

火花放电辅助下激光破坏材料的研究*

曾传相 周业为 谢建

(四川联合大学光电科学技术系, 成都, 610064)

摘要: 分析了直流火花放电辅助下激光破坏金属和绝缘体的机理, 介绍了有关实验方案和结果。研究表明, 在适当的直流火花放电辅助下, 激光对材料的破坏作用大大增强, 这种方法可望在激光加工技术中得到有效的应用。

关键词: 火花放电 激光 激光加工

Investigation of laser damage of materials assisted by DC spark discharge

Zheng Chuanxiang, Zhou Yewei, Xie Jian

(Department of Optoelectric Science and Technology, Sichuan United University, Chengdu, 610064)

Abstract: This paper introduces the physical mechanism of laser damage of metal materials and isolation materials, assisted by the DC spark discharge, and discusses the relation of DC spark discharge factors and the laser parameters, effecting on the laser cutting and laser drilling. A experimental setup is established to analysis the electrode arrangement and spark factors and to fined the optimum match of DC discharge factors and laser parameters. The experiment results show that the quality of laser cutting and laser drilling with DC spark discharge will considerably improve and the technique can be widely used in laser processing.

Key words: spark discharge laser radiation laser processing

* 四川省科委应用基础科学基金资助。

BL 为球面镜, P 为正交棱镜, M 为反射镜。), 使目标象斑始终落在雪崩光敏面上, 提高接收效率。

五、结 语

采用本文所述方法, 可实现高温炉体耐火绝热层轮廓不接触测量, 具有实用价值。测量范围为 1~ 20m, 精度为 1cm。如果将主振频率作相应的改变, 可针对性地进行其他不接触测控。

参 考 文 献

- 1 Max E B, Robert S, David Z. SPIE Proc, 1986; 726: 364~ 374
- 2 贺安之, 罗必凯, 苗鹏程 *et al.* 光学学报, 1993; 13(7): 667~ 669
- 3 Kari M, Juha K, Risto M. Appl Opt, 1993; 32: 5334~ 5347

作者简介: 黄作明, 男, 1965 年 1 月出生。讲师, 硕士研究生。主要从事光电信息传输与处理研究。

收稿日期: 1996-04-18 收到修改稿日期: 1996-12-06

引 言

激光的优良特性为激光加工提供了一种富有潜力的新技术,激光淬火、焊接、打孔、切割、表面处理等一系列应用,正随着激光器件的发展而日趋活跃。然而,至今激光加工并未得到广泛应用,其主要原因在于大能量或大功率激光器件价格昂贵,许多器件的性能尚不能充分满足工业生产的要求。要改变这种状况,诚然主要有待于激光器件的发展,但如何既充分利用现有激光的优良特性又降低对激光能量或功率的要求,如何以其他辅助措施改善激光加工的性能,也是值得研究的课题。本文讨论了外加直流火花放电增强激光对材料的破坏作用,并报导了有关实验结果。

一、机 理 分 析

在光吸收介质中,激光对材料作用的主要物理机理是部分吸收光所导致的加热作用。除非作用光极强,通常是线性单光子吸收过程起主导作用。激光辐照区的材料温升,由激光功率、作用时间、光吸收系数、材料比热及热扩散率所决定。低强度激光只引起材料温升而不产生相变,但随着激光不断增强,将会引起材料熔化、蒸发、溅射、蒸气电离等一系列现象。对激光打孔、切割而言,基本着眼点是用足够强的激光使要打孔、切割部位的材料迅速熔化和溅射出来。对此,可从如下几方面具体考虑:

1. 向所要打孔或切割的区域输入足够的能量或功率,使其充分熔化。在通常的激光加工中,所加工区域的位置和大小由激光束的聚焦情况决定,加热该区域所需能量或功率只由激光束提供。若激光束的发散角为 θ ,会聚透镜的焦距为 f ,则聚焦光斑直径 $d = f\theta$ 。加工深度为 h 、孔径为 d 的孔所需能量 E 为 $E \sim \pi(d/2)^2 h \rho(L + CT_v)$

