

高能激光辐照参数对岩石穿孔特性影响及效能分析

胡瑶瑶¹,徐彬^{2,3},马川义¹,黄新杰^{2,4},张波⁴,李彪^{2,4*}

(1. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098; 2. 山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061; 3. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 4. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:为探究激光参数对破岩效果的影响,开展激光辐照岩石穿孔效应研究。借助 MATLAB 软件获取熔蚀坑孔洞周围热裂纹宏观拓展形貌,揭示激光破岩参数对岩石热裂解特性影响。分析激光耗能及熔蚀坑孔洞体积间的定量关系,阐明激光参数对穿孔比能、切口比能和钻进速度的影响规律。结果表明:激光辐照岩石过程中首先在辐照点周围生成熔蚀坑孔洞,随后孔洞周围的热致微裂纹扩展发育形成辐射性宏观热裂纹;随着激光功率和辐照时间的增加,岩石热裂纹累积总面积及累积总长度增加,熔蚀坑孔洞体积也逐渐增大;兼顾熔蚀坑孔洞体积、宏观热裂纹形成条件以及破岩效能,建议激光功率不小于 4 kW,同时辐照时间不超过 5 s。

关键词:热裂纹;熔蚀坑孔洞;比能;切口比能;钻进速度

中图分类号:TU45

文献标志码:A

引用格式:胡瑶瑶,徐彬,马川义,等. 高能激光辐照参数对岩石穿孔特性影响及效能分析[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(6):72-81.

HU Yaoyao, XU Bin, MA Chuanyi, et al. Influence and efficiency analysis of high-energy laser irradiation parameters on rock perforation characteristics[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):72-81.

Influence and efficiency analysis of high-energy laser irradiation parameters on rock perforation characteristics

HU Yaoyao¹, XU Bin^{2,3}, MA Chuanyi¹, HUANG Xinjie^{2,4}, ZHANG Bo⁴, LI Biao^{2,4*}

(1. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China; 2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 4. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to investigate the influence of laser parameters on the rock breaking effect, a study on the perforation effect of laser irradiated rock was carried out. With the help of MATLAB software, the macroscopic expansion morphology of thermal cracks around the melting pit holes was obtained, and the influence of the laser rock breaking parameters on the thermal cracking characteristics of the rock was revealed. The quantitative relationship between the laser energy consumption and the melting pit hole volume was analyzed, and the influence laws of laser parameters on specific energy and specific kerfing energy and rate of penetration were elucidated. The results showed that laser irradiated rock first generated melting pit holes around the irradiation point, and then the thermal microcracks around the holes expanded and developed to form radiative macroscopic thermal cracks. With the increase of laser power and irradiation time, the cumulative total area and cumulative total length of sandstone thermal cracks increased, and the volume of melting pit holes gradually increased. Taking into account the melting pits volume, macroscopic thermal crack formation conditions, and rock-breaking efficiency, it was recommended that the laser power should not be less than 4 kW, and the irradiation time should not exceed 5 s.

Keywords: thermal crack; melting pit hole; specific energy; specific kerfing energy; rate of penetration

0 引言

随着交通强国战略的推进,一大批隧道、地下

设施、路基、边坡等工程在建或即将建设^[1-3]。地质钻机因自动化、机械化程度高,安全高效等优势,已成为隧道施工领域应用最广的工程机械之一^[4-6]。然而,钻机长距离钻孔施工速度慢,尤其在百米级

施工过程中,平均钻进速度不足 3 m/h,耗时在 40 h 以上,严重影响隧道施工效率^[7],已成为制约地下空间建设的主要瓶颈^[8-9]。研究高效破岩新理论和新技术是解决上述问题的有效手段,近年来提出了许多新型破岩方法,如高压水射流破岩^[10-11]、微波破岩^[12-13]、电脉冲破岩^[14-15]、激光破岩等^[16-17],均取得了良好效果。其中,高能激光具有能量密度大、穿孔效率高、无机械磨损、应用范围广等优势,认为是极具潜力的破岩方法之一^[18-20]。近年来,已有学者对激光破岩技术开展了探索性研究。在激光参数对破岩效果影响方面,文献[21]探讨了激光破岩参数对破岩效果的影响,研究表明随着辐照时间增加及辐照距离减小,岩石反应区温度变大,热裂纹生成数量增多且裂纹深度变大,岩石热破碎反应增强;文献[22]研究了激光穿孔数量对砂岩表面热裂纹扩展面积的影响,随着穿孔数量的增加,岩石表面裂纹长度和深度都呈现增加趋势;文献[23]研究发现钻孔深度与激光功率和激光频率呈显著正相关,而与修正比能呈负相关;文献[24]利用功率为 6 kW 的光纤激光器对 50 mm 和 60 mm 厚的不锈钢板进行水下切割,通过改变切割速度获得了较好的切割效果。在破岩机理方面,文献[25]利用 X 射线衍射和能谱分析等方法讨论了激光辐照作用下岩石的破裂机理,证实了激光辐照生成的热应力是岩石强度降低的根本原因;文献[26]基于数值分析进一步探究了激光辐照作用下岩石内部的热应力分布规律,指出激光辐照引起的高加热和冷却速率产生了远超花岗岩试样抗拉强度的拉伸应力(481~536 MPa),导致岩石破裂;文献[27]借助数值模拟方法再现了激光穿孔过程中热裂纹的萌生、发育、扩展和贯通的全过程,认为激光诱导的热裂纹有利于提高岩石孔隙度和渗透率。现有研究已经分析了激光破岩参数对岩石破坏效果的影响,但在破岩参数与熔蚀坑体积及裂纹特征间的定量关系方面研究尚不充分,且有关激光钻孔效能分析的相关研究较少,未能给出适用于工程现场的优势破岩参数组合。本研究开展了激光热裂解岩石试样的室内试验,分析了激光热裂解岩石过程及热损伤演化特征,量化了激光破岩参数对热裂纹和熔蚀坑孔洞形貌的影响,并揭示了岩石钻孔比能、切口比能和钻进速度随激光破岩参数的变化规律,最终给出了适用于工程实际的激光高效钻进参数范围。

1 试验过程及方法

1.1 试样制备

所有砂岩试样均来自中国山东省济宁市的某采石场,为减少微观结构变化对试验结果的影响,要求试样的纵波速度和密度相近。试样被加工成直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱,并用电子数字卡尺对试样的直径和高度进行测试,以保证尺寸精度,相关物理力学参数如表 1 所示。

