



玻璃表面微颗粒的激光清洗研究（特邀）

佟艳群 陆蒋毅 叶云霞 符永宏 蒋滨 丁柳馨 任旭东

Research on laser cleaning of micro-particles on glass surface (*invited*)

Tong Yanqun, Lu Jiangyi, Ye Yunxia, Fu Yonghong, Jiang Bin, Ding Liuxin, Ren Xudong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220782>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

38CrMoAl材料表面污染物激光清洗技术

Laser cleaning technology of 38CrMoAl material surface pollutants

红外与激光工程. 2018, 47(7): 706004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0706004>

KDP晶体表面残留磁流变抛光液清洗技术研究

Study on cleaning of residual from magnetorheological finishing(MRF) of potassium dihydrogen phosphate(KDP) crystal surface

红外与激光工程. 2018, 47(S1): 132 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.S120006>

飞秒光参量振荡器的光谱净化和稳定性提升（特邀）

Spectrum cleaning and stability improvement of femtosecond optical parametric oscillator (*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(12): 20201060 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201060>

大口径钕玻璃坯片中铂金颗粒的强激光辐照检测

Detection of platinum particles in large diameter Nd:glass blank by high power laser radiation

红外与激光工程. 2017, 46(11): 1106001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1106001>

飞机蒙皮的激光除漆技术研究

Research on laser paint removing of aircraft surface

红外与激光工程. 2018, 47(12): 1206003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1206003>

大口径反射镜表面颗粒物洁净度控制实验研究

Experimental study of particles cleanliness control on the surface of large-aperture reflector

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210117 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210117>

玻璃表面微颗粒的激光清洗研究 (特邀)

佟艳群*, 陆蒋毅, 叶云霞, 符永宏, 蒋 滨, 丁柳馨, 任旭东

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对玻璃表面微颗粒的污染问题, 文中研究了脉冲激光对颗粒污染物的清洗阈值和清洗效果。通过颗粒吸附和形变模型计算石英玻璃表面与颗粒间的吸附力, 分析热应力与激光能量密度的关系。通过吸附力和热应力的对比分析得到颗粒污染物的清洗条件和理论阈值。实验对比石英玻璃表面颗粒的正面入射和反面入射的清洗效果, 研究功率密度、扫描速度和清洗次数等参数对清洗率的影响。结果表明, 大颗粒污染物的反面清洗可以完全去除, 正面清洗小颗粒污染物的效果较好。单因素和三因素研究表明激光功率密度对清洗率的影响比扫描速度大, 激光清洗次数对清洗率几乎没有影响。

关键词: 激光清洗; 理论阈值; 正反清洗对比; 清洗率

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220782

Research on laser cleaning of micro-particles on glass surface (*invited*)

Tong Yanqun*, Lu Jiangyi, Ye Yunxia, Fu Yonghong, Jiang Bin, Ding Liuxin, Ren Xudong

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: For the contamination problem of micro-particles on glass surface, the cleaning threshold of pulsed laser and its cleaning effect on particle contaminants are studied in this paper. The particle adsorption and deformation model was used to calculate the particle adsorption force. The relationship between thermal stress and laser energy density was analyzed, and the cleaning conditions and theoretical thresholds for particle contaminants were obtained. The cleaning effect of forward irradiation and back irradiation of particles on glass surface were compared in experiments, and the effect of parameters such as power density, scanning speed and cleaning times on the cleaning rate were studied. The results show that the back irradiation cleaning of large particles can be removed, and forward irradiation cleaning of small particles is more effective. The experiments of single-factor and three-factor show that the laser power density has a greater impact on the cleaning rate than the scanning speed, and the laser cleaning times have little impact. a greater impact on the cleaning rate than the scanning speed, and the laser cleaning times have little impact.

Key words: laser cleaning; theoretical threshold; positive and negative cleaning comparison; cleaning rate

收稿日期: 2022-10-31; 修订日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51975261); NSFC—区域创新发展联合基金重点项目 (U21A20138)

通讯作者: 佟艳群, 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光清洗与光电检测技术。

0 引言

特种设备玻璃表面长期暴露于空气中,会粘附大量颗粒污染物。微颗粒会直接影响设备的正常使用,长时间的吸入会影响人体健康。激光清洗采用无水方式,具有独特的优势。

激光清洗是一种绿色清洗技术,具有非接触、高精度清洗等优点,目前在工业领域已广泛应用于材料表面的清洗^[1-3]、工艺品的清洗^[4]、模具的清洗^[5-6]、锈迹清洗^[7-9]等。激光清洗技术包含激光干式清洗^[10]、激光湿式清洗^[11]、激光冲击波清洗^[12]等类别。叶亚云等^[13]利用激光冲击波清洗法去除 K9 玻璃表面的污染物,采用有限元模拟和实验相结合的方式,分析激光功率和作用时间对清洗效果的影响。Lu 等^[14]研究在两种沉积液中氧化铝颗粒物的清洗效果,结果表明沉积液的存在可以提高清洗效率。李勇等^[15]使用 1064 nm 激光器清洗太阳能电池制备中薄膜片表面硅颗粒物,探讨了激光器脉冲宽度、填充线间距、扫描速度等工艺参数对清洗效果的影响。大量研究表明,激光清洗可以有效去除表面颗粒,但对于颗粒尺寸与理论阈值的关系分析,和不同方向的清洗方式实验研究还较少。激光干式清洗的可操作性好,优化清洗参数能有效去除表面颗粒,系统研究玻璃表面微颗粒的激光清洗机理和工艺可进一步促进应用。

