

激光破岩技术影响因素的研究进展

官兵*, 李士斌**, 张立刚, 陈双庆

东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318

摘要 激光破岩技术是利用高能激光实现地层复杂岩性岩石高效可控破坏的一种新型的钻井技术,在石油、天然气开采以及矿业挖掘方面极具发展潜力。然而,目前关于激光破岩技术的研究还处于室内实验和理论探索阶段,在工业应用之前还存在诸多难点。着眼于激光与岩石相互作用过程涉及的对象,总结了近年来关于影响激光破岩效果的研究成果,分析梳理了激光参数、岩石性质、激光传递介质、工作环境这四方面因素的影响机制,对现存问题和今后的研究方向提出了建议。众多的研究表明,不同类型的影响因素对激光破岩的作用机制不同,且影响因素众多。量化激光破岩多因素影响机制,筛选关键影响因素,协调多因素共同作用,是实现激光高效破岩技术应用的重要课题。

关键词 激光技术; 激光破岩; 影响因素; 激光参数; 岩石性质; 传递介质; 工作环境

中图分类号 TN249; TE242

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030003

Review on Influencing Factors of Laser Rock Drilling Technology

Guan Bing*, Li Shibin**, Zhang Ligang, Chen Shuangqing

College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China

Abstract Laser rock drilling technology is a new drilling technology that utilizes the advantages of high-energy laser to achieve high-efficiency and controllable destruction of complex lithologic rock formations. It exhibits great development potential in oil and gas exploitation and mining excavation. However, current research on laser rock drilling technology is based on indoor experiments and theoretical explorations; therefore, many challenges are to be overcome prior to its industrial application. This paper focus on the objects involved in the interaction between laser and rock, and the results on the influencing factors of rock removal by laser are summarized. Furthermore, the influence mechanism of laser parameters, rock properties, laser transfer medium, and the working environment are analyzed. Moreover, certain suggestions aiming at solving the existing problems and indicating future research directions in laser rock drilling technology research are presented. Numerous studies show that numerous different kinds of factors have different mechanisms for rock removal by laser. The quantification of the multi-factor influencing mechanism of rock removal by laser, the screening of the key influencing factors, and the coordination of the multi-factor interaction constitute the important subjects of the laser rock drilling technology applications.

Key words laser technology; rock removal by laser; influencing factors; laser parameters; rock properties; transfer medium; working environment

OCIS codes 000.4930; 350.3390

1 引言

激光破岩技术^[1,2]是一种非机械接触式的破岩方法,即:利用激光器发射出的准直光束辐射岩石表面,光能转化成热能并向岩石内部传递,受局部温度骤增的影响,岩石在热应力作用下发生破裂,而后随

着温度不断升高,岩石发生熔化、蒸发等相变破坏。激光破岩技术具有改善孔道及其周围岩石基质孔渗特性、调控孔道几何形状,以及损伤程度小等优势^[3-4],在钻进、挖掘、射孔完井、压裂增产等井下作业方面具有巨大的应用潜力^[5-7]。随着激光技术的不断成熟,激光破岩技术所形成的孔道的方位、深度

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-07-10; 录用日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(51874098)、东北石油大学研究生创新基金(JYCX_CX02_2018)

* E-mail: sygcgb@163.com; ** E-mail: lishibin_2001@sina.com

和数量等都可以得到精确控制。

激光破岩技术的关键在于控制激光与岩石相互作用的过程,实现以尽可能小的激光能量破坏最大岩石体积的目的。这一过程涉及激光参数、岩石性质,以及激光岩石相互作用的工作状态等诸多因素。为优化激光的破岩效果,阐明激光与岩石之间的影响机制,众多学者开展了大量的实验测试和理论研究;Gahan等^[8]利用1.6 kW的脉冲Nd:YAG激光分别对砂岩、页岩和石灰岩进行了定点射孔实验,分析了激光功率、重复频率、脉冲宽度、辐照时间等对激光破岩能量消耗的影响;Xu等^[9]采用6 kW的超脉冲CO₂激光研究了光束传输模式(连续波、正常脉冲、超脉冲)、辐射时间,以及吹风方式下砂岩和石灰岩的射孔破岩效果;Graves等^[10]对比了CO激光、COIL激光和Nd:YAG激光对砂岩的破岩效果。这些研究的结果显示,具有不同参数的激光辐射岩石所消耗的破岩能量不同,不同岩性的岩石在激光作用下的破坏机制不同。文献[11-13]针对激光辐射岩石表面过程中的传输介质开展了实验测试,指出了激光传输介质对激光破岩效果的影响规律。Erfan等^[14-15]研究了激光破岩过程中激光束移动状态和岩石所处外界环境不同时所形成的孔道的区别,分析了激光与岩石的作用环境对激光破岩的影响。本文结合近年来国内外在激光破岩方面的一些工作成果,从激光参数、岩石性质、激光传递介质和工作环境等方面对激光破岩技术的影响因素进行综述,以为激光破岩技术的现场应用提供一定的理论支撑。

2 激光破岩的相关概念

在激光破岩过程中,比能(SE)和穿孔速率(ROP)通常被作为衡量岩石破坏效率的评价标准^[5,10,16]。比能越小,表示激光破岩效率越高^[12];穿孔速率越大,表示激光破岩效率越高^[17-18]。

比能是指岩石达到稳定破坏状态后,移除单位体积岩石所需要的能量,可以定义为入射激光的平均功率与破坏岩石体积对时间导数的比值,表达式为^[10]

$$R_{SE} = \frac{P}{dV/dt}, \quad (1)$$

式中: R_{SE} 为比能,单位为 J/cm^3 ; V 为岩石的体积,单位为 cm^3 ; t 为激光破岩时间,单位为 s ; dV/dt 为破坏岩石体积对时间的导数,单位为 cm^3/s ; P 为入射激光的平均功率,单位为 W 。

穿孔速率是指激光照射岩石的穿孔深度与激光照射时间的比值,也可以定义为激光功率密度与比能的比值,表达式为^[19]

$$v_{ROP} = \frac{P_{SP}}{R_{SE}} = \frac{P/A_L}{R_{SE}} = \frac{D}{t}, \quad (2)$$

式中: v_{ROP} 为激光破岩的穿孔速率,单位为 cm/s ; A_L 为岩石在激光作用后产生的孔道的横截面面积,单位为 cm^2 ; P_{SP} 为激光的功率密度,单位为 W/cm^2 ; D 为激光破岩深度,单位为 cm ; t 为激光照射时间,单位为 s 。

3 影响因素的作用机制

比能和穿孔速率依赖于激光与岩石的特征参数^[8,20-21]。根据激光与岩石相互作用过程中的作用对象,以激光参数、岩石性质、激光传递介质和工作环境这四方面的影响参数为自变量,以激光照射岩石表面形成的孔眼直径、深度、比能和穿孔速率等作为激光破岩效率的评价标准,对激光破岩影响因素的作用机制进行分析与总结。

