

文章编号: 0258-7025(2010)04-1138-05

# 真空环境下微流道沟槽的激光铣削试验

王续跃<sup>1</sup> 李建丽<sup>1</sup> 胡亚峰<sup>1</sup> 吴勇波<sup>2</sup> 王连吉<sup>1</sup> 徐文骥<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024  
<sup>2</sup> 秋田县立大学智能机械和系统工程系, 日本 秋田 015-0055)

**摘要** 采用 Nd:YAG 激光器, 在真空环境下, 进行高硬镜面塑胶模具钢(HPM75)的微流道沟槽激光铣削试验研究。研究真空环境下铣削机理及真空度对铣削尺寸和表面质量的影响。研制真空调节系统, 调节激光铣削区域状态, 进行大气环境和真空环境下的对比试验。结果表明, 当真空压力在 $-0.07 \sim -0.5$  MPa 范围时, 排屑量增加 $1.6\% \sim 3.3\%$ 。在铣削优化参数下, 与大气环境下激光铣削相比, 铣削宽度增加, 排屑量增加; 可以铣出的沟槽宽度和深度分别为 $0.225$ 和 $0.058$  mm; 真空环境减小了背景气压阻力, 提高了熔屑排除力, 可以铣削出满足微流道沟槽尺寸和精度要求的沟槽, 是一种有效的激光铣削加工辅助工艺。

**关键词** 光学制造; 激光铣削; 微流道沟槽; 塑胶模具钢; 真空环境

**中图分类号** TG142.7; TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1138

## Laser Milling of Micro-Fluidic Grooves under Vacuum Condition

Wang Xuyue<sup>1</sup> Li Jianli<sup>1</sup> Hu Yafeng<sup>1</sup> Wu Yongbo<sup>2</sup> Wang Lianji<sup>1</sup> Xu Wenji<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China  
<sup>2</sup> Department of Machine Intelligence & Systems Engineering, Akita Prefectural University, Akita 015-0055, Japan)

**Abstract** Laser milling of micro-fluidic Grooves under vacuum condition is presented. The regularity of laser milling under vacuum condition is established according to the analysis of melting-material removal which provides a theoretical basis. Nd:YAG laser is used to mill micro-fluidic grooves of a kind steel of HPM75. The research outcomes show that when vacuum pressure is from  $-0.07$  MPa to  $-0.5$  MPa, the materials removal increases by  $1.6\%$  to  $3.3\%$ . Vacuum condition means that air pressure is reduced. When the parameters are preferable, the quality of groove is satisfied with width  $0.225$  mm and depth  $0.058$  mm, and materials removal increased, compared with common condition. Laser milling rate is higher and its surface quality is proved better than that of normal laser milling. It helps to control the precision of milling size, and it is an effective method to laser milling technology.

**Key words** optical fabrication; laser milling; micro-fluidic grooves; HPM75; vacuum condition

## 1 引 言

微流控分析芯片在生物医药、环境检测、食品卫生、刑事科学及国防等许多领域有着广阔的应用前景和巨大的市场需求<sup>[1]</sup>。它以分析化学和生物化学为基础, 以机电加工技术为依托, 以微管道网络为结构特征, 是一种集样品制备、稀释、反应、分离、检测于一体的快速、高效、低耗的微分析系统<sup>[2]</sup>, 现已成为微分析系统的发展前沿。但其制作存在局限性, 如制作周期长和存在表面质量缺陷等。常采用的模塑法或热压法<sup>[3,4]</sup>, 大批量复制芯片, 其中模具

上的沟槽尺寸一致性和表面粗糙度等评价指标是决定芯片质量的关键因素。激光铣削作为一种非接触成形加工方法, 没有切削力的作用, 避免了刀具磨损, 是一种高效的柔性成形方法, 将其引入到微流道沟槽的成形加工领域, 给微流控芯片的制造带来了新思路。

国外, 德国的 DMG 公司在 20 世纪 80 年代末开始对激光铣削进行研究<sup>[5]</sup>, 使用  $100$  W 的调 Q YAG 激光器, 激光束的去除厚度为  $1 \sim 5$   $\mu\text{m}$ , 表面粗糙度达  $1$   $\mu\text{m}$ 。20 世纪 90 年代末英国的 MEC 加

收稿日期: 2009-06-25; 收到修改稿日期: 2009-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(50975041)、辽宁省自然科学基金(20062181)和辽宁省重点实验室基金(2008S054)资助课题。

作者简介: 王续跃(1960—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事特种加工与精密加工方面的研究。E-mail: wbzzd@dlut.edu.cn

