

文章编号: 0253-2697(2024)10-1529-09 DOI:10.7623/syxb202410007

## 重载冲击破岩提速机理实验

祝效华 刘伟吉 石昌帅 周伟

(西南石油大学机电工程学院 四川成都 610500)

**摘要:**随着井深的增加,传统机械旋转破岩技术已逐渐逼近提速极限,很难再大幅提速。冲击破岩是解决深部硬地层钻头破岩效率低、机械钻速慢的最有效的机械提速方法之一。实践表明,冲击破岩可以提速 35%~135%,但仍无法满足降本增效的需求。鉴于此,提出了重载冲击破岩理念,用以增大破岩时的机械能量密度,并通过理论分析、室内实验等系统研究了其提速机理及影响因素。研究表明:①重载冲击破岩相比传统旋转切削破岩有巨大优势,重载冲击破岩机械钻速是常规破岩技术的 6~8 倍;②冲击器的冲击力必须大于能够激活岩石内部微裂隙,形成裂纹萌生和联通的临界能量才能有提速效果,加大冲击器冲击力是实现深部硬地层和干热岩地层钻井提速最贴近实际的提速手段;③由于抗拉强度远小于抗压强度,冲击产生的压缩波在自由面反射成拉伸波,这些拉伸波叠加起来会形成很大的拉应力,最终形成拉伸破碎,在冲击破岩中,岩石破碎以拉伸破碎为主、剪切破碎为辅。

**关键词:**重载冲击;冲击破岩;钻井提速;深部硬地层;干热岩

**中图分类号:**TE24

**文献标识码:**A

## Experiment on the rock-breaking and speed-up mechanism under heavy-duty impact

Zhu Xiaohua Liu Weiji Shi Changshuai Zhou Wei

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China)

**Abstract:** As the depth of boreholes increases, the traditional mechanical rotary rock-breaking methods have almost achieved their maximum potential for speed enhancement, and so it is increasingly difficult to achieve a substantial acceleration. Impacting rock breaking is one of the most effective mechanical speed-up methods for solving the problems of low rock-breaking efficiency and slow mechanical drilling rate in deep hard formations. Practical applications have demonstrated that impact rock-breaking can increase the speed by 35%-135%, but it still cannot meet the demand of cost reduction and performance enhancement. In view of this, the concept of heavy-duty impact rock-breaking is proposed to increase the mechanical energy density of rock-breaking, and its speed-up mechanism and influencing factors are systematically studied through theoretical analysis and laboratory tests. The research findings indicate as follows. (1) The heavy-duty impact method exhibits significant superiority over the traditional rotary cutting, with ROP that is approximately 6 to 8 times faster than the conventional rock-breaking methods. (2) To achieve meaningful speed improvements, the impact force of the impactor must exceed the critical energy threshold required for activating internal microcracks, enabling crack initiation and connectivity. Increasing the impact force of the impactor represents the most feasible approach to accelerate drilling in deep hard and hot dry rock formations. (3) Since the tensile strength is much smaller than the compressive strength, the compression waves generated by impact is reflected as tensile waves at the free surface. The cumulative effect of these tensile waves results in significant tensile stresses, ultimately leading to tensile breaking. During the impact rock breaking, the rock fragmentation is primarily induced by tensile breaking, with shear breaking as a supplement.

**Key words:** heavy-duty impact; rock break with impact; drilling speed-up; deep hard formation; hot dry rock

**引用:**祝效华,刘伟吉,石昌帅,周伟.重载冲击破岩提速机理实验[J].石油学报,2024,45(10):1529-1537.

**Cite:** ZHU Xiaohua, LIU Weiji, SHI Changshuai, ZHOU Wei. Experiment on the rock-breaking and speed-up mechanism under heavy-duty impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(10): 1529-1537.

能源安全关系中国经济社会发展全局,油气安全是能源安全的重要组成部分。中国原油和天然气对外依存度长期保持在约 70% 和 45% 的水平,油气安全形势异常严峻。近年来,中国新增油气储量超过 60% 来

自于深层,已探明深层油气资源量约为  $671 \times 10^8$  t 油当量,占全国油气资源总量的 34%,深层天然气占天然气资源总量的 70.3%<sup>[1]</sup>。其中,仅塔里木盆地最新资源评价埋深大于 6000 m 的常规原油和天然气资源

**基金项目:**国家自然科学基金杰出青年基金项目“钻井提速理论与方法”(No. 52225401)资助。

**第一作者及通信作者:**祝效华,男,1978 年 7 月生,2005 年获西南石油大学博士学位,现为西南石油大学教授、博士生导师,主要从事管柱力学和钻井提速等方面的研究工作。Email:zxhth113@163.com

分别为  $42.3 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $13.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[2]</sup>, 深层油气资源成为保障中国油气安全的重大战略接替。而深层油气钻井主要面临两大技术难题: 如何高效处理井下复杂事故以及如何提高机械钻速<sup>[3]</sup>。其中, 钻井提速研究的主要任务是揭示高效破碎岩石的原理与方法。岩石破碎的本质是岩石中微观裂纹萌生、扩展、交汇及破裂行为。深部复杂地层钻井提速难题可归纳总结为 4 类:

(1) 高效破岩钻头技术。近年来得益于材料科学和加工工艺的进步, 各种异形齿被广泛用于破岩钻头的设计上, 如锥形齿、斧形齿、尖齿、双曲面齿、凹面齿等。国内外钻头公司也相继研发出了新型 PDC 钻头, 如 Smith 钻头公司推出 AxeBlade 钻头<sup>[4-5]</sup>, 以及 HyperBlade 双曲面金刚石钻头<sup>[6-7]</sup>; Shear 钻头公司研发了一种 Pexus 复合钻头<sup>[8]</sup>; Halliburton 公司推出 Geometrix 4D 异形切割齿系列<sup>[9]</sup>。这些钻头在提高钻齿抗冲击性、耐磨性以及破岩效率方面都有很大提升。