表 1 完整砂岩试样的基本物理力学参数
Table 1 The physical and mechanical parameters of intact sandstone specimens

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗压强度 σ_c / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	导热系数 $K_c(T) / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
2.31	43.51	19.17	0.17	2.41

1.2 激光辐照砂岩试样方案

如图 1 所示,用于照射砂岩试样表面的连续波半导体激光器波长为 915 nm,最大输出功率为 5 kW,功率可调范围为 1%~100%。由激光头输出的激光光束直径为 10 mm,为避免激光辐照岩石产生的熔融飞溅物损伤镜头,设置激光与砂岩间的辐照距离为 200 mm。为防止激光辐照导致岩石高温燃烧造成设备损坏,试验过程中采用工业高纯度氮气作为辅助气体,通过同轴喷嘴输送,辅助气体压力设置为 0.6 MPa,以保证能及时清除熔蚀坑内的玻璃釉质,提高激光穿孔效率。砂岩放置在高精度的三轴数控加工平台内部,通过智能化控制系统,可实现激光与岩石相对位置和激光破岩参数的控制与调整。



图 1 激光辐照热裂解岩石试验系统

Fig.1 Test system of laser irradiated thermal fracturing rock breaking

试验开始前,将砂岩试样放置在三轴数控加工平台内部,通过控制系统调节激光破岩参数,以便在岩石端面中心位置进行激光穿孔;试验过程中,严格按照试验要求进行参数调控;试验结束后,将

辐照后的砂岩试样自然冷却至室温,防止过快的冷却速度对试样造成热冲击影响结果可靠性。本研

究探究了激光功率和辐照时间对试验结果的影响,具体试验内容及参数设置见表2。

表2 激光热裂破岩参数

Table 2 Laser thermal fracturing rock breaking parameters

激光功率 P/W	辐照时间 t/s	辐照距离/ mm	脉冲宽度	频率/Hz	入射角/ ($^{\circ}$)	波长 λ/nm	光斑直径/ mm	辅助气体 压力/MPa
0, 800, 1 600, 2 400, 3 200, 4 000, 4 800	5, 10	200	μs 级	5 000	0	915	20	0.6

2 结果分析

2.1 激光热裂解砂岩表面损伤演化分析

激光辐照砂岩试样热裂解过程如图2所示,试验过程中激光辐照砂岩试样产生耀眼的强光,试样瞬间熔融汽化产生大量絮状白烟。在辅助气体作用下部分熔化物从岩石表面吹离,并以颗粒状向四周飞溅,最后冷凝形成白色玻璃釉。停止辐照后,岩石形成倒锥形熔蚀坑孔洞,且孔洞表面附着一层厚厚的白色玻璃釉,这是由于部分熔融物未及时吹走导致的。此外,熔蚀坑孔洞周围出现了数条沿径向扩展的热裂纹,这是由于岩石内部的热应力导致的。

辐照后砂岩表面形貌如图3所示。由图3可知,激光辐照砂岩试样形成熔蚀坑孔洞以及裂纹网络,两者是辐照后试样的主要热损伤。分析发现,随着激光功率和辐照时间的增加,试样端面总是先产生熔蚀坑孔洞,随后在孔洞周围生成辐射性热裂纹。以辐照时间5 s为例,宏观热裂纹生成的最小激光功率为4.0 kW。当激光功率小于4.0 kW时,辐照后砂岩试样表面仅形成了近似圆形的熔蚀坑孔洞,无宏观裂纹出现。当激光功率达到4.0~4.8 kW时,熔蚀坑孔洞周围率先生成紧密分布的微裂纹,在热应力作用下微裂纹不断扩展和发育,最终形成1~2条沿径向延伸的宏观裂纹。

值得注意的是,较短的辐照时间导致试样内部热量累积相对较小,宏观裂纹的宽度较小。当辐照时间增加到10 s时,宏观热裂纹生成的最小激光功率减小至2.4 kW,且由于辐照时间的增加,熔蚀坑孔洞周围的微裂纹扩展发育加剧,以至于形成2~4条沿径向延伸的宏观裂纹。综上所述,随着照射时间的增加,宏观裂纹产生时的激光功率会下降,当辐照时间增大到10 s时,辐照砂岩产生宏观微裂纹的最小激光功率由4.0 kW下降至2.4 kW。

