

脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮相爆炸研究

蔡 颂¹ 陈根余^{1,2} 何 杰¹

¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

²湖南大学激光研究所, 湖南 长沙 410082

摘要 提出脉冲激光修锐青铜结合剂砂轮过程中存在相爆炸现象,分析了相爆炸对激光修锐产生的不利影响,并对相爆炸进行理论研究,为激光修锐青铜金刚石砂轮提供理论指导。开展相关实验,研究相爆炸发生时的激光工艺参数范围,采用高速相机对激光修锐过程的相爆炸进行观测,并采用超景深三维显微系统观察修锐后青铜金刚石砂轮地形地貌与青铜轮表面质量,得出激光修锐青铜结合剂砂轮要避免相爆炸发生,使得磨粒突出结合剂周边有容屑空间。优化相关条件下激光修锐青铜金刚石的工艺参数,并获得较理想的修锐效果。

关键词 光谱学; 脉冲激光修锐; 青铜金刚石砂轮; 相爆炸; 工艺参数

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0906002

Studies on the Phase Explosion of Laser Dressing Bronze-Bond Diamond Grinding Wheel by a Pulsed Fiber Laser

Cai Song¹ Chen Genyu^{1,2} He Jie¹

¹State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

²Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract The existence of a phase explosion phenomenon during the process of grinding wheel laser dressing is proposed, and the negative effects of a phase explosion on laser dressing are analyzed. Additionally, a theoretical study on phase explosion is conducted. In the experiment, the processing parameters of the laser during phase explosion are studied. A high-speed camera is used to observe phase explosion in the laser dressing process. An ultra-depth three-dimensional microscope system is used to observe the topography of the bronze bond diamond grinding wheel after dressing as well as the bronze wheel surface quality. It is concluded that to avoid phase explosion from occurring in the laser dressing of the bronze bond grinding wheel, chip space around the bond must exist for the abrasive particle protrusions. The processing parameters of laser dressing under certain condition are optimized, and the desired dressing effect is achieved.

Key words spectroscopy; pulsed laser dressing; bronze-bond diamond grinding wheel; phase explosion; process parameters

OCIS codes 300.6360; 140.3615; 350.3390

1 引 言

脉冲激光修锐超硬磨料砂轮技术的实质是将聚焦脉冲激光束辐照于匀速转动的砂轮表面,通过控制激光参数,可以实现激光选择性去除砂轮表层结合剂,而对超硬磨粒不造成热损伤,从而使磨粒突出于结合剂之外适当的高度,并在磨粒周围形成一定的容屑空间,最终达到修锐砂轮的目的。

现有文献中,有学者^[1-7]用激光修锐各种材料,包括树脂、青铜结合剂金刚石砂轮和树脂结合剂CBN砂轮,并用扫描电镜观察了激光修锐前后砂轮表面的微观形貌,对激光作用下砂轮表面不同结合剂材料的去

收稿日期: 2015-03-06; 收到修改稿日期: 2015-04-10

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04003101)

作者简介: 蔡 颂(1982—),男,博士研究生,主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: happy9918@sina.com

导师简介: 陈根余(1965—),男,博士,教授,主要从事激光制造方面的研究。E-mail: hdgychen@163.com(通信联系人)

除机理进行了分析。陈根余等^[1,5-7]开展激光修锐超硬磨料砂轮实验,观察修锐后砂轮的表面地形地貌,证实了激光修锐后砂轮表面具有熔融物,堵塞了凹坑,影响修锐后砂轮的磨削性能。针对激光相爆炸,Lu等^[8]发现在高功率激光辐照下,超过单晶硅阈值时,出现了相爆炸,此时烧蚀凹坑深度会显著增加;Yoo等^[9]证实了单晶硅发生相爆炸,并且得出了发生相爆炸的时间模型,计算了单晶硅发生相爆炸是在脉冲结束后的大约300 ns;目前,对于激光修锐砂轮机理分析中出现的相爆炸现象鲜有报道。

对脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮中产生的相爆炸现象进行研究,开展脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮的实验,研究相爆炸行为对脉冲激光修锐效果的不利影响,得出相关条件下适合激光修锐的激光功率密度值和功率密度范围,完善激光修锐青铜金刚石砂轮机理,为后续激光修锐砂轮提供指导作用。

