

DOI: 10.11779/CJGE20230396

激光照射岩石热裂特性与裂隙分布研究

王义江^{1,2,3}, 郁东旭¹, 孙立鹏¹, 朱启银^{2,3}, 王建州^{2,3}

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 激光辅助破岩是一种非接触式破岩技术, 破岩效果主要受激光功率、照射时间和离焦距离等参数影响。选择石灰岩、砂岩和花岗岩3类岩石, 开展了不同照射参数的破岩试验, 分析了温度、射孔参数、比能、热裂效能、裂隙分布、矿物组分和微观结构等变化规律。结果表明, 激光照射下3类岩石表面温度均超过2000°C、温度梯度最高可达1500°C/mm, 相同位置处花岗岩表面温度和温度梯度最高、砂岩次之、石灰岩最低; 3类岩石射孔直径、射孔深度和射孔速率均与照射参数密切相关, 砂岩、石灰岩和花岗岩最大射孔速率分别为3.18, 2.68, 0.8 mm/s。相同照射参数下, 比能较热裂效能高1~2个数量级, 3类岩石比能排序为: 花岗岩>石灰岩>砂岩。照射后岩样均存在数条主裂隙, 沿径向延伸至试样边缘, 石灰岩和花岗岩次生裂隙发育, 砂岩未发现明显次生裂隙。照射后岩石矿物衍射强度和微观结构发生显著改变。

关键词: 激光破岩; 温度分布; 比能; 热裂效能; 裂隙分布

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)09-1809-11

作者简介: 王义江(1981—), 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 主要从事激光辅助破岩和新能源开发利用等方面的研究工作。E-mail: yjwang@cumt.edu.cn。

Thermal-breaking characteristics and crack distribution of rock irradiated by laser beams

WANG Yijiang^{1,2,3}, YU Dongxu¹, SUN Lipeng¹, ZHU Qiyin^{2,3}, WANG Jianzhou^{2,3}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Yunlong Lake

Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Construction and

Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The laser-assisted rock breaking is a non-contact technology employed for the rock fragmentation, with its efficiency contingent upon the laser power, irradiation time and defocusing distance. To explore the effects of various irradiation parameters, the rock-breaking tests are conducted on three distinct rock types, including limestone, sandstone and granite. The temperature field, perforation parameters, specific energy, thermal-cracking energy, crack distribution, mineral composition and microstructural characteristics are studied. The results demonstrate that the rock surface temperature subjected to laser irradiation experiences a substantial increase, with the maximum temperature and temperature gradient of 2000 °C and 1500 °C/mm, respectively. The granite sample exhibits the highest surface temperature and temperature gradient, followed by sandstone, and the limestone displays the lowest values. The perforation diameter, depth and speed of rocks are closely associated with the corresponding irradiation parameters. The sandstone, limestone and granite exhibit the maximum perforation speeds of 3.18 mm/s, 2.68 mm/s and 0.8 mm/s, respectively. The relationship between specific energy and irradiation parameters mirrors that of thermal-cracking energy under the same irradiation parameters. However, the specific energy values are approximately 1-2 orders of magnitude higher than the corresponding thermal-cracking energy values. The specific energy ranking for the three rock types is as follows: granite > sandstone > limestone. The rock samples exhibit a notable presence of radial cracks that extend to the edges. The limestone and granite samples display extensive development of the secondary cracks, whereas the sandstone shows no significant presence of the secondary cracks. The irradiated rock samples demonstrate evident alterations in both diffraction

基金项目: 深地科学与工程云龙湖实验室重点攻关项目(104023006);
国家自然科学基金项目(51978653); 国家高等学校学科创新引智计划
项目(B14021)。

收稿日期: 2023-05-08

intensity and microstructures when compared with their corresponding original samples.

Key words: laser-assisted rock breaking; temperature distribution; specific energy; thermal-cracking energy; crack distribution

0 引言

硬岩隧道高效掘进是地下工程中常见的难题,如引汉济渭秦岭输水隧洞施工时遇到了抗压强度为194~300 MPa的高石英含量花岗岩^[1],徐州地铁、青岛地铁分别遇到了强度为110 MPa的石灰岩^[2]和170 MPa的片麻岩,导致掘进速度显著降低、施工成本大幅升高。为了提高硬岩隧道掘进效率,诸多新型破岩技术如微波^[3-4]、激光^[2, 5]、水射流^[6]等得以研究,以期通过这些新型破岩技术预先致裂岩石、降低围岩初始强度,从而提高机械破岩速度、降低道具消耗量。其中,激光破岩技术因其效率高被认为是最有潜力的非接触式破岩方法之一^[7]。

大量试验研究表明^[8-10],激光辅助破岩可以显著提升岩石破碎效率。Chen等^[11]发现激光辐照过程中砂岩表面温度可达1900°C、表面温度梯度可超过830°C/mm。Wang等^[2, 5]发现激光照射石灰岩产生的表面温度梯度可达1400 °C/mm,花岗岩表面温度梯度高达2669~5700 °C/mm。Hu等^[12]发现激光照射不同类型岩石的射孔参数和热裂效果存在差异。Li等^[13-14]分析了激光辐射花岗岩损伤形态特征及温度分布,发现比能值随辐照时间增加呈非线性增长,拉伸和拉剪作用分别导致了岩样熔融区、损伤区与热影响区破坏。Guo等^[15]建立了激光破碎岩体参数回归模型,发现岩石破裂效果与照射参数密切相关。

分析发现,激光照射单种岩石的温度、比能变化研究较多,关于激光照射多种高强度或高耐磨岩石热裂规律方面的对比研究相对较少。本文开展了激光照射石灰岩、砂岩和花岗岩试验,对比分析了不同激光功率、照射时间及离焦距离下3类岩石表面温度、比能、热裂效能、裂隙分布、矿物组份及微观结构变化,研究结果可为硬岩隧道激光辅助破岩提供技术支持。

1 试验设计

1.1 试验设备

本文采用苏州迅镭激光科技有限公司生产的QL-DC1000型连续式光纤激光系统,主要由激光器、切割头、机械手臂和冷水机等部件组成;激光波长为1080±10 nm,最大输出功率为1000 W,光纤半径为25 μm,如图1(a)所示。采用Flir-SC655红外热像仪系统测试激光照射过程中岩石表面温度变化,其测温量程为150~2000°C,测温误差为±2°C(或2%量程),如图1(b)所示。此外,通过中国矿业大学现

代分析与计算中心的X射线衍射仪(XRD)及X射线荧光光谱仪(XRF)分析激光照射前后3类岩石物相组分。采用三维X射线纤维成像系统(3D-XRM)获取激光照射后岩石内部裂隙切片图像,如图1(c)所示,通过Dragonfly软件采集裂隙尺寸数据和实现裂隙体的三维重构。



