

## 激光与光电子学进展

## 激光扫描作用花岗岩表面玻璃化特性研究

姜昌浪<sup>1,2</sup>, 康民强<sup>2\*</sup>, 刘记立<sup>1\*\*</sup>, 吴行才<sup>3</sup>, 朱启华<sup>2</sup>, 韩大匡<sup>4</sup><sup>1</sup>武汉理工大学理学院, 湖北 武汉 430070;<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;<sup>3</sup>思达威(北京)能源科技有限公司, 北京 100097;<sup>4</sup>中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要** 随着人类能源需求的增长, 油气钻井活动日益频繁。激光钻井在能源领域具有极大的应用价值, 有望实现井下原位玻璃套管的制造, 以替代传统金属套管, 为油气钻井工程节省大量时间和资金。激光辐照岩石玻璃化的稳定形成是实现玻璃套管的关键因素。基于激光扫描花岗岩实验并结合物相检测和数值模拟方法, 对激光烧蚀花岗岩玻璃化的影响因素和机理进行了研究。结果表明, 受激光扫描后, 花岗岩各组成矿物按熔化的难易程度分别发生熔化和碎裂现象, 部分表面转化为深色玻璃; 高速气流可有效清除岩石碎屑和粉尘, 且能够提高激光作用效率和增加岩石玻璃的附着力; 花岗岩易受温度作用而发生破裂, 其较低的扫描速度和气流辅助条件有利于玻璃化的形成。在实际工程应用中, 采用控制扫描速度和辅助高速气流的方法控制岩石的温度作用, 形成稳定岩石玻璃和制造稳固覆盖于硬岩表面的原位玻璃化井壁。本研究探究了激光扫描作用岩石的玻璃化机理, 为拓展激光钻井的工程应用提供了重要参考。

**关键词** 油气钻井; 激光钻井; 玻璃化; 花岗岩; 套管; 温度应力

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230781

## Study on Vitrification of Granite Surface by Laser Scanning

Jiang Changlang<sup>1,2</sup>, Kang Minqiang<sup>2\*</sup>, Liu Jili<sup>1\*\*</sup>, Wu Xingcai<sup>3</sup>, Zhu Qihua<sup>2</sup>, Han Dakuang<sup>4</sup><sup>1</sup>School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;<sup>2</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;<sup>3</sup>Startwell (Beijing) Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100097, China;<sup>4</sup>Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

**Abstract** With rising energy demand, oil and gas drilling activities are increasing. Laser drilling has great application value in the energy field and is expected to realize the manufacture of downhole *in-situ* glass casing to replace traditional metal casing, resulting in time and money savings for oil and gas drilling projects. The stable formation of laser irradiation rock vitrification is a key factor in achieving glass casing. In this study, the influencing factors and mechanisms of laser ablation granite vitrification are investigated based on laser scanning granite experiments, combined with phase detection and numerical simulation. The results show that after laser scanning, the constituent minerals of granite melt and fragment according to the ease of melting, and part of the surface is transformed into dark glass. The high-speed airflow can effectively remove rock debris and dust, improve the laser efficiency, and increase the adhesion of rock glass. Granite is susceptible to temperature fracture, and its low scanning speed and airflow auxiliary conditions favor the formation of vitrification. In practical engineering applications, the temperature action of the rock can be controlled via the scanning speed and auxiliary high-speed airflow to form stable rock glass, and create an *in-situ* vitrification well wall that firmly covers the hard rock surface. This study focuses on the vitrification mechanism of laser-acting rocks, and provides an important reference for expanding the engineering application of laser drilling.

**Key words** oil and gas drilling; laser drilling; vitrification; granite; casing; temperature stress

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-04-06; 录用日期: 2023-04-20; 网络首发日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(62075201, 12004352)

通信作者: \*kangmq@163.com; \*\*lj0507@163.com

# 1 引言

日益增加的能源需求为油气资源勘探研究提供助力<sup>[1]</sup>,然而常规钻井过程需要耗费大量的时间,据估计,开采过程将近一半的时间用于套管及其固定等操作<sup>[2]</sup>。在激光加工技术持续发展<sup>[3]</sup>以及我国在激光应用领域稳定投入<sup>[4]</sup>的背景下,激光技术将参与并应用于更多社会活动中。激光钻井因其破岩效率高、钻井速度快、运行成本低等优势<sup>[5-6]</sup>,被认为是替代传统机械旋转钻井的潜在方法。在激光钻井过程中,发生玻璃化的井壁岩石在理论上能够固定钻井井壁和代替钻井套管,同时具有良好的抗腐蚀性能。<sup>[7-8]</sup>。尽管研究人员进行了许多激光钻井方面的研究,然而涉及岩石玻璃化机理的研究仍较少。激光与岩石作用过程中,温度变化和岩石性质等因素是决定岩石玻璃化形成状态的关键。Yang等<sup>[9]</sup>在激光辐照花岗岩、砂岩实验中发现,岩石温度上升过程分为陡升、缓升和平衡3个阶段,并且岩石中石英含量越高,岩石熔化温度越高,岩石熔化所需的激光辐照时间越长。Yan等<sup>[10]</sup>的实验分析表明,金属原子在激光照射下更容易发生电离,这将导致固化后的玻璃态岩石中包含大量的非金属元素。激光辐照花岗岩表面的研究表明<sup>[11]</sup>,激光照射下的岩石温度上升和熔融岩石的产生主要集中在熔化区,熔化区经过快速冷却容易形成玻璃。激光持续作用时,熔化区的温度向周围岩石扩散,导致岩石强度降低和岩石散裂<sup>[12-13]</sup>。Li等<sup>[14]</sup>发现熔融岩石冷却形成的玻璃表面分布大量微孔和气泡。由此可知,由于温度作用导致的岩石强度降低和岩石散裂使岩石玻璃难以附着于岩石表面,以及容易形成含大量气泡的非致密体玻璃。这些问题使形

