

# 偏心冲击回转钻进工艺试验研究及其所用 钻头的开发

汤凤林<sup>1,2</sup>, 赵荣欣<sup>1</sup>, Нескоромных В.В.<sup>3</sup>, 李博<sup>1</sup>,  
周欣<sup>4</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>, Чихоткин В.Ф.<sup>2</sup>

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海 200032; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074;  
3.西伯利亚联邦大学(Сибирский Федеративный университет),克拉斯诺雅尔斯克(г.Красноярск) 660095,  
俄罗斯(Россия); 4.湖北省地震局,湖北武汉 430064)

**摘要:**冲击回转钻进是一种重要的钻进方法,在地质钻探中得到了广泛应用。传统上,冲击回转钻进中冲击脉冲是垂直的,不是偏心的。俄罗斯专家提出利用偏心冲击产生的冲击脉冲来破碎岩石,以提高其破碎效果,这是一个新的理念,是一种创新。试验研究证明了偏心冲击回转钻进中,在岩石中不仅产生垂直正应力,还产生切向剪应力,有利于岩石破碎效果和钻进效率的提高。在偏心距 $E=1\sim 2$  mm冲击脉冲钻进粗粒玄武岩和大理岩条件下,机械钻速和钻头每转进尺比 $E=0$  mm时都有大幅度的提高。此外,还研发了与之配套的偏心冲击回转钻进用钻头,并取得了发明专利,使偏心冲击回转钻进在地质勘探中的效果和作用得到了进一步的加强。建议中国对偏心冲击回转钻进进一步研究。

**关键词:**冲击回转钻进;偏心冲击脉冲;偏心距;机械钻速;每转进尺;偏心冲击回转钻进用钻头  
**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)06-0014-10

## Experimental research on drilling parameters of eccentric percussion rotary drilling and development of the drill bit used for

TANG Fenglin<sup>1,2</sup>, ZHAO Rongxin<sup>1</sup>, NESKOROMNYH V.V.<sup>3</sup>, LI Bo<sup>1</sup>,  
ZHOU Xin<sup>4</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>, CHIKHOTKIN V.F.<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;  
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China;  
3. Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660095, Russia;  
4. Hubei Province Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

**Abstract:** Percussion rotary drilling is an important method of drilling and widely used in geological exploration. Traditionally in percussion rotary drilling application of impact pulse is centric, but not eccentric. Russian experts have put forward fragmentation of rock by application of eccentric impact pulse in order to improve the result of the fragmentation. That is a new concept and an innovation. The experimental research has been proved, that in percussion rotary drilling by eccentric impact pulses in rock not only vertical normal stress are created, but also tangential shear stress created and it is beneficial to improve the result of rock fragmentation and rising of drilling rate. In drilling dolerite and marble at eccentricity  $E=1\sim 2$ mm the mechanical drilling rate and bit penetration per revolution are increased substantially in comparison with  $E=0$ mm. Matching with the mentioned above the drill bit for eccentric percussion

收稿日期:2024-03-25; 修回日期:2024-07-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.06.002

基金项目:国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号:42272366)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际矿产资源科学院院士,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,fltang\_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,赵荣欣,Нескоромных В.В.,等.偏心冲击回转钻进工艺试验研究及其所用钻头的开发[J].钻探工程,2024,51(6):14-23.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V.V., et al. Experimental research on drilling parameters of eccentric percussion rotary drilling and development of the drill bit used for[J]. Drilling Engineering, 2024,51(6):14-23.

rotary drilling has been developed and the bit patent obtained, strengthening the result and role of the eccentric percussion rotary drilling further in geological exploration. It is suggested that further research on eccentric percussive rotary drilling should be carried out in China.

**Key words:** percussion rotary drilling; eccentric impact pules; eccentricity; mechanical drilling rate; bit penetration per revolution; drill bit for eccentric percussion rotary drilling

### 1 冲击回转钻进概述

冲击回转钻进是一种重要的钻进方法,在地质钻探中得到了广泛的应用<sup>[1-9]</sup>。俄罗斯钻探工作者在冲击回转钻进方面做了很多工作,发表了很多文章,取得了很多成果<sup>[19-36]</sup>。

冲击回转钻进的技术指标之一是机械钻速,在数值上机械钻速  $V_M$  等于钻头每转进尺  $h_{o6}$  和钻头转速  $\omega$ (r/min) 的乘积,即:

$$V_M = h_{o6} \omega \quad (1)$$

钻头每转进尺为:

$$h_{o6} = \frac{V_{\pi} Z}{F_{3a6}} \quad (2)$$

式中:  $V_{\pi}$ ——岩石破碎穴体积,  $m^3$ ;  $F_{3a6}$ ——孔底面积,  $m^2$ ;  $Z$ ——钻头底端切削具数量。

冲击能为  $A$ :

$$A \geq V_{\pi} q \quad (3)$$

式中:  $q$ ——岩石破碎单位能耗量,  $J/m^3$ 。

则:

$$V_M = \frac{AZ\omega}{qF_{3a6}} \quad (4)$$

常规冲击回转钻进时,在孔底产生垂直孔底平面的正应力,钻进时利用高能量的冲击,以挤压和压碎形式破碎岩石。

在以一定偏心距冲击破碎岩石时,岩石破碎机理发生了变化,此时的冲击变成了相对钻头不对称的冲击,作用到钻头上的切向剪切力不再相互抵消,导致切削具沿着孔底移动,于是在孔底平面上除了形成垂直作用力外,还形成了切向剪切作用力(见图1)<sup>[10]</sup>。

