

# 兰陵铁矿小口径定向钻进PDC钻头设计与应用

黄建强<sup>1</sup>, 张云龙<sup>1</sup>, 黄宝胜<sup>1</sup>, 冯超臣<sup>1</sup>, 杜焱森<sup>2,3</sup>, 张恒春<sup>2,3</sup>, 董向宇<sup>2,3\*</sup>

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队(山东省第七地质矿产勘察院), 山东临沂 276000;  
2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 3. 中国地质调查局定向钻井技术创新中心, 河北廊坊 065000)

**摘要:**小口径定向钻进是解决高精度控矿勘探钻进的重要技术。针对兰陵铁矿中硬岩石薄软互层小口径定向钻进施工碎岩PDC钻头广谱适应性问题,通过对钻头的冠部形状、刀翼布置、PDC切削齿镶焊角度、钻头水力结构及钻头胎体等几个方面的优化设计,研制了 $\varnothing 98$  mm定向钻进PDC钻头。经过中等硬度以上非均质地层3个定向钻进应用验证,PDC钻头在抗冲击破坏、耐磨性、钻头寿命等方面取得了满意的效果,达到高效碎岩、连续稳定定向钻进的目的,为小口径定向钻进PDC钻头的设计及制造提供了一个有效解决方案。

**关键词:**小口径钻探;定向钻进;PDC钻头;刀翼;兰陵铁矿

**中图分类号:**P634.4 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2024)S1-0313-05

## Design and application of small-diameter directional drilling PDC bit in Lanling iron ore

HUANG Jianqiang<sup>1</sup>, ZHANG Yunlong<sup>1</sup>, HUANG Baosheng<sup>1</sup>, FENG Chaochen<sup>1</sup>,

DU Yaosen<sup>2,3</sup>, ZHANG Hengchun<sup>2,3</sup>, DONG Xiangyu<sup>2,3\*</sup>

(1. *The Seventh Geological Brigade of Shandong Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Linyi Shandong 276002, China (Shandong Provincial Seventh Institute of Geology and Mineral Exploration),*

*Linyi Shandong 276000, China;*

*2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

*3. Technology Innovation Center for Directional Drilling, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China)*

**Abstract:** The small-diameter directional drilling is an important technology to solve the problem of high-precision ore-controlled exploration and drilling. In view of the broad-spectrum adaptability of the PDC bit in small-diameter directional drilling construction for the hard rock with thin and soft interbed in the Lanling iron ore area, through the optimization design of the crown shape of the drill bit, the blade arrangement, the PDC cutting tooth inlay welding angle, the hydraulic structure of the drill bit and the drill bit carcass, the  $\varnothing 98$  mm directional drilling PDC bit was developed. After the application verification of three directional drilling holes in heterogeneous strata above medium hardness, the PDC drill bits have achieved satisfactory results in impact damage resistance, wear resistance, service life, etc., achieving the goal of efficient rock crushing and continuous and stable directional drilling, which provides an effective solution for the design and manufacture of small-diameter directional drilling PDC bits.

**Key words:** small-diameter drilling; directional drilling; PDC bit; blades; Lanling iron mine

## 0 引言

钻头性能的好坏直接影响着钻探的综合成孔

效率和钻探成本<sup>[1]</sup>。小口径定向钻进PDC钻头,具有钻头体尺寸小,结构比较复杂,外形轮廓度要求

收稿日期:2024-05-20; 修回日期:2024-06-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.049

第一作者:黄建强,男,汉族,1978年生,工程师,探矿工程专业,从事地质钻探工作,山东省临沂市兰山区蒙山大道97号,1025199455@qq.com。

通信作者:董向宇,男,汉族,1970年生,正高级工程师,探矿工程专业,从事水文水井钻探、岩心钻探、非开挖技术等工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,13932678511@163.com。

引用格式:黄建强,张云龙,黄宝胜,等.兰陵铁矿小口径定向钻进PDC钻头设计与应用[J].钻探工程,2024,51(S1):313-317.

