

关于提高金刚石钻进效果的试验研究

汤凤林¹, 段隆臣¹, H. B. СОЛОВЬЕВ², Ф. Ф. РУСОВ², 邹庆化¹, 刘晓阳¹

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 俄罗斯莫斯科国立地质勘探学院, 莫斯科 117873)

摘要: 为了提高金刚石钻进的效果, 根据试验研究结果建议从金刚石镀膜、胎体添加稀土元素 2 个方面来提高金刚石钻头的工作能力, 采用以每转进尺为基础的恒钻速钻进方法, 利用泡沫作为冲洗介质的钻进工艺。

关键词: 金刚石镀膜; 恒钻速; 泡沫洗井工艺; 钻进试验效果。

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2002)05-0544-05

作者简介: 汤凤林(1933—), 男, 教授, 博士生导师, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 俄罗斯工程院外籍院士, 主要从事钻探工程方面的教学和科研工作。

地质钻探工程中, 特别是固体矿产勘探中, 金刚石钻探得到了广泛的应用。在市场经济条件下, 如何扩大金刚石钻探的服务领域, 如何提高金刚石的钻进效果, 是非常重要的问题^[1]。对于这个问题, 笔者在中国地质大学钻探实验室和莫斯科地质勘探学院钻探实习基地进行了试验研究。结果表明, 要提高金刚石钻头的工作能力, 首先要解决金刚石的热稳定性和提高胎体的强度问题; 其次是采取比较先进的钻进方法, 即恒钻速钻进方法; 第三是使用有前景的冲洗工艺, 即泡沫洗井钻进工艺。

1 提高金刚石钻头的工作能力

为了提高金刚石钻头的工作能力, 对金刚石进行了镀膜处理, 对钻头胎体添加了稀土元素。

1.1 金刚石镀膜

钻头上的金刚石是破碎岩石的工具, 因此金刚石的强度非常重要。但是金刚石, 特别是人造金刚石(我国主要使用这种金刚石)的热稳定性很差, 即其强度随温度的升高而急剧下降, 而在钻进过程中, 特别是在非正常钻进过程中, 孔底温度是非常高的。因此, 如何提高金刚石的热稳定性是一个非常重要的问题。为此, 笔者进行了金刚石镀膜研究。金刚石镀

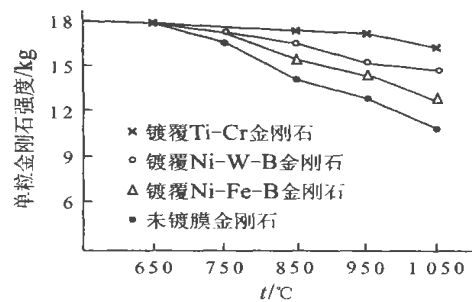


图1 从不同温度烧制品中回收的镀膜与未镀膜金刚石强度对比

Fig. 1 Comparison of strength of metallized diamonds with nonmetallized diamonds from different temperature hot-pressed and sintered diamond products

膜研究是在中国地质大学(武汉)钻探实验室用 2 种方法——化学镀方法和真空镀方法进行的。为了便于对比, 选用了能够形成碳化物的 3 种金属: Fe、W、Ti。由于硼能提高金刚石的热稳定性, 故在化学镀时采用了 Ni-Fe-B 和 Ni-W-B。镀膜 Ti 采用了真空法。把这 3 种金属化的金刚石和未镀膜的金刚石于不同温度下烧结成制品, 然后用王水分解制品, 清洗出金刚石, 对其进行强度测试, 结果示于图 1^[2]。从图 1 可见, 镀覆有 Ti-Cr 的金刚石的热稳定性最好, 镀覆有 Ni-W-B 和 Ni-Fe-B 的金刚石分别次之与再次之, 但都比未镀膜的金刚石好。采用张力环方法测量了胎体对金刚石的包镶能力, 测量结果见表 1^[3]。从表 1 可见, 未镀膜金刚石的胎体平均包

收稿日期: 2002-06-10

基金项目: 武汉市科委国际合作项目(No. 997005137); 国土资源部“九五”重点科研项目(No. 9505402)。

表 1 胎体对不同类型金刚石包镶能力的测量结果

Table 1 Measured results of cohesive ability of matrix materials to diamonds metallized with different elements

