

文章编号: 0258-7025(2003)03-0275-04

大理石的激光铣削加工试验研究

袁根福, 曾晓雁

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用 Nd:YAG 脉冲激光器对大理石进行铣削加工试验。系统研究了工艺参数对铣削量和铣削面质量的影响规律, 并探讨了不同石材类别对激光铣削面质量的影响。利用优化了的铣削工艺对大理石进行多种形状铣削加工。

关键词 激光技术; 铣削量; 激光铣削; 大理石

中图分类号 TG 665 **文献标识码** A

Experimental Study of Laser Milling on Marble

YUAN Gen-fu, ZENG Xiao-yan

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Experiments of laser milling were done on marble with YAG laser. The influence of the processing parameters on the laser milling amount and milling surface quality were studied systematically, and the experiments of different shapes were carried out with optimized processes.

Key words laser technique; milling amount; laser milling; marble

1 引 言

大理石和花岗岩等天然石材质地坚硬、色彩艳丽、抗腐、抗磨耐用。随着工业技术的发展和人民生活质量的提高,其在建筑装饰、家居用品、环保、机械和化工等行业的应用越来越广泛。大理石属于硬脆和不导电材料,其传统的加工方法是用机械的方法进行锯、切、磨、抛光和用人工的方法进行凿、鑿加工。但这些加工方法存在噪音大、粉尘严重、加工效率不高,特别是对一些复杂和精度要求比较高的孔、槽等的加工,更是难以胜任。随着现代加工方法的发展,人们研究开发了利用高压水射和超声波等方法进行石材的切割和凿削加工^[1,2]。特别是近年来,随着激光技术的发展,人们已经开始研究利用激光来对石材进行钻孔和精密切割加工,这在日本已经应用到建筑的高档装饰中^[3]。激光加工具有精度高和易于进行数控等许多优点,因此,研究用激光铣削技术进行石材精密铣削加工,对开发石材精密件和精美装饰件是很有意义的。

2 试验方法与设备

激光铣削(图 1)就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,类似于机械铣削过程。利用激光铣削,理论上可以铣削任何材料至所要求的尺寸。利用 YAG 脉冲激光进行激光铣削,其实质是利用激光光斑部分重叠的单脉冲形成的密集孔群,层层剥离材料而达到成型的目的。

加工试样选用市售的普通白色大理石(汉白玉)、黑色大理石和花岗岩。激光器采用 300 W Nd:YAG 固体脉冲激光器,波长为 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽和频率可调。激光输出能量的大小可以通过调节抽运灯电源电压来控制。激光经过透镜聚焦后垂直入射到工件表面。工作台由一台 586 微机自动控制。加工采用氧气作为辅助气体,气压约为 0.4 MPa,喷嘴直径约为 $\phi 1.5 \text{ mm}$ 。试验通过改变不同的激光铣削工艺参数来探讨影响大理石激光铣削量和质量的规律。利用不同激光铣削工艺,分别在石材上一次性铣出边长为 3 mm 的方形槽,测量出槽的深度,作为

收稿日期:2002-07-16; 收到修改稿日期:2002-10-31

作者简介:袁根福(1964—),男,安徽建筑工业学院数理系副教授,现在华中科技大学激光技术重点实验室攻读博士学位,主要研究方向为激光与物质相互作用。E-mail: forygf@263.net