HUANG Jianqiang, ZHANG Yunlong, HUANG Baosheng, et al. Design and application of small-diameter directional drilling PDC bit in Lanling iron ore[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):313-317.

高,复合片排布位置、保径槽受钻头空间尺寸的影响大等特点,设计一种高效碎岩钻头,需要仔细的对钻头进行结构规划。笔者结合施工区域岩石性质,设计了小口径定向钻进用长寿命PDC钻头,有效解决了铁矿区小口径控向钻进碎岩问题。

## 1 PDC钻头设计

PDC钻头就是以聚晶金刚石复合片为碎岩刀具的切削型钻头<sup>[2]</sup>。钻头的结构围绕着钻头的冠部轮廓、切削齿排布、钻头水力结构3个主要方面进行设计<sup>[3-4]</sup>。

### 1.1 钻头冠部形状及刀翼结构设计

岩石是各向异性、裂纹丛生、软硬交错的非均质体<sup>[5]</sup>。岩石物理性质是决定钻头设计的基本因素<sup>[6]</sup>,石灰岩、砂岩、页岩等由不同的矿物和结构组成<sup>[7]</sup>,对扭矩、钻速、钻压的变动有不同的反应。对于小口径定向钻进PDC钻头而言,存在与破碎岩石的适应性问题。兰陵铁矿区钻遇的岩石以灰岩、泥灰岩、石英砂岩、黑云变粒岩为主,具有比较坚硬且磨蚀性高的特点<sup>[8]</sup>,PDC钻头的刀翼结构和冠部轮廓,需要具有设计针对性。

Ø98 mm小口径定向钻进PDC钻头冠部形状设计为浅锥面平底轮廓,平抛面型,钻头与岩石的接触面基本为平面。本着径向力平衡,主刀翼和辅助刀翼对称型布置,四刀翼螺旋形状展布,见图1。钻头结构与定向钻进的需要相适应,对钻孔的孔壁方向岩石的破碎能力强,在定向造斜工况易形成新的轨迹线,造斜钻进不打滑。同时钻头在碎岩运动过程中跳动、摆动等不稳定运动工况少,适宜在小钻压条件下具有钻进的稳定性,钻头耐用性较高。

### 1.2 切削齿工作角度设计

钻头结构设计时最主要的设计参数为金刚石复合片的切削角,切削角选择是否合理直接影响着

钻头的钻进效率<sup>[9-10]</sup>。Ø98 mm PDC钻头以负刃前角剪切方式碎岩,镶焊金刚石复合片规格为Ø16 mm×10 mm,按等破岩体积原则,同轨中等密度布齿,钻头冠顶和侧翼的切削齿布置适当加密,增加刀翼间切削片在圆周向的重叠区域,增强PDC钻头对非均质地层损坏的抵抗能力。针对兰陵铁矿钻遇地层为较坚硬的岩石,且岩石硬度跨度较大,均一性差,工作齿镶焊采用非均一倾角的线路,对于主刀翼的金刚石复合片,采取的是后倾角15°、18°、20°,侧倾角8°、12°、15°的镶焊角度。对于辅刀翼的金刚石复合片采取的是后倾角12°、15°,侧倾角8°、12°镶焊,如图2所示。

