

文章编号: 0258-7025(2008)11-1836-05

中性盐溶液辅助激光加工试验研究

张 华¹ 徐家文¹ 王吉明²

(南京航空航天大学¹ 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, ²理学院应用物理系, 江苏 南京 210016)

摘要 针对激光加工存在再铸层、热影响区(HAZ)的致命缺陷,提出了中性盐溶液辅助激光加工(SALM)方法,利用中性盐溶液对材料的热化学作用和持续冷却作用在线去除再铸层和热影响区。基于激光在中性盐溶液下衰减的特性研制了试验系统,并对0.5 mm厚的不锈钢片进行了打孔试验,通过对该方法与空气中激光打孔(LBM)加工效果的比较,证实了中性盐溶液辅助激光加工的可行性。试验结果表明,随着盐溶液浓度及流速的增加,中性盐溶液辅助激光加工对于再铸层和热影响区的去除效果越明显;流速5 m/s,质量分数为20%的NaCl溶液辅助激光加工可实现再铸层的厚度减少80%,热影响区的范围缩小90%以上。

关键词 激光技术;激光加工;热化学作用;再铸层;热影响区

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1836

Experimental Study of Neutral Salt Solution Assisted Laser Machining

Zhang Hua¹ Xu Jiawen¹ Wang Jiming²

(¹Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, ²Department of Applied Physics, College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract In order to solve the Achilles' heel of recast layer and heat affected zone produced during laser machining, a new processing of neutral salt solution assisted laser machining (SALM) is put forward, which can remove recast layer and heat affected zone (HAZ) on-line by using the effect of salt solution on the thermal chemical reaction and continuing cooling effect of materials. Based on the properties of laser attenuation in neutral salt solution, the experimental system was designed, and a drilling experiment on a 0.5mm thickness stainless steel sheet was done. It is confirmed that the principle of SALM is right and the processing is feasible by comparing the results of the SALM with laser beam machining (LBM) in air. The drilling experiment results show that the quality of removing recast layer and HAZ are better with the increase of solution concentration and flow velocity, and the thickness of recast layer is reduced by 80%, the dimension of HAZ is reduced by more than 90% during SALM in NaCl solution with concentration of 20% and flow velocity of 5 m/s.

Key words laser technique; laser machining; thermal chemical reaction; recast layer; heat affected zone

1 引言

由于激光束具有单色性好、能量密度高、空间和时间控制性良好等一系列优点,激光加工技术在精密与微细制造领域得到了广泛应用^[1~6]。但激光加工机制是一个热作用过程^[7],利用激光聚焦后的高能量密度靠光热效应去除材料,材料在激光作用下达到气化温度后,液态材料在高压力的蒸气作用下喷出,残留的一部分未喷出的熔融材料凝固后形成再铸层;另外在加工目标区周围还存在热影响区

(HAZ)。再铸层和热影响区的存在会降低零件的疲劳寿命,严重影响零件使用的安全可靠。

目前比较有效地减少再铸层和热影响区的方法包括水下激光加工^[8]、喷射气体辅助激光加工^[9]、超声辅助激光加工^[10]等。水下激光加工可对加工区进行冷却并利用热对流及时带走材料熔液微滴,可以有效阻止再铸层的形成,但仍然存在再铸层和热影响区^[11]。喷射气体辅助激光加工采用辅助气体与激光束同轴喷射,有利于排除熔渣,减小热影响

收稿日期:2008-04-22;收到修改稿日期:2008-06-05

基金项目:国家自然科学基金(50675103)和南京航空航天大学博士创新与创优基金(BCXJ06-12)资助项目。

作者简介:张 华(1980—),男,江苏人,博士研究生,主要从事激光加工新技术的研究。E-mail:nuaazhh@nuaa.edu.cn

导师简介:徐家文(1941—),男,江西人,教授,博士生导师,主要从事特种加工的研究。E-mail:xjw502@nuaa.edu.cn

区,但由于气体喷射方向与排渣方向相反,仍然有部分熔渣粘附于加工区。超声辅助激光加工可以有效减少热影响区和再铸层,但超声振动有损于精密工件。

本文在对中性盐溶液辅助激光加工试验原理分析的基础上,基于激光在中性盐溶液中衰减的特性,研制了中性盐溶液辅助激光加工(SALM)的试验系统,并利用该系统进行了不同条件下打孔对比工艺试验。通过对试验结果比较,验证了中性盐溶液辅助激光加工的可行性,该加工方法能够实现在线去除再铸层和热影响区,成为一种新型复合加工技术。

