

# 高温环境下单齿破岩特性研究

高清亮<sup>1</sup> 叶西安<sup>2</sup> 张弦<sup>3</sup> 刘生旭<sup>4</sup>

1. 中国石油集团长城钻探工程有限公司, 中国·北京 100000
2. 中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术研究院, 中国·辽宁 盘锦 611930
3. 中国石油天然气股份有限公司辽河油田庆阳勘探开发分公司, 中国·甘肃 庆阳 745200
4. 中国石油集团冀东油田新能源事业部, 中国·河北 唐山 063000

**摘要:** 地热资源作为兼具清洁性与可再生性的新型能源, 正受到世界各国的高度关注, 地热钻井是地热资源开发的核心环节。而 PDC 钻头在地热井开采中, 由于地层硬度高和耐磨性极强的特点, 容易出现 PDC 齿磨损、脱落等热磨损失效现象, 钻头进尺量不高, 严重影响开采成本。为了探究 PDC 齿在高温环境下切削齿与岩石的相互作用规律, 进行 PDC 圆形齿刮切不同温度条件的花岗岩和砂岩试验和仿真。发现对于花岗岩和砂岩, 温度升高会改变花岗岩和砂岩内部结构, 使岩石更容易破碎, 同时齿面上的应力更均匀。对比不同齿面结构齿刃 Cpress 应力分布发现奔驰齿与屋脊齿的应力波动更小, 这使得切削齿的不平衡磨损程度更低, 工作寿命更长。研究对于地热井钻头研制有一定指导意义。

**关键词:** 高温地热井; 单齿破岩; 数值模拟; 破岩效率

## Research on the Rock-Breaking Characteristics of a Single Tooth under High-Temperature Conditions

Gao Qingliang<sup>1</sup>, Ye Xi'an<sup>2</sup>, Zhang Xian<sup>3</sup>, Liu Shengxu<sup>4</sup>

1. China National Petroleum Corporation Greatwall Drilling Engineering Company, China Beijing 100000
2. Engineering Technology Research Institute, China National Petroleum Corporation Greatwall Drilling Engineering Company, China Liaoning Panjin 611930
3. Qingyang Exploration and Development Branch, Liaohe Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, China Gansu Qingyang 745200
4. New Energy Division, Jidong Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, China Hebei Tangshan 063000

**Abstract:** As a new type of energy that is both clean and renewable, geothermal resources are receiving high attention from countries around the world. Geothermal drilling is the core link in the development of geothermal resources. However, in the process of geothermal well exploitation, PDC bits often suffer from thermal wear and failure phenomena such as PDC tooth wear and shedding due to the high hardness and strong wear resistance of the strata, resulting in low bit footage and significantly increased exploitation costs. To explore the interaction laws between PDC teeth and rocks under high-temperature conditions, experiments and simulations of PDC circular teeth scraping granite and sandstone under different temperature conditions were conducted. It was found that for both granite and sandstone, the increase in temperature alters the internal structure of the rocks, making them easier to break, and the stress distribution on the tooth surface becomes more uniform. By comparing the Cpress stress distribution on the cutting edges of different tooth surface structures, it was discovered that the stress fluctuations of the Mercedes tooth and the ridge tooth are smaller, which reduces the degree of unbalanced wear of the cutting teeth and extends their working life. This research has certain guiding significance for the development of geothermal well bits.

**Keywords:** High-temperature geothermal wells; Single-tooth rock breaking; Numerical simulation; Rock breaking efficiency

## 0 引言

地热作为一种可再生、清洁能源, 越来越多的得到全世界重视, 随着石油、煤炭的不断开采, 不可再生资源越

来越少<sup>[1,2]</sup>, 而地热作为一种可再生资源已成为替代不可再生资源的一种有效途径, 地热资源利用效率, 将达到全球总能量的 30%-80%, 应用越来越广泛<sup>[3-6]</sup>。在中低温地层