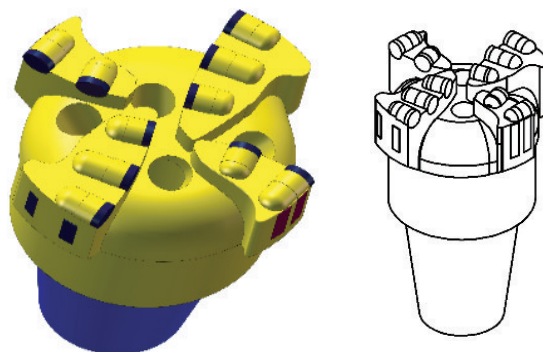


图2 Ø98 mm PDC钻头切削齿布置示意

### 1.3 钻头水力结构设计

钻头切削刀具的清洁是影响钻头使用效果和使用寿命的重要因素之一,因此钻头水力结构设计是PDC钻头设计的重要环节,通过定位喷嘴和设计流道来调整冲洗液的流动分布,达到清洗和冷却钻头切削齿的目的<sup>[11-12]</sup>。排屑槽的深度一方面可使喷嘴射流反射到钻头体的能量大大降低,另一方面使钻头表面的过流面积增大,使喷嘴射流在冲击孔底后给周围漫流的阻力明显降低,射流能量衰减较快,减轻射流对钻头基体的冲蚀<sup>[13]</sup>。

Ø98 mm钻头采用了宽大且深19 mm的螺旋排屑槽,提高钻头的水力清洗和冷却作用。钻头设计了4个Ø15 mm的水孔,采用轴对称倾斜布置,分布在辅助刀翼的中心线上,方位角分别为65°、157°、243°和337°朝向钻头外缘,且与钻头的中心轴线呈20°喷射角。水孔的射流避开主刀翼,指向排屑槽,减少水力能量对切削齿和刀翼钻头体的冲蚀。

小口径定向钻进最大泵压为7 MPa,冲洗液含

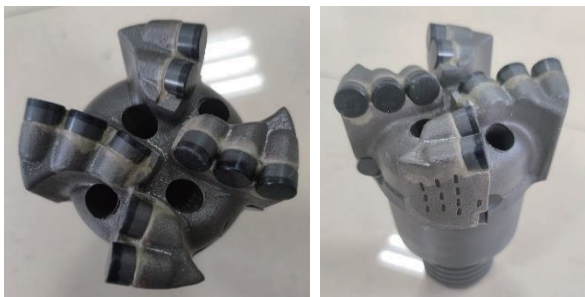


图1 四刀翼平底PDC钻头

砂量 $<0.2\%$ ,密度在 $1.03\text{ g/cm}^3$ 左右,钻头喷嘴喷射距离最小为 $3\text{ mm}$ , $<3\text{ mm}$ 泵压过高,无法开泵和钻进,在 $3\sim 10\text{ mm}$ 之间时钻头基体存在一定程度冲蚀,当喷射距 $>10\text{ mm}$ 时,射流对钻头基体基本已无冲蚀。

## 2 金刚石复合片的选择

PDC钻头的理想运动工况是绕钻柱中轴线转动,并且沿着这个轴线基本匀速的向下攻进,形成螺旋线式运动<sup>[13]</sup>。PDC钻头的钻速为 $N(\text{r/min})$ ,其向下攻进的速度为 $V(\text{m/h})$ ,则切削齿的转动角

速度为 $\omega=(2\pi N)/60$ ,钻头每旋转1周,向下攻进距离与钻头攻进速度的关系为 $\delta=100V/60N$ 。金刚石复合片的磨损对钻进有着根本的影响<sup>[14]</sup>。

针对兰陵铁矿区钻遇砂岩、泥灰岩、黑云变粒岩地层, $\text{O}98\text{ mm}$  PDC定向钻头选用了 $\text{O}16\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的复合片,抗冲击韧性及耐磨性方面具有地层适配性,岩石物性与复合片参数见表1所示。岩石的抗压强度及石英含量与复合片的磨损程度正相关,当磨损面增大后,需要增加钻压,才能维持平均钻速。复合片磨损速度与切削正压力成正比,与切削线速度成正比。

表1 岩石物性与复合片参数

项 目	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ / GPa	泊松比 $\mu$	平均抗压强度/ MPa	平均抗剪切强 度/MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	粘聚力/ MPa
金刚石复合片	3.56	850	0.07				
灰岩、泥灰岩	2.64	32.5	0.3	148	12	44.5	27.5
石英砂岩	2.46	24.5	0.25	111.3	21.4	44.3	27.2
黑云变粒岩	2.68	53	0.25	107.2	9.3	44.6	45