不同工艺激光铣削的铣削量大小的比较值。比较观察不同工艺激光铣削面的质量。利用优化的激光铣削工艺进行多种槽的试铣削,用体视显微镜观察其形貌并照相。

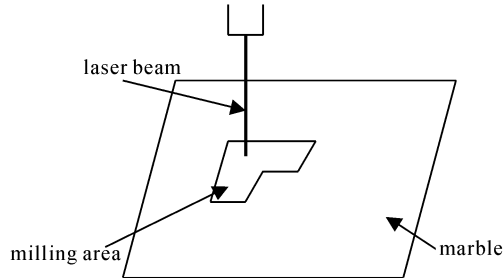


图 1 激光铣削示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser milling

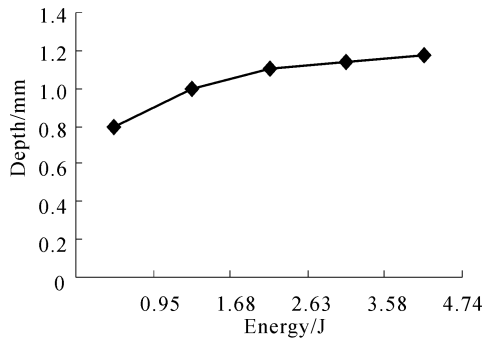


图 2 能量与铣削量的关系

Fig. 2 Relationship between laser energy and milling amount

3 试验结果与分析

3.1 激光输出能量对大理石铣削的影响

试验所用的激光器的输出激光能量的大小是通过调节抽运灯电源电压来实现的。保持激光束扫描速度(2 mm/s)、重复频率(40 Hz)和脉宽(0.5 ms)不变,只是改变灯抽运两端电压,即改变激光的输出单脉冲能量。由图 2 可以看出,大理石的激光铣削量随着激光输出的单脉冲能量的增加而增加。这是由于激光单脉冲能量越大,激光作用在试样上形成的气化层和熔融层越大,单脉冲形成的孔的深度是随着激光束能量增大而增大的,因此由密集孔群组成的铣削面的深度也就增加。

3.2 重复频率和脉宽对激光大理石铣削的影响

图 3 给出了在不同激光重复频率和脉宽条件下(单脉冲能量 1.68 J,激光扫描速度 2 mm/s)激光铣削量的变化规律。可以看出,随着重复频率的提高,

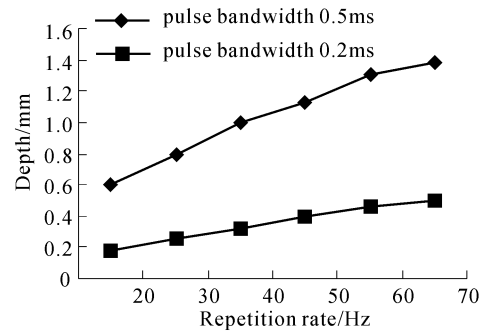


图 3 重复频率和脉宽与铣削量的关系

Fig. 3 Influence of the laser repetition rate and pulse width on the milling amount

铣削量增加。这是由于当激光重复频率较高时,相邻光斑重叠度^[4]高,激光形成的孔深比较大,同时在相同时间内,重复频率高,试样加工区接受的激光能量较多,加工区的大理石气化和熔化的量比较大,从而也提高了铣削量。由图中不同脉宽的两条曲线可以看出,0.5 ms 脉宽的激光铣削量明显高于 0.2 ms 的激光铣削量,这是由于在能量相同的情况下,长的脉宽可以保持激光形成孔洞内的熔液处于较长时间的沸腾状态,在蒸气的反冲压力作用下,孔洞内的溶液易于被挤压喷射出去^[5],从而使孔洞加深,激光铣削量增大。

3.3 激光扫描速度对大理石铣削的影响

保持激光输出能量(1.68 J)、重复频率(40 Hz)和脉宽(0.5 ms)不变,图 4(a)反映了激光扫描速度对大理石铣削量的影响。随着激光扫描速度的提高,大理石的激光铣削量明显降低。这是由于当扫描速度增加,在相同重复频率情况下,相邻光斑重叠度降低,减少了孔深,从而降低了铣削量。另外,扫描速度大,同一试样加工区接受的激光能量较少,加工区的石材气化和熔化的量比较少,从而也降低了铣削量。当扫描速度高于 2 mm/s 时,扫描速度的增加对大理石铣削量的影响不明显。

3.4 辅助气体的压力对激光铣削量的影响

图 4(b)为其他参数一定时,辅助气体压力的变化对铣削量的影响。具体工艺为:激光单脉冲能量 1.68 J,脉宽 0.5 ms,扫描速度 2 mm/s,重复频率 40 Hz。由图可见,激光铣削量随着气体压力增加而增加,压力增加到一定值后,铣削量增加速度变缓。辅助气体增加铣削量的原因是由于辅助气体增加了激光作用于试样产生飞溅物的飞溅速度,从而使熔体飞溅物飞离铣削面,减少了熔体在铣削面的

凝结。气体压力越大,飞溅速度越大,熔体在铣削面

凝结的几率越低,从而铣削深度越大。

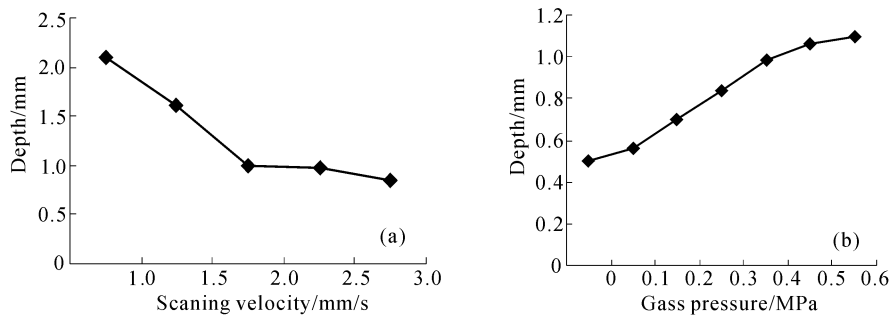


图4 扫描速度(a)及吹气压力(b)与铣削量的关系

Fig. 4 Influence of scanning velocity (a) and pressure of gas (b) on the milling amount