(2) 提速工具—钻头一体化提速技术。目前, 已经研发了低速螺杆 + 多刀翼 PDC 钻头钻进技术<sup>[10]</sup>、冲击器 + 大功率螺杆 + PDC 钻头提速技术<sup>[11]</sup>、低速螺杆 + 混合钻头提速技术<sup>[12]</sup>、射流冲击器 + 水力加压器 + 高效 PDC 钻头提速技术等<sup>[13]</sup>, 其中低速螺杆具有大排量、大扭矩的优点, 低转速减小了 PDC 切削齿单位时间损耗, 而大排量提高了破岩水功率, 增强了钻头冷却效果。

(3) 强化钻头破岩参数提速技术。该技术主要是促进岩石从塑性破碎向脆性破碎转变<sup>[14]</sup>。钻头破岩钻进过程中, 岩石主要发生两种破碎模式, 分别是塑性破碎和脆性破碎, 塑性破碎耗能高, 脆性破碎耗能低, 因此在钻进过程中希望岩石发生脆性破碎<sup>[15]</sup>。实践表明, 通过冲击提速工具可以增大钻头破岩能量, 促使岩石发生脆性破碎, 从而提高破岩效率<sup>[16]</sup>。在钻井过程中通常使用的冲击提速工具有液动冲击器<sup>[17]</sup>、扭力冲击器<sup>[18]</sup>、复合冲击器<sup>[19]</sup>、旋冲螺杆<sup>[20]</sup>等。这些工具在使用过程都有一定效果, 但普遍存在冲击载荷偏小的问题, 导致钻头有限激活岩石裂隙, 只能实现较快速度钻进(一般提速 35%~135%), 无法解决工程上关于提速的急迫需求。

(4) 井底降压提速技术。主要涉及控压钻井技术<sup>[21]</sup>和空气钻井技术<sup>[22]</sup>, 其中控压钻井技术在保护储层的同时也可以实现提速; 空气钻井技术则可以提速 3~15 倍。但目前的空气钻井工艺还面临钻遇出水地层等难题, 无法全井段推广。

除上述常规破岩提速技术外, 学者们还致力于研究新型破岩提速技术, 如超声波破岩技术<sup>[23]</sup>、微波辅助破岩<sup>[24]</sup>、高温热致裂技术<sup>[25]</sup>及高压电脉破岩技术<sup>[26]</sup>等。而冲击钻井技术是现阶段解决深部难钻地层破岩效率低、成本高最有效的钻井方法之一<sup>[27-28]</sup>。其破岩原理是通过钻头冲击岩石激活岩石内部裂隙, 促使其萌生微裂纹, 进而扩展和交汇, 最终破碎岩石。现有冲击器的冲击功相对较小, 仅能有限激发岩石内部微裂隙, 虽有提速效果, 但达不到工程预期。因此, 针对深部难钻地层钻井提速亟需一种新的、对现有工艺不进行大的调整且能在短期内应用的破岩提速新方法, 以解决现阶段传统旋转破岩技术面临的难题。聚焦钻井提速问题, 特别是针对超深井井眼尺寸小、钻柱动力传递效率低导致的钻头破岩能力不足、效率低的问题, 笔者提出了重载冲击破岩提速新技术, 以大幅提高机械破岩能量密度, 使其达到激活岩石内部裂隙的临界能量, 有效激活岩石内部微裂隙并使之快速扩展, 从而实现深部硬地层高效破碎钻进。笔者围绕重载冲击破岩提速最新进展, 通过理论分析、室内实验等深入分析了重载冲击破岩机理及影响因素, 以期为重载冲击破岩提速技术的推广使用提供有益参考。

## 1 全钻头冲击破岩实验

现有钻井使用的冲击器(如扭转冲击器、复合冲击器等)的冲击功一般较小, 这是导致大部分冲击器在钻井实际中提速效果不明显、达不到工程需求的主要原因。通过常规轻载、中载和重载冲击器破岩钻进实验对比, 可以分析其破岩机理的差异。实验使用的冲击器有液力冲击器(属轻载冲击器, 标称冲击力约在 1000 N), 大载荷冲击器(属中载冲击器, 冲击力约在 15000 N), 重载冲击器(冲击力约达 120000 N)。实验中使用的岩样为细粒花岗岩, 密度为  $2890 \text{ kg/m}^3$ , 单轴抗压强度为 110.96 MPa, 抗拉强度为 9 MPa, 弹性模量为 30.69 GPa, 泊松比为 0.27, 可钻性级值大于 8, 冲击破岩实验是在常温常压条件下开展的。

### 1.1 实验方案

使用的冲击实验装置有两套, 其中轻载—中载冲击器使用全尺寸钻头破岩实验装置[图 1(a)]。该实验过程对于泵压要求较低。重载冲击破岩实验在地面钻机开展, 泵压可以达到 40 MPa, 满足重载冲击器的使用要求[图 1(b)]。轻载—中载冲击破岩实验中, 使用的钻头为 5 刀翼 PDC 钻头, 钻头钻压设置为 3 t, 转速设置为 60 r/min, 而重载冲击破岩实验中的钻头为冲击锤。



图 1 冲击破岩室内实验测试系统

Fig. 1 Laboratory test system for impacting rock-breaking

1.2 轻载—中载冲击破岩实验结果分析

两种型号冲击器在破岩钻进过程中冲击力的测试曲线如图 2 所示,实验中钻压都保持为 3 t。由轻载冲击器冲击力曲线[图 2(a)]可以看出,轻载冲击力的测试结果不明显,实验测试冲击力约为 200 N。由中载冲击器冲击力曲线[图 2(b)]可以看出,相比轻载冲击器的冲击力,中载冲击器的冲击力更为明显,最大冲击力可达 13 000 N。通过计算 2 种实验条件下钻头的机械钻速可

以看出,轻载冲击破岩机械钻速为 3.49 m/h,中载冲击破岩机械钻速为 3.41 m/h。使用冲击器后钻头的机械钻速却比不使用冲击器的机械钻速(4.07 m/h)小。结合破岩井底情况(图 3)可以看出,除底部有 PDC 齿的刮切痕迹外,其余部分较光滑。分析其原因主要是由于轻载—中载冲击器冲击力太小,不足以激活花岗岩地层内部裂隙,形成体积破碎,钻头破岩方式还是依靠钻压吃入岩石然后刮切实现破碎,以切削破岩为主。