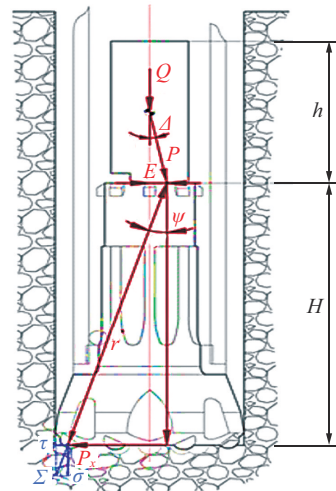
根据布司涅斯克(Буссинеск Ж.В.)理论得到的正应力和切向应力的计算公式如下:

$$\sigma_i = \frac{3Q \cos^2 \psi_i \cos^2 \Delta}{2\pi r_i^2} \quad (5)$$

$$\tau_i = \frac{3Q \cos^2 \psi_i \cos \Delta \sin \Delta}{2\pi r_i^2} \quad (6)$$

式中:  $i$ ——计算  $r_i$  和  $\psi_i$  用的切削具序号。

从上述公式可以看出,偏心冲击时,钻头切削



Q—冲击器重力, N; P—冲击力, N; E—施加冲击的偏心距, m; Δ—钻头中心线和冲击器传给破碎岩石切削具的冲击脉冲方向之间的夹角, (°); h—冲击器高度, m; ψ—钻头中心线和冲击脉冲施加点到破碎岩石切削具方向之间的夹角, (°); r—冲击脉冲施加点到破碎岩石切削具之间的距离, m; H—破碎岩石切削具的高度, m;  $P_x$ —一切向剪切力分力的合力, N;  $\sigma$ —正应力, Pa;  $\tau$ —切向应力, Pa;  $\Sigma$ —总合应力, Pa

图1 点冲击时冲击脉冲的传递和破碎岩石切削具应力的产生

Fig.1 The transfer of impact pulses and creation of rock fragmentation stresses under impacting with a point impact

具承受的应力是不同的。

从图1可见,当偏心距数值增加时,冲击力  $P$  是减小的,如式(7):

$$P = Q \cos \Delta = \frac{Qh}{2\sqrt{E^2 + (h/2)^2}} \quad (7)$$

式中:  $P$ ——冲击力, N;  $h$ ——冲击器高度, m;  $E$ ——冲击时的偏心距, m。

由于经受偏心冲击脉冲的作用和切削具上切向剪切力的不同,所以,作用在钻头端面平面上的切向力,在冲击偏心距  $E$  增加时是增加的,见式(8)<sup>[10]</sup>:

$$P_x = \frac{2PE}{\sqrt{(4E^2 + H^2)}} = \frac{QE}{\sqrt{(4E^2 + H^2)(E^2 + h^2/4)}} \approx \frac{PE}{H} \quad (8)$$

式中： $H$ ——钻头高度，m。

当冲击器重力  $Q=58.8$  N、冲击器高度  $h=0.152$  m、碎岩工具高度  $H=0.65$  m 时，冲击力、剪切力与偏心距  $E$  的关系见图 2。

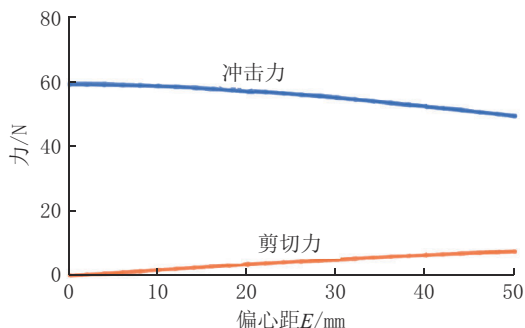


图 2 冲击力、剪切力与偏心距的关系

Fig.2 Dependence of impact force and tangential force from the eccentricity of impact application

## 2 岩石破碎体积与偏心距的关系

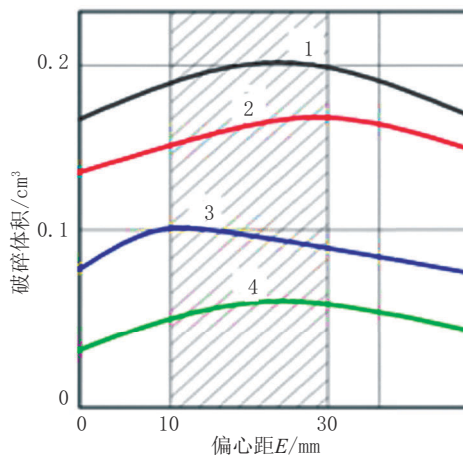
岩石破碎体积与偏心距关系的试验是在试验台上进行的，是以单个冲击产生的偏心冲击脉破碎岩石的方式进行的。试验的岩石为大理岩（硬度为 765 MPa，塑性系数为 3.3）和花岗闪长岩（硬度为 2489 MPa，塑性系数为 1.1）。冲击能分别为 0.17 kJ 和 0.24 kJ。冲击脉偏心距范围为 0~42 mm。所用钻头直径为 90 mm，镶有 8 个半球状钨钴（BK）硬质合金切削具。试验结果见图 3<sup>[13]</sup>。

从图 3 可见，岩石破碎体积是随冲击能量的提高而增加的。在偏心距  $E$  为 10 mm 以内，岩石破碎体积都是随  $E$  的增加而提高的。另有试验结果表明，利用液动冲击器、用金刚石钻头偏心冲击钻进花岗闪长岩和大理岩时，在一定冲击脉偏心距（1~3 mm）条件下，钻进效率也是提高的<sup>[14]</sup>。