工中心分别对激光铣削的光源特性、铣削特性、能量的吸收特性、去除机理以及随之发展的 CNC 机床技术做了深入研究<sup>[6]</sup>。最近, A. Kaldos 等<sup>[7]</sup>利用短脉冲高重复频率的 Nd:YAG 激光器对冷作钢压花模的制作取得了一定进展。近年来, 国内也开始对激光铣削进行研究。袁根福等<sup>[8,9]</sup>分别对陶瓷、硬质合金、玻璃和单晶硅片等进行了大脉宽高能量的实验。同期, C. H. Tsai 等<sup>[10]</sup>对陶瓷的激光铣削进行了大量研究。

针对陶瓷、硅、玻璃等硬脆材料的激光铣削研究较多, 并在一些方面取得了一定的进展。国外学者<sup>[11,12]</sup>多集中于短脉宽、高重复频率的研究, 去除效率比较低, 不能够满足大批量生产的需求。国内学者多采用长脉宽、低重复频率的激光对陶瓷、硅、玻璃等硬脆材料进行高效铣削成形试验研究, 存在铣削表面粗糙度过大和重铸层对表面质量破坏等问题, 且大多采用同轴吹气<sup>[13]</sup>进行研究; 对于金属材料, 特别是微流道的激光铣削, 排屑是其中的关键问题之一, 其机理和方法的研究需进一步加强。

本文针对塑胶模具钢 HPM75 微流道沟槽的制作, 研究真空条件下的加工方法。通过对铣削及排屑过程分析, 研究了膨胀气化物质产生的瞬时反冲压力和排屑状态, 分析了真空环境下的排屑原理。在不同真空度环境下, 以激光铣削熔屑喷射作用为机理, 选择满足加工要求的激光输出功率、离焦量、扫描方向等优化参数, 对 HPM75 微流道沟槽进行试验研究。

## 2 真空环境下激光铣削基本原理

加工原理是利用激光束按规定的图案, 一层一层扫描剥离(或称烧蚀)材料, 与机械铣削类似<sup>[14]</sup>。当激光束的脉宽较宽(毫秒级或者更长), 单脉冲能量较大(焦耳级)时, 激光铣削过程主要以被辐照区域的固体物质在短时间内熔融, 并部分气化, 液体在膨胀气化物质所产生压力作用下从基体表面快速喷射的激光致熔体喷射机理为主。

### 2.1 激光铣削排屑受力分析

当激光的功率密度达到材料气化阈值密度时, 试样表面便开始气化, 伴随着气化物质向外急剧地膨胀扩张, 凹坑的表面被球状的气化物质所笼罩, 与熔融液体之间存在一层气液平衡的克努森层, 由于该层继续吸收激光能量, 一方面温度继续上升, 另一方面层内物质以气化或熔融物质形式迅速离开试样表面, 即形成熔体。当熔体向外喷出时, 由动量定理

$$F_t = (P_s S - P_0 S)t = mv - mv_0 \quad (1)$$

可知, 内部产生了瞬时反冲压力<sup>[15]</sup>来克服背景气压, 并使熔体具有一定速度喷出。(1)式中  $F_t$  为膨胀气化物质的瞬时反冲压力和背景气压合力,  $m$  为一定时间  $t$  内喷射熔体的质量,  $v$  为喷射平均速度,  $v_0$  为初始速度, 初始状态为 0。  $P_s$  为气体反冲压强,  $P_0$  为背景气压,  $S$  为熔体受压面积。熔体排除速率(包含气化和熔融物质)  $m_v$  和排屑量  $m_p$  表示为

$$m_v = \frac{F_t \Delta t}{v} = \frac{(P_s S - P_0 S) \Delta t}{v}, \quad (2)$$

$$m_p = \int m_v dt, \quad (3)$$

(1)~(3)式表示激光铣削排屑量与真空度的关系。真空环境的作用是减小或消除背景气压, 使熔体在膨胀气化物质的瞬时反冲压力的单独作用下以较高速度从试件表面喷出。速度大小呈麦克斯韦速率分布; 同时由于真空环境减小了背景气压阻力, 提高了熔屑排除力, 使得熔体排除的速率也有所增加, 从而使排屑量有所增加。

### 2.2 激光铣削排屑状态分析

脉冲激光铣削过程是通过单个脉冲作用形成的凹坑依次排列或部分重叠来完成的, 因此取单脉冲激光作用过程进行分析。在大气环境下, 熔体在  $P_s$  与  $P_0$  的共同作用下喷溅而出, 当外界为真空环境时, 在  $P_s$  作用下直接喷射而出, 实现排屑。真空环境气体蒸发时的压强一定,  $P_s$  也是一定的, 它比较均匀地作用在克努森层上, 同时没有其他压力的干扰, 熔屑的飞溅方向是沿凹坑边界的切线方向飞出。图 1 为真空环境和大气环境下铣削加工过程中熔屑的飞溅对比照片。