3.1 激光参数

评价激光辐射岩石的破岩效率时,首先要确定激光的特征参数,而能够表征激光特性的参数就是影响激光破岩技术的相关因素。

3.1.1 辐射时间

比能和穿孔速率都是辐射时间的非线性函数^[20,22-23]。随着激光辐射时间延长,射孔深度先增加后趋于平稳^[23],射孔直径逐渐增大^[24-26],比能整体呈上升的趋势,而穿孔速率呈下降的趋势^[27-29],如图1所示。与激光功率相比,激光辐射时间对破岩的影响更明显^[30]。

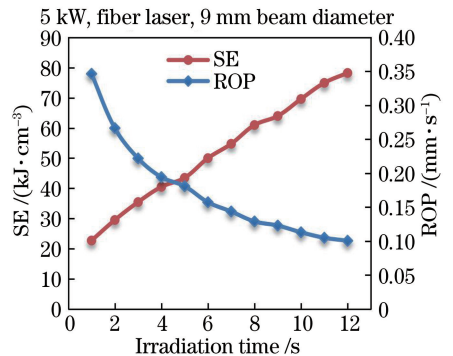


图1 激光辐射石灰岩的时间对比能和穿孔速率的影响^[29]

Fig. 1 Effects of laser irradiation time on SE and ROP for limestone^[29]

在激光作用下,当激光功率一定时,随着辐射时间增加,岩石表面积聚的能量越来越多,在岩石温度

达到熔点之前,短辐射时间内激光能量的增加有利于岩石的破坏,射孔深度和射孔直径逐渐增加,但这段时间对于大功率激光器而言是十分短暂的;当辐射时间较长时,温度达到岩石内部某些矿物的熔点后,孔道周围的矿物颗粒发生熔化的概率开始增大^[10,31],岩石破坏由热碎裂转向热熔化,有效的岩石去除体积越来越少,穿孔速率快速下降,更多的激光能量用于岩石的反复熔化和蒸发,同时由于射孔深度的增加,孔道内杂物排出的效率降低,而射孔深度的变化趋于平稳,大量的能量被孔内杂质吸收、反射和散射,形成一定的能量损失,比能显著增加^[8,32]。

3.1.2 激光功率

激光功率是指激光器在单位时间内所输出的能量,通常以平均功率(或连续功率)、峰值功率、功率密度等方式表征,其中激光平均功率是激光材料相互作用过程中对热传递最具影响的代表性参数^[33]。

随着激光平均功率增大,岩石在激光作用下形成的射孔深度先逐渐增大后趋于平稳,射孔直径逐渐增大^[24],比能先减小后增大,穿孔速率则先增大后下降^[8,29],如图2所示。在激光与岩石相互作用过程中,当激光的平均功率较低时,激光能量向岩石传递,岩石表面温度逐渐升高,初始时大部分热能用于使岩石内部的微观结构发生变化,如岩石热膨胀、矿物分解、微裂缝产生等,此时能量不足以使岩石破碎,因此比能较大;随着激光平均功率增大,有效时间内岩石吸收的能量增加,足以满足岩石破坏所需的能量,激光辐射产生的孔道深度、直径都开始逐渐增大^[23],去岩量、去岩效率增大,穿孔速率增大^[31],比能下降^[27];当入射能量使得岩石内部温度临近矿物熔点时,意味着岩石热破碎的结束,此时比能达到最小值,破岩效率最高,最有利于岩石的破坏;当激光入射平均功率增大到一定值以后,入射能量过高,岩石发生熔化和蒸发,能量消耗增大,同时随着射孔深度的增加,岩屑和熔融物无法及时排除,射孔深度变化趋于平稳,穿孔速率随之下降,导致消耗比能增大。对于连续激光器,一般用平均功率作为参数;而对于脉冲激光器,其功率则被定义为峰值功率,其平均功率等于单个脉冲的峰值功率、脉冲宽度和脉冲重复频率的乘积^[8]。激光的平均功率与峰值功率、脉冲宽度、脉冲重复频率呈正比。当脉冲宽度和脉冲重复频率一定时,脉冲激光峰值功率与激光平均功率对激光破岩效率的影响规律相同。激光功率密度也被称为激光强度,是指激光光束在单位面积上

的功率^[34],由激光功率和激光束的截面积共同决定。当光束直径一定时,激光功率密度越小,岩石在激光作用下用于产生熔化的概率越低,射孔和移除岩石所需的比能越小^[10,35]。

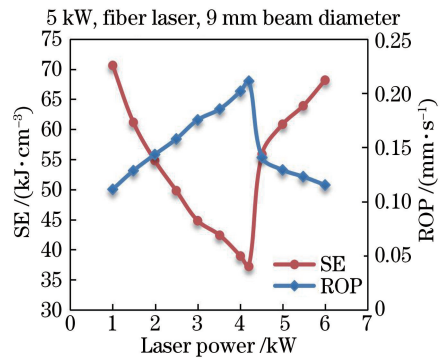


图2 激光辐射石灰岩的功率对比能和穿孔速率的影响^[29]

Fig. 2 Effects of laser power on SE and ROP for limestone^[29]

3.1.3 脉冲宽度和脉冲重复频率

激光的脉冲宽度是指单个脉冲的持续时间,量级越小,激光作用的时间越短。激光的脉冲重复频率是指在1 s内脉冲重复出现的次数。脉冲激光可以通过调节激光的重复频率来控制其输出的平均功率。在激光发射类型、波长、峰值功率、平均功率、强度相同的情况下,随着脉冲宽度和脉冲重复频率增大,射孔深度先增大后减小,射孔直径逐渐增大,比能先减小后增大,穿孔速率先增大后降低^[36]。与脉冲重复频率相比,脉冲宽度对比能的影响更显著^[8,32]。

脉冲重复频率的增大会升高岩石中的最高温度,增大热循环频率和激光驱动冲击波强度,使有效的能量更多地用于岩石的去除,从而降低比能,提高激光的破岩效率^[37];脉冲宽度的增加可以提高单脉冲辐射岩石的能量,满足岩石内部裂缝形成的瞬时能量,增大穿孔速率,降低比能。但是长时间的激光脉冲^[38]或过高的激光脉冲频率^[35]都会使激光向岩石释放的能量超过其局部表面剥落所需的能量,增加岩石的热输入,使得局部热量过多,从而限制岩石内裂缝的产生,增大岩石熔化的概率,致使比能增大。

3.1.4 光束传输模式

激光光束传播模式包括连续波模式和脉冲波模式,其中脉冲波是比连续波更好的激光破岩模式^[9-10,27]。在相同的工作条件下,脉冲波比连续波破岩的穿孔速率更快,比能也相对更小,破岩效率更高。在激光破岩过程中,高功率连续激光连续射击岩石,在几秒内就会产生等离子体(这里的等离子体