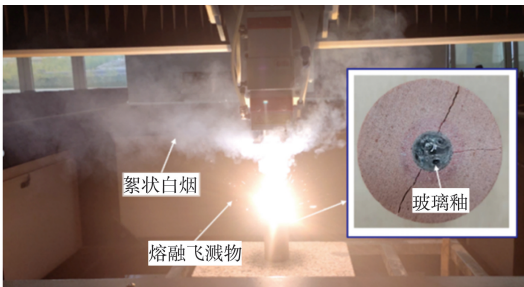


图2 激光辐照砂岩试样热裂解过程

Fig.2 Thermal fracturing process of laser irradiated sandstone specimen

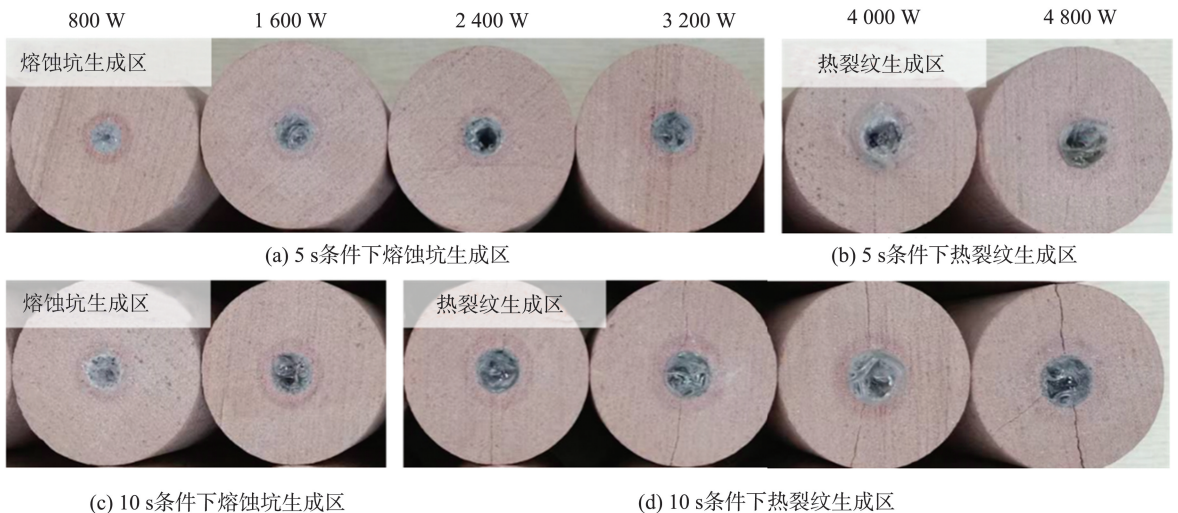
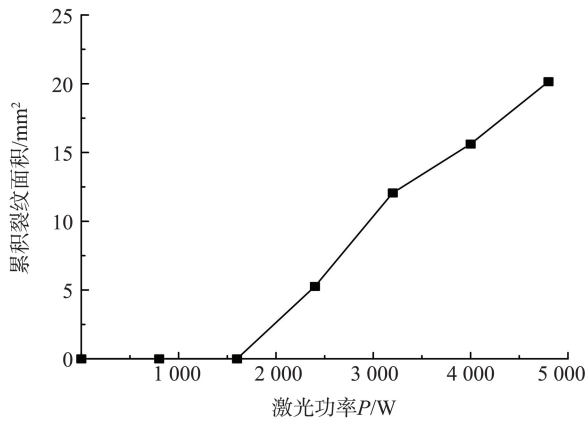


图3 辐照后砂岩表面形貌

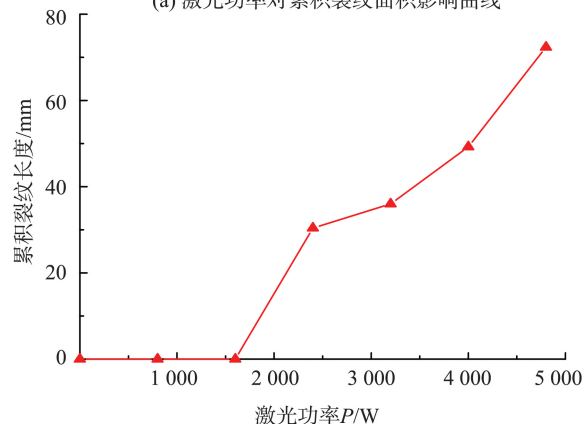
Fig.3 Irradiated sandstone surface morphology

2.2 激光破岩参数对裂纹特征影响分析

上述研究表明激光辐照砂岩产生的热裂纹及熔蚀坑孔洞形貌受激光破岩参数影响,为探明激光破岩参数与热损伤效果间的关系,定量分析了不同激光参数作用下的热裂纹及熔蚀坑孔洞形貌变化特征。采用裂纹识别提取技术获取端面热裂纹真实形貌,通过 MATLAB 软件依次计算累积裂纹面积及累积裂纹长度。以激光辐照 10 s 为例,图 4(a)展示了激光功率对辐照后试样累积裂纹面积的影响。从图 4(a)可以看出:当激光功率小于 1 600 W 时,砂岩试样吸收的激光总能量较少,试样端面并未形成宏观热裂纹,因此累积裂纹面积为 0;随着激光功率的提高(大于 1 600 W),累积裂纹面积也随之增大,且两者近似呈现线性增长趋势;当激光功率达到 4 800 W 时,试样端面累积裂纹面积达到了 20.15 mm²。图 4(b)展示了激光功率对累积裂纹长度的影响。从图 4(b)可以看出,当激光功率小于 1 600 W 时,由于激光功率过小,砂岩试样端面并未形成宏观热裂纹,导致累积裂纹长度为 0。



(a) 激光功率对累积裂纹面积影响曲线



(b) 激光功率对累积裂纹长度影响曲线

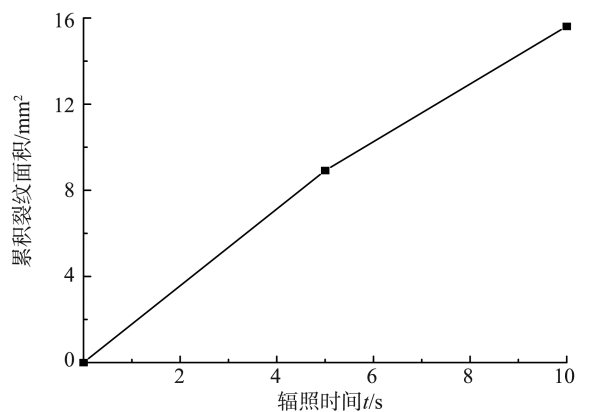
图 4 激光功率对裂纹形貌影响

Fig.4 Effect of laser power on crack morphology

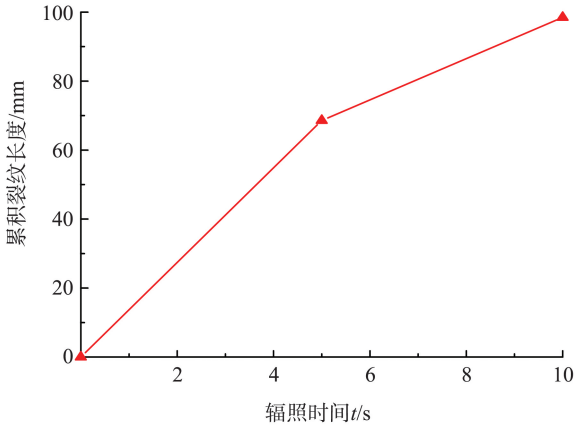
随着激光功率的提高(大于 1 600 W),累积裂

纹长度也随着加长,但增长趋势相对复杂,曲线呈现先快速增加再缓慢增加,最后再快速增加的趋势。当激光功率为 1 600~2 400 W 时,砂岩试样端面开始出现热裂纹,增长速率较快,以激光功率 2 400 W 为例,此时砂岩端面累积裂纹长度增长至 30.41 mm;当激光功率为 2 400~3 200 W 时,辐照后砂岩试样表面均出现 2 条宏观裂纹,因此累积裂纹长度增长速度不明显;当激光功率为 3 200~4 800 W 时,辐照后砂岩试样表面产生了 3 条或 4 条宏观裂纹,此时累积裂纹长度增长速度快速增加,以激光功率 4 000 W 为例,此时砂岩端面累积裂纹长度为 49.23 mm,当激光功率增加到 4 800 W 时,累积裂纹长度增长到 72.34 mm,增长率为 46.94%。综上所述,随着激光功率的增加,砂岩试样的累积裂纹面积和累积裂纹长度均呈现增加趋势,这说明高功率激光能使岩石更为破碎,因此当激光热裂解技术应用于实际工程时,不宜选用较低的激光功率。

