中国光学 Chinese Optics 核心期刊

激光破岩技术的研究现状及进展

官兵，李士斌，张立刚，陈双庆

引用本文:
官兵, 李士斌, 张立刚, 陈双庆. 激光破岩技术的研究现状及进展[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 229-248. doi: 10.3788/CO.20201302.0229
GUAN Bing, LI Shi-bin, ZHANG Li-gang, CHEN Shuang-qing. Research progress on rock removal by laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 229-248. doi: 10.3788/CO.20201302.0229

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/CO.20201302.0229

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于激光的测量技术在燃烧流场诊断中的应用

Applications of measurement techniques based on lasers in combustion flow field diagnostics

中国光学. 2018, 11(4): 531 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0531

机载激光通信系统发展现状与趋势

Development status and trend of airborne laser communication terminals

中国光学. 2016, 9(1): 65 https://doi.org/10.3788/CO.20160901.0065

连续激光辐照下的TiO2薄膜热传导性质

Heat conduction properties of TiO2 films irradiated by a continuous laser

中国光学. 2019, 12(3): 628 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0628

采用解析法对Nd:YAG单晶光纤的温度场研究

Research on temperature field in high-power Nd: YAG single crystal fiber laser by analytical method

中国光学. 2020, 13(2): 258 https://doi.org/10.3788/CO.20201302.0258

空气导热作用下Nd:YAG晶体温场特性

Temperature field of Nd:YAG crystal under air heat transfer

中国光学. 2019, 12(3): 686 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0686

文章编号 2095-1531(2020)02-0229-20

激光破岩技术的研究现状及进展

官 兵[1,2*],李士斌[1],张立刚[1],陈双庆[1]
(1. 东北石油大学 石油工程学院,黑龙江 大庆 163318;
2. 东北石油大学 非常规研究院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:激光破岩技术是应用光学领域的重要研究方向,它是集合了多相态、多耦合、多尺度的复杂高温、高压物理与化学过程。为了厘清激光破岩研究中的核心难点,给研究者提供有效的理论参考和趋向信息,本文对激光破岩技术的研究概况进行了分析总结。首先明确了激光破岩机理;之后分别从石油井下作业用激光器、激光破岩影响因素、激光破岩的温度场相变传热、物理力学性质以及激光破岩应用可行性等方面对国内外激光破岩技术研究进行了总结分析,指出了现阶段所取得的创新成果和不足;最后阐明了激光破岩技术的优点和发展趋势。研究结果表明,激光破岩技术可在现场配套设施研发、多影响因素评价、多场耦合作用机制和井下适用性理论体系研究等方向着力突破。

关 键 词:应用光学;激光破岩;影响因素;温度场;物理力学性质;应用可行性
中图分类号:TN249;TE242 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20201302.0229

Research progress on rock removal by laser technology

GUAN Bing[1,2*], LI Shi-bin[1], ZHANG Li-gang[1], CHEN Shuang-qing[1]
(1. *College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing* 163318, *China*;
2. *Institute of Unconventional Oil & Gas, Northeast Petroleum University, Daqing* 163318, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: sygcgb*1990@163.*com*

Abstract: Laser technology in rock removal is an important research direction in the field of applied optics. It is a complex, high-temperature and high-pressure physical and chemical process with multi-phase, multi-coupling and multi-scale applications. In order to clarify the core difficulties in laser-rock interaction research and to provide an effective theory reference and trend information for researchers, an overview of research on laser rock removal technology is summarized. Firstly, the mechanism of rock removal using lasers is clarified. Then, existing research of laser rock removal is summarized and analyzed from different perspectives, including laser equipment for petroleum drilling and completion, its influencing factors, the phase-change heat transfer of temperature fields, its physical and mechanical properties, and its feasibility in the oil and gas industry. Finally, the advantages of rock removal by laser technology compared with traditional drilling and completion methods are elaborated. In view of the existing problems in laser-rock interaction research, the future development trend of rock removal by laser technology is predicted. The research results show that rock removal by laser technology can lead to research breakthroughs in field-supporting facilities, multi-factor evaluation,

收稿日期:2019-04-28;**修订日期**:2019-06-28
基金项目:国家自然科学基金(No. 51874098);东北石油大学研究生创新基金(JYCX_CX02_2018)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51874098); Northeast Petroleum University Innovation Foundation for Postgraduate (No. JYCX_CX02_2018)

multi-field coupling mechanisms and theoretical systems of underground applicability.

Key words: applied optics; rock removal by laser; influencing factors; temperature field; physical and mechanical properties; application feasibility

1 引 言

激光技术的日益完善为石油与天然气工业中的钻完井技术改革提供了可能。随着油气田勘探开发技术的日趋完善,开采难度愈渐增长,传统钻完井工艺能够满足的油气开发需求也已经愈发受限[1],突破现有钻完井技术的瓶颈,寻求钻完井新技术的研发,实现更深钻完井深度、更复杂钻完井工况、更快钻完井效率的同时,降低钻完井成本,是石油和天然气行业一直以来追求的目标。而激光[2]这一高度集中的“纯”能量,因其极好的单色性和方向性、极高的亮度以及极强的相干性促使其在工业生产、医学治疗、科技研发等领域成功应用[3-4],同时为激光钻完井技术在石油和天然气行业的应用前景提供了有效印证[5-6]。激光破岩技术能够精确地控制岩石受激后形成孔道的几何形状,并提高孔道及其周围的孔渗特性,是一种新型的无损伤技术[6-7],可替代当前储层完井、增产、钻井和井筒施工等多种井下常规作业[8-10]。激光钻完井破岩过程中岩石受激后局部温度骤升,高温作用下发生破碎、熔化、蒸发形成多相态同时存在的状态,激光/岩石/流体 3 种物质相互作用,发生多相态多场耦合关系,同时岩石受激后发生宏观破坏,其存在的内在微观变化也是分析激光钻井破岩技术的关键所在。针对这一复杂问题,本文旨在对激光破岩技术的研究成果进行归纳总结,掌握激光破岩的工作原理,了解激光破岩的实验方法和理论分析研究方向,指出激光破岩技术研究中存在的问题,为后续的激光钻完井破岩技术的深入研究提供参考。

2 激光破岩机理

激光破岩,从本质上讲,就是强激光与岩石的相互作用。激光破岩[11-13]是利用激光技术产生高能激光聚焦到岩石表面,使岩石在局部高温作用下产生热爆裂并发生弱化、碎化、熔化和汽化[14-15],然后利用高速辅助气流将其清除,是一种非机械接触式破岩方法。激光照射岩石过程中,局部温度快速升高,岩石由固态瞬间相变到热熔和汽化状态,并形成气液固多相混合物,其相变规律如图 1(彩图见期刊电子版)所示,而岩石在激光作用下的热破坏则可以概括为 3 种形式:热破碎、熔化及汽化,其中热破碎方式的破岩效率最高[16-18]。

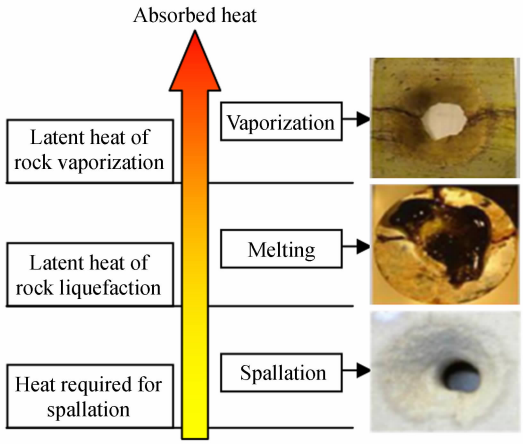

图 1 激光破岩状态示意图[19-20]

Fig. 1 Schematic diagram of rock removal by laser[19-20]

3 激光破岩技术研究进展

从 20 世纪 60 年代开始,许多国家开展了激光破岩研究工作,激光破岩经历了小功率激光器的岩石切割阶段和大功率激光器的钻井破岩阶段[21-27]。进入 21 世纪以来,随着科技的发展,人们对激光破岩技术的研究更加深入,目前已经取得了许多代表性的成果,如表 1 所示。针对激光破岩技术的研究大多是通过各种室内试验和数值模拟进行的,根据研究内容的不同,可以从石油井下作业用激光器、激光破岩影响因素、激光破岩的温度场及热效应、物理力学性质以及激光破岩井下应用可行性 5 个方面来分析总结现有研究成果。

表 1　激光破岩代表性研究成果

Tab. 1　Representational achievements of rock removal by laser

Researchers	Year	Research contents	References
Moavenzadeh F, *et al*	1968	The idea of rock breaking and drilling by laser is put forward.	[21]
O′Brien D G, *et al*	1999	Feasibility test of rock breaking by laser drilling has been carried out, and its incomparable superiority in improving penetration rate has been proved.	[25]
Graves R, *et al*	1998/2002	The specific energy between laser drilling and other drilling techniques is compared, and the effect of different laser on different rock type is analyzed including 6 typical lasers and 13 rock samples.	[2]/[27]
Xu Z, *et al*	2002 ~ 2005	The effect of different parameters on specific energy of laser rock drilling is studied through laboratory experiments, and its thermal spallation model is established.	[11]/[14]/[16]/[17]
Batarseh S, *et al*	2002/2012/2017	The high power laser-rock interaction and the change of rock properties by laser including porosity, permeability, strength are analyzed, and the application advantages in the oil and gas industry are presented.	[6]/[10]/[19]
Yi X Z, *et al*	2010/2011	The mechanism of laser rock breaking is introduced in detail, and it is pointed out that the temperature field is the fundamental factor causing the change of micro-physical and macro-physical properties of rocks.	[22]-[24]

3.1　激光器类型

激光器是指能够将不同形式的能量转变为具有电磁辐射光子的装置[26]。要研究激光在石油天然气工业中与岩石、钻井液之间的相互作用,首先要了解不同的激光器的关键参数和工作特征。随着现代激光技术的不断成熟,激光器类型和功能日趋多样化,而在石油天然气工业钻完井中有实用价值的激光技术可以列举出以下 8 种[22,28],如表 2 所示。

表 2　激光井下作业用激光器[22,28]

Tab. 2　Laser devices used for petroleum downhole operation[22,28]

Type	Symbol	Year	Wavelength/μm	Operation mode	Average power/kW
Carbon dioxide	CO_2	1964	10.6	CW、RP	1 000
	Used widely, good durability and reliability, too large wavelength and attenuate easily.				
Carbon monoxide	CO	1964	5 ~ 6	CW、RP	2 000
	Work only under cooling conditions, mainly used in scientific research and medical treatment.				
Neodymium: yttrium aluminum garnet	Nd: YAG	1964	1.06	CW、RP	4 000
	Small energy of only 4 kW used in industry, but tend to be feasible to obtain 10 kW or higher power laser.				
Hydrogen fluoride and deuterium fluoride	DF/HF	1969	2.6 ~ 4.2	CW	10 000
	First used to conduct rock formation tests in reservoirs.				
Free electron laser	FEL	1976	1.61	CW	14.2
	Infrared range, adjusted laser wavelength, can make laser reflection, scattering, absorption, blackbody radiation and plasma shielding optimization.				