是指在岩石表面产生的电离云,由激光辐射岩石表面矿物致使其蒸发后继续吸收激光能量而产生)^[27],而且这些等离子体不能被吹扫气体吹走,这就阻碍了激光对岩石的进一步辐射,增大了能量消耗,从而使得激光破岩的效率明显降低。对于脉冲激光,脉冲节点之间的弛豫时间为岩石吸收消化能量提供了一个缓冲^[39],使得脉冲激光在破坏岩石的同时可以有效地吹扫去除岩屑,避免岩石熔化,增大岩石散裂的概率,从而使穿孔速率增大。

3.1.5 激光波长

激光波长是指激光器的输出波长,是激光器输出激光光束的重要参数。不同的激光类型具有不同的激光波长。统计已有的激光破岩室内实验发现^[10],所使用的最长波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ (CO_2 激光器),最短波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ (Nd:YAG激光器)。尽管波长有一个数量级的变化,但是考虑到激光破岩消耗比能误差的存在,可认为激光波长对激光与岩石之间的相互作用并没有显著影响,对破岩消耗比能的影响不大。

3.1.6 光束直径

适当增大入射激光的光束直径可以降低破岩消耗比能,提高穿孔速率,同时射孔直径的变化要比射孔深度的变化更为显著^[18]。在入射激光功率相同的情况下,光束直径越大,激光强度就越小,从而增大了岩石表面的能量分布,降低了局部能量积聚过快的可能,从而减小了激光辐照面下岩石的熔化概率,使更多的能量可以用于岩石的热破碎,从而获得

了较大的穿孔速率和较小的比能^[10]。

3.1.7 光束组合

将多个单一的激光光束部分重叠地排列成射束组,能够使岩石在激光作用下实现较大孔眼,而这一过程对激光破岩的影响主要体现在激光脉冲间的弛豫时间和光束重叠的几何组合方式两方面^[3,40-41]。激光脉冲间的弛豫时间是指激光头发射一束脉冲光到物质表面的一点后到其返回同一点所需的时间,与光束的数量、脉冲宽度和激光头移动的时间有关^[35]。当光束连续射击在一个点上时,热量无法迅速散去,岩石熔化的概率就会增大,所消耗的比能就会增多。而有效的弛豫时间能够防止岩石熔化,也就是说,弛豫时间的增加可以减缓比能的增大,如图3所示。但是,如果测试过程中的弛豫时间较长,则再次射击同一点之前,必须等待更长的时间,穿孔速率就可能会受到限制。光束重叠的几何组合方式包括光束的数量、光束的排列方式和脉冲频率的设置。许多小点的几何组合不仅会产生更大的孔,还可以避免因大量熔融物产生而造成的能量消耗。对于几何组合方式,光斑的重叠量和间距、焦距距离和光束截距角都是设计激光多光束组合的关键^[40-41]。合理的排列组合方式可以提高激光破岩的去除效果,如六边形的光束重叠组合相比其他重叠方式可以获得最佳的覆盖、重叠控制,并且最接近圆形轮廓,如图4所示。此外,改变孔间距可以防止激光破岩后剩余岩脊的形成,减小激光头向下移动的阻碍。

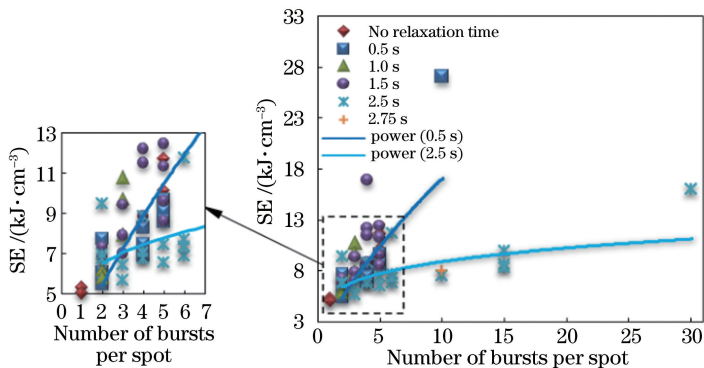


图3 不同弛豫时间下激光破岩所需比能随其脉冲数量的变化趋势^[40]

Fig. 3 Change trends of SE with increasing numbers of bursts per spot under different relaxation time^[40]

3.2 岩石的性质

不同的岩石,受自身性质的影响,在激光作用下发生破坏后表现的行为是不同的。影响激光破岩行为的岩石性质可分为岩石的热物理参数、矿物组成和表现形貌等。

3.2.1 岩石的热导率

激光破岩主要靠由光能转化而成的热能使岩石发生破坏,而直接决定破坏行为的热物理参数是岩石自身的导热能力,即岩石的热导率。热导率越高,表示岩石表面在激光作用下吸收的热量向内扩散得

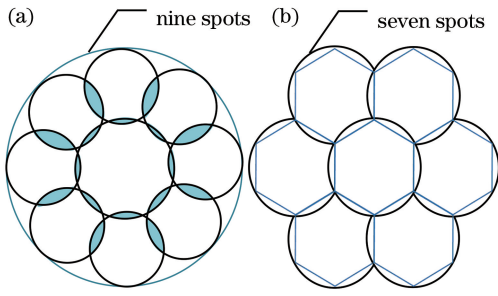


图4 多个激光光束重叠组合的几何排列方式^[3]。

(a)激光束重叠;(b)六边形重叠

Fig. 4 Different configuration of multiple overlapping laser beam spots^[3]. (a) Overlapping of laser beams; (b) hexagonal overlap

越快,局部发生热量积聚的可能性越小,越能降低因能量分布不均而造成的局部矿物熔化,从而使激光破岩消耗的比能相对下降^[5]。但是,激光辐射岩石后传递到岩石表面的能量很容易超过岩石自身的导热能力,使得热能在岩石局部积聚,岩石温度持续上升,易导致岩石矿物熔融、矿物分解、流体气化,以及裂隙生成等二次效应^[3,42]的发生,导致激光破岩能量的非必要损失,使比能显著增大^[8,32]。

3.2.2 矿物成分

不同类型的岩石由不同的矿物成分组成,从而导致岩石在激光作用下的破坏机制也有所不同。对于砂岩和页岩来说,激光破岩的主要机制是依靠吸收激光能量引起的热破碎和热熔化来去除岩石^[29]。大部分砂岩和页岩中都含有黏土矿物,而黏土分子中含有水,在激光的热作用下,水在高温下汽化,导致岩石体积膨胀,出现裂缝,随着温度不断升高,裂缝扩展,最终导致岩石发生热破碎,甚至熔化^[43]。花岗岩的激光破岩行为与砂岩类似^[27]。在相同的激光辐射条件下,花岗岩和页岩会剥落,而砂岩只能在表面发生熔化^[44],这说明花岗岩和页岩受到破坏所需的比能要比砂岩小。这是因为砂岩中的石英含量较高,二次效应(包括熔化和汽化)对激光能量的消耗更大^[28,38]。

