进行磨削加工, 首先利用导电区域与加工材料产生电火花诱导放电并通入助燃氧气, 使材料表面产生电火花引燃烧蚀并软化, 然后将已烧蚀和软化的材料磨除, 对钛合金 TC4 进行烧蚀磨削试验, 并与常规电火花磨削和机械磨削进行对比, 分析了材料去除率(RMM)、表面质量和机床主轴电机功率变化等指标。结果表明, 在试验条件下, 烧蚀磨削在放电利用率提高的同时可获得表面粗糙度为 $0.59 \mu\text{m}$ 的加工表面, 与机械磨削的表面粗糙度值相近, 而相同条件下电火花磨削的表面粗糙度为 $1.29 \mu\text{m}$ 。由于烧蚀后产生了软化层, 在切深小于软化层厚度的条件下, 相对于电火花磨削和机械磨削状况, 烧蚀磨削主轴电机功率相比空载时的增加值分别降低了 95.2% 和 96.8%。此工艺方法可大大提高难加工材料的可磨削性能。

关键词: 钛合金; 电火花; 烧蚀; 磨削; 表面质量

中图分类号: V261.6⁺1; TG661 **文献标识码:** A

钛合金是典型的难加工金属材料, 其切削性能较低^[1-4]。国内外提出多种磨削方法解决钛合金的加工难题, 如强冷磨削技术、低温电解在线砂轮修整(Electrolytic In-process Dressing, ELID)磨削技术、缓进给磨削技术以及高效深磨技术等^[5-13], 但这些都属于传统机械加工方法, 加工能量主要依靠机械能, 加工时存在机械磨削力大、机床刚性要求高、刀具易磨损等问题。

本文利用大部分金属尤其是难加工金属的可燃特性, 提出一种电火花(Electrical Discharge Machining, EDM)诱导可控烧蚀难加工金属材料的高效磨削加工的新方法^[14]。利用导电砂轮与难加工金属材料之间的火花放电诱导作用, 同时通入助燃氧气形成表层金属的烧蚀, 并使表层发生软化, 之后在砂轮的机械磨削作用下磨除已

烧蚀及软化的金属材料。

1 加工原理

加工原理如图 1 所示, 由于钛合金在水溶性工作液中采用正极性电火花加工时表面会发生阳极氧化产生氧化膜, 影响加工表面外观, 因此试验中均采用负极性加工。开槽导电砂轮和钛合金 TC4 分别接脉冲电源正、负极, 两者输出端接示波器, 以采集放电波形。加工区域持续充入复合工作液及氧气, 由于砂轮是开槽的, 因此通过控制砂轮转速、氧气流量和压力可以实现加工区域内氧气的可控输入, 从而形成可控烧蚀。采用顺磨的加工方式, 同时钛合金工件在驱动工作台的带动下以恒速进给。磨削力的变化可通过主轴电机扭矩来近似衡量。

收稿日期: 2011-10-24; 退修日期: 2011-11-29; 录用日期: 2012-01-11; 网络出版时间: 2012-02-01 09:42

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120201.0942.006.html

基金项目: 国家自然科学基金(51175256); 航空科学基金(2011ZE52060); 江苏省自然科学基金(BK20111732)

* 通讯作者. Tel.: 025-84892520 E-mail: liutum@nuaa.edu.cn

引用格式: Wang L, Liu Z D, Qiu M B, et al. Study of TC4 controllable burned efficient grinding induced by electrical discharge machining. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(8): 1524-1530. 王琳, 刘志东, 邱明波, 等. 钛合金 TC4 电火花诱导可控烧蚀高效磨削技术研究. 航空学报, 2012, 33(8): 1524-1530.