文中研究激光能量与微颗粒相互作用的热膨胀效应,分析颗粒吸附力与颗粒尺寸之间的关系,并获得微颗粒激光清洗阈值。实验对比研究正反清洗方式下不同的激光清洗效果,采用激光功率、扫描速度和清洗次数等三因素变量法,实验获得激光清洗颗粒污染物的规律与最佳条件,为激光清洗玻璃表面的微颗粒提供参考。

1 激光清洗机理

1.1 吸附模型

激光扫描玻璃表面粘附的颗粒污染物,对其进行清洗,激光产生的光能会转化成热能,传递到颗粒物和玻璃内部后,颗粒物吸收激光能量产生膨胀^[16]。由于颗粒物吸热膨胀产生瞬时加速度,颗粒物克服吸附力从表面脱离。

由于颗粒污染物的不透明性,颗粒对激光的吸收表现为强吸收,基底对激光的吸收则表现为弱吸收。玻璃基底是透明的,激光辐照方式分为正向入射和反向入射,见图 1(a) 和图 1(b)。当激光正面辐照时,激光能量直接作用颗粒自身。当激光背面辐照时,激光能量穿过透明玻璃作用于颗粒。颗粒受激光辐照后产生热膨胀,这种瞬态热效应产生向外的热膨胀加速度,相当于颗粒受到热膨胀带来的应力,当应力大于

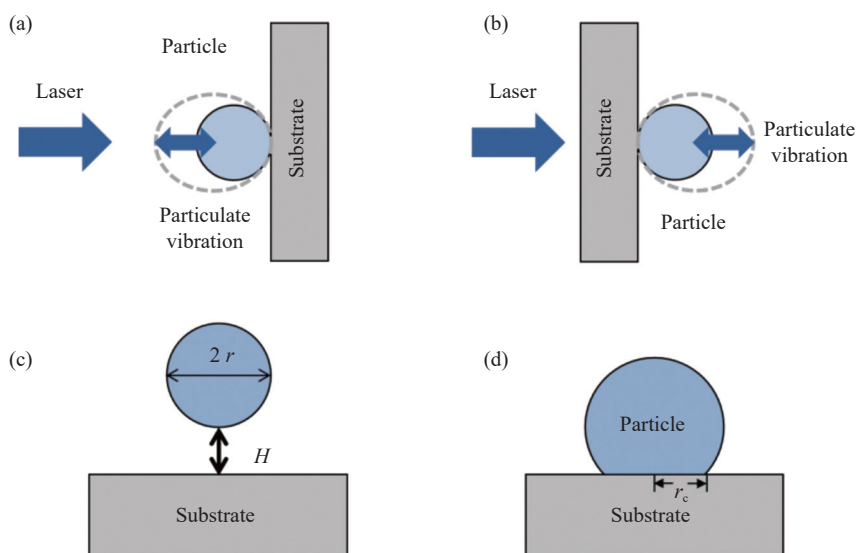


图 1 (a) 颗粒正面吸收模型; (b) 颗粒反面吸收模型; (c) 吸附力模型; (d) 吸附形变模型^[16]

Fig.1 (a) Absorption model on the front side of particles; (b) Absorption model on the reverse side of particles; (c) Absorption force model; (d) Absorption deformation model^[16]

颗粒吸附力时,颗粒达到激光清洗的脱附条件,实现颗粒的去除。

从宏观上说,颗粒污染物脱附需要克服颗粒与玻璃表面间吸附力,以范德华力为主。当微米级污染颗粒与玻璃基底表面的距离很小时,分子和原子的电子云会由于细小的波动而极化,因此颗粒物具有较强的吸附力。

当光学元件表面暴露于空气中,主要粘附二氧化硅颗粒,吸附模型如图 1(c) 所示,颗粒可以看成半径为 r 的球体,假设颗粒与玻璃表面相距 H ,颗粒所受范德华力^[17]可表示为:

$$F_v = \frac{A_{132}r}{6H^2} \quad (1)$$

由于颗粒材料具有顺从性,在吸附力的作用下近似为球形的颗粒会产生吸附形变,吸附模型如图 1(d) 所示。通过 DMT 模型解释形变产生的接触半径 R_c 与颗粒半径 R 之间的关系式^[18]:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\sigma_1^2}{E_1} + \frac{1-\sigma_2^2}{E_2} \quad (2)$$

$$R_c = \sqrt[3]{\frac{A_{132}R^2}{8E^*H^2}} \quad (3)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为颗粒与基底的杨氏模量; σ_1 、 σ_2 分别为颗粒与基底的泊松系数。则吸附力为:

$$F_v = \frac{A_{132}r}{6H^2} \left(1 + \frac{r_c^2}{RH} \right) \quad (4)$$

由于玻璃表面二氧化硅颗粒和玻璃之间存在空气,整个系统存在三种物质,则:

$$A_{132} = \left(\sqrt{A_{11} - A_{33}} \right) \left(\sqrt{A_{22} - A_{33}} \right) \quad (5)$$