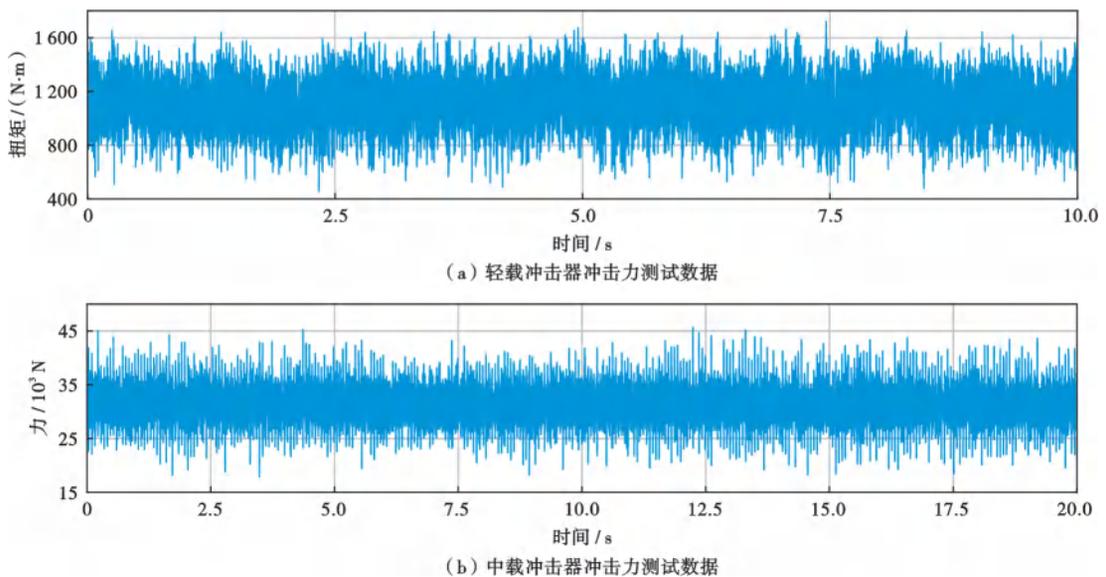


图 2 轻载—中载冲击破岩实验测试结果

Fig. 2 Test results of rock-breaking under light-medium duty impact

1.3 重载冲击破岩实验结果分析

为研究重载冲击是否可以提高钻头破岩效率,开展了重载冲击破岩室内测试。破岩钻进实验装置使用的是一种地面钻机,冲击器使用的是重载液动冲击锤[图 1(b)],结构如图 4 所示。液动冲击锤活塞的冲

程与回程均由液压推动,利用高压流体在活塞不同上、下腔产生的压力差,推动活塞上下运动。活塞运动位移与控制阀芯的流道配合,进而控制阀芯运动情况,阀芯上下运动控制活塞的上下腔室的压力情况,进而使活塞冲程、回程交替进行。在流体压力驱动下,活塞高



(a) 轻载冲击破岩井底 (b) 中载冲击破岩井底

图3 轻载和中载冲击破岩实验井底情况

Fig. 3 Bottomhole diagram of rock breaking under light and medium duty impact

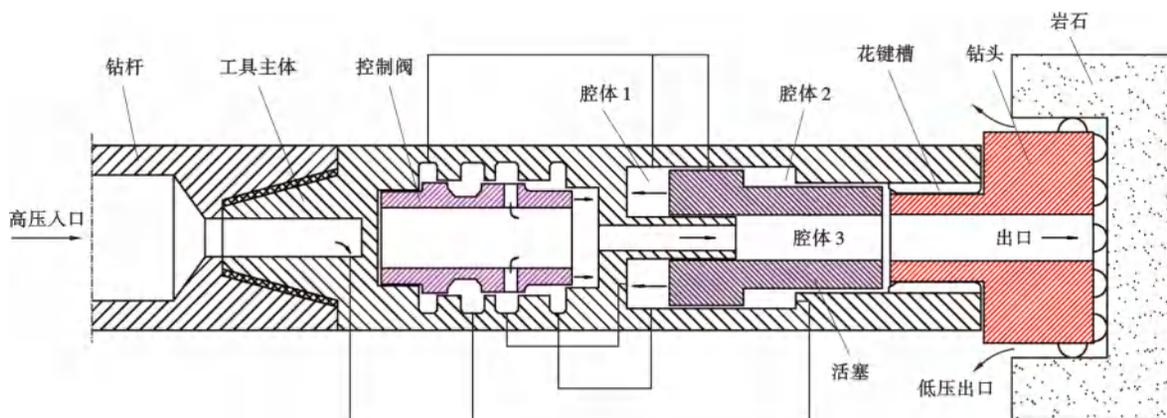


图4 重载液动冲击锤冲二维结构

Fig. 4 Two-dimensional structure of the heavy duty hydraulic impact hammer

频率、高速撞击锤头做功。流体压力越高，冲击频率高，冲击速度大，冲击功越大。

实验测试了重载冲击锤在破岩钻进过程中的冲击力，冲击器外径为 80 mm，冲击力普遍高于  $4 \times 10^4 \text{ N}$ ，最大可以超过  $10 \times 10^4 \text{ N}$ ，冲击力大小和泵排量关系较大(图 5)。当重载冲击器冲击频率为 5 Hz 时冲击力的范围在  $(3 \sim 9) \times 10^4 \text{ N}$ ，当冲击频率为 6 Hz 时，冲击力的范围在  $(6 \sim 12) \times 10^4 \text{ N}$ ，单次冲击岩石的能量可以达到 230 J。

图 6(a)为  $\Phi 80 \text{ mm}$  重载冲击器在不同钻压、不同转速和泵压条件下重载冲击器机械钻速的变化规律。所有破岩钻进实验中机械钻速最小为 16.5 m/h，最大为 29.1 m/h。相比使用中载冲击器破岩时的 3.41 m/h，机械钻速得到了大幅提高。