不同于其他岩石,石灰岩(即碳酸盐岩)的主要成分为碳酸钙,激光破岩主要是利用碳酸钙的热分解过程来移除岩石^[9]。在高温作用下,石灰岩内的碳酸钙吸热分解,产生的气体会吸收一部分激光辐射的能量,使得较少的能量得以传递到岩石上,增大了破坏岩石所需消耗的比能^[5]。此外,石灰岩的导热率相对较低,易因受热不均而局部发生热膨胀,倾向于以较小的碎片分解^[45]。相比石灰岩,砂岩具有

更高的激光能量利用率,更容易形成裂缝,继而发生破坏。文献^[28-29,46]指出,在相同的实验条件下,石灰岩消耗的比能大于砂岩,如图5所示。但是,文献^[31,38]通过对数值模拟与已有的实验结果指出,激光辐射砂岩使其破坏所消耗的比能要大于石灰岩,如图6所示。造成以上结论差异的原因主要在于所选定岩石的矿物含量不同,砂岩中的石英含量越高,其导热性越好,吸收激光能量使其达到破坏所需的比能就越大。

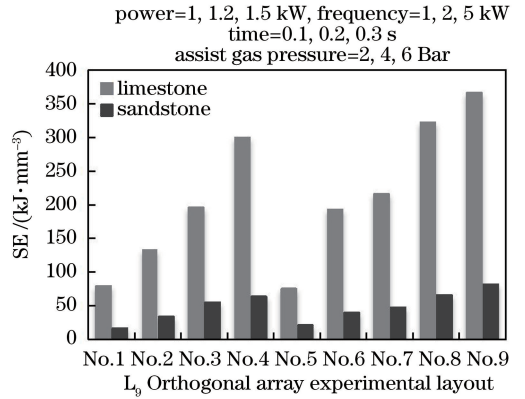


图5 在L₉正交实验的不同参数组合下,激光破岩所需的比能^[28]

Fig. 5 SE needed for laser rock breaking at different parameter combinations in L₉ orthogonal array experimental layout^[28]

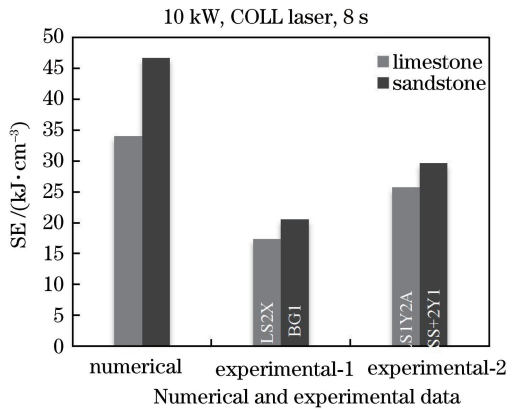


图6 数值模拟与实验测试得到的激光破岩所需的比能^[31,47]

Fig. 6 SE needed for laser rock breaking obtained by numerical simulation and experimental test^[31,47]

3.2.3 矿物充填

矿物的良好充填方式可以增大岩石的导热性,降低激光破岩消耗的比能^[22]。当岩石吸收激光能量的速率超过耗散速率时,岩石局部温度升高,岩石中的矿物开始熔化,矿物颗粒的充填越紧密,吸收激光能量产生的温度传递速率越快,产生的熔体越少,因熔化吸收而浪费的能量就越少,因此用于破岩消

耗的比能就相对更小。因此,在激光破岩过程中,紧密堆积的矿物颗粒比松散堆积的矿物颗粒需要更低的比能^[5]。

3.2.4 胶结强度

岩石的胶结强度实际上与岩石的热导率有关^[48]。岩石中矿物颗粒之间的胶结程度越大,岩石的热导率就越大,破坏岩石额外损失的能量就越少。若岩石矿物颗粒之间的胶结程度越小,则其热导率越小,岩石吸收激光产生热能的速率大于其传导速率,能量积聚,增大了岩石熔化的概率,从而导致能量损失,比能增大,降低了激光的破岩效率。

3.2.5 岩石裂缝

岩石裂缝的存在会导致激光能量的损失,增加比能^[5]。通常,砂岩和页岩裂缝中充填着地层流体,在激光的辐射下,岩石内部温度升高,流体耗能气化,气化后的流体难以排出,迫使岩石体积膨胀,内部压力增大,导致裂缝进一步起裂和扩展,裂缝内流体的相变消耗能量,造成了更大的能量损失。

3.2.6 饱和和流体

地下没有一个地层是空的,充满了水、油或气,因而岩石孔隙内必然充盈着不同的流体,不同类型流体的饱和使岩石在激光作用下的破坏效率不同。Batarseh^[19]利用6 kW COIL(化学氧碘)激光器分别对干燥砂岩、清水饱和砂岩、盐水饱和砂岩、油饱和砂岩进行了激光破岩实验,指出饱和液体岩样比干燥岩样消耗的比能更高。文献^[20, 22]测试了400 W Nd:YAG激光破除干燥岩石、水饱和花岗岩、油饱和花岗岩和石灰岩所消耗的比能,发现水饱和岩样比油饱和岩样需要更多的能量,而油饱和岩样比干燥岩样需要的能量更多,如图7所示。这是因为当受到激光辐射时,加热液体比加热空气需要更多的能量,液体在高温下气化消耗了额外的能量,从而增大了比能。对比水饱和岩样和油饱和岩样在激光作用下的破坏情况可知,水和油的气化点、比热容有很大差别,水的气化需要更多的能量和时间,而油对激光能量的吸收率更高,如在1.06 μm 波长下,重油对激光能量的吸收率约为41.3%,而水的吸收率约为0.02%,所以水饱和岩样和油饱和岩样的比能相差很大。

饱和流体的存在会增大激光破岩的比能。但是,Gahan等^[8, 32, 49]分别采用1.6 kW Nd:YAG激光和30 W CO₂激光辐射干燥砂岩、水饱和砂岩以及混凝土样品后发现,水饱和岩样的比能、穿孔速率相比干燥岩样变化更显著,岩样中水的存在倾向于

降低比能,如图8所示。这是因为水分改变了激光射孔从蒸发到散裂的主要破坏机制,激光能量在薄层中被岩石和水吸收,水沸腾导致岩石表面发生强烈的蒸发和爆炸,从而加快了岩样的破坏^[50],不同于干燥岩样中颗粒受热经历的膨胀、熔化和蒸发,激光能量直接加速了颗粒热膨胀过程中的裂缝扩展,所以激光作用下水饱和岩样发生破坏所消耗的比能更少。