$$P_e = T_e n / 9550 \quad (1)$$

式中: P_e 为有效功率; T_e 为有效扭矩; n 为电机的转速。

由式(1)可知^[15],当主轴电机转速恒定时,扭矩与功率存在对应关系,因而试验可通过不同加工条件下主轴电机功率的变化来近似衡量磨削力的差异。

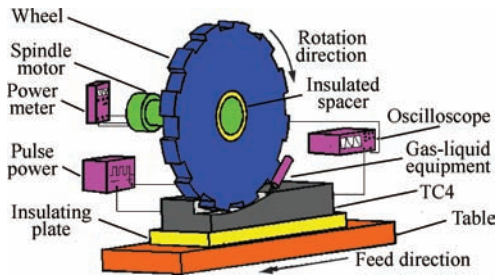


图1 钛合金可控烧蚀磨削试验原理图

Fig. 1 Titanium alloy controllable burned grinding schematic diagram

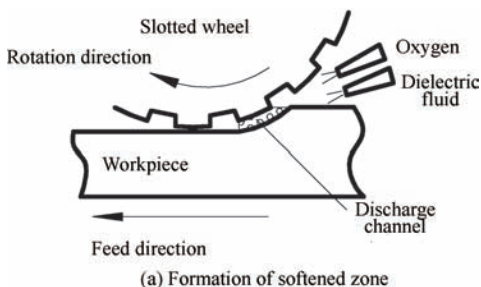
具体加工从微观上分为3个过程:

首先,如图2(a)所示,在电火花放电诱导作用下,砂轮导电区域与钛合金之间形成放电通道,少量钛合金材料被火花放电蚀除,形成放电凹坑,凹坑及附近区域材料由于温度较高,形成活化区,表面材料达到燃点温度以上。

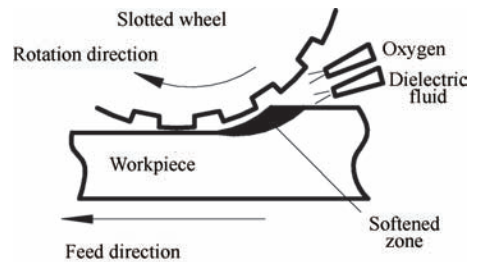
其次,如图2(b)所示,活化区材料在外部持续供氧条件下,发生剧烈的烧蚀反应,使活化区进一步扩大,同时释放出大量的热量,热量作用于钛合金加工区域表层,使其加热至软化甚至熔化状态,从而形成软化层。

然后,如图2(c)所示,软化层及基体材料在砂轮磨粒的磨削作用下被磨削去除,活化区消除,恢复至初始状态。

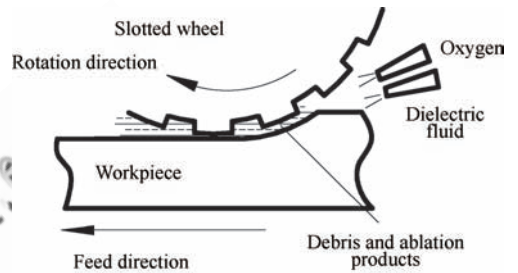
重复上述加工过程,使电火花诱导作用下的可控烧蚀与机械磨削两种状态交替进行直至加工结束。



(a) Formation of softened zone



(b) Expansion of softened zone



(c) Elimination of softened zone

图2 烧蚀磨削加工微观过程图

Fig. 2 Micro process of burned grinding

2 试验条件及结果

2.1 材料去除率及表面粗糙度

材料去除率(Material Removal Rate, MRR)及表面粗糙度试验参数如表1所示。表中: T_{on} 为脉冲电源的脉冲宽度; T_{off} 为脉冲间隔。

表1 材料去除率及表面粗糙度试验参数

Table 1 Test parameters in experiment of material remove rate and roughness

Parameter	Value
No-load voltage/V	120
Discharge current/A	10
$T_{on}/\mu\text{s}$	100
$T_{off}/\mu\text{s}$	200
Feed rate/(mm · min ⁻¹)	8
Wheel rotating speed/(r · min ⁻¹)	1 800
Oxygen press/MPa	0.15
Cutting depth/ μm	150

在上述加工规准下对钛合金 TC4 进行烧蚀磨削的材料去除率及表面粗糙度试验,并与常规电火花磨削和机械磨削进行对比。其中,工件尺

寸为 $100\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 采用了 16 齿的开槽电镀砂轮, 砂轮基体外径为 150 mm , 粒度为 120。图 3 为烧蚀磨削试验加工现场。