式中: A_{11} 、 A_{22} 、 A_{33} 分别为二氧化硅、空气和玻璃的 Hamaker 常数。

1.2 温升模型

微颗粒受到激光辐照后,由于比热容、热膨胀系数等参量的不同,颗粒产生的热膨胀应力有很大差别。假设一个脉宽内作用于颗粒的热应力^[19]为:

$$F' = \frac{2\pi\rho R^3 H'}{3\tau^2} \quad (6)$$

式中: τ 为激光器的脉宽; H' 为由温升 ΔT 引起的热膨胀位移,可表示为:

$$H' = 2\beta R \Delta T \quad (7)$$

式中: β 为颗粒的热膨胀系数。

由于激光辐照的实际温升过程难以确定,因此条件设置为所有材料均为连续、各向同性;材料对激光的吸收率恒定;忽略干扰量;传热过程中忽略其他形式的传导,设置为完全热传导。在三维空间的直角坐标系下,对于吸收激光能量的热传导方程^[20]表述为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容; T 为温度; t 为时间; k 为材料导热系数。

1.3 激光清洗阈值

由于石英玻璃为浓度极高的非晶态二氧化硅,其与微颗粒力学性能类似,即杨氏模量为 70 Gpa,泊松系数为 0.17。通过公式 (2) 和 (3) 的理论计算得到颗粒尺寸和接触半径的关系如图 2(a) 所示,在大于 2 μm 的颗粒中,颗粒半径与颗粒吸附形变之间的关系基本呈线性单调递增关系 ($Y=2.0924X+9.0137$)。在小于 2 μm 的颗粒中,颗粒半径 R 与接触半径 R_c 之间的关系呈幂函数形式 ($Y=6.69X^{0.6667}$)。当污染颗粒越小, R_c 与 R 的比值越大,形变接触面所引起的吸附作用在吸附力中占据的作用也就越大,即越小的污染颗粒在同样的激光能量密度下越难实现清洗。由于三种物质的 Hamaker 常数均为特性参数,且微米级颗粒与基底的间距通常为 0.4 nm。通过公式 (4) 和 (5) 可以得到颗粒半径与吸附力的关系如图 2(b) 所示,颗粒吸附力与半径之间呈线性关系,且受到的吸附力大小约为 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ N 量级。因此根据颗粒物的半径和清洗的难易程度,选取典型颗粒半径分别为 0.5、1、2、5 μm 进行阈值与实验分析。

激光对颗粒的热应力模型为热传导,建立颗粒和基底的仿真模型,定义微颗粒的特性参数比热容和材料密度均为定值。激光为面热源形式,波长为 1064 nm,且脉冲形式为高斯分布。通过不同激光能量密度作用于不同尺寸颗粒上,得到模型中颗粒温升与能量密度的关系如图 2(c) 所示,颗粒的温度随着激光能量密度几乎呈线性增长,但与颗粒半径变化的规律相反。由于颗粒尺寸远小于光斑大小,不同尺寸的颗粒顶点的极高温相近,颗粒在脉宽时间内的热传导深度极小,颗粒半径越大,极高温对于平均温度的贡献就越小,平均温度也就越低。

