

孕镶金刚石钻头设计和临界钻进规程研究

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, 李 博¹, Нескоромных В. В.³,
段隆臣², Чихоткин В. Ф.²

(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 федеральный университет), 克拉斯诺亚尔斯克(г.Красноярск) 660095, 俄罗斯(Россия))

摘要: 金刚石钻进是一种重要的钻进方法, 在各国得到了广泛利用。金刚石钻头是这种钻进方法的主要碎岩工具。在中等及以上强度岩石中钻进时, 多用孕镶金刚石钻头。一些国家在孕镶金刚石钻头设计中, 考虑了多个岩石性质因素, 取得了好的钻进效果, 值得中国研究者关注。在金刚石钻进工艺中, 提出了使用临界钻进规程的建议。临界钻进规程对保证正常钻进、安全生产、防止事故, 具有重要意义。把好的钻头和好的钻进工艺结合起来, 就可以大幅度提高钻进效率, 为中国的经济建设作出更多的贡献。

关键词: 钻头设计; 孕镶金刚石钻头; 岩石性质因素; 钻进效果; 临界规程

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0058-06

Design of impregnated diamond drill bit and critical drilling parameters

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, LI Bo¹, NESKOROMNYH V. V.³, DUAN Longchen², CHIKHOTKIN V. F.²

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

Abstract: Diamond drilling is an important method of drilling and used widely in various countries. Diamond drill bit is a main tool for fragmentating rock in this method. In some countries in drilling of medium-strength and above-strength rocks impregnated bits are used usually. In designing of the impregnated drill bits many rock character factors are considered and good results have been obtained. That should attract attention of Chinese researchers. In diamond drilling a suggestion of using critical drilling parameters has been put forward. The critical drilling parameters has important significance for normal drilling, safe production and preventing accidents. Combining the good drill bit with the good drilling parameters can increase drilling results substantially and make our more contributions to the performance economic construction of China.

Key words: designing of bit; impregnated diamond drill bit; rock characteristics factors; drilling performance; critical drilling parameters

0 引言

金刚石钻进是一种重要的钻进方法, 在地质钻探中得到了广泛运用, 特别是在中等硬度及以上硬度岩石钻进时更是如此。在这种岩石中多用孕镶

金刚石钻头。中国孕镶金刚石钻头主要是根据岩石可钻性进行设计^[1-5]。近年来, 一些国家的著名钻头公司设计孕镶金刚石钻头开始采用新举措^[6-20], 并提出了使用临界钻进规程的建议, 值得中国研究

收稿日期: 2026-06-22; 修回日期: 2026-07-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.006

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 42272366)

第一作者: 汤凤林, 男, 汉族, 1933年生, 1960年苏联斯维尔德洛夫斯克矿业学院探矿工程专业毕业, 中国地质大学(武汉)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, 湖北省武汉市鲁磨路388号, fttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式: 汤凤林, 赵荣欣, 李博, 等. 孕镶金刚石钻头设计和临界钻进规程研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 58-63.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, LI Bo, et al. Design of impregnated diamond drill bit and critical drilling parameters[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 58-63.

者关注。

1 钻头设计新举措^[6]

以瑞典、美国和俄罗斯有关公司为例来说明设计孕镶金刚石钻头的新举措。

1.1 瑞典

瑞典阿特拉斯·科普柯(Atlas Copco)公司的新举措是对岩石进行分类,对不同类别岩石使用不同类型的金刚石钻头。

第一类岩石包括大颗粒、强裂隙性和强研磨性岩石,如页岩、泥板岩、石灰岩等。建议钻进此类岩石采用胎体硬度最大的 Craelius 和 Hobic 孕镶金刚石钻头。

第二类岩石包括裂隙性、研磨性岩石,如砂岩、白云岩、凝灰岩、硅质页岩等,建议钻进此类岩石采用胎体硬度较低的金刚石钻头。

第三类岩石包括中等研磨性岩石,如安山岩、玄武岩、伟晶花岗岩、辉绿岩、辉长岩等,钻进此类岩石建议采用胎体硬度更低的金刚石钻头。

第四类岩石包括坚硬、弱研磨性岩石,如片麻岩、闪长岩、花岗岩、石英岩、斑岩等。钻进此类岩石建议采用胎体硬度更低的金刚石钻头。

第五类岩石包括非常坚硬、非研磨性岩石,如石英、硅质石灰岩、铁燧岩、褐铁矿、碧玉等。钻进

此类岩石建议采用胎体硬度最小的金刚石钻头。

制造孕镶金刚石钻头,可以使用人造金刚石。制造表镶金刚石钻头,可以使用粒度 30~50 粒/ct (1 ct=0.2 g) 或 20~25 粒/ct 的天然金刚石。粒度大的金刚石用于钻进硬度小的岩石,粒度小的金刚石用于钻进硬度大的岩石。表镶钻头只使用经过处理和抛光的金刚石。