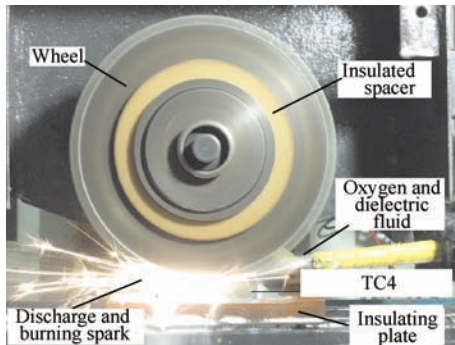


图 3 烧蚀磨削加工过程

Fig. 3 Burned grinding process

分别采用称重法及 TR240 表面粗糙度仪对材料去除率及表面粗糙度进行测量。设工件材料加工前质量为 m_0 , 加工后质量为 m_1 , 加工时间为 t , 则材料去除率为 $(m_0 - m_1)/t$ 。结果如表 2 所示。

表 2 不同磨削方式下材料去除率及表面粗糙度对比

Table 2 Material remove rate and roughness comparison of different grinding processes

Grinding method	MRR/(g · min ⁻¹)	Roughness Ra/μm
Burned grinding	0.058	0.593
EDM grinding	0.057	1.296
Mechanical grinding	0.037	0.459

2.2 主轴电机功率变化

试验中主轴空载时电机功率 $W_0 = 145\text{ W}$, 采取 3 组切深 $a_{p1} = 30\text{ μm}$, $a_{p2} = 48\text{ μm}$, $a_{p3} = 60\text{ μm}$ 条件下测试主轴电机功率。在上述 3 组不同的切深条件下, 不同的磨削方式主轴电机功率与空载时的变化值如表 3 所示。

表 3 不同磨削方式下主轴电机功率变化值

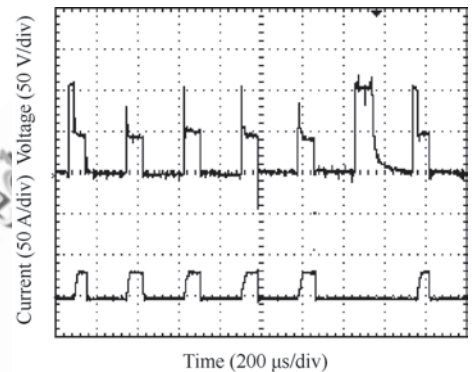
Table 3 Spindle motor power change comparison of different grinding processes

Grinding method	Spindle motor power change		
	$a_{p1} = 30\text{ μm}$	$a_{p2} = 48\text{ μm}$	$a_{p3} = 60\text{ μm}$
Burned grinding	0.1	0.12	1.2
EDM grinding	1.2	2.5	5
Mechanical grinding	1.5	3.8	7.5

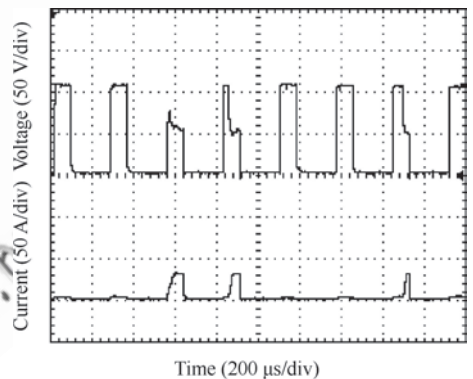
3 试验结果分析

3.1 材料去除率对比

由表 2 可知, 烧蚀磨削与电火花磨削在材料去除率方面基本相同, 试验采集烧蚀磨削及电火花磨削加工放电波形如图 4 所示。



(a) Discharge wave of burned grinding



(b) Discharge wave of EDM grinding

图 4 加工放电波形

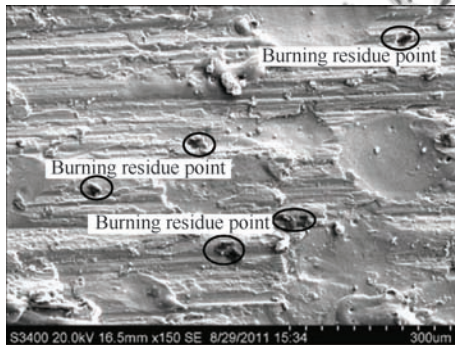
Fig. 4 Discharge waves of processes

图 4(a)为烧蚀磨削加工的放电波形, 图 4(b)为单纯电火花磨削加工的放电波形。两者的放电维持电压(50 V)和放电峰值电流(30 A)基本一致, 但烧蚀磨削的放电利用率大大提高。这是因为相对于单纯的电火花磨削加工, 烧蚀磨削加工的两极间有助燃氧气的充入, 加工介质实质上处于气液两相状态, 因此极间间隙能满足气液放电状态的点均可以被击穿形成放电, 而在单纯电火花加工条件下, 工件上只有满足液中放电条件的点进行放电, 因此在烧蚀加工条件下, 放电利用率得以提高。

