

激光与光电子学进展

面向钻井提速的激光破岩机理研究进展

姜昌浪^{1,2}, 康民强^{1*}, 刘记立², 朱启华¹¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;²武汉理工大学理学院, 湖北 武汉 430070

摘要 激光破岩技术在油气开采、矿业挖掘等方面具有很大潜力,然而现阶段有关激光破岩的多数研究还处于理论与实验探索阶段。高能激光钻井破岩是一项涉及光学、材料、力学等学科的复杂技术,需要对激光与岩石作用过程中的物理化学变化、岩石力学性质、激光参数等问题进行研究,在实际应用之前有许多难题需要解决。本文针对激光与岩石作用机理,对近年来的相关研究成果在多方面进行了归纳总结。现阶段对激光破岩机理的研究仍在不断进行,其中数值仿真、实验研究是研究激光破岩的主要方式。此外,本文还总结了激光破岩的应用研究进展,并分析了未来激光破岩的发展趋势。

关键词 激光技术; 激光破岩; 钻井提速; 破碎机理; 岩石性质; 激光参数

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221028

Research Progress in Laser Rock-Breaking Mechanism for Drilling Acceleration

Jiang Changlang^{1,2}, Kang Minqiang^{1*}, Liu Jili², Zhu Qihua¹¹Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;²School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China

Abstract Laser rock-breaking technology has great potential in oil and gas exploration, mining, and related fields. However, most studies on laser rock breaking are in the theoretical and experimental exploration stages. High-energy laser drilling and rock breaking are complex and involve optics, material science, mechanics, and other disciplines. It is necessary to examine the physical and chemical changes, rock mechanical properties, laser parameters, and other issues during the interaction between the laser and rock. Before practical applications can be achieved, many challenges must be addressed. This paper summarizes the recent research results on the interaction mechanism between lasers and rocks. In the ongoing research on the mechanism of laser rock breaking, numerical simulations and experimental research are the main approaches. This paper also reviews the application research progress in laser rock breaking and analyzes the future development trends of laser rock breaking.

Key words laser technology; laser rock breaking; drilling acceleration; breaking mechanism; rock properties; laser parameters

1 引言

1917年,阿尔伯特·爱因斯坦预言了受激辐射(通过原子或分子能级之间的跃迁产生光子或离散能量束)的可能性^[1]。1960年,梅曼根据爱因斯坦的理论制作了世界上第一台(红宝石)激光器。1968年,美国麻省理工学院和加州大学联合提出使用激光钻井破岩的

设想^[2]。2012年,美国FORO公司实现了激光设备与传统机械钻井工具的结合,并在实验室内进行了一系列的激光-机械联合破岩实验,验证了激光-机械破岩的高效性^[3]。从使用激光进行破岩的设想提出开始,激光钻井破岩(激光直接破岩和激光辅助破岩)技术处于一个不断发展的状态,并一直持续到今天。而在激光破岩的早期发展中,美国的研究一直处于领先地位,

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-05-11; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(62075201,12004352)

通信作者: kangmq@163.com

俄罗斯、加拿大和日本等国家激光破岩理论的研究也相对较早^[4]。国内在激光破岩领域虽然起步较晚,但近年来国内学者对激光破岩钻井展开了大量的研究,取得了较多成果。随着激光技术的完善,以及数值仿真等工具的应用,有关激光与岩石作用温度场变化、应力场变化^[5]、岩石损伤分布、裂纹拓展变化^[6]等机理研究逐渐增多。目前激光破岩技术距离应用主要面临着机理探索、钻井系统设计和应用实验等过程。

自 20 世纪以来,传统机械钻井的方式已广泛使用,并发展为如今世界上最主要的钻井方法之一。然而在面对坚硬岩石和深层地质构造时,传统钻井方法出现了钻井速度慢、钻头寿命短和设备操作复杂等问题^[7-8],进一步产生钻井效率低和钻井成本高等不利因素。虽然在传统钻井方法的基础上进行不断改进,如使用更坚硬的钻头、更耐高温的电子设备和更加简化的设备操作流程,但钻井的成本仍不乐观^[9],硬岩破碎切割技术亟待发展。在这种背景下发展出多种用于岩石快速开挖的新技术,包括激光辐照法、微波处理法^[10-11]、水射流法^[12]、可控液氮/二氧化碳注入法^[13]和电子束破岩^[14]等。其中高能激光破岩技术因其超高的破岩效率^[15]、可靠的操作性^[16],以及激光能量密度高、相干性和准直性好等特点被认为是最有发展前景的破岩方法之一。激光破岩在发展过程中形成了高能激光直接破岩和激光辅助钻井破岩两种方法,其中高能激光直接破岩方法的工作过程为高能激光破碎、熔化和气化岩石并使用气流带走碎屑,其工作过程无传统钻头参与,且与岩石无直接接触,是一种能够给钻井领域带来革命的技术。相比激光直接破岩,激光辅助钻井破岩的工作过程为在激光热力作用改变硬岩性质、降低岩石强度的情况下,使用钻头破碎岩石,其破岩的过程中岩石热损伤起着关键作用,并且其可行性也被许多研究证实^[17]。然而受限于激光功率低和激光射孔距离短等限制^[2],早期激光破岩发展受阻。随着现代高功率^[18-19]、高重复频率^[20]等激光技术的日趋完善^[21],激光破岩技术的研究创造有了更坚实的基础。而激光破岩技术的逐步完善,将为日益增加的隧道挖掘、采矿和钻探等硬岩石挖掘需求提供一个节能、高效、经济的方法^[22]。

2 激光破岩机理

2.1 激光破岩相关概念

比能(SE)和穿孔速率(ROP)通常作为衡量激光对岩石破坏效率的评价标准。SE 越小则激光对岩石的破坏效率越高,ROP 越大则激光对岩石的钻井速率越快。此外,为衡量激光切割岩石情况下的 SE,定义了切口比能(SKE);为计算激光作用下岩石散裂的 SE,定义了修正比能(MSE)。表达式如下所示。

1) SE

激光去除单位岩石所需要的能量即为激光破岩的

SE,此概念于 1980 年由 Maurer 定义^[23-24],是衡量激光破岩效率的重要参数。激光对岩石的破坏 SE,其表达式为

$$E_{SE} = \frac{Q}{dV/dt} = \frac{P \times t}{V}, \quad (1)$$

式中: E_{SE} 为比能; Q 为激光输入能量; dV/dt 为去除岩石体积对应的时间导数; P 为激光平均功率; t 为激光辐照时间; V 为激光去除岩石的体积。

2) SKE

除了 SE, Maurer 还定义了 SKE^[23],用来描述切割或凿削岩石时每个切口面积的能量。切口面积是切口一侧的表面积。

$$E_{SKE} = \frac{P}{D_K \times v_T}, \quad (2)$$

式中: E_{SKE} 为切口比能; D_K 为切口深度; v_T 为切口横向移动速度。

3) ROP

激光穿孔深度与激光辐照时间的比值钻速即为激光破岩的 ROP^[24-25]。也可以定义为激光功率密度与 SE 的比值,表达式为

$$S_{ROP} = \frac{P_{SP}}{E_{SE}} = \frac{P/A_L}{E_{SE}} = \frac{L}{t}, \quad (3)$$

式中: S_{ROP} 为激光破岩的穿孔速率; P_{SP} 为激光单位横截面积的功率; A_L 为岩石在激光作用后产生的孔道的横截面面积; L 为激光破岩深度。

4) MSE

SE 的大小取决于从激光作用岩石过程中掉落的岩石体积,然而,开裂岩石的体积同样不应忽视,尤其是在隧道和地下工程中。因此, MSE 定义为单位体积岩石破裂所需的能量^[5,26]。定义公式为

$$E_{MSE} = \frac{P \times t}{V_c}, \quad (4)$$

式中: E_{MSE} 是热破裂的修正比能; V_c 是激光辐照试样中破裂岩石的体积。

2.2 激光与岩石作用表面现象

激光破岩是利用激光器产生高能激光聚焦到岩石表面,使岩石在局部高温作用下发生强度弱化、碎裂、熔化和气化并伴随热爆裂现象的剧烈过程。激光照射岩石过程中形成气液固多相混合物,其表面现象如图 1 所示。

