

表镶大颗粒人造金刚石钻头受力及水力学数值模拟研究

王 骥^{1,2}, 刘宝昌^{1,2,3}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学复杂条件钻采技术国土资源部重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要:人造大颗粒金刚石技术的不断发展,使得利用其制造表镶金刚石钻头在技术上及经济上均变得可行。本文对 $\varnothing 75$ mm 表镶人造金刚石钻头的受力、流场与温度场进行了数值模拟,结果表明:金刚石颗粒在高钻压无钻井液循环的条件下极易发生碳化;在钻井液冷却作用下,钻头旋转一圈 0.08 s,钻头体会在 0.006 s 之内冷却;同时水力空化作用与钻井液中固相颗粒对钻头体的冲蚀作用明显;金刚石颗粒内存在较大微裂纹时,金刚石会在小于其许用应力条件下发生破坏。通过对比分析,表镶金刚石钻头的最外侧与最内侧水口处的金刚石较易发生破坏,在设计及制造钻头时应进行强化。

关键词:表镶金刚石钻头;人造大颗粒金刚石;数值模拟;钻头设计

中图分类号:P634.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)08-0064-05

Numerical Simulation Study on Force and Hydraulics of Surface Set Large Particle Synthetic Diamond Bit/WANG Su^{1,2}, LIU Bao-chang^{1,2,3} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Lab of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Land and Resources, Changchun Jilin 130026, China; 3. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China)

Abstract: The development of large particle synthetic diamond technology makes it feasible technically and economically to manufacture surface set diamond bit. In this paper, numerical simulation study on the force, flow field and temperature field of $\varnothing 75$ mm surface set synthetic diamond bit were made. The results indicate that diamond particles will be easily carbonized in the conditions of high bit weight and without drilling fluid circulation. With the cooling effect of drilling fluid, bit would get refrigeration in 0.006s during one round of bit rotation in 0.08s. Meanwhile, the erosion effect on bit body by hydraulic cavitation and solid particles in drilling fluid is very obvious. Duo to micro cracks in diamond particles, damage could occur in diamond particles even under the allowable stress. The comparative analysis shows that the diamonds on the outermost and the innermost nozzles of surface set diamond bit are prone to be damaged, so the design and manufacturing of surface set diamond bit should be strengthened.

Key words: surface set diamond bit; large particle synthetic diamond; numerical simulation analysis; design of bits

0 引言

表镶金刚石钻头一般用于可钻性 5~9 级、比较完整的岩石。尤其在钻探设备所能提供的钻压、转速相对较低时,采用表镶金刚石钻头一般可获得比孕镶金刚石钻头更好的钻进效果。合理控制钻进参数,可以有效提高表镶金刚石钻头的寿命。国内曾有一只表镶天然金刚石钻头进尺 609.8 m 的纪录^[1]。在孕镶金刚石钻头没出现以前,表镶金刚石钻头被一些钻探公司用于较难钻进的地层,但因为

其使用天然金刚石作为钻探磨料,故价格较为昂贵。直到 20 世纪中叶,近代科学知识奠定了合成金刚石的理论基础,高压装置的诞生和不断完善又为之提供了必要的手段。在这两个前提下,开始了有实际意义的利用高温高压技术研制金刚石的工作,从而使人造金刚石及钻头技术得以发展^[2]。但由于人造金刚石颗粒细小,故主要用于制造孕镶金刚石钻头。近年来,随着人造金刚石技术的快速发展,人工合成大颗粒金刚石已成为可能。如日本东名金刚石

收稿日期:2016-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目“硬岩钻探用金刚石复合片的仿生结构设计及强韧化机理”(编号:41572357)

作者简介:王骥,男,汉族,1990年生,硕士研究生,从事金刚石复合材料及钻头方面的研究,吉林省长春市西民主大街938号,690023117@qq.com。

通讯作者:刘宝昌,男,汉族,1975年生,副教授,地质工程专业,博士,从事岩土钻凿机具与材料方面的研究,吉林省长春市西民主大街938号,liube@jlu.edu.cn。