续表 2 激光井下作业用激光器[22,28]

Tab. 2 Laser devices for petroleum downhole operation[22,28]

Type	Symbol	Year	Wavelength/μm	Operation mode	Average power/kW
Chemical oxygen iodine laser	COIL	1977	1.315	CW、RP	200
	Accurately wavelength and amplitude control, used in well control, sidetracking and directional drilling, and suitable for deep well with low cost.				
Krypton fluoride excimer	KrF	1977	0.248	RP	10
	Low energy laser, no thermal effect, strong directivity, high wavelength purity and high output power				
High power fiber laser	HPFL	2002	1.07	CW、RP	1 ~ 100
	Long-distance transmission, super high electro-optical conversion efficiency (30%) and good beam quality.				

注:CW 表示连续波工作方式;RP 表示重复脉冲工作方式。

不同类型激光器具有不同的光束特征、工作方式以及适应环境等,实现激光井下作业高效钻进要综合考虑激光光源的安全性、稳定性以及远距离传输过程中的能量损耗等问题,从而筛选出合适的激光器类型。

3.2 激光破岩影响因素研究

激光破岩的目的在于以最小的能量破坏尽可能大的岩石体积,通常将破坏单位体积岩石所消耗的能量即比能(SE)和穿孔速率(ROP)作为衡量岩石破坏效率的评价标准[4,27,29],其中 SE 越小表示激光破岩效率越高[30],ROP 越大表示激光破岩效率越高[31-32]。而不同的岩石在不同的激光下所产生的破坏效率不同,激光破岩的过程受多种因素影响。根据激光与岩石相互作用过程中所涉及的主要对象:激光、岩石、传递介质,再考虑激光破岩过程中的其他外界条件,影响激光破岩的关键因素可归纳为激光参数、岩石性质、激光传递介质及工作环境 4 个方面[4,29,33-35],如图 2 所示。

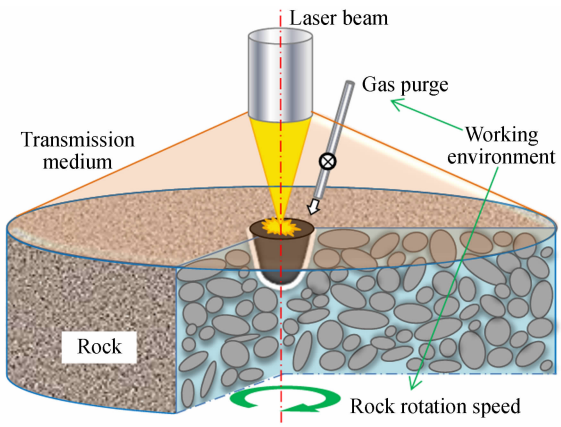

图 2 激光破岩过程可能涉及到的影响因素示意图

Fig. 2 Schematic diagram of influencing factors involved in process of rock removal by laser

3.2.1 激光参数

对于每种类型的岩石,都有一组最佳的激光参数使破岩效率达到最优。可以用来表征激光性能的参数主要包括激光功率、辐射时间、激光类型以及光束直径等,这些都是影响激光破岩过程的重要因素。

激光功率和辐射时间是影响激光破岩效率的关键参数,SE 和 ROP 都是辐射时间的非线性函数[36-38],随着激光功率和辐射时间的增加,射孔深度都是先增加后趋于平稳,射孔直径逐渐增大[38-40],SE 先减小后增大[39-42],而对应的 ROP 先增大后减小[42-45],破岩效率则先升高后下降[46],其中激光功率与 SE 的关系如图 3 所示。激光辐射岩石光能转化为热能,岩石温度升高,岩石初始吸收能量大部分用于支撑岩石内部微观结构变化,如岩石热膨胀、矿物分解以及微裂缝的产生等,此时能量不足以使岩石破碎,从而导致 SE 较大;而随着激光功率或辐射时间的增加,能量积聚到足以破坏岩石,在达到其熔点之前,岩石受激产生的孔道深度、直径都开始逐渐增大[38],去岩量、去岩效率增加,ROP 增大[47],破岩 SE 下降[43];当入射能量使岩石内部温度临近矿物熔点时,也意味着岩石热破碎的结束,此时 SE 达到最小值,破岩效率最高,最有利于岩石破坏[48];随后继续增

加激光功率或辐射时间,将使岩石开始熔化甚至蒸发,有效的岩石去除体积越来越少,ROP 快速下降,更多的激光能量用于岩石反复熔化和蒸发,同时由于射孔深度的增加,孔道内杂物排出的效率降低,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,造成一定的能量损失,岩石 SE 显著增加[48-49]。

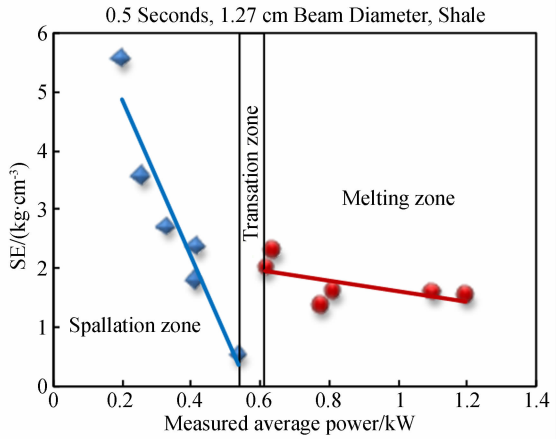

图 3　激光辐射页岩时其功率对 SE 的影响

Fig. 3　Effect of laser power on SE for shale

激光类型可以用激光波长、传输方式以及脉冲宽度和脉冲重复频率来表征。激光波长越短,其射束在传递过程中越不易发散[50],但根据 Graves R M[27]的实验结果统计显示激光波长对激光与岩石之间的相互作用没有显著影响,对岩石破坏所消耗的 SE 影响不大。激光光束的传播模式可以分为连续波和脉冲波,其中脉冲波比连续波能更有效地移除岩石,所获得的 ROP 更快,SE 也相对更小[11,27,43]。这是因为激光脉冲节点之间的弛豫时间[17]给岩石吸收消化能量的过程提供了一个缓冲,在去除岩屑的同时还可以避免连续辐射等离子体的积聚阻碍。其中脉冲弛豫时间也就是射击同一位置的脉冲间隔时间,取决于脉冲宽度和脉冲重复频率。脉冲宽度决定单脉冲辐射能量[28],脉冲重复频率与热循环频率和激光驱动冲击波强度有关[51],适量增加它们的数值可提高激光破岩效率,降低 SE,提高 ROP[52],但长时间的激光脉冲或过高的激光脉冲频率[53]将会造成激光破岩能量过盈,增大熔化机率,降低破岩效率。其中脉冲宽度相比脉冲频率对 SE 的影响更显著[48-49]。

激光入射光束直径越大,岩石消耗 SE 越小,ROP 越大,同时射孔直径的变化要比射孔深度的变化更为显著[32]。当激光功率一定时,激光入射直径越大,激光能量越分散,能够避免岩石局部能量过快积聚,从而延缓岩石熔化,获得更高的破岩效率[27]。将多个单一光束组合可以创建更大的光束直径,而其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几何组合方式两个方面。Parker R、Xu Z 及 Gahan B C 等[54-55]指出多光束的六边形重叠组合对大量材料的去除很有效果,而且适当改变孔间距,可以防止形成任何可能阻碍激光头向下移动的剩余岩脊。

3.2.2　岩石性质

不同岩石的受激破坏所需的阈值参数不同,激光破岩效率受岩石性质的影响。影响激光破岩的岩石性质可以归纳为岩石热导率、岩石矿物组成、岩石饱和状态以及岩石表观形貌等。

岩石热导率表示岩石导热能力的大小,其热导率越高,表面吸收的热量耗散越快,局部矿物发生熔化机率越少,可相对降低激光破岩消耗的 SE[4];但是从激光束到岩石的吸收能量传输速率很容易迅速地超过岩石中的热扩散速率,当吸收的能量超过岩石基质的热导率时,局部温度达到矿物熔点,受二次效应影响,SE 迅速增加[48-49]。二次效应[7,56]是指激光破岩过程中,由岩石熔融矿物、矿物分解、流体汽化以及岩石中的裂隙而造成的能量非必要损失,对 SE 影响显著。而这些主要取决于岩石的矿物成分、充填方式、胶结强度以及存在裂缝等。

组成岩石的矿物成分不同,激光辐射岩石的破坏机制不同。对于砂岩和页岩来说,高温使其中的粘土矿物发生含水汽化,岩体膨胀出现裂缝,随温度升高,裂缝扩展导致岩石发生热破碎,甚至熔化[57],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[42];花岗岩的激光破岩行为与砂岩类似[58];石灰岩的主要成分是碳酸盐岩,激光破岩主要利用碳酸钙的热分解过程来移除岩石[11],由于石灰岩的热导率较低,受激后导致岩石受热不均和膨胀,石灰岩倾向于以较小的碎片分解[59]。而岩石矿物充填的好坏和胶结强度对激光破岩的影响实质上与岩石热导率有关。矿物的良好充填方式可以增加岩石的