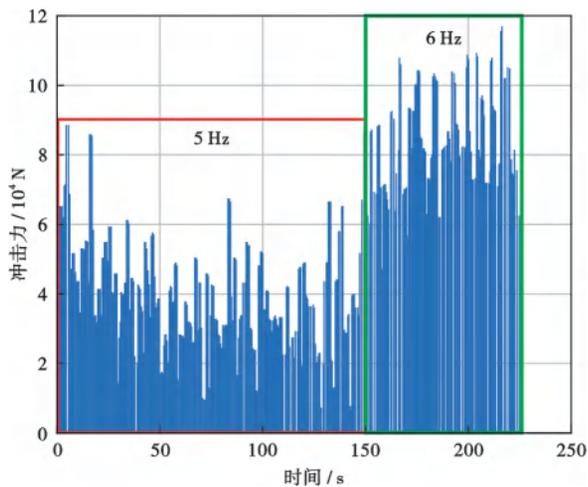


图5 重载液动冲击锤冲击力测试

Fig. 5 Test of impact force of the heavy duty hydraulic impact hammer

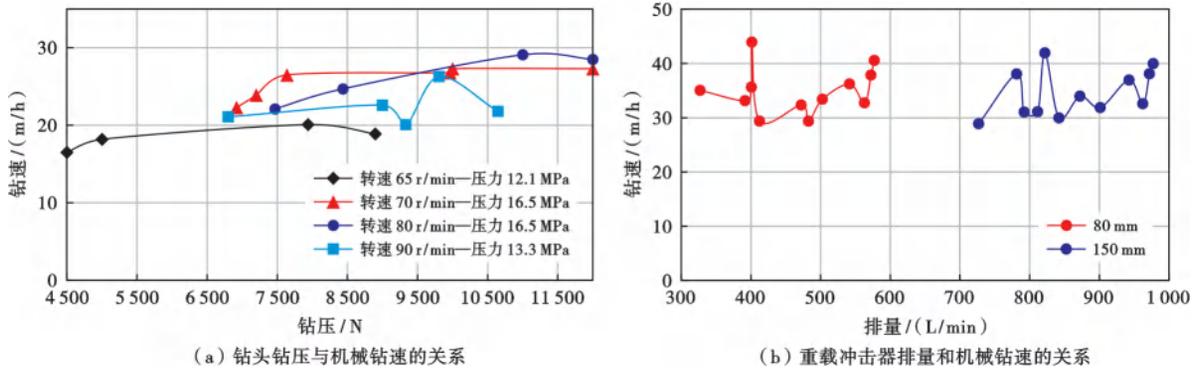


图 6 重载冲击器破岩机械钻速影响因素分析

Fig. 6 Analysis of factors affecting ROP of rock breaking under heavy duty impact

重载冲击器的机械钻速随着钻压的增加前期增加比较明显,后期机械钻速基本为恒定值,机械钻速增加不明显。此外,在泵压和钻压相同的情况下,转速和机械钻速基本呈现正相关,钻头转速越大机械钻速越快。通过对比泵压对机械钻速的影响发现,重载冲击器钻进时消耗泵压越大、机械钻速越大,并且所消耗泵压对机械钻速的影响大于转速的影响。根据收集到的岩屑分析发现,重载冲击破岩得到的岩屑与 PDC 钻头破岩的岩屑相比,岩屑尺寸更小,呈现细粒状,极少部分为小片状。

由 2 种不同型号重载冲击器排量和机械钻速的关系[图 6(b)]可以看出,机械钻速随着排量增大呈波动趋势,Φ80 mm 重载冲击器最大机械钻速为 43.9 m/h,Φ150 mm 重载冲击器最大机械钻速为 41.9 m/h。

重载冲击破岩井底及岩屑如图 7 所示。



图 7 重载冲击器破岩井底及岩屑

Fig. 7 Image of bottom hole and debris

6 种不同破岩条件下测得的在花岗岩地层中钻头的机械钻速如图 8 所示。其中,牙轮钻头机械钻速最慢,在钻进过程中钻头振动最为剧烈,机械钻速仅为 0.5 m/h,PDC 钻头相比三牙轮钻头机械钻速得到显著提高,可增大到 3.4~4.1 m/h。同时,PDC 钻头破岩实验中,还尝试使用了轻载冲击器和中载冲击器这

两种提速工具。但这两种提速工具配合 PDC 钻头相比不使用提速工具的情况都没有提速效果,仅在扭矩波动上有所改善。由图 8 可以看出,在使用了重载冲击器之后,机械钻速急剧增大,平均机械钻速增大(高达 35 m/h)。实验结果表明,重载冲击器破岩能够显著提高钻头机械钻速,究其原因还是重载冲击改变了钻头的破岩机理。

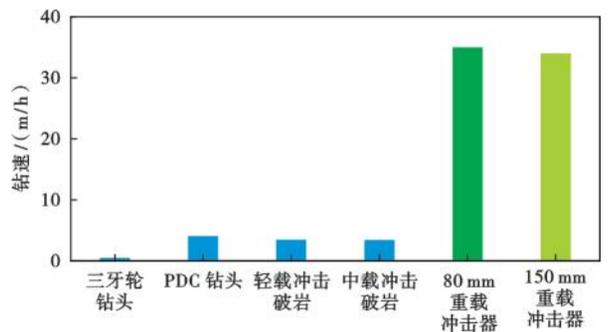


图 8 不同破岩方式下室内钻进实验所测机械钻速

Fig. 8 Measured ROP in laboratory drilling experiments under different rock breaking methods

## 2 重载冲击破岩单元实验

### 2.1 实验方案

利用落锤冲击试验机进行了单齿冲击破岩实验(图 9)。该设备通过自由落体对试件施加冲击载荷,最大可施加 440 J 的冲击能量。岩石放置于钻齿正下方,两侧通过螺钉固定在底座上,避免实验过程中岩样移动。钻齿焊接在齿座上,其轴线与铅垂线的夹角为 10°,底座通过销钉与锤体过盈连接,并可通过更改销钉位置实现钻齿角度调节。实验前,测得锤体与钻齿的总重量为 8.83 kg。