株式会社、日本爱媛大学,国内河南黄河旋风股份有限公司与中南金刚石公司已经可以制造出宝石级的大颗粒金刚石,且具有优良的力学性能^[3-5]。人造大颗粒金刚石技术的不断发展,使得利用人造大颗粒金刚石制造表镶钻头在技术上及经济上均变得可行。根据钻进机理,表镶金刚石钻头在钻进过程中容易使岩石产生体积破碎,产生的岩粉颗粒的最大粒径与钻头的出刃基本相同,岩粉粒径为金刚石出刃高度的1/2~1/3的颗粒占大部分^[6-7]。因此在可钻性合适的岩层中,表镶金刚石钻头可比孕镶金刚石钻头具有更高的钻进效率,可节约钻进时间、降低钻进成本。

本文采用有限元数值模拟方法,对人造金刚石表镶钻头的孔底流场及受力情况进行分析研究,以期为人造金刚石表镶钻头的合理设计及使用提供参考。

1 表镶金刚石钻头的设计

表镶金刚石钻头的主要设计参数包括:唇面形状、胎体性能、金刚石品级、金刚石粒度、金刚石的排列、水路设计^[2]。作为本文研究对象的表镶金刚石取心钻头,其外径为75 mm、内径为50 mm,底唇面为平底型,胎体硬度选择为中硬,采用直径为2 mm的近球形大颗粒人造金刚石,金刚石在钻头底唇面的出刃高度为0.4 mm,金刚石在底唇面上的排列形式为放射状,钻头水口宽5 mm、深5 mm,共8个水口。其具体形状如图1所示。

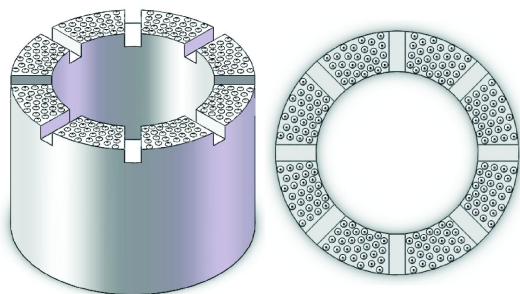


图1 075 mm 表镶金刚石钻头结构示意图

2 钻头体的数值模拟

2.1 钻头开始钻进时的温度分析

在无钻井液循环时,计算金刚石颗粒所升高的温度值。取金刚石的密度为 3.5 g/cm^3 。金刚石的比热容随温度上升而增加,如在 $-106 \text{ }^\circ\text{C}$ 时为 $399.84 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$, $107 \text{ }^\circ\text{C}$ 时为 $472.27 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ 。为简化计算,取比热容为 $450 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ 。

取最外侧金刚石颗粒所承受的压强为 $2 \times 10^7 \text{ Pa}$ ^[7]。取金刚石与岩石(假设细粒花岗岩)的摩擦系数为0.3(未破碎岩石)^[7-9]。

单颗粒金刚石的底面积为:

$$S = \pi r^2 = 10^{-6} \pi \quad (1)$$

单颗粒金刚石的体积为:

$$V = hS \quad (2)$$

单颗粒金刚石的质量为:

$$m = \rho V \quad (3)$$

单颗粒最外侧金刚石所受压力为:

$$F = PS = 2 \times 10^7 S \quad (4)$$

单颗粒最外侧金刚石旋转一圈所获得的能量为:

$$E = \mu F s \quad (5)$$

单颗粒最外侧金刚石旋转一圈获得的温度为:

$$T = \frac{E}{mC} \quad (6)$$

式中: r ——金刚石的等效粒径,m; h ——金刚石颗粒出刃高度,m; ρ ——金刚石的密度, kg/m^3 ; P ——最外侧金刚石颗粒所承受压强,Pa; μ ——金刚石与岩石间的摩擦系数; s ——最外侧金刚石旋转一圈的路程,m; C ——金刚石的平均比热容, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

将已知数据代入以上各式,得到无钻井液循环时金刚石颗粒约升高温度 $808 \text{ }^\circ\text{C}$ 。人造金刚石在空气中开始氧化温度大约为 $740 \sim 840 \text{ }^\circ\text{C}$,有的产品在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右就能氧化。在空气中,开始燃烧温度大约为 $850 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于钻孔内地温梯度的影响,假设钻头初始温度为 $127 \text{ }^\circ\text{C}$ (地温梯度较大)^[7],那么在钻头旋转一圈时,其最外侧温度将升高至 $927 \text{ }^\circ\text{C}$ (约为 1200 K)。在此温度下金刚石颗粒将失效,因此必须使用钻井液对钻头进行冷却。