导热性,降低激光破岩消耗的 SE[37];矿物颗粒之间的胶结状态越强,岩石的热导率越大,破坏岩石过程中额外损失的能量也越少[60]。

不同类型的饱和流体使岩石受激后产生的破坏效率不同,饱和流体类型包括空气、清水、盐水、原油以及烃类气体。Batarseh S[19]、Erfan M R[37]、Ahmadi M[36]等人分别利用 6kW COIL 激光和 400W Nd:YAG 激光辐射砂岩、花岗岩和石灰岩,他们指出由于液体高温汽化消耗能量,而水和油的汽化点和热容有很大的差别,水的汽化需要更多的能量和时间,所以激光破岩所消耗的 SE 从小到大依次是干燥岩样、油饱和岩样以及水饱和岩样;Graves R M[61]、Gahan B C[48]、Figueroa H G[49]以及 Kariminezhad H[62]等人分别通过 Nd:YAG激光和 CO_2 激光辐射干燥的以及水饱和的砂岩、混凝土样品,发现由于饱和水沸腾导致岩石表面强烈蒸发和爆炸,从而加快了岩样的破坏,所以水饱和岩样比干燥岩样的 SE 和 ROP 变化显著,对激光破岩有积极作用。学者们对于岩石饱和流体对激光破岩效率影响的研究存在差异性认识(如图 4 所示,彩图见期刊电子版),这是因为研究过程中所选用的激光参数、岩石类型有所不同,不同的激光与岩石在不同流体中有着不同配伍性,所以并不能定性地给出饱和流体对激光破岩的影响机制。

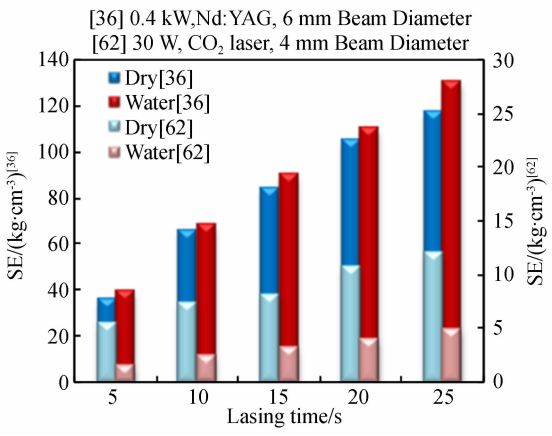

图 4 激光辐射岩石不同饱和流体对 SE 的影响[36,62]

Fig. 4 Effect of different saturated fluid on SE for rock removal by laser

岩石的表观形貌包括岩样直径、厚度、沉积取向以及表面粗糙度等,随岩样直径和厚度的增大,SE 先减小后趋于平稳[27,42];岩石沉积取向对激光破岩效率没有影响[41-42];表面粗糙度会加剧能量的反射或散射现象,决定着岩石对激光能量的吸收利用率[4]。这些都仅限于对激光破岩室内试验效果的影响,而在实际井下作业过程中,储层岩石可近似为无穷大,其对激光能量传递的影响则是可以忽略的。

3.2.3 激光传递介质

激光将能量传递到岩石上,需要依托传递介质,激光的传递介质可以是气体也可以是液体介质。对不同激光破岩试验研究进行总结可知,激光可以通过不同的传递介质,包括空气、氮气、清水、污水以及油井产出液介质等作用到岩石表面[20,41,51]。相较气体传递介质,激光在液体介质中破岩所消耗的 SE 更大[34]。这是因为高温作用下液体介质会汽化,从而消耗大量的额外激光能量;而对比污水和油井产出液,激光通过清水传递破岩消耗的 SE 要小很多,并且射孔深度也更大[41,51]。这是由于污水或油井产出液中所含有的大量的固体杂质将吸收或散射大量激光能量,使激光能量的衰减程度和分散程度增大,大大降低了到达岩石表面的能量,从而增大了 SE 值;同时介质深度的增加,将加剧这种现象,使消耗 SE 更大。

3.2.4 工作环境

除上述激光参数、岩石性质和传递介质之外,激光辐射岩石的工作环境也是必须考虑的因素。

首先是压力条件,考虑激光破岩在井下作业的实际环境,Gahan B C 等[63]通过不同围压、轴压与孔隙压力的组合配置,测试了 5.34 kW 掺铒光纤激光器照射岩石后的移除体积和所消耗的 SE,结果表明,施加应力和压力可以使矿物颗粒间的接触更紧密,提高受激岩石热扩散率,降低矿物熔化机率,从而减少 SE,即应力和压力对激光穿透砂岩和石灰岩的能力有积极影响;而 Erfan M 等[64]利用 500W 连续光纤激光器研究了不同温度、围压和孔隙压力条件下的石灰岩破坏过程,发现随着岩石温度、液压压力和围压的增加,热应力减小,岩石强度增大,从而使射孔深度减小,SE 增

加,ROP 降低,其结论为 T-H-M 耦合环境将降低激光破岩效率。二者结论相悖(选取孔压为零时不同围压下激光破岩 SE 的变化情况进行说明,如图 5 所示),主要是因为所选用的激光功率差别较大,同时施加的围压值范围也有所差距,但可以证明的是岩样所处的温度、压力环境对激光破岩作用机制是有影响的。另一个工作环境因素是辅助气体的吹扫方式、气体吹扫方向[11,65]以及气流速度[34,44]等,这些对激光破岩 SE 和 ROP 都有显著影响,适当的气体吹扫可以保证岩屑及时清除干净,而不占据孔道,阻碍激光能量传递,但使激光重复碎岩,岩屑熔化,造成了非必要能量损失,从而增加 SE,降低 ROP,同时也要避免吹扫气流速度太快而过早带走激光传递到岩石表面的能量。此外,激光与岩石的相对状态也是影响激光破岩能量能否有效利用的重要因素,包括激光入射角度[66]、离焦量[40]、激光运动状态[67]和岩石转速[68]等。

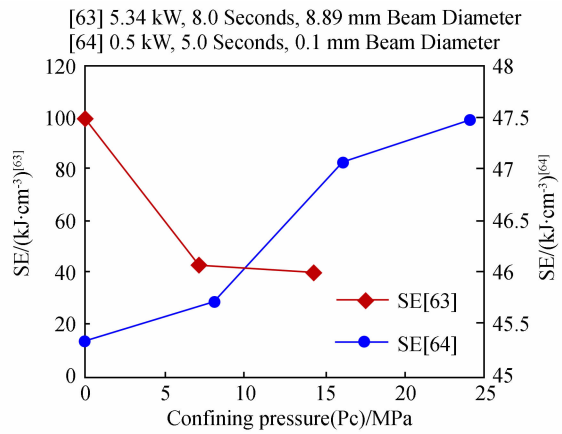

图 5　孔压为零时不同围压对激光破岩 SE 的影响[63-64]

Fig. 5　Effect of confining pressure on SE for rock removal by laser under pore pressure is 0 MPa

针对激光参数、岩石性质、传输介质和工作条件对于激光破岩效果的影响机制,学者们已经开展了大量试验研究和数值模拟分析,本文总结了不同因素对激光破岩过程的影响机制,但是大都针对特定的岩石与特定激光作用,并不能给出具有全面代表性的结论,要实现以最小的 SE 获得最大的 ROP 必须在考虑激光/岩石/流体之间的配伍关系的基础上,对影响激光破岩的参数进行合理的优化设计。同时针对如此大量的影响因素,为避免增加研究工作的复杂性和引入无用信息造成的信息混淆,多因素的系统分析必不可少。因此,深入研究激光/岩石/流体相互作用,确定激光/岩石/流体的配伍机制,阐明不同影响因素下的激光破碎岩石的宏观和微观破坏规律,量化激光参数、岩石物理力学特征、激光传递介质等影响因素与 SE、ROP 等激光破岩效率评价指标之间的作用关系,都是激光破岩技术研究的关键所在[69-70]。

3.3　激光破岩的温度场及热效应研究

高能激光破岩中,研究激光与岩石的相互作用过程是一个复杂的非稳定传热学过程。激光射击岩石,一部分入射能量被吸收并转化为热能,岩石局部温度瞬间增大,随着温度的升高,岩石发生破裂、熔化、汽化等变化。其中涉及激光辐射能量的吸收转换、热量传递与相变、热力学效应以及相变引起的喷射羽流作用(如图 6 所示,彩图见期刊电子版),而引起这些作用的根本原因主要在于温度场的剧烈变化,同时温度场也是分析岩石微观物性、宏观性质发生改变的关键所在[23]。因此,必须对激光破岩的温度场和岩石的热效应进行深入的分析与研究。

激光辐射能量的吸收转换是激光破岩的先决条件,它取决于材料类型和激光束特性。将岩石视为不透光材料,激光辐射岩石表面时的激光能量可分为反射光能和吸收光能,吸收的光能转化为热能,高温引起岩石相变,多相态的岩石在激光辐射过程中多次散射、反射、吸收光能。为解释岩石对激光这类高功率电磁波的散射、反射、吸收作用,不同学者提出了不同求解方案。Hossan M R 等人[71]提出了可求解受岩石电磁张量影响的麦克斯韦方程的全波法;由于求解电磁能量吸收过程受限于空间分辨率和时间离散化,Chandrasekhar S[72]、Cho J-H[73]以及 San-Roman-Alerigi D P[74]等提出了辐射转移方法或射线追踪算法等近似替代方案;之后,San-Roman-Alerigi D P 等人[69-70]针对激光与岩石的相互作用过程,提出利用 Beer-Lambert 定律将能量衰减、介质损耗与通过材料的光束传播联系起来,给出了激光这类电磁波的电磁能量转换通用模型。以上方法为计算单位体积或面积的激光耗散能量(即热量)提供了理论基础。