以激光功率 4 000 W 为例,图 5(a)展示了辐照时间对砂岩试样累积裂纹面积的影响。从图 5(a)可以看出:随着辐照时间的增加,累积裂纹面积呈现线性增加趋势;当辐照时间为 5 s 时,累积裂纹面积在 8.92 mm²;当辐照时间增加至 10 s 时,累积裂纹面积增大到 15.61 mm²,增长率达 75.00%。图 5(b)展示了辐照时间对砂岩试样累积裂纹长度的影响。从图 5(b)可以看出:随着辐照时间的增加,累积裂纹面积呈现先快速增加再缓慢增加的趋势;当辐照时间为 5 s 时,累积裂纹长度为 34.29 mm;当辐照时间增加至 10 s 时,累积裂纹长度增加至 49.23 mm,此时的增长率为 43.57%。综上所述,辐照时间的增加同样可以有效增加辐照后砂岩试样的累积裂纹面积及累积裂纹长度,因此亦可通过增加辐照时间的方式使岩石破碎更为充分。



(a) 辐照时间对累积裂纹面积影响曲线



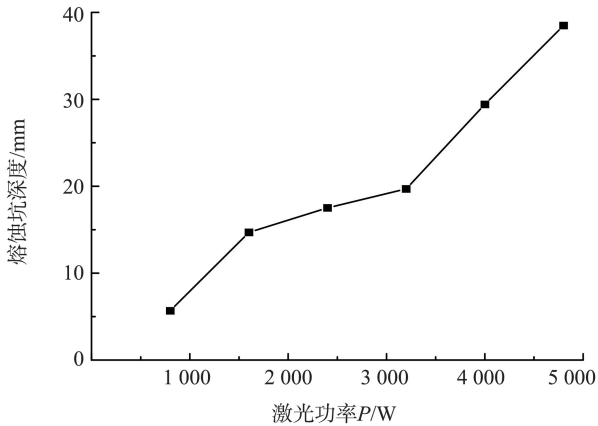
(b) 辐照时间对累积裂纹长度影响曲线

图5 辐照时间对裂纹形貌影响

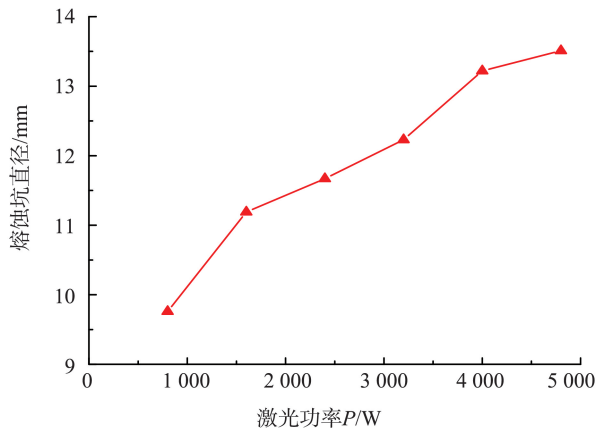
Fig.5 Effect of irradiation time on crack morphology

2.3 激光破岩参数对熔蚀坑深度和直径影响分析

砂岩试样的质量减少是通过熔融和汽化实现的,激光辐照岩石穿孔体积越大,熔蚀效果越显著,熔蚀坑深度和直径随激光功率的变化曲线如图6所示。



(a) 激光功率对熔蚀坑深度影响曲线



(b) 激光功率对熔蚀坑直径影响曲线

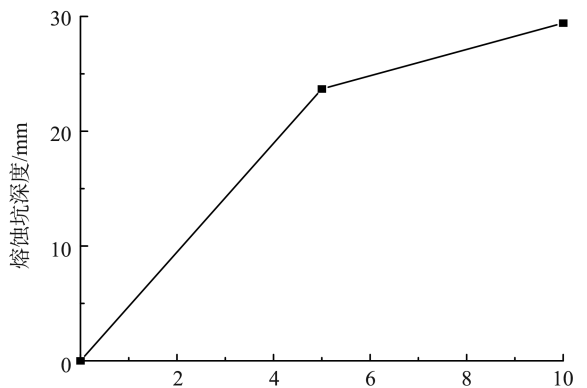
图6 激光功率对熔蚀坑形貌影响

Fig.6 Effect of laser power on the drilling hole shape

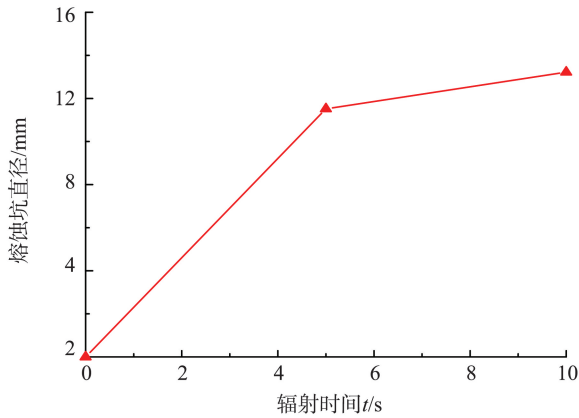
从图6(a)可以看出:激光辐照10 s条件下,

随着激光功率的增加,熔蚀坑深度呈现先快速增加再缓慢增加,最后再快速增加的趋势;当激光功率为1 600 W时,熔蚀坑深度迅速增加至14.69 mm;当激光功率提升至3 200 W时,熔蚀坑深度缓慢增加至19.69 mm,增长率仅为34.04%;当激光功率达到4 800 W时,熔蚀坑深度迅速增加至38.50 mm,相对于3 200 W条件下的熔蚀坑深度,增长率为95.53%。图6(b)展示了激光功率对熔蚀坑直径的影响,可以看出随着激光功率的增加,熔蚀坑直径也呈现增加趋势,然而由于砂岩试样的导热系数较低,导致激光束能量难以向径向传播,熔蚀坑直径增加并不显著,4 800 W条件下的熔蚀坑直径仅比800 W条件下的熔蚀坑直径增大3.75 mm。综上所述,随着激光功率的提升,激光辐照砂岩熔蚀坑深度和熔蚀坑直径都提升,即熔蚀坑体积增大。