## 3 偏心冲击回转钻进时钻进技术指标与规程参数、偏心距关系的试验研究<sup>[10]</sup>

### 3.1 试验条件

偏心冲击回转钻进试验是在试验台上进行的。试验台上装有 CKB 型钻机（见图 4）、测量机械转速



1—大理岩，冲击能量为 0.2 kJ；2—花岗闪长岩，冲击能量为 0.2 kJ；3—大理岩，冲击能量为 0.17 kJ；4—花岗闪长岩，冲击能量为 0.17 kJ

图 3 破碎体积与偏心距的关系曲线

Fig.3 Dependence of fragmentation volume from eccentricity of impact  $E$

的 ИСБ 型仪表、可以供给 15~120 L/min 冲洗液的 НБ-3 型水泵，试验用的岩块为 0.7 m×0.7 m×0.7 m。试验钻进时，每次钻进深度  $L_0=0.01$  m，记录每次钻进用的时间(s)。试验期间使用的冲洗液是工业用水，冲洗液量为 70 L/min，保持不变。



图 4 用 CKB-4 型钻机改装的试验台

Fig.4 Stand for experimental work on the base of drill rig CKB-4

试验用的岩石为不同性质的两种岩石：粗粒玄武岩和大理岩，使用的钻头为 3III-59-K-IIA 型三牙轮钻头，冲击器为 ГВ-6 型高频液动冲击器。冲击偏心距（1 mm 和 2 mm）是通过改进冲击器底端（切断其底端一部分）实现的（见图 5）。

### 3.2 试验目的和方法

试验研究的目的是：分析研究钻进技术指标机



图 5 施加偏心冲击脉冲用的冲击器

Fig.5 Impactor for application of eccentric impact pulse

机械钻速  $V_M=36L_0/t(\text{m/h})$  (式中:  $L_0=0.01\text{ m}$ ;  $t$ ——钻进  $0.01\text{ m}$  用的时间,  $\text{s}$ )、钻头每转进尺  $h_{00}=V_M/(60\omega)(\text{m})$  (式中:  $\omega$ ——转速,  $\text{r/min}$ ) 和冲击偏心距  $E$ 、规程参数(轴载  $P_{OC}$  和转速  $\omega$ ) 之间的关系。

试验研究方法是二水平、全因子试验<sup>[3]</sup>。试验中最主要因子考虑了轴载  $P_{OC}$  和转速  $\omega$  的变化(冲洗液量不变)。轴载采用的低水平是  $800\text{ dN}$ 、高水平是  $1200\text{ dN}$ ; 转速采用的低水平是  $155\text{ r/min}$ 、高水平是  $390\text{ r/min}$ 。

3.3 试验结果和数据处理

3.3.1 机械钻速试验

机械钻速试验得到的结果见表 1。

表 1 机械钻速试验数据

Table 1 Experimental data of mechanical drilling rate					
钻进岩石	转数/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	轴载/ $\text{dN}$	机械钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )		
			$E=0\text{ mm}$	$E=1\text{ mm}$	$E=2\text{ mm}$
粗粒玄武岩	155	800	0.403	0.417	0.445
		1200	0.790	0.877	0.997
	390	800	1.450	1.735	2.010
		1200	2.620	3.480	3.700
大理岩	155	800	0.817	0.925	1.090
		1200	1.810	1.940	2.243
	390	800	2.070	3.267	3.665
		1200	3.460	5.673	6.691

3.3.1.1 粗粒玄武岩机械钻速与规程参数、偏心距的关系

从表 1 可见,  $E=0\text{ mm}$  (非偏心冲击) 时, 在最大钻进规程条件下, 粗粒玄武岩机械钻速为  $2.620\text{ m/h}$ 。  $E=1\text{ mm}$  时, 机械钻速为  $3.480\text{ m/h}$ , 比非偏心冲击时增加了  $33\%$ 。  $E=2\text{ mm}$  时机械钻速为  $3.700$

$\text{m/h}$ , 比非偏心冲击时增加了  $41\%$ , 比  $E=1\text{ mm}$  时增加了  $6\%$ 。

根据试验结果得到的粗粒玄武岩机械钻速与规程参数、偏心距关系的数学模型为:

$$E=0\text{ mm 时: } V_M=1.316+0.719P_{OC}+0.389\omega+0.196P_{OC}\omega;$$

$$E=1\text{ mm 时: } V_M=1.627+0.98P_{OC}+0.551\omega+0.321P_{OC}\omega;$$

$$E=2\text{ mm 时: } V_M=1.788+1.067P_{OC}+0.561\omega+0.285P_{OC}\omega。$$

上述数学模型的图解见图 6。

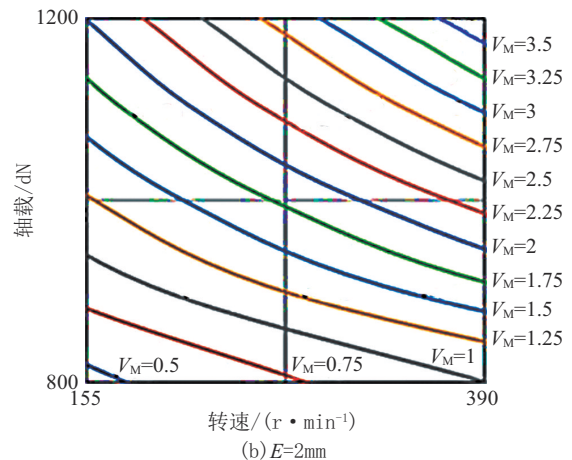
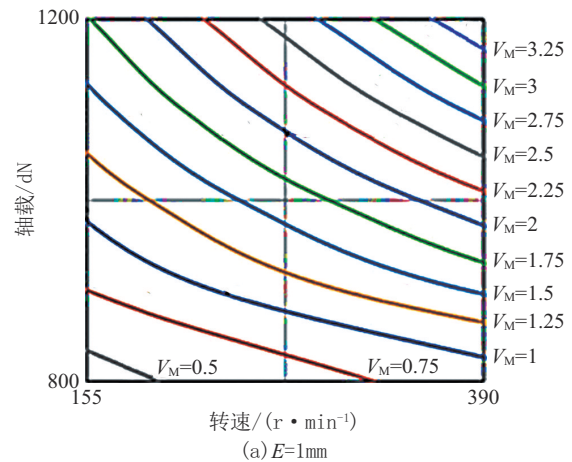