高能激光辐照岩石后,一部分能量被岩石表面反射、散射,另一部分能量以热能的形式被岩石吸收。激光辐射对岩石的损伤一般分为三个区:具有强烈熔化和蒸发的相变区(熔化区)、温度梯度变化最大的热破碎区(热损伤区)和具有广泛非弹性变形的岩石热蚀变的热影响区^[27-30]。激光和岩石相互作用过程中会发生三种明显的状态转变,包括热散裂、熔化和气化。其中热散裂方式因激光破岩的 SE 小,成为破岩效率最理想的一种方式^[31]。

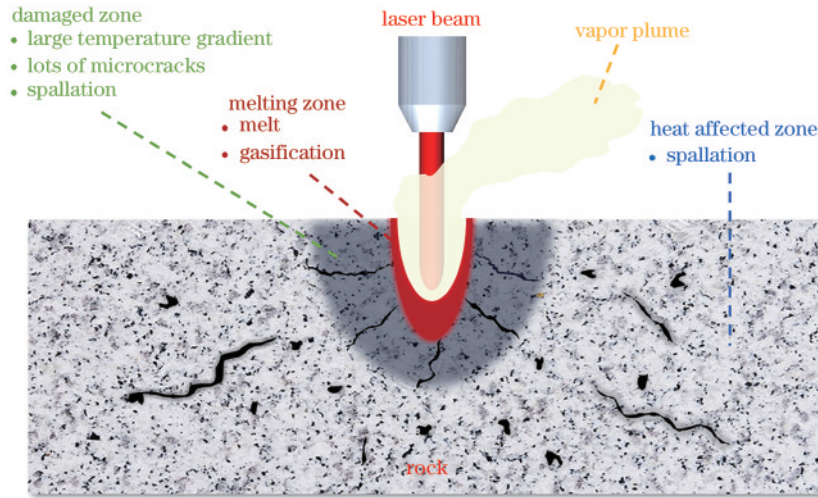


图 1 激光破岩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser rock breaking

当激光作用时间较短,岩石表面温度未超过熔点时,岩石的破碎方式主要为热力破碎。岩石经热力作用后散裂、剥落生成的岩屑可由高压辅助气流运移排出。受激光作用后热影响的岩石强度也在一定程度上降低,提高了岩石的可钻性。当岩石受激光持续作用时,激光照射到岩石表面,少量激光能量因反射和散射而耗散,岩石在短时间内吸收大量能量。当能量在岩石中的积累超过一定阈值时,将导致岩石的破碎、散裂、熔化和气化。在岩石熔化和气化过程中,由于岩石在极短时间内吸收能量发生相变导致的体积膨胀使岩石熔池发生热爆裂现象,因而激光与岩石作用是一个十分剧烈的过程。岩石熔化后重新凝固的过程会产生玻璃化的现象,其中凝结生成玻璃体附着于岩石表面,在通常情况下会降低岩石的孔隙率,对油气钻孔造成不利的影响。但另一方面,岩石表面的玻璃化可以对

胶结程度松散、力学性能不好的岩石进行加固处理,同时防止油气在岩石中的渗透^[32]。

2.3 激光破岩温度变化

在激光辐照下,岩石的温度分布与岩石的破坏状况相关。因此研究激光作用岩石内外的温度分布,成为研究激光破岩的重要内容。Yang 等^[33]使用最大功率为 50 W 的光纤激光器对花岗岩、砂岩和玄武岩进行射孔实验,系统地研究岩石温度的变化。研究认为,激光辐照区岩石温度上升过程可分为陡升、缓升和平衡三个阶段。当激光射到岩石表面上,温度变化处于陡升阶段,辐照区的温度快速上升。当岩石温度接近熔点,岩石温度变化进入缓慢上升阶段,岩石开始逐渐熔化和气化。当辐照区表面岩石完全熔化,吸热和散热达到平衡时,岩石温度停止上升,并保持在一个基本稳定的平衡点,即平衡阶段。如图 2 所示。

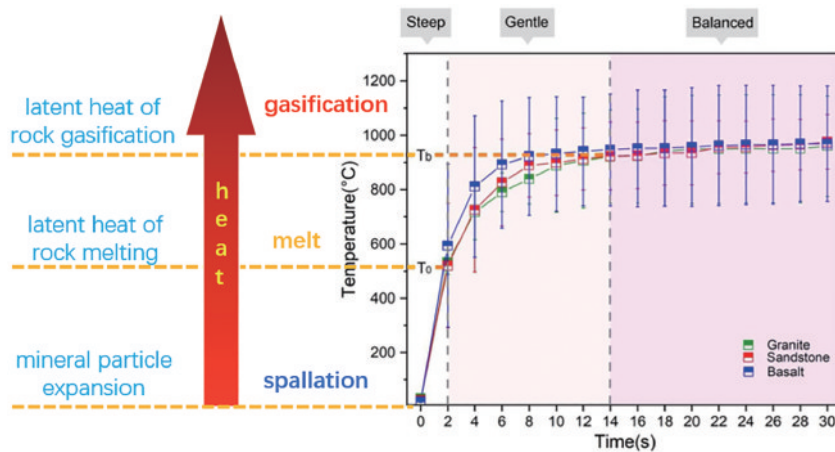


图 2 光纤激光射孔过程中岩石的温度分布^[33]和相变

Fig. 2 Temperature distribution^[33] and phase transition of rock during fiber laser perforation

在陡升阶段,岩石温度随激光功率线性上升。随着激光功率的增加,导致陡升阶段的温度上升速率增加,温度上升持续时间缩短。其中岩石性质对岩石温

度上升速率有明显影响,导热系数越高的岩石温度上升速率越大。陡升阶段岩石的破坏主要由热应力引起,陡升阶段的温度极限是岩石熔化的临界点。在缓

升阶段,激光辐照岩石开始出现熔化和气化等相变。岩石温度上升速度减慢,温度上升速率减小,并逐渐接近于零。并且随着激光功率增大,温度上升速率下降越快,而缓升阶段的持续时间变化不大。如果岩石具有更多熔点更高的石英,岩石完全熔化需要吸收更多能量,该阶段的持续时间将延长。并且随着激光功率的增加,温度变化的时间二阶导数(温度上升的加速度)减小。研究认为更高的激光功率会导致更剧烈的相变,从而干扰岩石对激光的吸收,导致出现以上现象。在平衡阶段,其标志为激光辐照区的岩石完全熔化、吸热和散热平衡。平衡温度随着激光功率的增加而增加,岩石中石英含量越高,平衡温度也越高。达到平衡温度所需的辐照时间主要与岩石性质有关,岩石中石英含量越高,所需时间越长^[33]。

Li等^[30]使用功率为1000 W的光纤激光器照射花岗岩表面的研究结果显示,中心熔化区域的温度高于2000 °C(红外热像仪的测量范围介于-25 °C~2000 °C)。花岗岩表面在激光照射下的温度上升主要集中在熔化区,其温度远高于损伤区和热影响区。随着径向距离的增加,岩石表面的温度逐渐降低,并且表面温度分布呈高斯分布。随着激光辐照时间的增加,熔化区和热损伤区逐渐扩大,如图3所示。

2.4 激光与岩石作用物理化学变化

在自然状态下,岩石内部通常由占比不同的矿物

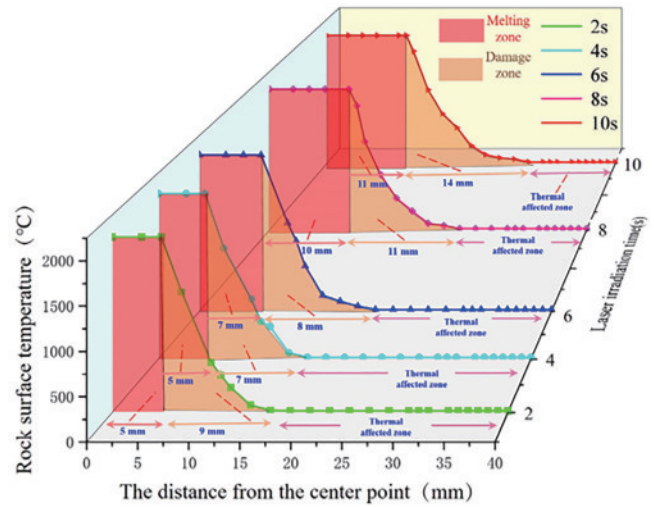


图3 不同辐照时间下花岗岩表面温度分布^[30]

