



# Experimental Study on Rock Fragmentation Efficiency of Two Stage PDC Bit

Wang Bin, Guan Zhichuan<sup>\*</sup>, Hu Huaigang, Pan Rui

School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, China

## Email address:

guanzhch@upc.edu.cn (Guan Zhichuan), 1308713266@qq.com (Wang Bin)

<sup>\*</sup>Corresponding author

## To cite this article:

Wang Bin, Guan Zhichuan, Hu Huaigang, Pan Rui. Experimental Study on Rock Fragmentation Efficiency of Two Stage PDC Bit. *Science Discovery*. Vol. 7, No. 2, 2019, pp. 92-97. doi: 10.11648/j.sd.20190702.17

**Received:** April 8, 2019; **Accepted:** May 20, 2019; **Published:** May 23, 2019

**Abstract:** This paper proposes a two-stage PDC bit that can actively release the formation pressure in advance to improve the rock breaking efficiency, and provides a new solution for effectively improving the rock breaking efficiency of the deep hard formation. The red sandstone drilling comparison experiment under the same drilling parameters of the two-stage PDC bit and the conventional PDC bit is carried out. The experimental results show that the two-stage PDC bit can effectively improve the rock breaking efficiency under the same conditions and compare with the conventional PDC bit. The speed increase efficiency can be up to 90%; the use of two-stage drill can greatly reduce the rock breaking torque during the drilling process. Under the same working conditions, the double-stage PDC bit can reduce the rock breaking torque by up to 30%, and the two-stage The mechanical specific energy of the drill bit is generally lower than the mechanical specific energy of the conventional drill bit, and the relative reduction of the mechanical specific energy under the same conditions is between 5% and 25%. And effectively reduce the ineffective vibration of the drill bit, thereby achieving the purpose of protecting the drill bit and increasing the life of the combination of the drill bit and the bottom drill.

**Keywords:** The Two Stage PDC Bit, Rate of Penetration, Rock Breaking Torque, Mechanical Specific Energy, Bit Vibration

---

## 双级PDC钻头破岩效率的实验研究

王斌, 管志川<sup>\*</sup>, 呼怀刚, 潘瑞

中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛, 中国

## 邮箱

guanzhch@upc.edu.cn (管志川), 1308713266@qq.com (王斌)

**摘要:** 为解决深层硬地层钻探工作中出现的破岩效率低的问题。本文提出一种能够主动提前释放地层压力从而提高钻头破岩效率的双级PDC钻头, 为有效提高深部硬地层的破岩效率提供一种新的方案。并进行了双级PDC钻头以及常规PDC钻头相同钻进参数条件下的红砂岩钻进对比实验, 实验结果表明: 相同钻进参数条件使用下双级PDC钻头能够有效提高破岩效率, 与常规PDC钻头相比机械钻速提升效率最大可达90%; 使用双级钻头可以有效减小钻进过程中的破岩扭矩, 在相同钻进参数条件下, 使用双级PDC钻头最多可减小破岩扭矩30%, 且双级钻头的机械比能普遍低于常规钻头的机械比能, 同等条件下机械比能的相对减小值在5%到25%之间。并有效减小钻头无效振动, 从而达到保护钻头增加钻头与底部钻具组合寿命的目的。

**关键词:** 双级PDC钻头, 机械钻速, 破岩扭矩, 机械比能, 钻头振动

---

## 1. 引言

近年来, 深层油气资源的勘探与开发逐渐成为油气开采的重点方向之一。我国深层油气资源丰富[1], 使用PDC钻头进行油气井的钻探是目前油气田开采常用的技术手段, 但常规PDC钻头在用于深层硬地层油气藏钻探工作中普遍出现了破岩效率差、机械钻速低等问题, 降低了油田的经济效益。所以有效提高深层硬地层中的机械钻速是如今钻井工程中亟待解决的一个问题[2]。