成的岩石玻璃难以满足应用要求,亟待进一步的研究。目前针对激光与岩石作用的研究重点集中于激光去除岩石的效率,并基于此对不同岩石受激光作用后的孔隙率、饱和度以及力学性能进行深入研究<sup>[15]</sup>。然而,很少有研究关注熔融岩石的物理化学变化<sup>[16]</sup>。

激光制造井下原位玻璃套管主要过程分为:使用激光或机械钻井凿出岩石井壁;后续激光以螺旋形扫描方式使井壁岩石熔化;采用高速气流等方式控制熔岩形态形成玻璃井壁;持续作业形成厚度可控的玻璃套管。其中,岩石玻璃化机理是实现井下原位玻璃套管制造的重要因素。基于辅助气流和激光扫描花岗岩的方式,研究不同激光移动速度下岩石表面形成的玻璃形貌,并利用物相检测和数值模拟的方法研究岩石内部的温度、应力分布和玻璃形成过程,最后对激光作用下岩石玻璃化机理进行讨论。本研究将为推进实现在激光作用下形成稳定岩石玻璃和制造稳固覆盖于花岗岩表面的玻璃化井壁提供工程应用参考。

## 2 实验部分

采用自主设计的激光扫描设备进行激光烧蚀花岗岩的实验,设备结构如图1所示。从最大功率为1 kW的连续光纤激光器(Model: MFSC-1000L, MAX)中输出一束中心波长范围为1070~1090 nm的圆形高斯激光。高斯激光相继经过传输光纤、输出头、输出窗口,然后进入激光扫描区,辐照到岩石表面。通过控制三维位移平台实现激光离焦量和移动速度的调整。使用高速气流装置(最大气体压力为1 MPa)清除产生的岩石粉尘、碎屑和熔融岩石。

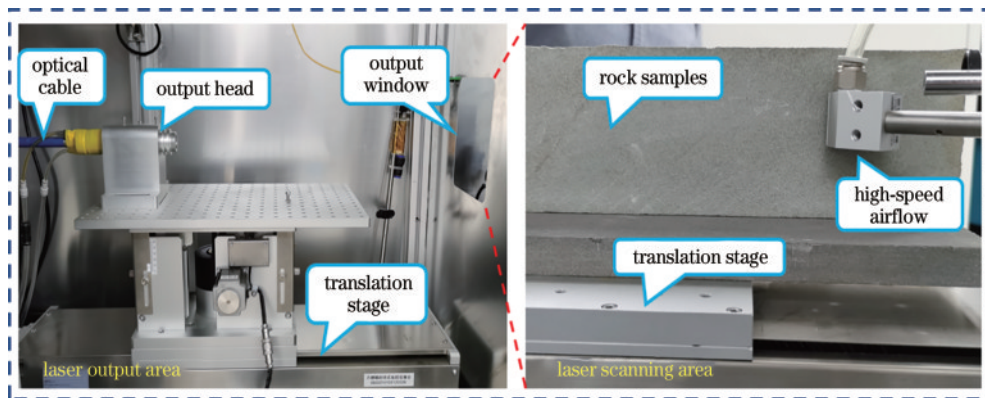


图1 激光扫描岩石设备示意图

Fig. 1 Sketch of laser scanning rock equipment

激光与岩石相互作用过程如图2所示。用于扫描岩石的圆形高斯激光直径为10 mm,实验所用花岗岩样品尺寸为500 mm×100 mm×30 mm。分别进行激光移动速度为2.5、5、7.5、10 mm/s的扫描实验。此外,激光扫描岩石过程中会产生包括空气对流传热、热辐射、热传导等能量变化,以及生成等离子体蒸气、熔融

岩石、玻璃等现象。其中实验中所形成的等离子体蒸气遮蔽了激光的传播路径,岩石受热破碎形成的碎屑阻碍了岩体的持续加热。基于上述现象,实验设置有高速气流(最大气体压力为1 MPa)辅助的对照组。分析两组实验中花岗岩表面形貌变化,采用X射线衍射仪分析花岗岩受激光扫描前后的物相结构。



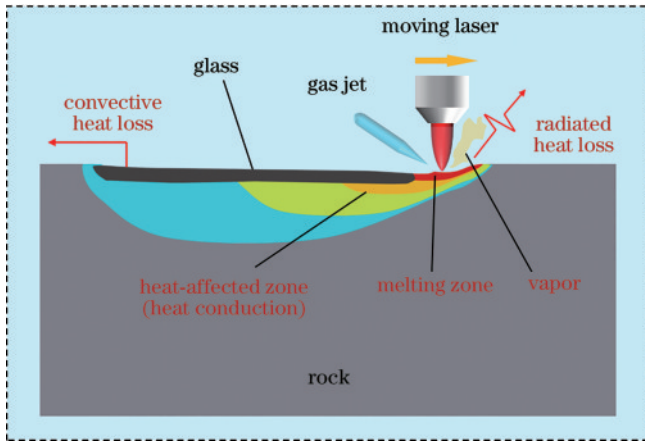


图2 激光与岩石相互作用过程  
Fig. 2 Laser rock interaction process

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 激光扫描实验

在无气流辅助下,激光扫描花岗岩的表面形貌如图3所示。激光与花岗岩之间相互作用,花岗岩快速熔化和气化,当激光扫描速度为2.5 mm/s时,熔融花

岗岩在冷却后形成厚度约为4.3 mm的黑色和棕色透明玻璃;当速度大于2.5 mm/s时,形成的玻璃减少且易脱落于岩体。气化花岗岩在接触花岗岩后冷却,化为一层白色粉尘附着于花岗岩表面。在激光与花岗岩直接作用的相邻区域,热扩散作用使花岗岩发生破裂,并在热应力作用下形成片状碎屑。