设计的孕镶金刚石钻头,不仅端面部分和水路形状不同,而且胎体高度也不同。例如,Craelius 钻头胎体高度可以是 6.5、9.5、12 和 16 mm。Hobic 钻头胎体高度可以是 6.5、8 和 10 mm。

1.2 美国

美国长年公司(Boart Longyear)设计 Alpha 型钻头见图 1,其设计思路见图 2。

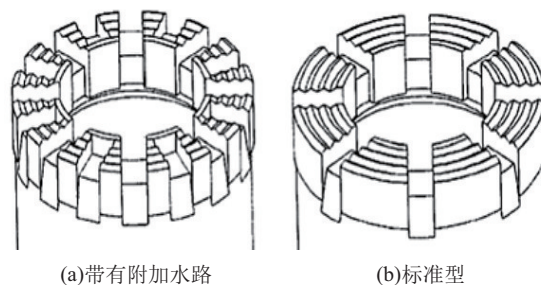


图1 美国长年公司设计的 Alpha 孕镶金刚石钻头唇面

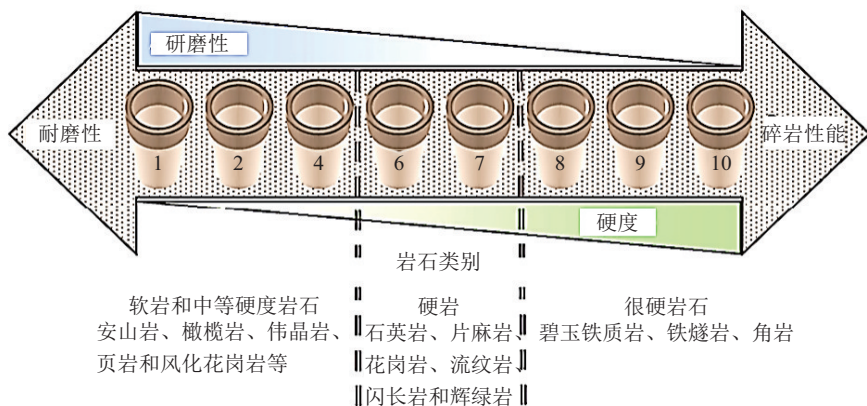


图2 美国长年公司 Alpha 型钻头的设计思路

从图 2 可见,美国长年公司与瑞典阿特拉斯·科普柯公司设计金刚石钻头的思路是类似的,都是基于对岩石按照研磨性、硬度、裂隙性进行分类。根据这种分类的岩石,建议使用不同胎体硬度(耐磨性)和金刚石粒度确定钻头的碎岩性能参数。

图 2 表明,钻头胎体分为 10 类。其中,6~10 类是胎体端面带有附加水路(Express)和高胎体(Extended Crown)的钻头。为了钻进硬岩(同时是研磨性和裂隙性岩石),建议使用 6、7 类胎体钻头。为了钻进很硬岩石,建议使用标准类型的 8、9、10 类

胎体钻头。

美国长年公司 Alpha 型钻头的胎体高度可以达到 9.5、12 甚至 25 mm。胎体高度 12 mm 的 Alpha Extended Crown 钻头,第一批钻头在很硬岩石中钻进时,进尺达到 126~130 m,第二批钻头进尺达到 40~41 m。用这种类型钻头钻进中等硬度岩石时,钻头进尺分别为 400~500 m 和 140~150 m。使用低胎体高度(6.5 和 8.0 mm)和标准高度(9.5 mm)钻头时,不受升降工序数量的影响,甚至钻头外径严重磨损时也是如此。绳索取心钻进时,一般建议使用胎体高度长(12 mm)和非常长(16 和 25 mm)的钻头。