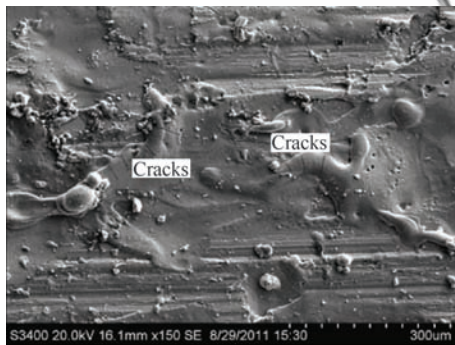
而从表 2 的材料去除率结果可知,烧蚀磨削的材料去除率与电火花磨削相差不多。这是因为两者是在同样的切深和工件进给速度下进行的,即使烧蚀磨削的放电利用率较电火花磨削有所提高,但未被放电电蚀的部分最终也会被磨除,这就决定了两者在材料去除率上基本相同。而机械磨削的材料去除率最小,这是因为试验系统中出于绝缘考虑,采用了环氧树脂绝缘垫板置于工件与工作台之间(如图 1 所示),而机械磨削的力较大,绝缘垫板在力作用下产生了一定的变形,导致让刀,致使实际切深没有设定的大,因此材料去除率最低。

3.2 表面质量对比

对烧蚀磨削和电火花磨削的加工表面进行微观形貌对比分析,结果如图 5 所示。



(a) SEM of burned grinding surface



(b) SEM of EDM grinding surface

图 5 磨削加工表面形貌扫描电子显微镜(SEM)图

Fig. 5 Ground surface by scanning electron microscope (SEM)

由图 5 (a)可以看出,烧蚀磨削加工表面较平整,未见表面微裂纹,而电火花磨削加工表面不平

整,表面有较多熔融物残留及微裂纹。此外,图 5 (a)中还发现存在一些黑点,对这些黑点及黑点周围区域进行能谱分析(如图 6 所示)和组份分析,并与 TC4 原始组份进行对比,结果如表 4 所示。

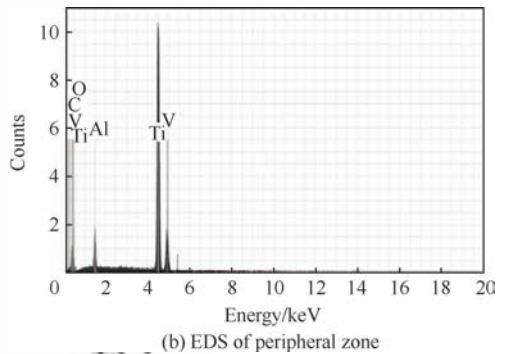
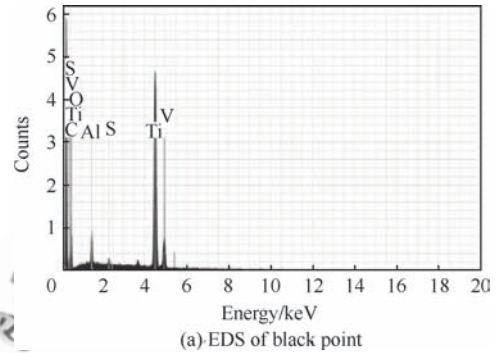


图 6 加工表面能谱分析图

Fig. 6 Surface energy dispersive spectrum (EDS) analysis

表 4 黑点、黑点周围区域与 TC4 原始组份对比表

Table 4 Component comparison of black points, peripheral zone, and primitive initial TC4