Fig. 3 Surface temperature distribution of granite under different irradiation time^[30]

颗粒胶结而成。岩石内部矿物成分占比的多少决定了岩石的种类。如自然中广泛分布的花岗岩主要由石英和长石组成,还含有少量的云母、辉石和角闪石。而砂岩主要由各种石英颗粒胶结而成。当激光作用于这些岩石表面时,岩石受剧烈的温度变化影响将产生一系列复杂的物理化学反应。如图4所示,为激光作用岩石物理化学流程。

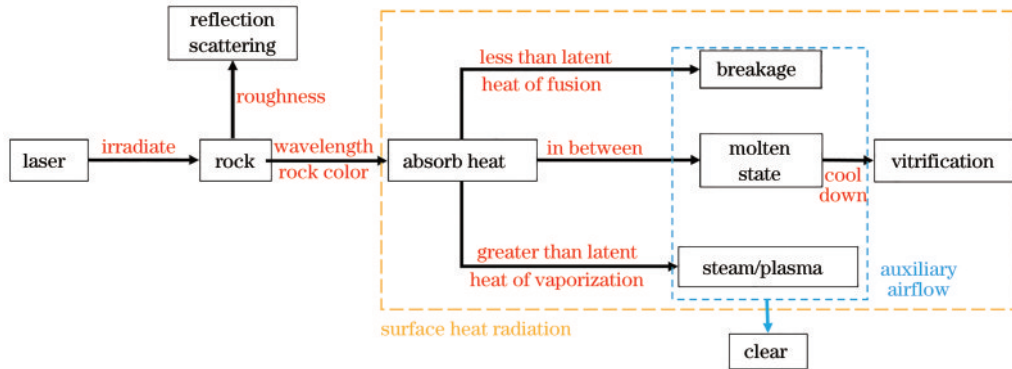


图4 激光与岩石相互作用的物理化学现象

Fig. 4 Physical and chemical phenomena of laser-rock interaction

1) 热力破碎阶段

当激光与岩石作用时间较短时,岩石未发生熔化和气化现象。岩石吸收的激光能量从辐照区扩散,由于此阶段缺少足够的能量使岩石熔化,激光对岩石的破坏以热力破碎为主^[34-35]。此外,岩石内部的矿物成分在温度和岩石膨胀压力的共同作用下发生一系列物理化学变化。如石英发生的同质多象转变, α 石英随温度升高转变为 β 石英后体积增大膨胀,而在巨大压力作用下转变为柯石英(coesite)和斯石英(stishovite)^[36],如图5所示;透长石在高温下转变为正长石;方解石在高温下分解为石灰和二氧化碳^[5,37]的反应等。这些物理化学变化在岩石热破碎过程中不断累

积,最终导致岩石的散裂破碎。

2) 相变阶段

当激光持续作用时,岩石高温区的温度不能及时扩散到周围而迅速升高,岩石表面的激发分子会经历不规则的剧烈热运动,导致局部瞬态温度上升到岩石基质的物理状态从高温热熔快速发展到液化,最终气化和蒸发。以花岗岩为例,花岗岩内部的主要矿物长石、石英和次要矿物云母、角闪石和辉石等在持续激光作用下发生熔化、气化现象,并发生相应的物理化学反应。李美艳等^[38-39]的研究表明,在激光作用的同时,花岗岩和砂岩中的部分硅酸盐受热发生化学变化,生成大量的SiO₂,导致石英含量增加。而在激光与石灰岩

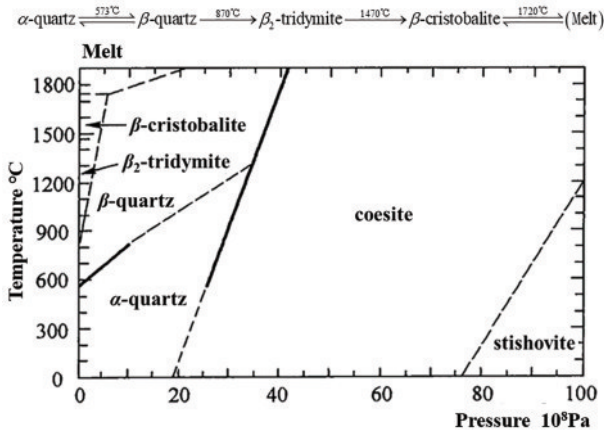


图 5 石英在温度、压力下的同质多象转变^[36]

Fig. 5 Homogeneous polymorphic transformation of quartz under temperature and pressure^[36]

作用的实验^[5]分析结果表明,相比于未受激光处理的区域,热影响区的方解石部分分解为CaO和CO₂,相变区石灰岩中的方解石在激光作用下大量分解,并在熔化冷却后的产物中发现CaO与空气中水反应生成的Ca(OH)₂。这些实验表明激光与岩石作用发生了物理化学变化,并证实这些物理化学变化是使岩石的强度降低的主要原因。

3) 岩石微裂纹拓展

温度变化通常对岩石的力学性能具有十分显著的影响。在激光作用下,辐照区温度向岩石内部扩散,形成损伤区和热影响区。损伤区和热影响区由于温度作

用导致其内部微裂纹的拓展,并大幅降低热影响区的岩石强度。因而观测岩石温度变化是研究岩石热损伤裂纹分布和激光破岩机理的重要方法。Gahan等^[27]使用脉冲激光辐照页岩,发现岩石吸收的能量主要用于岩石内部裂纹的形成,只有少量能量可以有效去除岩石。Homand-Etienne等^[40]研究花岗岩样品在20°C~600°C的温度范围内产生热裂纹现象,通过扫描电子显微镜(SEM)进行观察的结果显示,花岗岩中的裂纹长度几乎没有变化,而其宽度随着裂纹温度的升高而增加。Li等^[30]使用功率为1000 W的光纤激光器照射花岗岩的研究结果表明,由于花岗岩的内部热量传递速度远低于热量吸收速度,熔化区的微观损伤形态主要为阶梯状断裂。在距中心点的5~14 mm的损伤区,温度开始呈指数下降,并且存在明显的温度梯度(如图6所示)。损伤区岩石的微观损伤主要为裂纹,并且产生的微观裂纹数量最多,温度梯度的存在可以被认为是产生裂纹的主要因素。距离中心点越远,热量传递越少,导致距离中心点14~40 mm的热影响区温度变化很小。在辐照时间为4~10 s的情况下,岩石吸收更多的能量,导致熔化区的温度边界向外移动,岩石内部的损伤程度加深。通过对裂纹发展过程的仿真分析,该研究^[30]认为,在激光作用下岩石裂纹扩展的动态过程中,裂纹的开裂机理表现为拉伸开裂和剪切开裂。其中,拉伸裂纹是熔化区产生阶梯状断口的主要因素,而损伤区和热影响区裂纹的不规则交错发展是拉伸-剪切复合损伤的结果。