2 加工试验原理

中性盐溶液辅助激光加工结合了激光的热作用 and 高温下盐溶液的热化学作用,以激光的热作用为主,快速去除材料,同时利用盐溶液的冷却和热化学作用在线去除再铸层和热影响区。加工原理如图 1 所示,其中,中性盐溶液选用活性卤素族盐,其阴离子主要起活化金属表面作用,由于 Cl^- 在卤素离子中的活化能力最强,所以试验选用的中性盐溶液是 NaCl 溶液。激光加工过程中,激光束聚焦于工件后形成几千摄氏度的高温区,被 Cl^- 活化了了的金属与水发生热化学反应,生成氢氧化物沉淀,化学方程式为



热化学反应速率与加工区温度成正比,表达式为^[12]

$$\kappa = \left(\frac{KT}{h} \right) e^{\Delta S/R} \cdot e^{-\Delta H/RT}, \quad (2)$$

式中 κ 为反应速率, T 为温度, K 是温度为 T 时的反应平衡常数, h 为普朗克常数, ΔS 为熵变, ΔH 为焓

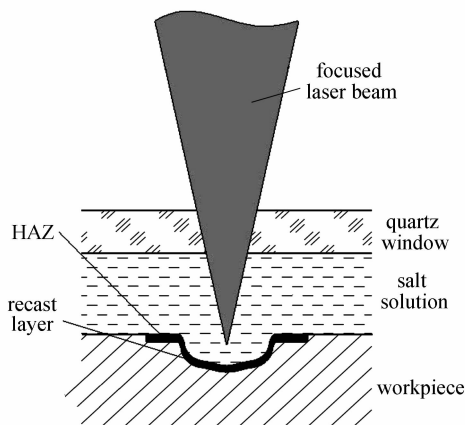


图 1 中性盐溶液辅助激光加工试验原理

Fig. 1 Experimental principle scheme of SALM

变, R 为气体常数。

热化学反应部分产物继续被氧化,生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 两种沉淀物被热对流的盐溶液带走,从而实现在线有效去除再铸层和热影响区。

3 激光在中性盐溶液中衰减特性

根据中性盐溶液辅助激光加工试验原理可知,加工过程中,激光束需通过一定厚度的盐溶液后聚焦于工件加工区。由于盐溶液对激光的吸收和散射作用使激光在盐溶液中传输后能量衰减,因此必须首先对激光在盐溶液中的衰减特性进行研究,以便合理选择工艺参数。

3.1 理论分析

激光在盐溶液中传输时,由于溶解杂质、水分子的吸收和悬浮杂质的散射使激光能量衰减,衰减的程度与入射激光的波长密切相关,其衰减规律遵从 Beer-Lambert 定律

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\mu(\lambda)x], \quad (3)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 为传输前的激光初始辐照度, $I_x(\lambda)$ 为在液体中传输了 x 路程后的激光辐照度, $\mu(\lambda)$ 为衰减系数,表示激光传输 1 m 距离后能量衰减的对数值(自然对数),单位为 m^{-1} 。光束衰减系数 $\mu(\lambda)$, 吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 和散射系数 $\beta(\lambda)$ 之间的关系为

$$\mu(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda), \quad (4)$$

溶液对激光的吸收与溶液的复数折射率有关,溶液的实际折射率的复数形式为

$$m(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda), \quad (5)$$

式中虚部 $k(\lambda)$ 称为消光系数,它与吸收系数的关系为^[13]