矿场实践表明, 钻进过程中提前释放井底岩石应力能够提高钻头的破岩效率。因此有学者提出通过改变井底形状改变井底应力场来释放地层应力从而提高钻头破岩效率的理论, 在此基础上发展出的随钻扩眼技术、双级PDC钻头钻井技术等[3]、通过优化设计钻头形状可达到释放地层应力, 提高钻井速度的效果, 其发展前景广阔。然而, 以往研究大都停留在理论与数值模拟阶段[4], 缺乏实际的钻头破岩钻进试验研究, 且没有建立适用于双级PDC钻头的经验钻进方程, 这在一定意义上限制了双级PDC钻头的应用与推广。本文采用天然红砂岩模拟地层岩石进行双级PDC钻头破岩钻进控制变量试验, 进一步研究双级PDC钻头破岩效率的影响因素, 为双级PDC钻头的应用与推广提供理论支撑。

## 2. 双级PDC钻头的设计与加工

### 2.1. 双级PDC钻头结构特点

双级PDC钻头主要结构包括钻头连接接头、扩眼钻头、钻头级间连接、领眼钻头; 领眼钻头与分流传力总成连接成一体, 安装于扩眼钻头的轴向传扭孔内; 双级钻头水力分流系统由导眼体喷嘴组、扩眼体喷嘴组、级间钻柱中心流道和级间环空组成。在两级钻头外部设计独立的排屑流道[5]。双级PDC钻头结构图如图1所示:

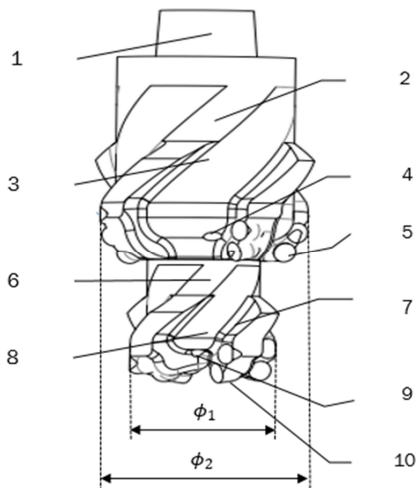


图1 双级钻头结构设计图。

1、钻头连接接头, 2、扩眼钻头排屑流道, 3、扩眼钻头, 4、扩眼钻头水力结构, 5、扩眼钻头切削结构, 6、钻头级间连接, 7、导眼钻头排屑流道, 8、导眼钻头, 9、导眼钻头水力结构, 10、导眼钻头切削结构

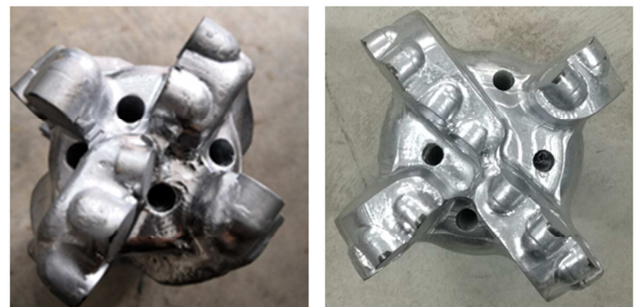
### 2.2. 双级PDC钻头工作特性

双级PDC钻头与常规PDC钻头破岩原理都是采用钻头的切削结构犁削、剪切破碎岩石[6]。两者主要区别体现在具体的破岩方式, 双级PDC钻头工作时, 首先是较小直径的导眼钻头在钻压的作用下吃入岩石, 此时采用的是大尺寸钻头的钻压参数, 由于井眼尺寸小, 破岩能量大, 相对于全尺寸钻头钻速相对快。在井眼底部产生一个较小直径的导眼。从而破坏地层岩石原始应力场, 释放地层应力; 随后较大直径的扩眼钻头在钻压作用下吃入岩石跟进破岩, 完成预设计的井眼尺寸[7]。因为导眼钻头在破岩过程中已经改变了井底岩石的应力场, 使地层岩石的抗破碎强度降低, 因此提高了扩眼钻头的破岩效率, 从而提高了钻头整体的钻进效率[8]。实验室所用成品双级PDC钻头外观图如图2所示:



图2 双级PDC钻头。

为了能够更加全面且真实的了解双级PDC钻头的破岩效率, 设计并加工了外径相同的常规PDC钻头作为对照, 同时双级钻头与常规PDC钻头在设计时保持了相似的剖面形状、水力结构、布齿设计和相同的刀翼数量。外观如图3所示:



A、双级 PDC 钻头

B、常规 PDC 钻头

图3 实验用常规PDC钻头。

3. 试验装置及试验分析

3.1. 试验装置

试验采用中国石油大学（华东）钻井工程实验室的XY-200型地质钻机，该钻机主要由液力加压系统、旋转系统和水力循环系统三部分组成，钻机通过旋转头带动六方钻杆旋转和钻进，钻机立轴单次进尺最大为440mm；钻机利用活塞水泵实现水力循环和岩屑清洁，钻井泵的最大流量为180L/min；可施加钻压0~20kN，转速具有64, 128, 287和557r/min 4个档位；钻机外观如图4所示：



图4 XY-200型钻机外观图。

通过在钻机顶部与钻杆连接处安装位移传感器，在钻杆与钻头中间部位安装加速度传感器和扭矩传感器，传感器连接数据采集记录软件，建立了集钻采功能为一体的破岩钻进试验装置，记录破岩试验过程中的钻头进尺位移、破岩扭矩、钻头加速度数据。试验装置结构如图5所示。

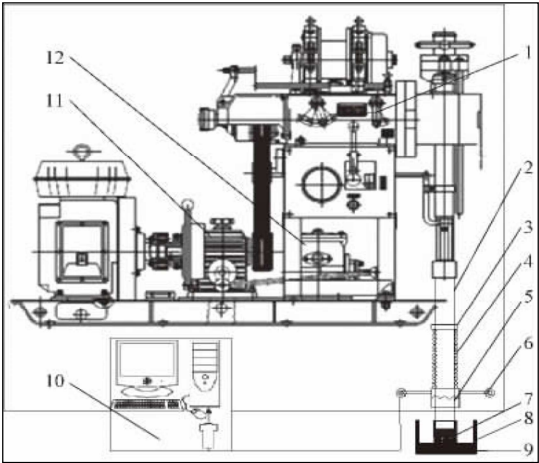


图5 钻进试验装置结构图。

1. 钻压表;2. 六方钻杆;3. 卡箍;4. 弹簧;5. 冲锤与砧体;6. 压力传感器;7. PDC钻头;8. 岩心筐;9. 岩样;10. 数据采集与处理系统;11. 卷扬机;12. 水泵。

3.2. 破岩钻进试验及结果分析

为了研究钻压、转速等钻进参数对双级PDC钻头破岩效率的影响规律，在不同钻压(5、10、15、20kN)、不同转速(64、128、287r/min)参数组合条件下分别对不同红砂岩进行破岩钻进试验。试验采用控制变量法，在相同条件下分别进行常规PDC钻头和双级PDC钻头破岩试验，由数据采集系统分别记录两种钻头的钻进参数[9]。两种钻头在钻进过程中的井底岩石结构如图6所示：