(a) 连续式光纤激光



(b) 红外热像仪



(c) 三维X射线显微成像系统

图1 主要试验设备

Fig. 1 Main test instruments

1.2 岩样制备

本文采用的石灰岩试样来自江苏徐州、砂岩试样来自江苏苏州、花岗岩试样来自河南驻马店。所有相同类型岩样分别取自同一岩块且取芯角度相同,加工成φ50 mm×50 mm的圆柱形试样,岩样上、下表面均采用磨边机打磨处理。室温下岩样物性参数如表1所示,3种岩石密度范围为2630~2714 kg/m³,采用HotDisk测得3类岩样的导热系数范围为1.78~3.06

$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 含水率范围为 0.15%~0.46%。

表 1 岩样物性参数

Table 1 Physical parameters of rock samples

物性参数	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	含水率/%
石灰岩	2714	720	3.06	0.46
砂岩	2661	781	1.78	0.40
花岗岩	2630	714	2.60	0.15

通过 XRF 测试, 得到了 3 种岩样主要化学组份及质量分数, 如表 2 所示。不难发现, 石灰岩中 CaO 含量最大, 砂岩和花岗岩则为 SiO_2 含量最高。

1.3 试验方案

激光照射岩石热裂效果主要受照射参数影响, 如激光功率、照射时间和离焦距离等。本文采用控制单一变量法开展试验, 激光功率范围为 400~1000 W, 照射时间范围为 5~20 s, 离焦距离范围为 6~12 cm, 具体激光照射参数如表 3 所示。当激光功率变化时, 照射时间和离焦距离分别设定为 20 s 和 6 cm; 当照射时间变化时, 激光功率和离焦距离分别设置为 1000 W 和 6 cm; 当离焦距离变化时, 激光功率和照射时间分别设置为 1000 W 和 20 s。此外, 考虑岩样物性测试试验安全需要, 所有照射后岩样物性参数均待试样冷却至室温后进行测试。

1.4 数据处理

比能和热裂效能是评价激光破岩效率的重要参数。其中, 比能定义为激光去除单位体积岩石所需的能量^[16], 其表达式如下所示:

表 2 XRF 结果

Table 2 XRF results

化学组份	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	CO_2	其它
石灰岩/%	0.13	2.30	1.17	6.21	0.08	51.23	0.37	38.39	0.12
砂岩/%	3.99	6.16	16.10	50.35	1.25	7.87	11.96	—	2.32
花岗岩/%	3.53	0.69	13.91	68.55	5.16	1.63	2.46	—	4.07

表 3 试验参数

Table 3 Test parameters

参数设置	激光功率/W	照射时间/s	离焦距离/cm
I	400/600/800/1000	20	6
II	1000	5/10/15/20	6
III	1000	20	6/8/10/12

说明: 改变激光功率和离焦距离时, 花岗岩试样照射时间为 30 s。

表 4 测试精度和不确定度

Table 4 Test accuracies and uncertainties

变量	温度/°C	质量/g	长度/mm	体积/ cm^3	$E_s, E_{T,C}/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3})$
测试精度	±2%	±0.01	±0.02	—	—
不确定度	±2%	2%~5%	0.11%	0.08%	2%~5%

$$E_s = \frac{P \cdot t}{V} \quad (1)$$

式中: E_s 为比能 (J/cm^3); P 为激光功率 (W); t 为照射时间 (s); V 为激光照射去除的岩石体积 (cm^3)。

热裂效能定义为激光致裂单位体积岩石所需要的能量^[2, 5], 其定义式如下所示:

$$E_{T,C} = \frac{P \cdot t}{V_C} \quad (2)$$

式中: $E_{T,C}$ 为热裂效能 (J/cm^3); V_C 为激光照射致裂岩石的体积 (cm^3)。

为了验证试验结果的可信度, 对温度、质量、长度、体积、比能及热裂效能等参数开展了测试精度及不确定度分析。采用式(3)计算了温度、质量、长度等有向变量的测试精度及不确定度^[16]:

$$\Delta_v^2 = u_v^2 - \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3)$$

式中: Δ_v 为变量的测试精度; u_v 为有向变量的不确定度; x_i 和 \bar{x} 分别为单个测试值及所有测试值的平均值; n 为测试项的数量。

此外, $u'_v = F(x_i)$ 为由 x_i 计算得出的无向变量, 采用式(4)计算体积、比能和热裂效能的不确定度^[16]:

$$u'_v^2 = \sum_i^n \left(\frac{\partial \ln(F)}{\partial x_i} \cdot \Delta_{x_i} \right)^2 \quad (4)$$

相关物理量的测试精度和不确定度如表 4 所示, 发现所有物理参数的不确定度均在 5% 以内, 说明本文试验数据具有较高的可信度。

2 结果和讨论

2.1 温度场

图 2 为不同照射参数下 3 类岩石表面红外温度场以及根据红外温度场得到的径向温度分布。图 2 (a) 为不同激光功率下花岗岩表面径向温度分布, 发现花岗岩相同位置处表面温度随着激光功率的增加而升高, 如激光功率从 400 W 增加到 1000 W 时, 半径 8 mm 处花岗岩表面温度分别从 464 °C 升高 1518 °C, 其原因是激光功率越高, 照射到花岗岩试样的热量也越多, 从而造成相同位置处花岗岩表面温度越高。图 2 (b) 为不同照射时间下砂岩表面径向温度分布, 发现砂岩相同位置处表面温度随照射时间增加而增加, 如照射时间从 5 s 增加到 20 s, 半径 10 mm 处砂岩表面温度从 230 °C 升高到 634 °C, 这是因为随着照射时间增加, 砂岩表面吸收的热量随之增加, 相同位置处的砂岩表面温度也越高。此外, 随着照射时间的增加, 砂岩表面温升速率不断降低, 如半径 10 mm 处砂岩表面温升速率从 40 °C/s (照射时间 5 s) 降低到 33.4 °C/s (照射时间 20 s), 这是由于激光照射岩石传热过程属于瞬态传热, 随着时间增加岩石温升速率会逐渐降低。图 2 (c) 为不同离焦距离下石灰岩表面径向温度分布, 发现相同位置处温度随离焦距离增加而增加, 如离焦距离从 6 cm 增加到 12 cm, 半径 10 mm 处石灰岩表面温度从 277 °C 增加到约 674 °C, 原因是随着离焦距离的增加, 激光直接辐射区域面积增大, 由于石灰岩表面吸收热能速率远大于岩石内部热扩散速率, 故相同位置处石灰岩表面温度相应增加。