在高速气流辅助下,激光扫描花岗岩形成的表面形貌如图4所示。不同于激光直接扫描,高速气流的作用使岩石表面产生的碎屑和气化岩石等物体被快速清除,因而被激光扫描的花岗岩表面无岩石碎屑和白色粉尘附着。随激光扫描速度增加,当扫描速度为2.5 mm/s时,形成玻璃厚度约为1.4 mm;当扫描速度为5 mm/s时,形成玻璃厚度约为1.1 mm;当扫描速度大于5 mm/s时,形成的玻璃少且分布不均而难以测量。在激光与花岗岩直接作用的相邻区域,热扩散作用使花岗岩发生破裂,受热应力形成的片状岩石碎屑被气流清除,裸露的岩石表面产生阶梯状裂纹。随着激光扫描速度的增加,激光扫描区域产生的岩石玻璃逐渐减少,受热应力形成阶梯状裂纹分布则变化不大。

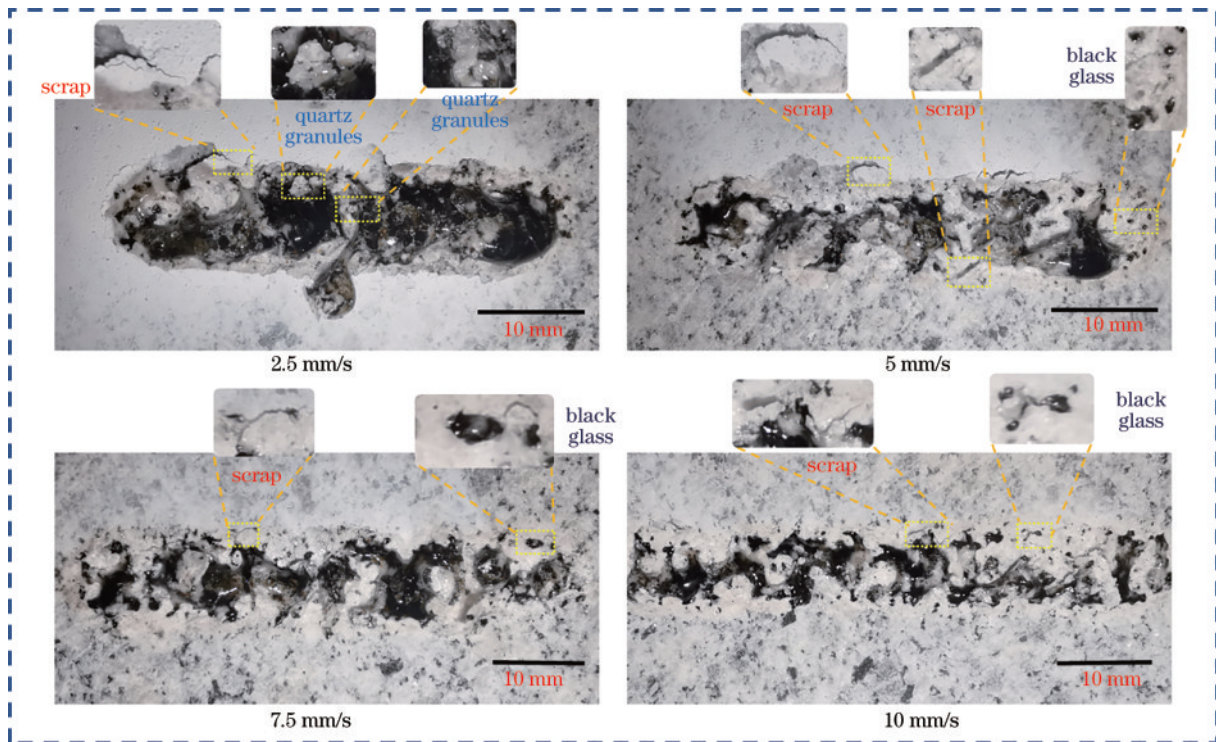


图3 激光扫描花岗岩表面形貌(无气流辅助)

Fig. 3 Surface morphology of laser scanning granite (without airflow assistance)

经过多组测量得到的激光烧蚀花岗岩深度(无玻璃覆盖区域)如图5所示。随着激光扫描速度的增加,激光烧蚀花岗岩深度非线性减少,且气流辅助下的激光烧蚀深度均大于无气流辅助下的烧蚀深度,其原因为激光辐照路径受碎屑和粉尘阻碍。花岗岩样品由乳白色、透明、黑色的颗粒胶结而成,如图3、图4所示。

其在激光直接扫描和气流辅助扫描下均形成岩石玻璃,且形成的玻璃随着激光扫描速度的增加呈现不连续、稀疏分布的状态。一方面,激光直接扫描形成的玻璃体在花岗岩表面的附着力较低,易受外界因素影响而脱落,而气流辅助下激光扫描形成的玻璃体对花岗岩的附着力较强;另一方面,激光直接扫描形成的玻璃