在岩心没有进入岩心管内,且有钻井液循环的条件下,建立钻头流体通道,假设其通道直径 79 mm (考虑在实际钻进过程中钻头的扩径作用)^[7]。对钻头附近的流体区域进行建模及网格划分,如图2所示。

用Fluent动网格方法,设定流体材料为纯水,钻井液采用正循环方式流动。使用非定常流对模型进行分析。钻杆柱中间液体流速为 0.6 m/s ,钻杆与孔壁间隙设定为压力出口。设定钻头的初始温度为 $1200 \text{ K}(927 \text{ }^\circ\text{C})$,钻井液温度为 $300 \text{ K}(27 \text{ }^\circ\text{C})$ 。钻头体与钻井液接触部分采用运动墙壁,其转速为 400 r/min 。设定所需模拟时间为 0.016 s ,步长为 0.0001 s ,每步迭代次数为100次。设定好参数后,模

拟得出钻头胎体的温度随时间的变化如图3所示。

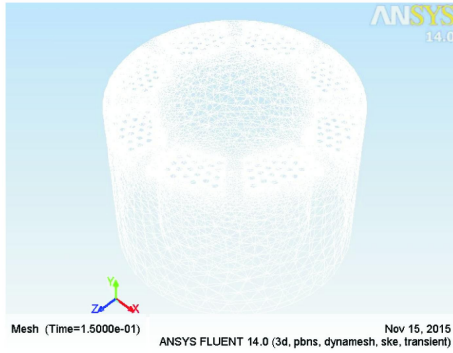


图2 钻头附近流体区域的网格划分

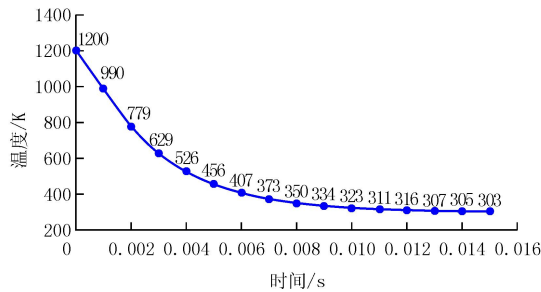


图3 钻头胎体最高温度随时间变化曲线

由图3可知,钻头在0.006 s的时间内急速冷却,而钻头旋转一周的时间约为0.08 s。可见,在有钻井液循环的情况下,钻头(及金刚石)完全可以快速冷却到烧钻的温度以下。

2.2 钻井液流量对携粉及对金刚石的影响

假设采用BW-250型泵,流量为70 L/min,此时泵压最大为7 MPa^[10]。设计钻进深度为500 m时,计算钻井液的沿程阻力损失^[11]。

钻井液通过钻杆中心通道到达孔底时,钻井液流速计算可得0.6 m/s。假设钻杆内部为存在一定划痕的金属表面,其粗糙度为 $\Delta=0.1$ mm^[12]。

雷诺数^[11]为:

$$Re = \frac{vd}{\mu} = \frac{0.6 \times 0.05}{1 \times 10^{-5}} = 3000 \quad (7)$$

因此钻井液在钻杆内的流动可看作是紊流状态。沿程阻力系数由尼古拉兹公式^[11]计算:

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{2lgr}{\Delta} + 1.74\right)^2} = 0.34 \quad (8)$$

沿程阻力损失为^[11]:

$$h_{f_1} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{g} = 124.9 \text{ m} = 1.249 \text{ MPa} \quad (9)$$

式中: l ——钻杆总长度, m; d ——钻杆内径, m;

v ——钻井液在中心通道中的流速, m/s; g ——重力加速度, m/s²; Δ ——管内粗糙度, m。

将孔壁与钻杆外表面看作是未加工的金属表面,其粗糙度约为 $\Delta=0.6$ mm^[12]。钻井液在环间隙上返流速,经计算约为2.41 m/s。同样可以算出上返的沿程阻力损失约为 $h_{f_2}=5.72$ MPa。因此水力总损失约为6.97 MPa, BW-250型泵可满足在此流量下正常工作。

在钻井液上返过程中,计算是否可以有效携带岩粉上返。金刚石颗粒在钻头底面的出刃量为0.4 mm时,产生的岩粉粒径为0.15 mm的约占 $C_w=50\%$ 。等效粒径 $0.07 \text{ mm} < d_k \leq 0.15 \text{ mm}$ 时,选用B. C. 科诺罗兹公式^[10],其临界流速为:

$$v_k = 0.255 \frac{\gamma - 1}{1.7} (1 + 2.48 \sqrt[3]{C_w} \sqrt[4]{D_k}) = 0.619 \text{ m/s} \quad (10)$$