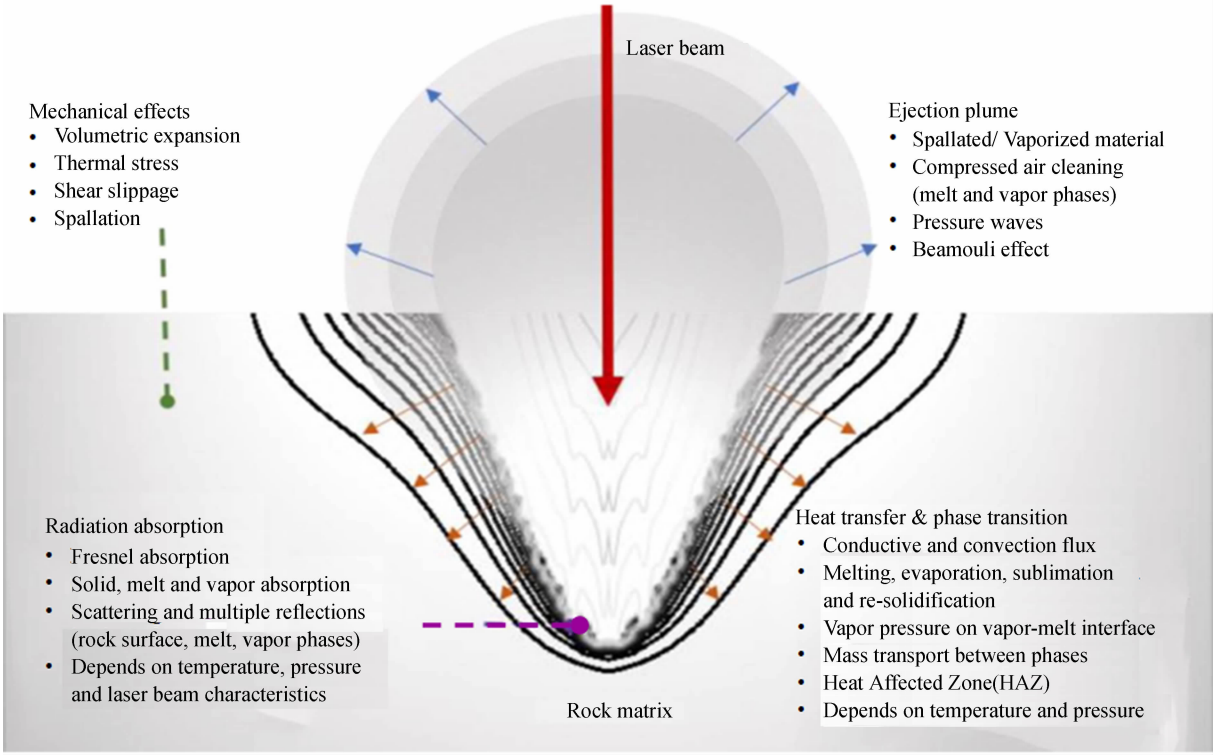

图 6 激光与岩石相互作用过程中涉及的热物理及力学效应示意图[69-70]

Fig. 6 Schematic diagram of thermophysical and mechanical effects in laser-rock interaction

激光辐射岩石的热量传递与相变就是激光破岩的主要演化机制。激光辐射岩石所吸收的光能转化成热能,热能通过热传导和对流的形式传递到岩石表面,岩石表面温度逐渐升高,继续吸收能量,热影响区向内扩散,岩石发生熔化、蒸发、升华再凝固的一系列物理效应,激光光斑中心及其周围的岩石表面将经历从固体到液体,然后从液体到气体的岩石相变过程,从而实现岩石的破坏去除。易先中、祁海鹰以及高德利等人[75-78]基于热传导理论和能量守恒原理,针对岩石受激过程中的传热和相变问题,简化液-气界面和液-固界面的焓、热导率以及比热等主要参数,建立了激发岩石从固体、液体向气体状态转变的温度场数学模型,并使用 Galerkin 法对激光破岩实际案例进行了数值研究,指出岩石在聚能激光束作用下,其相变过程的时间相对更短,由固态变到液态、由液态变到气态的温差范围极大;光斑内轴中心上的温度最高,光斑边缘的温度稍低,与聚能光束的空间分布形状基本一致。Agha K R[47]和 Bjorndalen N[79]等人给出了岩石熔化前的传热模型、熔化时固液界面能量守恒方程、蒸发时液气界面能量守恒方程,以及激光功率模型(高斯空间分布),利用数值模拟分析了不同参数对激光破岩的影响,指出相同激光功率和照射时间下砂岩所需的 SE 大于石灰岩,在整个熔化过程中砂岩的熔化层厚度略小于石灰岩,而当激光功率增大时,岩石熔化层厚度减小,汽化速度加快。李密[80]、柯珂[81]、周国立[82]、刘浩[83]、牟海维[84]等人根据非定常传热学原理,给出了激光与岩石相互作用过程中的温度场分布模型、热应力分布模型、岩石熔化模型和汽化模型,确定了砂岩受激后其径向和轴向的温度场、应力场分布规律,计算了激光破岩所需的功率阈值,指出激光破岩过程中达到岩石热破碎、熔化和汽化所需要的功率密度阈值依次上升,而破除岩石的效率依次下降;不同种类的岩石受激后的破坏机理不同,对于强度较大的岩石,激光破岩过程中起主要作用的是激光的汽化作用,而对于强度较小的岩石,起主要作用的是热应力引起的破碎。

激光破岩的机械力学效应是岩石发生热破碎的基础和前提。激光辐射岩石使其产生瞬态和非均匀的温度分布,岩石内不同区域发生不同程度

的膨胀,从而产生不同的热应力,随着热应力的不断增大,当超过岩石屈服极限时就会形成剪切滑移或断裂,从而使岩石发生散裂破坏。Xu Z、Reed C B 等人[17,31]根据激光诱导岩石剥落的岩石力学基础,建立了岩石在激光下发生热碎裂的物理模型,计算了激光照射下干岩或水饱和岩的瞬态温度和应力分布,确定了岩石受激发生热碎裂边界和能量效率,指出热剥落是最节能的岩石去除机制。Ndeda R A[85]、Li M[86]等人利用 Ansys 有限元数值软件模拟了不同参数下激光照射花岗岩的温度、应力分布情况以及形成孔道的特征,指出当岩石受激过程中局部温度升高引起的应力超过岩石中最弱的矿物强度时,强度较强的矿物中就会发生开裂,从而导致岩石剥落,而激光辐照花岗岩属脆性断裂,所形成的玻璃层内壁光滑,孔隙多。杨明军等人[87]研究了激光照射煤岩的作用过程,指出不同于其他岩石的热应力破岩,煤岩在激光作用下的破坏机制主要在于热效应所导致的材料烧蚀汽化。牟海维、辛朋辉等人[88-89]分别对有、无内含物时的砂岩内部热应力分布情况进行了数值模拟,指出相同条件下有内含物的岩石受激后产生的热应力值较大,岩石内含物的存在有易于激光破岩。San-Roman-Alerigi D P 等人[69-70]通过 COMSOL Multiphysics 和 2D-FLAC 数值模拟软件实现了激光-岩石相互作用的热-力耦合仿真模拟,利用轴对称结构中质量密度的周期性分布来表征非均质性岩石,指出岩石受激产生的机械损伤随非均质性方向和周期数的变化而变化,质量密度水平变化的岩石,受激孔道的入口和底部附近的机械损伤比中部区域更严重,底部机械损伤为剪切屈服,而入口附近的为拉伸屈服;质量密度垂直变化的岩石,会出现厚度相对均匀的机械损伤区;岩石质量密度变化周期数越大,受激后产生的机械损伤发展越显著;同时指出围压应力会抑制岩石受激后产生裂纹区域的径向和垂直扩展。

激光破岩的喷射羽流作用是影响激光破岩质量的重要过程。岩石在高功率激光作用下发生汽化,蒸发岩石,随着激光能量的持续输入,蒸汽电离产生等离子体,等离子体膨胀吸收激光,会阻碍激光能量到达岩石表面。而在这一过程中,熔融液体、蒸汽和等离子体等共存,等离子体羽流形成反冲效应,熔池内的岩石液体颗粒在等离子体的反冲压力下喷射,蒸汽在等离子体的压力波作用下返回岩石表面凝结。Elahifar B 等人[43]指出连续波激光射孔过程中产生的等离子体随着温度的升高将积聚在岩石表面,消耗激光能量,阻碍激光辐射进一步穿透岩石样品。Yan F 等人[38]应用高速视频图像分析了激光破岩过程中形成的蒸汽/等离子体和熔池形态发现,激光辐射后的岩石熔池不断变化,呈现出非均匀的温度特性,过热的能量导致飞溅,而在一定程度上,蒸汽/等离子体的变化可以证明岩石吸收能量的程度,随着时间推移其产生的量也可以作为衡量激光射孔深度的指标。研究发现岩石受激产生的蒸气/等离子体影响着激光射孔工艺的稳定性、射孔质量和激光束能量的效率。Graves R M 等人[61]利用高速摄影技术观测了岩石表面激光等离子体羽流的形成过程,随着作用时间的增加,电离等离子体迅速发展,周围环境气体将吸收激光的气体或等离子体的传播运动,即激光维持吸收波(LSW)将出现,激光羽流横向膨胀,导致岩石表面的强烈屏蔽,增加激光破岩 SE;同时分析了不同激光-岩石相互作用的流体动力学机制,指出在 CO 激光与岩石相互作用的情况下,较重的岩石颗粒从岩石表面喷出,受 LSW 形成的限制,岩石颗粒的喷出质量与能量通量呈正比;而在相同的激光辐射强度下,LSW 对 CO_2 激光更强烈,这可以防止 CO_2 激光辐射进入岩石表面;同时阐明了激光波长、脉冲波形和功率密度对激光与岩石相互作用的流体动力学状态的影响。

激光与岩石的相互作用过程是一个集合了电磁学、传热学、机械和流体动力学多交叉学科的典型多物理场耦合问题,而其中激光破岩温度场研究是破岩机理的研究基础。激光的光能引起的热应力使岩石发生破碎,从而达到钻完井目的。已有研究大都基于一定的前提假设,忽略了岩石热力学参数的温度特性,针对激光与岩石相互作用过程中的岩石相变传热学与热力学问题,建立了岩石在激光作用下的相变传热模型、温度分布模型、热应力模型等,并利用数值模拟等手段对激光破岩的温度场、热应力场的分布规律进行了研究,而关于激光破岩产生的熔体喷射、等离子体羽流