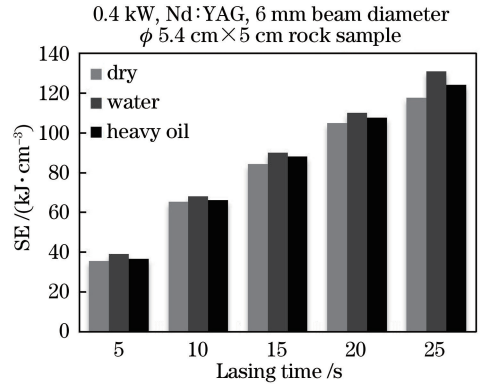


图7 激光破除不同饱和和流体石灰岩所需的比能^[20]

Fig. 7 SE for limestone with different saturated fluids by laser radiation^[20]

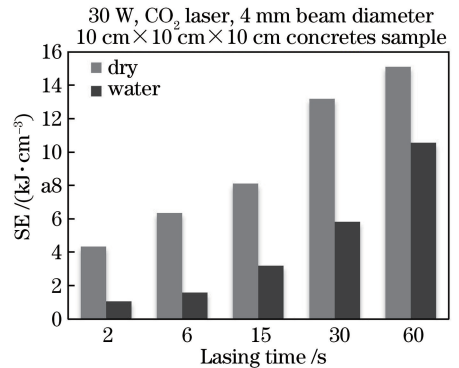


图8 激光破除干燥混凝土岩样和水饱和混凝土岩样所需的比能^[49]

Fig. 8 SE for dry and water saturated concrete samples by laser radiation^[49]

不同学者关于岩石饱和流体对激光破岩效果影响规律的研究结果有所不同,这主要是由于开展研究的实验条件存在差异,如激光类型、激光参数、岩石特征参数的选择不同。考虑到不同激光辐射不同类型岩石时所存在的内部参数的配伍性,关于岩石饱和度对激光破岩技术的影响机制尚不能得出定性结论,仍有待进一步深入研究。

3.2.7 岩石尺寸

岩石尺寸包括岩样的直径和厚度。随岩样的直径和厚度增大,比能先减小后趋于平稳^[10, 29]。在较小直径和厚度的岩样中,产生裂缝所受的约束阻碍

较小,相对耗能较大;随着岩样的直径和厚度增加,产生裂缝所受的约束越来越大,产生的裂缝相对较少,能量损失少,消耗的比能减小;但当岩样的直径和厚度增大到一定值时,岩样边界对激光破岩局部产生热应力的影响效应就会消失^[46],比能趋于平稳。因此,在室内进行激光破岩实验时,可以据此选择岩样的尺寸。但对于实际的井下作业而言,储层岩石尺寸可近似为无穷大,岩石尺寸对破岩效率没有影响。

3.2.8 岩石的沉积取向

岩石是一种各向异性的非均质多孔介质,在不同的沉积方向上,矿物的组成和胶结程度都会有所不同。文献[29,46]等在室内针对正方体岩石样本的6个沉积表面(A、B、C、D、E、F)进行了激光定点射孔实验,结果显示,砂岩或石灰岩的6个表面在激光作用下形成孔道所需的比能基本一致,如图9所示,说明岩石沉积取向对激光破岩效率没有影响。

3.2.9 岩石的表面粗糙度

岩石的表面粗糙度也会影响激光能量的传输^[5],平坦的岩石表面通过反射使能量浪费,而非非常粗糙的表面则通过散射使能量浪费,这两种情况都会增大激光破岩消耗的能量。

3.3 激光传递介质

激光破岩需要传递介质将激光能量传递到岩石表面,能够传递激光的介质可以分为气体和液体两种^[11,13,46]。

3.3.1 介质类型

气体传递介质包括空气、氮气、二氧化碳、稀有气体等。从经济的角度出发,空气成本最低,但空气中含有氧气,其在高温下易与其他物质发生反应,如激光辐射煤岩时会发生氧化燃烧^[13];从安全的角度出发,稀有气体的化学性质相对稳定。所以,激光破岩气体介质的选择需要从安全、高效的角度进行综合优选。

液体传递介质包括清水、污水,以及油井产出液等。激光在液体介质中传输能量时,随着入射能量增大,激光光束周围的液体介质会在高温作用下发生气化,气化蒸发会消耗大量的激光能量,所以相较于气体传递介质,液体传递介质条件下激光破岩消耗的比能更大。将污水、油井产出液与清水进行比较可知,在污水或油井产出液传递条件下,激光破岩消耗的比能要比清水条件下大很多,并且射孔深度也远小于清水条件下的^[11,46]。这是由于污水或油井产出液中含有大量的固体杂质,导致大量的激光能

量被其他物质吸收或散射,从而增大了激光能量在污水或油井产出液中的衰减程度和分散程度,大大降低了作用于岩石表面的能量,因此破坏岩石所消耗的比能更多。

3.3.2 介质深度

随介质深度逐渐增加,激光能量的衰减率越来越小,但到达岩石表面的能量越来越少,导致岩石能够被破坏的体积减少,比能消耗增大;当介质深度达到一定程度时,污水或油井产出液与清水中的能量衰减曲线趋于重合,岩石在激光辐射下去除的岩石质量趋于0,如图10所示,说明液体介质深度是比液体介质类型更能影响激光能量传输的因素^[11]。

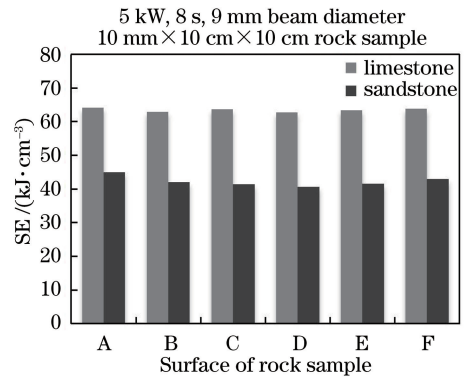


图9 石灰岩和砂岩沉积方向对比能的影响^[29]

Fig. 9 Effects of deposition orientations of limestone and sandstone samples on SE^[29]

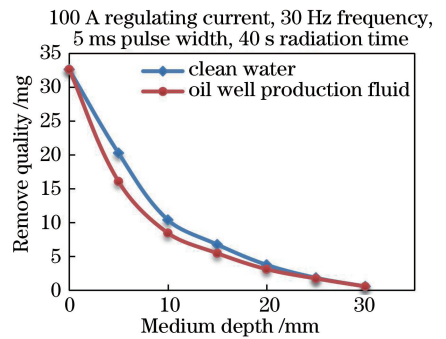


图10 介质深度与激光破岩去除质量之间的关系^[11]

Fig. 10 Relationship between medium depth and remove quality of rock^[11]

3.4 工作环境

选定激光参数、岩石性质和激光传递介质之后,还要考虑激光辐射岩石的工作环境。激光与岩石所处的外界压力条件、岩屑吹扫系统的工作方式,以及激光与岩石的相对运动状态等都是影响激光破岩技术的重要因素。