孕镶钻头主要使用 W 型剖面,这种剖面在破碎岩石时可以产生自由面,有利于提高钻头的破碎岩石效果。

在钻进过程中,对于美国长年公司和瑞典阿特拉斯·科普柯公司设计的钻头,都建议使用线性回转速率为 2~5 m/s 的最优钻头转速和保证一定钻

速的轴载。

1.3 俄罗斯^[11]

岩石各向异性是钻探工程中常常遇到的一个问题。岩石各向异性是指岩石不同方向上物理力学性质不同,而且多数沉积岩、变质岩,甚至某些岩浆岩都有这种性质。钻进时,硬度、弹性模量、抗压强度、摩擦系数和弹性波传播速度都不同,引起孔底和孔壁破碎不均匀,影响钻进速度和钻孔质量。俄罗斯西伯利亚联邦大学钻探教研室在美国、瑞典公司设计思想的基础上,除了岩石硬度、研磨性和裂隙性外,还提出了岩石各向异性问题,把各向异性系数 K_V 加上去,丰富了美国公司设计方案,并研发出了端面偏心(偏心距为 e)的金刚石钻头,进行了试验,取得了较好的效果,不仅解决了钻孔弯曲问题,还提高了钻进效率。俄罗斯金刚石钻头设计思路见图 3。

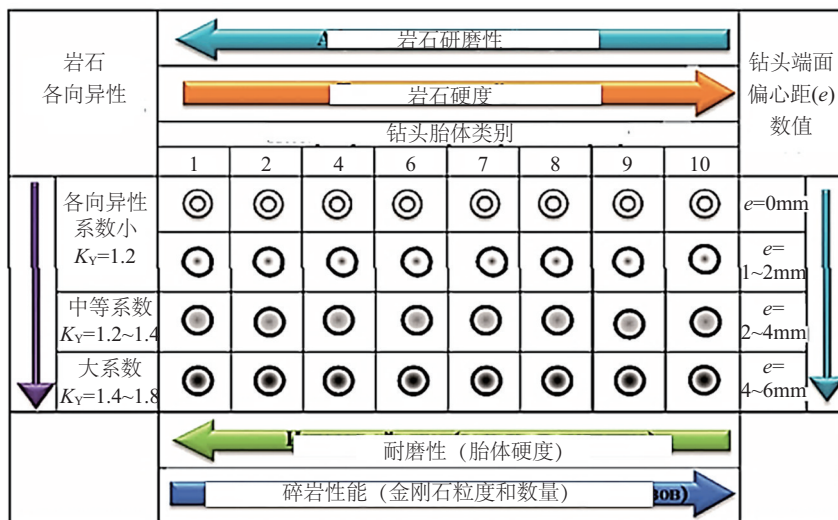


图3 俄罗斯金刚石钻头设计新思路

2 金刚石钻进工艺研究及其临界规程参数的确定

乌克兰科学院超硬材料研究所对金刚石钻进工艺进行了大量试验研究,提出了临界钻进规程的概念。此举具有重要的实际意义,中国过去对此关注、研究不够,建议引起重视。

试验研究是在钻进试验台进行的,使用直径 46 mm 的 BCC 钻头,钻进花岗岩。试验台装有 H-388 型功率表和记录胎体温度的 $\Theta\Pi\Pi$ 电子电位计。所得机械钻速与规程参数关系见表 1。

试验钻进得到的钻头胎体温度与钻进规程关系的资料见表 2 和图 4、图 5。

上述试验说明,钻头胎体温度 T 与轴载 p 和钻头转速 n 的乘积(pn)有关,乘积值见表 3。

钻进功率消耗与规程参数关系见表 4 和图 6。

对上述试验结果的分析研究表明,每一种转速,当其轴载达到一定数值时,钻头胎体温度都发生突变(由 100~200 °C 变到 600~700 °C)(图 4)。每一种轴载,当其转速达到一定数值时,胎体温度也