中钻进过程中钻头所遇到的挑战不是很大，但在高温地层钻头工作性能会因井底地层环境的变化显著降低。高温地层温度通常为 150-650℃，且是研磨性极强，硬度高的变质岩或火成岩，PDC 钻头在高温地热钻井中的工作性能会显著下降<sup>[7,8]</sup>。虽然 PDC 钻头在钻探工程中的技术比较成熟，但高温地热钻井与油气钻井在钻井过程中的各个因素明显存在着差异，高温地热钻井中，PDC 钻头的失效比重急剧增加，钻进性能显著下降，常规 PDC 钻头已不能满足上述高温环境下的钻井要求。高温地热钻井中牙轮钻头在高温环境所遇到的掉齿、轴承失效问题，进一步需要 PDC 钻头来完成地热钻井资源的开采。因此开展高温环境下单齿破岩机理研究，为高温环境下 PDC 钻头的研发提供依据。

## 1 高温环境下单齿破岩机理实验研究

### 1.1 试验准备

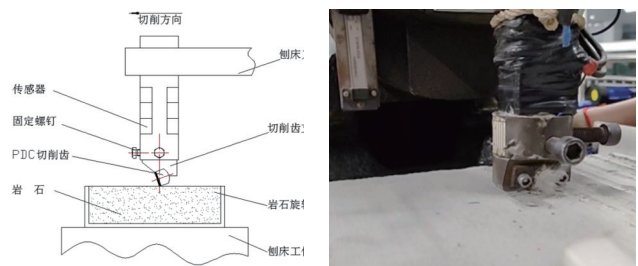
岩石力学性质对钻头钻进过程中所作用载荷有直接关系，尤其在高温地热钻井中，井下高温环境使岩石力学性质发生明显的变化。故研究高温环境下岩石力学性质，能够有效对高温下钻头对岩石的破碎机理及切削齿的设计有着重要指导意义。试验采用花岗岩和砂岩，在液压式万能试验机上采用直径为 25mm、高径比为 2 的圆柱形岩样进行单轴抗压强度、弹性模量、泊松比三种岩石力学性质测试。在岩样中间位置沿岩样横向和纵向位置贴高温应变片，将岩样在 YTH-12-12 高温加热炉中加热到预定温度，恒温保持 2h 后进行力学性质测试，然后取出放在压力机上以恒定加载速度施加载荷，直到试样破坏并记录压破载荷。岩样同一温度做 3 个试样，从而使试验数据更加稳定、

可靠。

在交变角剪切试验机上对岩石内摩擦角及抗剪强度进行测试，其中岩样直径尺寸为 50mm，高径比为 2，将岩样在高温加热炉中加热到预定温度，保温后进行测试，取出放在交变角剪切试验机上，岩样同一温度下工作 4 个变角度，为保证试验可靠同一角度同一温度做 3 个试样，在刚施加载荷到剪切岩样时用高温枪测量温度，然后进行载荷施加，直到岩样沿着剪切面发生剪切破坏为止，同时用高温枪进行剪切后岩样的温度变化。不同温度下岩样部分测试结果如（表 1、表 2 所示）。

### 1.2 试验原理

单齿破岩实验在对牛头刨床进行改装而成的单齿刮切破岩试验机上进行，试验机具有切削速度可调节、冲击力小，刮切时运动平稳，切削力恒定等优点，其实验原理设备如图 1 所示。所用设备包括单齿刮切破岩试验机、数据采集系统、三向力传感器、切削齿。



(a) 试验原理 (b) 试验设备

图1 单齿刮切实验示意图

本次实验所采用的 PDC 齿为圆形齿，直径为 15.875mm，厚度为 13mm，切削速度为 0.3m/s。实验中通过对岩样在不同温度下单齿刮切破岩效率进行实验研究。

表1 花岗岩部分岩石力学性质

温度/℃	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	抗剪强度 (MPa)	泊松比	内摩擦角 (°)
25	133.33	5.798	15.92	0.206	20.7
100	146.89	7.764	17.35	0.175	21.1
200	157.81	8.649	20.85	0.154	28.5
300	86.29	4.4	14.64	0.152	18.7
400	76.52	4.225	14.23	0.147	16.5
500	75.83	4.156	13.96	0.149	16.2

表2 砂岩部分岩石力学性质

温度/℃	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	抗剪强度 (MPa)	泊松比	内摩擦角 (°)
25	61.64	3.999	14.61	0.143	36.95
100	59.13	4.104	12.23	0.125	35.51
200	56.56	4.395	11.62	0.117	31.72
300	46.03	4.487	10.32	0.108	30.55
400	40.21	4.533	9.52	0.082	28.75
500	39.86	4.486	9.35	0.081	28.34