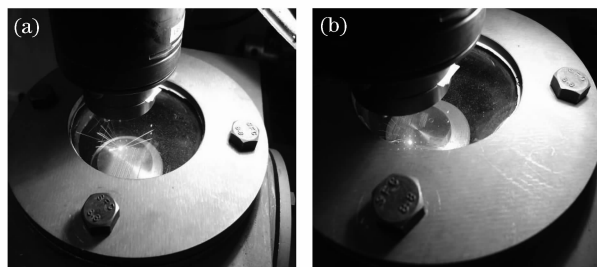


图 1 不同环境下熔屑的飞溅照片

(a) 真空环境; (b) 大气环境

Fig. 1 Splash photos of laser milling under different environments

(a) vacuum condition; (b) common condition

从图 1 可以看出, 真空环境下熔屑的飞溅阻力小, 排屑量大, 成四散型向四周飞溅。大气环境下由于背景气压的限制, 在相同的铣削加工参数下, 熔屑

的排除量明显较少。

### 2.3 真空环境下激光铣削分析

同种材料  $P_s$  是一定的,真空环境下激光铣削是通过减小或者消除背景气压、减小熔体飞溅阻力的方法来增加喷射速度,同时由于真空环境减小了背景气压阻力,提高了熔屑排除力,使得熔体排除的速率也有所增加,从而使排屑量有所增加。而喷射速度直接影响到铣削速率和铣削面质量,喷射速度越大,熔体越不容易沉积于铣削表面,铣削速率也就越大,铣削面质量也就越高。同时真空激光铣削,避免了熔池全部或部分地暴露在大气之中,减小大气中氧气进入熔池,对试件基体的氧化反应起到很好的抑制作用,减小某些合金元素的烧损,使其成分基本保持不变,提高了试件的加工质量。

随着真空度的增加,铣削凹坑发生显著的变化,真空度越大,外界阻力越小,熔体喷射越容易,喷射速度越大,带走的热量越多,降低熔池温度,铣削沟槽边界清晰,表面质量好,铣削凹坑的宽度增加。同时对氧化反应的抑制作用更加明显,使得铣削凹坑的深度进一步减小。

## 3 真空环境下激光铣削试验

### 3.1 试验条件

试验材料:采用日本日立金属株式会社生产的预硬高硬度镜面塑胶模具钢 HPM75,几何尺寸为  $\phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,具有热膨胀系数小、无磁性、较好的耐磨性和耐腐蚀性,优异的镜面加工性能、良好的冷热加工性能等,表 1,2 是其对应的化学成分和热物理学参数。

表 1 模具钢 HPM75 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Element composition of HPM75 plastic mould steel (mass fraction, %)

Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu
10	7.5	2	1	1	2~3

表 2 模具钢 HPM75 的热物理学参数

Table 2 Physical characters of HPM75 plastic mould steel

Density / $(\text{kg}/\text{m}^3)$	7800
Melting point / K	1750
Gasification point / K	3000
Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	502
Conductivity / $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	15.8

加工装置:激光器采用英国 GSILUMONICS 公司生产的 JK701H 型 Nd:YAG 固体激光器,具有焊接、切割两种模式,脉宽和频率可调。激光器所配

套的机械系统为北京机床所精密机电有限公司生产的 LMT5040 精密数控工作台。

真空状态调整装置:自行设计的状态调整装置安装在激光加工机工作台上,通过调整进气口的连接方式,来获得大气或真空环境,通过调节真空泵来获得所需要的真空度,真空压力为  $-0.07 \sim -0.5 \text{ MPa}$ 。

检测装置:CCD 检测系统监测铣削加工过程;美国 ZYGO 表面轮廓仪对铣削沟槽的宽度、深度进行综合评定,该仪器能描述加工表面的三维几何形貌,分辨率为  $0.2 \text{ nm}$ 。

### 3.2 试验参数的选用

试验主要采用切割模式进行,激光重复频率  $f = 25 \text{ Hz}$ ,光斑重叠率  $K = 0.8$ ,扫描速度  $v_s = 66 \text{ mm}/\text{min}$ ,激光脉宽  $\tau = 1 \text{ ms}$ ,激光功率  $P = 0.75 \text{ W}$ ,离焦量  $z = 0$ ,功率密度  $q_p = 7.2 \times 10^4 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,采用相同的扫描方向进行试验研究,通过改变激光铣削的环境,真空压力分别为  $-0.07, -0.1, -0.5 \text{ MPa}$ ,来试验研究真空环境对 HPM75 微流道沟槽铣削尺寸和质量的影响。