图 6 粗粒玄武岩破碎机械钻速  $V_M(\text{m/h})$  与规程参数关系的图解

Fig.6 Graphic interpretation of dependence of dolerite mechanical drilling rate from drilling parameters

不同钻进规程条件下机械钻速  $V_M(\text{m/h})$  与冲击偏心距  $E(\text{mm})$  的关系见图 7。

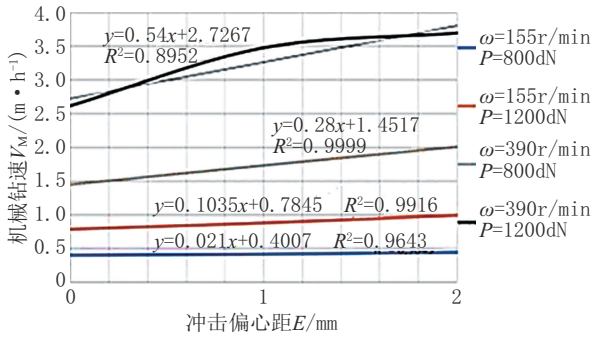


图7 不同钻进规程条件下粗粒玄武岩机械钻速与冲击偏心距的关系曲线

Fig.7 Dependence of dolerite mechanical drilling rate from value of impact application eccentricity under different drilling conditions

3.3.1.2 大理岩机械钻速与规程参数、偏心距的关系

从表1可见,  $E=0$  mm(非偏心冲击)时,在最大钻进规程条件下,大理岩机械钻速为3.460 m/h。  $E=1$  mm时,机械钻速为5.673 m/h,比非偏心冲击时增加了64%。  $E=2$  mm时机械钻速为6.691 m/h,比非偏心冲击时增加了93%,比  $E=1$  mm时增加了18%。

根据试验结果得到的大理岩机械钻速与规程参数、偏心距关系的数学模型为:

$$E=0 \text{ mm 时: } V_M=2.039+0.726P_{Oc}+0.596\omega+0.099P_{Oc}\omega;$$

$$E=1 \text{ mm 时: } V_M=2.951+1.519P_{Oc}+0.885\omega+0.348P_{Oc}\omega;$$

$$E=2 \text{ mm 时: } V_M=3.422+1.756P_{Oc}+1.045\omega+0.468P_{Oc}\omega.$$

不同钻进规程条件下大理岩机械钻速  $V$  与规程参数关系的图解,见图8。

不同钻进规程条件下,大理岩机械钻速与冲击偏心距的关系见图9。

3.3.2 每转进尺试验

每转进尺试验结果见表2。

3.3.2.1 粗粒玄武岩每转进尺试验

从表2可见,  $E=0$  mm(非偏心冲击)时,在最大钻进规程条件下,粗粒玄武岩每转进尺为0.1120 mm/r。  $E=1$  mm时,每转进尺为0.1485 mm/r,比非偏心冲击时增加了33%。  $E=2$  mm时每转进尺为0.1583 mm/r,比非偏心冲击时增加了41%,比  $E$

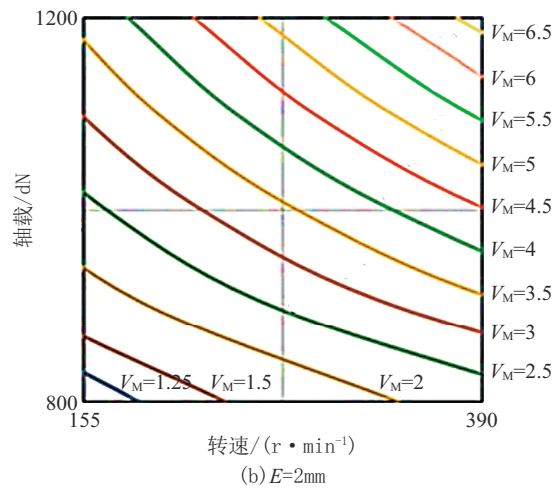
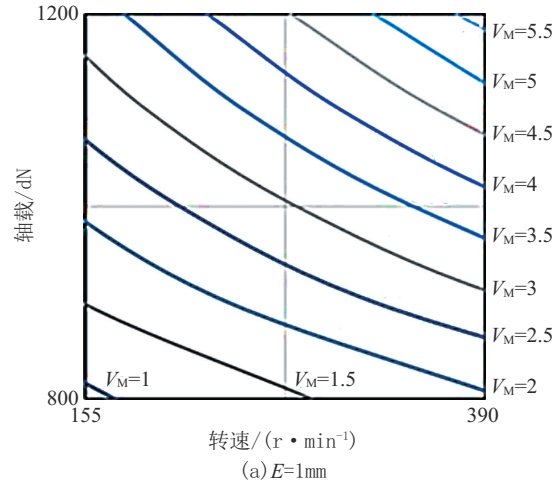


图8 大理岩破碎机械钻速  $V_M$ (m/h)与规程参数关系的图解

Fig.8 Graphic interpretation of dependence of marble mechanical drilling rate from drilling parameters