等流体动力学方面的研究相对较少，如何在尽可能接近真实激光/岩石/流体实际相互作用的前提下，耦合电磁场、温度场、应力场和流体动力场的作用关系，建立激光释放的能量与岩石破坏特征之间的联系，确定激光破岩的温度场、热应力场、流体动力场和破岩能量之间的关系等都是开展激光破岩研究应该关注的重点内容。

3.4 激光破岩物理力学性质研究

激光破岩过程中的温度场变化引起岩石发生相变，高温诱发岩石内部矿物组成发生变化，从而改变了岩石的物理力学性质。研究激光破岩物理力学性质的变化就是探索岩石在激光作用下发生微观结构响应的过程，为激光破坏岩石的宏观表征提供了理论依据，从而揭示了激光破岩的内在破坏机制。以岩石矿物成分、孔隙特性、渗透特性以及强度参数等为研究岩石物理力学性能的代表参数，众多学者应用不同测试手段针对激光破岩过程中温度效应引起的岩石物理力学性能变化进行了研究。

不同岩性的岩石在不同激光作用下，岩石的矿物成分发生改变，岩石的孔隙度和渗透率增大，岩石强度降低。Batarseh S[90] 通过开展 MIRACL 和 COIL 激光照射不同岩性岩石的室内实验，研究了高功率激光对岩石物理力学参数的温度效应，通过薄片分析、X-RD、扫描电镜等技术手段研究了岩石在激光照射前后的物理力学参数变化，证明了激光破岩能够改善岩石受激孔道和其相邻区域的孔渗特征；Xu Z 等人[14] 测试了光纤电缆传输脉冲 Nd:YAG 激光在 Berea 砂岩上射孔的孔道效果，指出 Nd:YAG 激光可以像其他类型的高功率激光一样有效地穿透岩石，并且与未受激光照射岩石相比，1.6 kW 脉冲 Nd:YAG 激光束激发的岩石渗透率增加高达 566%；Graves R M 等人[59] 通过岩石薄片分析、CT 扫描、纵横波速法、以及压力衰减剖面渗透率（PDPK）等不同的测量手段分析了岩石受激前、后的矿物学特性、粘土特性和原始裂缝，研究了岩石受激后孔隙度、渗透率、弹性模量和强度等物理力学参数变化；Yan F 等人[38] 通过光学显微镜，高速视频图像以及 X 射线衍射仪分析了高功率光纤激光器与砂岩的相互作用过程，指出受激后岩石孔道周围的主要矿物组成由 SiO_2、CaO、Al_2O_3、MgO 物相变为 SiO_2、Fe_2O_3 以及少量的 Al_2O_3，这是由于金属原子的电离电位相比非金属原子要低很多，受激后易电离，大量激光诱导金属等离子体/蒸汽从小孔中喷射出来，岩石的状态发生了变化，从而导致岩石性能改变；Sharma K V 等人[91] 研究了激光诱导温度对 Indiana 石灰岩这类多孔材料孔隙率和微观流体输送效率的影响，通过一系列实验、建模和分析，利用显微 CT 扫描受激后的岩石，确定通过良好的控制激光功率能够使岩石的多孔性和连通性显著增加，如图 7 所示（彩图见期刊电子版）。

岩石物理力学性质的变化主要是由于高温作用导致粘土脱水、矿物分解，岩石形成宏观和微观裂纹，从而导致受激后岩石孔隙度和渗透率增大，而受激光照射附近的岩石强度参数如杨氏模量、剪切模量、体积模量、复合模量等相比于未受激部分则有所降低。而岩石物理力学性质的变化程度则与受激岩石的矿物组成、热力学参数（导热性、扩散性和热容量）以及饱和度等密切相关。Graves R M[92] 等人通过对比砂岩、石灰岩和页岩受激后的物理力学参数变化幅度，指出不同的岩石矿物组成和热力学参数的影响程度不同，具有高导热性的岩石，受激后岩石孔隙度、渗透率以及强度模量的变化幅度要更加显著；Bazargan M 等人[2] 对比了饱和水与饱和油的石灰岩岩样受激后的物理力学参数变化，指出饱和水岩石受激后仅在孔眼周围的渗透率有所增大，而饱和油岩石受激后渗透率改变的作用范围要大一些，相同条件下，对于低导热系数的石灰石，饱和油岩石渗透性增加的幅度可能要高于饱和水岩石，这是由于水和油对激光能量的吸收和散射能力不同；Soleymani M 等人[57] 使用脉冲 CO_2 激光对砂岩、石灰岩、页岩分别进行了射孔破岩实验，并通过具有能量分散体系的扫描电子显微镜（SEM-EDS）、X 射线衍射（XRD）和薄片分析、差热分析（DTA）、压力衰减谱仪（PDPK）以及同步热分析等实验观测手段分析了激光对岩石特性的影响，指出在砂岩和一些页岩中由于有机物的含量较多，会熔融形成保护套，阻碍能量传输；而石灰岩则倾向于以较小的碎片分解，这是由于激光引起的突然热和石灰石的低导热率所导致的热不均匀性和膨胀造成的。

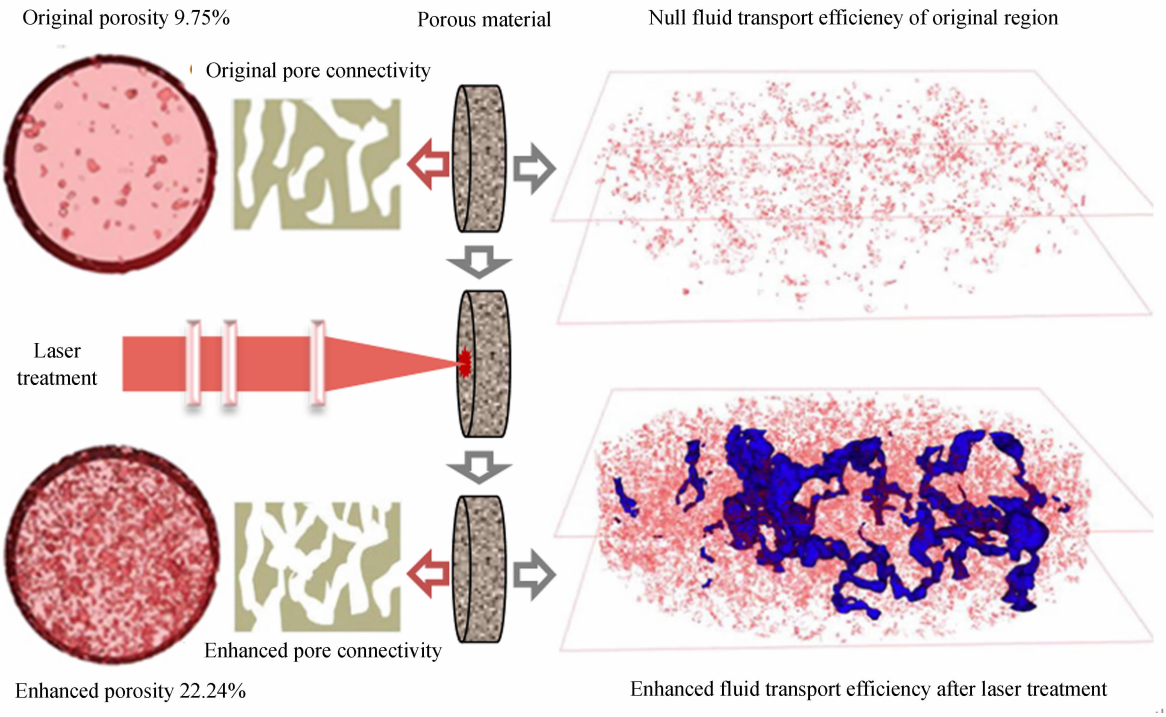

图 7　多孔材料受激前后孔隙特征和微观流体输送效率的变化[91]

Fig. 7　Pore distribution characteristics and fluid transport efficiency of porous material before and after laser treatment

扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、薄片分析、CT 扫描以及岩石物理力学实验等方法是检测分析岩石在激光作用下发生宏微观变化的必要手段。激光破岩后井壁周围的岩石内部微观结构将发生变化,从而导致孔隙度、渗透率和强度等物理力学性质也发生了变化,但是激光具体怎样影响岩石内部的微观结构,宏观上又发生了哪些破坏特征,以及多相态多物理场下激光射击岩石的微-宏观响应机制等都有待深入研究。

3.5　激光射孔和辅助破岩应用研究

将激光技术应用于钻井破岩方面的研究已经取得了一定的成果,目前大多针对激光射孔和辅助破岩方面的研究证明:利用高功率激光实现井下射孔完井可有效避免传统爆破式射孔所带来的损害和污染,可在有效控制孔道几何形状的同时提高孔渗特性;激光辅助破岩技术则是将激光技术和机械旋转钻井技术相结合,利用激光能量转换的热能使岩石在热应力作用下强度性质弱化,从而有助于机械钻进。

针对激光射孔和辅助破岩方面的研究,国内目前还集中于理论研究和室内试验研究阶段。杨阳等人[51]证实了激光技术在不同深度的水中和油井采出液中传递而破碎岩石的可行性,并指出激光烧蚀岩石有益于避免油井出砂;张云博[41]、彭汉修[46]、谢慧[68]等人进一步测试了不同类型激光器对不同种类岩石进行射孔破岩的参数影响机制;韩彬,李美艳以及张世一等人[66,93-96]针对激光辅助破岩和射孔开展了一系列实验研究,从微观角度研究了不同岩石受激后的矿物成分变化和破坏形貌特征,并利用微 PDC 钻头进行可钻性实验,评价了激光辅助破岩的有效性;同时,中石化胜利石油工程有限公司联合国内激光技术研发单位[65]也搭建了激光试验系统,开展了硅质砂岩岩样激光直线扫描及定点打孔试验,验证了激光破岩的实际效果,并重点从激光光源优选、高能激光远距离传输及井下适应性 3 个方面分析了激光应用需要解决的关键技术。