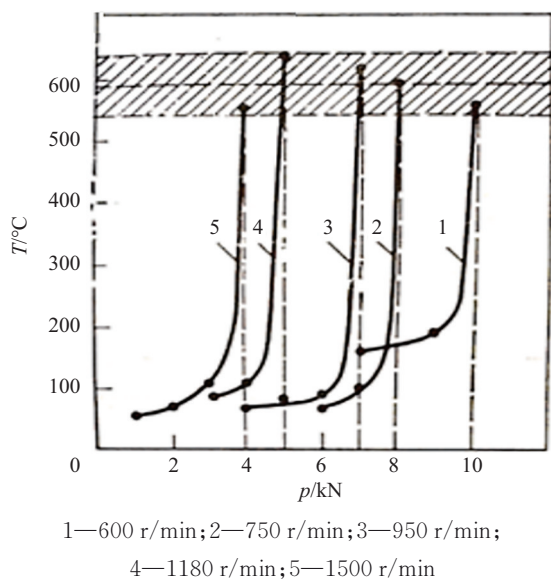
表1 机械钻速(ROP)与规程参数的关系

钻头转速/(r·min ⁻¹)	轴载/kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	机械钻速/(mm·min ⁻¹)									
600						20	25	30	36	40*
750					30	35	37	44.5*		
950				30	32	37	44*	50*	58*	
1180				30	35	45*				
1500	27	35	37	47.5*						

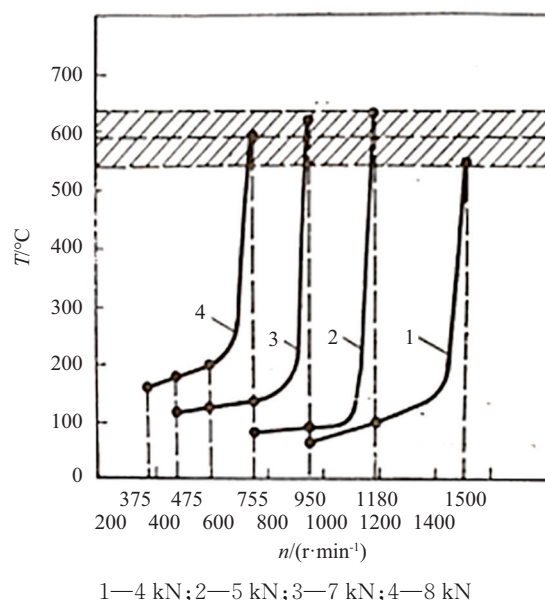
*:规程参数增加时,机械钻速增大值。

表2 钻头胎体温度 T 与钻进规程的关系

钻头转速/(r·min ⁻¹)	轴载/kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	胎体温度/°C									
600					90	160	190	190	560	
750					100	70	100	590		
950				70	80	80	620	650	670	
1180			90	120	640					
1500	50	70	120	550						

图4 不同转速 n 时钻头胎体温度 T 与轴载 p 的关系

发生突变(由100~200℃变到600~700℃)(图5)。此时的规程,即轴载和钻头转速的乘积 pn ,称之为临界规程。这可说明,胎体温度的变化与临界规程有关。对于钻进试验的花岗岩来说, pn 临界值= $(61.1 \pm 3.8) \times 10^2$ kN·r/min。达到临界规程时,再增加冲洗液量已经不起作用,不能解决问题。

图5 不同轴载 p 时钻头胎体温度 T 与钻头转速 n 的关系

正常规程条件下和临界规程条件下,功率消耗和胎体温度的变化情况见图7。

在试验台钻进条件下,还研究了钻头磨损与钻进规程的关系。其结果也是与钻头转速(线性回转速度)和轴载的乘积(pv)有直接关系。虽然钻头磨损皆随此乘积值的增加而增加,但是,临界规程下的钻头磨损值,比正常规程下的钻头磨损值高出多倍,见图8。

3 讨论与建议

(1)目前,中国孕镶金刚石钻头(胎体),主要是根据岩石可钻性进行设计。一些国家近年来提出考虑岩石硬度、研磨性、裂隙度和各向异性等综合因素的不同,根据钻头碎岩性能和耐磨性来设计金刚石钻头,以适应不同的地层,取得了较好的效果,是提高钻进效果的新举措,值得中国研究者关注。建议有关专家和单位予以考虑。例如,按照美国胎体设计方案,钻进安山岩、橄榄岩、伟晶岩、页岩、风化花岗岩及其他风化石等,建议使用1~4类胎体金刚石钻头;钻进石英岩、片麻岩、花岗岩、流纹岩、闪长岩和辉绿岩等,建议使用6~7类胎体金刚石钻头;钻进碧玉铁质岩、铁燧岩、角岩等,建议使用8、9、10类标准胎体金刚石钻头。按照俄罗斯胎体设计方案,钻进各向异性岩石时,建议使用钻头端面偏心距为 $e=1\sim 6$ mm的钻头。