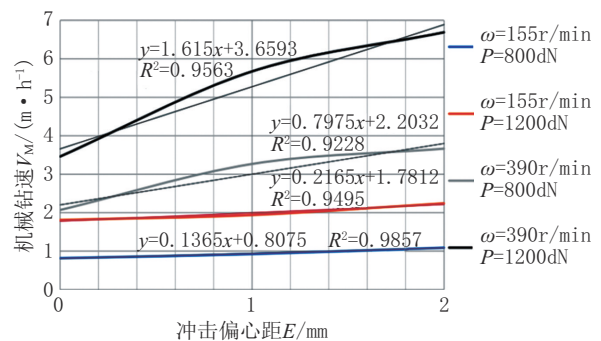


图9 不同钻进规程条件下大理岩机械钻速与冲击偏心距的关系曲线

Fig.9 Dependence of marble mechanical drilling rate from value of impact application eccentricity at different drilling parameters

表 2 每转进尺试验数据

Table 2 Data of bit penetration per revolution					
钻进岩石	转数/(r·min <sup>-1</sup> )	轴载/dN	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )		
			E=0 mm	E=1 mm	E=2 mm
粗粒玄武岩	155	800	0.0433	0.0447	0.0475
		1200	0.0850	0.0943	0.1073
	390	800	0.0623	0.0740	0.0860
		1200	0.1120	0.1485	0.1583
大理岩	155	800	0.0877	0.0995	0.1170
		1200	0.1912	0.1930	0.2413
	390	800	0.0885	0.1393	0.1565
		1200	0.1480	0.2427	0.2857

=1 mm 时增加了 7%。

根据试验结果得到的粗粒玄武岩每转进尺与规程参数、偏心距关系的数学模型为:

$$E=0 \text{ mm 时: } h_{06} = 0.07565 + 0.0115P_{oc} + 0.02285\omega + 0.002P_{oc}\omega;$$

$$E=1 \text{ mm 时: } h_{06} = 0.09038 + 0.02088P_{oc} + 0.03103\omega + 0.0249P_{oc}\omega;$$

$$E=2 \text{ mm 时: } h_{06} = 0.09978 + 0.02238P_{oc} + 0.03303\omega + 0.0313P_{oc}\omega.$$

上述数学模型的图解见图 10。

不同钻进规程条件下粗粒玄武岩每转进尺与规程参数的关系见图 11。

### 3.3.2.2 大理岩每转进尺试验

从表 2 可见, E=0 mm(非偏心冲击)时,在最大钻进规程条件下,大理岩每转进尺为 0.1480 mm/r。E=1 mm 时,每转进尺为 0.2427 mm/r,比非偏心冲击时增加了 64%。E=2 mm 时每转进尺为 0.2857 mm/r,比非偏心冲击时增加了 93%,比 E=1 mm 时增加了 18%。

根据试验结果得到的大理岩每转进尺与规程参数、偏心距关系的数学模型为:

$$E=0 \text{ mm 时: } h_{06} = 0.12885 + 0.0106P_{oc} + 0.04075\omega + 0.011P_{oc}\omega;$$

$$E=1 \text{ mm 时: } h_{06} = 0.168625 + 0.022375P_{oc} + 0.049225\omega + 0.002475P_{oc}\omega;$$

$$E=2 \text{ mm 时: } h_{06} = 0.2 + 0.020975P_{oc} + 0.06338\omega + 0.00123P_{oc}\omega.$$

大理岩破碎时每转进尺  $h_{06}$  (mm/r) 与轴载、转速关系的图解见图 12。

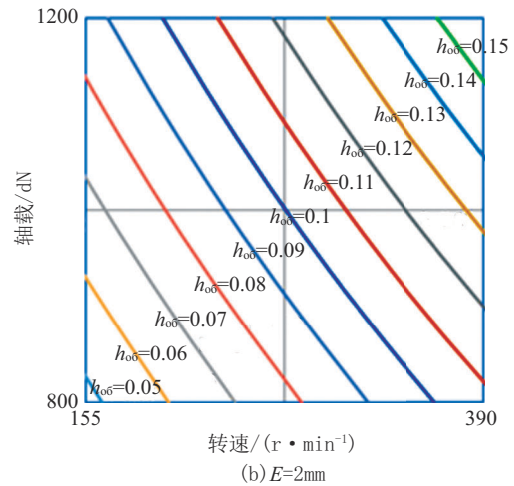
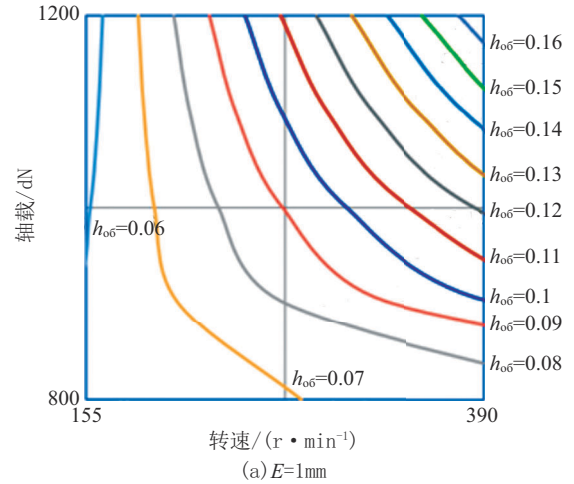


图 10 粗粒玄武岩每转进尺  $h_{06}$  (mm/r) 与规程参数、偏心距关系的图解

Fig.10 Graphic interpretation of dependence of dolerite bit penetration per revolution from drilling parameters