3.4.1 压力条件

大部分研究激光、岩石相互作用的室内实验都

是在大气压力下进行的,而要将激光破岩技术应用到现场就必须考虑井下作业的压力环境。2005年, Gahan 等^[51]首次研究了在井下压力条件下激光、岩石的相互作用过程,利用 5.34 kW 掺铒光纤激光器辐照处于不同围压、轴压与孔隙压力组合条件下的砂岩和石灰岩,测试了激光破岩的体积以及比能(图 11),并指出井下压力和应力条件能够促进激光破岩效率的提高。在轴向应力和围压应力下对岩石进行激光操作,可以改善激光破岩的条件,这是由于更紧密的颗粒间的接触提高了激光作用下岩石的热扩散率,光束能量转化而成的热量在岩石中扩散得较快,矿物熔化的概率低,从而有效地降低了比能。2018年, Erfan 等^[15]测试了 500 W 光纤激光器在不同环境温度、液体压力和围压状态下辐射石灰岩的射孔深度、比能(图 12),以及获得的穿孔速率,结果表明:随着岩石所受压力状态增大和温度升高,岩石的弹性和强度增大,激光辐射引起的热应力减小,促使激光破岩射孔深度减小,比能增加,穿孔速率降低;温度、液体压力和围压这三个因素,无论是耦合作用还是单独作用,都会降低激光的破岩效率。受激光功率和岩石所处压力条件差异的影响,不同学者得到了不同的研究结果,但都证实了激光辐射岩石所处的压力条件是影响破岩效率的重要因素。

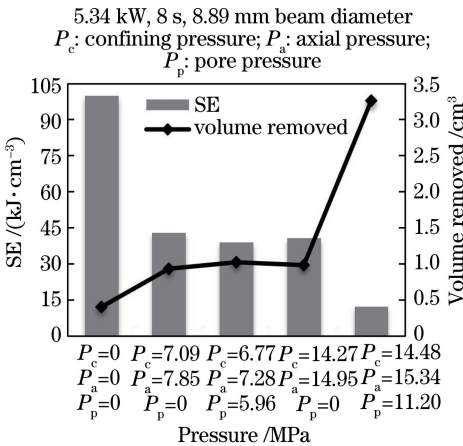


图 11 不同的三轴压力组合下激光破除石灰岩的比能和移除体积^[51]

Fig. 11 SE and volume removed variation against tri-axial pressure conditions for limestone by laser radiation^[51]

3.4.2 吹扫方式

激光破岩过程中是否具有辅助气体吹扫除屑,吹扫气体的方向及其气流速度等都对激光破岩比能和穿孔速率有显著影响。激光作用于岩石后,岩石碎裂,若岩屑不能及时清除,就会阻碍激光能量的进

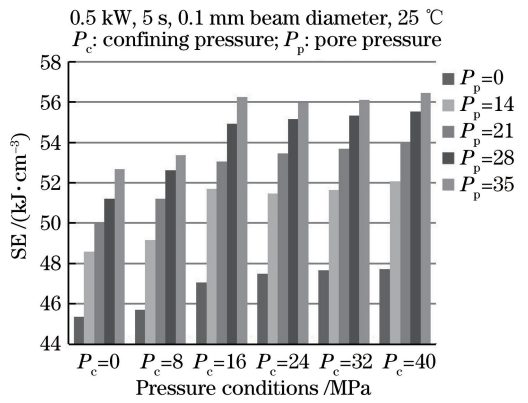


图 12 不同液压和围压组合下激光破除石灰岩的比能^[15]
Fig. 12 SE variation against confining pressure and hydraulic pressure for limestone by laser radiation^[15]

一步传递,同时,岩屑占据了孔道位置,岩屑就会吸收激光能量,甚至发生熔化蒸发,造成了能量的不必要损失,使比能显著增加,穿孔速率下降。Xu 等^[9]进行了 CO₂ 激光辐射砂岩和石灰岩的实验,指出相比吹扫气体随激光头移动,固定位置吹扫去岩(吹扫喷嘴角度与水平面呈 60°)的效果更好,产生的孔道更加清洁(图 13)。张建阔^[52]通过光纤激光定点射孔实验发现,在相同的条件下,同轴吹风清除岩屑的效果要好于侧向吹风,形成的孔道更深,如图 14 中的孔眼 A 和 B₁ 所示。此外,吹扫气体的流速也很关键^[28,53],既要保证能够将激光破岩孔道中的岩屑粉末有效除净,又要避免激光能量在岩石表面积聚的热量被过早地带走,必须合理设计吹扫气流的速度。

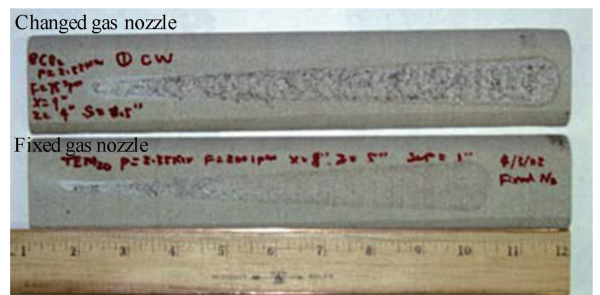


图 13 改变和固定吹扫喷嘴位置时的激光射孔线性孔道^[9]
Fig. 13 Linear tracks produced with changed (top) and fixed (bottom) purging gas position^[9]

3.4.3 激光入射状态

激光作用于岩石表面时,激光头与岩石的相对位置决定着激光的入射状态。以垂直于岩石表面的轴向为基准,随着激光入射角度增大,岩石在激光作用下形成的表面孔眼形状由圆形向椭圆形转变,射孔深度相应减小^[54],如图 15 所示。随着激光焦点与岩石表面距离的增加,射孔深度与射孔直径先增

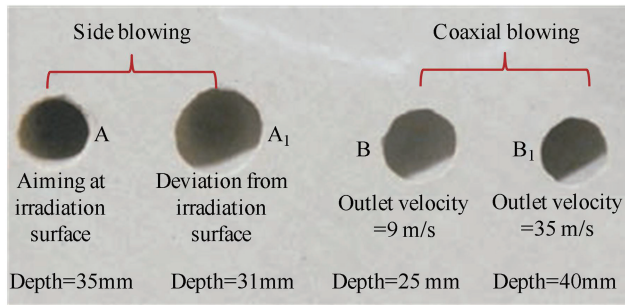


图 14 同轴吹风与侧向吹风条件下的激光射孔孔眼^[52]

Fig. 14 Holes obtained at side blowing and coaxial blowing^[52]