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}. \quad (6)$$

溶液对激光的散射作用与溶液中悬浮颗粒的大小有关。用颗粒粒径相对入射激光波长的无量纲参数 ($q = 2\pi R/\lambda$) 来表示颗粒的大小。当 $q < 0.1$ 时激光散射属于瑞利(Rayleigh)散射, $q > 0.1$ 时,属于米氏(Mie)散射。

由于试验所用的 NaCl 溶液的溶质存在水不溶物,从而导致溶液中存在不溶悬浮颗粒。根据理论分析, NaCl 溶液对激光的衰减作用包括悬浮颗粒的散射作用,因此 NaCl 溶液浓度的变化对激光衰减有直接的影响,浓度影响因子用 Ψ_C 表示,单位为 m^{-1}/PSU , PSU 表示 NaCl 的质量分数为 0.1%; 除浓度外 NaCl 溶液温度对激光能量衰减也有影响,温度影响因子用 Ψ_T 表示,单位为 $\text{m}^{-1}/^\circ\text{C}$ 。将 Ψ_C ,

Ψ_T 引入(3)式得

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\{-[\mu(\lambda) + \Psi_C(C - C_0) + \Psi_T(T - T_0)]x\}. \quad (7)$$

3.2 测试及结果

测试设备包括:石英玻璃槽,用以放置样本 NaCl 溶液;恒温加热器,用以加热 NaCl 溶液并控制其温度;连续波半导体绿光激光器 ($\lambda = 532 \text{ nm}$),脉冲 Nd:YAG 激光器 ($\lambda = 1064 \text{ nm}$);激光能量计。实验中 NaCl 溶液的溶剂采用工业纯水,溶质包括分析纯试剂 (Analytic Regent, AR) 和工业试剂 (Industrial Regent, IR),分别为分析纯氯化钠 (GB1266-86) 和工业氯化钠 (QB2238.2-2005),质量分数 (Concentration, C) 按 2%, 8%, 14%, 20% 配制。

首先标定激光穿透空槽后的能量,并以此为基准值,然后将激光在不同样本溶液传输后的能量测试值与基准值的比值作为激光液体传输的衰减率,再利用(3)式计算出衰减系数;变化浓度或温度后得到的衰减系数再通过(7)式计算出浓度影响因子和温度影响因子。

图2为绿光激光 ($\lambda = 532 \text{ nm}$) 在不同浓度的工业 NaCl 溶液中传输的光路照片。由图可见,随着溶液浓度的增加,光路亮度越来越亮,即溶液对激光的散射作用越明显。

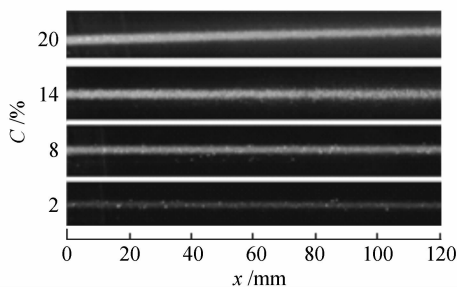


图2 绿光激光在工业 NaCl 溶液中的传输光路

Fig. 2 Light path of green laser in industrial NaCl solution

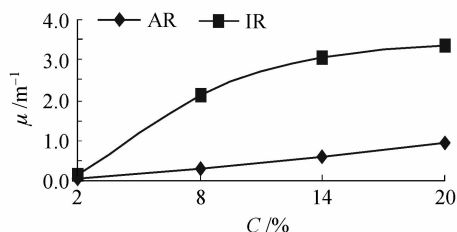


图3 绿光激光在 NaCl 溶液中的衰减系数

Fig. 3 Attenuation coefficient of green laser in NaCl solution

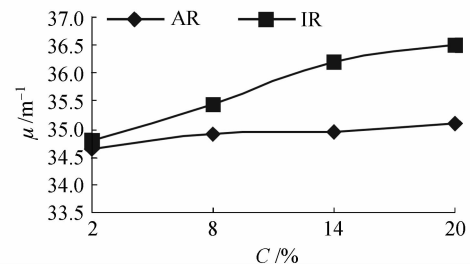


图4 红外激光在 NaCl 溶液中的衰减系数

Fig. 4 Attenuation coefficient of infrared laser in NaCl solution

图3和4分别是绿光激光和红外激光在室温 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) 下 NaCl 溶液中的衰减系数随浓度的变化曲线。可以看出,激光在 NaCl 溶液中的衰减系数随溶液浓度呈线性增加,532 nm 和 1064 nm 激光在纯水中的衰减系数分别为 0.0355 m^{-1} 和 34.2438 m^{-1} ^[14],与纯水相比,由于存在不溶物的散射作用,激光在 NaCl 溶液中的衰减系数高于纯水,其中红外激光在 NaCl 溶液中的衰减系数在 34.5 m^{-1} 以上。