表3 轴载与转速乘积值 pn

钻头转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	轴载/ kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$pn/(\text{kN}\cdot\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$									
600						3600	4200	4800	5400	6000*
750					3750	4500	5250	6000*		
950				3800	4750	5700	6650*			
1180			3540	4720	5900*					
1500	1500	3000	4500	6000*						

*:临界规程的胎体温度值。

表4 钻进功率消耗 N 与钻进规程的关系

单位: kW

钻头转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	轴载/ kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	功率消耗/ kN									
600						1.71	1.86	1.92	2.32	5.34
750					1.80	1.86	2.04	5.67*		
950				1.96	2.31	2.79	5.37*	6.56*	6.91*	
1180			2.16	2.64	5.52*					
1500	0.48	1.41	2.16	5.54*	5.54*					

*:临界规程的钻进功率消耗值。

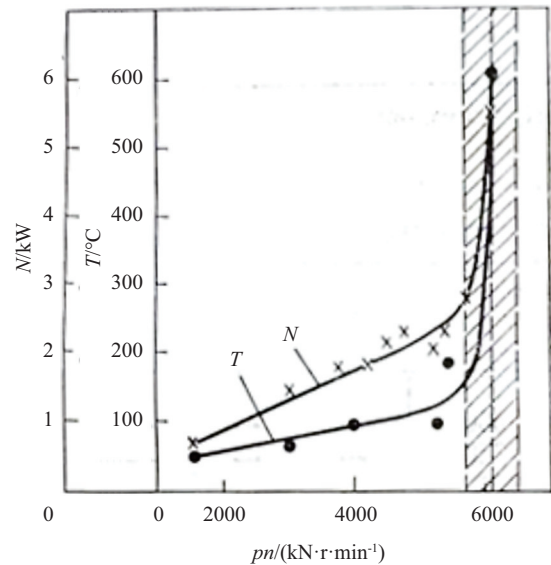
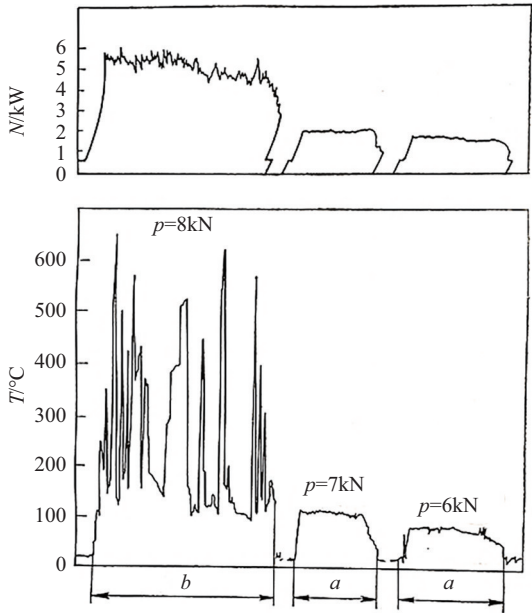


图6 钻头胎体温度 T 、钻进功率消耗 N 与轴载和转速乘积 (pn) 的关系

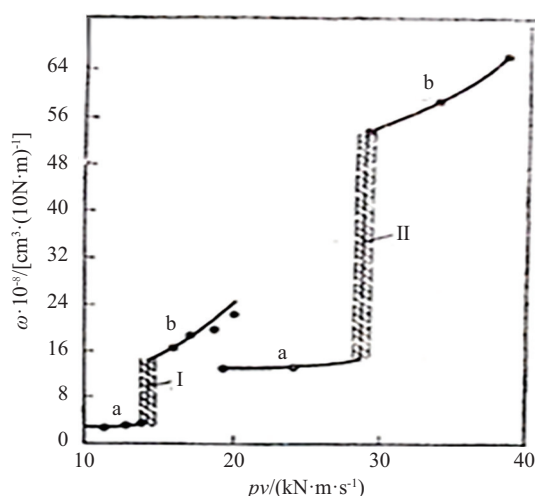
(2)钻进临界规程概念的提出与实践。好钻头要有好的钻进工艺配合才能取得好的钻进效果。一般情况下,机械钻速随着轴载和转速的增加而提高,但是,轴载和转速的增加也有上限,即当其乘积达到一定数值时,胎体温度大幅度升高,钻进功率