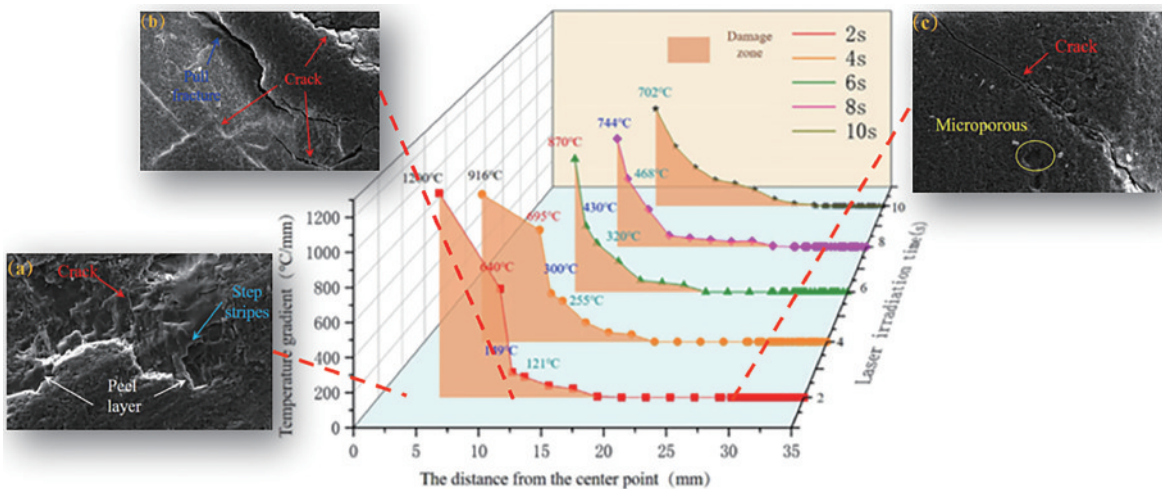


图 6 花岗岩表面温度梯度^[30]。(a)熔化区;(b)损伤区;(c)热影响区的SEM图像

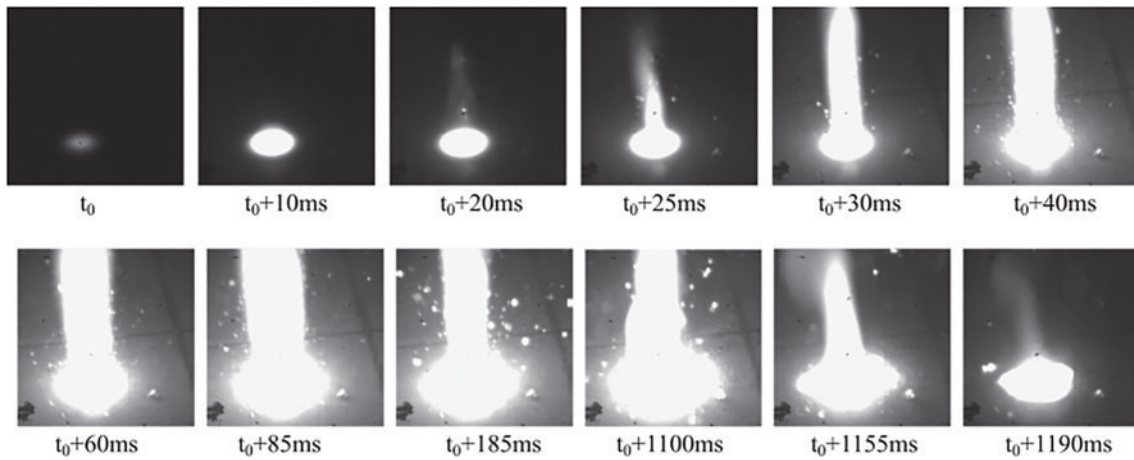
Fig. 6 Temperature gradient of granite surface^[30]. SEM images of (a) melting zone; (b) damage zone; (c) heat-affected zone

4) 激光诱导等离子体

砂岩是由大量的石英颗粒和少量的附加矿物胶结而成。在一项砂岩激光射孔研究中,观察到砂岩在激光射孔时等离子体蒸气的动态变化^[29],如图7所示。

图7中的时间 $t_0 + 20$ ms时,出现了由岩石蒸气/等离子体表示的电子云。随着电离过程的继续,岩石的

蒸气/等离子体增加,观察到的亮度稳步增强。亮度代表温度和能量。亮度越高,温度越高,能量越大^[41]。X射线衍射(XRD)测试结果显示,射孔后岩石的物相主要由SiO₂和Fe₂O₃组成,并含有少量的Al₂O₃。分析表明,大量激光诱导的金属等离子体蒸气从孔中喷射出来。其原因为激光穿孔过程中,金属反应性强的金属原子的电离电位很低,因此在激光照射下更容易电离。

图 7 激光与岩石作用等离子体的高速视频图像^[29]Fig. 7 High-speed video image of laser-rock interaction plasma^[29]

相反,非金属原子电离电位相当高,因此只有少量的非金属等离子体蒸气出现。导致固化后的玻璃态岩石中包含大量的非金属元素^[29]。

2.5 小结

上述内容从激光与岩石作用过程中的表面现象、温度变化、物理化学变化等角度总结了近年来激光破岩机理研究。其中激光作用下岩石温度变化概括了岩石温度上升过程和温度分布特点。岩石物理化学变化则进一步概述了对温度导致的岩石体积、化学反应等的变化,并对这些变化导致的岩石损伤和裂纹拓展进行深入归纳,对于后续的研究具有一定参考意义。然而目前关于激光破岩的机理仍需做更深入的研究,如在不同激光参数下岩石的温度场和应力场变化、激光作用岩石玻璃化过程,以及岩石在激光作用下更深层的变化过程等。

3 激光破岩的影响因素

激光与岩石作用的影响因素包括激光参数、岩石性质、环境以及作用过程中产生的二次效应等,这决定了激光破岩是一个动态的、复杂的过程。激光对破岩效果的影响因素包括激光的功率、离焦量、辐射时间、脉冲宽度和频率、入射角、波长以及光斑大小和形状等^[27,42-43]。影响激光破岩的岩石性质包括岩石内的矿物种类和含量、胶结程度、热膨胀系数、导热系数、比热容、孔隙率等^[42-43]。此外,在高温环境、饱和液体、液态氛围、岩石围压等诸多环境下的激光破岩效率也是重要研究内容。以下对激光破岩过程的主要影响因素进行介绍。

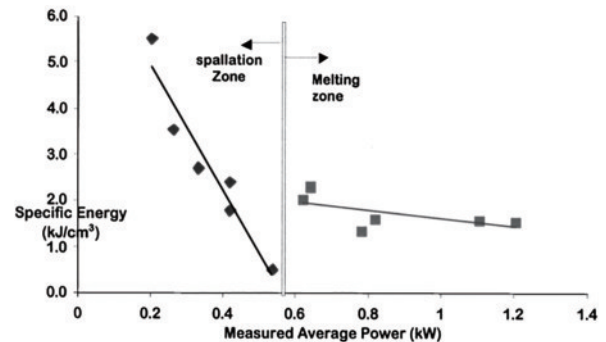
3.1 激光参数

激光参数对激光破岩的主要影响因素包括激光功率、辐照时间、重复频率和脉宽等。另外,将激光光斑形状和激光移动速度也归类为激光参数范围,并对这些参数对岩石破除的影响进行概括。根据近年来的研究成果将其汇总如下。

1) 激光功率

对于石灰岩、砂岩、花岗岩等岩石,研究证明激光功率和作用时间都对激光破岩的SE和ROP有明显的影响^[25,37]。在这些研究的基础上,Zhang等^[44]使用基于响应面法的高精度多元非线性岩石SE预测模型和实验的研究方法。结果显示激光功率对岩石SE的影响最为显著,光斑直径对岩石SE的影响中等显著,并且激光功率与辐照时间以及激光功率与光斑直径的相互作用对岩石的SE有显著影响。

在最大程度上避免二次效应的情况下,Xu等^[28]使用Nd:YAG激光器在页岩上做了一系列打孔实验,得到SE随激光功率的变化如图8所示。在功率低于200W时,吸收的能量只能加热少量岩石并使其散裂,因而SE很大。随着功率的增加,大量岩石被加热破碎导致SE逐渐减小,直到激光功率在600W以上岩石开始熔化。当热散裂转变为熔融时,岩石由固体到液体过程中由于存在熔化潜热需要吸收大量的热量,导致SE逐渐增大。这解释了热散裂是最有效的岩石去除机制,且所需要的SE最小的原因。随着激光功率的增

图 8 在光束直径为 0.5 英寸、曝光时间 0.5 s 下,页岩钻孔 SE 随激光功率的变化图^[28]Fig. 8 Variation of shale drilling specific energy (SE) with laser power under 0.5-inch beam diameter and 0.5-s exposure time^[28]

加,融化区 SE 略有下降,这被认为是由于在较高的温度下,较高的功率使液相的黏度降低,使液体更容易被吹扫气体从孔中除去而导致的。同时平均激光功率的增加会导致孔的进、出口尺寸增大^[45]。