种类	未镀膜金刚石制品		镀覆 Ti-Cr 金刚石制品		镀覆 Ni-Fe-B 金刚石制品		镀覆 Ni-W-B 金刚石制品	
	P/kN	σ /MPa	P/kN	σ /MPa	P/kN	σ /MPa	P/kN	σ /MPa
1	2.56	96.7	4.14	156.4	2.17	81.9	2.54	95.8
2	2.25	84.9	4.74	179.1	2.92	110.4	2.89	109.4
3	2.79	105.4	3.71	140.3	2.74	103.6	3.04	114.9
4	2.57	97.3	4.26	160.9	2.89	109.4	2.68	101.3
平均值	2.54	96.1	4.21	159.2	2.68	101.3	2.79	105.4
比率	1.00	1.0	1.657	1.657	1.055	1.065	1.098	1.098

表 2 添加稀土元素铈(Ce)的 Co 基和 Fe 基胎体性能测量结果

Table 2 Measured results of Co-based and Fe-based matrix adding rare earth element Ce

试样号	w(Ce)/%	胎体类别	抗弯强度 均值/MPa	硬度均值/ HRC
37, 38, 39	0.0	Co 基	578	28
40, 41, 42	0.3	Co 基	644	29
31, 32, 33	0.3	Fe 基	710	33

表 3 添加稀土元素镧(La)的 Co 基和 Fe 基金刚石复合材料性能测量结果

Table 3 Measured results of Co-based and Fe-based diamond composites adding rare earth element La

样号	w(La)/%	复合材料类别	抗弯强度 均值/MPa	硬度均值/ HRB
1	0	35% Fe 加镀膜金刚石	301	71
2	0	35% Co 加镀膜金刚石	590.8	89
3	0.3	35% Fe 加镀膜金刚石	591	91

镶能力为 96.1 MPa, 镀覆 Ni-Fe-B 金刚石的胎体包镶能力为 101.3 MPa, 镀覆 Ni-W-B 金刚石的胎体包镶能力为 105.4 MPa, 而镀覆 Ti-Cr 金刚石的胎体包镶能力为 159.2 MPa, 即胎体对镀膜金刚石的包镶能力比未镀膜金刚石的包镶能力分别提高了 6.5%, 9.8% 和 65.7%, 说明镀覆 Ti 的效果是最好的. 这是因为金刚石镀膜减少了氧对金刚石的氧化作用, 增加了金刚石与胎体金属的连接强度, 从而提高了金刚石的热稳定性, 提高了金刚石的碎岩能力. 用真空法镀覆金属 Ti 的金刚石热稳定性最好, 胎体包镶金刚石的能力最强, 说明这种方法是一种非常好、非常有前景的镀膜方法^[4,5].

1.2 提高胎体性能

为了提高胎体(钻头)的性能, 特别是使用性能(硬度、抗弯强度等), 笔者对胎体中添加稀土元素问题进行了探索. 采用掺杂法和共沉淀法, 对胎体添加

稀土元素(镧 La、铈 Ce、钇 Gd 等)进行了试验. 稀土元素添加量较小, 一般不超过胎体金属总量的 1%. 对用上述方法添加稀土元素的胎体和金刚石复合材料制品进行了热压烧结, 测定了有关性能, 测试结果见表 2 和表 3^[6,7]. 从表 2 可知, 与未添加 Ce 的相比, 添加 Ce 的 Co 基纯胎体抗弯强度提高了 11.4%, 添加 Ce 的 Fe 基纯胎体抗弯强度提高了 22.8%, 硬度提高了 17.8%. 从表 3 可见, 添加稀土元素的纯胎体和金刚石复合材料(含金刚石胎体)的抗弯强度和硬度均有所提高. 与未添加 La 的相比, 添加 La(w(La)=0.3%)的 35%Fe 基的金刚石复合材料抗弯强度提高了近 1 倍, 与 35%Co 基相近, 硬度也提高了 28.2%. 可见, 通过添加稀土元素的办法来提高纯胎体和金刚石复合材料的性能非常有效.