以激光功率4 000 W为例,图7(a)展示了辐照时间对熔蚀坑深度的影响。由图7(a)可以看出:随着辐照时间的增加,熔蚀坑深度呈现先快速增加再缓慢增加的趋势;当辐照时间为5 s时,熔蚀坑深度迅速增加至23.68 mm;当辐照时间为10 s时,熔蚀坑深度增加至29.42 mm,相对于辐照时间为5 s,增长率仅为24.24%。图7(b)展示了相同条件下的熔蚀坑直径变化。由图7(b)可以看出:随着辐照时间的增加,熔蚀坑直径呈现缓慢增加的趋势;当辐照时间为5 s时,熔蚀坑直径为11.52 mm;当辐照时间增加到10 s时,熔蚀坑直径仅增加至13.22 mm,增加率仅为14.76%。研究表明辐照时间对熔蚀坑形貌的影响与激光功率类似,随着辐照时间提升,激光辐照砂岩熔蚀坑深度和熔蚀坑直径都提升,但熔蚀坑深度提升显著,熔蚀坑直径仅有小幅增加。



(a) 辐照时间对熔蚀坑深度影响曲线



(b) 辐照时间对熔蚀坑直径影响曲线

图 7 辐照时间对熔蚀坑形貌影响

Fig.7 Effect of irradiation time on the drilling hole shape

3 激光辐照砂岩钻孔效能分析

3.1 激光穿孔比能

比能是评价岩石破碎效率的重要指标,它代表了移除单位体积岩石所需的能量,其计算公式为:

$$S_E = E/V, \quad (1)$$

式中: S_E 为比能, J/mm^3 ; E 为激光穿孔岩石所消耗的能量, J ; V 为激光穿孔体积, mm^3 。

激光穿孔岩石所消耗的能量

$$E = Pt, \quad (2)$$

式中: P 为激光功率, W ; t 为激光辐照时间, s 。

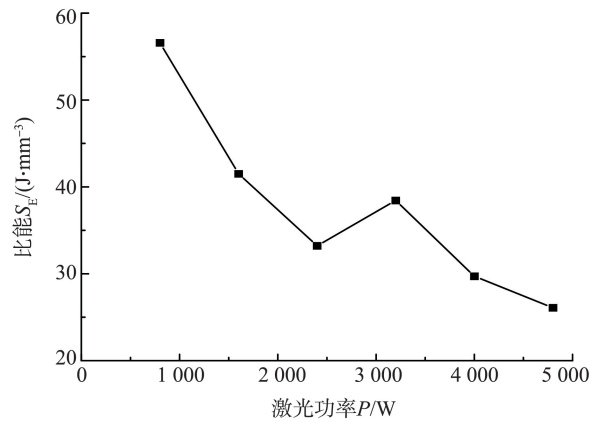
特别地,激光穿孔体积为倒锥形,故体积

$$V = \pi D^2 h/12, \quad (3)$$

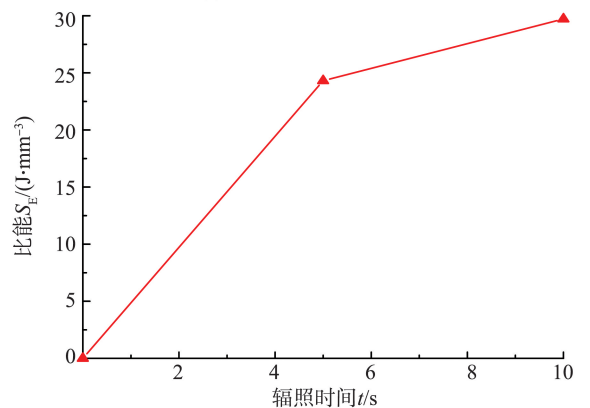
式中: D 为熔蚀坑直径, mm ; h 为熔蚀坑深度, mm 。

根据计算公式(1),得到辐照 10 s 条件下激光热裂解砂岩比能随激光功率的变化曲线如图 8(a)所示。由图 8(a)可以看出:随着激光功率的增加,比能总体呈现先快速减小再缓慢减小的趋势;当激光功率为 800~2 400 W 时,比能迅速由 $56.58 J/mm^3$ 减小至 $33.22 J/mm^3$,下降率为 41.27%;随着激光功率的继续增加(3 200~4 800 W),比能减小速率下降;当激光功率达到 4 800 W 时,比能达到最小值 $26.09 J/mm^3$ 。图 8(b)展示了功率在 4 000 W 条件下激光钻孔砂岩比能随辐照时间的变化曲线。由图 8(b)可以看出:随着辐照时间的增加,比能呈现先快速增加再缓慢增加的趋势;当辐照时间为 5 s 时,比能为 $24.31 J/mm^3$;当辐照时间为 10 s 时,比能为 $29.72 J/mm^3$ 。综上所述,随着激光功率的增加,比能总体呈现先快速减小再缓慢减小的趋势,而随着辐照时间的增加,比能呈现先快速增加再缓

慢增加的趋势。



(a) 激光功率对比能影响曲线



(b) 辐照时间对比能影响曲线

图 8 激光破岩参数对比能的影响

Fig.8 Effect of laser rock breaking parameters on specific energy

3.2 激光切口比能

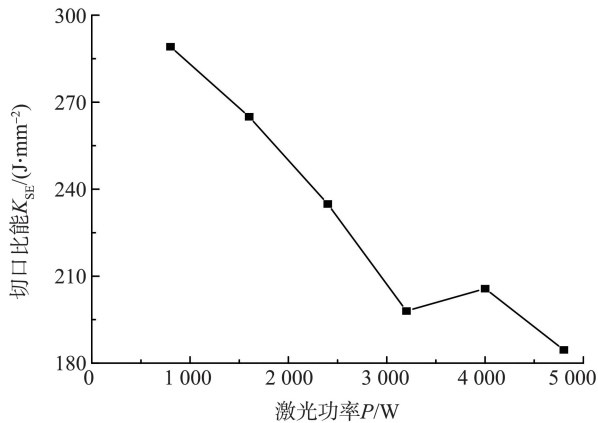
切口比能也是评价岩石破碎效率的重要指标,它代表了单位切口面积内激光穿孔岩石所需的能量,其计算公式为:

$$K_{SE} = \frac{2E}{Dh}, \quad (4)$$

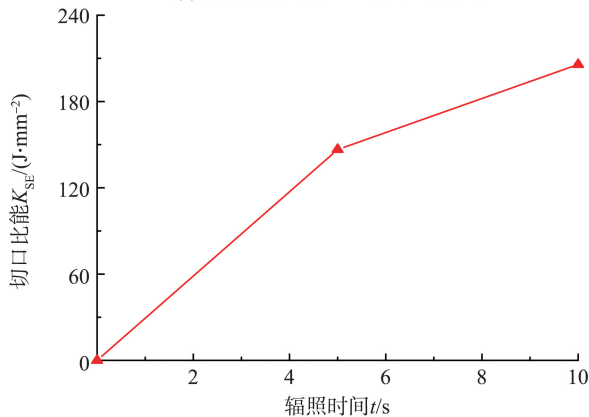
式中: K_{SE} 为切口比能, J/mm^2 ; D 为熔蚀坑直径, mm ; h 为熔蚀坑深度, mm 。