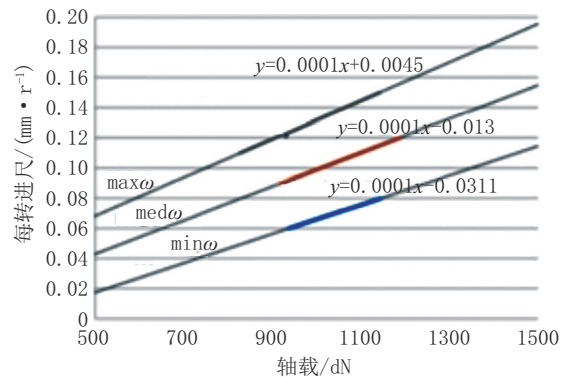


图 11 E=2 mm 时粗粒玄武岩每转进尺与规程参数轴载、转速的关系

Fig.11 Dependence of dolerite bit penetration per revolution from drilling parameters at E=2mm

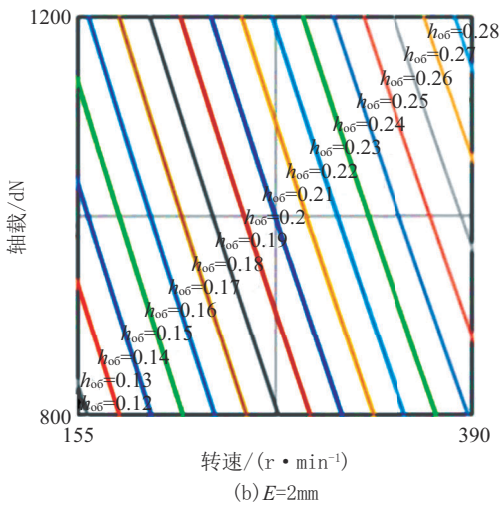
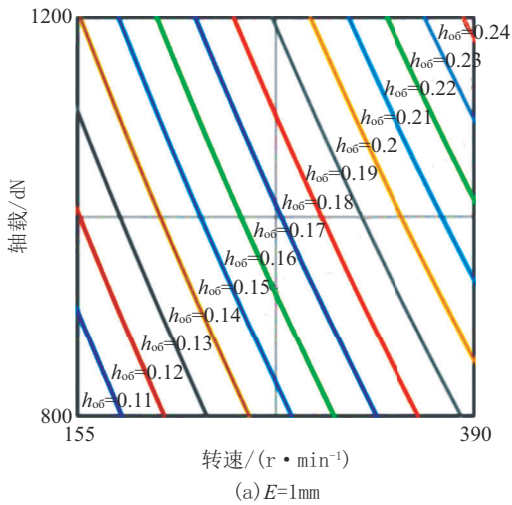


图12 大理岩破碎时每转进尺  $h_{06}$  (mm/r)与轴载、转速关系图解:

Fig.12 Graphic interpretation of dependence of marble bit penetration per revolution from drilling parameters

$E=2\text{ mm}$ 时钻进大理岩每转进尺与轴载、转速的关系见图13。

从上述试验结果数据可见,总的趋势是:在给定的钻进规程条件下,偏心冲击回转钻进时,尽管粗粒玄武岩和大理岩的性质不同,但是,在其钻进时得到的机械钻速和钻头每转进尺,均随轴载和转速的增加而提高,均随偏心距的增加而大幅提高,在规程参数不同组合时也是如此,说明偏心冲击脉冲在破碎岩石中起了重要作用。机械钻速试验中,轴载的作用大于转速的作用;钻头每转进尺试验中,转速的作用大于轴载的作用。这与岩石性质有关,也与所用的规程参数有关。钻头每转进尺试验

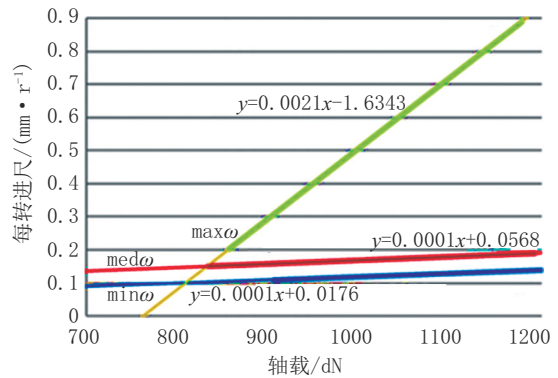


图13  $E=2\text{ mm}$ 时钻进大理岩每转进尺与轴载、转速的关系

Fig.13 Dependence of marble bit penetration per revolution from drilling parameters at  $E=2\text{ mm}$

中,每转进尺的数值比较低,可能与轴载不足,没有形成体积破碎,只是表面疲劳破碎有关。

#### 4 偏心冲击回转钻进用钻头的研发<sup>[12]</sup>

俄罗斯 Нескоромных В.В. 教授等人研发出了一种偏心冲击回转钻进用的钻头。这种钻头是俄罗斯发明专利产品,专利号为RU2682824。钻头的工作原理和结构见图14。