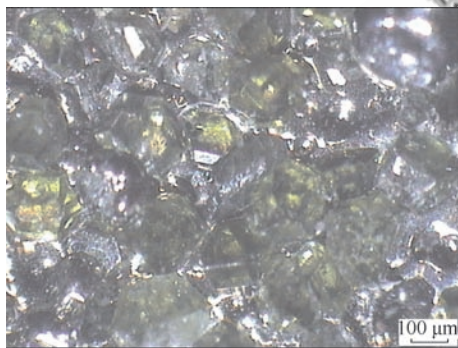
Main components	Black points	Peripheral zone	Initial TC4	%
Ti	32.15	75.87	88.61	
Al	1.94	7.25	6.80	
V	0.96	3.07	4.49	
O	18.32		0.02	
C	46.63	13.81	0.08	

由表 4 知,TC4 烧蚀磨削加工表面残留黑点的氧元素含量达到 18.32%,较 TC4 原始组份中的氧元素含量(0.02%)高出许多,而黑点周围区域的氧元素含量近似为 0。这是因为,电火花诱导放电后通入氧气发生了烧蚀反应产生烧蚀区,之后在磨粒的机械作用下烧蚀区大部分都被磨除,但也

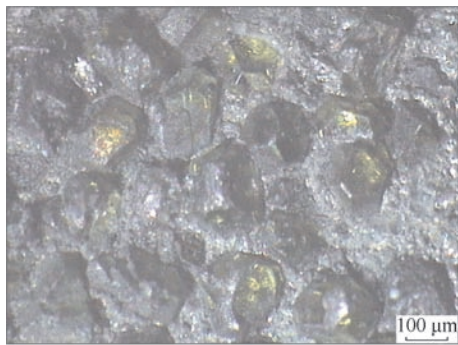
留下了一部分的烧蚀残留点,即为图 5(a)中的黑点,因此黑点处的氧元素含量明显增加。

此外,TC4 原始组份中的碳元素含量较少(0.08%),而黑点周围区域的碳元素含量达到 13.81%,黑点内的碳元素含量则达到 46.63%。分析认为,这是由于金刚石磨粒在电火花诱导放电作用下会因放电的高温发生碳化并脱落粘结在工件表面,粘结在黑点周围区域上的碳化物在磨削作用下大部分被磨除,而烧蚀残留点内的碳化物残留下来,因此黑点内的碳元素较黑点周围区域的碳元素明显增加。

图 7 为烧蚀磨削加工前后的砂轮表面形貌照片。其中,图 7(a)为试验前的砂轮表面形貌图,图 7(b)为加工进行一段时间后(约 240 h)的砂轮表面形貌图。



(a) Wheel surface before burned grinding



(b) Wheel surface after burned grinding

图 7 烧蚀磨削前后的砂轮表面形貌图

Fig. 7 Wheel surface before and after burned grinding

由图 7 可以看出,烧蚀磨削加工前,砂轮表面磨粒较多,而经过一段时间的烧蚀磨削加工之后,磨粒产生脱落及损耗,数量减少。

由以上分析说明,电火花诱导可控烧蚀磨削

砂轮最好将导电区域与磨削区域分布在不同的功能平面上,以防止金刚石磨粒在放电加工中的碳化和脱落。同时由于金刚石磨料与钛合金之间有一定的亲和力,因此磨削区域应尽可能采用绿色碳化硅(GC)、铈碳化硅(CC)等磨料替代金刚石磨料。

由于软化层的磨除较基体容易得多,反应过程中产生的燃烧产物和熔融物也随着软化层的磨除而更易被去除,此外气体的冲刷作用也在一定程度上降低了熔融物重凝在工件上形成重熔物的可能性,因此加工表面较为平整。由于烧蚀反应温度相比于火花放电温度低得多,作用区域相对于火花放电又大得多,工件加工表面与内部温度梯度大大降低,因此表面裂纹得到抑制。

表面粗糙度是表面微观形貌在宏观上的体现,由表 2 知,烧蚀磨削可获得表面粗糙度略次于机械磨削而较优于电火花磨削的加工表面。这是因为,电火花磨削表面残留有较多的重熔物,使得表面质量下降,表面粗糙度值大于烧蚀磨削。而烧蚀磨削和电火花磨削均因火花放电作用产生了放电凹坑,少部分工件材料因放电作用而被蚀除,即使材料之后会被磨除,仍有少量放电凹坑存在,因此机械磨削的表面粗糙度值最低。