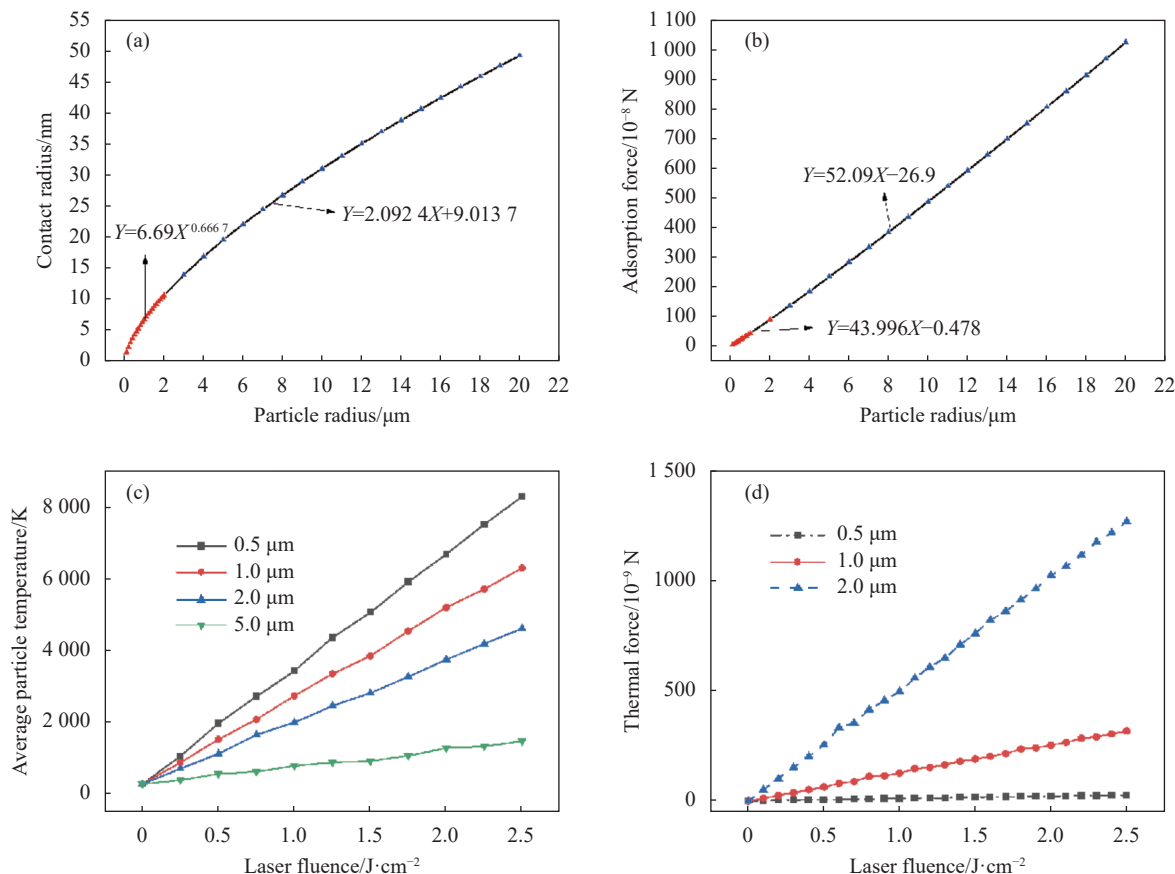


图 2 (a) 颗粒尺寸与接触半径的关系; (b) 颗粒半径与吸附力的关系; (c) 激光能量密度与平均温升的关系; (d) 激光能量密度与热应力的关系

Fig.2 (a) Relationship between particle size and contact radius; (b) Relationship between particle radius and adsorption force; (c) Relationship between laser energy density and average temperature rise; (d) Relationship between laser energy density and thermal stress

通过温升模型数据可以得到不同激光能量下颗粒所受热应力。由于激光器特性, 激光脉宽设为 100 ns, 热膨胀系数 β 为 $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。通过公式 (6) 和 (7) 可以得到不同尺寸颗粒的能量密度与热应力的关系, 如图 2(d) 所示, 当激光能量密度不变时, 颗粒半径越大, 受到的热膨胀应力越大, 因此当颗粒污染物大于 5 μm 时, 只需要很小的激光能量就能将其去除。当能量密度增大时, 受到的热应力也越大且颗粒尺寸间的这种差异也就越大。这说明, 尺寸越大的污染颗粒越容易脱离基底表面。对于越小的污染颗粒, 同样的激光能量密度越难实现清洗。当颗粒受到的热应力大于吸附力时, 此时的激光能量密度为理论阈值。

将图 2(b) 和 (d) 中同一尺寸颗粒所受热应力与吸附力进行对比, 当热应力和吸附力数值相等时, 此时作用于颗粒的激光能量密度即为颗粒清洗的理论阈值。如图 2 所示, 半径大于 5 μm 颗粒污染物的理论

阈值仅为 $0.0028 \text{ J}/\text{cm}^2$, 因此只需要较低的激光能量就能轻松将颗粒污染去除, 当颗粒半径约为 2 μm 时, 理论阈值为 $0.043 \text{ J}/\text{cm}^2$, 可通过清洗方式和参数的变化完成去除, 当颗粒污染物为 1 μm 时, 理论阈值为 $0.3 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。当颗粒污染物达到亚微米级时的理论阈值约为 $1.9 \text{ J}/\text{cm}^2$, 此时激光较难清洗。

2 实验方案

选取的石英玻璃规格 (长 \times 宽 \times 厚) 为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。采用划分区域清洗法, 将玻璃片分成 9 个大小相同的清洗区域。为减小实验误差, 将石英玻璃放置在超声波设备中清洗 3 min, 随后用清水清洗烘干, 去除表面污渍。

激光清洗玻璃表面的实验装置如图 3 所示。实验采用的激光器为 Nd-YAG 纳秒脉冲光纤激光器, 激光波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 100 ns, 最大单个脉冲能量为 1 mJ, 激光束为高斯分布, 聚焦光斑直径 40 μm 。

将石英玻璃夹取在移动工作台上,激光器输出的激光束通过分束镜(透射与反射能量比为 8 : 2)将光束分成两部分。反射激光连接到能量器进行能量检测,透射激光通过聚焦透镜聚焦在样品表面。在实验过程