式中, ρ , L , C , T_v 分别为所加工材料的密度、溶解热、比热、熔点。不难看出,单纯由激光束提供所需加工能量是有一定局限性的,具体表现为:(1)在许多情况中,所需加热能量或功率较大,从而使激光器件复杂庞大、价格昂贵、光束性能差。通常的器件难以满足加工要求,生产上的推广应用也受到局限。(2)激光器件的输出大时,通常会导致振荡模式大大增加,光束发散角 θ 变大。这一方面造成加工区域增大,另一方面使聚焦光束的能量密度或功率密度不能有效提高,从而单纯由增大激光器件输出所能得到的加工深度受到限制。(3)由于加工中使激光束聚焦,必然造成在深度方向上的加工锥度。透镜焦距越小,所产生的锥度越大。加工件的厚度越大,由偏离焦点所造成的孔径随深度的变化也越大。

鉴于上述情况,可在聚焦激光束决定加工位置及区域的前提下,通过快速火花放电向加工区域补充能量。大家熟知,电火花加工是一种传统的特种加工技术,它通过火花放电通道中瞬时产生大量热能,以及电子或正离子对放电电极的强烈轰击而使电极表面金属局部熔化甚至蒸发、溅射,造成电极被蚀除。通常是使电容器缓慢充电而贮存电能,随后通过快速火花放电而将电能转换成热能释放出来。由于这一过程非常短促,加工区域金属的熔化、熔液的热膨胀及气化过程均具有爆炸性,它们的爆炸性应力会使熔化金属溅射出来。这同激光所造成的加热、熔化、蒸发及溅射,具有类似性质。显然,若采取适当措施向激光所限定的加热区域同步地补充进火花放电所产生的热量,实现激光加工与电火花加工的有机结合,必将使二者取长补短。这首先表现在降低了所需激光能量或功率,从而有利于克服与激光能量或功率大有关的一系列问题。或者说,在相同的激光能量或功率下,直流火花放电的辅助会使所加工的孔更

大、更深。此外,若激光束加工所需孔的入射端,而辅助火花放电加工该孔的出射端,二者前后夹击必然有利于减小孔径的锥度,对改善孔的质量有好处。这一思想,正是本工作所研究的主题^[1-4]。

2. 向所加工区域输入能量应适当快,以减少由工件的热传导所产生的损耗。然而,输入能量也不能过快,否则会造成熔化金属在气化状态下抛射的太多,从而多消耗气化热及使蒸气电离所产生的能量损耗。因此,激光加工中适宜用普通脉冲激光或使聚焦连续激光快速通过加工区域。在电火花放电中,应使放电时间适当短,并与激光照射时间匹配。为使激光与火花放电同步,应通过激光照射时所产生蒸发物中的电子、离子来触发起火花放电。

3. 及时将熔化材料抛射出来,以形成所需的孔或切缝。激光所产生的热蒸发及所熔化材料急速膨胀的热应力所引起的熔液溅射作用,将使工件材料抛射出来。在火花放电中,除热蒸发及爆炸性应力的溅射作用外,极间电场对电子、正离子的牵引或排斥作用,高速电子、离子对电极的轰击力,均有利于熔化材料抛射出来。因此,激光与火花放电配合无疑对加快熔化材料及时抛离有利。

4. 选择适当加工条件,以满足对打孔或切缝的质量要求。毫无疑问,激光与火花放电的有机结合,将对加工条件提供更大的选择余地,以提高加工质量。

二、实施方案

要实现上述基本想法,关键在于怎样实现激光与火花放电有机的恰当配合。为此,可从如下几方面考虑和选择实施方案:

1. 激光与火花放电的配置

如图 1 所示,在图 1a 中聚焦激光束通过孔状工具电极 P_1 中心小孔或针状电极,入射到金属工件上,工件本身为电极 P_2 。由于此方案中激光与工件位于工件同侧,激光与火花放电的热能同时输入到加工区域的入口端,故此方案虽然对穿孔或切割有利,但难以克服锥度的影响;在图 1b 中

