

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0250-04

脉冲激光铣削的机制研究与应用

袁根福

(安徽建筑工业学院激光加工联合研究中心, 安徽 合肥 230022)

摘要 通过观察和分析研究高、低两种脉冲激光功率密度条件下激光铣削的硬质合金的表面形貌和其铣削实验过程,发现脉冲激光铣削的材料去除机制存在材料直接气化、材料溶化后其熔体喷射和材料表面块状剥落三种方式。这三种材料去除机制在脉冲激光铣削过程中一般是同时存在的,但在不同条件下其主次不同,在本实验条件下,较低脉冲激光功率密度激光铣削的硬质合金材料去除机制以材料溶化后熔体喷射为主,而在较高功率密度条件下硬质合金铣削表面上存在类似解理断裂一样的表面形貌,即激光铣削表面以块状剥落为主。最后简单介绍了一些脉冲激光铣削的应用。

关键词 激光技术; 激光铣削; 材料去除机制; 块状剥落

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

Mechanism Research and Application of Pulse Laser Milling

YUAN Gen-fu

(United Engineering Research Center of Laser Processing Attached to Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract Through the observation and analysis on the surface formation and the milling test of hard alloy under power-density conditions of high and low pulse lasers, it shows that there exist three modes of material removal mechanism milled by pulse laser, including immediate gasification, ejection after being melted, and ablation of material surface. In the process of pulse laser milling, these three modes coexist but plays a different role under different conditions. In the test, under the condition of a low power-density, the removal mechanism for hard alloy material is primarily ejection; under a high power-density condition, the milling surface of the hard alloy shows some fracture in formation, that is, the ablation as the main mode. In the last part, some applications of pulse laser milling are briefly introduced.

Key words laser technique; laser milling; material removal mechanism; ablation

1 引 言

硬脆性材料工业用途非常广泛,但其加工一直是个技术难题,现有的加工方法各有其局限性。激光铣削就是利用高密度能量的激光束按所设计的图案,在试件上逐层扫描去除材料,像机械铣削一样进行成形加工的过程。脉冲激光铣削的实质是利用单脉冲激光光斑部分重叠形成的密集群孔^[1,2],来达到去除多余材料的目的,这和激光烧蚀(Laser ablation)有点类似,但由于脉冲激光铣削和激光烧蚀无论在所用激光设备方面还是在工艺方面都有很大不同,因此其材料去除机制也与以前研究比较多的激光烧蚀机制有所差异,而研究脉冲激光铣削机

制可以为更好地在工程上应用提供理论基础。

2 实验方法与设备

加工试样选用牌号为 YG15 的硬质合金和氧化铝陶瓷等硬脆性材料。本实验所采用的设备为在工业上常见的两类激光加工设备:一类是脉冲能量较高(最大可达数焦耳)、低重复频率(数十到上百赫兹)、脉宽为毫秒级,功率密度级别为 10^6 J/cm² 的激光加工系统,其平均功率为 300 W 的 Nd:YAG 固体脉冲激光器,波长为 1.06 μ m,激光输出能量的大小,通过调节抽运灯电源电压来控制,加工采用氧气作为辅助气体,气压约为 0.5 MPa,喷嘴直径约为

基金项目: 安徽省教育厅重点基金(2005KJ040ZD)资助课题。

作者简介: 袁根福(1964—),男,教授,博士,主要从事激光加工理论及其应用方面的研究。E-mail: forygf@263.net

$\phi 1.5$ mm。另一类是通过调 Q 重复频率可达数千到数万赫兹、脉宽为纳秒级和单脉冲能量较低(毫焦耳级),功率密度级别为 10^9 J/cm² 的 Nd:YAG 固体激光加工系统,激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$,平均功率为 50 W,频率可调,可以通过调节灯丝电流来调节激光输出能量的大小。利用不同激光铣削工艺,在硬质合金试样上一次性铣出边长为 3 mm 的方形槽。激光扫描间距小于 0.2 mm。用体视显微镜和扫描电子显微镜观察其形貌并照相。