根据计算公式,得到辐照 10 s 条件下激光辐照砂岩切口比能随激光功率的变化曲线,如图 9(a)所示。由图 9(a)可以看出:随着激光功率的增加,切口比能总体呈现先快速减小再缓慢减小的趋势;当激光功率为 800~3 200 W 时,切口比能迅速由 $289.13 J/mm^2$ 减小至 $198.01 J/mm^2$,下降率为 31.52%;随着激光功率的继续增加(4 000~4 800 W),切口比能减小速率下降,当激光功率达到 4 800 W 时,切口比能达到最小值 $184.57 J/mm^2$ 。图 9(b)展示了功率在 4 000 W 条件下激光钻孔砂岩切口比能随辐照时间的变化曲线。由图 9(b)可以看

出:随着辐照时间的增加,切口比能呈现先快速增加再缓慢增加的趋势;当辐照时间为5 s时,切口比能为146.63 J/mm²;当辐照时间为10 s时,切口比能为205.69 J/mm²。综上所述,随着激光功率的增加,切口比能总体呈现先快速减小再缓慢减小的趋势,而随着辐照时间的增加,切口比能呈现先快速增加再缓慢增加的趋势。



(a) 激光功率对切口比能影响曲线



(b) 辐照时间对切口比能影响曲线

图9 激光破岩参数对切口比能的影响

Fig.9 Effect of laser rock breaking parameters on specific kerfing energy

3.3 激光钻进速度

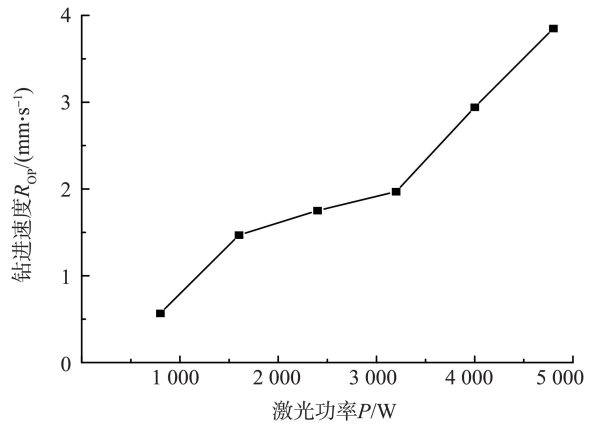
钻进速度是另外一个评价岩石破碎效率的重要指标,主要用于衡量激光穿孔砂岩的钻进效率,它代表了单位时间内激光穿孔砂岩的深度。其计算公式为:

$$R_{OP} = \frac{h}{t}, \quad (5)$$

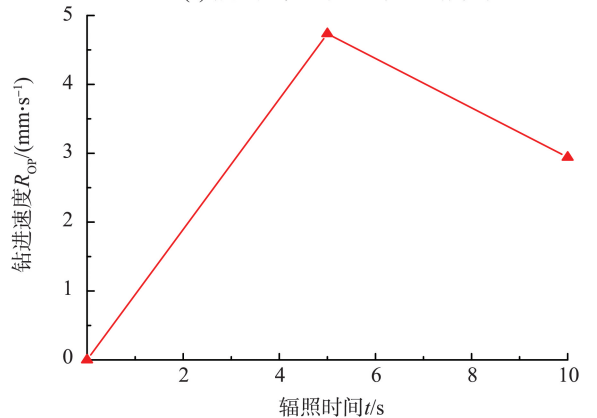
式中: R_{OP} 为钻进速度,mm/s; h 为熔蚀坑深度,mm。

根据公式(5),可得到辐照10 s条件下激光钻孔砂岩钻进速度随激光功率的变化曲线,如图10(a)所示。由图10(a)可以看出:随着激光功率的增加,钻进速度呈现先快速增加再缓慢增加,最后再快速增加的趋势;当激光功率升高至1 600 W时,钻

进速度增加至1.47 mm/s;当激光功率升高至3 200 W时,钻进速度增加至1.97 mm/s;随着激光功率的继续增加(大于3 200 W),此后钻进速度近似以线性趋势快速增加,当激光功率达到4 800 W时,钻进速度增加至最大值3.85 mm/s。图10(b)展示了功率4 000 W条件下激光钻孔砂岩钻进速度随辐照时间的变化曲线。从图10(b)可以看出:随着辐照时间的增加,钻进速度呈现先增加后减小的趋势;当辐照时间为5 s时,钻进速度增加至4.74 mm/s;当辐照时间为10 s时,钻进速度下降至2.94 mm/s,下降率为61.22%。综上所述,在激光功率不小于4 000 W以及辐照时间不超过5 s条件下可获得相对较高的钻进速度。



(a) 激光功率对钻进速度影响曲线



(b) 辐照时间对钻进速度影响曲线

图10 激光破岩参数对钻进速度的影响

Fig.10 Effect of laser rock breaking parameters on drilling of speed

低比能、低切口比能以及高钻进速度意味着激光穿孔砂岩具有更好的钻进效能,根据上述结论,当激光热裂破岩技术应用于工程实际时,应选用较大的激光功率及较小的辐照时间以获取更高的效能。此外当激光功率大于等于4 000 W同时辐照时间为5 s时,激光穿孔形成的熔蚀坑体积较大,且岩石表面形成了宏观热致裂纹,这有效降低