金刚石复合片采用氢气、氩气混合气体保护高频感应钎焊<sup>[15]</sup>,钎焊缝的剪切强度 $>160\text{ MPa}$ 。

## 3 钻头胎体

刀翼型PDC钻头在钻进过程中施加的钻压集中在刀翼上,在钻压和扭矩的共同作用下,为了保证刀翼稳定可靠的工作(不会断裂),对钻头胎体的综合强度提出了更高的要求,PDC钻头结构不同、刀翼的长短差异,对钻头胎体的性能要求也不同,钻头胎体的性能是钻头结构设计的基础保证,因此钻头胎体质量成为制约钻头寿命的重要因素<sup>[15]</sup>。根据兰陵铁矿区地层和钻探的要求, $\text{O}98\text{ mm}$  PDC钻头采用的是全保径胎体钻头形式。胎体采用成型碳化钨耐磨合金胎体,以碳化钨粉和铁粉作为骨架材料,提高胎体的硬度和耐磨性能,碳化钨的含量为 $20\%\sim 45\%$ ,铁粉 $5\%\sim 30\%$ ;铜锡合金粉末 $29\%\sim 33\%$ ,具有粘结成分的作用;镍和钴为 $14\%\sim 18\%$ ,提高胎体的耐磨性和韧性;锰为 $3\%$ ,提升胎体的部分力学性能。采用粉末冶金烧结工艺制造,钻头胎体表面硬度高,具有较高的抗研磨性、抗冲击性和抗流体冲蚀能力。

## 4 应用验证

山东省兰陵县古林-兰陵矿区小寨子-古林段铁矿勘探转采工程,区内地层顺序由老至新分别为:新太古界泰山岩群山草峪组、新元古界土门群、古生界长清群及新生界第四系,赋矿地层埋深 $550\sim 800\text{ m}$ ,均隐伏于沉积盖层之下。盖层自上而下为页岩段、灰岩段和砂岩段3个岩性段及少量的灰色泥岩及砂砾岩层。砂岩段以灰、浅灰色含海绿石石英砂岩为主, $\text{SiO}_2$ 含量达 $95\%$ 以上。矿区内基底地层呈单倾构造,倾向北东,局部南倾,倾角较陡,在 $85^{\circ}\sim 89^{\circ}$ 。钻遇地层产状陡,构造复杂,在进行小口径绳索取心钻探的过程中,采用小口径定向钻探技术,以达到高精度控矿勘探的目的。

ZK801孔设计为顶角 $7^{\circ}$ 、方位角 $120^{\circ}$ 的小口径地质勘探孔,设计钻孔轴线深度 $1100\text{ m}$ ,矿层顶板埋深约 $800\text{ m}$ 。由于该区域地层倾角大,地层造斜能力极强,钻至孔深 $520\text{ m}$ 时,钻孔顶角已经降至 $3.38^{\circ}$ ,方位增至 $150^{\circ}$ ,钻孔偏离设计轴线,且有继续发展的趋势,钻孔轨迹偏离设计勘探线要求。

ZK801孔主孔采用绳索取心工艺钻进,一开口径 $150\text{ mm}$ ,二开口径 $98.5\text{ mm}$ 。针对钻孔口径小、钻具强度低、纠斜轨迹“狗腿”度不能过大的特殊要求,经过积极开展技术攻关,反复测量钻孔轨迹,采