温度在 $30 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内两种激光在 NaCl 溶液中衰减特性的温度影响因子如表1所示。通过表1和图2,3的比较,可以看出,NaCl 溶液的温度对激光衰减的影响与浓度相比极小,从工程应用角度来看,对温度的影响可忽略不计。

表1 NaCl 溶液中激光衰减的温度影响因子

Table 1 Temperature influence factor of the attenuation of laser in NaCl solution

λ/nm	NaCl solution	C/%	$\Psi_T / (\text{m}^{-1}/^\circ\text{C})$
532	AR	2	-0.005 ± 0.0006
		20	-0.012 ± 0.003
	IR	2	-0.007 ± 0.001
		20	-0.034 ± 0.005
1064	AR	2	-0.017 ± 0.001
		20	-0.022 ± 0.003
	IR	2	-0.020 ± 0.005
		20	-0.027 ± 0.005

4 试验系统及条件

4.1 试验系统

对激光在盐溶液中的衰减特性的研究结果表明,红外激光在 NaCl 溶液中的衰减系数在 34.5 m^{-1} 以上,即激光在 NaCl 溶液中传输 15 mm,能量衰减接近 40%,这就要求试验中激光通过的 NaCl 溶液的距离控制在几毫米以内,以便尽量减少激光传输中的能量损耗。另外,热化学作用生成的

沉淀产物需要及时带走, 整个加工区的 NaCl 溶液需要保证具有连续稳定的活化能力。

图 5 为研制的试验系统, 其中基座与光学玻璃窗口组成溶液流动腔体, 保证溶液厚度在 5 mm 之内; 流动腔体两端分别接通 NaCl 溶液槽, 由微型水泵提供动力, 使在加工区的溶液不断更新, 可以及时带走热化学反应的产物, 同时确保 NaCl 溶液对金属的连续稳定的活化能力。

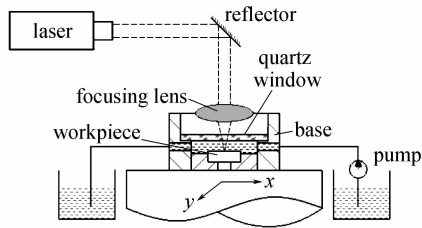


图 5 中性盐溶液辅助激光加工试验系统示意图
Fig. 5 Experimental system schematic of SALM

4.2 试验条件

试验选用 XGL-1 脉冲 Nd:YAG 固体激光器, 单脉冲能量 100 mJ, 脉宽 20 ns, 重复频率 10 Hz; 采用工业 NaCl 溶液, 质量分数为 20%, 流速 5 m/s, 加工时间为 10 s。加工试件选择厚度为 0.5 mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢薄片。

5 试验结果与分析

5.1 打孔形貌对比分析

利用自制的中性盐溶液辅助激光加工试验系统对不锈钢材料进行了打孔试验, 将该方法与空气中激光打孔 (LBM) 的打孔形貌进行对比分析。

图 6~8 分别是两种加工工艺打孔整体形貌、边缘形貌和孔底局部形貌的显微对比照片。可以看出, 激光在空气中打的孔外围存在明显的热影响区, 孔边缘和底部堆积了大量的熔化再凝固金属层, 即再铸层; 中性盐溶液辅助激光加工打的孔整体轮廓较好, 孔边缘、孔底的再铸层基本被去除。图 9 是孔边缘的热影响区的显微对比照片。可以看出, 与空