在中国地质大学(武汉)钻探实验室进行的钻进花岗岩等 2 种岩石结果表明^[1], 金刚石镀膜、胎体添加稀土元素钻头的钻进速度虽然比金刚石未镀膜、未添加稀土元素钻头提高幅度不大(2%~7%), 但钻头寿命提高了 17%~19%, 每 m 钻探成本降低了 14%~17%. 可见, 试验研究是成功的.

2 恒钻速钻进

恒钻速(每转恒进尺)钻进是钻探工程中近年来提出的一种比较新的概念. 在钻进过程中, 特别是在复杂地层(软硬互层)中钻进时, 采用恒钻速钻进可以减轻司钻的劳动强度, 提高机械钻速、钻头进尺和岩心采取率, 因此值得提倡和推广.

СОЛОВЬЕВ 等^[8]研制的金刚石恒钻速钻进系统如图 2 所示. 钻具下到孔底后, 加压, 确定必要的转速和冲洗液量. 然后, 利用调压阀确定钻头每转的进尺值. 从功率传感器传来的信号, 传到零放大器的入

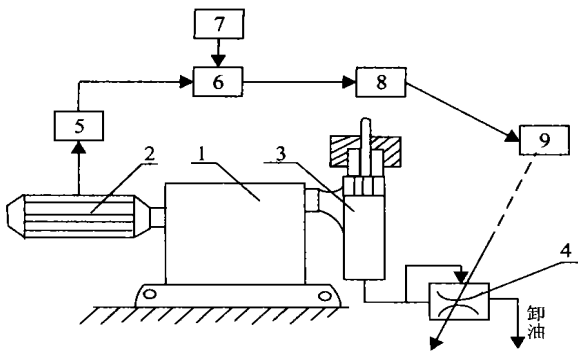


图 2 金刚石钻进恒钻速钻进系统原理

Fig. 2 Principle scheme of constant penetration rate system while diamond drilling

1. 钻机; 2. 电动机; 3. 给进油缸; 4. 调压阀; 5. 功率传感器; 6. 零放大器; 7. 定值器; 8. 控制部件; 9. 伺服电机

口, 用定值器确定功率传感器信号的补偿值, 以使零放大器上产生的信号等于零. 岩石性质和钻头工况发生变化而使孔底产生的岩粉情况发生变化时, 扭矩和功率消耗都发生变化. 例如, 孔底堵钻时钻机功率消耗增加. 信号的变化量, 由功率传感器传到零放大器的第 1 个入口. 这个变化量就是供给零放大器的第 2 个入口的定值器的信号值. 此时, 在零放大器的出口上出现极性为负的信号, 并进入控制部件的入口. 控制部件接通伺服电机, 减小调压阀的通孔面积, 于是减小每转的进尺值, 直到零放大器的入口处的信号等于零为止. 此后, 伺服电机自动关闭. 当由于钻头进尺少而使功率消耗降低时, 由功率传感器传到零放大器第 1 个入口的信号变化值小于供给零放大器的第 2 个入口的定值器的信号值. 此时, 在零放大器的出口上出现极性为正的信号, 控制部件接通伺服电机, 增加调压阀的通孔面积, 于是增加每转的进尺值, 直到零放大器的入口处的信号等于零为止. 此后, 伺服电机自动关闭. 如此类推.

使用这个系统可以在保持最优钻进规程的条件下, 减小对钻进设备和钻头的动载, 因此可以提高机械钻速、钻头进尺, 提高岩心采取率. 本系统已获得了俄罗斯的专利^[8], 专利号为 2026973 PΦ.

3 泡沫洗井钻进工艺

泡沫是气相以气泡形式分散在液体(水)中的分散体系, 其中分散相(气相)的体积分数最高可达 90%. 稳定泡沫是靠泡沫剂(表面活性剂)使气相均

匀地分散在液体(一般为水)中形成的分散体系. 泡沫洗井的特点是: 可用较低的环空上返流速, 只为空气洗井时的 3%~6%; 与液体洗井相比, 可以节约大量的水; 由于泡沫的淤塞作用和泡沫柱的压力低, 可有效地解决漏失地层的钻进问题; 有一定的润滑性能, 有利于保护孔壁和防止钻具振动; 捕集岩粉效果好, 消除了空气洗井钻进时钻场周围粉尘飞扬的问题; 可以预防冻结松散地层因空气吹洗温度升高引起孔壁融化而坍塌的问题. 因此, 引起了人们的关注.