激光与火花放电处于工件两侧,激光处于所要打孔的入口端,而火花放电处于该孔的出口端。只有激光首先击穿金属工件之后,才能由激光穿孔所产生的蒸发、溅射电荷触发起 P_1 和 P_2 (工件) 间的火花脉冲放电。在此方案中,火花放电从孔的出口端扩大孔,从而有利于克服聚焦激光束所产生的锥度影响;在图 1c 中工件一般为绝缘体,也可为金属。电极 P_1, P_2 位于工件两侧,在工件未被激光烧穿时也不会产生火花放电。当工件为非金属且未被激光烧穿时,极间的静电场只起到从工件的激光加热区域拉出电子或正离子作用。一旦激光使工件烧穿, P_1, P_2 间就会产生火花放电,从而对由激光烧穿的孔起到扩大与整形作用。上述几种方案各有其优缺点,并且通过改变激光和火花放电能量、电极与工件间的距离等因素就可改变工件上穿孔的状况。可根据加工要求选择不同的方案及加工条件。

2. 电极材料和形状的选择

在火花放电中,应使不是加工工件的那个电极——工具电极的电蚀量尽可能小,因此应选择熔点、沸点高,导热系数、比热、熔解热、气化热大的材料作这种电极。钨、钼、石墨等材料熔点、沸点高,铜导热性好,故在火花放电中作工具电极的电蚀量较小。但是,钨、钼较难加工,用

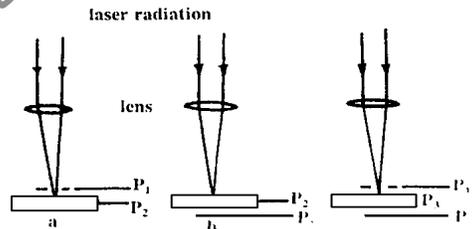


Fig. 1 Experimental schemes of laser processing assisted by DC spark discharge

紫铜、黄铜作电极较为合适。图1所示的不同方案中,所用电极形状也不尽相同,可根据具体情况选用孔状、针状或板状电极。

3. 放电极性的选择

在火花放电过程中,存在两电极的电蚀速率不同的所谓“极性效应”。在脉冲放电时,电子质量虽小但其加速度及速度很大,故在持续时间较短(小于50 μ s)的脉冲加工中,阳极的电蚀量大于阴极电蚀量,工件应接正极;反之,正离子虽然质量较大,但在电脉冲持续时间较长时,它们也能获得较大速度对阴极进行轰击,此时工件应接负极。由于交变极性的电脉冲加工无“极性效应”,会导致工具电极损耗大,故应用单向直流脉冲火花放电,并根据所用放电脉冲宽度选择不同的放电极性。

在火花放电配合激光加工时,是由激光触发起电极间产生火花放电。对打孔或切割而言,激光与火花放电所起作用的机理虽然类似,但所起作用的时刻、位置、出发点等方面不尽相同,因此,激光脉冲与火花放电脉冲的宽度不必相同。由于调Q激光脉冲所产生的等离子体蒸气对激光有屏蔽、衰减作用,故激光加工中宜用普通脉冲激光或连续激光。对重复频率脉冲激光加工而言,应有适当的但不一定是相同重复频率的火花放电脉冲与之配合;对连续激光加工而言,应有适当的高重复频率火花放电脉冲与之配合。

4. 火花放电脉冲电源

如图2所示,所需之火花放电脉冲由简单的RC充放电装置产生,其充电电源的电压在千伏范围内可调,由它通过充电电阻 R 向储能电容 C 充电。由转换开关改变 R, C 的大小从而改变充电速率、放电脉宽及储能。由于电容器的储能 $E = CV^2/2$,故改变电容 C 、电压 V 均可调节火花放电能量,但电压 V 的改变对储能影响较大,改变电容 C 不仅改变储能,还会影响到放电脉冲宽度。通常,所用普通激光脉冲宽度为毫秒级,故产生相应脉宽的火花放电所需电容为百微法级。通过选择适当的充电电阻,可产生高、中、低三种重复频率的火花放电,改变储能电容则可产生宽、中、窄三种放电脉冲宽度,以适应不同加工情况的需要。