式中: γ ——重度,取2.85 N/m³; D_k ——临界管径(环形的水力直径,为内径与外径之和),取0.154 m; C_w ——重量稠度, mPa·s。

使用流量为70 L/min泵量时,钻井液上返流速约为2.41 m/s,大于临界流速,因此钻井液流速满足上返岩粉的需要。

为了观察钻头体附近流场细节,在Fluent中,采用定常流的模型,流体采用速度入口 $v=0.6$ m/s,压力出口(假定为大气压),得到钻头体附近速度矢量云图如图4所示。

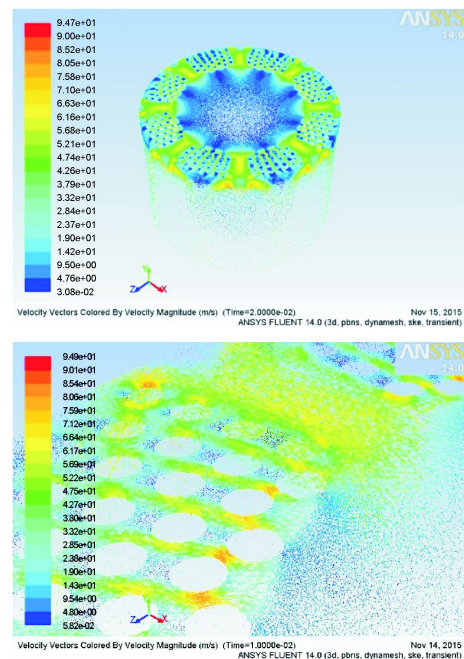


图4 钻头体附近流体速度矢量图

由速度矢量图发现,在最内侧的金刚石附近、外侧金刚石以及水口附近钻井液的流速较大。为此,进一步利用 Fluent 软件模拟钻井液流动对钻头体的冲蚀作用。

在高速流体流动过程中遇几何形状突变容易发生空化现象^[13]。空化现象本身容易损伤金属表面。对钻头流体进行混合流模拟,出入口分别设置 0 体积的水蒸气,进行模拟^[14-15]。其结果如图 5 所示。在钻头水口的出口处,靠近最外侧的金刚石处产生水力空化现象,水蒸气的最大体积百分数为 1.18%;钻头体附近其余部分钻井液未产生空化现象。

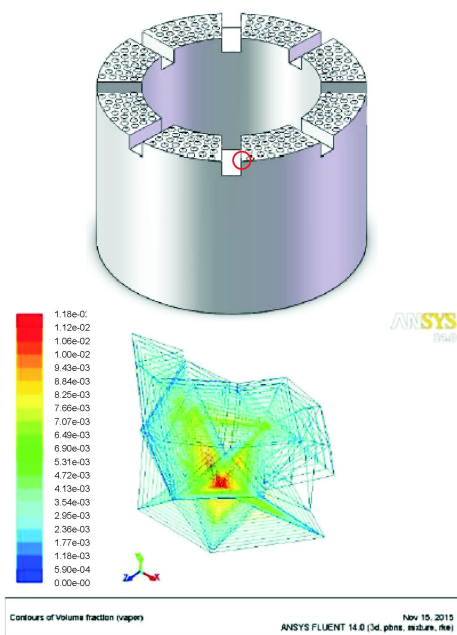


图 5 钻头水口附近钻井液空化现象
(下图所示流体区域位于上图红色圆圈部分)

为了模拟岩粉颗粒对钻头的冲蚀作用,在钻井液中加入固相颗粒^[14-15],其颗粒直径为 0.15 mm,固体颗粒质量流量为 1 kg/s。颗粒的初始速度设定为 0.6 m/s,其速度大小和钻井液的初始速度相同。追踪其中 5000 个颗粒,如图 6 所示,颗粒在水口边缘处的金刚石周围分布较多,说明固体颗粒对水口边缘金刚石的作用较多,固体颗粒冲击(腐蚀钻头率)最大为 0.177 kg/(m²s),在水口处的固体颗粒的冲蚀作用较为严重。