### 3.3 试验结果

#### 3.3.1 基础试验结果

通过 CCD 检测系统和 ZYGO 表面轮廓仪记录沟槽的宽度、深度和表面轮廓形状。一组参数下铣削质量对比的照片如图 2 所示。

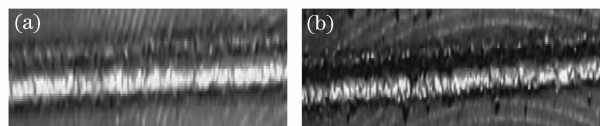


图 2 不同加工环境下铣削质量的对比照片(10×)

(a) 真空环境;(b) 大气环境

Fig. 2 Contrast pictures of milling quality influenced with different environments (10 ×). (a) vacuum condition; (b) common condition

从图 2 可以看出,不同的加工环境状态对铣削效果有较大的影响。真空环境下,排除熔屑效果较好,铣削沟槽边界清晰,表面质量好;而大气环境下,在铣削沟槽的边界残留大量的熔屑颗粒,表面质量较差。经测量,大气环境下单道沟槽的宽度和深度分别为  $0.220$  和  $0.059 \text{ mm}$ ;而真空环境下,沟槽宽度为  $0.225 \text{ mm}$ ,深度为  $0.058 \text{ mm}$ ,铣削宽度增加了  $0.005 \text{ mm}$ ,排屑量增加  $1.6\%$ 。

使用美国 ZYGO 公司生产的白光干涉式表面轮廓仪对结果进行综合评价,根据结果绘制真空度

对铣削宽度、深度影响规律如图 3 所示。从图 3 可知,随着真空度增加,铣削宽度增加,深度减小,排屑量逐渐增加。当真空压力为  $-0.07 \sim -0.5$  MPa 时,排屑量增加幅度为  $1.6\% \sim 3.3\%$ 。从而证实真空环境可以提高激光铣削的排屑量,从而提高铣削速率。当真空压力达到  $-0.5$  MPa 时,铣削尺寸变化不明显,排屑量增加趋于平缓。真空环境下,铣削宽度增加,排屑量增加,相比于大气环境,铣削速率更快,铣削边界清晰,无熔屑颗粒,表面质量更好。

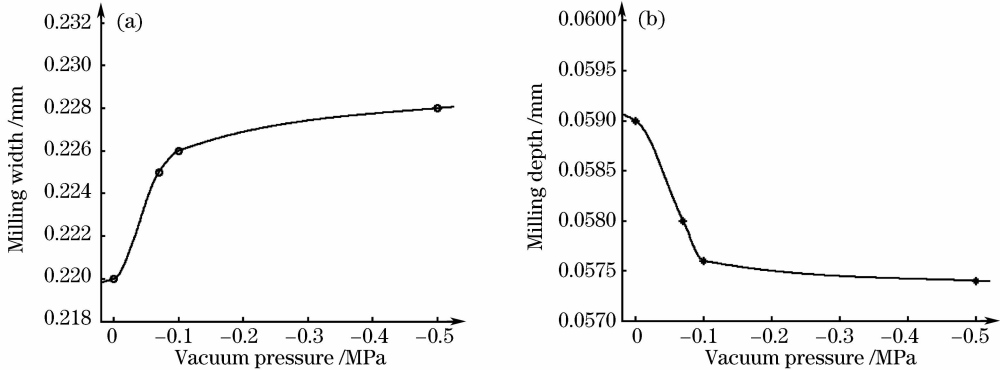


图 3 真空度对铣削尺寸的影响。(a) 对铣削宽度的影响;(b) 对铣削深度的影响

Fig. 3 Effect on milling size of vacuum degree

(a) effect on milling width; (b) effect on milling depth

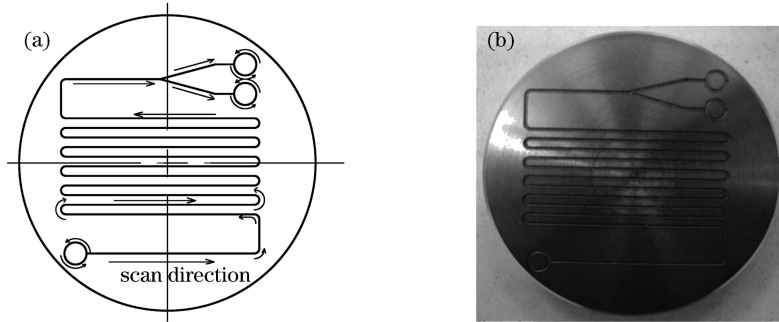


图 4 真空环境下的扫描路径(a)和铣削沟槽(b)