泡沫洗井钻进试验是在莫斯科国立地质勘探学院钻探实习基地试验台(图 3)上进行的.

试验台工作程序如下: 配料泵将泡沫中的表面活性剂溶液从冲洗介质池中抽出并压入排送泵中, 表面活性剂溶液由此被压入增压装置中. 表面活性剂溶液在此与空气混合, 形成泡沫, 通过主动钻杆送到孔底. 带有岩粉的泡沫从孔内出来时, 从三通分配阀来的压缩空气作用到消泡装置上, 由于运动的空气气流在消泡装置中产生压力差而消泡. 岩粉在沉淀池中沉淀, 净化的表面活性剂溶液进入冲洗介质池中. 如此继续.

钻进试验时使用的是 $\phi 59$ 孕镶金刚石钻头, 岩块是花岗岩, 用羟基苯磺酸钠作为表面活性剂. 未装恒给进装置和装有恒给进装置的泡沫洗井钻进试验结果见表 4、表 5. 从表 4、表 5 和图 4 可见, 在装有恒钻速给进装置情况下钻进时, 钻头的磨损量均低于未装恒钻速给进装置钻进时的钻头磨损量. 在装有恒钻速给进装置的情况下, $n = 715 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $h = 0.16 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时, 钻头磨损量最低, 机械钻速最高; $n = 1130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $h = 0.08 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时, 钻头磨损

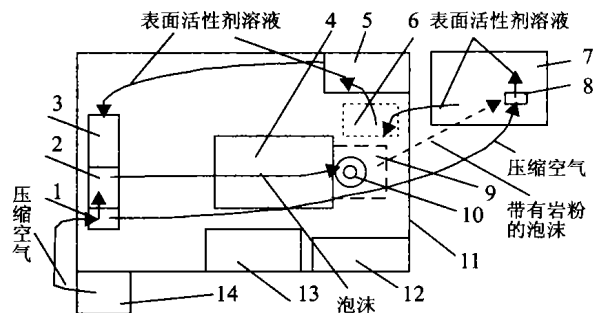


图 3 泡沫洗井钻进试验台

Fig. 3 Drilling experiment stand for flushing with foam

1. 三通分配阀; 2. 增压装置 $\Psi \Delta \text{KH}-4$; 3. 排送泵 $\text{HB}320/63$; 4. 钻机 $\text{CKB}-5$; 5. 配料泵 $\text{HB}160/63\text{Y}3$; 6. 冲洗介质池; 7. 沉淀池; 8. 气动消泡装置; 9. 岩块; 10. 主动钻杆; 11. 钻机房; 12. 配电盘; 13. 钻机(包括液给进装置)控制装置; 14. 空压机

表4 未装恒给进装置的泡沫洗井钻进试验结果

Table 4 Drilling experiment results for flushing with foam and without constant feeder

编号	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$\varphi/\%$	m/g	t/s	$v/(mm \cdot s^{-1})$
1	715	1.4	1.1	185	0.378
	715	1.0	0.15	176	0.398
	715	0.6	0.1	137	0.511
2	1 130	1.4	1.0	78	0.897
	1 130	1.0	0.6	81	0.864
	1 130	0.6	0.2	95	0.737
3	1 500	1.4	0.55	56	1.07
	1 500	1.0	1.2	40	1.50
	1 500	0.6	0.25	49	1.22

n . 钻具转速; φ . 表面活性剂溶液体积分数; m . 钻头绝对磨损量; t . 钻进时间; v . 机械钻速.