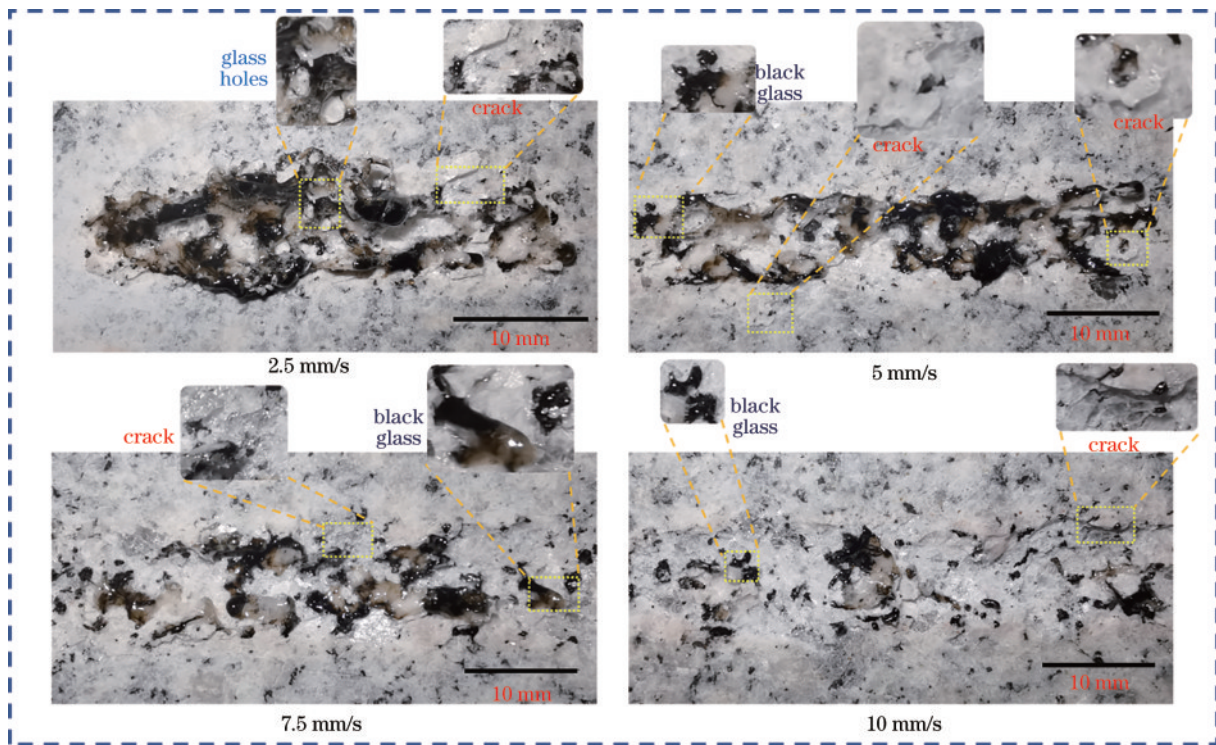


图 4 激光扫描花岗岩表面形貌(1 MPa 气压气流辅助)

Fig. 4 Surface morphology of laser scanning granite (airflow assisted by 1 MPa pressure)

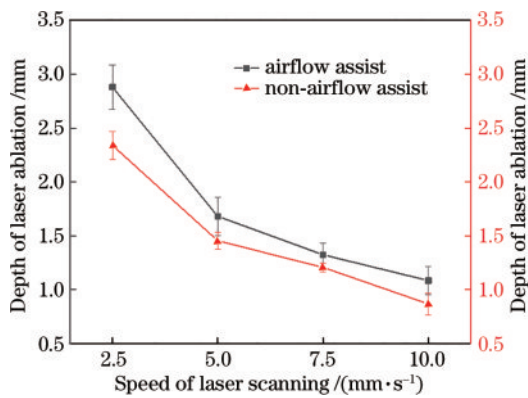


图 5 激光在高速气流和无气流辅助下以不同速度扫描岩石的烧蚀深度

Fig. 5 The ablative depth of rock scanning by laser at different speeds with the assistance of high speed airflow and no airflow

体面积较大且分布相对连续集中,而气流辅助下形成的玻璃体面积较小且相对稀疏。随着激光扫描速度的增加,两组实验形成的岩石玻璃均表现为减少的趋势。

### 3.2 物相检测

花岗岩物相检测分析表明如图 6(a)所示,实验所用花岗岩样品主要由石英、长石、羟铁云母、霞石构成,具体成分如表 1 所示。激光扫描后,形成玻璃体的物相检测结果如图 6(b)所示,熔融花岗岩冷却后形成的黑色和棕色固体主要为非晶态的玻璃,其中含有少量结晶晶体为石英和长石。经过分析认为,熔融岩石在空

气环境中迅速过冷,导致结晶困难,玻璃中检测得到的少量石英和长石疑为玻璃样品污染所致。

### 3.3 实验结果分析

在激光扫描区域,花岗岩受激光辐照发生热破碎、熔化和气化现象。激光扫描后花岗岩表面形成黑色和棕色的玻璃体,并且其间夹杂白色矿物颗粒(图 3,扫描速度为 2.5 mm/s)。形成深色玻璃的原因为当激光辐照时,熔点较低的羟铁云母以熔化为,羟铁云母中蕴含铁元素导致形成的玻璃主要为黑色和棕色。在气流辅助下,岩石表面的玻璃无白色矿物颗粒(图 4,扫描速度为 2.5 mm/s),由此可推测占比多且熔点高的石英以热破碎为主,玻璃间夹杂的白色矿物颗粒为热破碎后的石英颗粒。此外,对比图 3、图 4 可得,在无高速气流辅助下,气化的岩石会阻碍光束传播,降低激光扫描效果,并在花岗岩表面形成一层白色粉尘;在高速气流辅助下,气化岩石及碎屑被快速清除,达到较好的激光扫描效果。

在激光扫描的相邻区域(热扩散区),花岗岩受热应力作用而产生片状碎屑,这有助于岩石的去除,但不利于玻璃的附着。在气流辅助条件下,岩石碎屑被清除而露出阶梯状的裂纹,松散表面被清除使玻璃能够更紧密地黏附于岩体,而基体形成大量的裂纹(图 4)降低了花岗岩的强度,使附着于表面的玻璃易脱落。随着激光扫描速度的增加,两组实验形成的岩石玻璃减少,热破碎现象增多。在较高扫描速度下,花岗岩接受的能量密度减小,不利于岩石的熔化和玻璃的形成。

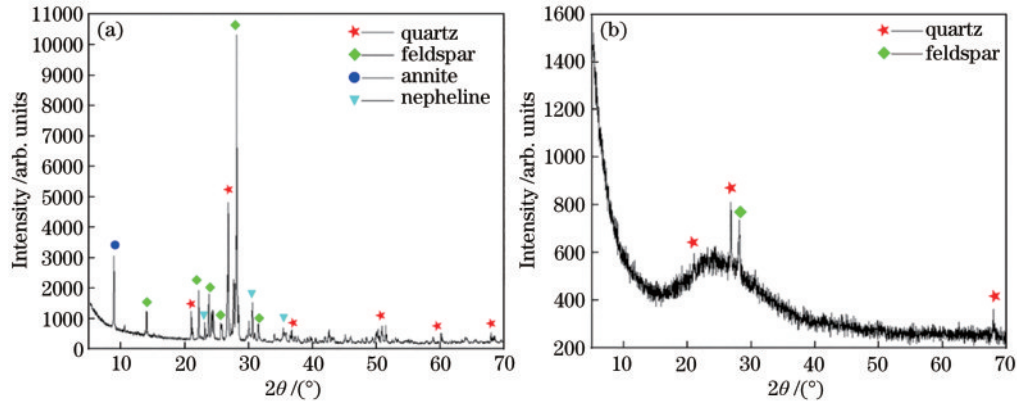


图 6 X射线衍射(XRD)轮廓图。(a)花岗岩;(b)花岗岩玻璃

Fig. 6 XRD contour map. (a) Granite; (b) granite glass

表 1 花岗岩样品的组分比例

Table 1 Components ratio of the granite sample

Mineral	Quartz	Feldspar	Annite	Nepheline	Other
Mass fraction / %	69	18.2	8.1	4	0.7