2 脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮相爆炸

脉冲激光辐照后,表面积累越来越多的能量,导致结合剂发生熔融,逐渐形成液相层。在液相中会出现物质成核,当成核速率快速增加,就可能引起正常的沸腾,但在高功率激光修锐中,因外界压强逐渐增大,会形成过热效应^[10]。过热状态下,如果过热层受到高功率短脉冲激光辐照,其温度达到青铜结合剂热力学临界温度 $0.90 T_c$ (T_c 为青铜热力学临界温度),并存在一定的扰动,会产生更加激烈的相爆炸现象^[11-16]。

2.1 相爆炸原理

在激光修锐砂轮过程中,存在过热层会导致相爆炸发生。相爆炸过程如图1所示,激光能量辐照在青铜轮表面,结合剂吸收能量后,形成热渗透层,其温度很高,导致相变化,出现高温液相。在高温液相区会发生成核现象,开始成核的气泡数量少,尺寸小,但随着能量的继续积累,形成过热液相后,气泡成核的速率增加,形成大量的气泡,同时热量会向材料内部扩散,过热层增厚。当气泡达到临界尺寸后,气泡数目的增加变化非常剧烈,并且自发地喷出液相表面。

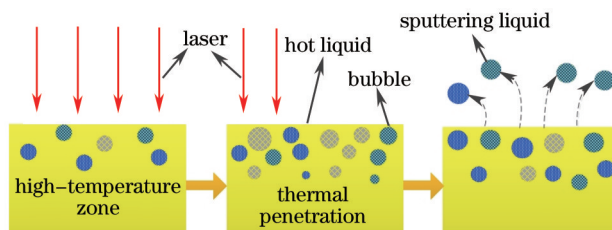


图1 相爆炸过程示意图

Fig.1 Schematic of phase explosion process

2.2 相爆炸成核数

异相成核是指分子被吸附在固体杂质表面或溶体中存在的未破坏的晶种表面而形成晶核的过程。简言之,异相成核的结晶过程发生在相界面,或者在杂质表面。均匀形核是严格按照热力学和动力学进行的,所需的能量起伏、成分起伏、结构起伏很难同时满足,因此在实际中是不存在均匀形核的;而非均匀形核一般是在杂质处或其他某些地方形核,杂质和这些地方已经提供了很多形核的能量、成分,因此很容易发生。

影响相爆炸成核的因素包括激光参数(激光功率、频率、离焦量等)和砂轮材料的物性参数等,由于相爆炸发生时间短,相爆炸区的热现象不能用导热方程描述。青铜结合剂中主要是铜元素,其余的元素含量低,并且其他元素与铜的物性相近。作为激光修锐青铜金刚石砂轮,在引用均匀成核方程中将做几点假设:

1) 假设结合剂是一种复合材料,即由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法组成,在宏观上是一种具有新性能的材料;

2) 假设材料的热物性参数均不随温度变化。实际上材料的热物性参数(比热 C_p 、导热系数 K 等)随温度变化不大,近似为常数;

3) 青铜结合剂材料各向同性,其中无气孔并分布均匀。

采用 Martynyuk^[17]研究的成核速率公式来描述:

$$I_n \approx 1.5 \times 10^{32} \exp\left(-\frac{\Delta G_n}{k_b T}\right) \exp\left(\frac{-\tau_{ln}}{t}\right), \quad (1)$$

式中 k_b 为玻尔兹曼常数, ΔG_n 为在液体里形成稳定球形蒸气均匀核的吉布斯自由能, τ_{in} 为相关的时间常数, T 为烧蚀温度。(1)式表明当时间很短和温度很低时,成核率很低。当温度接近热力学临界温度 T_c 时,成核率迅速增加,如以 C_n 为例,当液相温度接近 $T=0.905 T_c$ 时, $I_n=10^{26}$ nuclei/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)。文献[18]指出当激光功率密度为 3×10^{13} W/ cm^2 、脉冲宽度为 1 ns、波长为 532 nm 的激光照射碳、铝、铜、锡、铅靶材时,在脉冲激光结束数十微秒后观察到剧烈的相爆炸现象;Martynyuk 计算结果表明,相爆炸所需的弛豫时间大致为 1~100 ns。在不同靶材和不同激光参数下,产生相爆炸的时间不同。