中,在样片一个区域的污染点上只允许辐照一次脉冲,每当辐照一次脉冲后即更换下一个新的污染点。选择不同的参数对样片进行辐照测试,记录清洗前后效果图片。

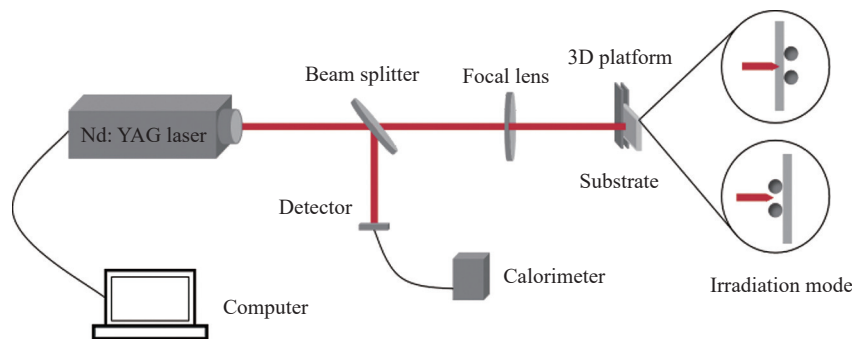


图 3 激光清洗装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the laser cleaning device

3 结果与讨论

3.1 清洗方式对比

通过上述的理论分析为实验中的激光参数的选择作出铺垫。由于理论计算和颗粒尺寸的误差性,对于略小的颗粒需要更大能量密度。对于 5 μm、2 μm 和 1 μm 半径左右的不同等级颗粒,使用更高的能量密度参数进行实验,分别以 0.003 J/cm²、0.3 J/cm² 和 1.9 J/cm² 的激光能量密度入射,文中研究激光正面入射和反面入射的清洗效果,结果如图 4 所示。

在激光辐照下,颗粒吸收能量后快速升温,从而引起颗粒的快速热膨胀,附着力限制了颗粒的快速膨胀,在颗粒内引起热应力,当热应力大于颗粒吸附力时,颗粒物产生加速度膨胀脱离基底表面。由图 4 中的正面辐照可以看出,大于 5 μm 的颗粒在较小的激光能量密度 0.003 J/cm² 下也能够完全清洗干净,这是由于激光所辐照的热应力远大于其吸附力,与上述的理论分析相符合,即半径大的颗粒物容易清洗。以 0.3 J/cm² 的激光能量密度正面清洗半径为 2 μm 的颗粒物时,发现清洗后仍有大量残留,这是由于石英玻璃的透明性,激光照射正面容易产生光与反射,导致半径为 2 μm 的大颗粒清洗效果较差。当激光能量密度提高到 1.9 J/cm² 时,正面清洗半径小于 1 μm 的颗粒,可以看出颗粒基本清洗干净。这是因为对于类似球型的颗粒物,当 1064 nm 的激光波

长与颗粒物的尺寸大小相接近时,即颗粒物在 1 μm 左右时,此时的微小颗粒物与玻璃表面接触处容易发生光的共振效应和近地效应,导致光场强度在该界面处得到很大的加强,因此正面清洗亚微米级的颗粒有较好的效果。

由图 4 中的反面辐照可以看出,大于 5 μm 的颗粒在 0.003 J/cm² 的条件下仍然能够清洗干净,与上述的实验与理论分析完全符合。使用激光能量密度 1.9 J/cm² 反面清洗半径小于 1 μm 的颗粒时,从图中可以看出几乎没有效果。当以 0.3 J/cm² 的激光能量密度反面清洗半径为 2 μm 左右的颗粒物时,可以发现颗粒物完全被去除,这是因为污染物大颗粒大多以不规则的形状粘附在基底上,反面清洗时激光直接辐照颗粒物的底部,颗粒物与基底的接触面不受顶部的遮挡,可以直接吸收激光的热量。从反面入射时,颗粒物与接触面处的最高温度大于正面入射时的最高温度,由于清洗力与辐照面的温度升高成正比,则在同等功率下受到的热应力更高,因此反面清洗 2 μm 半径左右的大颗粒效果更好。

通过理论规律可以得到,大颗粒物的吸附力呈线性增长,而仅需较小的激光能量,其所受热应力远大于吸附力数值。而亚微米级别以及更小尺寸的颗粒形变接触面占比也就越大,而难以清洗,更高的激光能量密度会使得基底损坏。