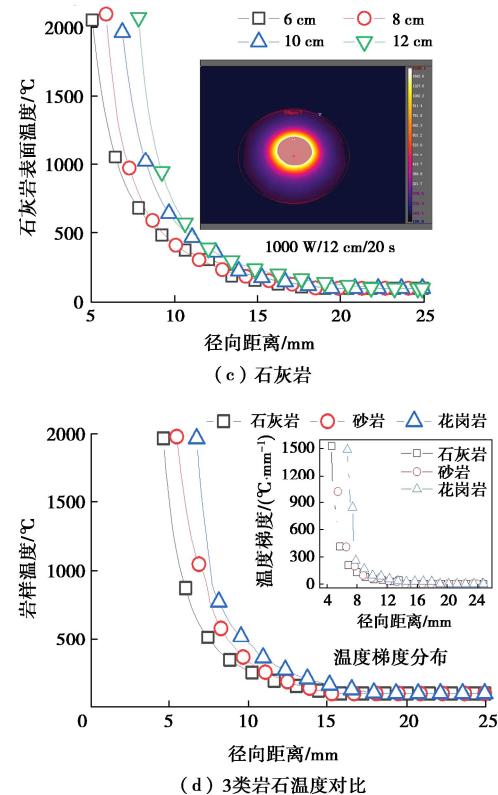
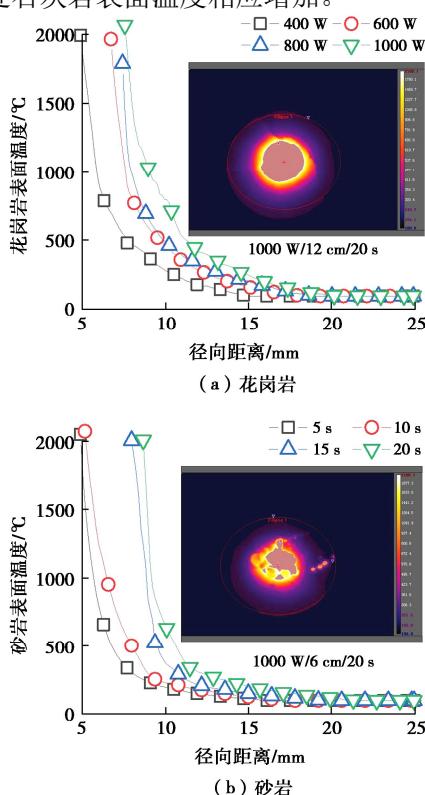


图 2 不同辐射参数下岩石表面径向温度

Fig. 2 Radial temperatures of rock surfaces under different irradiation parameters

选择激光功率 600 W、离焦距离 6 cm、照射时间 20 s 时石灰岩、砂岩和花岗岩温度分布, 如图 2 (d) 所示。发现相同位置处花岗岩温度最高、砂岩次之、石灰岩温度最低, 如半径 7 mm 处花岗岩、砂岩和石灰岩的温度分别为 812°C, 645°C, 430°C。由于石灰岩主要成分为白云石、方解石, 当温度超过 700°C 后逐渐发生分解反应, 此过程会吸收大量热量, 从而造成石灰岩温度相对偏低; 花岗岩属于酸性岩浆岩, 其所含的黑云母等矿物具有较高的熔融温度, 且花岗岩导热系数比砂岩高, 故激光照射后花岗岩的温度相对较高。此外, 选择相同照射参数下石灰岩、砂岩和花岗岩温度分布, 计算得到了相应表面温度梯度, 发现 3 类岩石最大温度梯度均超过 1000°C/mm, 其中花岗岩可达 1500°C/mm, 且相同位置处花岗岩表面温度梯度最大, 砂岩次之、石灰岩最小, 如半径 7 mm 处石灰岩、砂岩、花岗岩表面温度梯度分别为 192, 292, 1108°C/mm。如此高的温度和温度梯度, 将在岩样内部产生极大的热膨胀和热应力, 由此产生的拉伸、拉剪作用导致岩石破裂。

2.2 热裂规律

(1) 射孔参数

图 3 为不同照射参数下 3 类岩石的射孔直径, 可知 3 类岩石射孔直径均随激光功率、照射时间和离焦

距离增加呈非线性增长。如图3(a)所示, 岩石射孔直径均随照射功率增加而增大, 如当激光功率从400 W增加到1000 W, 石灰岩的射孔直径从6.1 mm增加到7.8 mm。这是因为激光功率越高, 岩样所吸收的热量也越多, 导致射孔直径也越大; 由图3(b)可知, 岩石射孔直径随照射时间增加而增加。当照射时间从5 s增加到20 s时, 砂岩射孔直径从8.6 mm增加到9.6 mm。这是由于随着激光功率和照射时间增加, 岩样所吸收的热量也越多, 故射孔直径会增加; 从图3(c)发现, 岩石射孔直径随离焦距离增加而增大。当离焦距离从6 cm增加到12 cm时, 花岗岩射孔直径从7.0 mm增加到10.4 mm; 原因是激光离焦距离越大, 激光光束照射面积越大, 导致射孔直径增大^[17]。

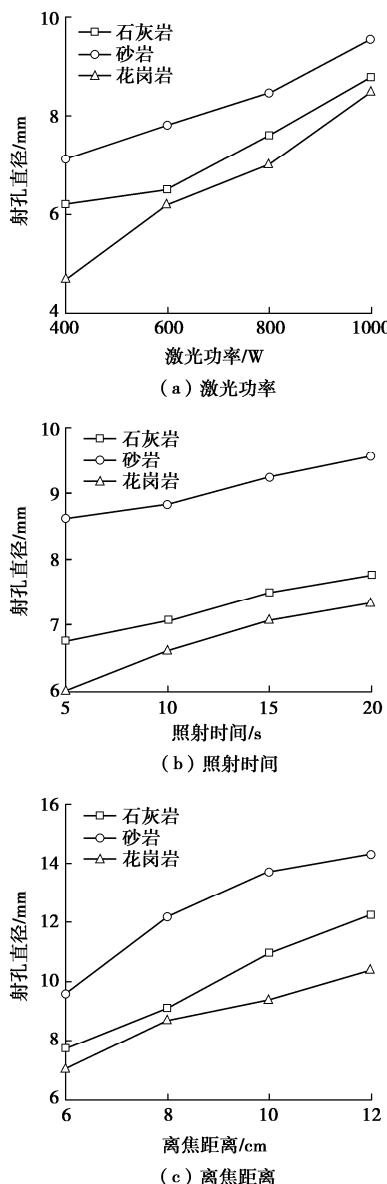


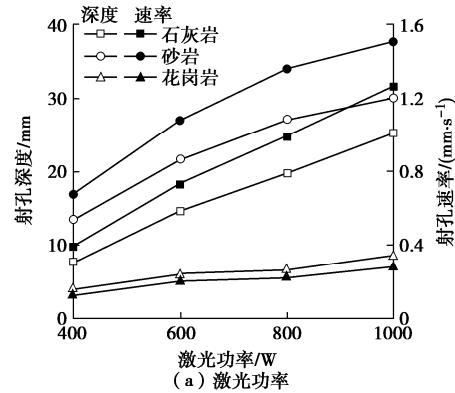
图3 不同照射参数下射孔直径

Fig. 3 Hole diameters under different irradiation parameters

在激光束极高热流密度作用下, 岩石表面形成了

不均匀温度场, 导致岩石矿物相位发生改变, 造成矿物基质组份发生熔化和蒸发, 并产生高温熔池和蒸气, 高温熔池不断扩大造成射孔直径逐渐增加^[13]。如石灰岩中的方解石和白云石在700 °C左右分解为CaO、MgO等; 随着温度持续增加, 这些氧化产物会逐渐融化, 砂岩和花岗岩中的长石、石英等也会随着温度增加而逐渐熔化, 高温熔体不断向孔壁扩张, 导致射孔直径逐渐增加。