了岩石完整性,利于岩石的进一步破碎。综合考虑熔蚀坑孔洞体积、宏观热裂纹形成条件以及钻进效能,建议激光功率不小于4 000 W,同时辐照时间不超过5 s。

4 讨论

实际钻孔施工过程中常常遭遇复杂多变地层环境,如砂岩地层、花岗岩地层等,其岩性变化严重影响激光的穿孔能力。为探究高能激光在不同岩石类型条件下的穿孔特性及效能,进一步开展了激光辐照花岗岩试样的穿孔试验,其中岩石类型为花岗岩,辐照时间为5 s,辐照距离为150 mm,单轴抗压强度为90 MPa。试验结果及部分激光参数如表3所示,其余参数设置与表2相一致。

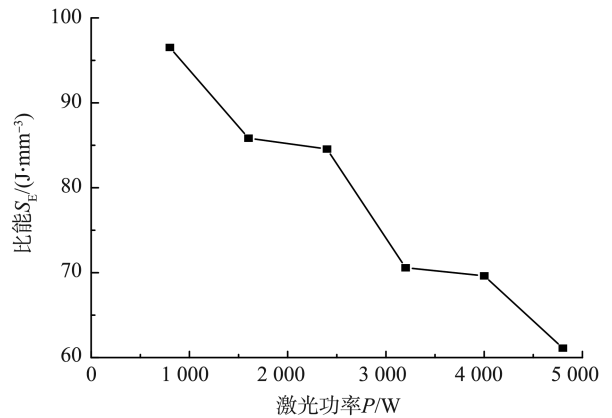
表3 激光破岩参数及试验结果

Table 3 Laser rock-breaking parameters and test results

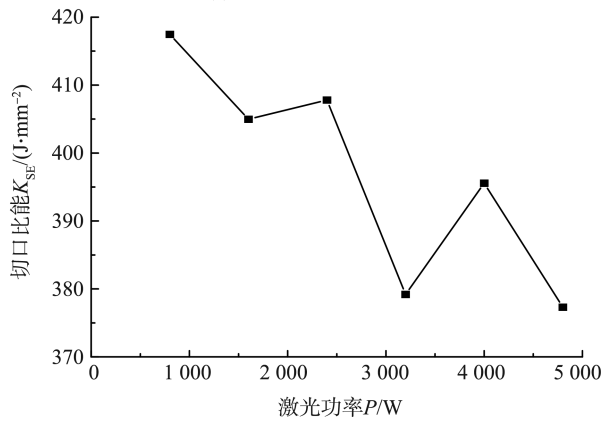
试验序号	激光功率 P/W	熔蚀坑深度 h/mm	熔蚀坑直径 D/mm	是否形成宏观热裂纹
1	0	0	0	否
2	800	4.64	8.26	否
3	1 600	8.77	9.01	否
4	2 400	12.78	9.21	否
5	3 200	16.45	10.26	否
6	4 000	18.64	10.85	是
7	4 800	21.58	11.79	是

由表3可以看出,当激光功率不小于4 000 W时,岩石表面开始形成宏观热裂纹,且熔蚀坑孔洞体积相对较大,约为574.45 mm³,相较于3 200 W激光功率条件下的熔蚀坑孔洞体积增大为21.10%。这表明此条件下激光辐照对花岗岩试样产生较大的热损伤,导致岩石完整性下降,有利于岩石的进一步破碎。

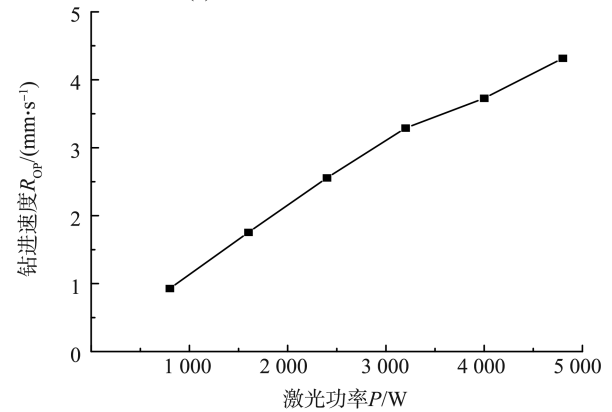
辐照5 s条件下激光钻孔效能随激光功率的变化曲线如图11所示。从图11可以看出:随着激光功率的增加,比能和切口比能呈现明显下降趋势,钻进速度呈现上升趋势;当激光功率不小于4 000 W时,激光穿孔可以获得相对较小的比能和切口比能,同时获得相对较大的钻进速度,相较于800 W激光功率条件下,比能下降率为27.87%,切口比能下降率为13.87%,钻进速度提高接近4倍。综上所述,“激光功率不小于4 000 W同时辐照时间不超过5 s,即为兼顾熔蚀坑孔洞体积、宏观热裂纹形成条件以及高破岩效能的优势参数组合”这一结论同样适用于花岗岩试样。



(a) 激光功率对比能影响曲线



(b) 激光功率对切口比能影响曲线



(c) 激光功率对钻进速度影响曲线

图11 激光功率对花岗岩穿孔效能的影响
Fig.11 Effect of laser power on granite perforation efficiency

5 结论

本研究利用激光辐照热裂破岩试验系统对岩石试样进行了热辐照处理,分析了激光辐照岩石穿孔过程及辐照后试样的热损伤演化特征,揭示了不同激光破岩参数作用下的热裂纹及钻孔形貌变化规律。在此基础上,分别对岩石试样的钻孔比能、切口比能和钻进速度进行了讨论,获得了兼顾熔蚀坑孔洞体积、宏观热裂纹形成条件及优势钻孔效能条件下的激光破岩参数组合。基于本项研究,得到

主要结论如下。

(1) 激光辐照砂岩先生成熔蚀坑孔洞,随后孔洞周围热致微裂纹扩展发育形成放射性宏观裂纹。随着照射时间的增加,产生宏观裂纹时的激光功率有所下降,当辐照时间增大到 10 s 时,辐照砂岩产生宏观微裂纹的最小激光功率由 4 000 W 下降至 2 400 W。

(2) 随着激光功率的提升,辐照后试样累积裂纹面积近似呈现线性增长趋势,累积裂纹长度呈现先快再缓、最后再快速增加的趋势;钻孔深度呈现先快速再缓、最后再快速增加的趋势,钻孔直径呈现小幅度增加的趋势。随着辐照时间增加,累积裂纹面积呈现线性增加趋势,累积裂纹长度呈现先快速增加再缓慢增加的趋势;钻孔深度呈现先快速增加再缓慢增加的趋势,钻孔直径呈现小幅度增加的趋势。