表5 装有恒给进装置的泡沫洗井钻进试验结果

Table 5 Drilling experiment results for flushing with foam and constant feeder

编号	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$\varphi/\%$	$h/(mm \cdot r^{-1})$	m/g	t/s	$v/(mm \cdot s^{-1})$
1	715	1.4	0.08	0.30	52	1.35
	715	1.4	0.12	0.22	35	2.00
	715	1.4	0.16	0.15	26	2.70
	715	1.0	0.08	0.25	52	1.35
	715	1.0	0.12	0.20	35	2.00
	715	1.0	0.16	0.10	26	2.70
	715	0.6	0.08	0.60	56	1.35
	715	0.6	0.12	0.15	35	2.00
	715	0.6	0.16	0.10	26	2.70
2	1 130	1.40	0.08	0.25	33	2.12
	1 130	1.40	0.12	0.20	22	3.18
	1 130	1.40	0.16	0.35	17	4.10
	1 130	1.00	0.08	0.15	33	2.12
	1 130	1.00	0.12	0.35	22	3.18
	1 130	1.00	0.16	0.40	17	4.10
	1 130	0.60	0.08	0.25	33	2.12
	1 130	0.60	0.12	0.10	22	3.18
	1 130	0.60	0.16	0.45	17	4.10

h . 钻头每转进尺值,其他参数同表4.

量最低,但机械钻速也最低,钻头磨损量随表面活性剂溶液体积分数变化而变化的规律性不够明显.从表4、表5和图5可见, $n=715 r \cdot \min^{-1}$, $\varphi=0.6\%$ 时,钻头磨损量较低,与每转进尺关系不大; $n=1 130 r \cdot \min^{-1}$ 时,钻头磨损量随表面活性剂溶液体积分数、每转进尺变化而变化的规律性不够明显.从表4、表5和图6可见,钻头磨损量有随钻具转速增加而增大的趋势,但随表面活性剂溶液体积分数的变化而变化的规律性不是线性的.

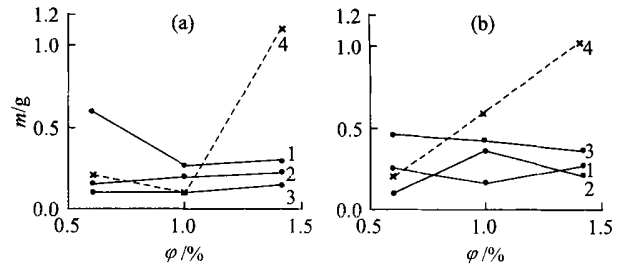


图4 装有恒钻速给进装置和未装恒钻速给进装置条件下,转速为 $715 r \cdot \min^{-1}$ (a)和 $1 130 r \cdot \min^{-1}$ (b)时金刚石钻头磨损量(m)与表面活性剂溶液体积分数(φ)的关系曲线

Fig. 4 Dependence curves of diamond bit wear (m) on volume fraction of surface active agent solution (φ) while rotary speed is $715 r \cdot \min^{-1}$ (a) and $1 130 r \cdot \min^{-1}$ (b) with constant penetration rate feeder and without the latter

1. 每转进尺值 $h=0.08 mm \cdot r^{-1}$; 2. $h=0.12 mm \cdot r^{-1}$; 3. $h=0.16 mm \cdot r^{-1}$; 4. 未装恒钻速给进装置

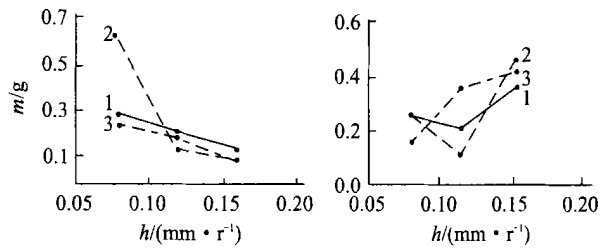


图5 转速 $715 mm \cdot r^{-1}$ (a)和 $1 130 mm \cdot r^{-1}$ (b)时,金刚石钻头磨损量(m)与钻头每转进尺值(h)的关系曲线

Fig. 5 Dependence curves of diamond bit wear (m) on penetration per revolution while rotary speed is $715 mm \cdot r^{-1}$ (a) and $1 130 mm \cdot r^{-1}$ (b)

1. $\varphi=1.4\%$; 2. $\varphi=1.0\%$; 3. $\varphi=0.6\%$

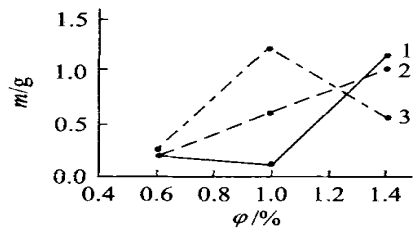


图6 金刚石钻头磨损量(m)与表面活性剂溶液体积分数(φ)的关系曲线

Fig. 6 Dependence curves of diamond bit wear (m) on volume fraction of surface active agent solution (φ)