图4为不同照射参数下3类岩石射孔深度和射孔速率变化。如图4(a)所示, 3类岩石射孔深度和射孔速率随着激光功率增加而增加。当激光功率从400 W增加到1000 W, 石灰岩、砂岩、花岗岩的射孔深度分别从7.7, 13.5, 4.0 mm增加到25.2, 30.2, 8.4 mm, 射孔速率则分别从0.39, 0.68, 0.13 mm/s增加到1.26, 1.51, 0.28 mm/s, 3类岩石的射孔速率增幅分别为223%, 122%, 115%。这是由于激光功率增加后, 传递到岩石表面的热能增加, 导致射孔深度和射孔速率不断增加。从图4(b)可知, 当照射时间从5 s延长到20 s, 石灰岩、砂岩和花岗岩的射孔深度分别从13.4, 15.9, 4.0 mm增加到25.2, 30.2, 7.5 mm, 相应的射孔深度增幅约为88%, 90%, 88%; 石灰岩、砂岩和花岗岩的射孔速率分别从2.68, 3.18, 0.80 mm/s降低到1.26, 1.51, 0.38 mm/s, 射孔速率降幅均为53%左右。随着照射时间增加, 岩石局部表面温度迅速超过2000°C, 导致岩石内长石、石英和方解石、白云石等各类矿物熔化, 产生的熔融物阻碍了激光热能的传递, 造成射孔速率逐渐降低。由图4(c)发现, 3类岩石射孔深度和射孔速率均随离焦距离增加呈非线性下降。当离焦距离从6 cm增加到12 cm时, 石灰岩、砂岩、花岗岩射孔深度从25.2, 30.2, 9.5 mm分别下降到6.1, 13.4, 4.5 mm, 射孔速率则分别从1.26, 1.51, 0.32 mm/s下降到0.31, 0.67, 0.15 mm/s, 3类岩石射孔深度(射孔速率)的降幅分别为75%, 56%, 53%。随着离焦距离增加, 光束照射面积也增加, 而激光能量密度随之降低, 导致岩石射孔深度和射孔速率不断降低。



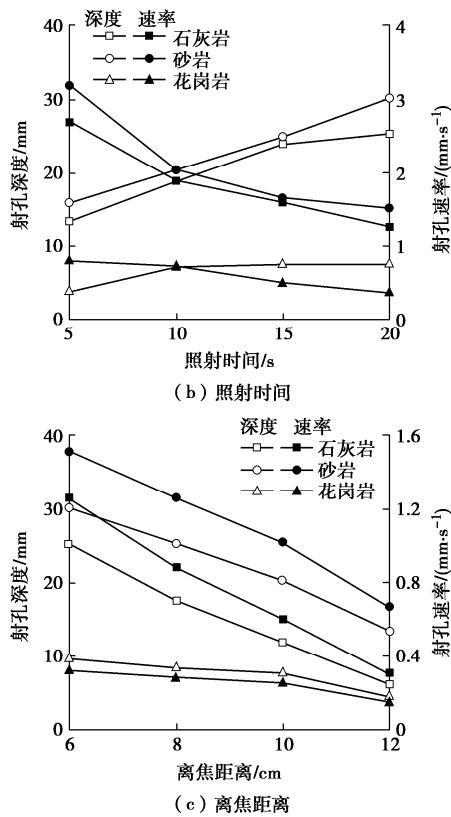


图 4 不同照射参数下射孔深度与射孔速率

Fig. 4 Hole depths and rates of perforation under different irradiation parameters

(2) 比能

图 5 为不同照射参数下 3 类岩石比能变化。由图 5(a)看出, 比能随激光功率增加而降低, 如随着激光功率从 400 W 增加到 1000 W, 石灰岩、砂岩、花岗岩比能分别从 15.8, 3.8, 151.2 kJ/cm³降低到 9.9, 2.6, 66.9 kJ/cm³。花岗岩属于火成岩, 石英、斜长石和黑云母等矿物组份胶结致密, 且具有相对较高的熔点; 石灰岩中含有方解石, 在温度为 700°C 左右会首先发生矿物热分解并吸收大量热能, 生成的氧化物则会继续发生熔化甚至气化; 砂岩为沉积岩, 内部缺陷相对较多, 其中的石英和斜长石等矿物在高温作用下发生熔融。因此, 移除相同质量的花岗岩所消耗的能量要比石灰岩和砂岩高。

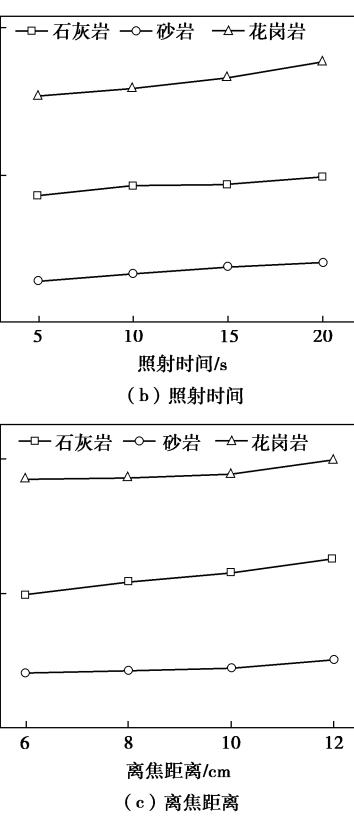
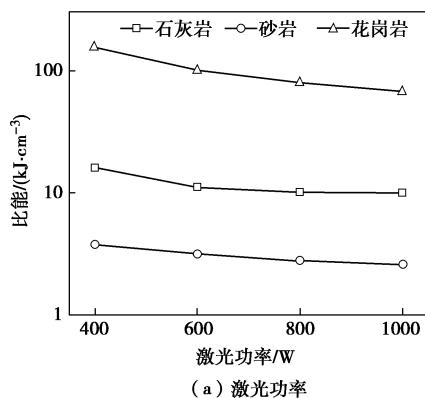


图 5 不同照射参数下比能

Fig. 5 Specific energies under different irradiation parameters

从图 5(b)发现, 比能随照射时间增加而增加, 如随着照射时间从 5 s 延长到 20 s, 石灰岩、砂岩、花岗岩比能分别从 7.2, 1.9, 33.9 kJ/cm³增加到 9.9, 2.6, 58.1 kJ/cm³。照射时间增加后, 岩石表面产生了更多的熔融物并保持熔化状态, 这将消耗大量的激光热能, 导致移除单位体积岩石需要更多能量, 造成比能值随照射时间增加而增大。