国外已经从理论研究和室内测试,发展到现场试验阶段。在激光射孔方面,da Silva M G 等[97]通过一系列室内试验模拟了套管井和水泥井结构中的激光射孔,当激光功率达到 1.2 ~ 1.5 kW时可实现对钢-水泥-钙华碳酸盐岩样品的射孔,证实了激光井下射孔的可行性;Saudi Aram-

co 公司的 Batarseh S I 和科罗拉多矿业学院的 Graves R 等人[6,98-99]联合研究了激光技术在石油井下的应用,开发了配有双轴加载架的高功率激光系统和支持设备,模拟井下原位应力条件,实现了垂直井原位射孔,同时可以精确控制几何形状、深度和方向,创造干净的增强型射孔孔道,如图 8 所示。实验证实了其在提高岩石孔渗特性和减少储层冲击压实的射孔优越性,提出利用连续油管装置和光纤电缆传输,结合经过大量现场还原测试的激光射孔装置,包括特殊射孔激光头和原型工具、激光器瞄准头以及专用清洗系统等,可实现将实验室成果向现场应用测试的转换。在激光辅助破岩方面,Ezzedine S 等人[100]通过一系列激光加热/冲击室内试验和钻头穿透岩石的数值模拟,研究了热软化和热裂对钻头破岩效率和岩石破碎机制的影响,确定了激光强化钻(LED)硬质岩石在钻完井作业中提高破岩效率和改善地层环境方面的有效性和可行性;Pooniwala S A[101]提出了新型激光机械三牙轮钻头的设计方案和使用方法,并介绍了其候选激光的选择、光束传输配置、激光头以及其他相关的附加附件,如图 9 所示。美国 Foro Energy 公司[102]开展了激光与机械 PDC 钻头联合破岩现场试验,通过连续油管钻机,利用光纤传输激光光束,实现了在激光功率为 20 kW 的情况下,钻头切除软化岩石的功率只需 7.5 kW,且破岩速度提高 10 倍以上,证实了激光辅助钻井相比传统钻井技术的有效替代优势。

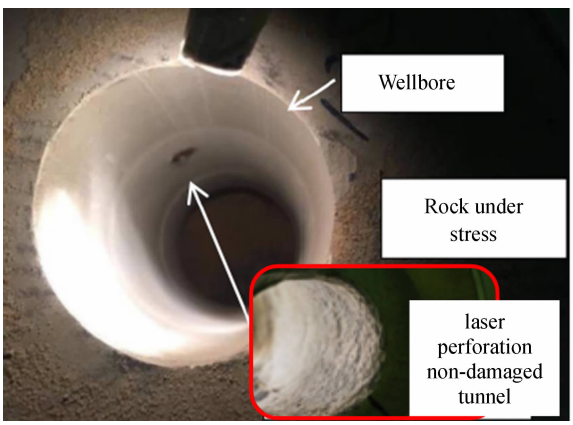

图 8 原位应力下的垂直井激光射孔[99]及无损孔道[6]

Fig. 8 In-situ perforation in vertical wellbore under stress conditions and the non-damaged tunnel

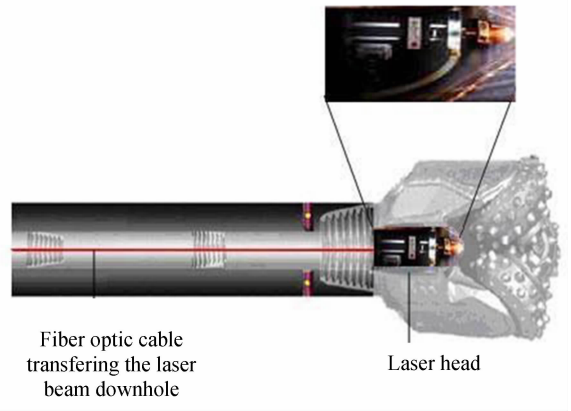

图 9 激光机械式光纤三牙轮钻头[101]

Fig. 9 Laser-mechanical tri-cone rotary bit with fiber optic delivery system

目前国外已经实现了激光射孔的现场测试,激光射孔理论相对成熟健全,而国内相比国外仍然落后很多,还处于摸索探寻阶段。面对如今钻完井过程中所面临的层位深、研磨性高、岩性复杂等诸多问题,以节约成本为前提,更快、更好、更安全地实现石油钻完井是当下必须迈进的发展方向。如何突破激光破岩的核心基础科学问题,形成激光破岩井下适用性的研究体系,是实现激光破岩在石油与天然气工业应用的关键前提。

4 激光破岩技术发展趋势

4.1 激光破岩技术优势

激光破岩技术在石油与天然气工业中能够实现速度快、成本低、效率高、安全性高以及损伤小等钻井射孔优势。与传统钻完井工艺相比,激光钻井具有如下潜在优点:

(1)提高钻完井效率

① 能量极高易穿透岩石,可适用于坚硬岩层等复杂条件,提高机械钻速或穿孔速率;

② 易实现全井一趟钻,非钻进时间(起下钻柱、更换钻头、打捞卡钻管段、注水泥以及下金属套管)大大降低;

(2)节约钻完井成本

① 设备简单,易转移,占地小;

② 不需钻头等旋转钻井所需构件和器材;

③ 辅助破岩和射孔完井操作中可重复利用,钻进损耗小,使用寿命长;

④ 井下实时监控手段更先进,导向性强,远程控制效果好,可应用于复杂井型井眼轨道控制;

(3)增强钻完井安全性

① 高温井壁或孔道壁形成陶瓷保护层,以减少井喷、井漏和坍塌事故的风险;

② 送入工具结构简单,体型小巧,减缓了井架作业的拉伸载荷,同时也降低了打捞作业的难度,有时甚至可以使落鱼直接熔化。

(4)降低环境污染度

① 可以保护和改善储层环境,增加岩石的孔隙度和渗透率;

② 钻完井相对清洁,激光可使岩石热碎裂、熔融甚至蒸发,而不会有钻屑返出地面;

③ 由于陶瓷井壁或孔道壁的存在,无渗入,对地层伤害小。

4.2　存在问题和发展方向

综上所述,激光破岩技术的准、快、稳、优是传统钻完井技术无法比拟的,无论是在钻完井效率提速上,还是环保安全上,激光技术都是目前石油井下作业最具发展前景的先进工艺技术之一。激光破岩技术研究在石油用激光器、影响因素、温度场相变传热、物理力学性质以及井下应用可行性等方面已经取得了一定的成果。尽管如此,目前激光破岩技术在石油与天然气工业中仍然处于理论研究和实验室探索阶段,其理论体系的形成和实际应用还面临着诸多研究难点:

(1)适用于井下环境和远距离传输的激光设备和现场配套设施

定量分析破碎不同岩石体积所需的激光能量范围,在保证激光传输效率的前提下,筛选适用于长距离传输和能满足井下狭窄空间复杂作业环境的新型激光设备,创建相应的激光钻完井技术的井下作业装备和完整的现场配套设施;

(2)激光破岩多因素影响机制评价量化

激光破岩过程中受多因素影响,确定关键影响因素,分析激光岩石作用过程中的宏微观变化规律,探寻多因素协调作用下激光破岩机制,合理设计最佳的激光破岩参数组合;

(3)激光/岩石/流体相互作用的耦合机制研究

还原激光/岩石/流体实际相互作用过程,耦合电磁场、温度场、应力场和流体动力场的作用关系,建立激光释放的能量与岩石破坏特征之间的联系,确定激光破岩的温度场、热应力场、流体动力场和破岩能量之间的关系;

(4)形成完善的激光破岩井下适用性研究体系

综合考虑激光井下作业环境,如井下激光岩石作用岩屑排除、激光钻遇复杂流体的作业安全性和井壁稳定的储层保护问题等,突破激光破岩的核心基础科学问题,将理论与室内实验研究成果转化到现场应用,形成完善的激光破岩井下适用性研究体系,实现激光破岩技术的井下成功作业。

5　结　论

激光破岩是由激光器决策能量来源,协同激光参数、岩石的性质、激光传递介质以及工作环境等多因素作用影响,以温度场相变传热为内在依托,涉及复杂物理力学性质等宏微观受激破坏响应,从而产生热破碎、熔化及汽化的碎岩过程。它是涉及多学科交叉的理论和技术密集型工程。在系统梳理现有研究成果的基础上,明晰得到现有理论和技术着重于新型激光器设计、激光破岩因素作用机制、激光破岩热效应、激光破岩物理力学性质和激光射孔与辅助应用 5 个方面的研究,整体呈现“多尺度、多物理场、多因素、多应用途径”的研究趋势。虽然成果丰硕,但目前仍处于破岩机理了解不深入、基础理论模型不完善、实验研究手段单一、配套设备及技术薄弱的理论技术体系成型与发展阶段,仍然需要进一步深入研究以突破激光破岩技术的工业化应用瓶颈。通过总结现有激光破岩技术的不足,指出可在现场配套设施研发、多影响因素评价、多场耦合作用机制和井下适用性理论体系研究等方面进行攻关突破,为激光破岩理论与技术的未来发展提供了可行研究方向。

参考文献：

[1] 张世一，韩彬，李美艳，等. 激光钻井技术研究进展与展望[J]. 石油机械，2016，44(7)：7-11.
ZHANG SH Y，HAN B，LI M Y，*et al*.. Research progress and prospect on laser drilling technology[J]. *China Petroleum Machinery*，2016，44(7)：7-11.（in Chinese）

[2] BAZARGAN M，HABIBPOUR M，JALALYFAR H，*et al*.. Using the laser irradiation to improve the rate of production of Iran South west formation[C]. *Proceedings of SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition*，*Society of Petroleum Engineers*，2012.

[3] 王德，李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学 精密工程，2001，9(3)：279-283.
WANG D，LI X Q. New progress in semiconductor lasers and their application[J]. *Opt. Precision Eng.*，2001，9(3)：279-283.（in Chinese）

[4] ADENIJI A W. The applications of laser technology in downhole operations-a review[C]. *Proceedings of International Petroleum Technology Conference*，*International Petroleum Technology Conference*，2014.