1. $n=715 r \cdot \min^{-1}$; 2. $n=1 130 r \cdot \min^{-1}$; 3. $n=1 500 r \cdot \min^{-1}$

4 结论

(1) 金刚石镀膜减少了氧对金刚石的氧化作用, 提高了金刚石的热稳定性, 增加了金刚石与胎体金属的连接强度, 提高了金刚石的碎岩能力. 胎体中添加稀土元素可以提高纯胎体和金刚石复合材料的性能. 金刚石镀膜和胎体中添加稀土元素, 可以提高金刚石钻头的碎岩能力. (2) 在金刚石钻进中采用恒钻速装置进行钻探时, 可以减轻钻工的劳动强度, 提高机械钻速, 降低钻头磨损, 提高岩心采取率. (3) 如把机械钻速和钻头磨损量加以综合考虑, 根据试验结果得到的泡沫洗井最优钻进规程参数为: 钻具转速 $n = 715 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、钻头每转进尺 $h = 0.16 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、表面活性剂溶液体积分数 $\varphi = 0.6\%$, 此时的机械钻速 v 为 $2.7 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$. (4) 采用碎岩能力强的钻头, 安装恒钻速给进装置, 确定好最优的钻进规程参数, 就可以大大提高泡沫洗井金刚石钻进时的技术经济指标.

参考文献:

- [1] 汤凤林, 杨凯华, 段隆臣, 等. 提高金刚石碎岩工具工作能力的试验研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(3): 324—328.
TANG F L, YANG K H, DUAN L C, et al. Experimental research to improve work performance of diamond tools for fracturing rock [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 324—328.
- [2] 段隆臣. 新型镀覆金刚石工具的研制[D]. 武汉: 中国地

质大学, 1997.

- DUAN L C. Development of new types of clad diamond tools [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1997.
- [3] 汤凤林, 杨凯华, 段隆臣. 关于金刚石表面金属化(镀膜)的试验研究[J]. 探矿工程, 2000, (5): 14—17.
TANG F L, YANG K H, DUAN L C. Experimental research on surface metallization of diamond [J]. Exploration Engineering, 2000, (5): 14—17.
- [4] ТАН Фуньинь, и др. Экспериментальные исследования металлизированных алмазных породоразрушающих инструментов [J]. Методика и Техника Разведки, 1999, 9—10: 96—111.
- [5] ТАН Фуньинь, и др. Экспериментальные исследования металлизации алмазов [J]. Геология и Разведка, 2000, 5: 14—17.
- [6] 汤凤林, 杨凯华, 段隆臣, 等. 金刚石碎岩工具胎体材料添加稀土元素的试验研究[J]. 探矿工程, 2001, (1): 45—48.
TANG F L, YANG K H, DUAN L C, et al. Experimental research on adding rare earth elements to matrix of diamond tool [J]. Exploration Engineering, 2001, (1): 45—48.
- [7] 邹庆化. 铁基稀土金刚石工具胎体材料[D]. 武汉: 中国地质大学, 1999.
ZOU Q H. Iron-base rare earth matrix materials of diamond tools [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1999.
- [8] Соловьев Н В, и др. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях [M]. Москва: ОАО ВНИИОЭНГ, 1997.

Experimental Research into Increase in Diamond Drilling Effectiveness

TANG Feng-lin¹, DUAN Long-chen¹, Н. В. СОЛОВЬЕВ², Ф. Ф. РУСОВ², ZOU Qing-hua¹, LIU Xiao-yang¹
(1. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Moscow State Geology and Prospecting Academy, Moscow 117873, Russia)

Abstract: In this paper, the diamond metallization and the adding of rare earth elements to the matrix materials are two major methods for the increase in diamond drilling effectiveness, as suggested in authors' experimental research. This increase can be achieved by the application of the drilling at a constant penetration rate based on the footing per cycle. The foam may serve as the flushing medium of the drilling technique.

Key words: diamond metallization; constant penetration rate; drilling technology of foam circulation; drilling experimental effectiveness.