由图 5(c)可知, 比能随离焦距离增加而增加, 如随着离焦距离从 6 cm 增加到 12 cm, 石灰岩、砂岩和花岗岩比能分别从 9.9, 2.6, 69.1 kJ/cm³增加到 17.8, 3.3, 96.4 kJ/cm³, 增幅分别约为 80%, 27%, 40%。由于离焦距离增加, 照射到岩石表面激光束的功率密度逐渐降低, 从而导致激光照射移除岩石体积减少、比能增加。

(3) 热裂效能

激光照射后 3 类岩石热裂效能如表 5 所示。需要说明的是, 由于砂岩在激光照射后几乎未发生破裂, 因此认为激光照射砂岩的热裂效能等于其比能, 故不再赘述其变化规律。

由表 5 发现, 热裂效能随激光功率增加而减小, 如随着激光功率从 400 W 增加到 1000 W, 石灰岩、花岗岩热裂效能分别从 0.122, 1.628 kJ/cm³降低到 0.078, 1.072 kJ/cm³。激光功率增加将导致岩石获得更多热能, 除了岩石所含的矿物发生熔融外, 如花岗岩

中云母、长石内羟基逸出和化学键断裂, 造成岩样矿物颗粒剥落、破碎量增加^[18-19]等, 故热裂效能随之降低。此外, 还发现热裂效能随照射时间增加而增加, 如当照射时间为 5 s 时, 石灰岩和花岗岩均未发生明显破裂; 随着照射时间从 10 s 延长到 20 s, 石灰岩和花岗岩的热裂效能分别从 0.039, 0.459 kJ/cm³ 增加到 0.078, 0.838 kJ/cm³。照射时间增加后, 石灰岩和花岗岩孔内熔融物含量增加, 由于熔融物保持融化状态需要吸收大量热能, 导致破裂单位体积岩石需要消耗更多的热能, 故热裂效能随之增加。最后, 热裂效能随离焦距离增加而增加, 如随着离焦距离从 6 cm 增加到 12 cm, 石灰岩、花岗岩热裂效能分别从 0.078, 0.860 kJ/cm³ 增加到 0.137, 2.680 kJ/cm³, 增幅分别为 75.64%, 211.63%。由于离焦距离增加, 激光功率密度降低, 单位体积岩石破碎量减少、热裂效能增加。

表 5 热裂效能

Table 5 Thermal-cracking energies

照射参数	热裂效能/(kJ·cm ⁻³)		
	石灰岩	砂岩*	花岗岩
激光功率/ W	400	0.122	1.51
	600	0.103	1.36
	800	0.090	1.08
	1000	0.078	0.68
照射时间/ s	5	—	1.51
	10	0.039	1.65
	15	0.043	2.04
	20	0.078	3.18
离焦距离/ cm	6	0.078	0.67
	8	0.092	1.02
	10	0.097	1.26
	12	0.137	1.51
			2.680

注: *表中砂岩热裂效能等于比能。

对比发现, 热裂效能和比能随激光功率、照射时间及离焦距离的变化规律一致; 然而, 相同照射参数下热裂效能值较比能低约 1~2 个数量级, 说明激光热裂岩石较激光钻进所需能量更少。

2.3 裂隙分布

(1) 内部裂隙

基于 3D-XRM 获取激光照射后 3 类岩石内部断层扫描图像, 如图 6 所示。从图 6 石灰岩径向及轴向断层扫描图像可见, 石灰岩内部径向断面仍存在 4 条主裂隙 (L1~L4) 沿径向贯穿岩样, 将岩样分割成四块不规则扇形岩块。主裂隙平均长度约为 20 mm、平均宽度约为 154 μm、最大宽度约为 200 μm; 次生裂隙主要沿主裂隙中部呈枝状发育, 其平均长度约为 10 mm、平均宽度约为 82 μm。石灰岩射孔剖面形状呈“V”型, 张开角约 14°, 射孔内壁熔融层厚度约 2 mm, 裂隙轴向延伸深度小于射孔深度。

由图 6 砂岩径向和轴向断层扫描图像发现, 砂岩内部径向断面存在 3 条主裂隙 (S1~S3) 沿径向延伸

并贯穿岩样, 主裂隙平均长度约为 20 mm、平均宽度约为 112 μm、最大宽度约为 154 μm, 未见明显次生裂隙。砂岩内部大量微孔隙约束了矿物颗粒膨胀和变形, 限制了次生裂隙发育, 故砂岩内部裂隙数量整体偏少。砂岩射孔剖面形状也呈“V”型, 张开角度约为 34°, 射孔内壁相对光滑, 孔内残留有熔融物。

从图 6 花岗岩径向及轴向断层扫描图像可知, 花岗岩内部径向断面有 3 条主裂隙 (G1~G3) 沿径向延伸并贯穿岩样, 主裂隙平均长度约为 20 mm、平均宽度约为 498 μm、最大宽度约为 1087 μm; 花岗岩射孔附近次生裂隙密度较高, 呈须状延伸发育, 平均长度为 6 mm、平均宽度为 100 μm, 最大宽度约为 345 μm。花岗岩射孔剖面形状为“U”型, 射孔内部残留大量熔融物、射孔底部存在熔池, 间接导致了花岗岩射孔深度小于石灰岩和砂岩; 由于气泡浮升速率较低^[20], 熔池底部还存在未逸出的气泡。花岗岩内部缺陷少, 矿物颗粒受热膨胀, 产生的热应力导致沿晶裂隙、穿晶裂隙在矿物边界和内部发育、连通, 形成了大量次生裂隙^[21]。