2) 辐照时间

激光与岩石作用时,随着激光辐照时间的增加,岩石的变化表现出和增强激光功率相似的过程。岩石吸收激光能量使岩石表面局部加热,当岩石受热膨胀变化被周围的冷岩石阻止时,产生热应力。随着辐照时间的增加,散裂的岩石熔化,岩石内部热应力逐渐消失。这个过程中 SE 随激光辐照时间的增加而增加,呈现出非线性的变化关系,并且激光辐照时间对钻孔深度的影响也呈非线性关系^[46]。Rui 等^[47]的研究显示,将激光功率分为 100 W 和 200 W 两种情况,辐照时间分为 0.5 s 和 1 s 两种情况相互组合的四种激光辐照的岩石,以及一个未受损的样品作为基本参考(激光诱导的岩石损伤被视为零),分别对五种情况进行加载测试。结果如图 9 所示,通过控制变量法分析,激光功率对激光诱导岩石损伤的产生比辐射时间更显著。

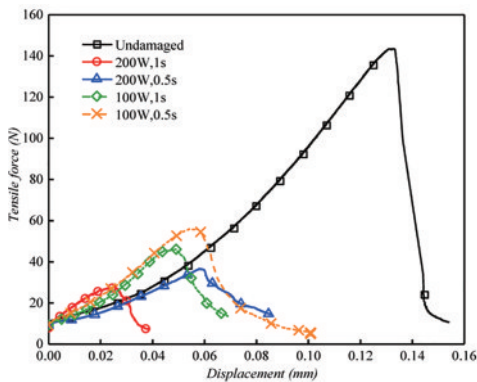


图 9 激光辐照花岗岩强度测试^[47]

Fig. 9 Strength test of granite irradiated by laser^[47]

3) 脉冲激光

重复频率和脉冲宽度是脉冲激光的重要参数。随着激光的重复频率和脉冲宽度的增加,岩石吸收能量也逐渐增加,表现为 SE 先减小后增大,射孔深度先增大后减小,射孔直径逐渐增大,ROP 先增大后降低。其原因为岩石吸收能量过多而熔化,导致破岩效率降低。Gahan 等^[27]研究不同激光参数对页岩、石灰岩和砂岩样品的 SE 影响结果表明,随着脉冲重复频率和脉冲宽度的增加,SE 降低。然而相比于脉冲重复频率,脉冲宽度是 SE 降低的主要机制。Xu 等^[28]的研究表明,增加光束重复频率可以使岩石内的最高温度、热循环频率和激光驱动冲击波强度增加,从而降低 SE 并增加材料去除率。Ndeda 等^[48]对脉冲激光作用下花岗岩散裂过程的热应力进行了分析,研究了加热末期对流冷却对应力和裂纹扩展的影响。在建立的二维有限元模型中,观察到加热过程中产生的拉应力在冷却过程

中反转为压应力,并且当岩石受到突然冷却时,裂纹扩展速率增加,岩石剥落速率增加。研究结果表明,在脉冲激光作用下,岩石上的残余应力要高得多。

4) 光斑形状

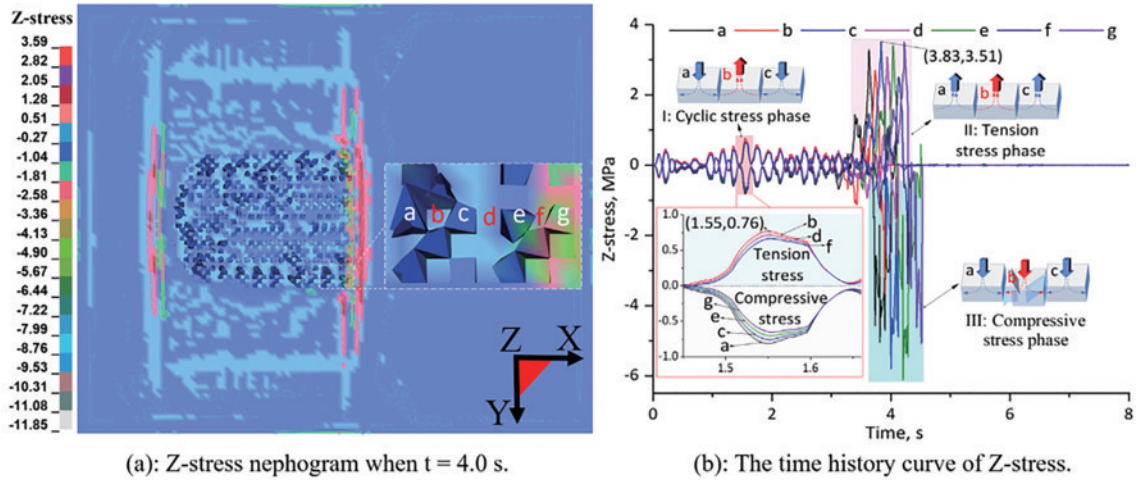
有关激光光斑形状对破岩效果的研究相对较少。Deng 等^[49]关于矩形和圆形激光光斑扫描对花岗岩强度和可钻性的研究表明,在给定参数下,分别用矩形扫描点和圆形扫描点扫描花岗岩,岩石的单轴抗压强度分别降低 24% 和 15%,抗拉强度分别降低 20% 和 11%,可钻性分别降低 16% 和 10%。根据仿真和实验结果分析^[49],圆形光斑的激光能量相对较集中,温度更高,加热速度更快,岩石熔化温度很快达到,并在熔化过程中吸收了大量热量;虽然矩形光斑的激光能量相对分散,但岩石熔化量相对较小,岩石熔化吸收的温度相对较小,大部分热量转移到岩石内部,导致岩石表面温度相对较高。因此,矩形扫描点的破岩效果优于圆形扫描点。之后 Chen 等^[50]对椭圆激光光斑进行了研究,研究表明,与传统机械钻速相比,椭圆激光辅助钻速提高了 61%,证实了椭圆激光辅助钻头高效钻井的可行性。其实验和模拟结果表明,相比于圆形激光,椭圆形激光可导致更大面积的岩石熔化和蒸发。并且椭圆激光辐照形成了椭圆高应力区和梯形低应力区,其中,低应力区的岩石在 Z 方向(激光入射方向)受到拉应力,导致损伤的发生和积累,最终导致热开裂和剥落。如图 10 所示。

5) 移动激光

在当前的激光破岩实验研究中,多采用激光光源相对岩石静止的方式与岩石进行作用,而很少对移动激光光源与岩石作用情况进行研究。通常情况下,激光束采用垂直入射的方式作用于岩石表面,这决定了激光光源仅能以沿着激光入射方向、平行于岩石表面方向以及两者夹角的方向移动。Erfan 等^[51]使用 Nd:YAG 激光在石灰岩、页岩和花岗岩中的移动穿孔研究结果显示,在激光沿着入射方向移动靠近岩石样品时,当激光相对于岩石样品的移动速度等于 ROP 时,岩石样品会产生圆柱孔而不是锥形孔。Deng 等^[52]以实际钻井工况为背景,对移动线性激光(平行于岩石表面)与岩石作用进行了研究,并建立对应的数值模型。通过实验数据与仿真结果对比,验证了移动线形激光破岩温度场分布数值模型的合理性。该研究成果对合理匹配激光、机械两部分相关参数提供了一定数据支撑^[52]。Wang 等^[26]的沿岩石表面方向的移动激光研究结果显示,随着移动速度的降低,激光辐照下岩石的移除质量和破裂岩石的质量呈非线性增加的趋势;随着激光束移动速度的增加,切槽宽度和深度均减小。

3.2 岩石性质

岩石性质对激光破岩的主要影响因素包括岩石内矿物种类和含量、岩石的热学性质、岩石孔隙率、岩石颜色和表面粗糙度等。其中岩石的比热、热膨胀系数

图 10 椭圆激光辐照砂岩的 Z 方向应力变化^[50]Fig. 10 Stress change in Z direction of sandstone by elliptical laser irradiation^[50].