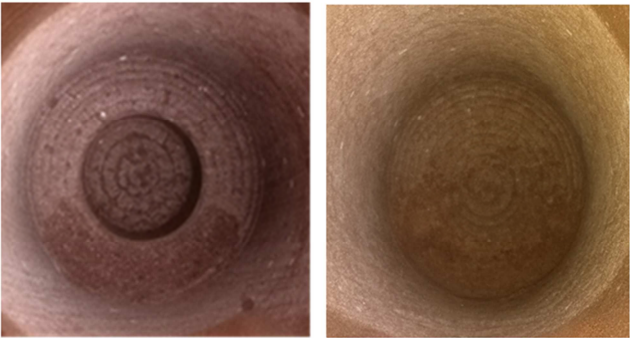


图6 两种钻头井底岩石结构。

3.2.1. 两种钻头机械钻速对比分析

在红砂岩钻进试验中，相同钻进参数条件下分别进行两种钻头破岩试验，使用数据采集系统记录钻进参数。两种钻头钻速与钻压关系曲线如图7所示。

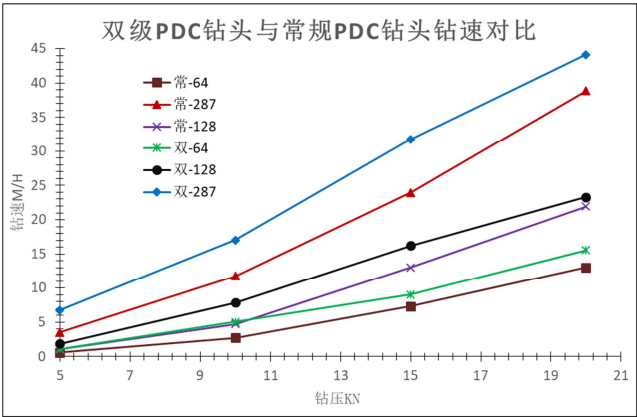


图7 两种钻头机械钻速对比。

从图6可以看出，两种钻头破岩试验过程中，钻压和转速是影响钻头钻速的主要因素，随着钻压的增大，两种钻头机械钻速呈现出明显的增大趋势；随着转速的增大，两种钻头机械钻速同样呈现出明显的增大趋势，因此对两种钻头做出钻速与钻压拟合曲线进行分析[10]。将两种钻头钻速与钻压拟合曲线汇入表1中。



表1 钻速与钻压拟合曲线

转速/(r/min)	钻头种类	钻速与钻压拟合方程	拟合方差
64	常-PDC	$v = -0.0382w^3 + 1.5055w^2 - 15.645w + 49.901$	0.9997
64	双-PDC	$v = -0.0336w^3 + 1.3454w^2 - 13.999w + 43.97$	0.9996
128	常-PDC	$v = -0.014w^3 + 0.5857w^2 - 5.9769w + 18.055$	0.9994
128	双-PDC	$v = -0.0127w^3 + 0.5371w^2 - 5.5124w + 16.622$	0.9998
287	常-PDC	$v = -0.007w^3 + 0.2875w^2 - 2.8409w + 8.3861$	0.9996
287	双-PDC	$v = -0.0057w^3 + 0.2398w^2 - 2.3935w + 7.0547$	0.9995

拟合方程为形如(1)式的3次多项式:

$$v = C_1 w^3 + C_2 w^2 + C_3 w + C \quad (1)$$

式中:  $v$ ——机械钻速 m/h;

$w$ ——钻压 kN;

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C$ ——常数;

对多项式求导计算可得,在钻压0~20kN区间内,导数均大于0,即在0~20kN区间内,随着钻压的增大,两种钻头钻速提升效率呈上升趋势。

对比两种钻头钻速与钻压拟合方程分析可得,在相同的钻速-转速参数组合条件下,使用双级PDC钻头获得的机械钻速要明显大于使用常规PDC钻头。计算双级PDC钻头相对提速效率并做出提速效率随钻压变化曲线如图8。

$$\eta = \frac{v_{\text{双}} - v_{\text{常}}}{v_{\text{常}}} \quad (2)$$

$v_{\text{双}}$ ——双级PDC钻头钻速 m/h;

$v_{\text{常}}$ ——常规PDC钻头钻速 m/h;

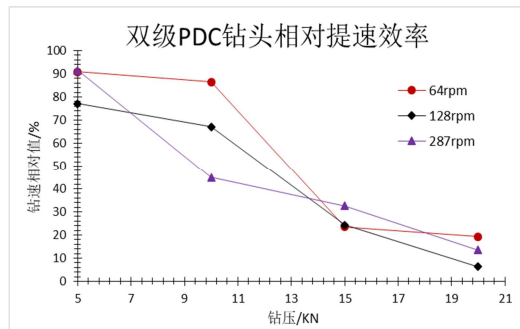


图8 双级PDC钻头提速效率变化曲线。

通过计算相对提速效率可得,在相同的钻速转速参数组合条件下使用双级PDC钻头能最高提速90%。从提速效率变化曲线可以看出,随着钻压增大,双级PDC钻头提速效率呈递减趋势,且双级PDC钻头在高转速的条件下具有更高的应用价值。

### 3.2.2. 两种钻头破岩扭矩与机械比能分析

实验过程中通过数据记录软件记录两种钻头在钻进过程中产生的破岩扭矩。对比两种钻头破岩扭矩静态值可以明显看出双级PDC钻头扭矩值要小于常规PDC钻头,扭矩相对减小值最高30%,借鉴R.Teale提出的机械比能模型