3 脉冲激光铣削表面观察与分析

首先来观察低功率密度(10^6 W/cm²)条件下硬质合金激光铣削的表面形貌,图 1 所示为硬质合金在激光单脉冲能量为 0.95 J,重复频率 50 Hz,脉宽 0.5 ms,激光扫描速度为 2 mm/s 条件下铣削的表面形貌,可见铣削面布满细小、均匀的熔渣[图 1(a)],这些熔渣成棉絮状[图 1(b)],表明在这个参数条件下,激光铣削面均匀平整,残余熔体在铣削面凝固成典型的烧蚀形貌。如果在其他参数不变的条件下,随着激光单脉冲能量的提高,硬质合金铣削面变得较差,如图 2 所示为激光单脉冲能量提高到 2.63 J 时硬质合金铣削面的表面形貌,铣削面布满大块熔渣和孔洞。图 3 为高单脉冲能量(2.63 J)铣削面的横截面照片,其中可见激光致孔的剖面。以上硬质合金激光铣削表面的微观形貌,都发现激光铣削表面存在大量由熔体凝结成的熔渣。

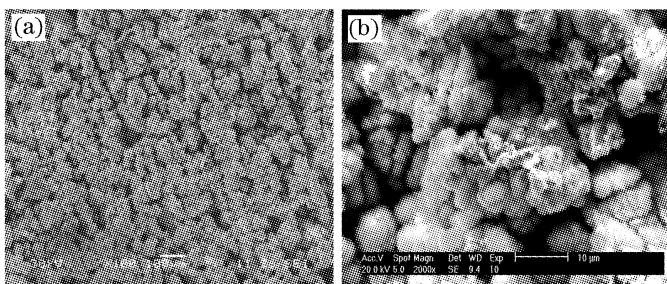


图 1 低单脉冲能量激光铣削的硬质合金表面微观形貌
(a) 低倍形貌, (b) 高倍形貌

Fig.1 Surface microtopography of hard alloy that lower single pulse energy laser. (a) lower amplification of appearance, (b) higher amplification of appearance
(0.95 J, 50 Hz, 2 mm/s, 0.5 ms)

大幅度降低激光单脉冲能量到十几毫焦耳,提高激光重复频率到数千赫兹,降低脉宽至纳秒级别,以提高功率密度级别到 10^9 W/cm²,对硬质合金进行激光铣削。利用 XL30ESEM 扫描电镜观察以上工艺参数下铣削的硬质合金表面,结果如图 4 所示,由该图

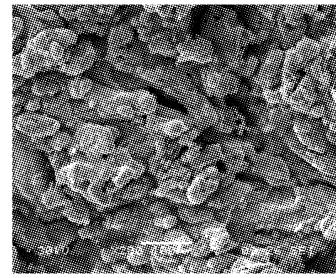


图 2 较高单脉冲能量激光铣削的硬质合金表面微观形貌(低倍)

Fig.2 Surface microtopography of hard alloy that higher single pulse energy laser (lower amplification)
(2.63 J, 50 Hz, 2 mm/s, 0.5 ms)

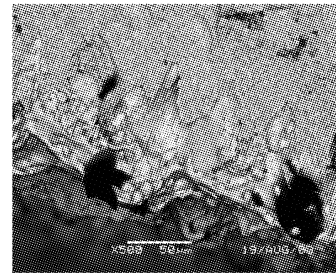


图 3 较高单脉冲能量激光铣削的硬质合金面的横截面图

Fig.3 Cross section picture of hard alloy that higher single pulse energy laser
(2.63 J, 50 Hz, 2 mm/s, 0.5 ms)

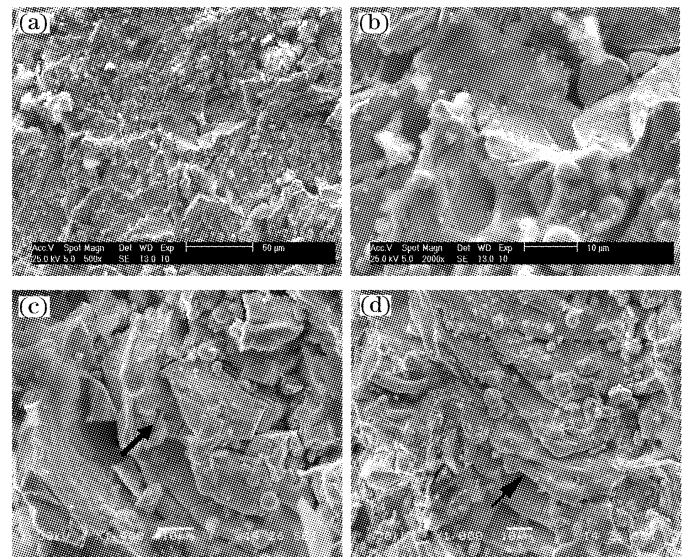


图 4 硬质合金在激光参数为毫焦级单位脉冲能量、高重复频率、纳秒级脉宽铣削的表面微观形貌(灯丝电流 1.6 A,重复 Hz)。(a)低倍;(b)高倍;(c)块状剥落(箭头处);(d)层状剥落(箭头处)