和热导率是岩石热物理性质的基本参数,比热和热膨胀系数表示岩石的内能和体积随温度变化的情况,热导率表示在岩石内部存在温度梯度时,热量由一点传递到另一点的速率变化。

1) 岩石对激光吸收率

影响岩石自身对辐照激光的吸收率的因素主要包括岩石表面粗糙度、岩石颜色。在矿物中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量越多,颜色越浅,矿物中富含铁和镁则更多表现为暗色^[36],而暗色矿物对辐照激光的吸收率更大。如果一个表面是平面的,像一面镜子,那么大部分的能量被反射。入射激光在光滑的岩石表面上主要表现为反射,在粗糙岩石表面上主要表现为散射。反射率由岩石的成分决定,而激光的散射由激光波长决定。正是被吸收的能量引起岩石的加热和破坏。反射和散射表示被吸收能量之外的能量损失。因此,将反射和散射能量损失的比例最小化,将最大限度地增加可用于转移到岩石进行破坏的能量^[27]。

2) 热导率

不同岩石的热传导率不同,但具有相似的随温度变化的趋势。对于火成岩和沉积岩,当温度接近零度时岩石的热传导率比较高,不同岩石的热传导率值比较分散,随着温度的上升,岩石的热传导率逐渐减小,不同岩石的热传导率值也相对集中。而岩石的热传导率值与石英的含量和孔隙率的大小有关,石英含量越多,孔隙率越小,岩石热传导率越大^[53]。另一方面,岩石导热系数决定岩石内部热量的扩散速度,具有高导热系数的岩石升温速率更快,岩石内部的温度分布也更均匀。导热系数较低的岩石的升温效率低,在激光作用于岩石表面时,岩石内部温度分布梯度大,局部区域快速升温导致快速熔化、蒸发。

3) 热膨胀系数

热膨胀系数是衡量材料受热时膨胀大小的一个物理参数,一般情况下跟随材料的温度变化。在激光破

岩过程中,岩石热膨胀系数越大,岩石的热散裂破坏越容易。以花岗岩为例,花岗岩中的构成矿物石英、斜长石、正长石等热膨胀系数随温度升高而增加,使花岗岩的热膨胀系数随温度上升大体呈现线性增长,而构成矿物颗粒之间的热膨胀系数不一致导致花岗岩内部出现微裂纹,其数量随温度的升高而增加。尤其以石英为例,当温度升高到 $573\text{ }^\circ\text{C}$ 附近时,石英由 α 相向 β 相转变,体积急速膨胀^[53-54]。

3.3 二次效应

实验表明,在高功率激光与岩石作用时,有害的次级效应会随着孔的深度增加而增加,从而降低激光破岩效率^[55]。这些影响包括破碎材料的熔化和重熔、激光射孔内物质的排出形成的羽流、诱发裂缝等,这些因素会影响岩石吸收的能量以及岩石内部能量的扩散^[56],这些被统称为二次效应。

Bharatish 等^[25]对于激光钻孔石灰岩的研究表明,辐照时间的增加会导致相互作用区域的加热和二次效应,如材料熔化,从而消耗更多的激光能量。这种熔体起到屏障的作用,阻止激光束与岩石充分相互作用。此外,额外的散热将导致热膨胀、裂缝形成和矿物分解,从而导致 SE 值增加。对于激光岩石射孔熔化后产生的玻璃体,Kobayashi 等^[54]的研究认为,玻璃体会使后续辐照的激光发生散射,导致激光能量分散而不能会聚于一点。激光分散的能量被周围的岩石吸收后导致更多的岩石熔化、热量向周围扩散,导致岩石内部温度梯度过大而破碎。而在透明水中激光射孔使多余热量被水吸收避免了岩石破碎,如图 11 所示。

由于二次效应的存在,获得激光打孔的真正 SE 非常困难。因而在目前的研究中,通过精细控制激光束强度和辐照时间来产生浅孔,通过清洗减少孔内气体凝结和碎片,并最大限度地减少熔化材料粘附在表面等方法,以减少大部分的二次效应。

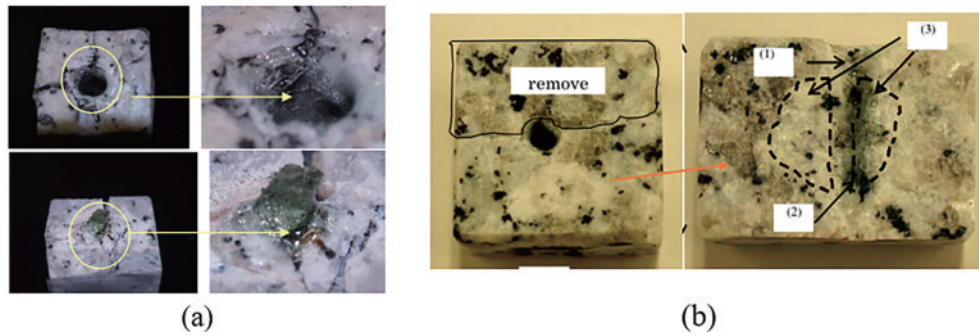


图 11 空气和水环境中激光与花岗岩作用^[54]。(a)空气中激光射孔岩石的上、下面；(b)透明水中激光射孔岩石试样截面[(1)激光孔；(2)玻璃体；(3)塑性区]

Fig. 11 Laser interaction with granite in air and water environments^[54].(a) Top and bottom of laser perforated rock in air; (b) section of laser perforated rock sample in transparent water [(1) laser hole; (2) glass body; (3) plastic zone]

3.4 环境因素

实际的工程钻井环境相较于实验室环境往往更加复杂。例如在油气钻井中的含油岩层、含水岩层,地下深处干热岩层的钻井,甚至在海洋环境中的钻井。这些钻井环境将对激光破岩的SE和ROP产生不同程度的影响。

1) 饱和岩石

岩石内部通常包含众多的孔隙,孔隙内含流体的变化对激光与岩石作用具有不同的影响。在考虑岩石内部液体饱和的情况下,不同的岩石饱和液对激光破岩的SE和ROP产生相应的变化。Ahmadi等^[46,57]研究了激光照射时间、水和重油饱和度对激光射孔SE的影响。结果表明,随着激光照射时间的增加,孔深度增加,SE也随之增加,且二者呈非线性关系。其破岩SE由小到大顺序为干燥、饱和重油、饱和水状态。其原因为饱和液体状态下,岩石内部的液体吸收激光传递的热量,导致激光破岩SE的增大、钻孔深度的减小。而Rad等^[58]的研究表明,某些较重的原油能够及时吸收大量的激光能量,从而增加激光破岩的ROP。Dini等^[59]使用数值模拟分析花岗岩和石灰岩激光钻孔中饱和度和侧压力对热机械应力影响。结果显示,所采用的数值模型与Ahmadi等^[46,57]的实验数据吻合较好。分析认为,岩石中产生的热机械应力与钻孔SE有直接关系。此外,在石灰岩和花岗岩中,激光钻孔在水饱和和岩石中产生的最大应力高于油饱和干燥状态下的最大应力。

2) 岩石围压

当岩石处于一个较大压强的环境中,环境产生的围压会对激光在岩石的ROP和SE产生影响。随着柱状岩石侧面围压的增加,激光破岩SE在某一围压范围内迅速增加,而ROP在这一范围内迅速下降。并且强度较强的岩石具有较大的SE和较小的ROP。分析表明,围压增大导致激光破岩SE增大和机械ROP降低,主要原因是围压的存在增加了岩石的强度并降低了岩石的热应力影响^[57]。

3) 液态氛围

已知在空气氛围中,激光能够破碎、烧蚀岩石并在高速气流的作用下带走岩石碎屑。然而,当处于液态氛围中,激光与岩石的作用机理会如何变化。在Kobayashi等^[54]的研究中,利用 α 石英被加热到573℃区域时, α 石英向 β 石英相变时会发生强烈的体积膨胀产生层裂的特点,使岩石层裂持续产生而破除岩石。在水中进行花岗岩激光钻孔则有效控制了激光辐照区的温度在相变区域。实验结果显示,通过剥落法钻孔花岗岩所需的时间几乎是通过熔融法钻孔花岗岩所需时间的1/3。将花岗岩熔化产生直径2英寸的孔所需的能量几乎是将花岗岩剥落以产生同样大小的孔所需能量的3倍。

而Ohtani等^[60]进行了脉冲Ho:YAG激光诱导液体射流水下凿岩实验研究。结果显示,激光脉冲形成的回弹冲击波超压约为22.7 MPa,气泡塌陷诱导超压为40 MPa,足以对岩石试样造成破坏。射流诱导的高压加载成功地破坏了石灰岩岩样的表面,表明激光诱导的射流可将激光能量转化为机械力,具有用于挖掘海底岩石的潜力。Shi等^[61]也提出了一种脉冲激光诱导空化气泡的岩石破碎新方法。空化是液体中蒸汽气泡的迅速形成和坍塌。激光束的能量转化为高压空化气泡。当空化气泡在岩石表面附近爆炸时,爆炸产生的动力使岩石破裂。研究结果表明,空化气泡爆炸时的动力是造成岩石破裂的主要原因。脉冲激光在水中诱导空化气泡是激光切割技术在工业应用中的一种有效途径。这种产生空化气泡的脉冲激光方法有可能发展成为硬岩开挖和破碎的工程工具。