激光修锐砂轮是在单脉冲激光重复叠加基础上连续完成的,假定单脉冲时间 $t=2.1 \times 10^{-7}$ s,青铜的吸收系数 $U=4.74 \times 10^6$ m^{-1} ,并且被加热到 T_c ,加热深度 $X_m=2.1 \times 10^{-5}$ cm,受热体积 $V=1/4 \pi X_m D^2$ (D 为光斑直径,实验为 38 μm)^[8]。脉冲持续时间内形成的核数量为 $I_n V t$ ^[8],如果 $I_n \approx 10^{26}$ nuclei/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}$),则成核数约为 5×10^9 ,为相爆炸的发生形成提供了成核数。

2.3 相爆炸效应

相爆炸发生时,液体内部压强增加,导致液滴突发性的向外猛烈喷发,飞溅出液体表面。相关实验表明,确实观察到了直径约为 1 μm 的液滴^[9,19-20]。同时也发现相爆炸喷射出的液滴和团簇粒子,约占全部喷射粒子的 90%^[16]。液态质量的快速迁移,导致烧蚀深度会突然迅速增加。文献[8]研究发现单晶硅在激光功率密度为 2.03×10^{10} W/ cm^2 时,烧蚀深度由 1.5 μm 猛增到 6.3 μm ;当激光功率密度提高到 3×10^{11} W/ cm^2 ,烧蚀深度急速增到 20 μm 。实际上,激光功率密度 2.03×10^{10} W/ cm^2 即为单晶硅靶材开始相爆炸的功率密度阈值。

激光修锐砂轮中存在超热液相层,导致修锐过程中出现动态不稳定性,引起液态质量的迁移,造成凹坑深度会突然猛烈增加,通过测量修锐后的青铜轮凹坑深度,可以判断相关条件下发生相爆炸的功率密度阈值范围。

3 实验设备与方法

图 2 为激光修锐部分设备仪器。激光器采用 IPG 生产的紧凑型脉冲掺镱光纤激光器(YLP-1/120/50/50-HC),其参数为平均功率 $P_{\text{avg}}=5\sim 50$ W,脉冲重复频率 $f=50\sim 150$ kHz,脉冲宽度为 210 ns,波长为 1064 nm,输出激光能量近似呈现高斯分布。激光束由单模光纤传输到固定在二维电动位移平台上带有标准隔离器的激光烧蚀头,再经烧蚀头内部焦距为 180 mm 的双凸透镜聚焦后沿砂轮径向方向垂直入射到砂轮表面,将青铜结合剂金刚石砂轮安装在精密平面磨床的主轴上,磨床主轴转速可通过其控制面板精确调节。



图 2 激光烧蚀实验设备图

Fig.2 Experimental devices of laser ablation

实验选用的材料为青铜结合剂光滑圆柱轮(100D*10T*5X*31.75H)与带磨粒的青铜结合剂砂轮(100D*10T*5X*31.75H*80#),采用高速相机对修锐时砂轮表面出现的相爆炸现象进行观测,采用超景深三维显微系统放大(200倍)对修锐后的青铜轮表面质量和青铜砂轮表面地形地貌进行观察,实验时为了便于观察同时节省材料,使用金属圆圈分别箍在青铜轮与青铜砂轮上,圆环套中间开有一直径为 6 mm 的圆形通孔,脉冲激光束辐照通过该圆孔入射到裸露在外的青铜轮与青铜砂轮表面,图 3 为金属圆圈和烧蚀后的青铜轮。实验结果数据只需从通孔内露出的青铜结合剂轮与青铜砂轮表面获取。

表 1 是激光修锐青铜金刚石实验参数,实验目的是证实相爆炸现象发生在激光修锐青铜砂轮中,并证实产生喷射的液体会影响砂轮表面地形地貌和容屑空间,两部分结合说明激光修锐中存在相爆炸现象和堵塞凹坑。