2.3 钻压对钻头及金刚石的影响

由于井底情况复杂与钻头加工精度的限制,为了防止金刚石钻头在刚下钻的过程中发生碎裂,表镶金刚石钻头在下钻的过程中应采用逐渐加压的方

式^[16]。假设在 0~10 s 的范围内对钻头施加 1~10 kN 的压力,同时扭矩大小为 700 N·m^[16]。其最大压力与最小压力随时间的变化如图 7 所示。由于施压设定为线性,钻头体本身的压力变化也呈线性变化。

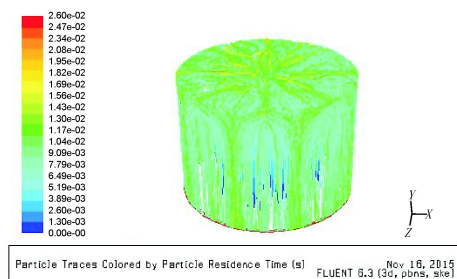


图 6 固相颗粒在钻头流体区域的分布情况

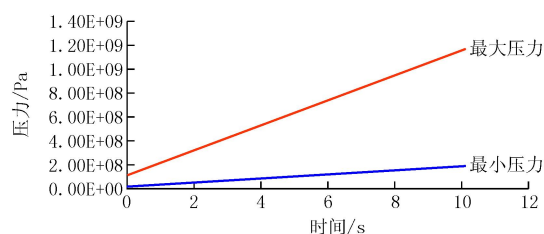


图 7 加压过程中钻头体最大与最小压力变化曲线

在 10 s 的时候钻头上的压力云图如图 8,可见最外侧靠近水口处的金刚石其压力最大。

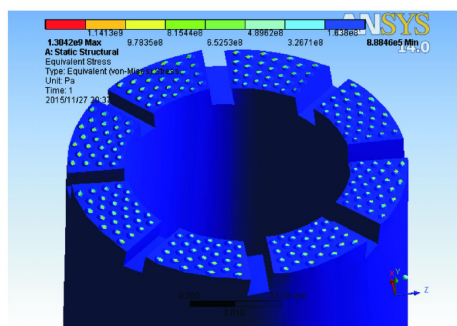


图 8 金刚石钻头受力情况

由图 8 可明显看出,虽然钻头底面的金刚石理论上处于一个平面上,但是其最外侧的金刚石的受力大于其内侧金刚石的受力。同时,在相同的钻头转速下,外侧金刚石的行程要大于内侧金刚石,因此外侧的金刚石更易磨损。最外侧金刚石颗粒与岩石最先接触部分其应力值最大,约为 1304 MPa,小于金刚石的理论破坏应力 8680 MPa^[2]。因此,在金刚石颗粒完整的状态下,上述条件下不会发生破坏。

材料本身通常不是完整的,往往存在着内部缺陷及微裂纹^[17]。假设出刃的金刚石中部有三维的微裂纹(不是半无限大体),将出刃金刚石简化为圆

柱体(如图9所示),且认为应力与应变关系为线弹性。其中单颗粒金刚石的平均应力由以上模拟可知约为 $\sigma = 1.8 \times 10^8 \text{ Pa}$, $\tau = 1.1 \times 10^8 \text{ Pa}$,裂纹及金刚石的相关几何参数如下: $a = 0.045 \text{ mm}$, $H_1 = 0.2 \text{ mm}$, $H = 0.4 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ mm}$ 。利用 ANSYS 计算裂纹附近的应力强度因子 K_I , K_{II} , K_{III} 。

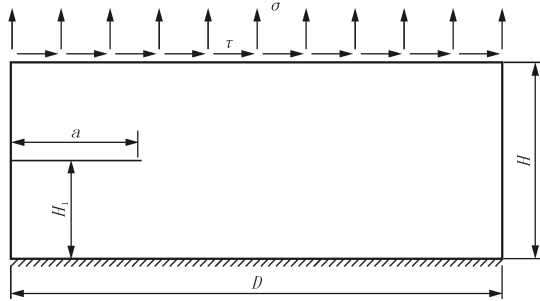


图9 金刚石颗粒采用的裂纹模型

输出的结果 $K_I = 0.5 \times 10^7$ 、 $K_{II} = 2.1 \times 10^5$ 、 $K_{III} = 0.31 \times 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