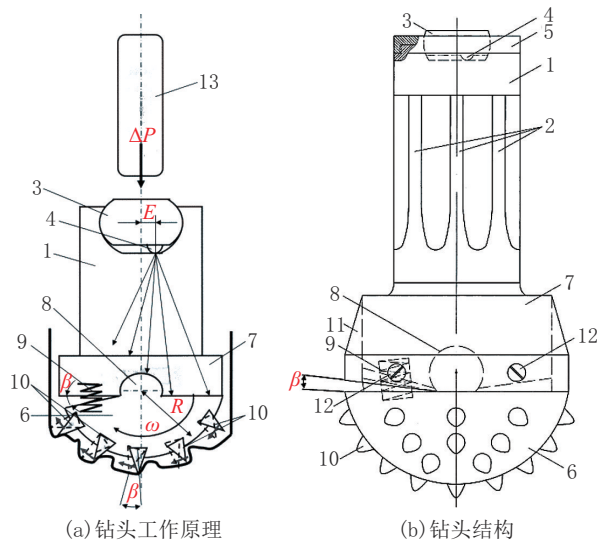


图14 偏心冲击回转钻进用钻头  
1—圆鼓尾座;2—连接花键;3—圆鼓;4—半球状偏心凸起件;5—固定圆鼓用垫圈;6—钻头头部中的转动部件;7—钻头头部中的不转动部件;8—铰接件;9—弹性件;10—破碎岩石切削具;11—圆柱形套筒;12—螺栓;13—冲击器

图14 偏心冲击回转钻进用钻头  
Fig.14 The drill bit used for eccentric percussion rotary drilling

从图14可见,钻头由钻头头部和尾部组成。钻头头部由钻头转动部件6和不转动部件7组成,二者通过铰接件8连接起来。钻头尾部包括有圆鼓尾座1、圆鼓3、半球状偏心凸起件4和固定圆鼓用垫圈5。钻头头部和尾部用花键2连接起来。

为了破碎孔底岩石,钻头头部转动部件6上,装有破碎岩石用的切削具10。为了把钻头头部的转动部件和不转动部件组装起来,在钻头结构中配有圆柱形套筒11,该套筒用螺栓12固定在钻头头部上。

钻头头部保持在初始位置或完成破碎循环后回到初始位置,用弹性件9实施。

新型偏心冲击回转用钻头如下进行工作:圆鼓3上端,接受来自冲击器13的中心(轴向)冲击脉冲,产生的弯矩为 $M=\Delta P \cdot E$ (式中: $\Delta P$ ——冲击力,N; $E$ ——凸起4在圆鼓底端上的偏心距,m),通过圆鼓3底端上的凸出件4,传送给圆鼓底座1。

传送到圆鼓尾座1上的偏心冲击脉冲,被传送给钻头头部,因此在孔底平面上除了正应力 $\sigma$ 作用外,还作用有切向剪切力 $\tau$ (参见图1)。

钻头头部可以转动的半球形部件6的转动,保证了产生切向冲击力和横向位移,改变了破碎穴的形状,提高了破碎穴的尺寸(见图15),还可保证岩体经受破碎作用、被裂隙分离、但仍靠其内部联系力保持在破碎穴内的那部分岩屑脱离孔底,因而提高了破碎岩石的效果,提高了钻进效率。

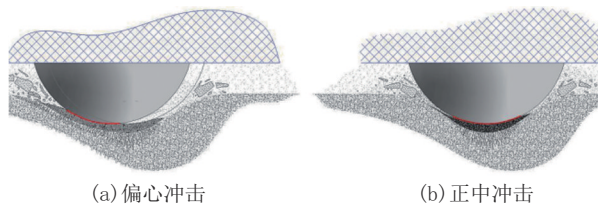


图15 岩石破碎情况

Fig.15 Rock fragmentation

破碎岩石切削具10横向位移的数值,由 $\beta$ 角的大小设定。例如,对于非常硬的岩石来说, $\beta$ 角可能很小甚至等于0,而随着岩石硬度的降低和塑性的提高, $\beta$ 角可能达到最大可能值。

在地质勘探钻孔及其它有关钻孔钻进时,使用这种冲击回转钻头,利用孔底冲击器,可以提高中等硬度岩石、特别是塑性岩石的破碎效果。这是因

为利用轴向(非偏心)冲击时会导致岩石变得致密,破碎效果低的缘故。而在偏心冲击脉冲破碎岩石时,除了轴向(非偏心)载荷分力外,还有钻头切向位移产生的切向剪切载荷破碎岩石,犹如岩石切削和剪切岩石一样,因而破碎穴扩大了,钻进效率提高了。

## 5 讨论和建议

根据上述研究资料及对其进行分析,可做如下讨论和建议。

(1)冲击回转钻进是一种传统、重要的钻进方法,在地质钻探中得到了广泛应用。但在传统冲击回转钻进中,冲击产生的是垂直(非偏心)的冲击脉冲。俄罗斯专家提出利用偏心冲击产生的冲击脉冲破碎岩石来提高岩石破碎效果,是一种新的理念,是一种创新。试验结果表明,偏心冲击破碎岩石的效果比非偏心冲击破碎岩石的效果好,钻进效率明显提高,而且提高幅度较大,说明这种理念具有实际意义,值得引起我们的注意。

(2)在偏心冲击脉冲破碎岩石中,冲击偏心距是个重要参数。在偏心距 $E < 10$  mm范围内,岩石破碎体积是随 $E$ 的增大而增加的。多数研究表明, $E=1\sim 2$  mm时,钻进技术指标(机械钻速、钻头每转进尺)比 $E=0$  mm(非偏心冲击)时明显提高,但是, $E=2$  mm比 $E=1$  mm时钻进技术指标提高的幅度有所下降。

(3)偏心冲击脉冲破碎岩石比非偏心冲击脉冲破碎岩石效果之所以好,主要是由于偏心冲击脉冲破碎岩石时,在冲击功的作用下,在岩石中不仅产生了垂直正应力,还产生了切向剪切应力。在切向剪切应力作用下,破碎穴变宽了,破碎效果变好了,因此,钻进效率提高了。

(4)在与偏心冲击脉冲破碎岩石工艺研究的同时,俄罗斯钻探专家还研发出了偏心冲击回转钻进的钻头,并取得了发明专利,使所用钻头和工艺配套起来,为偏心冲击回转钻进在地质钻探工程中的推广使用创造了有利条件。