## 4 模型构建及数值计算

### 4.1 激光及花岗岩模型构建

本实验所使用的光纤激光束在空间上的分布为高斯轮廓,如图 7(a)所示。高斯激光在径向光强度的空间分布  $I(x, y)$  可表示为

$$I(x, y) = \frac{iP}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{i(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right], \quad (1)$$

式中:  $I(x, y)$  为激光光强密度;  $i$  为激光功率集中系数;  $P$  为激光功率;  $\omega$  为激光光斑半径。

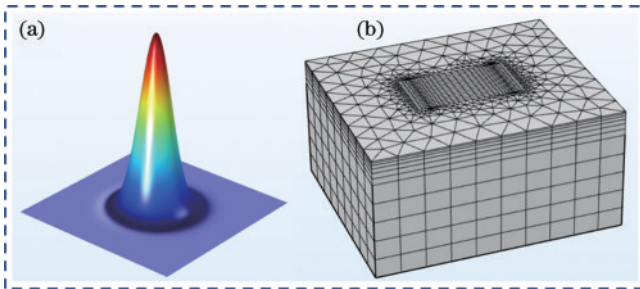


图 7 数值模型。(a)圆形高斯光束;(b)花岗岩模型网格划分

Fig. 7 Numerical model. (a) Circular Gaussian beam;

(b) granite model meshing

花岗岩模型网格划分如图 7(b)所示,花岗岩热物理和力学参数如表 2 所示,模型的网格点作为点加热源,在每个裸露的单元面上,用功率密度乘以裸露的区域面积,然后均匀扩散到其相关联的网格点。产生热传导的方程<sup>[21]</sup>可表示为

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q_v = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为岩石样品的密度;  $C_v$  为恒定体积的岩石样品

表 2 花岗岩热物理和力学参数<sup>[17-20]</sup>Table 2 Heat physics parameters and mechanical parameters of granite<sup>[17-20]</sup>

Parameter	Value
Density / (kg/m <sup>3</sup> )	2.6
Melting temperature / °C	1465
Line expand coefficient / (1/°C)	$A(T) = 7.715 \exp(-7) \exp[(T + 273.15)/209.71] + 6.41 \exp(-6)$
Heat conductivity / [W/(m·°C)]	$K(T) = 4.35081 - 0.05639T + 5.22201 \exp(-4)T^2 - 1.61523 \exp(-6)T^3$
Specific heat capacity / [J/(kg·°C)]	$C(T) = 850 + 0.14(T - 20)$
Poisson's ratio	0.25
Young's modulus / Pa	$60 \times 10^9$
Latent heat of fusion / (J/kg)	$2 \times 10^6$
Compressive strength / MPa	199.95
Tensile strength / MPa	11.06

的比热;  $t$  为时间;  $T$  为温度;  $Q_v$  为体积热通量;  $k$  为岩石样品的导热率。

热应力由温度变化导致的热膨胀引起,热应力方程<sup>[18]</sup>可表示为

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = 2G \left( \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} - \alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij} \right) + \left( K - \frac{2}{3}G \right) \left( \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t} - 3\alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \right) \sigma_{ij}, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{ij}$  为总应力;  $G$  为岩石样品的剪切模量;  $\epsilon_{ij}$  为总应变,  $\alpha_t$  为线性热膨胀系数;  $\delta_{ij}$  为克罗内克系数;  $K$  为岩石的体积模量;  $\epsilon_{kk}$  为与总应变  $\epsilon_{ij}$  垂直方向的应变。

在激光直接扫描实验中,由于岩石破碎、岩石气化等复杂现象难以模拟,高速气流辅助激光扫描花岗岩过程相对简单,因而仅对气流辅助激光扫描实验进行



数值模拟。为模拟实际实验场景,同时简化模型,提高计算效率,设定为花岗岩受激光辐照熔化后被气流清除,使激光辐照后的花岗岩形成与实际实验相似的沟槽。此外,为检测激光扫描时花岗岩内部的温度分布,在花岗岩模型内部设置分布的 8 个温度探针,如图 8 所示。其中,  $v$  为激光扫描速度。当激光经过探针所在模型表面时,探针记录此时岩石内部的温度分布。

### 4.2 温度分析

高速气流辅助激光扫描花岗岩内部温度分布的数值模拟结果如图 9 所示。随着激光扫描速度的增加,激光从起始点 A 扫描至点 B 所需的时间分别为 2、1、0.666、0.5 s。激光平均功率为 1 kW,随着激光扫描速度增加,单位长度的花岗岩吸收能量减少,具体表现为激光通过 B 点后(图 9 虚线),扫描速度为 2.5 mm/s 时,对应有 4 mm 深度岩石进入熔化状态,其他扫描速度