进一步计算对比两种钻头破岩过程中的机械比能,分析常规PDC钻头和双级PDC钻头的破岩效率。Teale提出的机械比能模型[11]:

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi \cdot N \cdot T}{A_b \cdot ROP} \quad (3)$$

式中: MSE—机械比能,  $\times 10^3$ MPa;

WOB—钻压, kN;  $A_b$ —钻头面积,  $\text{mm}^2$ ;

N—转盘转速, r/min; T—钻头扭矩, kN.m;

ROP—机械钻速, m/h;  $D_b$ —钻头直径, mm。

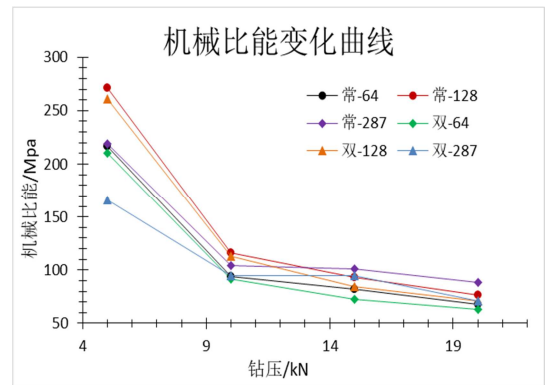


图9 两种钻头破岩的机械比能变化曲线。

计算不同钻进参数组合下双级PDC钻头与常规PDC钻头机械比能相对值并对比曲线如图10所示:

$$\eta_1 = \frac{T_{\text{双}} - T_{\text{常}}}{T_{\text{常}}} \quad (4)$$

$T_{\text{双}}$ ——双级PDC钻头破岩扭矩  $N \cdot m$ ;

$T_{\text{常}}$ ——常规PDC钻头破岩扭矩  $N \cdot m$ ;

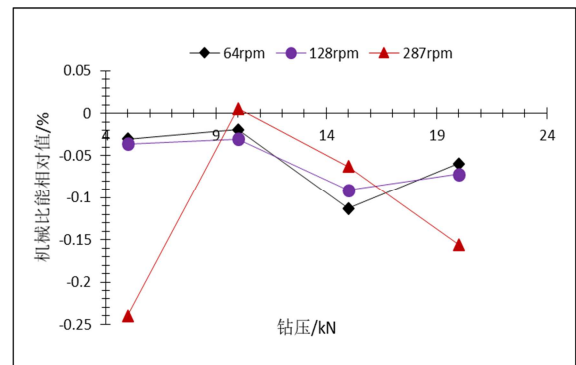


图10 机械比能相对值。

从两种钻头机械比能对比曲线（图10）可以看出常规PDC钻头和双级PDC钻头机械比能曲线变化趋势相似，即在钻压0~20kN范围内，随着钻压提升，机械比能呈递减趋势，最终且都趋于一个稳定值，理想状态下，机械比能的最小值应该等于岩石的原位抗压强度，且相同钻进参数组合条件下常规PDC钻头的机械比能要明显大于双级PDC钻头。通过机械比能相对变化曲线（图10）看出，在相同钻进参数条件下，双级PDC钻头的机械比能普遍低于常规PDC钻头的机械比能，且在高转速条件下更为明显，同等条件下的降幅在5%到36之间，表明双级PDC钻头在相同条件下更易于破碎岩石。

3.2.3. 两种钻头加速度分析

实验过程中通过数据记录软件记录两种钻头在钻进过程中产生的钻头加速度相应曲线。不同钻进参数组合下差压式PDC钻头与常规PDC钻头加速度静态值对比曲线如图11所示，钻压与加速度拟合曲线见表4：