4 激光参数对铣削面粗糙度的影响机理分析

激光功率、频率、脉宽、激光束扫描速度、扫描行距和吹气压力等都对激光铣削面质量有影响,这是个复杂而重要的问题,现在只进行初步讨论。试验表明在其他条件相同情况下,激光铣削面粗糙度随激光能量增加而明显增加,随激光频率增加而略有降低,而对激光扫描速度的变化不明显。下面通过建立铣削面粗糙度模型来分析激光参数对铣削面质量的影响机理。设单脉冲形成的孔上端直径为 d , 下端直径为 d_0 , 深度为 h , 圆孔锥度为 α 。另外,设圆孔相交一点处孔的直径为 d_x , 容易推出 $d_x = \sqrt{2}v/f$, v 为激光扫描速度, f 为激光脉冲频率。那么,四圆孔相交余下的凸点高度就是铣削面粗糙度 R_z (如图5)。

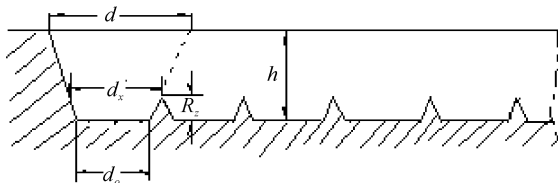


图5 激光铣削粗糙度产生示意图

Fig. 5 Indicative roughness picture of laser milling

由几何关系很容易可得

$$R_z = \frac{\sqrt{2}v/f - d + 2\alpha \cdot h}{2\alpha}$$

由于存在 $d \propto E^{1/3}$ 和 $h \propto E^{1/3}$, 即有下面公式

$$R_z = \frac{\sqrt{2}v/f - k_1 E^{1/3} + 2\alpha \cdot k_2 E^{1/3}}{2\alpha}$$

式中 k_1, k_2 为与材料有关的常数, E 为激光能量, 激

光扫描速度为 $v = 1 \sim 5$ mm/s, 激光脉冲频率 $f = 20 \sim 70$ Hz, 圆孔锥度 α 对某一激光器来说基本上是一定的。分析上式表明, 函数 R_z 值随自变量 E 增加而明显增加; 随自变量 v 增加而略增加; 随自变量 f 增加而略降低。这就较好地说明了激光功率、频率和激光束扫描速度对激光铣削面粗糙度的影响规律。

5 工艺参数优化与多样铣削

根据上述试验结果与分析, 激光铣削工艺参数对大理石的铣削量和铣削面质量的影响很大, 为了提高大理石激光铣削效率和降低铣削面粗糙度, 有必要对激光铣削工艺进行优化。当需要较大的铣削速率时, 激光脉宽应选用 0.5 ms, 重复频率宜选 40 ~ 60 Hz, 激光扫描速度应选适当大值, 激光单脉冲输出能量 2.63 J 左右为宜。高能量脉冲使大理石产生较厚的熔化层, 在随后冷却过程中形成过量溶渣而使激光铣削量增加变缓, 同时导致铣削的大理石面较粗糙。为了降低激光铣削面粗糙度, 可以采用降低激光输出能量同时提高激光频率来达到, 但其铣削量较低。为了保证大理石的激光铣削既有高效率, 铣削面又能满足较低粗糙度要求, 可以先选用如上所述的合适工艺进行较高速粗铣, 然后再利用快速扫描和低能量工艺进行精铣。另外, 还可以通过减小激光脉宽来降低大理石铣削面的粗糙度。利用优化的工艺可以在大理石上铣出各种图形(图6), 槽深度都为 2 mm 左右。测得试样的激光铣削尺寸精度为 IT7~8, 铣削面粗糙度 R_z 为 4~5, 圆度 0.03, 方形对边平行度为 0.05, 边缘垂直度(陡直度)为 0.05 左右, 四边形圆角半径为 0.12 左右。