应力强度因子与最大许用应力关系式^[17]:

$$K_i = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (11)$$

式中: $i = I, II, III$; σ ——最大许用应力, Pa; a ——裂纹长度, m。

则最大许用应力大约为 $4.2 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

如图10所示在尖端处其受力最大为 $6.63 \times 10^8 \text{ Pa}$, 大于含有单个微裂纹的金刚石许用应力, 因此金刚石在此应力状态下将会发生碎裂。

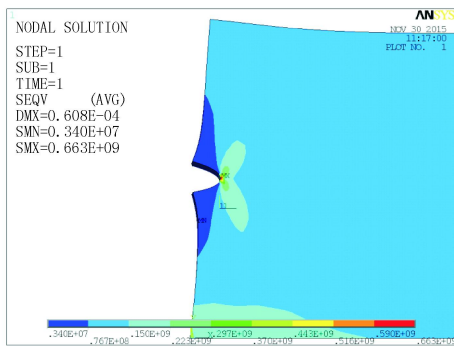


图10 裂纹尖端受力大小

再次利用式(11), 在尖端受力大小为 $6.63 \times 10^8 \text{ Pa}$ 时, 裂纹长度最大值为 0.018 mm 。因此当单个裂纹长度 $< 0.018 \text{ mm}$, 且在金刚石颗粒中部位置时, 金刚石颗粒不会发生碎裂。

3 结论

通过对 $\varnothing 75 \text{ mm}$ 人造表镶金刚石钻头进行水力

学与受力分析, 得出以下结论。

(1) 在没有钻井液的情况下, 表镶金刚石会瞬间碳化, 难以再进行使用。钻井液可以很好地起到冷却效果。

(2) 在高速钻井液的冲蚀下, 最内侧的金刚石和水口边缘处的金刚石处于最危险的状态。钻头胎体容易在冲蚀作用与水力空化作用下损坏。在地质岩心钻探中使用表镶金刚石钻头应注意对钻井液的固相控制。因此要对水口处与内侧的金刚石进行定期检查。

(3) 在高钻压的作用下, 最外侧的金刚石处于高应力状态下, 其切削岩石的行程也最长, 因此应注意最外侧金刚石的磨损情况。在使用表镶金刚石钻头时应注意防止钻头受冲击载荷的作用, 导致单颗粒金刚石表面产生较大裂纹, 从而导致金刚石颗粒碎裂, 进而影响整个钻头的寿命。

参考文献:

- [1] 陈廷凯. 一只天然表镶金刚石钻头进尺609.8米[J]. 探矿工程, 1980, (3): 64.
- [2] 张祖培, 刘宝昌. 碎岩工程学[M]. 吉林长春: 吉林大学出版社, 2004: 95-115.
- [3] 河南黄河旋风股份有限公司[J]. 超硬材料工程, 2015, (1): 2.
- [4] 中南金刚石公司研制成功大颗粒高品级金刚石[J]. 工具技术, 2006, (12): 98.
- [5] 化信. 日本合成全球最硬金刚石直径超1cm[J]. 化工新型材料, 2011, (1): 130.
- [6] 耿瑞伦. 关于表镶金刚石钻头的非正常变形及防止办法[J]. 探矿工程, 1978, (6): 74-78.
- [7] A. A. 布加涅夫. 人造金刚石在地质勘探钻探中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 65-216.
- [8] 秦超. PDC钻头多相流场模拟及应用研究[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2014.
- [9] 蒋大权, 张世良, 林中村. 大学物理简明教程[M]. 北京: 北京出版社, 1991: 78-91.
- [10] 樊洪海. 实用钻井流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 231-271.
- [11] 林建忠, 阮晓东, 陈邦国. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 215-255.
- [12] 秦大同, 谢里阳, 等. 机械设计手册(第一卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 281-294.
- [13] 汤凤林, 段隆臣, 等. 关于金刚石钻进时冲洗液气蚀的试验研究——金刚石钻进技术专题之二[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(7): 37-40.
- [14] 许京荆. Ansys13.0 work bench 数值模拟技术[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2012: 30-35.
- [15] 韩占忠. FLUENT-流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 168-294.
- [16] 邓裕荣. 表镶金刚石钻头钻压计算问题的探讨[J]. 地质与勘探, 1980, (12): 70-73.
- [17] 王士升. 断裂力学[M]. 吉林长春: 吉林大学出版社, 1994: 1-30.