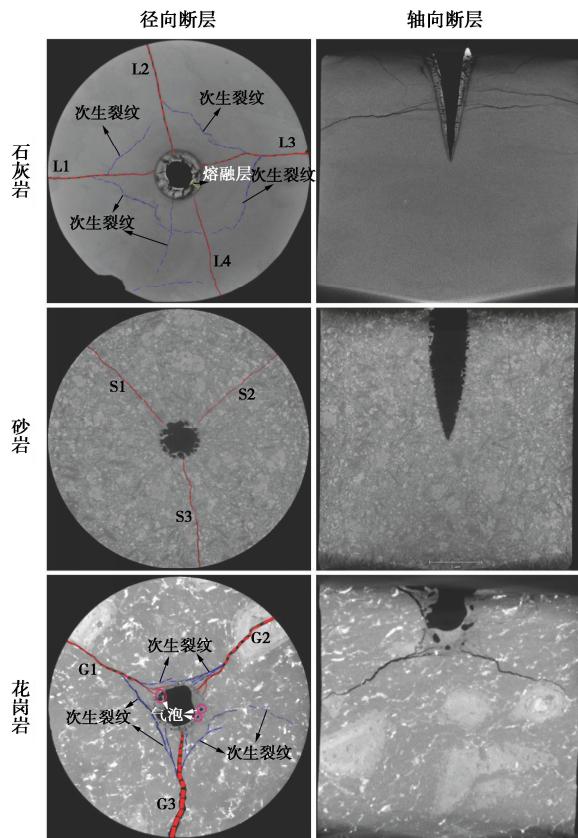


图 6 径向及轴向断层扫描图

Fig. 6 Radial and axial computed tomography images

(2) 整体裂隙

通过 Dragonfly 软件重构激光照射后 3 类岩样及整体裂隙三维模型, 如图 7 所示, 其中灰白色部分为

岩样骨架，紫红色部分为裂隙（包含中心射孔、主裂隙和次生裂隙）。

由图 7 照射后石灰岩三维岩样模型及整体裂隙可见，照射后石灰岩射孔内壁附着熔融物凝固体，这是石灰岩矿物在高温加热后产生的熔融物与分解物黏结形成，主要成分是碳酸钙等矿物颗粒受热分解产生的 CaO 等；此外，石灰岩有 4 条主裂隙贯穿岩样，还发现射孔附近次生裂隙发育，岩样外侧表面存在一条不规则环形破裂面。岩样内部产生的复杂裂隙网络，导致照射后石灰岩试样单轴抗压强度最大下降约 60%^[2]。

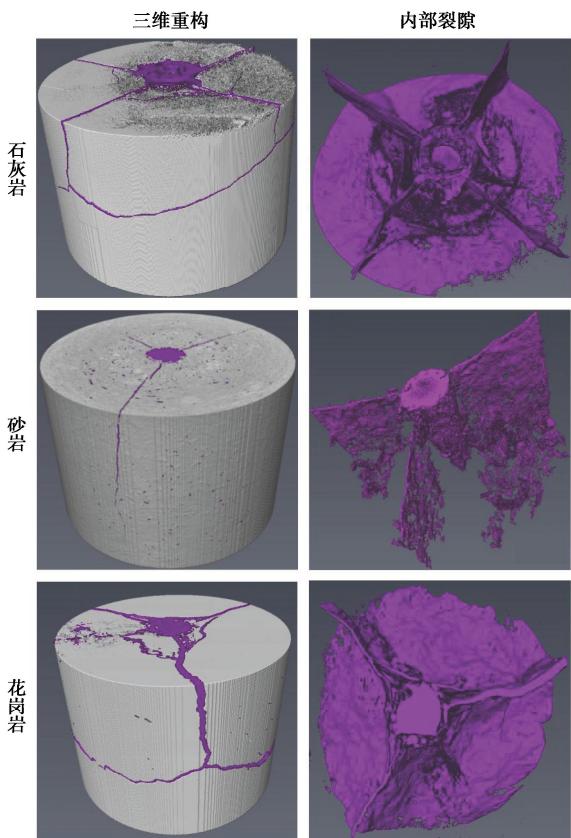


图 7 岩样及裂隙三维重构

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction for samples and cracks

从图 7 照射后砂岩三维岩样模型及整体裂隙发现，砂岩射孔内壁残留凝固后 SiO₂ 熔融玻璃体，熔体持续吸收及反射大量热能，这会导致岩样内部吸收的热量不断降低；砂岩表面发现 3 条主裂隙沿射孔放射性延伸到试样边缘，使岩样破裂为数块不规则扇形岩块；与照射后石灰岩试样不同，照射后砂岩未见明显的次生裂隙。

由图 7 照射后花岗岩三维模型及整体裂隙发现，花岗岩射孔内壁同样附着大量熔融物，射孔外侧发现少量分解物，主要成分为钠长石^[22]。此外，花岗岩表面发现 3 条主裂隙，且岩样外侧表面存在一条不规则

环形破裂面，导致照射后花岗岩试样单轴抗压强度最大下降约 69%^[17]。

石灰岩和砂岩属于沉积岩，其矿物颗粒分布不均、排列无序，胶结物通常充填于碎屑颗粒之间或附着于颗粒表面，岩石内含有随机分布的空腔、微孔隙等缺陷，可起到阻碍裂隙扩展的作用^[23]，故石灰岩和砂岩裂隙宽度较窄、破裂面较光滑。此外，砂岩矿物胶结与石灰岩不同，导致砂岩热裂效果较差。花岗岩属于酸性岩浆岩，岩石矿物颗粒胶结致密、晶粒间接触好、内缺陷少^[24]，受激光热作用后矿物颗粒间出现较强的不协调热变形，故裂隙宽度大、数量多、热裂效果好。

2.4 XRD 衍射图谱

图 8 为激光照射前后石灰岩、砂岩和花岗岩 3 类岩石的 XRD 测试结果。由图 8 (a), (d) 可知，石灰岩原始试样主要由方解石、白云石等矿物组成，最大衍射峰强度约为 3000 CPS，对应的衍射角约为 29°。熔融石灰岩主要成分为方解石、生石灰和氢氧钙石，含少量碳镁钠石。在高热流激光束作用下，熔融区温度超过 700°C，导致石灰岩中的方解石、白云石等矿物发生分解，生石灰含量逐渐增加，部分生石灰吸收空气中的水蒸气变成氢氧化钙^[2]。此外，熔融矿物的衍射强度较原始试样大幅降低，例如熔融矿物中方解石最大衍射强度约为 450 CPS，较原始试样下降约 85%，说明熔融后矿物晶体结构遭到破坏。

由图 8 (b), (e) 发现，砂岩原始试样以长石和石英等矿物为主，含少量方解石、菱铁矿和绿泥石等矿物，且主要以胶结物形式存在；砂岩熔融物中只发现少量石英和斜长石的衍射峰，且衍射强度远低于原始试样，衍射宽度有所增加。其原因是高温引起基质组份熔化并形成高温熔池，导致矿物晶体结构遭到破坏、晶粒尺寸减小、晶面间距改变，石英、长石和胶结矿物等向非晶体玻璃态转变。

从图 8 (c), (f) 可知，花岗岩原始试样主要由石英、斜长石和黑云母等矿物组成，花岗岩熔融物则仅发现石英和斜长石衍射峰，且衍射强度较原始试样大幅下降，特征峰数量减少、半峰宽增加。说明花岗岩熔融后，其内部矿物晶粒尺寸降低，晶体结构发生破坏并向非晶体转变；比如石英原子无序变化和高温膨胀，以及斜长石高温作用后发生的位移型相变，均可改变其结晶度和晶格间距。

2.5 SEM 微观结构

图 9 为 3 类岩石原始试样、热影响区和熔融物 SEM 微观结构图像。由图 9 石灰岩电镜图像发现，石灰岩原样结构致密，表面分布有微孔和岩石碎屑，少见微裂纹发育。热影响区内的石灰岩微裂隙沿矿物边界和内部发育并相互连通。这是因为激光照射导致石