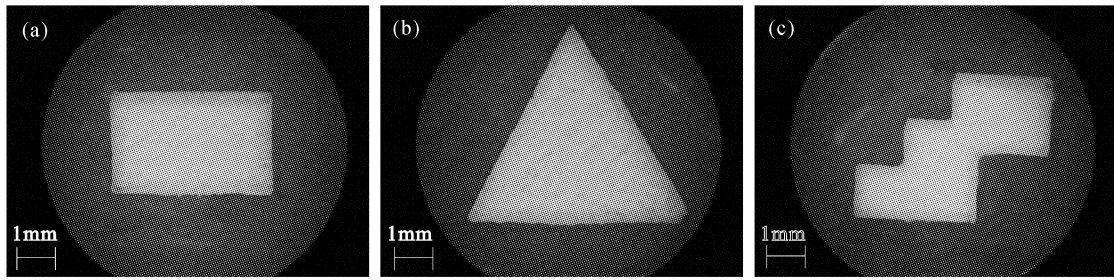


图 6 大理石上铣出的各种图形

(a) 矩形槽; (b) 三角形槽; (c) 组合形槽

Fig. 6 Different pictures of laser milling on marble

(a) rectangle groove; (b) triangle groove; (c) combination groove

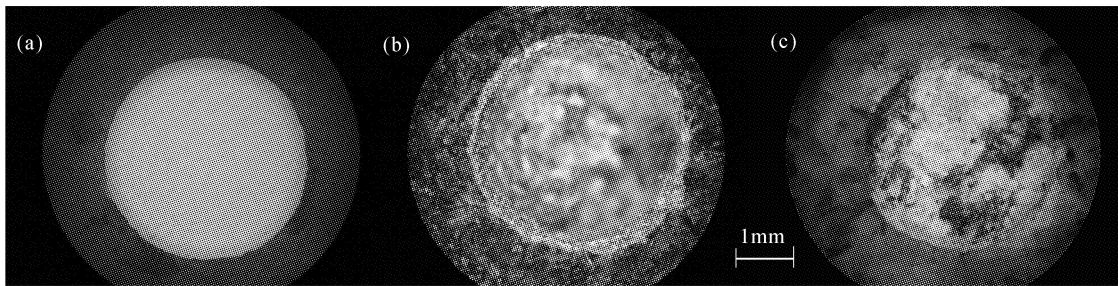


图 7 三种石材激光铣削的盲孔比较(直径 6 mm)

Fig. 7 Compare of laser milling blind holes for three kinds of lithoid materials (diameter 6 mm)

6 不同石材种类对激光铣削的影响

图 7(a)~(c)是利用相同的激光铣削工艺,分别在白色大理石、黑色大理石以及灰白色花岗岩上铣出直径为 6 mm 的盲孔。黑色大理石的铣削深度比其他两种石材高许多,白色大理石和灰白色花岗岩铣削深度相差不大。这可能是由于黑色大理石对激光吸收率较高的缘故。白色大理石的激光铣削面质量最好。黑色大理石铣削面较粗糙,其原因可能是材质构造均匀性较差、粗粒而不致密和含有较多杂质物。花岗岩铣削面质量差,是由于花岗岩内含有高达 60% 以上的 SiO_2 ,加工面的大量 SiO_2 在激光能量的作用下,熔化冷却后在铣削面产生渣滓^[3],从而严重降低花岗岩的激光铣削面质量。

7 结 论

利用激光铣削技术可以在大理石上铣出比较精密的各种复杂形状的结构。激光铣削工艺影响到大理石的铣削量和铣削质量。增加激光输出能量、重复频率、增大脉宽和减少激光扫描速度,都可以增加激光铣削量的大小。激光束能量对铣削面质量有较

大影响。利用建立的粗糙度模型可以较好地说明激光束能量、脉冲频率和激光扫描速度对铣削面粗糙度的影响机理。为了在不降低铣削速率的情况下,提高铣削面质量,可以先进行激光快速粗铣,然后利用快速扫描和低能量进行精铣。不同种类石材的激光铣削面的质量差别很大。结构均匀,细晶致密和含杂质较少的白色大理石的激光铣削面质量最好。

参 考 文 献

- 1 Da Zhou. The compare of laser beam and high pressure water-jet beam [J]. *Information for Optical Machine*, 1996, **13**(2):33~35
- 2 Qin Yong. Reaserch of ultrasonic processing for marble [J]. *Late-model Technology and Technics*, 2001, (2): 17~18
- 3 Kenji Sugi, Hacked Moto. Study on laser cutting assisted by water [J]. *Saturation of Marble*, 1996, **24**(2):191~199
- 4 LI Xiang-you. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(12):1125~1129 (in Chinese)
- 5 M. von Allmen. Laser-beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1994. 164 ~ 167 (in Chinese)