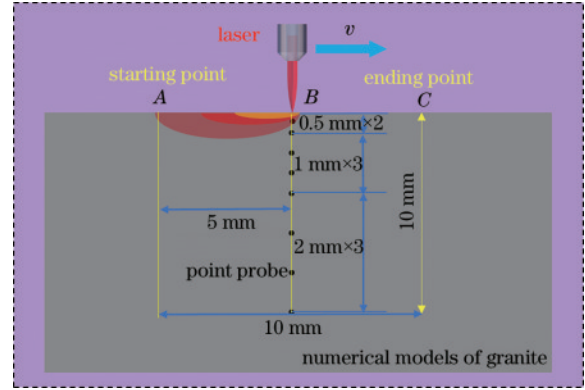


图 8 花岗岩数值模型探针分布

Fig. 8 Probe distribution of granite numerical model

下的熔化状态深度为:5 mm/s 对应 2 mm,7.5 mm/s 和 10 mm/s 对应 1 mm。

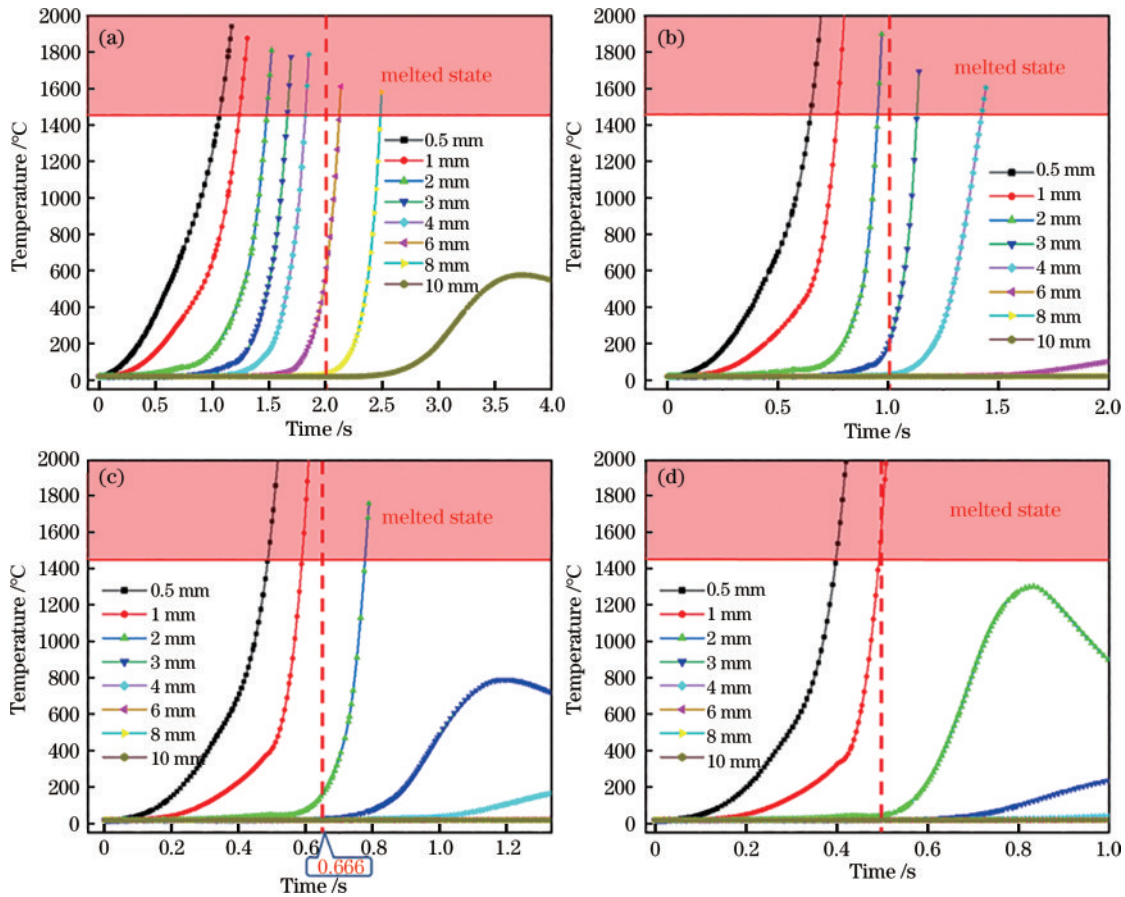


图 9 对应扫描速度下花岗岩内部各点温度。(a)2.5 mm/s;(b)5 mm/s;(c)7.5 mm/s;(d)10 mm/s

Fig. 9 Temperature of each point in the granite under the corresponding scanning speed. (a) 2.5 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 7.5 mm/s; (d) 10 mm/s

不同速度激光扫描 10 mm 长度岩石时,岩石表面 20~1400 °C 等温线分布如图 10 所示。随着激光扫描速度的增加,激光扫描相同距离的时间相应缩短,岩石吸收激光辐照的能量减少。激光辐照时间长短和能量吸收多寡的差异呈现出不同的温度分布,这对岩石产生不同的影响。激光辐照中心区域(图 10 中圆形域)温度保持在 1400 °C 以上,主要引发岩石熔化和气化;

激光辐照的边缘区域温度等值面分布紧密,形成巨大的温度应力,导致岩石破碎并产生片状岩石碎屑;在辐照区域之外的热扩散区的温度等值面分布随扫描速度增加而收缩,其受辐照时间和能量的影响较为明显。