每次冲击实验后,将岩样连同底座一起取出,计算和分析岩石破碎体积、破碎区直径、侵入深度和破岩比功,以评估岩石破碎性能。岩石破碎体积采用注水法

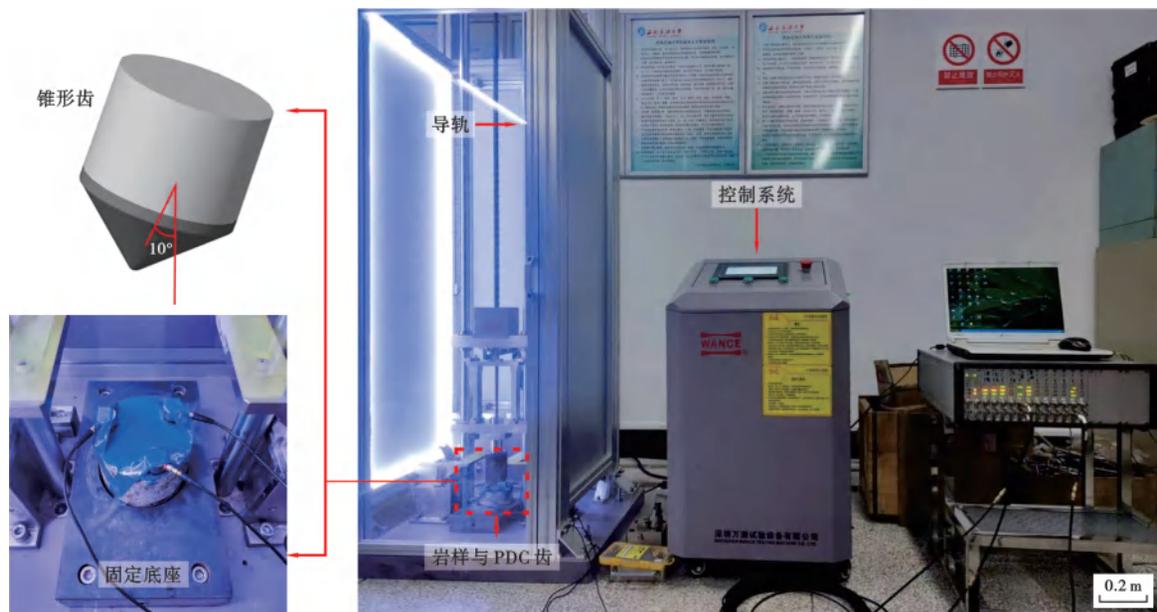


图 9 落锤冲击破岩测试系统

Fig. 9 Test system for rock-breaking under drop hammer impact

测量,利用注射器将水缓慢滴入其中,直至液面与岩样端面平行,在测量前先将岩石侵入水中,使其充分吸水,测量时用吸水纸将表面水分吸干,以减少测量时的误差。破碎区域直径使用钢尺近似测量,岩石破碎深度用游标卡尺测量。

2.2 重载冲击破岩机理

图 10 为不同冲击功下钻齿的侵入深度和岩石破碎体积的变化规律。由图 10(a)可以看出,侵入深度与冲击能量呈线性关系,冲击功为 10 J 时钻齿的侵入深度为 1.0 mm,冲击功为 90 J 时钻齿的侵入深度约为 5.5 mm。在工程实践中,冲击锤钻齿的出露高度一般是 5~10 mm,实际破岩情况单齿侵入深度不会超过钻齿的出露高度。由图 10(b)可以看出,破碎体积随着冲击能量呈指数型增加,破碎体积的主要增量来自于破碎坑周围岩石的侧向崩落。冲击功为 10 J 时的破碎体

积为 30 mm<sup>3</sup>;冲击功为 20 J 时的破碎体积为 90 mm<sup>3</sup>;冲击功小于 10 J 时,由于没有形成明显的破碎坑,无法测量得到体积。由此可以推断,在该实验条件下,10 J 冲击能量应该为破碎此类花岗岩的临界能量。以一个冲击锤 12 颗齿为例,在地面环境下破碎该类花岗岩的最小冲击功为 120 J,小于该临界值时无法激活岩石内部裂隙而形成有效破碎。在 1.3 节中,实验用高能冲击器的冲击功约为 230 J,分配到每颗齿上的冲击能量约为 20 J,大于该类花岗岩的临界冲击功,因此地面实验获得了较高的机械钻速。

由冲击功 90 J 下岩石破碎坑及损伤区域(图 11)可以明显看出,冲击除了产生一个宏观可见的破碎坑之外,在破碎坑以下还会产生密实核。这个区域岩石内部裂纹充分发育(宏观上的表现如图 11 中的深红色区域)。密实核下方是塑性损伤区,这部分区域岩石损