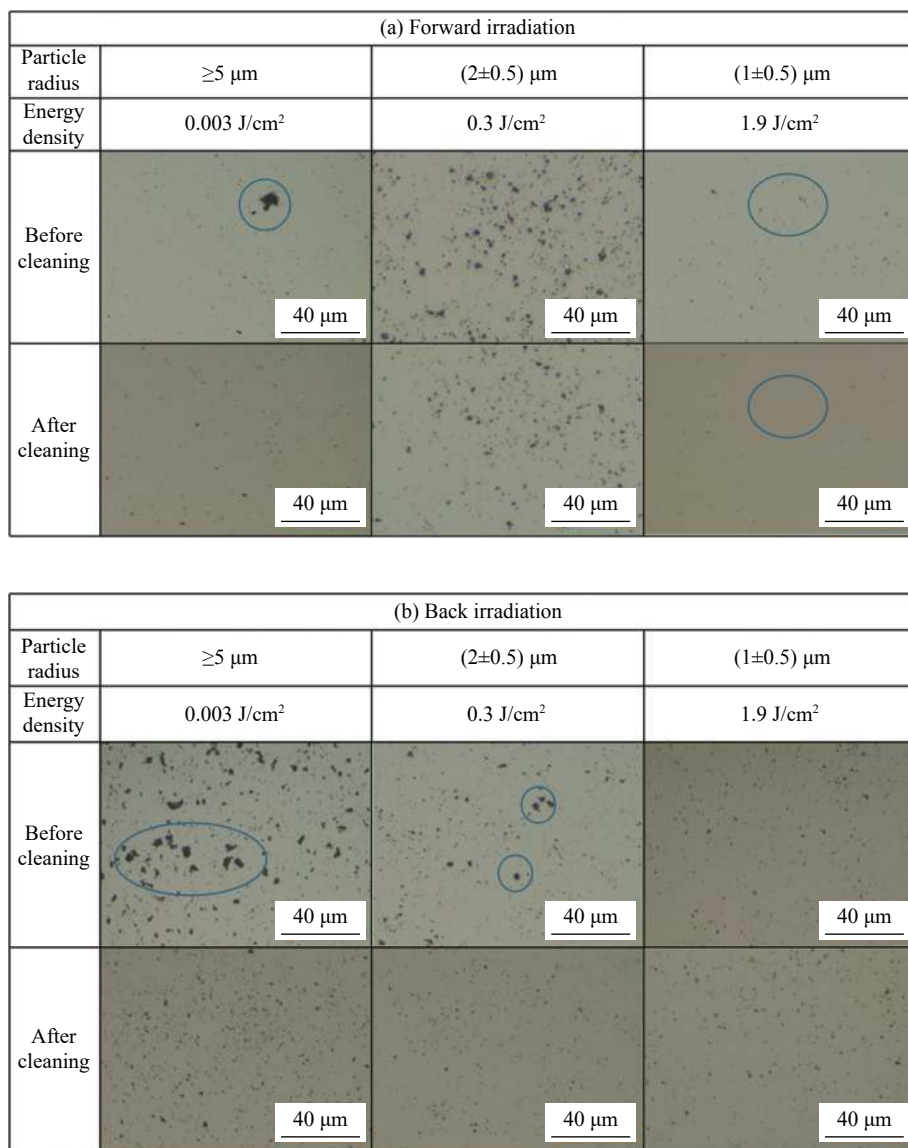


图 4 激光正面入射 (a) 和反面入射 (b) 的清洗效果图

Fig.4 Laser cleaning effect diagram of forward irradiation(a) and back irradiation(b)

3.2 清洗参数影响

采用清洗率评判激光清洗效果, 将清洗前后拍摄的图片通过图像分析处理后计算清洗率, 如图 5 所示。采用灰度和颜色处理, 区分出颗粒污染物和玻璃基底, 黑色像素表示颗粒污染物, 白色像素表示玻璃。从而计算出清洗效率 Y :

$$Y = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \quad (9)$$

式中: S_1 为污染物总面积; S_2 为洗消后剩余污染物面积。

由于光学元件表面的颗粒污染物为大颗粒时, 在较低的能量密度下就能够去除, 因此为保证清洗效

果, 以小尺寸颗粒的去除为目标, 其中考虑到激光清洗应用的效率性, 采用功率作为实验变量, 保持频率一定时, 功率的变化与能量密度呈正相关性, 因此实验结果满足上述能量密度的规律性。采用 40 W 激光功率参数为起始点, 通过能量计检测此时的单脉冲能量大于小颗粒的理论阈值, 计算正面入射方式下的激光清洗率, 结果见图 6。

以激光功率、扫描速度、清洗次数三个为实验因子进行单因素实验, 采取控制变量法, 研究各因素对清洗效果的影响。控制激光功率 (60 W) 和扫描次数 (3 次) 不变, 如图 6(a) 所示。实验选取扫描速度的范围 1000~2 000 mm/s, 当扫描速度较低为 2 000 mm/s 时,