### 4.3 应力分析

扫描速度对应各点应力状态如图 11 所示,随着激光扫描速度的增加,与岩石表面距离小于 6 mm 的探针

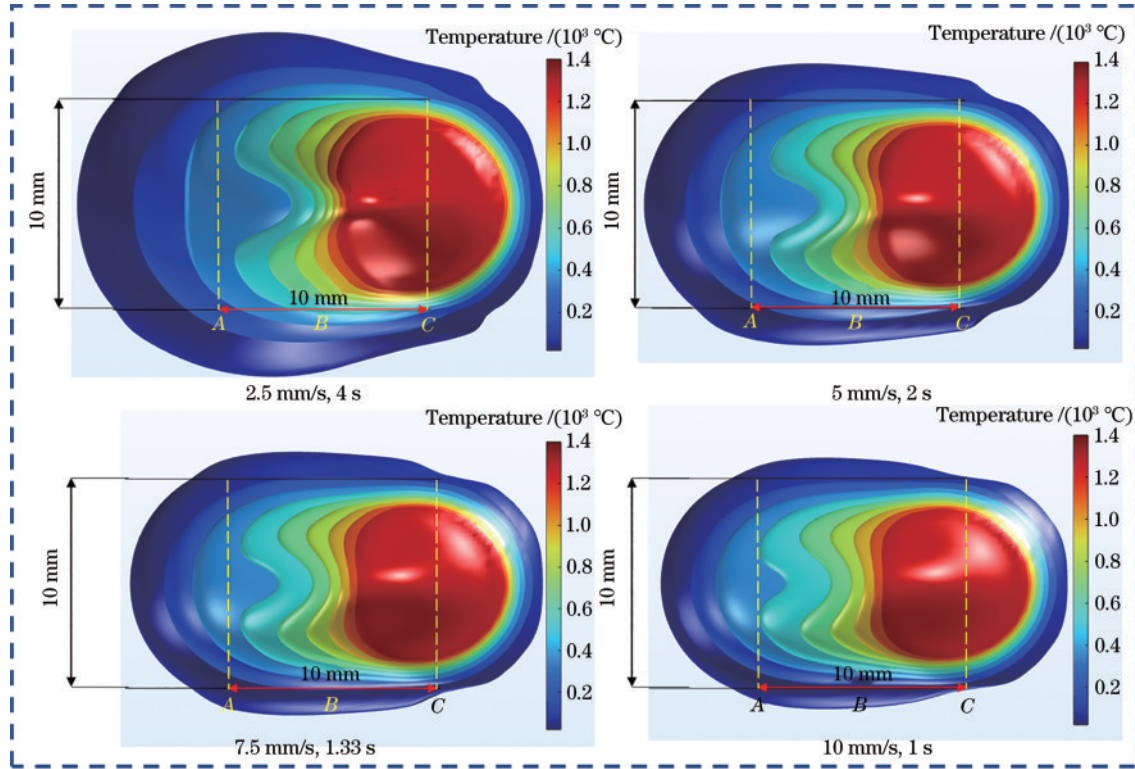


图 10 激光以不同速度扫描 10 mm 长度岩石时表面等温线分布

Fig. 10 Surface isotherm distribution of 10 mm length rock scanned by laser at different speeds

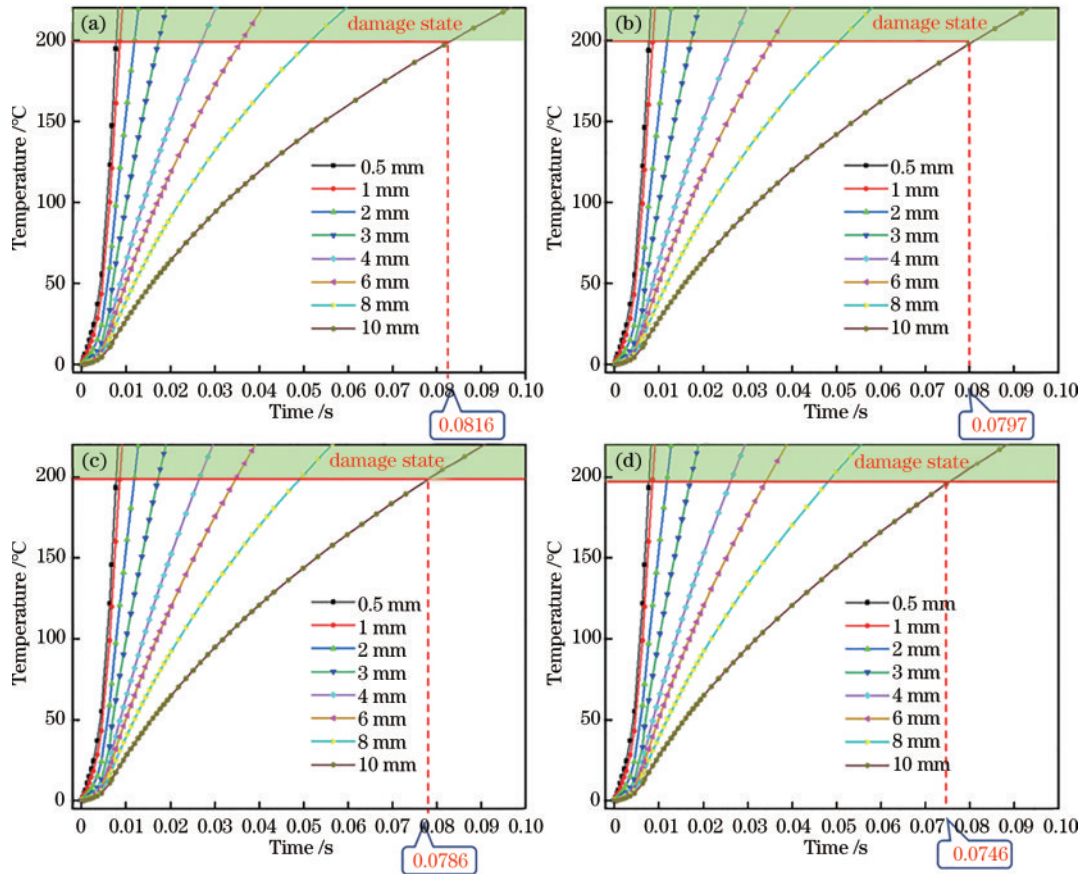


图 11 对应扫描速度下花岗岩内部各点应力。(a) 2.5 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 7.5 mm/s; (d) 10 mm/s

Fig. 11 Temperature stress of each point in the granite under the corresponding scanning speed. (a) 2.5 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 7.5 mm/s; (d) 10 mm/s



均在极短时间内达到最大破坏应力;与岩石表面距离大于 6 mm 的探针到达最大破坏应力的时间缩短。其中,随激光扫描速度增加,距岩石表面 10 mm 处的探针达到破坏应力所需时间分别为 0.0816、0.0797、0.0786、0.0746 s,时间逐渐缩短。