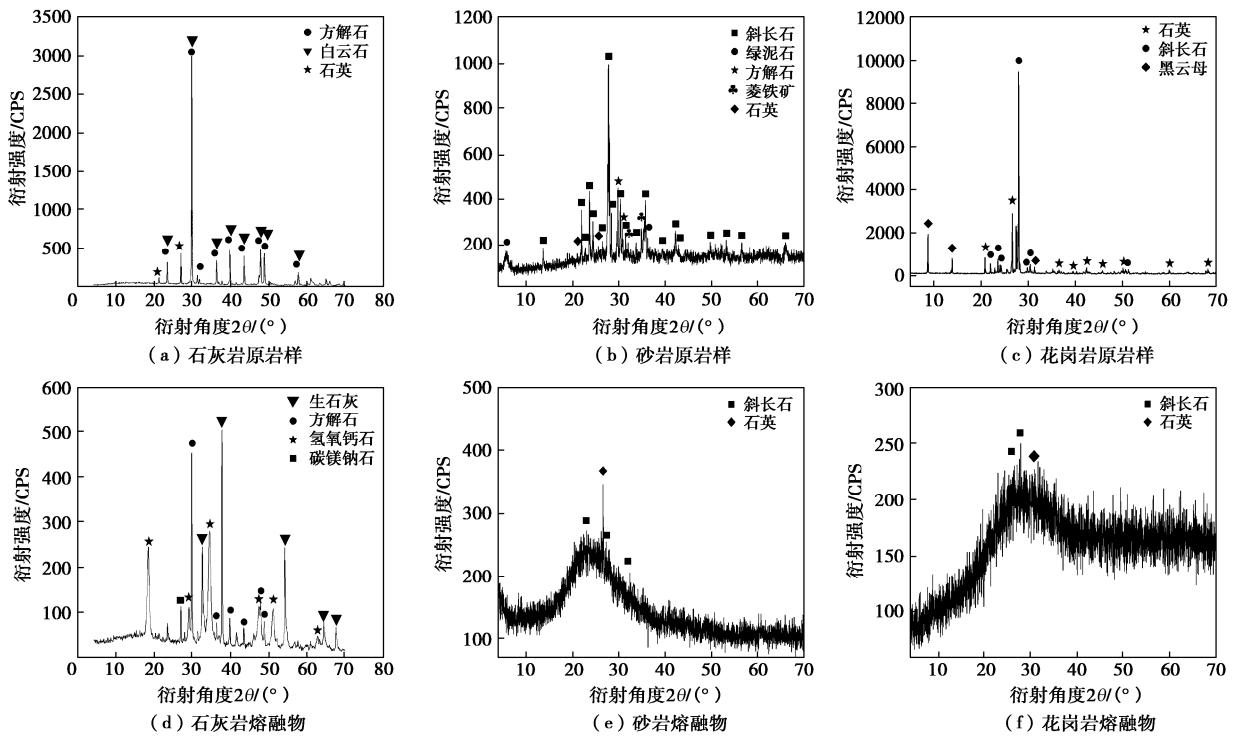


图 8 XRD 结果

Fig. 8 XRD results

灰岩内部产生的热应力远远超过矿物颗粒的抗拉强度, 造成沿晶裂纹和穿晶裂纹发育。石灰岩熔融后结构相对致密, 主要由熔融后碳酸钙和氧化钙等冷却凝固形成^[2], 其表面发现波浪形热裂纹和少量岩屑。

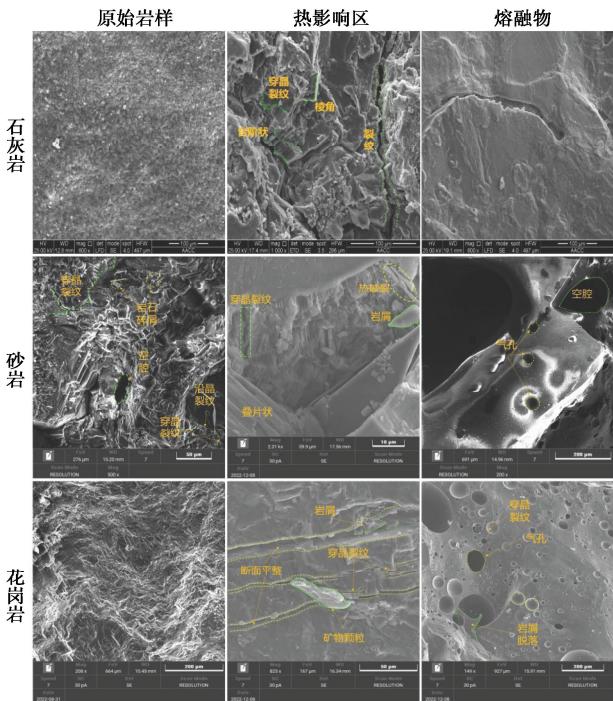


图 9 SEM 微观图像

Fig. 9 SEM microscope images

由图 9 砂岩电镜图像可知, 砂岩原始岩样结构较疏松、颗粒胶结较弱, 岩样内空腔和微孔隙等缺陷较

发育。砂岩热影响区发现热应力导致的微裂纹, 另有部分岩屑, 但少见微孔。这是因为激光高温作用导致在颗粒接触位置产生较高的应力集中, 造成部分颗粒破碎成更小的颗粒。此外, 晶体颗粒高温膨胀充填部分原始孔隙, 导致微空隙减少。砂岩熔融后形成玻璃体, 其表面光滑, 存在明显的空腔和气孔。这是因为原始砂岩试样中存在大量微孔隙和空腔, 在这些缺陷中存在少量气体。随着矿物组份逐渐熔化, 气体逸出后形成气泡不断生长、破裂, 当气泡逃逸速度低于熔融物的凝固速度时, 气泡在熔融物凝结形成的玻璃体中生成气孔或空腔。

由图 9 花岗岩电镜图像发现, 花岗岩原始岩样结构平整、矿物胶结致密, 未发现微裂隙; 热影响区内花岗岩发现层状撕裂断面, 断面上有少量岩屑堆积, 断面边界光滑平整, 属于典型的脆性断裂。这是因为花岗岩属于脆性岩石, 当激光照射产生的热应力超过试样抗拉强度时, 在岩石内部就会产生不同程度的热损伤、形成微裂隙。花岗岩熔融后形成玻璃体, 结构平整, 表面发现大量呈蜂窝状分布的气孔、圆形釉泡, 气孔内壁光滑且孔内充填少量碎屑, 另有少量微裂隙, 局部出现岩屑颗粒脱落。

3 结 论

(1) 激光照射石灰岩、砂岩、花岗岩最高温度均超过 2000°C, 3 类岩石表面温度分布相似, 沿径向迅

速降低; 相同位置处石灰岩表面温度和温度梯度最低、砂岩次之、花岗岩最高。

(2) 激光功率越大, 3类岩石射孔直径、射孔深度和射孔速率越大; 照射时间越长, 3类岩石射孔直径、射孔深度越大, 射孔速率越小; 离焦距离越小, 3类岩石射孔直径越小, 射孔深度和射孔速率越大。相同照射参数下, 射孔直径、射孔深度和射孔速率从大到小顺序为: 砂岩>石灰岩>花岗岩。