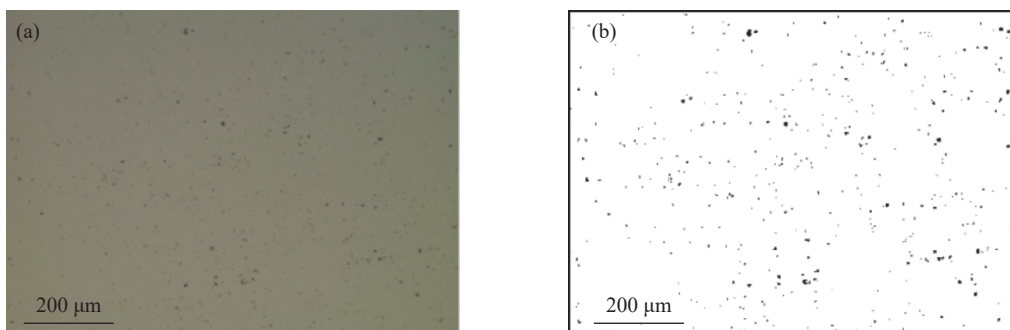


图 5 图像处理。(a) 原图; (b) 处理图

Fig.5 Image processing. (a) Original image; (b) Processing image

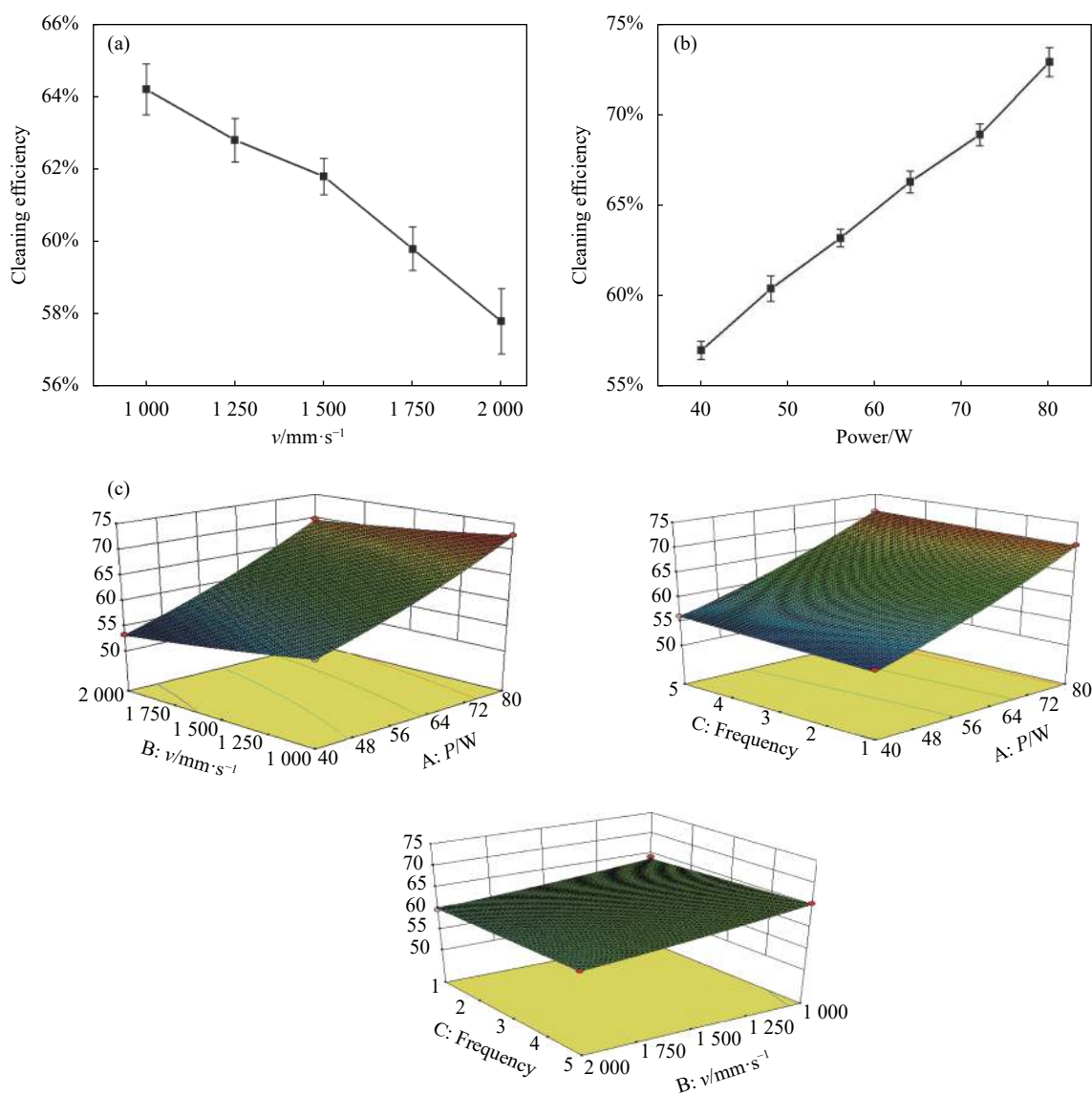


图 6 (a) 清洗率随扫描速度变化图; (b) 清洗率随功率变化图; (c) 三因素响应曲面图

Fig.6 (a) Diagram of cleaning rate changing with scanning speed; (b) Diagram of cleaning rate changing with power; (c) Curved surface diagram of three-factor response

光斑搭接率较低,此时激光辐照未完全覆盖,清洗率只达到了 57%,随着扫描速度的减慢,由于激光辐照时间增加和热效应的积累,清洗率逐渐增加,在扫描速度为 1000 mm/s 时达到 64.2%,扫描速度决定了激光辐照在玻璃表面的时间,决定了颗粒的热积累,但此时的清洗率仍然较低,这是由于激光功率未达到最佳值,部分颗粒受到的激光能量未达到清洗条件。控制扫描速度(1000 mm/s)和扫描次数(3 次)不变,如图 6(b)所示,分析了清洗率随激光功率在 40~80 W 之间的变化规律。当功率较低(40~50 W)时,此时的激光能量较低,颗粒物受到的清洗率不足 60%,随着功率的提升,清洗率也显著增长,当激光功率提高到 80 W 时,此时清洗率达到 72.8%。