(5)应该指出的是,俄罗斯钻探工作者在偏心冲击脉冲破碎岩石试验中,每次钻进深度只为0.01 m。在这种情况下采取了数据,进行了分析与讨论,并得出了相应的结论。这个钻进深度太浅了,如果钻进深度大一些,可能取得的数据更加充分,得出



的结论更有说服力,可信度更高。其研发的偏心冲击回转用钻头,虽然取得了发明专利,但是尚未看到其大量使用效果的报道,尚未看到有其取得优秀技术经济指标的资料。

(6)建议中国钻探工作者对偏心冲击回转钻进的理论 and 实践进行进一步讨论和研究,以便对其进行评估,讨论其在中国推广的可能性、必要性和发展前景。

### 参考文献(References):

- [1] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程,2023,50(1):39-48.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 39-48.
- [2] 汤凤林, Нескоромных В.В., 宁伏龙,等.金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J].钻探工程,2021,48(10):43-55.  
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 43-55.
- [3] 汤凤林,赵荣欣, Нескоромных В.В.,等.PDC钻头钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数关系的分析研究[J].钻探工程,2024,51(1):5-14.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V. V., et al. Analytical research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in PDC bit drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 5-14.
- [4] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.  
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [5] 汤凤林, Чихоткин А.В., 段隆臣,等.关于利用系统论方法设计金刚石钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):13-19.  
TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V. F., DUAN Longchen, et al. Analytical research on design of diamond drill bits with the system theory approach [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1): 13-19.
- [6] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [7] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [8] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):74-79.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 74-79.
- [9] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):88-92.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitier wing bit [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6): 88-92.
- [10] Нескоромных В. В., Головченко А. Е., Попова М. С. Модернизация породоразрушающего инструмента для ударно-вращательного бурения, реализующего внецентренное приложение ударных импульсов [J]. Известия высших учебных заведений Геология и разведка, 2019(5):64-69.
- [11] Нескоромных В.В., Попова М.С., Головченко А.Е., et al. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC [J]. Записки Горного Института, 2020, 245:539-546.
- [12] Нескоромных В. В. Головченко антон евгеньевич (RU) буровое долото для ударно-вращательного бурения: 2018118680[P]. 2018-05-21.
- [13] Нескоромных В. В. Результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами [J]. Геология и разведка, 1999(6): 115-120.
- [14] Головченко А.Е. Исследования зависимости угла перекоса забоя от эксцентриситета приложения удара [J]. Проблемы геологии и освоения недр, 2018, 2:497-499.
- [15] Опарин В.Н., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин [J]. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2016(6):60-74.
- [16] Тимонин В.В., Карпов В.Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин [J]. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2016, 2(3):172-176.
- [17] Васильев А. Н., Шишляев В. В., Кирильченко А. В. Внедрение ударно-вращательного способа бурения и эффективных методов геолого-промысловых исследований при разведке метаноугольных месторождений [J]. Разведка и охрана недр, 2014(1):45-49.
- [18] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Влияние среды призабойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов, 2021, 332(9):119-127.
- [19] Нескоромных В. В., Попова М. С., Чихоткин А. В. Методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивление среды [J]. Строительство

- нефтяных и газовых скважин на суше и море, 2020(4): 14-17.
- [20] Нескоромных В. В., Попова М. С., Зотов З. Г., et al. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2022, 333(2):81-89.
- [21] Нескоромных В. В., Попова М. С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев [J]. Записки Горного института, 2019, 240: 701-710.
- [22] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом [M]. Красноярск: Для личного использования, 2020.
- [23] Нескоромных В. В., Попова М. С., Харитонов А. Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом [J]. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020, 331(10): 40-48.
- [24] Третьяк А. Я., Попов В. В., Гроссу А. Н., et al. Борисов/инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2017, (8):225-230.
- [25] Кубасов В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матрицы алмазного породоразрушающего инструмента [D]. Москва: ВПО Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 2015.
- [26] Богатырева Г. П. Оценка перспективности структурирования металломатричных алмазных буровых коронок наноалмазами [С]//Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. Киев: Институт надтвердых матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 2011: 97-102.
- [27] Нескоромных В. В., Петенёв П. П., ПНеверов А., et al. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4): 30-40.
- [28] Будюков Ю. Е., Кубасов В. В., Спирин В. И. Характер износа алмазной коронки [С]//Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов X V II научно-технической конференции Тула. Издательство, Инновационные технологии, 2015; 89-92.
- [29] Кубасов В. В. Исследование износа алмазных коронок [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-аналитический журнал), 2015, 4:6-11.
- [30] Третьяк А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [D]. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет, 2017.
- [31] Третьяк А. А. Разработка современных конструкций коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами и технология их использования [D]. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012.
- [32] Третьяк А. А. И др. Буровые коронки армированные алмазно-твердосплавными пластинами [M]. Новочеркасск: Издательство «Политехник», 2015.
- [33] Третьяк А. А. И др. Конструкция буровых коронок армированных алмазно-твердосплавными пластинами с учетом схемы разрушения забоя скважины [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на море и суше, 2015(6): 9-12.
- [34] Кубасов В. В. и др. Новые технологии повышения работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Экономика X X I века. инновации, инвестиции, образование, 2013(5):50-53.
- [35] Третьяк А. А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [M]. Новочеркасск: Издательство Политехник, 2016.
- [36] Нескоромных В. В., Попова М. С. Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований [J]. Инженер нефтяник, 2018(3):18-23.

(编辑 周红军)