a—正常钻进规程;b—临界钻进规程

图7 正常钻进规程和临界钻进规程时功率消耗 N 、胎体温度 T 的变化曲线

大幅度增加,钻头磨损异常,大的冲洗液量已经不起作用,甚至会导致钻进事故。此时的规程,即轴载和钻头转速的乘积 pn 称为临界规程。这个临界



I — 正常规程条件; II — 临界规程条件

图8 正常规程和临界规程条件下钻头磨损 ω 与轴载转速乘积 pv 的关系曲线

规程对于相同的岩石来说是一个定值,例如,对于钻进试验的花岗岩来说, pn 临界值 $= (61.1 \pm 3.8) \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{r}/\text{min}$,有一定范围。因此,为了安全生产、正常钻进,建议避免使用临界规程,即宜使用低于临界规程的正常规程参数。

但是,不是 pn 越小越好,因为机械钻速也随正常规程时 pn 的增加而提高。因此要处理好正常规程下的 pn 的提高与临界规程 pn 的关系,即正常钻进规程下 pn 增加时,机械钻速也提高。因此建议,正常规程下的 pn 值要小于临界规程的 pn 值,但也不能太小,要接近临界规程的 pn 值,以保证有高的机械钻速。

在正常规程条件下的 pn 乘积中,究竟用大轴载 p 、小转速 n ,还是用小轴载 p 、高转速 n ,要视所钻岩石性质而定。钻进高研磨性、低强度岩石,建议使用大轴载、低转速;钻进低研磨性、高强度岩石,则建议使用低轴载、高转速规程,以此类推。

参考文献:

- [1] 汤凤林, А.Г. Калинин, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- [2] 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.
- [3] 段隆臣, 潘秉锁, 方小红. 金刚石工具的设计与制造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Нескоромных В. В., Белов Н. М., Кириков Д. В. Новая

концепция создания алмазного бурового инструмента для геологоразведочного бурения[J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2026(3): 29-34.

- [7] Нескоромных В. В., Белов Н. М., Кириков Д. В. Исследование искривления скважин при бурении алмазными коронками с различной зернистостью алмазов[J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2025(12): 5-11.
- [8] Будюков Ю. Е., Власюк В. И., Спирин В. И. Алмазный породоразрушающий инструмент[M]. Тула: Гриф и К, 2005.
- [9] Нескоромных В. В. Механика разрушения анизотропных горных пород при бурении скважин заданного направления[M]. Геоинформмарк, 1997.
- [10] Нескоромных В. В. Направленное бурение и основы кернометрии[M]. 3-е изд., перераб. и доп. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022.
- [11] Нескоромных В. В. Искривление скважин в анизотропных горных породах[M]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017.
- [12] Петенёв П. Г., Нескоромных В. В., Попова М. С. Опыт и результаты внедрения динамически стабилизирующего инструмента при бурении геологоразведочных скважин комплексами ССК[J]. Разведка и охрана недр, 2022(3): 57-64.
- [13] Karakus M., Perez S. Acoustic emission analysis for rock-bit interactions in impregnated diamond core drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 68: 36-43.
- [14] Tang Jiren, Lu Yiyu, Ge Zhaolong. A new method of combined rock drilling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(1): 1-6.
- [15] Бабаян Э. В., Черненко А. В. Инженерные расчеты при бурении[M]. Инфра-Инженерия, 2016.
- [16] Соловьев Н. В., Чихоткин В. Ф., Богданов Р. К., при. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях[M]. ВНИИОЭНГ, 1997.
- [17] Нескоромных В. В., Петенёв П. Г., Неверов А. Л., и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах[J]. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2015(4): 30-40.
- [18] Кривошеев В. В. Искривление скважин в анизотропных породах[M]. Томск: Издательство научно-технической литературы, 1999.
- [19] Нескоромных В. В., Попова М. С., Лиу Баочанг. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом[M]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020.
- [20] Нескоромных В. В., Кириков Д. В., Петенёв П. Г. Разработка положений методики определения параметров буровых алмазных инструментов с эксцентриситетом вооружения торцевой части для бурения анизотропных горных пород[J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2025(6): 35-39.

(编辑 王文)