[5] 秦渊，毕娟，倪晓武，等. 毫秒激光金属打孔的解析和实验[J]. 光学 精密工程，2011，19(2)：340-347.
QIN Y，BI J，NI X W，*et al*.. Analysis and experiment on millisecond pulsed laser drilling of metals[J]. *Opt. Precision Eng.*，2011，19(2)：340-347.（in Chinese）

[6] BATARSEH S I，GRAVES R，AL OBAID O，*et al*.. High power laser technology in downhole applications，reshaping the industry[C]. *Proceedings of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*，*Society of Petroleum Engineers*，2017.

[7] SINHA P，GOUR A. Laser drilling research and application：an update[C]. *Proceedings of SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition*，*Society of Petroleum Engineers*，2006.

[8] 戴罡，陆建，刘剑，等. 使用长脉冲高能激光对石英玻璃打孔[J]. 光学 精密工程，2011，19(2)：380-386.
DAI G，LU J，LIU J，*et al*.. Expriment of long pulse high energy laser drilling on silica glass[J]. *Opt.. Precision Eng.*，2011，19(2)：380-386.（in Chinese）

[9] KURAWLE I B，KAUL M，MAHALLE N A，*et al*.. Laser，mono-diameter drillstring with resin spray casing completions[C]. *Proceedings of Offshore Europe*，*Society of Petroleum Engineers*，2009.

[10] 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]. *Proceedings of SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*，*Society of Petroleum Engineers*，2012.

[11] XU Z，REED C B，PARKER R A，*et al*.. Laser rock drilling by a super-pulsed CO_2 laser beam[C]. *Proceedings of the* 21*st International Congress on Application of Lasers and Electro-Optics*，*LIA*，2002：160291.

[12] 马卫国，杨增辉，易先中，等. 国内外激光钻井破岩技术研究与发展[J]. 石油矿场机械，2008，37(11)：11-16.
MA W G，YANG Z H，YI X ZH，*et al*.. Current progresses on laser drilling technology[J]. *Oil Field Equipment*，2008，37(11)：11-16.（in Chinese）

[13] 杨赟，谭平，韦孝忠，等. 激光钻井技术现状与关键技术[J]. 钻采工艺，2015，38(1)：35-39.
YANG Y，TAN P，WEI X ZH，*et al*.. Development status and key technologies of laser drilling[J]. *Drilling & Production Technology*，2015，38(1)：35-39.（in Chinese）

[14] XU Z，REED C B，GRAVES R，*et al*.. Rock perforation by pulsed Nd：YAG laser[C]. *Proceeding of the* 23*rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*，LIA，2004：1406.

[15] CLARKE J A. Laser micro-drilling applications[C]. *Proceedings of Global Powertrain Congress on Advanced Engine Design & Performance*，*USA*，2006：57-64.

[16] 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.

[17] XU ZH Y，YAMASHITA Y，REED C. Modeling of laser spallation drilling of rocks for gas and oil well drilling[C]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*，*Society of Petroleum Engineers*，2005.

[18] BYBEE K. Modeling laser-spallation rock drilling[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2006, 58(2): 62-64.

[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, 2001.

[20] 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 ZH, 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. (in Chinese)

[21] 谢冀江, 李维, 李雨田. 工业用数控激光切管机研制[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(6): 587-591.
XIE J J, LI W, LI Y T. Numerical control laser pipe cutting machine for industrial use[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 587-591. (in Chinese)

[22] 杨增辉, 易先中, 曹良波, 等. 激光钻井破岩技术及其发展[C]. 2010 年钻井基础理论研究与前沿技术开发新进展学术研讨会论文集, 中国石油学会, 2010: 120-129.
YANG Z H, YI X ZH, CAO L B, *et al*.. Laser drilling rock breaking technology and its development[C]. *Proceedings of the* 2010 *Symposium on Drilling Basic Theory Research and Frontier Technology Development*, *Chinese Petroleum Society*, 2010: 120-129.

[23] 易先中, 张军锋, 田佳. 激光钻井破岩技术及其发展前景[C]. 2011 年度钻井技术研讨会暨第十一届石油钻井院所长会议论文集, 中国石油工程学会, 2011: 1-7.
YI X ZH, ZHANG J F, TIAN J. Laser drilling rock breaking technology and its development prospects[C]. *Proceedings of the* 2011 *Drilling Technology Symposium and the* 11*th Petroleum Drilling Institute*, *China Petroleum Engineering Society*, 2011: 1-7. (in Chinese)

[24] 刘剑, 陆建, 倪晓武, 等. 单晶硅片在脉冲激光作用下的断裂行为[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(2): 414-420.
LIU J, LU J, NI X W, *et al*.. Fracture behavior during pulsed laser irradiating silicon wafer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 414-420. (in Chinese)

[25] O′BRIEN D G, GRAVES R M, O′BRIEN E A. Laser-rock-fluid interaction: application of free-electron laser (FEL) in petroleum well drilling and completions[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3614: 168-177.

[26] 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*.. Prospect of laser drilling technology[J]. *Foreign Oil Field Engineering*, 2010, 26(9): 42-44. (in Chinese)

[27] 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]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2002.

[28] BAZARGAN M, MADANI A, SHARIFI H, *et al*.. Utilisation of lasers in petroleum drilling industry[C]. *Proceedings of International Petroleum Technology Conference*, 2013.

[29] ASHENA R, ASHENA R, NABAEI M, *et al*.. Experimental investigation of specific energy of rocks by low power laser drilling[C]. *Proceedings of Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2010.

[30] 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.
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. (in Chinese)

[31] XU ZH Y, REED C B, PARKER R, *et al*.. Laser spallation of rocks for oil well drilling[C]. *Proceedings of the* 23*rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, *LIA*, 2004: 1803.

[32] 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]. *Proceedings of SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2015.

[33] 徐依吉, 周长李, 钱红彬, 等. 激光破岩方法研究及在石油钻井中的应用展望[J]. 石油钻探技术, 2010, 38

(4): 129-134.
XU Y J, ZHOU CH L, QIAN H B, *et al.*. The study of laser rock breaking method and its application in well drilling [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(4): 129-134. (in Chinese)

[34] 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.
HUANG K ZH. Analysis of influencing factors of laser drilling[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(1): 87-90. (in Chinese)

[35] 段锐, 郭田超, 孙涛, 等. 激光射孔破岩机理及应用前景展望[J]. 石化技术, 2017, 24(4): 253.
DUAN R, GUO T CH, SUN T, *et al.*. Laser perforation rock breaking mechanism and its application prospect[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2017, 24(4): 253. (in Chinese)

[36] 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.

[37] ERFAN M R, AHMADI M, ASHENA R, *et al.*. Drilling of middle-eastern reservoir carbonate rocks by high power ND: YAG laser[C]. *Proceedings of IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2010.

[38] 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.

[39] 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, 39(3): 121-123, 127.
LI SH 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, 39(3): 121-123, 127. (in Chinese)

[40] 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.
LI K X. Analysis of mechanism and influencing factors of laser breaking rock[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017. (in Chinese)

[41] 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.
ZHANG Y B. Research on high power laser perforation technology in petroleum well[D]. Xi'an: Northwest University, 2013. (in Chinese)

[42] 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.

[43] ELAHIFAR B, ESMAEILI A, PROHASKA M, *et al.*. An energy based comparison of alternative drilling methods[C]. *Proceedings of SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2011.

[44] BHARATISH A, KUMAR B K, RAJATH R, *et al.*. Investigation of effect of CO_2 laser parameters on drilling characteristics of rocks encountered during mining[J]. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2019, 31(4): 395-401.

[45] 刘拓, 王智信, 崔子昂, 等. 花岗岩表面激光破岩预钻孔工艺影响研究[J]. 应用激光, 2017, 37(4): 580-585.
LIU T, WANG ZH X, CUI Z A, *et al.*. Research on the process influence of laser pre-drilling on granite surface[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(4): 580-585. (in Chinese)

[46] 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.
PENG H X, GU Y F, WANG CH M, *et al.*. Study of laser perforating process on rock[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(5): 525-529. (in Chinese)

[47] 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.

[48] GAHAN B C, PARKER R A, BATARSEH S, *et al.*. Laser drilling: determination of energy required to remove rock [C]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2001.

[49] 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: 678-691.

[50] 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. (in Chinese)

[51] 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.
YANG Y, SUN X N, CHENG CH 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. (in Chinese)

[52] 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.

[53] 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: 885-894.

[54] PARKER R, XU Z, REED C, *et al.*. Drilling large diameter holes in rocks using multiple laser beams[C]. *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, *LIA*, 2004: 504.

[55] PARKER R A, GAHAN B C, GRAVES R M, *et al.*. Laser drilling: effects of beam application methods on improving rock removal[C]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2003.

[56] 黄开钊. 激光碎岩技术的研究[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(12): 63-65.
HUANG K ZH. Research on laser rock breaking technology[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2015, 27(12): 63-65. (in Chinese)

[57] SOLEYMANI M, BAKHTBIDAR M, KAZEMZADEH E. Experimental analysis of laser drilling impacts on rock properties[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 1(2): 106-114.

[58] LYU Z, SONG X ZH, SHI Y, *et al.*. Experimental study on specific energy of thermal spallation drilling technology [C]. *Proceedings of the 51st U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, *American Rock Mechanics Association*, 2017.

[59] GRAVES R M, BAILO E T. Analysis of thermally altered rock properties using high-power laser technology[C]. *Proceedings of Canadian International Petroleum Conference*, *Petroleum Society of Canada*, 2005.

[60] GAHAN B C, PARKER R A, GRAVES R, *et al.*. Laser drilling: drilling with the power of light phase 1: feasibility study[R]. US: Institute of Gas Technology, 2001.

[61] GRAVES R M, IONIN A A, KLIMACHEV Y M, *et al.*. Interaction of pulsed CO and CO_2 laser radiation with rocks typical of an oil field[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3885: 159-171.

[62] 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.

[63] GAHAN B C, BATARSEH S I, WATSON R C, *et al.*. Effect of downhole pressure conditions on high-power laser perforation[C]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2005.