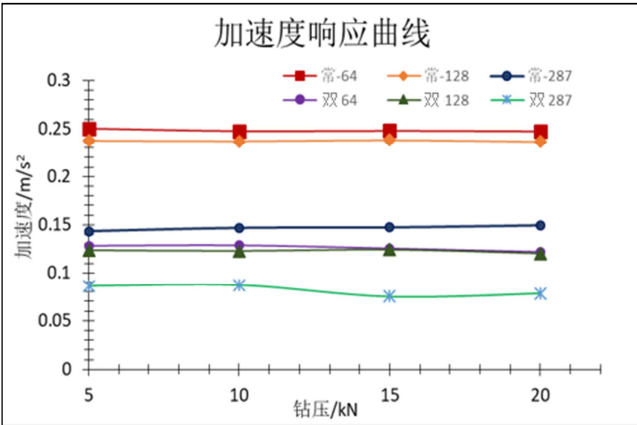


图11 两种钻头加速度对比。

表2 加速度与钻压拟合曲线。

转速/（r/min）	钻头种类	加速度与钻压拟合方程	拟合方差
64	常-PDC	$a = -0.0007w + 0.2505$	0.5777
64	双-PDC	$a = -0.0015w + 0.3461$	0.4112
128	常-PDC	$a = -0.0004w + 0.5410$	0.6236
128	双-PDC	$a = -0.0004w + 0.1575$	0.5501
287	常-PDC	$a = -0.0002w + 0.8542$	0.7214
287	双-PDC	$a = -0.0007w + 0.2546$	0.5610

从加速度对比曲线（图11）可以看出两种钻头加速度随钻压响应曲线变化趋势相似，均呈显出比较稳定的状态，加速度与钻压拟合曲线为： $a = kw + b$ 的线性关系。导数值  $k < 0$ ，即在钻压0~20kN范围内递增时，钻头加速度减小。对比拟合方程可以明显看出在并且相同钻进参数组合条件下，使用双级PDC钻头获得的钻头振动加速度要小于常规PDC钻头。这说明使用双级PDC钻头确实能够有效降低钻头振动，从而达到保护钻头增加钻头与底部钻具组合的目的。

4. 结论

本文提出一种能够主动提前释放地层压力从而提高钻头破岩效率的双级PDC钻头，为有效提高深部硬地层的破岩效率提供一种新的方案。并进行了双级PDC钻头以及常规PDC钻头相同钻进参数条件下的红砂岩钻进对比实验，通过分析实验结果可以得到双级PDC钻头相比常规PDC钻头确实有着一定的优越性，主要体现在以下三个方面：

- （1）双级钻头能够有效提升钻进效率，在相同钻进参数条件下，使用差压式钻头最多能够提升钻速90%；
- （2）双级PDC钻头能够有效减小破岩扭矩，稳定钻头工作状态；在相同钻进条件下，使用差压式钻头最多可减小破岩扭矩30%。双级钻头的机械比能普遍低于常规钻头的机械比能，同等条件下机械比能的相对减小值在5%到25%之间。

（3）双级PDC钻头能够有效降低钻头工作时的振动强度，大大减弱了钻头所受的冲击载荷。从而达到保护钻头，延长钻头使用寿命的目的。不但节省了钻井成本，还提高了钻井效率。

参考文献

[1] 我国油气资源勘探开发潜力较大[N],中国国土资源报,2015-05-07(006)。

[2] 左汝强,国际油气井钻头进展概述(一)——Kymera组合式(Hybrid)钻头系列[J],探矿工程(岩土钻掘工程),2016,(01):4-6。

[3] 彭烨,沈忠厚,樊胜华.基于开挖方法的井底应力场有限元模型[J],石油学报,2006,(06):133-136+140。

[4] 彭烨,双级PDC钻头的理论及试验研究[D],中国石油大学,2008:33-58。

[5] 李诚铭,杨红伟,孙金凤,等,新编石油钻井工程实用技术手册[J].中国知识出版社,2006:485。

[6] 李田军.,PDC钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D],中国地质大学,2012。

[7] T. M. Warren, M. B. Smith, Bottomhole stress factors affecting drilling rate at depth, SPE-13381-PA, 1985.

- [8] Azar, Slim Hbaieb. Michael, Hybrid. bit improves drilling efficiency. in Brazil's pre-salt formations [J], World Oil, 2013: 4-7.
- [9] 孙辉,郭俊磊,李隆承,关于PDC钻头破岩效率的研究[J],中国新技术新产品,2012,(16):141。
- [10] 张光辉,PDC钻头破岩机理及围岩状态识别技术研究[D],中国矿业大学,2015。
- [11] R. Teale. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2 (1): 57-73.