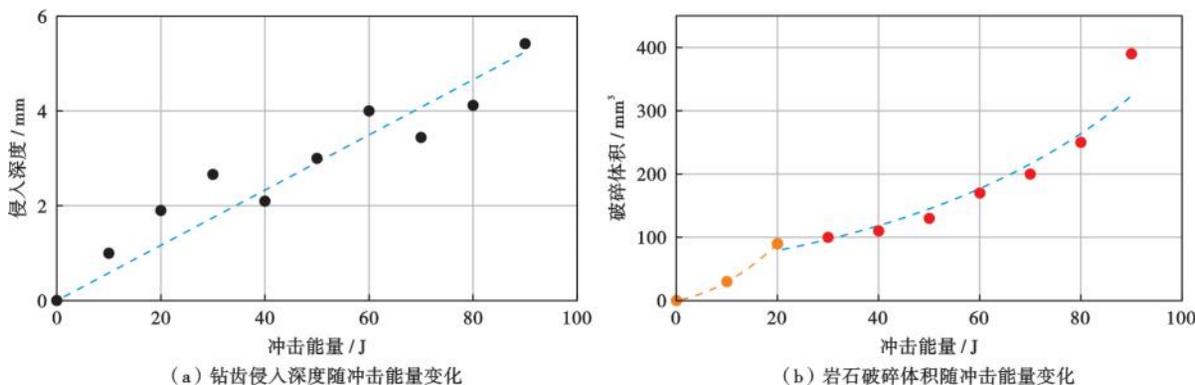


图 10 不同冲击功下钻齿破岩规律

Fig. 10 Rock-breaking laws under different impact energy

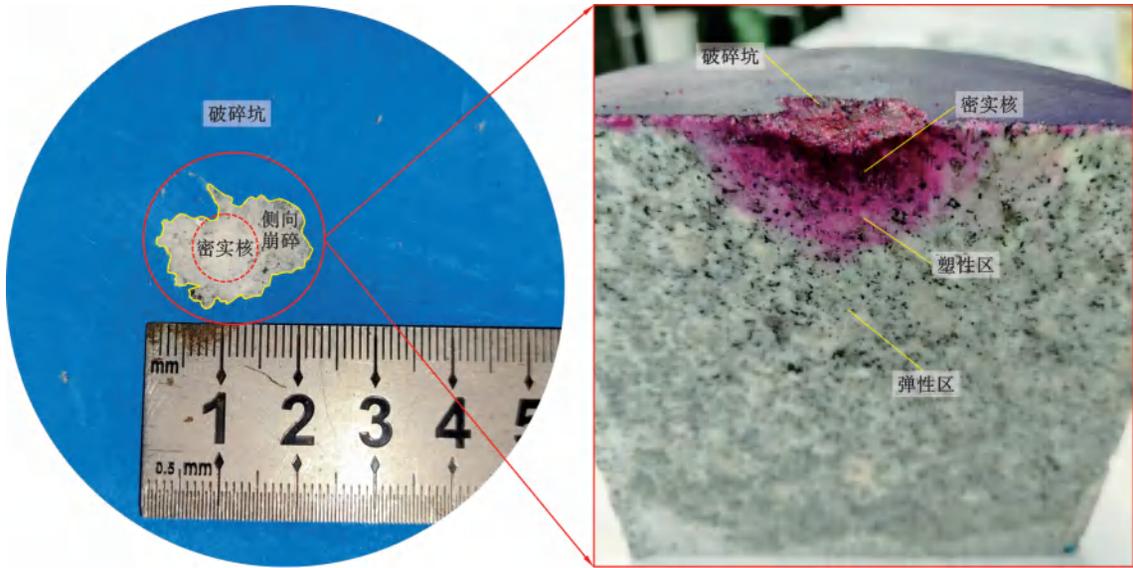


图 11 单齿冲击破岩破碎坑及损伤情况

Fig. 11 Crater and damage situation of rock breaking under single-tooth impact

伤程度较小,在图 11 中呈现出浅红色。塑性区下方为弹性区,冲击不会导致岩石内部微裂纹的萌生。

为了能够从细观角度观测重载冲击下破碎坑周围的裂纹萌生及扩展情况,对破碎坑下方岩石进行了薄片分析。由重载冲击破碎坑岩石的薄片观察结果(图 12)可以看出,在冲击破碎坑正下方是密实核区域,有很多碎屑还堆积在下方,并在下方产生复杂且密集的微裂纹。此外,在冲击破碎坑的两侧会产生侧向主裂纹,侧向主

裂纹通过分析破碎形貌可以判断是拉伸裂纹,侧向主裂纹从密实核处萌生,向岩石自由面扩展。结合图 10(b)可以分析,在冲击功较大时岩石破碎体积会指数上升,究其原因是在冲击功较大时(重载冲击)会极大地诱发侧向主裂纹的产生,产生侧向崩碎(图 11)。冲击实现大体积破碎的关键即在于增大破碎坑岩石侧向崩落的程度,在小于 10 J 的冲击功作用下,几乎无侧向崩落,冲击功越大岩石侧向崩落的体积越大。

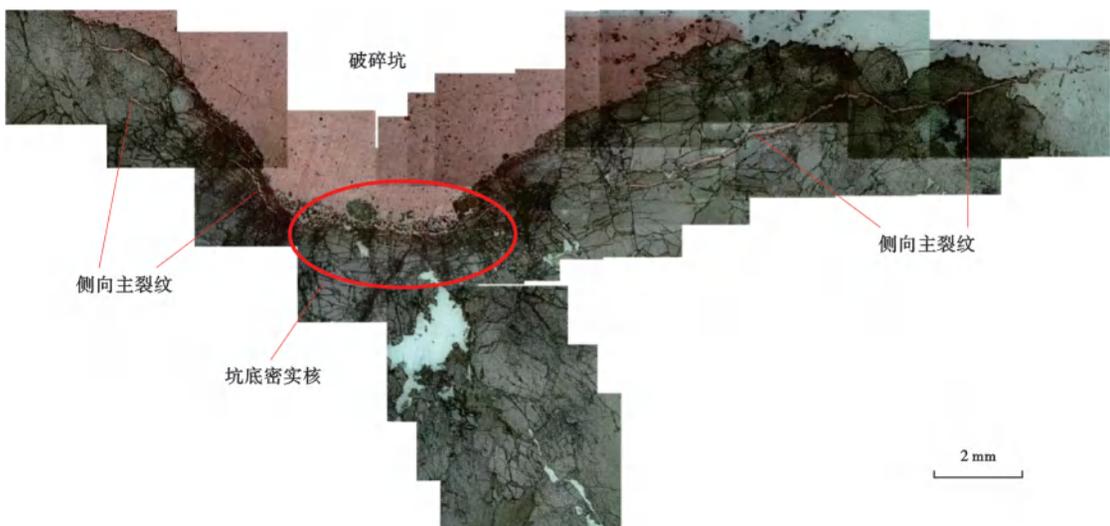


图 12 重载冲击破岩裂纹扩展薄片观测

Fig. 12 Section image of rock crack propagation of rock breaking under heavy duty impact