在液态氛围中,激光与岩石作用形式分为热作用和机械作用两种。利用激光水下热作用剥离岩层的结果表明该方法具有提高射孔效率、降低岩石SE的效果^[54]。而利用激光诱导空化气泡,将激光热能转化为机械能凿岩的方式被证明是一种有效的水下岩石破碎方法,该方法同时具有低能耗、高效率等优点^[61]。

4 激光破岩的应用研究

激光破岩在油气钻井中的应用方式主要分为激光直接钻井破岩和激光辅助机械钻井破岩两种方式。激光直接钻井破岩利用激光短时间输出的巨大能量,使岩石快速发生熔化和气化等反应,并由高速气流带走破除的岩石碎屑。激光辅助机械钻井则利用激光加热导致岩石强度大幅下降的原理,使机械钻头能够更快地破除坚硬岩石。这两种激光破岩方式由于破岩机理的不同而被研究用于对应的情况。其中由中国工程物理研究院激光聚变研究中心和西南石油大学共同成立了激光-机械破岩联合实验室,搭建了千瓦级激光与机械联合破岩实验装置,开展了千瓦激光穿过空气、清水、膨润土等溶液的衰减实验,进行了激光与机械联合破岩机理的初步研究。以实际钻井工况为背景,对移动及不同形状激光束作用于岩石的破碎规律进行了相关研究。同时采用有限元仿真软件对移动线形激光作用花岗岩过程进行了热力耦合瞬态仿真,模拟了激光热应力作用下花岗岩的破损形貌。其对激光与岩石的作用形式进行的探索,促进了激光破岩的研究。

在激光作用于岩石过程中,在岩石未发生大规模的相变之前,岩石主要受热力破碎并使岩石强度大幅降低。这个阶段由于并未消耗大量能量熔化和气化岩石,致使激光破岩的 SE 最小^[35],因而受到更多的关注。Jamali 等^[17]通过对包括砂岩、花岗岩和变质石英岩在内的多种岩石类型的表征,综合分析了岩石参数对激光-岩石相互作用的可能影响。通过划痕实验获得了研究样品的岩石强度、钻孔强度和断裂韧性。通过热诱导软化各种类型的岩石,包括非常坚硬的岩石,都可以通过高功率激光转化为可钻状态。整体分析的结果表明,热作用岩石强度弱化可以有效地促进联合激光-机械辅助钻井系统的工作效率,能够提高刀具的 ROP,降低钻孔扭矩和钻头重量,从而降低能耗。并且通过提高钻头寿命和缩短总体钻井时间,可以显著降低钻井成本。在 Rui 等^[47]的研究中使用耦合非连续变形分析(DDA)实现了激光辅助岩石切削的应用,结果表明,引入激光损伤可以提高岩石的破碎率,减少刀具的磨损。数据分析显示,辐照时间对破断效率提高率和刀具磨损降低率的影响最为显著。根据岩石切割的模拟结果,初步预测了激光辅助隧道掘进机(TBM)掘进的破岩效率提高、刀具磨损减少与激光参数之间的关系。研究结果显示了该数值模型在激光辅助 TBM 中的应用前景。

随着技术的发展,许多新的研究思路和研究方法为激光钻井破岩的研究提供了灵感,促进了对激光破岩机理的探索,促进了激光破岩技术的发展。如使用仿真技术对激光破岩温度场^[49]、应力场^[59,62]、机械破岩过程^[47]、岩石模型^[63]和岩石去除过程^[64]等场景进行模拟;采用激光移动的方法研究岩石的破除规律^[52];对不

同形状的激光光斑与岩石的作用规律进行研究等^[49-50]。这些研究工具和方法促进了对激光破岩机理的探索;丰富了激光与岩石的作用方式;推进了激光破岩走向应用的过程。从技术角度分析,激光破岩技术相比于传统机械旋转破岩具有破岩效率高和经济友好等优点。然而,激光破岩技术在实现广泛应用的过程中仍然需要完成对激光与岩石作用机理的研究、激光钻井系统的设计,以及最终的应用实验。

5 总结与展望

综上所述,本文对近年来激光与岩石作用机理进行了系统的总结,并对激光与岩石作用的主要影响因素和激光破岩的应用研究做了简单的归纳。结合近年来激光破岩的发展状况和未来高能激光钻井破岩的需求,对激光破岩现阶段发展的不足和未来的发展趋势做如下展望。

1)目前,激光破岩技术的研究发展多数停留在实验和理论探索阶段。虽然近年来对激光破岩机理的研究已深入到温度应力变化、裂纹发展和岩石的物理化学变化等方面,但对各类岩石性质、岩石玻璃化特性和形成玻璃体等岩石物理化学特性的研究仍然较少。这些研究成果距离完成实际的激光钻井系统的设计,并应用到实际的钻井破岩仍然遥远。

2)使用数值仿真分析和实验结合研究激光破岩成为一种普遍的方法,具有重要的参考意义。通过仿真模型的构建,可以对各种激光、岩石性质和激光与岩石的作用过程进行仿真模拟。在未来的研究中,更加严谨、精密的激光与岩石耦合物理场将在数值模型中实现,为该研究提供一个有力的工具。

3)近年来,探寻激光与岩石作用机理仍然是研究激光破岩技术的主要任务。随着对激光破岩中产物性质和激光与岩石作用过程的明确,对产生二次效应等问题的解决,激光钻井破岩系统的研究与设计阶段也将到来。相信高能激光钻井破岩技术将在油气钻井、矿物挖掘等领域具有革命性的意义。

参 考 文 献

- [1] O'Brien D, Graves R M, O'Brien E. StarWars laser technology for gas drilling and completions in the 21st century[C]//The SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 3-6, 1999, Houston, Texas. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1999: SPE-56625-MS.
- [2] Moavenzadeh F, McGarry F J, Williamson R B. Use of laser and surface active agents for excavation in hard rocks [C]//The Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, September 29-October 2, 1968, Houston, Texas. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1968: SPE-2240-MS.
- [3] Hallada M R, Walter R F, Seiffert S L. High-power laser rock cutting and drilling in mining operations: initial feasibility tests[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4065:

- 614-620.
- [4] 牟海维, 辛朋辉, 罗伟. 激光破岩技术发展现状及未来发展方向[J]. 石油化工应用, 2016, 35(8): 1-5, 9.
Mou H W, Xin P H, Luo W. Development status and future development of laser breaking technology[J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(8): 1-5, 9.
- [5] 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.
- [6] Bazargan M, Madani A, Sharifi H, et al. Utilisation of lasers in petroleum drilling industry[C]//International Petroleum Technology Conference, March 26-28, 2013, Beijing, China: International Petroleum Technology Conference, 2013: IPTC-17019-MS.
- [7] 施斌全, 薛启龙, 唐文全, 等. 激光钻井技术研究展望[J]. 国外油田工程, 2010, 26(9): 42-44.
Shi B Q, Xue Q L, Tang W Q, et al. Research prospect of laser drilling technology[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(9): 42-44.
- [8] Buckstegge F, Michel T, Zimmermann M, et al. Advanced rock drilling technologies using high laser power[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 336-343.
- [9] Ezzedine S, Rubenchik S, Yamamoto R. Laser-enhanced drilling and laser-assisted fracturing for subsurface EGS applications[J]. GRC Transactions, 2012, 36: 287-290.
- [10] Zheng Y L, Sun T W. A method to derive the dielectric loss factor of minerals from microwave heating rate tests[J]. Measurement, 2021, 171: 108788.
- [11] Zheng Y L, Ma Z J, Yang S Q, et al. A microwave fracturability index (MFI) of hard igneous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104566.
- [12] Ciccu R, Grosso B. Improvement of disc cutter performance by water jet assistance[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 733-744.
- [13] Gao H, Gong X P, Cheng X Y, et al. Reasonable arrangement of high-level orientation extraction boreholes of pressure relief gas in overlying strata under high-strength fully mechanized mining in low-gas-thick-coal seam[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 5574917.
- [14] 刘柏禄, 潘建忠, 谢世勇. 岩石破碎方法的研究现状及展望[J]. 中国钨业, 2011, 26(1): 15-19.
Liu B L, Pan J Z, Xie S Y. On the research development of rock fragmentation and its prospect[J]. China Tungsten Industry, 2011, 26(1): 15-19.
- [15] Ketata C, Satish M, Islam M R. Knowledge selection for laser drilling in the oil and gas industry[C]//International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06), November 28-30, 2005, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 2005: 377-382.
- [16] 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.
- [17] Jamali S, Wittig V, Börner J, et al. Application of high powered Laser Technology to alter hard rock properties towards lower strength materials for more efficient drilling, mining, and Geothermal Energy production[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2019, 20: 100112.
- [18] 姚宝权, 杨科, 密淑一, 等. 高功率 Ho: YAG 激光器及其泵浦的磷锗锌、硒镓钼和硒化镉中长波红外非线性光学频率转换研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101002.
Yao B Q, Yang K, Mi S Y, et al. Research progress of high-power Ho: YAG lasers and its application for pumping mid-far-infrared nonlinear frequency conversion in ZGP, BGSe and CdSe crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101002.
- [19] 张娜玲, 井红旗, 袁庆贺, 等. 高功率 1060 nm 锥形激光器[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0514002.
Zhang N L, Jing H Q, Yuan Q H, et al. High power 1060 nm tapered laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42 (5): 0514002.
- [20] 陈忆兰, 朱小磊. 高重复频率大能量簇式脉冲输出激光器技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700003.
Chen Y L, Zhu X L. Burst-mode laser technology with high repetition frequency and high pulse energy output[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700003.
- [21] Pooniwala S. Lasers: the next bit[C]//SPE Eastern Regional Meeting, October 11-13, 2006, Canton, Ohio, USA. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006: SPE-104223-MS.
- [22] Jurewicz B R. Rock excavation with laser assistance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(7): 207-219.
- [23] Graves R M, Araya A, Gahan B, et al. Comparison of specific energy between drilling with high power lasers and other drilling methods[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 29-October 2, 2002, San Antonio, Texas, USA. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2002: SPE-77627-MS.
- [24] Bakhtbidar M, Ghorbankhani M, Alimohammadi M, et al. Application of laser technology for oil and gas wells perforation[C]//SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, October 24-26, 2011, Muscat, Oman. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-148570-MS.
- [25] Bharatish A, Kumar B K, Rajath R, et al. Investigation of effect of CO₂ laser parameters on drilling characteristics of rocks encountered during mining[J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2019, 31(4): 395-401.
- [26] 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.
- [27] Gahan B C, Parker R A, Batarseh S, et al. Laser drilling: determination of energy required to remove rock

- [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 30-October 3, 2001, New Orleans, Louisiana. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2001: SPE-71466-MS.
- [28] Xu Z, Reed C B, Konercki G, et al. Specific energy for pulsed laser rock drilling[J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, 15(1): 25-30.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Xu Z Y, Reed C B, Parker R A, et al. Laser spallation of rocks for oil well drilling[J]. *ICALEO*, 2004(2004): 1803.
- [32] Batarseh S, Gahan B C, Graves R M, et al. Well perforation using high-power lasers[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 5-8, 2003, Denver, Colorado, USA. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2003: SPE-84418-MS.
- [33] Yang X F, Zhou J H, Zhou X, et al. Investigation on the rock temperature in fiber laser perforating[J]. *Optik*, 2020, 219: 165104.
- [34] 杨玲芝, 文国军, 王玉丹, 等. 激光破碎煤岩作用过程理论分析与实验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2016, 44(5): 168-172.
- Yang L Z, Wen G J, Wang Y D, et al. Theoretical analysis and experimental research on breaking process of laser drilling in coal and rock[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(5): 168-172.
- [35] Xu Z, Yamashita Y, Reed C. Modeling of laser spallation drilling of rocks for gas and oil well drilling[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 9-12, 2005, Dallas, Texas, USA. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2005: SPE-95746-MS.
- [36] 唐洪明. 矿物岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 82-84.
- Tang H M. *Mineral petrology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 82-84.
- [37] 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.
- [38] 李美艳, 韩彬, 张世一, 等. 激光辅助破岩规律及力学性能研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(3): 363-368.
- Li M Y, Han B, Zhang S Y, et al. Study on laser assisted rock breaking law and mechanical properties[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(3): 363-368.
- [39] 李美艳, 韩彬, 张世一, 等. 激光辅助破岩实验研究[J]. *钻采工艺*, 2015, 38(3): 1-3, 9.
- Li M Y, Han B, Zhang S Y, et al. Experimental study on rock fragment assisted by laser technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(3): 1-3, 9.
- [40] Homand-Etienne F, Houpert R. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(2): 125-134.
- [41] Wang J, Wang C M, Meng X X, et al. Interaction between laser-induced plasma/vapor and arc plasma during fiber laser-MIG hybrid welding[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(6): 1529-1533.
- [42] 苏芮, 刘刚. 激光破岩机理及其影响因素分析[J]. *西部探矿工程*, 2013, 25(9): 1-6.
- Su R, Liu G. Mechanism and influencing factors of laser rock fragmenting[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2013, 25(9): 1-6.
- [43] 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.
- [44] Zhang W L, Huang Z Q, Kang M Q, et al. Research on multivariate nonlinear regression model of specific energy of rock with laser drilling based on response surface methodology[J]. *Optics Communications*, 2021, 489: 126865.
- [45] Boutinguiza M, Pou J, Lusquinos F, et al. Drilling of slate tiles by CO₂ laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 159(1): 83-90.
- [46] Ahmadi M, Erfan M R, Torkamany M J, et al. The effect of interaction time and saturation of rock on specific energy in ND: YAG laser perforating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(1): 226-231.
- [47] 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.
- [48] Ndeda R, Sebusang S E M, Marumo R, et al. On the role of laser pulses on spallation of granite[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2017, 4(2): 60-75.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Erfan M R, Shahriar K, Sharifzadeh M, et al. Moving perforation of rocks using long pulse Nd: YAG laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94: 12-16.
- [52] 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.
- [53] 席道瑛, 徐松林. 岩石物理学基础[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012: 340-345.
Xi D Y, Xu S L. Foundations of rock physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2012: 340-345.
- [54] Kobayashi T, Nakamura M, Kubo S, et al. Drilling a 2-inch in diameter hole in granites submerged in water by CO₂ lasers[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, March 17-19, 2009, Amsterdam, Netherlands. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2009: SPE-119914-MS.
- [55] Xu Z, Reed C, Parker R A, et al. Laser rock drilling by a super-pulsed CO₂ laser beam[J]. ICALEO, 2002(2002): 160291.
- [56] Xu Z, Reed C, Graves R M, et al. Rock perforation by pulsed Nd: YAG laser[J]. ICALEO, 2004(2004): 1406.
- [57] Ahmadi M, Erfan M R, Torkamany M J, et al. The effect of confining pressure on specific energy in Nd: YAG laser perforating of rock[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 57-62.
- [58] Rad A G, Bazargan M, Koohian A, et al. The effects of carbon dioxide laser irradiation on drilling of limestone included crude oil[J]. Journal of Modern Physics, 2014, 5(5): 248-256.
- [59] Dini A, Ahmadi M. Numerical modeling of saturation type and lateral pressure influences on thermo-mechanical stresses caused by laser drilling in granite and limestone [J]. International Journal of Geo-Engineering, 2018, 9(1): 1-12.
- [60] Ohtani K, Numata D, Takayama K, et al. Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho: YAG laser-induced jets[J]. Shock Waves, 2009, 19(5): 403-412.
- [61] Shi X M, Duan Y L, Han B, et al. Enhanced rock breakage by pulsed laser induced cavitation bubbles: preliminary experimental observations and conclusions[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6(1): 25.
- [62] 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.
- [63] Ndeda R A, Sebusang S E, Marumo R, et al. Numerical model of laser spallation drilling of inhomogeneous rock [J]. IFAC-Papers Online, 2017, 50(2): 43-46.
- [64] 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.