实验具体内容如下:

(1) 岩样在高温加热炉中进行加热, 加热温度分别为 100℃、200℃、300℃、400℃、500℃, 再取出时用保温材料进行包裹进行保温后进行刮切。

单齿刮切过程中, 在刮切深度一定条件下, 主要靠切向力来破碎岩石, 故将刮切过程中切向力所做的功与所破碎岩样的体积的比值作为衡量不同岩石温度下破岩效率指标。单齿刮切岩石时的破碎比功为:

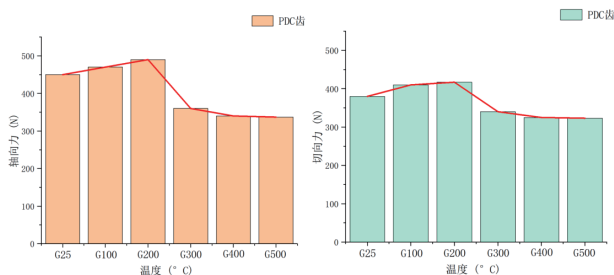
$$A^* = \frac{W^*}{V^*} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ti} \cdot v \cdot t}{V^*} \quad (1)$$

其中,  $W^*$  为切削齿所做功, 单位为 J;  $f_{ti}$  为所采集的离散载荷数据点, 单位为 N;  $v$  为切削齿刮切速度, 单位为 m/s;  $t$  为刮切时间, 单位为 s;  $A^*$  为破碎比功, 单位为 J/mm<sup>3</sup>;  $V^*$  为岩石破碎体积, 单位为 mm<sup>3</sup>。

## 2 单齿刮切试验结果分析

### 2.1 花岗岩

图 2 为 PDC 圆形齿刮切花岗岩后的受力特性。可以观察到, 随着温度升高, PDC 齿的轴向力与切向力均呈现先升后降的变化趋势, 且在温度达到 200℃左右时, 两种力均达到峰值。实验以轴、径向力比值作为齿吃入能力的评价指标, 比值越小代表吃入能力越强。比值最小在 500℃时, 比值为 1.043。刮切花岗岩时, 温度达到 200℃后, 岩石的内部结构发生了改变, 由于热胀使孔隙度变大, 从而破岩更容易。因此花岗岩最佳破岩温度为 500℃。



(a) 轴向力 (b) 切向力

图2 刮切花岗岩轴向力与切向力关系

图 3 为刮切花岗岩作业中温度与破碎比功的对应关系。由图可得, 破碎比功随温度升高先增大后减小, 其最大值出现在 200℃左右的温度区间。该温度下, 最高破碎比功为 0.462J/mm<sup>3</sup>, 对应的破岩效率也降至最低。500℃时破岩比功最低, 此时破岩效率最高。

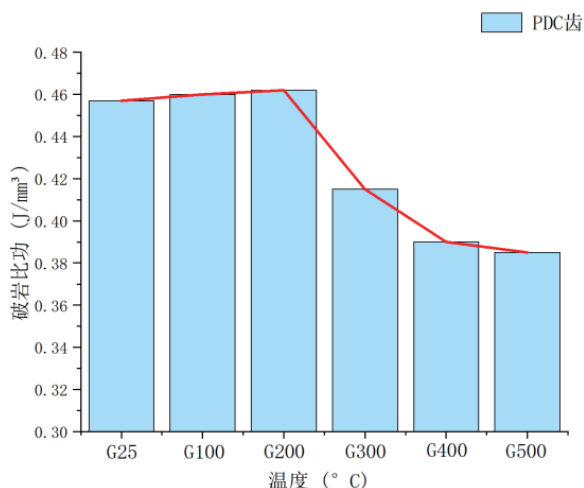
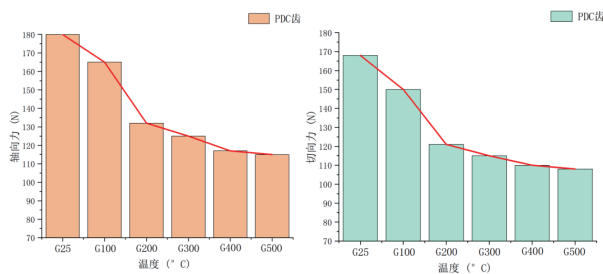