Fig. 4 Scanning path (a) and milling results of micro-fluidic grooves mould (b) under vacuum environment

## 4 结 论

1) 进行真空环境下激光铣削的理论分析,得到真空环境下,使熔屑排除的主要动力是  $P_s$ 。真空环境下,减小了背景气压,产生有利于熔屑排除的压力环境,增加了喷射速度,提高了熔屑排除力,使得排除的速率也有所增加,从而使排屑量有所增加,提高铣削速率,且铣削轮廓边界清晰,表面质量好。

2) 进行不同真空度的真空环境和大气环境的铣削试验,通过 ZYGO 表面轮廓仪记录沟槽的宽度、深度计算得到,真空压力为  $-0.07 \sim -0.5$  MPa 时,排屑量增加  $1.6\% \sim 3.3\%$ ,与大气环境相比,真

### 3.3.2 微流道沟槽的真空铣削制作

真空环境下,离焦量的变化直接决定了材料表面的激光功率密度,从而决定膨胀气物质的瞬时反冲压力。输出功率不能过大,否则产生的熔渣增多,影响铣削表面质量。扫描方向对铣削效果基本上没有影响。基于以上的各个影响因素的综合考虑进行了真空环境下工艺参数的选择。扫描路径采用如图 4(a)所示的光束走刀轨迹。图 4(b)是在铣削优化参数下铣削出的微流道沟槽图案。

空激光铣削排屑速度快,轮廓边界清晰,表面质量好。且随真空度的增加,排屑速度提高,排屑量增加,表面质量也有提高。

3) 分析真空和大气环境对铣削质量的影响得出,在一定真空度下,真空环境减小背景气压,减小排屑时所受阻力,排屑容易,排屑速度大,从而提高铣削速率,铣削宽度增加,同时避免了氧化现象,使得气体极易将熔融残渣排除,表面干净,铣削沟槽边界清晰,表面质量好。

## 参 考 文 献

- 1 J. Khandurina, A. Guttman. Journal of Chromatography [M].

- Berlin: Springer, 2002. 159~183
- 2 A. Mare, B. Becket. *Microsystem Technology in Chemistry and Life Sciences*[M]. Berlin: Springer, 1999. 3~4
  - 3 D. C. Duffy, J. C. McDonald, O. J. A. Schueller *et al.*. Rapid prototyping of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane) [J]. *Anal. Chem.*, 1998, **70**(23):4974~4984
  - 4 H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrnl. A low-cost negative resist for MEMS [J]. *Journal Micromech. Microeng.*, 1997, **7**(3): 121~124
  - 5 Ai Feng. Laser material processing of EMG [J]. *Machining Technology of High-Energy Beam*, 2005, **60**(2):51~52  
艾 枫. EMG 的激光加工技术[J]. *高能束流加工技术*, 2005, **60**(2):51~52
  - 6 D. T. Pham, S. S. Dimov, P. V. Petkov *et al.*. Laser milling [J]. *Proc. Instn. Mech. Engrs. Part B; J. Engineering Manufacture*, 2002, **216**(2):133~136
  - 7 A. Kaldos, H. J. Pieper, E. Wolfb *et al.*. Laser machining in die making-a modern rapid tooling process [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **155-156**:1815~1820
  - 8 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Experimental study of laser milling on marble [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):275~278  
袁根福,曾晓雁. 大理石的激光铣削加工试验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3):275~278
  - 9 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Experimental study of laser milling on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):467~470  
袁根福,曾晓雁. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光铣削试验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):467~470
  - 10 C. H. Tsai, H. W. Chen. Laser milling of cavity in ceramic substrate by fracture-machining element technique [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **136**(1-3):158~165
  - 11 S. L. Campanelli, A. D. Ludovico, C. Bonserio *et al.*. Experimental analysis of the laser milling process parameters [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, **191**(1-3):220~223
  - 12 Peter Heyl, Thomas Olschewski, Roelof W. Wijnandts. Manufacturing of 3D structures for micro-tools using laser ablation [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, **57-58**:775~780
  - 13 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1745~1750  
杨 楠,杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1745~1750
  - 14 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. *Physics of Laser and Material Interaction* [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 35~49
  - 陆 建,倪晓武,贺安之. *激光与材料相互作用物理学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 35~49
  - 15 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Physical process of laser milling [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci & Tech. (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