为了能够再现重载冲击破岩过程裂纹的生成过程,开展了冲击破岩数值模拟研究。首先建立了冲击破岩的数值仿真模型,并开展了数值仿真模型的参数标定<sup>[29]</sup>。在仿真模型中,根据动能定理,即得到速度:

$$v = (2W/m)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

对冲击齿赋予一定大小的初速度,使其具有目标冲击能量值,并对岩样产生侵彻冲击,在岩石表面产生弹性冲击应力波。由于齿和岩样的波阻抗不同,大部分应

力波在岩石内部传播,少部分应力波反射回冲击齿。

为分析岩样受到钻齿冲击后的损伤破坏模式,对模型进行半剖处理,并分析其损伤变量云图和模型单元的应力变化规律(图13)。以钻齿刚接触岩样作为零时刻:在 $6\mu\text{s}$ 时,岩石内部由于压缩损伤开始生成径向裂纹,此时存在的径向裂纹有助于密实区的进一步扩展;在 $18\mu\text{s}$ 时,钻齿正下方的中心裂纹开始萌生,密实区由于受压快速扩大,此时岩石表面出现的个别小型裂纹同样处于受压状态;在 $46\mu\text{s}$ 时,钻齿回弹,向冲击反方向运动,不再和岩石接触,此时岩石内部单元均处于受压状态,中心主裂纹完全形成,此刻在岩石表面已生成多条拉伸裂纹并不断向外延伸,破碎坑轮廓与钻齿外形大致相似,此破碎坑的破坏失效模

式主要为剪切破坏;在 $70\mu\text{s}$ 时,岩石内部的损伤基本不再改变,能清楚观察到密实区、开裂区和弹性区,开裂区存在多条放射性径向裂纹,在接近岩石表面的密实区由于应力波的影响开始出现崩离的趋势。冲击产生的压缩波在自由面反射成拉伸波,这些拉伸波叠加会形成很大的拉应力,最终形成拉伸破碎,这也是图12中侧向主裂纹产生的力学机制。径向裂纹被认为是冲击钻进中最重要的裂纹类型,涉及到由相邻齿的相互作用而引起破碎坑之间的岩石材料失效破碎现象。在 $1000\mu\text{s}$ 时,岩石损伤区域不再变化,破碎坑上半部分的密实区由于应力波的扰动导致其失效删除,类似于图11中的侧向崩落区域,岩样上表面边缘存在塑性变形区域,并能观察到岩屑飞溅。

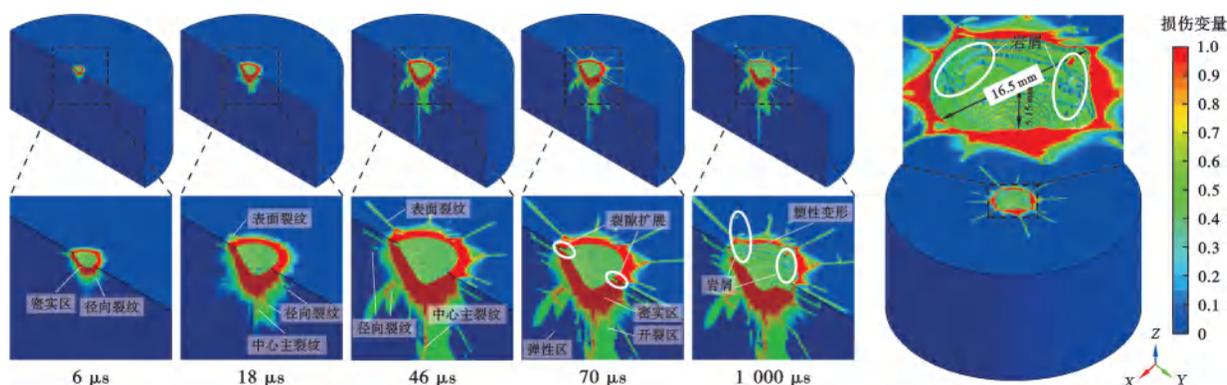


图13 90 J 钻齿冲击破岩裂纹形态及损伤云图

Fig. 13 Crack shapes and damage nephogram of rock breaking under 90 J drilling tooth impact

### 3 结论

(1) 室内实验表明,重载冲击破岩相比常规冲击破岩及传统旋转切削破岩有巨大优势,重载冲击破岩机械钻速是常规破岩技术的6~8倍,重载冲击可以诱导产生破碎坑岩石的侧向崩落,形成体积破碎。

(2) 冲击器的冲击功必须大于能够激活岩石内部微裂隙,形成裂纹萌生和联通的临界能量才能有提速效果,因此加大冲击器冲击力是实现深部硬地层和干热岩地层钻井提速最贴近实际的提速手段。

(3) 由于抗拉强度远小于抗压强度,冲击产生的压缩波在自由面反射成拉伸波,这些拉伸波叠加会形成很大的拉应力,最终形成拉伸破碎;在冲击破岩中,岩石破碎以拉伸破碎为主、剪切破碎为辅。

(4) 冲击破碎坑密实核区域的吸波或吸能会影响冲击能量的传递,进而影响冲击破岩效率。落锤累计冲击实验表明,钻齿侵入深度和破碎体积增幅随着累计冲击次数的增大而减小。

符号注释: $v$ —齿的冲击速度,  $\text{m/s}$ ;  $W$ —齿的冲击能量,  $\text{J}$ ;  $m$ —齿的质量,  $\text{kg}$ 。

### 参考文献

- [1] 孙金声,刘伟,王庆,等. 万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 1-9.  
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 1-9.
- [2] 匡立春,支东明,王小军,等. 新疆地区含油气盆地深层—超深层成藏组合与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 1-16.  
KUANG Lichun, ZHI Dongming, WANG Xiaojun, et al. Oil and gas accumulation assemblages in deep to ultra-deep formations and exploration targets of petroliferous basins in Xinjiang region [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 1-16.
- [3] 张光亚,马锋,梁英波,等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156-1166.  
ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [4] Baker Hughes. Apex shaped-cutter technology[EB/OL]. [2024-08-15]. <https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/shapedcutter-technology/apex-shapedcutter-technology>.
- [5] Baker Hughes. StabilisX shaped-cutter technology[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/shaped->