图3 刮切花岗岩破碎比功

### 2.2 砂岩

图 4 为 PDC 圆形齿刮切砂岩后的受力特性, 分析该图可知, PDC 齿随着温度的增加, 轴向力、切向力逐渐减小, 轴、径向力比值分别为 1.071、1.09、1.086、1.063、1.062, 因此最佳吃入能力位于 500℃。



(a) 轴向力 (b) 切向力

图4 刮切砂岩轴向力与切向力关系

图 5 为刮切砂岩时温度与破碎比功关系, 从图中可以看出, PDC 齿破碎比功随着温度的升高而降低, 在温度约为 500℃时破碎比功最小, 最小值分别为 0.091J/mm<sup>3</sup>, 即该温度下的破岩效率最高。

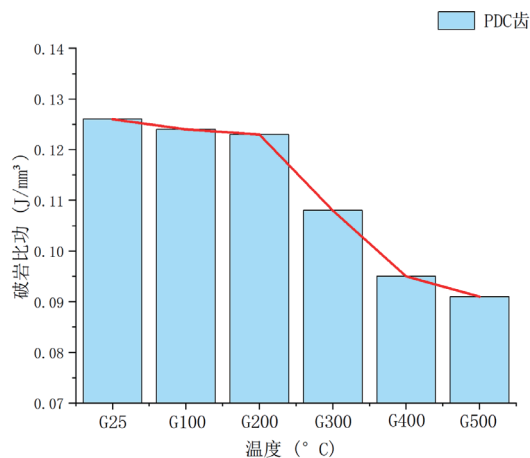


图5 刮切砂岩破碎比功

### 3 结语

本研究通过试验和仿真探讨高温环境下 PDC 齿破岩机理, 通过单齿刮切试验记录单齿刮切花岗岩和砂岩时力学关系, 此外通过单齿刮切数字模拟切削齿应力场和温度场变化规律。为地热井钻头设计提供理论依据。

开展高温下岩石力学性质研究。得出了高温条件下, 花岗岩的抗压强度、抗剪强度、内摩擦角先升高后降低, 最大值的温度约为 200℃。砂岩的抗压强度、抗剪强度、内摩擦角逐渐降低, 最大值温度为 25℃。

不同温度下单齿刮切破岩实验。结果表明, 温度升高会改变花岗岩和砂岩内部结构, 使岩石更容易破碎, 在 500℃时刮切花岗岩和砂岩效率最高, 切削齿吃入能力最强。

#### 参考文献:

[1] Shulyupin A N. Steam-water flow instability in geothermal wells [J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2015, 22 (4):475-480.

[2] 查永进, 冯晓炜, 葛云华等. 高温地热发电钻井技术进展[J]. 科技导报, 2012,(32):51-54.

[3] Gioia Falcone. Oil and Gas Expertise for Geothermal Exploitation: The Need for Technology Transfer [C]. SPE 113852, 2008.

[4] 毕玉荣. 地热资源开发应用现状及前景综述[J]. 石油石化节能, 2011,(10): 7-11.

[5] 李骥飞. 干热岩发电技术模拟研究与性能分析[J]. 山东化工, 2021,50(09):114-119.

[6] 张杰, 赵萌, 牛世伟. 干热岩 EGS 关键技术进展与发展趋势[J]. 区域供热, 2021(02):79-84.

[7] Frolova J V, Ladygin V M, Rychagov S N. Petrophysical alteration of volcanic rocks in hydrothermal systems of the kuril-kamchatka Island Arc[C]. World Geothermal Congress, 2010.

[8] Greg Bignall. Taupo volcanic zone deep geothermal drilling project [EB/OL]. [http://www.gns.cri.nz/content/download/6786/37092/file/2-3\\_HADES\\_May2011\\_Bignall\\_GNS-Science.pdf](http://www.gns.cri.nz/content/download/6786/37092/file/2-3_HADES_May2011_Bignall_GNS-Science.pdf)

作者简介: 高清亮, 男, 高级工程师, 中国石油集团长城钻探工程有限公司, 研究方向: 钻井提速研究。