Fig.4 Surface microtopography of hard alloy when laser parameters are single pulse energy with several millijoules, high repetition frequency and nanosecond pulse width (filament current 1.6 A, repetition frequency 3000 Hz). (a) lower amplification, (b) higher amplification, (c) massive flaking (direction of arrows), (d) layered flaking (direction of arrows)

可见,硬质合金在这种条件下铣削,其激光铣削表面形貌与利用较低的激光功率密度级别为 10^6 W/cm² (单脉冲能量为焦耳级、重复频率为数十赫兹、脉宽为毫秒级)的激光铣削表面形貌明显不同。在图 4(a)和图 4(b)中,硬质合金在铣削后表面存在类似解理断裂一样的表面形貌,表面基本上没有熔渣存在。高倍形貌观察可以发现,被铣削加工表面的微观过程,实际上是由铣削面存在的块状剥落和层状剥落现象造成的,这可以从图 4(c)和图 4(d)直接看出,图 4(c)箭头所指处为一个块体,即将从基体剥落,图 4(d)箭头所指处为即将在铣削表面形成的层状剥落块。

4 脉冲铣削材料去除机制的分析与讨论

研究激光烧蚀过程中激光与物质作用机制是目前热点之一,激光烧蚀过程一般被认为是高能量脉冲激光轰击固体材料表面时,激光辐照区域的固体物质在瞬间发生微型爆炸式喷发(Micro explosion)的过程。有关激光烧蚀的机制,目前尚无定论。但基本认为有两种方式:一种认为由于准分子激光的波长与脉宽都很短,被辐照的固体物质在瞬间迅速直接气化而逃逸出固体表面,形成激光刻蚀坑;另一种则认为,尽管准分子激光的波长与脉宽都很短,被辐照的固体物质一般会先熔化然后气化,再逃逸出固体表面,形成激光刻蚀坑。这两种机制实质上有一个共同点,即固体材料的去除主要是依赖其气化过程^[3~6]。观察低功率密度(10^6 W/cm²)条件下激光铣削实验,可以发现激光铣削硬质合金过程中存在大量熔体喷射,并且熔体喷射的方向与激光束移动方向总是相背的,也就是说利用本实验所用的 Nd:YAG 激光对硬质合金进行铣削与前面所述两种准分子激光烧蚀物质作用机制存在明显不同,而与脉冲激光打孔存在的熔体喷射有点类似^[7]。对应的硬质合金激光铣削的表面形貌存在大量熔渣,这是由于在低功率密度和较大脉冲能量条件下,激光致孔产生较多熔体,熔体在喷射后,有较多残留在铣削面随后冷却而产生的。也就是说低功率密度条件下激光铣削材料去除机制以熔体喷射为主。硬质合金在较高激光功率密度(级别为 10^9 W/cm²)条件下铣削,虽然也有少量熔体喷射,但硬质合金在铣削后表面存在类似解理断裂一样的表面形貌,在铣削表面形成层状剥落块,而且表面基本很少发现有熔渣存在,表明这种参数条件下的激光铣削的材料去除机制以剥落为主,这可能由于硬质合金在低单脉冲能

量(最高十几毫焦耳)和高达数千赫兹重复频率作用下,因为热应力作用,在试样表面形成微裂纹,然后裂纹长大和扩展,最终形成剥落块而脱落。

综合前面的研究分析结果,我们认为脉冲激光铣削过程应当主要以三种机制进行,一是激光烧蚀机制,也就是指激光铣削过程中被激光辐照区域的固体物质直接气化导致物质转移的过程;二是激光导致熔体喷射机制,即激光束的热作用使被辐照区域的固体物质在短时间内熔融,并部分气化,在辅助气体和反喷物质所产生压力的作用下,以液体方式从固体表面喷射出来,完成物质转移的过程;三是激光致脆性材料块状剥落机制,即在脉冲激光的热冲击下,脆性材料形成大量微细裂纹而粉碎成为小块状物体,并被蒸发气流带走的物质转移过程。必须指出,激光铣削过程中,上述三种机制不是孤立存在的,而是随着激光铣削工艺参数和材料的不同使铣削机制有所偏重。