- cutter-technology/stabilisx-shapedcutter-technology.
- [6] Halliburton. Geometrix™ 4D-shaped cutters[EB/OL]. [2024-08-10]. <https://www.halliburton.com/en/products/geometrix-4d-shaped-cutters>.
- [7] Schlumberger. AxeBlade ridged diamond element bit[EB/OL]. [2024-08-25]. <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/drill-bits/pdc-bits/axeblade-ridged-diamond-element-bit>.
- [8] Schlumberger. HyperBlade hyperbolic diamond element bit[EB/OL]. [2024-08-25]. <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/drill-bits/pdc-bits/hyperblade-hyperbolic-diamond-element-bit>.
- [9] GOOCH C. PDC bit uses staggered cutter configuration to take energy from vibrations to drill ahead[J]. *Drilling Contractor*, 2015, 71(4): 70-71.
- [10] 张敏,刘明国,兰凯,等. 焦石坝页岩气水平井钻井提速工具应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 6-9.  
ZHANG Min, LIU Mingguo, LAN Kai, et al. Application of drilling tools to improve ROP of shale gas well in Jiaoshiba block[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(1): 6-9.
- [11] 邹德永,曹继飞,袁军,等. 硬地层 PDC 钻头切削齿尺寸及后倾角优化设计[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 91-94.  
ZOU Deyong, CAO Jifei, YUAN Jun, et al. Optimization design of the cutter size and back rake for PDC bit in hard formation[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(6): 91-94.
- [12] 宋保健,孙凯,乐守群,等. 涪陵页岩气田钻井提速难点与对策分析[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 9-12.  
SONG Baojian, SUN Kai, YUE Shouqun, et al. Drilling acceleration challenges at Fuling shale gas field and solutions[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(4): 9-12.
- [13] 樊好福,臧艳彬,张金成,等. 深层页岩气钻井技术难点与对策[J]. 钻采工艺, 2019, 42(3): 20-23.  
FAN Haofu, ZANG Yanbin, ZHANG Jincheng, et al. Technical difficulties and countermeasures of deep shale gas drilling[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(3): 20-23.
- [14] LIU Weiji, ZHU Xiaohua, JING Jun. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 311-319.
- [15] LIU Weiji, LUO Yunxu, ZHU Xiaohua, et al. The ductile-brittle failure mode transition of hard brittle rock cutting—new insights from numerical simulation[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(4): 129.
- [16] 刘岩生,张佳伟,黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.  
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 312-324.
- [17] 陶兴华,葛东,张广,等. 油基钻井液驱动下射流式液动冲击器的动态特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3504-3511.  
TAO Xinghua, GE Dong, ZHANG Guang, et al. Influence of oil-based drilling fluids on dynamic behavior of fluidic down-the-hole hammer[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(9): 3504-3511.
- [18] 祝效华,汤历平,童华. 高频扭转冲击钻进的减振与提速机理研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 75-78.  
ZHU Xiaohua, TANG Liping, TONG Hua. Rock breaking mechanism of a high frequency torsional impact drilling[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(20): 75-78.
- [19] 柳贡慧,李玉梅,李军,等. 复合冲击破岩钻井新技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 10-15.  
LIU Gonghui, LI Yumei, LI Jun, et al. New technology with composite percussion drilling and rock breaking[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(5): 10-15.
- [20] 席传明,穆总结,罗翼,等. GCY-I 型冲击螺杆钻井提速技术与试验[J]. 石油机械, 2020, 48(10): 39-43.  
XI Chuanming, MU Zongjie, LUO Yi, et al. Research and field test of GCY-I screw impact drilling tools[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(10): 39-43.
- [21] 周英操,崔猛,查永进. 控压钻井技术探讨与展望[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4): 1-4.  
ZHOU Yingcao, CUI Meng, ZHA Yongjin. Discussion and prospect of managed pressure drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(4): 1-4.
- [22] 孟英峰,练章华,李永杰,等. 气体钻水平井的携岩研究及在白浅 111H 井的应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(8): 50-53.  
MENG Yingfeng, LIAN Zhanghua, LI Yongjie, et al. Research on the cuttings-carried ability in gas horizontal drilling and its application to well Baiqian-111H[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(8): 50-53.
- [23] BADESCU Mircea, LEE Hyeong Jae, SHERRIT Stewart, et al. Auto-Gopher-II: an autonomous wireline rotary-hammer ultrasonic drill[C]//Proceedings of SPIE 10166, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2017. Portland, Oregon, United States; SPIE, 2017.
- [24] HASSANI Ferri, NEKOOVAGHT Pejman M, GHARIB Nima. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1): 1-15.
- [25] 刘伟吉,刘畅,谭宾,等. 局部高温诱导致裂非均质花岗岩机理研究[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 222-236.  
LIU Weiji, XIANG Chang, TAN Bin, et al. The mechanism of local high-temperature induced cracking of heterogeneous granites[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(10): 222-236.
- [26] 祝效华,罗云旭,刘伟吉,等. 等离子体电脉冲钻井破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法[J]. 石油学报, 2020, 41(9): 1146-1162.  
ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji, et al. Electrical breakdown experiment and numerical simulation method of rock-breaking mechanism of plasma electric pulse drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(9): 1146-1162.
- [27] 祝效华,刘伟吉. 单齿高频扭转冲击切削的破岩及提速机理[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 578-586.  
ZHU Xiaohua, LIU Weiji. The rock breaking and ROP rising mechanism for single-tooth high-frequency torsional impact cutting[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 578-586.
- [28] 祝效华,刘伟吉. 旋冲钻井技术的破岩及提速机理[J]. 石油学报, 2018, 39(2): 216-222.  
ZHU Xiaohua, LIU Weiji. Rock breaking and ROP rising mechanism of rotary-percussive drilling technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(2): 216-222.
- [29] LI Hongchao, CHEN Yong, LIU Dianshu, et al. Sensitivity analysis, determination and optimization of granite RHT parameters[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2019, 29(1): 94-102.