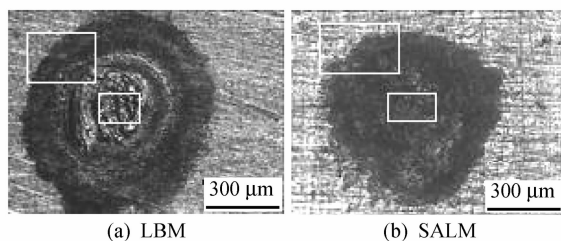


图 6 打孔整体形貌比较

Fig. 6 Comparison of holistic profiles of holes

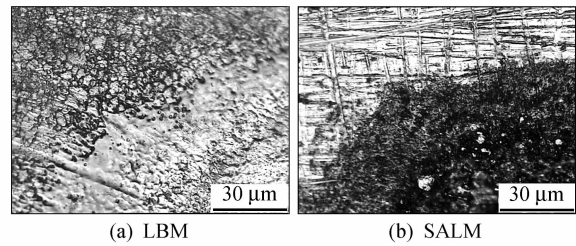


图 7 打孔边缘形貌比较

Fig. 7 Comparison of fringe profiles of holes

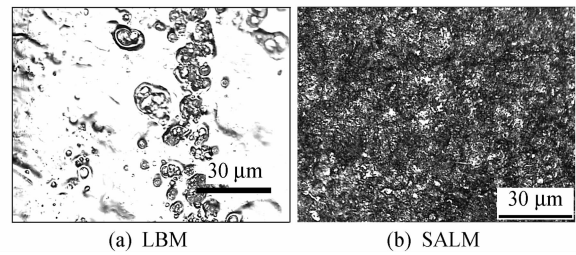


图 8 孔底局部形貌比较

Fig. 8 Comparison of bottom part profiles of holes

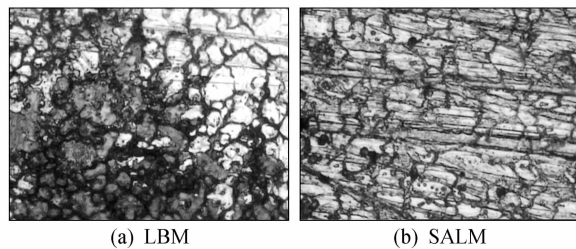


图 9 孔边缘热影响区的比较

Fig. 9 Comparison of HAZ of holes' edge

气中激光打孔相比, 中性盐溶液辅助激光加工的热影响区大幅减小。通过对两种加工工艺打孔形貌的比较, 证实了中性盐溶液辅助激光加工可以在线去除再铸层和热影响区。

5.2 中性盐溶液工艺参数对加工质量的影响

试验研究了在一定范围内变化的浓度和流速 (flow velocity, FV) 对加工质量的影响。加工质量的量化标准取自再铸层厚度 (recast thickness, RT) 和热影响区范围 (HAZ dimension, HD) 减少量的比值, 两者分别用 RRR (Recast reduce rate) 和 HRR (HAZ reduce rate) 表示, 其中

$$RRR = (1 - RT_{SALM} / RT_{LBM}) \times 100\%, \quad (8)$$

$$HRR = (1 - HD_{SALM} / HD_{LBM}) \times 100\%. \quad (9)$$

试验中, 激光能量与加工时间恒定, 中性盐溶液质量分数从 2% 递增至 26%, 流速从 1 m/s 递增至 9 m/s。试验结果分别如图 10 和 11 所示。由图可以看出, 盐溶液浓度及流速越大, 中性盐溶液辅助激光加工对于再铸层和热影响区的去除效果越明显。其中,

浓度变化对再铸层的去除影响较大;而流速变化对热影响区的减小影响显著,这是由中性盐溶液辅助激光加工的原理决定的,再铸层的去除主要靠盐溶液与材料的热化学作用,而热影响区的减小主要依赖于流动的盐溶液对加工区持续的冷却作用。试验结果证明了中性盐溶液辅助激光加工原理的正确性。