计算三因素响应曲面图。选择合适的激光功率实验区间,以 40 W 为基础并以 8 W 为增量,设置 X1 单因素实验;选择扫描速度实验区间,以 1000 mm/s 为基础并以 250 mm/s 为增量,设置 X2 单因素实验;同时选择清洗次数实验区间,以 1 次为基础并以 1 次为增量,设置 X3 单因素实验,由图 6(c)可以看出,清洗率随功率的增加速度最为剧烈,而随着扫描速度的减小较为缓慢,扫描次数影响图最为平缓,可以看出扫描次数对清洗率的影响最低。这是因为颗粒的去除需要足够的热膨胀力,清洗次数的循环会使颗粒反复进行温度升降,对颗粒的热应力有些许作用,但影响有限。

4 结 论

(1) 通过颗粒吸附和温升模型,得到典型颗粒的激光清洗理论阈值。越小尺寸的颗粒吸附形变比例越大,在同等激光能量密度下越难清洗。

(2) 由于反面清洗的高受热性,大颗粒污染物能在反面入射的清洗方式下以较小的激光能量密度去除。

(3) 由于 1064 nm 波长的激光与小颗粒的尺寸相近,理论上激光作用于颗粒易发生光共振效应和近地效应。通过实验证明,正面清洗小颗粒效果较好。

(4) 功率是影响清洗率的最主要因素,清洗效果与功率成正比。扫描速度主要决定了脉冲激光的作用时间,决定了能量的热积累,清洗效果与扫描速度成反比。由于颗粒的去除需要足够的热膨胀力,多次

的清洗次数对颗粒的升温影响较小,因此清洗次数对清洗效果影响不大。

参考文献:

- [1] Gao Qiyu, Li Yun, Wang Hongen, Liu Weiping, et al. Effect of scanning speed with UV laser cleaning on adhesive bonding tensile properties of CFRP [J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 11(4): 1087-1099.
- [2] Amsellem Q, Pauchet F, Jeandin M, et al. Excimer laser surface modification of plasma spraying aluminum oxide coating of connecting hole [J]. *Therm Spray Technol*, 2013, 5(1): 53-60.
- [3] Tian Ze, Lei Zhenglong, Chen Xi, et al. Nanosecond pulsed fiber laser cleaning of natural marine micro-biofouling from the surface of aluminum alloy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118724.
- [4] Jeremie Berthonneau, Philippe Parent, Olivier Grauby, et al. Yellowing of laser cleaned artworks: Formation of residual hydrocarbon compounds after Nd: YAG laser cleaning of gypsum plates covered by lamp black [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, 39: 57-65.
- [5] Jia Xianshi, Zhang Yudong, Chen Yongqian, et al. Laser cleaning of slots of chrome-plated die [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 119: 1056-1059.
- [6] Kumar F, Prasad M, Shail S, et al. Pulsed laser-assisted removal of powder coating from vanised steel surface: a characterisation study [J]. *Appl Phys*, 2015, 119: 853-858.
- [7] Kumar F, Sonar V R, Das D K, et al. Laser cleaning of tungsten ribbon [J]. *Appl Surf Sci*, 2014, 308: 216-220.
- [8] Xu Jiawei, Wu Chenwei, Zhang Xiang, et al. Influence of parameters of a laser cleaning soil rust layer on the surface of ceramic artifacts [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): 2725-2730.
- [9] Xie Xiaozhu, Huang Qingpeng, Long Jiangyou, et al. A new monitoring method for metal rust removal states in pulsed laser derusting via acoustic emission techniques [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2019, 275: 116321.
- [10] Grojo D, BoyoMo-Onana M, Cros A, et al. Influence of laser pulse shape on dry laser cleaning [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(13): 4786-4791.
- [11] Mosbaeher M, Chaoui N, Siegel J. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surfaces [J]. *Applied Physics A: Materials Science Processing*, 1999, 69(S1): S331-S334.
- [12] K M T, Lee J M, Cho S H, et al. A acoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2005, 43(9): 1010-1020.

- [13] Ye Yayun, Yuan Xiaodong, Xiang Xia, et al. CO₂ laser-cleaning of dimethylsilicone contamination on gilded film surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 5(5): 968-972. (in Chinese)
- [14] Lu Y F, Zhang Y, Wan Y H, et al. Laser cleaning of silicon surface with deposition of different liquid films [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 138: 140-144.
- [15] Li Yong, Qin Yingxiong. Edge cleaning processing of a-Si : H thin film solar cell with 1 064 nm MOPA laser [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(2): 275-279. (in Chinese)
- [16] Tam A C, Leung W P, Zapka W, et al. Laser cleaning techniques for removal of surface particulates [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(7): 3515-3523.
- [17] Watkins K G, Curran Carmel, Lee Jongmyung. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd: YAG sources [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4(S1): 59-64.
- [18] Ramakrishna S N, Nalam P C, Clasohm L Y, et al. Study of adhesion and friction properties on a nanoparticle gradient surface: transition from JKR to DMT contact mechanics [J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2013, 29(1): 175-182.
- [19] Suratwala T I, Miller P E, Bude J D, et al. HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94(2): 416-428.
- [20] Boyer K, Malone R C, Mccrory R L, et al. Indications of strongly flux-limited electron thermal conduction in laser target experiments [J]. *The Review of Laser Engineering*, 1974, 2(3): 283-291.