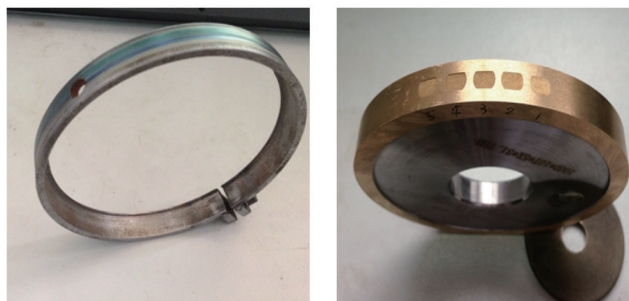


图3 金属圆圈和烧蚀后的青铜轮

Fig.3 Metal loops and bronze wheel after ablation

表1 激光修锐青铜金刚石实验参数

Table 1 Laser dressing experimental parameters with bronze bond grinding wheel

Laser power	Repeat frequency rate	Defocusing amount	Cycle index	Rotation rate
P / W	f / kHz	o / mm	n	$R / (r/min)$
20	80	0	3	400
35				

表2是激光修锐青铜轮实验参数,实验目的是得到相关条件下,发生相爆炸的激光功率范围和最利于修锐青铜轮的激光功率密度值,为修锐青铜砂轮提供指导作用。

表2 激光修锐青铜轮实验参数

Table 2 Laser dressing experimental parameters with bronze wheel

Laser power density	Repeat frequency rate	Defocusing amount	Cycle index	Rotation rate
$P / (10^7 W/cm^2)$	f / kHz	o / mm	n	$R / (r/min)$
5.25	80	0	3	400
13.12				
15.75				
18.37				
20.99				

表3是依据表2的实验结果,对青铜砂轮进行修锐的实验参数。实验目的是观察修锐后砂轮的地形地貌,为相关条件下修锐砂轮提供指导作用。

表3 激光修锐青铜金刚石砂轮实验参数

Table 3 Laser dressing experimental parameters with bronze bond grinding wheel

Laser power density	Repeat frequency rate	Defocusing amount	Cycle index	Rotation rate
$P / (10^7 W/cm^2)$	f / kHz	o / mm	n	$R / (r/min)$
13.99	80	0	3	400
18.37				

4 实验结果与讨论

4.1 观测激光修锐砂轮相爆炸

按照表1参数采用高速相机对激光修锐过程相爆炸进行观测,如图4所示。激光烧蚀砂轮过程中激光一直出光,实验时,拍摄从开始到结束一直进行,整个烧蚀时间大约3 min。图中可见,相爆炸发生时液体喷发非常猛烈,溅射出来的液滴较大,造成液态质量迁移,飞溅出的液滴会重新凝聚在砂轮表面,相邻的液滴会相互叠加形成小山峰,影响修锐后的地形地貌。

4.2 青铜金刚石砂轮地形地貌

图5为拍摄的砂轮表面地形地貌图。其中表面分层设色地形图中用蓝色表示地势较低区域,红色表示地势较高区域,且随着地势高度的增加,图形颜色由蓝色逐渐向红色过渡,以显示烧蚀后青铜轮表面地形的

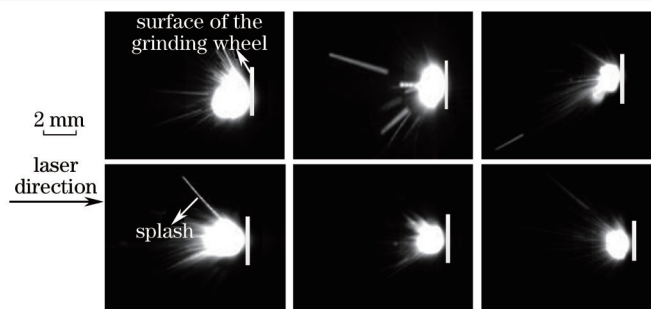


图4 激光修锐砂轮中高速相机拍摄相爆炸图片

Fig.4 Images of phase explosion taken by a high-speed camera during grinding wheel laser dressing