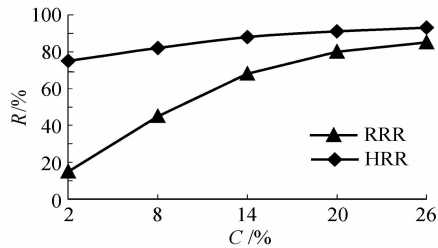


图 10 浓度对加工质量的影响

Fig. 10 Influence of concentration on the machining quality (FV, 5 m/s)

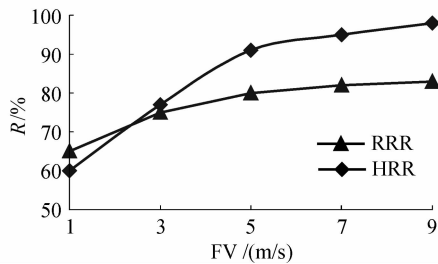


图 11 流速对加工质量的影响

Fig. 11 Influence of flow velocity on the machining quality (C, 20%)

6 结 论

中性盐溶液辅助激光加工是为了解决激光加工出现再铸层、热影响区这些致命缺陷而提出的一项新型复合加工技术,利用中性 NaCl 溶液的热化学作用和持续冷却作用在线去除再铸层和热影响区,具有优质高效的特点。流速 5 m/s,质量分数为 20% 的 NaCl 溶液辅助激光加工可实现再铸层的厚度减少 80%,热影响区的范围缩小 90% 以上。试验结果表明,中性盐溶液辅助激光加工方法在工程上切实可行,有望在精密和微细加工领域得到应用。

参 考 文 献

- 1 Yao Zhengqiang, Yao Y. Lawrence, Wang Fei *et al.*. Progress in advanced laser assisted manufacturing technology [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, **39**(12):57~61
姚振强, Yao Y. Lawrence, 王 飞 等. 先进激光制造技术研究新进展[J]. *机械工程学报*, 2003, **39**(12):57~61
- 2 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Status and prospect of precision laser machining [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(5):1~3
李祥友, 曾晓雁, 黄维玲. 激光精密加工技术的现状和展望[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(5):1~3
- 3 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):595~622
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):595~622
- 4 Yang Xichen, Wang Gang, Zhao Youbo *et al.*. Femtosecond laser processing of arrayed micro holes of metal filtration membrane [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1155~1158
杨洗陈, 汪 刚, 赵友博 等. 飞秒激光制备阵列孔金属微滤膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1155~1158
- 5 Ma Nangang, Wang Xijun, Ding Huadong *et al.*. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1441~1445
马南钢, 王希军, 丁华东 等. 碳化硼厚板的激光切割工艺及其机制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1441~1445
- 6 Li Yanning, Tang Jie, Hu Xiaotang *et al.*. Applications of pulsed laser microfabrication technology in MEMS [J]. *Piezoelectrics & Acousto-Optic*, 2005, **27**(2):185~189
李艳宁, 唐 洁, 胡小唐 等. 脉冲激光微加工技术在 MEMS 中的应用[J]. *压电与声光*, 2005, **27**(2):185~189
- 7 William M. Steen. *Laser Material Processing* [M]. Third Edition. Springer-Verlag, 2003. 1~178
- 8 Arvi Krusing. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1—general features, steam cleaning and shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**:307~327
- 9 B. Tirumala Rao, Rakesh Kaul, Pragya Tiwari *et al.*. Inert gas cutting of titanium sheet with pulsed mode CO₂ laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**:1330~1348
- 10 W. S. Lau, T. M. Yue, M. Wang. Ultrasonic-aided laser drilling of aluminum-based metal matrix composites [J]. *CIRP Annals*, 1994, **43**(1):177~180
- 11 S. Roth, M. Geiger. Novel technique for high-quality micro structuring with excimer lasers [C]. *SPIE*, 2000, **3933**:338~346
- 12 A. Cotton, G. Wilkinson. *Basic Inorganic Chemistry* [M]. Third Edition. John Wiley and Sons, 1976. 10~12
- 13 Martin Von Allmen. *Laser-Beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications* [M]. Springer-Verlag, 1987. 6~8
- 14 George M. Hale, Marvin R. Query. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(3):555~563