(3) 激光钻孔砂岩比能随激光功率的增加呈现先快速减小再缓慢减小的趋势,随辐照时间的增加呈现先快速增加再缓慢增加的趋势;钻进速度随激光功率的增加呈现先快速增加再缓慢增加,最后再快速增加的趋势,随辐照时间的增加呈现先增加后减小的趋势。在实际工程中,为兼顾熔蚀坑孔洞体积、宏观热裂纹形成条件以及破岩效能,建议激光功率不小于 4 000 W,同时辐照时间不超过 5 s。

参考文献:

- [1] BAYATI M, HAMIDI J K. A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 63: 162-170.
- [2] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3): 445-468.
XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan - Tibet railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(3): 445-468.
- [3] DE LA FUENTE M, SULEM J, TAHERZADEH R, et al. Tunneling in squeezing ground: effect of the excavation method [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 601-623.
- [4] WANG T, XIAO X, ZHU H, et al. Experimental study on Longmaxi shale breaking mechanism with micro-PDC bit [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50: 2795-2804.
- [5] DENG L C, LI X Z, XU W, et al. Integrated monitoring of lithology parameters while drilling in small-scale coring platform [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(11): 7269-7288.
- [6] 赵志刚, 张凯, 尹延春, 等. 不同应力下煤体钻孔试验及钻进能量响应研究 [J]. *岩土力学*, 2023(10): 1-8.
ZHAO Zhigang, ZHANG Kai, YIN Yanchun, et al. Research into drilling test and drilling energy response of coal under different stresses [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023(10): 1-8.
- [7] 范晓东. PDC 钻头在三叠系泥岩钻进过程中的技术问题及对策研究 [J]. *西部资源*, 2019(3): 5.
FAN Xiaodong. Study on the technical problems and countermeasures of PDC bits in the drilling process of triassic mudstone [J]. *West Resou*, 2019(3): 5.
- [8] ZHU X, LUO Y, LIU W, et al. Rock cutting mechanism of special-shaped PDC cutter in heterogeneous granite formation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 110020.
- [9] CAPIK M, YILMAZ A O. Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 139: 104633.
- [10] 程建龙, 邹清友, 杨圣奇, 等. 水力切缝上方 TBM 滚刀贯入破坏机制模拟研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2317-2326.
CHENG Jianlong, ZOU Qingyou, YANG Shengqi, et al. Simulation of indentation behavior of TBM disc cutter and failure mechanism of hard rock assisted by hydraulic precutting kerfs [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2317-2326.
- [11] JIANG Y, ZENG J, XU C, et al. Experimental study on TBM cutter penetration damage process of highly abrasive hard rock pre-cut by high-pressure water jet [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(12): 511.
- [12] LU G M, FENG X T, LI Y H, et al. The microwave-induced fracturing of hard rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 3017-3032.
- [13] WANG S, XU Y, XIA K, et al. Dynamic fragmentation of microwave irradiated rock [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(2): 300-310.
- [14] VOGLER D, WALSH S D C, SAAR M O. A numerical investigation into key factors controlling hard rock excavation via electropulse stimulation [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(4): 793-801.

- [15] YUDIN A S, ZHURKOV M Y, MARTEMYANOV S M, et al. Electrical discharge drilling of granite with positive and negative polarity of voltage pulses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104058.
- [16] RUI F, 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.
- [17] WANG Y, SHI Y, JIANG J, 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: 161-173.
- [18] YAN F, GU Y, WANG Y, et al. Study on the interaction mechanism between laser and rock during perforation[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 303-308.
- [19] GUO C, SUN Y, YUE H, et al. Experimental research on laser thermal rock breaking and optimization of the process parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 160: 105251.
- [20] HU M, BAI Y, CHEN H, 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.
- [21] 郭辰光, 孙瑜, 岳海涛, 等. 激光辐照热裂破岩规律及力学性能[J]. 煤炭学报, 2022(4):047.
- GUO Chenguang, SUN Yu, YUE Haitao, et al. Law and mechanics of thermal cracking of rock by laser irradiation [J]. Journal of China Coal Society, 2022 (4): 047.
- [22] LI M, HAN B, ZHANG Q, et al. Investigation on rock breaking for sandstone with high power density laser beam[J]. Optik, 2019, 180: 635-647.
- [23] PAN H, HU Y, KANG Y, et al. The influence of laser irradiation parameters on thermal breaking characteristics of shale[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 213: 110397.
- [24] SHIN J S, OH S Y, PARK H, et al. Underwater cutting of 50 and 60 mm thick stainless steel plates using a 6 kW fiber laser for dismantling nuclear facilities[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 1-8.
- [25] ZHU J, ZHAN H L, ZHAO K, et al. Thermal spallation in rock revealed by ultraviolet laser-induced voltage[J]. Sci. China Phys. Mech. Astron, 2019, 62: 974222.
- [26] LI M, HAN B, ZHANG S, et al. Numerical simulation and experimental investigation on fracture mechanism of granite by laser irradiation[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 52-60.
- [27] CHEN K, HUANG Z, DENG R, et al. Numerical simulation and test investigation on phase transition and thermal cracking process of sandstone by laser drilling [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55 (4): 2129-2147.

(编辑:郭少华)

(上接第71页)

- [27] 周昊. 基于音形码的中文敏感词变形体检测[D]. 南京:南京大学, 2020.
ZHOU Hao. Research on Chinese deformation sensitive word detection[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [28] CHRISTIANI T, PAGH R. Set similarity search beyond minhash [C]//Proceedings of the 49th Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing. N Y, USA: ACM, 2017: 1094-1107.
- [29] 沈晓鹰. 网约车服务中的位置隐私保护方法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2021.
SHEN Xiaoying. Research on location privacy protection in Ride-Hailing service[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [30] THORUP M. Bottom-k and priority sampling, set similarity and subset sums with minimal independence [C]//Acm Symposium on Theory of Computing. N Y, USA: ACM, 2013: 371-380.
- [31] WOOD G. Ethereum: a secure decentralised generalised transaction ledger[J]. Ethereum Project Yellow Paper, 2014,(151): 1-32.
- [32] DABBAGH M, CHOO K K R, BEHESHTI A, et al. A survey of empirical performance evaluation of permissioned blockchain platforms: challenges and opportunities[J]. Computers & Security, 2021, 100: 102078.

(编辑:郭少华)