高低起伏。分层设色地形图的颜色杂乱无章后的青铜砂轮表面凹凸不平。图 5(b)显示磨粒突出高度较平均,青铜砂轮表面颜色近乎一致地形地貌较好,而图 5(a)显示磨粒周边出现了较接近的颜色,青铜砂轮表面颜色变化范围大,特别是图标黄色小圈标记的金刚石周围出现了大量的熔融物,溅射的液滴重新凝聚,相邻间的熔融物相互叠加出现高低不平小山峰,严重堵塞了金刚石周围的凹坑槽,减少金刚石旁边的容屑空间,同时也使得金刚石突出结合剂高度不够,达不到修锐青铜砂轮的目的。

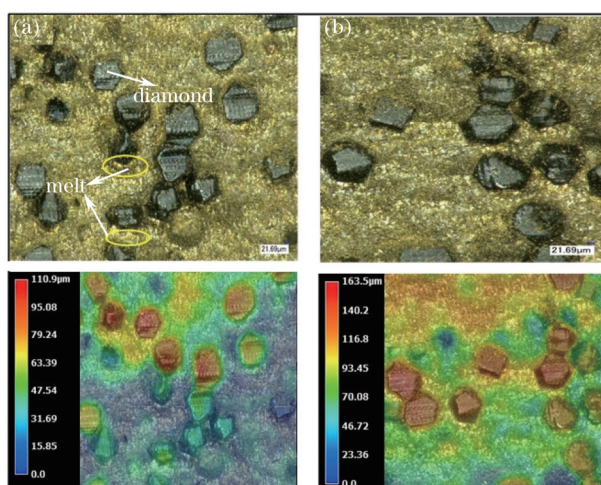


图5 青铜砂轮地形地貌和表面分层设色地形图。(a) $P=20\text{ W}$; (b) $P=35\text{ W}$

Fig.5 Bronze bond grinding wheel topographies and surface layered color topographies. (a) $P=20\text{ W}$; (b) $P=35\text{ W}$

综上所述,证实了激光修锐过程中存在相爆炸现象,并而激光修锐会严重影响青铜砂轮的地形地貌和表面质量均匀性,实际激光修锐过程中需想办法避免金属结合剂材料出现相爆炸导致重凝的问题。

4.3 激光修锐青铜轮

研究相爆炸时,激光功率密度 I 是一个至关重要的工艺参数^[5],它与结合剂材料的破坏去除效率和去除方式(液相、气化)密切相关,其参数的确定原则是在确保结合剂材料去除效率高的同时,还要尽可能避免激光修锐后砂轮表层由于相爆炸产生重凝熔融物等,选用合适的激光功率密度,可以直接使得结合剂发生气化,避免相爆炸发生造成的影响。图 6 是按表 2 参数修锐青铜轮后,拍摄的脉冲激光烧蚀后的青铜轮表面微观地形地貌和表面分层设色地形图。测量的凹坑深度值为图中 A 未烧蚀部分与 B 烧蚀凹坑最低位置的相对高度差值,即烧蚀深度值。可以看到,在图 6(a)中,因激光功率密度 I 较小,烧蚀区域的结合剂材料在受热熔化后和少部分气化去除,青铜轮表面分层颜色近乎一致,区别不大,表面质量一般,烧蚀深度 h 为 $13.44\ \mu\text{m}$,材料去除效率很低;在图 6(b)中激光功率密度 I 增大到 $13.12 \times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$,表面的质量图明显粗糙,凹坑数量多,表面分层图显示颜色变化大,出现最高的红色,最低的蓝色,两者差距值较大,这会严重影响青铜砂轮的修锐效果,表面的坑坑洼洼主要是由于表层结合剂熔化后发生了相爆炸,爆炸溅射的液体相互碰撞后叠加在表面,在凹坑周边重凝后形成高低不同的小山峰,此情况在青铜砂轮的修锐过程中会堵塞凹坑,减少容屑空间,不利于砂轮的修锐,同时激光烧蚀深度 h 仅约 $15.73\ \mu\text{m}$,材料去除效率还是较低;在图 6(c)~(f)中,激光