3.3 功率变化值对比

3 种加工方式的主轴电机功率变化值如表 3 所示。由结果可知,3 种磨削方式下的主轴电机功率变化值在不同切深时的差别程度也不相同,当切深为 48 μm 时,三者相差最多,此时烧蚀磨削的功率变化值相对于电火花磨削和机械磨削分别下降了 95.2% 和 96.8%。在同一切深条件下,烧蚀磨削的主轴电机功率变化最小,机械磨削的主轴电机功率变化最大。

这是因为,烧蚀磨削产生了烧蚀软化层,在一定参数条件下,烧蚀反应产生的软化层厚度 d 是确定的。对于烧蚀磨削,如图 8 所示,当切深小于软化层厚度时,是在软化层内进行磨除,功率变化很小;当切深大于软化层厚度时,部分基体也被磨除,功率变化值会有所增大,而电火花磨削和机械磨削则都是在磨除基体。因此,当切深为 30 μm 和 48 μm 时,烧蚀磨削的功率变化很小,基本可以忽略,而电火花磨削、机械磨削的功率值变化相对较大,尤其当切深为 48 μm 时,这种差别尤为

明显。而当切深为 $60\ \mu\text{m}$ 时,烧蚀磨削的功率变化值增大,电火花磨削和机械磨削的功率变化则相对减小,因此可以说明,在本试验条件下产生的软化层厚度在 $48\ \mu\text{m}$ 至 $60\ \mu\text{m}$ 之间。

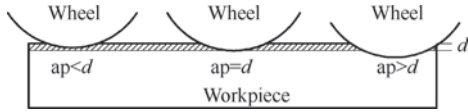


图 8 切深与软化层厚度关系图

Fig. 8 Relationship of cutting depth and softened layer thickness

此外,烧蚀磨削时也会有部分工件材料由于烧蚀反应而被蚀除,加上软化层的产生,两者的综合作用使得同一切深条件下烧蚀磨削的功率变化最小。而电火花磨削由于放电高温也会在工件表层产生少量软化,但机械磨削则完全是对基体材料的机械作用力,因此,电火花磨削的功率变化较烧蚀磨削大,而机械磨削的功率变化最大。

4 结 论

1) 电火花诱导可控烧蚀磨削较单纯电火花磨削的放电利用率大大提高,实际切深超过软化层厚度后,烧蚀区基本被磨除,加工表面平整,表面粗糙度接近于机械磨削表面,同时能有效抑制表面裂纹的产生。