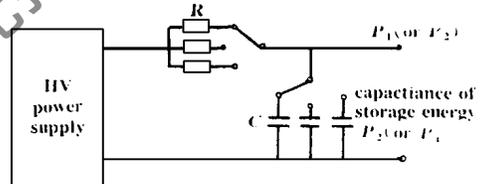


Fig. 2 Power supply of DC spark discharge

三、初步实验结果及讨论

根据上述物理思想及实验方案,我们曾分别用普通脉冲红宝石或钕玻璃激光、连续YAG或CO₂激光,作了火花放电辅助下金属的破坏实验,得到如下初步结果:

1. 对工件的蚀除量明显增加

由于直流火花放电向激光所限定的加热区域输入辅助能量,故必将大大增加对工件的蚀除量,造成在相同激光辐照下工件上产生更大、更深的孔或切缝,或在加工同样的孔或切缝时所需的激光能量或功率降低,从而可充分保证所需光束质量。在实验中可明显看出,往往由单脉冲激光多次照射或连续激光长时间照射所不能烧穿的工件,加进火花放电的辅助作用后,可一举将工件烧穿。况且,由于火花放电过程是直接将电能变成加工所需热能,减少了由电能变成激光能量然后再转换成所需加工热能的多次低效率转换环节,而此热量又集中在激光所限定的微小加工区域,故火花放电的电能辅助激光加工的效率较高。

例如,我们用焦距为50mm的透镜聚焦一束能量约0.5J的红宝石激光于一块厚度为

1mm 的锯条钢片上, 此脉冲激光接连照射十余次均不能将其烧穿。但按图 1a 所示方案, 将 100 μ F 的电容充电到 1000V (50J 贮能), 在激光引起的蒸发、溅射电荷触发下向激光的光斑区火花放电, 一举就能将此锯片烧穿。同样, 以焦距为 50mm 的透镜将 20W 的连续 YAG 激光聚焦在这种锯片上, 连续照射数分钟也不能将其烧穿, 但如以每秒数十次而每次放电能量为 2J 的重复火花放电辅助之, 则能快速将此工件烧穿, 并由移动工件而产生切缝。

按图 1b 所示方案, 在工件快要被激光烧穿时, 由尚未烧穿薄层的热发射作用, 也能在工件后面触发起火花放电, 从而将工件烧穿, 产生较好的孔或缝。

2. 加工质量的改进

对于厚的工件, 单纯激光加工或图 1a 所示方案的复合加工, 都将使孔产生锥度。若采用图 1b 所示方案, 激光与火花放电前后夹击工件, 只要激光与火花放电能量配合得当, 工具电极 P₁ 离工件的距离合适, 将产生比较均匀的光滑圆孔或切缝。

从上述两方面初步实验结果来看, 火花放电的辅助作用无疑有助于激光在量与质上的改进, 成本降低。然而, 对一定的工件而言, 加工的优劣有赖于激光与火花放电是否配合得当。因此, 应根据工件的特性, 对激光束的质量、能量或功率, 对放电脉冲的能量、脉宽、重复频率、放电极性、电极材料及电极的形状位置等因素加以适当选择。在所述方法中, 虽然由于火花放电而增加了激光加工装置的复杂性, 但对于单纯用激光加工难以满足对加工效率、质量、成本等要求的情况下, 火花放电对激光加工的辅助作用无疑是有价值的。

四、结 束 语

上述方法, 实质上是激光加工与电火花加工的有机结合。理论分析与实验结果表明, 只要二者配合得当, 必然收到取长补短和综合作用之效, 在加工的质与量上比每种单独方法为好。但对于具体的加工情况是否要选用此方法, 应根据工件具体情况及加工要求作具体分析。当然, 此方法中必然带来一些与激光同火花放电配合有关的新问题, 有待作深入细致的理论与工艺研究, 本工作只是在理论与实验上对其作了原理性的探讨。

参 考 文 献

- 1 李明辉. 电火花加工理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1989: 315~ 345
- 2 哈工大 11 系编. 电火花加工技术. 北京: 国防工业出版社, 1978: 7~ 43
- 3 Duley W W. Laser processing and analysis of materials. New York: Plenum Press, 1983: 69~ 141
- 4 Ready J F. Effects of high-power laser radiation. New York: Academic Press, 1971: 67~ 124

* * *

作者简介: 曾传相, 男, 1939 年 7 月出生。副教授。主要致力于强激光效应及激光生物医学领域研究工作。

收稿日期: 1996-12-30