烧蚀深度 h 在 $50.60\sim 85.67\ \mu\text{m}$ 范围内随激光功率密度 I 的增加几乎呈线性增长趋势,同时烧蚀后的青铜轮表面质量高,表面趋于平坦,表面分层图颜色为近乎一致的青绿色,几乎全为气化去除,并且如图 6(c)所示,烧蚀深度达到 $50.60\ \mu\text{m}$,相比图 6(b),结合剂材料去除效率剧增,而激光功率密度增加幅度却不大;图 6(d)中当激光功率密度达到 $18.37\times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$,结合剂气化后表面相对平整,无高低起伏的小山丘,表面分层图颜色完全接近青绿色,激光修锐后的表面质量高,如在该情况下修锐砂轮,不会堵塞砂轮的表层容屑空间,有利于青铜金刚石砂轮的修锐,同时激光烧蚀去除深度 h 为 $73.97\ \mu\text{m}$,相比于图 6(c),尽管表面质量相差不大,但是材料去除效率高,两者差值达 $20.37\ \mu\text{m}$;当激光功率密度 I 进一步增大到 $23.62\times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,激光烧蚀深度 h 只是略有增加,其值约为 $85.67\ \mu\text{m}$,功率密度过大后,部分气化粒子会返回到表面,表面分层色图出现了颜色的轻微变化。综上所述,激光功率密度会影响青铜轮表面质量,导致相爆炸发生。并得到相关条件下,激光功率密度 I 约为 $18.37\times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,激光烧蚀后可以获得较为满意的结合剂材料去除效率和较为理想的青铜轮表面质量。

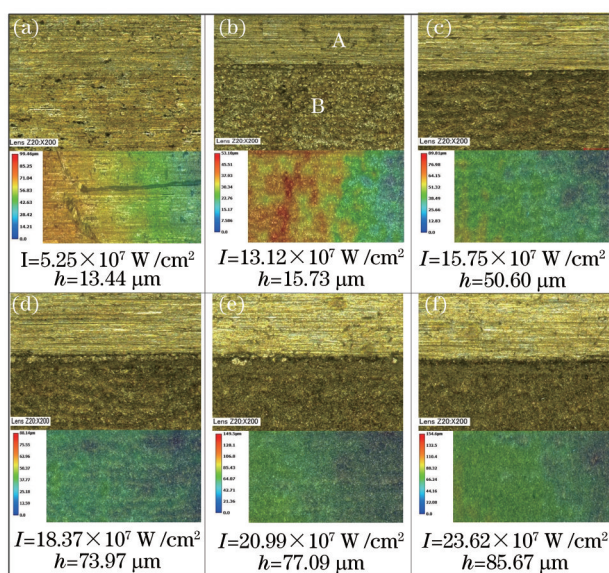


图 6 青铜轮微观地形地貌和表面分层设色地形图

Fig.6 Bronze wheel microscopic topographies and surface layered color topographies

图 7 为最大烧蚀深度与激光功率密度的变化关系图,图中点 A 的激光功率密度为 $13.12\times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$,对应的烧蚀深度值为 $15.73\ \mu\text{m}$,点 B 的激光功率密度值为 $15.75\times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$,对应的烧蚀深度值为 $50.60\ \mu\text{m}$,两者烧蚀深度值相差约 $35\ \mu\text{m}$,结合剂的烧蚀深度突然大幅度增加;结合前面的表面分层色图的分析,此阶段内发生相爆炸,导致溅射加强,造成液态质量迁移;当激光功率密度继续增加到图中点 C 为 $18.37\times 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,对应的烧蚀深度为 $73.97\ \mu\text{m}$,相比于点 B 的烧蚀深度,两者相差约 $23\ \mu\text{m}$,结合剂材料去除效率高,依据前面的表面分层色图的分析,烧蚀区域的气化效应显著增强,基本没有液体溅射,修锐后地形地貌较佳;继续增