2) 烧蚀磨削产生了软化层,且磨削时会有部分工件材料由于烧蚀反应而被蚀除,两者共同作用使得烧蚀磨削的主轴电机功率变化最小。

3) 加工参数的合理选择有利于软化层厚度的增加,从而减小主轴电机功率变化值,增加可磨削性能,达到解决难加工金属材料加工难题的目的。

参 考 文 献

- [1] Ren J X, Kang R K, Shi X K. Difficult-to-cut material grinding. Beijing: National Defense Industrial Press, 1999: 4-7. (in Chinese)
任敬心, 康仁科, 史兴宽. 难加工材料的磨削. 北京: 国防工业出版社, 1999: 4-7.
- [2] Ren J X, Kang R K, Wang X B. Difficult-to-cut materials grinding technology. Beijing: Electronics Industry Press, 2001: 6-9. (in Chinese)
任敬心, 康仁科, 王西彬. 难加工材料磨削技术. 北京: 电子工业出版社, 2001: 6-9.
- [3] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2): 233-253.
- [4] Chen W Y, Yuan Y F. Research progress of titanium cutting technology. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(15): 26-30. (in Chinese)
陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展. 航空制造技术, 2010(15): 26-30.
- [5] Song H W. Compulsive-cold grinding—new titanium grinding technology. Aeronautical Technology, 2001(6): 13-15. (in Chinese)
宋宏文. 强冷磨削——钛合金磨削新技术. 航空工艺, 2001(6): 13-15.
- [6] Paul S, Chattopadhyay A B. The effect of cryogenic cooling on grinding forces. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(1): 63-72.
- [7] Paul S, Chattopadhyay A B. Effects of cryogenic cooling by liquid nitrogen jet on forces, temperature and surface residual stresses in grinding steels. Cryogenics, 1995, 35(8): 515-523.
- [8] Fan M X, Zhang F H, Cui L L. Temperature field research of titanium grinding at low temperature by FEM. Diamond & Abrasives Engineering, 2002, 130(4): 20-23. (in Chinese)
范敏霞, 张飞虎, 崔玲丽. 用有限元法进行低温磨削钛合金温度场的研究. 金刚石与磨料磨具工程, 2002, 130(4): 20-23.
- [9] Zhu B. ELLD mechanism research of steel bonded carbide and titanium. Harbin: School of Mechanical and Electronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2001. (in Chinese)
朱波. 钢结硬质合金与钛合金 ELLD 磨削技术及机理的研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2001.
- [10] Hood R, Aspinwall D K, Voice W E. Creep feed grinding of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy using SiC abrasives. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1-3): 210-214.
- [11] Sato T, Waida T, Inoue H. High performance creep feed grinding of difficult-to-machine materials with new-type wheels. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 1990, 24(1): 39-44.
- [12] Fu Y C, Xu H J. Workpiece surface temperature analysis when creep feed grinding using slotted wheel. China Mechanical Engineering, 2002, 13(7): 7-9. (in Chinese)
傅玉灿, 徐鸿钧. 开槽砂轮缓进给深切磨削时工件表层温度场解析. 中国机械工程, 2002, 13(7): 7-9.
- [13] Sheng X M, Tang K, Yu J W. TC4 super high speed grinding technology research. Journal of Hunan University, 2008, 35(9): 28-32. (in Chinese)
盛晓敏, 唐昆, 余剑武. TC4 钛合金超高速磨削工艺试验
© 航空学报编辑部 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

研究. 湖南大学学报, 2008, 35(9): 28-32.

- [14] Liu Z D. Metals controllable burning by EDM-induced efficient cutting technology; China, 201110192863. 2011-11-30. (in Chinese)

刘志东. 电火花诱导可控烧蚀金属材料高效切削加工方法; 中国, 201110192863. 2011-11-30.

- [15] Ge B J, Liang Y P, Wen J B. Electromechanics. Beijing: China Power Press, 2010: 14-16. (in Chinese)

戈宝军, 梁艳萍, 温嘉斌. 电机学. 北京: 中国电力出版社, 2010: 14-16.

作者简介:

王琳 女, 硕士研究生. 主要研究方向: 特种加工。

E-mail: wanglin0502@126.com

刘志东 男, 博士, 博士生导师. 主要研究方向: 特种加工, 半导体放电加工, 高效加工。

Tel: 025-84892520

E-mail: liutim@nuaa.edu.cn

Study of TC4 Controllable Burned Efficient Grinding Induced by Electrical Discharge Machining

WANG Lin, LIU Zhidong^{*}, QIU Mingbo, TIAN Zongjun, YU Jianyuan

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: A new process of efficient grinding technology is proposed which is based on electrical discharge machining (EDM) induced controllable burning of the workpiece to be machined. This process utilizes the flammability of a metal, especially difficult-cutting metal, and uses a slotted conductive wheel to grind. First, an EDM induced discharge is generated between the wheel and the material. Then the gap is filled with combustion-supporting oxygen to induce the material to burn and soften, and the burned and soften layer is subsequently removed. Work on titanium alloy TC4 by burned grinding is compared with EDM grinding and mechanical grinding. The material removal rate (MRR), surface quality, spindle motor power change, etc., are analyzed. The result shows that burned grinding can improve the discharge efficiency with a roughness of 0.59 μm , similar to that of mechanical grinding, while the roughness of EDM is 1.29 μm . Because there is a softened layer in burned grinding, when the cutting depth is less than the softened layer, the spindle motor power increase from the no-load condition of burned grinding is respectively 95.2% and 96.8% less as compared with EDM grinding and mechanical grinding. This technology may improve the grinding performance of difficult-cutting materials greatly.

Key words: titanium alloy; electrical discharge machining; burning; grinding; surface quality

Received: 2011-10-24; **Revised:** 2011-11-29; **Accepted:** 2012-01-11; **Published online:** 2012-02-01 09:42

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120201.0942.006.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51175256); Aeronautical Science Foundation of China (2011ZE52060); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011732).

*** Corresponding author.** Tel.: 025-84892520 E-mail: liutim@nuaa.edu.cn