上述模拟结果表明,花岗岩在低扫描速度下可产生更多熔体(图 9),且岩石深处应力达到破坏的时间增加(图 11)。由实验结果对比可知,在气流辅助下的低扫描速度有利于花岗岩吸收激光辐照的能量,发生熔化现象并在冷却后形成玻璃(图 5),可见模拟和实验具有相同的结论。尽管扫描速度降低能在一定程度上延迟应力破坏、减少损伤范围,然而花岗岩极易受温度影响发生应力破坏的特点使得激光作用过程的可控性较弱,该现象仍待进一步的研究和新方法的出现。

## 5 总 结

随着激光与岩石作用研究的持续进行,有望实现激光钻井和激光制造玻璃套管设想,使激光在工程钻井中发挥巨大的作用。本研究认为,若在工程中成功实现激光钻井和岩石玻璃套管制造的同时进行,其可为油气钻井工程节省大量时间和资金。进行激光扫描花岗岩实验和数值模拟有助于探究岩石玻璃化的形成机理,为激光作用下形成稳定岩石玻璃和制造原位玻璃化井壁的工程技术应用发展提供重要参考。

在激光扫描作用下,花岗岩各组成矿物按熔化难易程度产生对应比例熔体,羟铁云母由于熔点较低,以熔化为主,并在冷却后形成深色透明玻璃;石英较难熔化,主要以应力破坏形式化为岩石颗粒和碎屑。在激光低速扫描时岩石易形成较大面积的玻璃,随着激光扫描速度的增加,岩石表面形成的玻璃占比减少。

高速辅助气流的参与有助于清除岩石碎屑和粉尘,提高激光辐照吸收效率;同时辅助气流能在一定程度上控制熔融玻璃的形状并为岩石提供一定的冷却作用,以此来降低热应力对岩体的影响,使玻璃附着于岩体,实现对裸露岩体的覆盖,从而增加岩石玻璃的附着力度。

数值模拟实验也表明,花岗岩受激光扫描在极短时间内发生热应力破坏,形成强度大幅下降并带有阶梯状裂纹的岩体。低扫描速度和气流辅助有利于花岗岩玻璃化,同时气流辅助可提高岩石玻璃在岩石基体上的附着力。

## 参 考 文 献

- [1] 康民强,朱启华. 激光破岩在干热岩地热能开发中的应用探讨[J]. 中外能源, 2022, 27(10): 20-25.  
Kang M Q, Zhu Q H. Discussion on the application of laser rock breaking in geothermal energy development of dry-hot rocks[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(10): 20-25.
- [2] Agha K R, Belhaj H A, Mustafiz S, et al. Numerical investigation of the prospects of high energy laser in drilling oil and gas wells[J]. Petroleum Science and Technology, 2004, 22(9/10): 1173-1186.
- [3] 王宇,夏博,万露露,等. 飞秒激光辅助化学刻蚀透明材料微孔加工研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1900009.  
Wang Y, Xia B, Wan L L, et al. Study on femtosecond laser assisted chemical etching of transparent materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1900009.
- [4] 唐华,沈咏,龙丽媛. 国家自然科学基金视角下我国激光科学技术发展的分析和展望[J]. 中国激光, 2023, 50(2): 0200001.  
Tang H, Shen Y, Long L Y. Analysis and prospects for development of laser science and technology in China from the perspective of national science foundation of China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(2): 0200001.
- [5] Lusquiños F, Pou J, Soto R, et al. The drilling of slate tiles by a Nd: YAG laser[J]. Journal of Laser Applications, 1997, 9(4): 211-214.
- [6] Moavenzadeh F, McGarry F J, Williamso R B. Use of laser and surface active agents for excavation in hard rocks [C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum engineers of AIME, September 29-October 2, 1968, Houston, Texas. Richardson: OnePetro, 1968.
- [7] Olaleye B M. A review of light amplification by stimulated emission of radiation in oil and gas well drilling [J]. Mining Science and Technology (China), 2010, 20(5): 752-757.
- [8] 康民强,面向钻井提速的激光破岩技术及应用研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2022.  
Kang M Q, Research and application of laser rock breaking technology for drilling acceleration[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2022.
- [9] Yang X F, Zhou J H, Zhou X, et al. Investigation on the rock temperature in fiber laser perforating[J]. Optik, 2020, 219: 165104.
- [10] Yan F, Gu Y F, Wang Y J, et al. Study on the interaction mechanism between laser and rock during perforation[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 303-308.
- [11] Li Q, Zhai Y L, Huang Z Q, et al. Research on crack cracking mechanism and damage evaluation method of granite under laser action[J]. Optics Communications, 2022, 506: 127556.
- [12] Choubey A, Jain R K, Vishwakarma S C, et al. Nd: YAG laser assisted drilling and spallation of rocks[J]. Advanced Science, Engineering and Medicine, 2013, 5(9): 905-911.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 官兵,李士斌,张立刚,等. 激光破岩技术影响因素的



- 研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 030003.
- Guan B, Li S B, Zhang L G, et al. Review on influencing factors of laser rock drilling technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030003.
- [16] 姜昌浪, 康民强, 刘记立, 等. 面向钻井提速的激光破岩机理研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1700007.
- Jiang C L, Kang M Q, Liu J L, et al. Research progress of laser rock breaking mechanism for drilling acceleration [J]. Laser & Optoelectronics Process, 2023, 60(17): 1700007.
- [17] Deng R, Liu J P, Kang M Q, et al. Simulation and experimental research of laser scanning breaking granite [J]. Optics Communications, 2022, 502: 127403.
- [18] Han Y H, Fang Y, San-Roman-Alerigi D P, et al. Thermal/mechanical interaction in laser perforation process: numerical-model buildup and parametric study [J]. SPE Journal, 2019, 24(5): 2097-2110.
- [19] Wang F, Konietzky H, Frühwirt T, et al. Laboratory testing and numerical simulation of properties and thermal-induced cracking of Eibenstock granite at elevated temperatures[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(8): 2259-2275.
- [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] 邓嵘, 张文汀, 康民强, 等. 移动线形激光破岩耦合场仿真分析及实验研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 535-542.
- Deng R, Zhang W T, Kang M Q, et al. Simulation analysis and experimental research on coupling field of mobile linear laser rock breaking[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(5): 535-542.