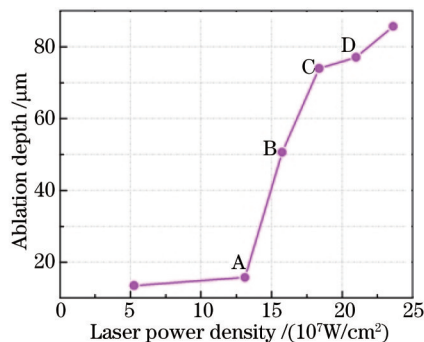


图 7 最大烧蚀深度与激光功率密度的变化关系图

Fig.7 Relationship between the maximum ablation depth and laser power density

加功率到图中点D为 $20.99 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,烧蚀深度只是略有增加,相比于点C的烧蚀深度,两者相差约 $3 \mu\text{m}$,气化粒子返回青铜表面,并且表面分层色图颜色有轻微变化。综上所述,在相关条件下,当激光功率密度在 $13.12 \times 10^7 \sim 18.37 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 范围时,烧蚀深度迅速增加,激光修锐后青铜轮发生相爆炸,表面质量差,不利于激光修锐砂轮,在选择激光功率密度时要尽量避免该范围。当激光功率密度值在 $18.37 \times 10^7 \sim 20.99 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 范围时,激光修锐后青铜轮表面质量高,表面平整均匀性好,激光修锐深度大,材料的去除效率相对较高,相关条件下修锐砂轮时应该选择此范围内的功率密度值。

4.4 激光修锐青铜金刚石砂轮

图8是按照表3得到的激光烧蚀后的青铜砂轮在超景深三维显微镜下放大(200倍)时拍摄的表面地形地貌图和地形地貌三维图从中可以看出,当激光功率密度为 $13.99 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,发生相爆炸,导致金刚石周围的凹坑槽堵塞,影响了金刚石旁边的容屑空间,同时也使得金刚石突出结合剂高度不够,达不到修锐青铜砂轮的目的,修锐后砂轮地形地貌质量低;当激光功率密度为 $18.37 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,避开相爆炸后,明显发现砂轮表面磨粒全部突出结合剂一定高度,平均高度适中,金刚石旁边有一定的容屑空间,修锐后砂轮的地形地貌质量较好。

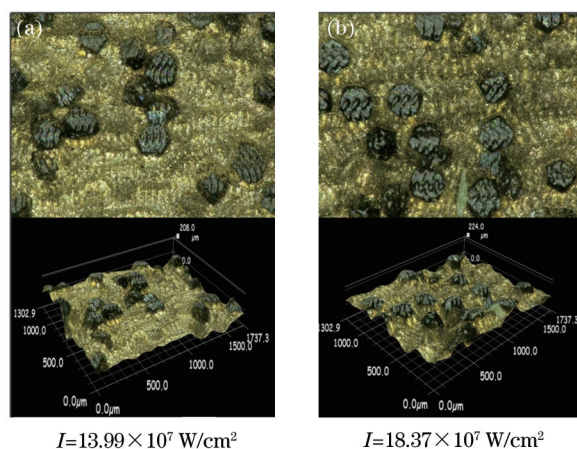


图8 青铜砂轮表面地形地貌图和地形地貌三维图

Fig.8 Bronze bond grinding wheel surface topographies and three-dimensional topographies

5 结 论

针对脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮中产生的相爆炸现象进行研究,得出如下几点结论:

- 1) 考虑激光修锐过程中出现的相爆炸现象,并详细分析相爆炸物理过程。研究发现处于相爆炸临界状态时,烧蚀深度不一致,对激光修锐青铜金刚石砂轮产生不利影响;
- 2) 通过开展激光修锐砂轮相关实验,证实相爆炸存在并导致金刚石周围的凹坑槽被堵塞,从而减少金刚石旁边的容屑空间,同时也使得金刚石突出结合剂高度不够,达不到修锐青铜砂轮目的;
- 3) 相关条件下,激光功率密度为 $13.12 \times 10^7 \sim 18.37 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 范围内时,激光修锐后青铜轮发生相爆炸,应尽量避免选择该范围内的激光功率密度;当激光功率密度值在 $18.37 \times 10^7 \sim 20.99 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 范围内时,激光修锐后青铜轮表面质量高,表面平整均匀性好,材料的去除效率相对较高,并通过实验得到理想的修锐效果。

参 考 文 献

- 1 Chen Genyu, Bu Chun, Deng Hui, *et al.*. Research on laser and mechanical compound truing and dressing of superabrasive grinding wheels[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(7): 0703002.
陈根余,卜纯,邓辉,等.激光-机械复合修整超硬磨料砂轮研究[J].中国激光,2012,39(7):0703002.
- 2 Ali Z, Taghi T, Bahman A, *et al.*. Picosecond laser treatment of metal-bonded CBN and diamond superabrasive surfaces[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2015, 76(5-8): 1479-1491.
- 3 Zhang Jianmin, Ma Zhiliang, Feng Guobin, *et al.*. Influence of tangential airflows velocity on ablation heat of laser irradiated glass fiber reinforced resin composites[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0306004.