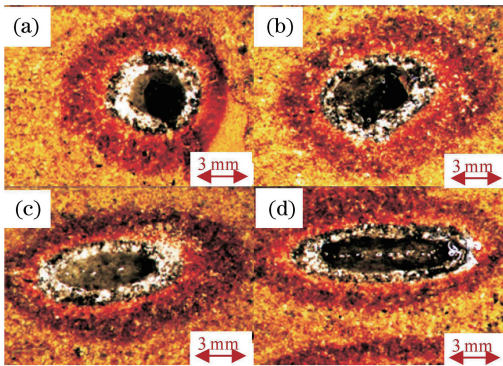


图 15 激光辐射砂岩的入射角度对钻孔形貌的影响^[54]。(a) 0°; (b) 60°; (c) 70°; (d) 75°

Fig. 15 Effect of incident angle on laser perforation morphology for sandstone^[54]. (a) 0°; (b) 60°; (c) 70°; (d) 75°

大后减小,消耗的比能先减小后增大,存在最优的离焦量使激光破岩消耗的比能最小^[26]。此外,激光头移动射孔可以改变激光破岩孔道的形状。Erfan等^[14]指出,激光头定点射孔时,岩石形成圆锥形孔洞,而激光头以激光穿孔速率向岩石表面轴向移动时,可以形成均匀的圆柱形孔洞,如图 16 所示。

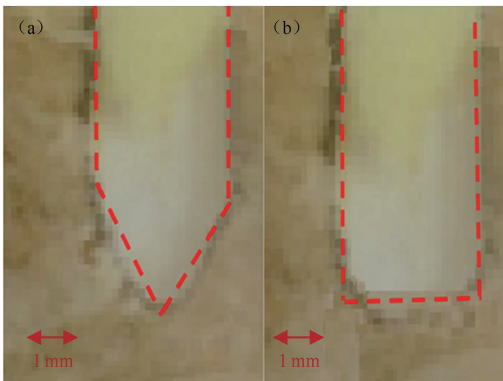


图 16 石灰岩中激光射孔薄片的剖面图^[14]。

(a) 固定射孔; (b) 移动射孔

Fig. 16 Thin section of penetrated hole in limestone^[14].

(a) Fix perforation; (b) moving perforation

3.4.4 岩样转速和激光头距轴线的半径

考虑到激光井下辅助破岩时钻具的旋转钻进过程,谢慧等^[30]利用电机驱动的卡盘带动岩样旋转,同时改变激光头距轴线的半径,研究了不同参数组合下的激光辅助破岩过程,得到了不同岩样转速和激光头距轴线半径下去岩量不同的结论。

4 结束语

激光破岩是一个多相态、多阶段的复杂过程。为了更好地梳理激光与岩石之间相互作用的机制,将激光破岩过程中所涉及的影响因素分为激光参数、岩石性质、激光传递介质与工作环境 4 个方面,分析总结了对应各类因素中所包含的相关子因素对激光破岩能力的影响。

虽然关于激光破岩影响因素的研究已有很多,但对于其成果的转化应用依然面临着许多挑战: 1) 在研究激光破岩影响因素的实验中,测试手段和标准尚未统一,不同的学者采用不同的激光设备辐射不同性质的岩石,而且对于同一影响因素目前尚不能给出定性的结论,完善的影响机制有待进一步探究。同时,定性的破岩机制并不能满足激光破岩技术工业化应用的需求,量化多因素影响机制对于激光破岩技术的实际应用具有重要作用。2) 激光破岩过程涉及的因素众多,分析研究工作冗杂,如何在尽可能还原激光破岩现场应用的前提下,实现对关键影响因素的筛选判别仍是目前较难解决的技术问题。3) 激光破岩技术实质上就是激光、岩石与流体之间相互作用的过程,集合了多因素多物理场的耦合作用,如何通过协调多因素之间的共同作用来提高激光破岩能力是激光破岩技术研究的的发展趋势。

随着激光技术的日趋成熟以及传统破岩工艺面临的技术瓶颈,激光破岩技术必将给石油工程技术的发展带来质的飞跃。厘清激光与岩石之间相互影响的机制是激光破岩技术实现工业应用的前提,因

此,关于激光破岩影响因素的分析总结对于激光破岩技术的进一步研究具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] Xu Z Y, Reed C B, Graves R, et al. Rock perforation by pulsed Nd : YAG laser [C] // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 4-7, 2004, San Francisco, California, USA. Orlando: Laser Institute of America, 2004: 1406.
- [2] Wang S L, Fang F Z. High power laser and its development[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090005.
王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090005.
- [3] Sinha P, Gour A. Laser drilling research and application: an update [C] // SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition, October 16-18, 2006, Mumbai, India. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006: SPE-102017-MS.
- [4] Batarseh S I, Graves R, Al Obaid O, et al. High power laser technology in downhole applications, reshaping the industry[C] // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, November 13-16, 2017, Abu Dhabi, UAE. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2017: SPE-188507-MS.
- [5] Adeniji A W. The applications of laser technology in downhole operations: a review [C] // IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference, January 20-22, 2014, Doha, Qatar. [S. l.: s. n.], 2014.
- [6] Li X J, Dong Y W, Yin C P, et al. Geometric parameters evolution experiment of hole during femtosecond laser helical drilling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502008.
李效基, 董一巍, 殷春平, 等. 飞秒激光螺旋加工小孔几何参数演化实验研究[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502008.
- [7] Batarseh S I, Abass H H, Al-Mulhem A A, et al. High power laser application in openhole multiple fracturing with an overview of laser research; past, present and future [C] // SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, April 8-11, 2012, Al-Khobar, Saudi Arabia. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2012: SPE-160836-MS.
- [8] 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. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2001: SPE-71466-MS.
- [9] Xu Z, Reed C B, Parker R A, et al. Laser rock drilling by a super-pulsed CO₂ laser beam [C] // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. LIA, 2002: 160291.
- [10] Graves R M, Araya A, Gahan B C, 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. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2002: SPE-77627-MS.
- [11] Yang Y, Sun X N, Cheng C J, et al. The experimental study of feasibility for well laser perforation and the analysis of mechanism for sand control [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(33): 8855-8858.
杨阳, 孙晓娜, 程春杰, 等. 油井激光射孔可行性实验研究及防砂机理分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(33): 8855-8858.
- [12] Zhang Y B, Lu B L, Jiang T, et al. The research about the laser rock-crushed characteristics [J]. Laser Journal, 2013, 34(5): 55-56.
张云博, 陆宝乐, 蒋涛, 等. 激光破岩特性研究 [J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 55-56.
- [13] 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.
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.
- [14] 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.
- [15] Erfan M, Shahriar K, Sharifzadeh M, et al. Coupled THM processes' effect on specific energy in continuous wave fiber laser rock perforation [J]. Journal of Laser Applications, 2018, 30(3): 032005.
- [16] Li G S, Li J H, Shan P C, et al. Effect of WC-reinforced Ni60AA on cracks and hardness [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021602.
李高松, 李金华, 单鹏超, 等. WC增强 Ni60AA 对裂纹与硬度的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2019,