5 脉冲激光铣削的应用

通过比较和研究,可以选择合适的工艺参数对硬质合金和氧化铝陶瓷等材料进行激光铣削加工。图 5 是利用激光铣削的矩形槽照片,采用的激光铣削工艺参数为:单脉冲能量 3.58 J,激光脉冲频率 70 Hz,脉宽 0.5 ms,工作台移动速度 2 mm/s。测得试样的激光铣削尺寸精度为 IT7~8,对边平行度为 0.04。

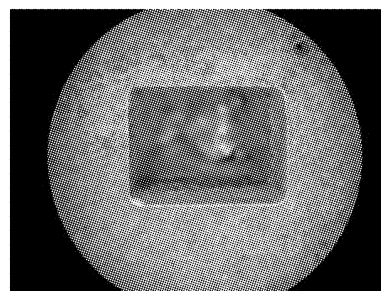


图 5 硬质合金 3 mm×5 mm 矩形槽

Fig. 5 3 mm×5 mm rectangular slot of hard alloy

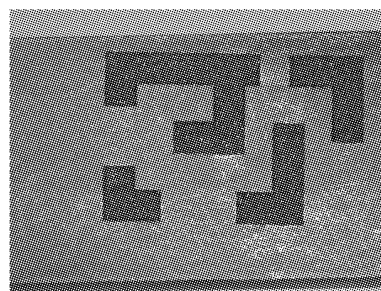


图 6 硬质合金复杂结构

Fig. 6 Complex construction of hard alloy

图 6 为利用固体激光器在硬质合金材料上铣削

出的复杂槽状结构照片,调整合适的参数,激光铣削面粗糙度可达 R_a 为 5~6。图 7 是利用激光在氧化铝陶瓷上铣削的环形槽,图 8 为在普通玻璃上利用

激光铣削的阶梯槽。

参 考 文 献

- 1 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Experimental study of laser milling on Al_2O_3 ceramics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 467~470
袁根福,曾晓雁. Al_2O_3 陶瓷激光铣削实验研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(5): 467~470
- 2 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Physical process of laser milling[J]. *J. Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2003, **31**(6): 26~28
袁根福,曾晓雁. 激光铣削物理过程研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, **31**(6): 26~28
- 3 G. G. Blanchet, C. R. Fisher Jr., C. L. Jackson *et al.*. Laser ablation and the production of polymer films[J]. *Science*, 1993, **262**(5134): 719~721
- 4 G. G. Blanchet, S. I. Shah. Deposition of amorphous fluoropolymers thin films by laser ablation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(5): 476~481
- 5 Q. Luo, X. Chen, Z. Liu *et al.*. Deposition of oriented polymer films for liquid crystal alignment by pulsed laser ablation[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1997, **108**(1): 89~93
- 6 Xiaoyan Zeng, Naoto Koshizaki, Takeshi Sasaki. Effect of target modification on deposition rates of hexaphenyldisilane by laser ablation[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, **140**: 90~98
- 7 M. von Allmen. Laser-Beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications[M]. Qi Haibang transl., Beijing: Science Press, 1994. 164~167
奥尔曼. M. von. 激光束与材料相互作用的物理原理及应用[M]. 漆海滨译. 北京: 科学出版社, 1994. 164~167

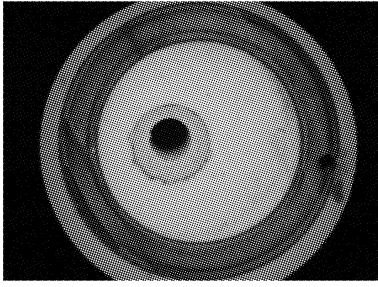


图 7 氧化铝陶瓷环形槽

Fig. 7 Annular groove of alumina ceramics

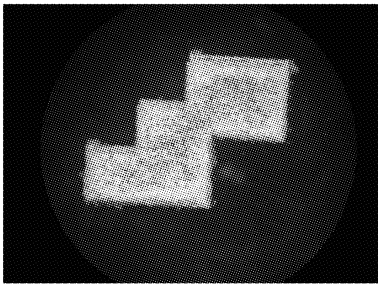


图 8 普通玻璃上铣的阶梯槽

Fig. 8 Ladder groove of simple glass