- 张检民, 马志亮, 冯国斌, 等. 切向空气流速度对玻璃纤维增强树脂基复合材料激光烧蚀热的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306004.
- 4 Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, *et al.*. Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass fiber/epoxy composites[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203001.
彭国良, 杜太焦, 刘峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203001.
- 5 Deng H, Chen G Y, Zhou C, *et al.*. Processing parameter optimization for the laser dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. Appl Surf Sci, 2014, 290: 475-481.
- 6 Chen Genyu, Chen Guogui, Huang Kong, *et al.*. Study on the accuracy for laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1278-1281.
陈根余, 陈国桂, 黄孔, 等. 激光修整青铜金刚石砂轮精度研究[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1278-1281.
- 7 Chen G Y, Mei L F, Zhang B, *et al.*. Experiment and numerical simulation study on laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheel[J]. Opt Laser Eng, 2010, 48(3): 295-1304.
- 8 Lu Q M, Mao S S, Mao X L, *et al.*. Delayed phase explosion during high-power nanosecond laser ablation of silicon[J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(17): 3072-3074.
- 9 Yoo J H, Jeong S H, Mao X L, *et al.*. Evidence for phase-explosion and generation of large particles during high power nanosecond laser ablation of silicon[J]. Appl Phys Lett, 2000, 76(6): 783-785.
- 10 Perez D, Lewis L J. Ablation of solids under femtosecond laser pulses[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(25): 255504.
- 11 Yang Hongdao, Li Xiaohong, Li Guoqiang, *et al.*. Silicon surface microstructures created by 1064 nm Nd: YAG nanosecond laser[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(2): 027901.
杨宏道, 李晓红, 李国强, 等. 1064 nm 纳秒脉冲激光诱导硅表面微结构研究[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 027901.
- 12 Hendijanifard M, Willis D A. Validity of the Taylor-sedov theory for studying laser-induced phase explosion and shock waves[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 15(4): 3249-3253.
- 13 Kudryashov S I, Allen S D. Optical transmission measurements of explosive boiling and liftoff of a layer of micron-scale water droplets from a KrF laser-heated Si substrate[J]. J App Phys, 2003, 93(7): 4306-4308.
- 14 Bulgakova N M, Bourakov L M. Phase explosion under ultrashort pulsed laser ablation: modeling with analysis of metastable state of melt[J]. Appl Surf Sci, 2002, 197: 41-44.
- 15 Shen M Y, Crouch C H, Carey J E, *et al.*. Formation of regular arrays of silicon microspikes by femtosecond laser irradiation through a mask[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(11): 1715.
- 16 Han Jinghua, Feng Guoying, Yang Liming, *et al.*. Influence of the high-repetition-pulsed laser beam size on the damage characteristics of absorbing glass[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(2): 028106.
韩敬华, 冯国英, 杨李茗, 等. 高重复频率激光脉冲光束大小对吸收玻璃损伤特征的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 028106.
- 17 Martynyuk M M. Vaporization and boiling of liquid metal in an exploding wire[J]. Sov Phys Tech Phys, 1974, 19: 793-797.
- 18 Pakhomov A V, Thompson M S, Gregory D A. Laser-induced phase explosions in lead, tin and other elements: microsecond regime and UV-emission[J]. J Phys D: Appl Phys, 2003, 36(17): 2067-2075.
- 19 Bulgakova N M, Bulgakov A V. Pulsed laser ablation of solids: Transition from normal vaporization to phase explosion[J]. Appl Phys A, 2001, 73(2): 199-208.
- 20 Yoo J H, Borisov O V, Nao X L, *et al.*. Existence of phase explosion during laser ablation and its effects on inductively coupled plasma-mass spectroscopy[J]. Anal Chem, 2001, 73(10): 2288-2293.

栏目编辑: 张浩佳