[64] ERFAN M R, SHAHRIAR K, SHARIFZADEH M, *et al.*. Coupled T-H-M processes′ effect on specific energy in continuous wave fiber laser rock perforation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2018, 30(3): 032005.

[65] 张建阔. 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.
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. (in Chinese)

[66] 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.
LI M Y, HAN B, ZHANG SH Y, *et al.*. Experimental study on rock fragment assisted by laser technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(3): 1-3. (in Chinese)

[67] 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.

[68] 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(江汉石油学院学报), 2013, 35(4): 152-154, 157.
XIE H, ZHOU Y, DONG H R, *et al.*. Experimental study on laser assisted rock breaking[J]. *Journal of Oil and Gas Technology* (*Journal of Jianghan Petroleum Institute*), 2013, 35(4): 152-154, 157. (in Chinese)

[69] SAN-ROMAN-ALERIGI D P, HAN Y H, BATARSEH S I. Thermal and geomechanical dynamics of high power electromagnetic heating of rocks[C]. *Proceedings of SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*, *Society of Petroleum Engineers*, 2017.

[70] SAN-ROMAN-ALERIGI D P, BATARSEH S I, HAN Y H. Numerical modeling of thermal and mechanical effects in laser-rock interaction-an overview[C]. *Proceedings of the* 50*th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, *American Rock Mechanics Association*, 2016.

[71] HOSSAN M R, DUTTA P. Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(13-14): 3412-3422.

[72] CHANDRASEKHAR S. *Radiative Transfer*[M]. New York: Courier Corporation, 2013.

[73] CHO J H, NA S J. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. *Journal of Physics D*: *Applied Physics*, 2006, 39(24): 5372-5378.

[74] SAN-ROMÁN-ALERIGI D P, SLIMANE A B, NG T K, *et al.*. A possible approach on optical analogues of gravitational attractors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8298-8310.

[75] 易先中, 祁海鹰, 易先彬, 等. 激光破岩温度场的数学模型[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005, 27(6): 885-887.
YI X ZH, QI H Y, YI X B, *et al.*. Mathematical model of temperature field in laser rock breaking[J]. *Journal of Oil and Gas Technology* (*Journal of Jianghan Petroleum Institute*), 2005, 27(6): 885-887. (in Chinese)

[76] 易先中, 高德利, 明燕, 等. 激光破岩的物理模型与传热学特性研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(8): 62-65.
YI X ZH, GAO D L, MING Y, *et al.*. Physical model of removing rock by laser and its heat transfer characteristics[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(8): 62-65. (in Chinese)

[77] 易先中, 祁海鹰, 余万军, 等. 高能激光破岩的传热学特性研究[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(1): 11-13.
YI X ZH, QI H Y, YU W J, *et al.*. Research on heat transfer characteristics of the removal rock by laser[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1): 11-13. (in Chinese)

[78] YI X ZH, MA W G, CAI Z L, *et al.*. Temperature fields characteristics on removal rock by high-energy lasers[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 328-330: 104-107.

[79] BJORNDALEN N, BELHAJ H A, AGHA K R, *et al.*. Numerical investigation of laser drilling[C]. *Proceedings of SPE Eastern Regional Meeting*, *Society of Petroleum Engineers*, 2003.

[80] 李密, 王岩楼, 王亚丽, 等. 激光破岩的理论分析与数值模拟[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1245-1249.
LI M, WANG Y L, WANG Y L, *et al.*. Theoretical analysis and numerical simulation of laser to rock[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8): 1245-1249. (in Chinese)

[81] 柯珂. 激光破岩温度应力数学模型的建立与实验研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(29): 7532-7537, 7542.
KE K. The thermal-stress mathematical model and experimental study of rock-breaking by laser[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(29): 7532-7537, 7542. (in Chinese)

[82] 周国立, 易先中. 激光钻井岩石内温度场分析[J]. 内江科技, 2013, 34(1): 27-28.
ZHOU G L, YI X ZH. Analysis of temperature field in rock of laser drilling[J]. *Neijiang Science and Technology*, 2013, 34(1): 27-28. (in Chinese)

[83] 刘浩, 易万福, 朱双亚. 激光破岩耦合场仿真分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011405.
LIU H, YI W F, ZHU SH Y. Coupled-fields numerical simulation of laser to rock[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011405. (in Chinese)

[84] 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]. *Petrochem-*

ical Industry Application, 2016, 35(8): 1-5, 9. (in Chinese)

[85] NDEDA R A, SEBUSANG S E, MARUMO R, *et al.*. Numerical model of laser spallation drilling of inhomogeneous rock [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(2): 43-46.

[86] LI M Y, HAN B, ZHANG SH Y, *et al.*. Numerical simulation and experimental investigation on fracture mechanism of granite by laser irradiation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 52-60.

[87] 杨明军, 王玉丹, 文国军, 等. 激光辐照煤岩的热效应数值模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 217-222.
YANG M J, WANG Y D, WEN G J, *et al.*. Numerical simulation of thermal effects of laser irradiation on coal and rock [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(6): 217-222. (in Chinese)

[88] 牟海维, 辛朋辉, 罗伟. 岩石内含物对激光破岩的影响[J]. 山东科学, 2017, 30(2): 126-132.
MOU H W, XIN P H, LUO W. Effect of impurities in rocks on the mechanism of laser rock breaking[J]. *Shandong Science*, 2017, 30(2): 126-132. (in Chinese)

[89] 辛朋辉. 激光破岩机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
XIN P H. Research on laser rock breaking mechanism[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017. (in Chinese)

[90] BATARSEH S, GAHAN B C, GRAVES R M, *et al.*. Well perforation using high-power lasers[C]. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, *Society of Petroleum Engineers*, 2003.

[91] SHARMA K V, DE ARAUJO O M O, NICOLINI J V, *et al.*. Laser-induced alteration of microstructural and microscopic transport properties in porous materials: experiment, modeling and analysis[J]. *Materials & Design*, 2018, 155: 307-316.

[92] GRAVES R M, BATARSEH S, PARKER R A, *et al.*. Temperatures induced by high power lasers: effects on reservoir rock strength and mechanical properties[C]. *Proceedings of SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*, *Society of Petroleum Engineers*, 2002.

[93] 李美艳, 韩彬, 张世一, 等. 岩石表面激光射孔实验研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(7): 44-47.
LI M Y, HAN B, ZHANG SH Y, *et al.*. Experimental study of laser perforation on the surface of sandstone[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(7): 44-47. (in Chinese)

[94] 韩彬, 李美艳, 李璐, 等. 激光辅助破岩可钻性评价[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2014, 36(9): 94-97.
HAN B, LI M Y, LI L, *et al.*. Rock drillability evaluation of laser assisted rock breaking[J]. *Journal of Oil and Gas Technology* (*Journal of Jianghan Petroleum Institute*), 2014, 36(9): 94-97. (in Chinese)

[95] 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 SH Y, *et al.*. Study on laser assisted rock breaking law and mechanical properties[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(3): 363-368. (in Chinese)

[96] 李璐. 激光辅助钻井破岩机理及可钻性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
LI L. Mechanism of removing rock by laser and the study on drillability[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015. (in Chinese)

[97] DA SILVA M G, BRAGA A M, DE FARIA G V, *et al.*. Application of lasers for perforation of petroleum wells[C]. *Proceedings of OTC Brasil*, *Offshore Technology Conference*, 2017.

[98] BATARSEH S, SAN ROMAN ALERIGI D, REECE J, *et al.*. Downhole high-power laser tools development and evolutions [C]. *Proceedings of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, *Society of Petroleum Engineers*, 2018.

[99] BATARSEH S I, GRAVES R, SAN-ROMAN-ALERIGI D P, *et al.*. Laser perforation: lab to the field[C]. *Proceedings of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, *Society of Petroleum Engineers*, 2017.

[100] EZZEDINE S, RUBENCHIK A, YAMAMOTO R, *et al.*. Laser-enhanced drilling for subsurface EGS applications[J]. *GRC Transactions*, 2012, 36: 287-290.

[101] POONIWALA S A. Lasers: the next bit[C]. *Proceedings of SPE Eastern Regional Meeting*, *Society of Petroleum Engineers*, 2006.

[102] ZEDIKER M S. High power fiber lasers in geothermal, oil and gas[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8961: 89610D.

作者简介：

官 兵(1990—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2013 年于东北石油大学获得硕士学位,主要从事关于激光与岩石相互作用的传热相变、岩石破裂机制、机械及流体动力学等方面的研究。E-mail: sygcgb1990@163.com

李士斌(1965—),男,内蒙古赤峰人,博士,教授,博士生导师,2006 年于东北石油大学获得博士学位,主要从事油气井工程力学以及激光破岩等相关方向的研究。E-mail: lishibin_2001@sina.com

张立刚(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,博士生导师,2014 年于东北石油大学获得博士学位,主要从事油气井工程力学、油藏压裂应力场以及岩石热力学等方面的研究。E-mail: zhangligang529@126.com

陈双庆(1990—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,讲师,2018 年于东北石油大学获得博士学位,主要从事关于复杂数学模型求解优化方面的研究。E-mail: csqing2590@163.com

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊（物理学类；无线电电子学、电信技术类）

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊，曾于 1992 年，1996 年，2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”，并于 2000 年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年；美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年；美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年；日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文；2008 年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊；2010 年被美国“EI”确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中，《发光学报》被评为“双效期刊”。2002 年获中国科学院 2001～2002 年度科学出版基金“择重”资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大，主要反映本学科专业领域的科研和技术成就，及时报道国内外的学术动态，开展学术讨论和交流，为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊，A4 开本，144 页，国内外公开发行。国内定价：40 元，全年 480 元，全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用，踊跃投稿。

地 址：长春市东南湖大路 3888 号
《发光学报》编辑部
邮 编：130033
电 话：(0431)86176862, 84613407
E-mail：fgxbt@126.com

国内统一刊号：CN 22-1116/O4
国际标准刊号：ISSN 1000-7032
国内邮发代号：12-312
国外发行代号：4863BM
http://www.fgxb.org