- 56(2): 021602.
- [17] Xu Z, Reed C B, Parker R, et al. Laser spallation of rocks for oil well drilling [C] // Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004, October 4-7, 2004, San Francisco, CA, USA. Orlando: Laser Institute of America, 2004: 1803.
- [18] Hafez A, Ibrahim E-S, Omar E-S, et al. Laser drilling using Nd:YAG on limestone, sandstone and shale samples: ROP estimation and the development of a constant ROP drilling system [C] // SPE North Africa Technical Conference and Exhibition, September 14-16, 2015, Cairo, Egypt. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2015: SPE-175848-MS.
- [19] Batarseh S. Application of laser technology in the oil and gas industry: an analysis of high power laser-rock interaction and its effect on altering rock properties and behavior [D]. Colorado: Colorado School of Mines, 2002: 63-71, 137-138.
- [20] 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.
- [21] 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. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2003: SPE-84418-MS.
- [22] Erfan M R, Ahmadi M, Ashena R, et al. Drilling of middle-Eastern reservoir carbonate rocks by high power Nd:YAG laser [C] // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, November 1-3, 2010, Ho Chi Minh City, Vietnam. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2010: SPE-134217-MS.
- [23] 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.
- [24] Peng H X, Gu Y F, Wang C M, et al. Study of laser perforating process on rock [J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 525-529.
彭汉修, 谷亚飞, 王春明, 等. 岩石的激光射孔工艺研究 [J]. 应用激光, 2013, 33(5): 525-529.
- [25] Li S B, Li K X, Zhang L G. Influence of laser power and irradiation time for laser rock fragmentation [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017 (3): 121-123, 127.
李士斌, 李可心, 张立刚. 激光功率和照射时长对激光破岩的影响 [J]. 能源与环保, 2017(3): 121-123, 127.
- [26] Li K X. Analysis of mechanism and influencing factors of laser breaking rock [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017: 33-39.
李可心. 激光破岩机理及影响因素的分析 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017: 33-39.
- [27] Elahifar B, Esmaeili A, Prohaska M, et al. An energy based comparison of alternative drilling methods [C] // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, October 24-26, 2011, Muscat, Oman. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-148166-MS.
- [28] Bharatish A, Kishore Kumar B, 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.
- [29] 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.
- [30] Xie H, Zhou Y, Dong H R, et al. Experimental study on laser assisted rock breaking [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(4): 152-154, 157, 170.
谢慧, 周燕, 董怀荣, 等. 激光辅助破岩试验研究 [J]. 石油天然气学报, 2013, 35(4): 152-154, 157, 170.
- [31] 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.
- [32] Figueroa H G, LaGreca A, Gahan B C, et al. Rock removal using high-power lasers for petroleum exploitation purposes [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4760: 678-690.
- [33] Zhao W N, Huang Y H, Song H W, et al. Multi-scale analysis model of thermal-mechanical damage effect in high-power continuous-wave laser irradiation of CFRP laminates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602003.
赵伟娜, 黄亿辉, 宋宏伟, 等. 高功率连续激光辐照 CFRP 层合板热力破坏效应多尺度分析模型 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602003.
- [34] Su R, Liu G. Mechanism and influencing factors of

- laser rock fragmenting [J]. West-China Exploration Engineering, 2013, 25(9): 1-6.
- 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.
- [35] Gordon Z L, Graves R M, Parker R A. Rock removal by laser: data analysis to identify trends and controlling factors [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5448: 885-893.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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. [S.l.: s. n.], 2013.
- [39] Xu Z Y, 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. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2005: SPE-95746-MS.
- [40] Parker R, Xu Z Y, Reed C, et al. Drilling large diameter holes in rocks using multiple laser beams [C] // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 13-16, 2003, Jacksonville, Florida, USA. Orlando: Laser Institute of America, 2003: 504.
- [41] Parker R A, Gahan B C, Graves R M, et al. Laser drilling: effects of beam application methods on improving rock removal [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 5-8, 2003, Denver, Colorado. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2003: SPE-84353-MS.
- [42] Huang K Z. Research on laser rock breaking technology [J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(12): 63-65.
- 黄开钊. 激光碎岩技术的研究 [J]. 西部探矿工程, 2015, 27(12): 63-65.
- [43] Soleymani M, Bakhtbidar M, Kazemzadeh E. Experimental analysis of laser drilling impacts on rock properties [J]. International Journal of Petroleum & Geoscience Engineering (IJPGE), 2013, 1(2): 106-114.
- [44] Lyu Z, Song X, Shi Y, et al. Experimental study on specific energy of thermal spallation drilling technology [C] // 51st US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, June 25-28, 2017, San Francisco, California, USA. San Francisco: American Rock Mechanics Association, 2017: ARMA-2017-0279.
- [45] Graves R, Bailo E. Analysis of thermally altered rock properties using high-power laser technology [C] // Canadian International Petroleum Conference, June 7-9, 2005, Calgary, Alberta, Canada. Alberta: Petroleum Society of Canada, 2005: PETSOC-2005-245.
- [46] Zhang Y B. Research on high power laser perforation technology in petroleum well [D]. Xi'an: Northwest University, 2013: 44-52.
- 张云博. 高功率激光器石油井下射孔相关技术研究 [D]. 西安: 西北大学, 2013: 44-52.
- [47] O'brien D G, Graves R M, O'brien E A. Starwars laser technology for gas drilling and completions in the 21st century [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 3-6, 1999, Houston, Texas, USA. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999: SPE-56625-MS.
- [48] Gahan B C, Parker R A, Graves R, et al. Laser drilling: drilling with the power of light phase 1: feasibility study [R]. Illinois: Institute of Gas Technology, 2001: 14.
- [49] Kariminezhad H, Amani H, Moosapoor M. A laboratory study about laser perforation of concrete for application in oil and gas wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 32: 566-573.
- [50] Graves R M, Ionin A A, Klimachev Y M, et al. Interaction of pulsed CO and CO₂ laser radiation with rocks typical of an oil field [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3885: 159-170.
- [51] Gahan B C, Batarseh S I, Watson R C, et al. Effect of downhole pressure conditions on high-power laser perforation [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 9-12, 2005, Dallas, Texas, USA. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2005: SPE-97093-MS.
- [52] Zhang J K. Experimental study on laser rock breaking and discussion on its application in petroleum engineering [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(3): 16-20, 25.
- 张建国. 激光破岩试验及激光技术在石油工程中的

- 应用[J]. 石油机械, 2017, 45(3): 16-20, 25.
- [53] Huang K Z. Analysis of influencing factors of laser drilling [J]. West-China Exploration Engineering, 2016, 28(1): 87-90.
- 黄开钊. 激光钻井影响因素的分析[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(1): 87-90.
- [54] 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.
- 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.