(3) 激光功率越大、照射时间越短、离焦距离越小, 3类岩石比能和热裂效能越小。相同照射参数下, 3类岩石比能大小顺序为: 花岗岩>石灰岩>砂岩, 热裂效能则是花岗岩>石灰岩。热裂效能较比能低1~2个数量级, 说明激光辅助致裂岩石所需要的能耗显著低于激光钻孔。

(4) 激光照射后3类岩石表面分布数量不等的主要裂隙, 沿射孔壁面径向延伸到试样外边缘, 石灰岩和花岗岩在岩样中底部形成环形断裂面; 此外, 石灰岩和花岗岩内部次生裂隙较发育, 砂岩内部未发现明显次生裂隙。熔融物衍射强度远低于原始试样, 说明照射后3类岩石矿物组份发生变化, 晶体结构遭到破坏, 并向非晶态转变。热影响区微裂隙发育, 熔融区表面光滑, 微观结构发生显著改变。

参考文献:

- [1] 刘晓丽, 孙欢, 董勤喜, 等. 深埋引水隧洞极硬岩 TBM掘进及辅助破岩技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8): 1292-1301. (LIU Xiaoli, SUN Huan, DONG Qinxi, et al. Extremely hard rock mass excavation using rock breakdown methods to assist TBM in a deep, long diversion tunnel in the Qinling Mountains[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(8): 1292-1301. (in Chinese))
- [2] WANG Y J, SHI Y L, JIANG J Y, et al. Experimental study on modified specific energy, temperature field and mechanical properties of Xuzhou limestone irradiated by fiber laser[J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 56(1): 161-173.
- [3] 卢高明, 李元辉, FERRI Hassani, 等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1497-1506. (LU Gaoming, LI Yuanhui, FERRI HASSANI, et al. Review of theoretical and experimental studies on mechanical rock fragmentation using microwave-assisted approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1497-1506. (in Chinese))
- [4] LI X, WANG S, XIA K, et al. Dynamic tensile response of a microwave damaged granitic rock[J]. Experimental Mechanics, 2021, 61(3): 461-468.
- [5] WANG Y J, JIANG J Y, DARKWA J, et al. Experimental study of thermal fracturing of Hot Dry Rock irradiated by moving laser beam: temperature, efficiency and porosity[J]. Renewable Energy, 2020, 160: 803-816.
- [6] 周新超, 马小晶, 廖翔云, 等. 磨料水射流冲击孔隙岩体的 SPH 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 731-739. (ZHOU Xinchao, MA Xiaojing, LIAO Xiangyun, et al. Numerical simulation of abrasive water jet impacting porous rock based on SPH method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 731-739. (in Chinese))
- [7] 官兵, 李士斌, 张立刚, 等. 激光破岩技术的研究现状及进展[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 229-248. (GUAN Bing, LI Shibin, ZHANG Ligang, et al. Research progress on rock removal by laser technology[J]. Chinese Optics, 2020, 13(2): 229-248. (in Chinese))
- [8] KUANG L F, SUN L P, YU D X, et al. Experimental investigation on compressive strength, ultrasonic characteristic and cracks distribution of granite rock irradiated by a moving laser beam[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10681.
- [9] RUI F X, ZHAO G F. Experimental and numerical investigation of laser-induced rock damage and the implications for laser-assisted rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139: 104653.
- [10] YANG X F, ZHOU J H, ZHOU X, et al. Investigation on the rock temperature in fiber laser perforating[J]. Optik, 2020, 219: 165104.
- [11] CHEN K, HUANG Z Q, DENG R, et al. Research on the temperature and stress fields of elliptical laser irradiated sandstone, and drilling with the elliptical laser-assisted mechanical bit[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 211: 110147.
- [12] HU M X, BAI Y, CHEN H W, et al. Engineering characteristics of laser perforation with a high power fiber laser in oil and gas wells[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 92: 103-108.
- [13] LI M Y, HAN B, ZHANG Q, et al. Investigation on rock breaking for sandstone with high power density laser beam[J]. Optik, 2019, 180: 635-647.
- [14] LI M Y, HAN B, ZHANG S Y, et al. Investigation into laser perforation of rock for petroleum exploitation[J]. Lasers in

- Engineering, 2018, **41**(1-3): 73-99.
- [15] GUO C G, SUN Y, YUE H T, et al. Experimental research on laser thermal rock breaking and optimization of the process parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, **160**: 105251.
- [16] LYU Z H, SONG X Z, LI G S, et al. Investigations on thermal spallation drilling performance using the specific energy method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, **54**: 216-223.
- [17] 王义江, 郁东旭, 王泽桂, 等. 激光照射花岗岩热裂规律及力学性质试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, **52**(4): 701-712. (WANG Yijiang, YU Dongxu, WANG Zegui, et al. Experimental research on thermal cracking and mechanical properties of granite irradiated by laser beam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, **52**(4): 701-712. (in Chinese))
- [18] 徐小丽, 高 峰, 沈晓明, 等. 高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究 [J]. 岩土力学, 2010, **31**(6): 1752-1758. (XU Xiaoli, GAO Feng, SHEN Xiaoming, et al. Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1752-1758. (in Chinese))
- [19] 孙 强, 张志镇, 薛 雷, 等. 岩石高温相变与物理力学性质变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(5): 935-942. (SUN Qiang, ZHANG Zhizhen, XUE Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(5): 935-942. (in Chinese))
- [20] LI M Y, HAN B, ZHANG S Y, et al. Numerical simulation and experimental investigation on fracture mechanism of granite by laser irradiation[J]. Optics & Laser Technology, 2018, **106**: 52-60.
- [21] YANG S Q, RANJITH P G, JING H W, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, **65**: 180-197.
- [22] 郭辰光, 孙 瑜, 岳海涛, 等. 激光辐照热裂破岩规律及力学性能[J]. 煤炭学报, 2022, **47**(4): 1734-1742. (GUO Chenguang, SUN Yu, YUE Haitao, et al. Law and mechanics of thermal cracking of rock by laser irradiation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, **47**(4): 1734-1742. (in Chinese))
- [23] SOUSA L, MENNINGEN J, LÓPEZ-DONCEL R, et al. Petrophysical properties of limestones: influence on behaviour under different environmental conditions and applications[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, **80**(24): 814.
- [24] 陈国庆, 李 阳, 陈亚烽, 等. 不同岩性的裂隙岩石破裂热-声敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(10): 1945-1957. (CHEN Guoqing, LI Yang, CHEN Yafeng, et al. Thermal-acoustic sensitivity analysis of fractured rock with different lithologies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(10): 1945-1957. (in Chinese))