取大曲率半径纠斜的方式,进行钻孔轨迹调整。控向钻进采用的是 $\varnothing 98$  mm口径,于孔深725 m处稳

住钻孔的孔斜和方位,钻孔轨迹如图3所示。

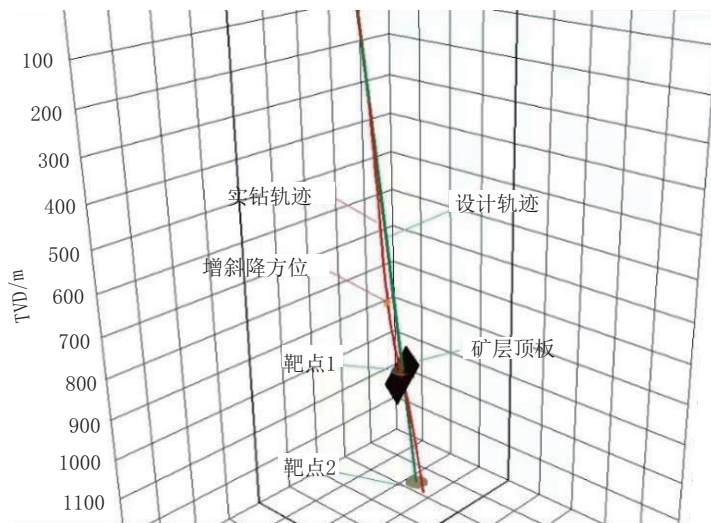


图3 ZK801钻孔轨迹

钻进操作参数直接影响到PDC钻头的使用效果。钻压和转速是相互关联的参数,它们又与钻头的工作载荷和功率相联系。设计的定向钻进小口

径PDC钻头分别在ZK801、ZK803、ZK804三个钻孔进行了应用验证,钻进参数见表2。

表2 钻头验证应用数据

孔号	钻进孔段/ m	地层	进尺/ m	纯钻时间/ h	机械钻速/ ( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )	钻压/ kN	转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	泵压/ MPa	排量/ ( $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )
ZK801	656~715	石英砂岩	68.86	77.3	0.89	2500	152	6	2.62
ZK803	435~468	灰岩	32.15	28.2	1.14	2300	160	6.5	2.67
ZK804	726~782	黑云变粒岩	55.33	75.7	0.73	2500	157	6.3	2.65

$\varnothing 98$  mm小口径定向钻进PDC钻头在兰陵铁矿区中硬以上含薄夹软层地层定向钻进工作中得到了成功应用验证,3个入孔的PDC钻头均未达到失效状况,钻头的应用效果理想,见图4。

## 5 结论

(1)研制的小口径定向钻进PDC钻头具有中等硬度以上非均质地层适应性。抗冲击性、全保径碳化钨耐磨合金胎体的强耐磨性以及钻头的使用寿命等方面获得满意效果。

(2)PDC钻头平底结构和底唇外缘的小弧度形状对造斜稳斜钻进均具有比较理想的适应性,对孔壁侧向剋取岩石能力强,造斜时不打滑。

(3)研制的小口径定向钻进PDC钻头在兰陵铁



图4 提出钻孔的PDC钻头

矿区3个定向钻探孔中进行了应用验证,获得较高的机械钻速,达到高效碎岩,连续稳定控向钻进的目的,为小口径定向钻进PDC钻头的设计及制造提

供了一个有效解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 赵旭. PDC钻头的应用现状与发展前景[J]. 工程技术, 2016(2): 46-48.
- [2] 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.
- [3] 汤凤林, 赵荣欣, Чихоткин В. Ф., 等. 关于PDC钻头设计的分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 15-22.
- [4] Kong C K, Liang Z L, Zhang D Z, et al. Study on geometry and kinematics of spherical single-roller PDC bit[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(12): 1.
- [5] Zhang C, Yang Y, Qi Q, et al. Research on numerical drilling technology of mesh-like cutting PDC bit[J]. Energy Reports, 2021, 7: 2068-2080.
- [6] 黄蕾蕾, 薛启龙. 国外钻头技术新进展[J]. 石油机械, 2010(4): 73-76.
- [7] 刘伟吉, 阳飞龙, 祝效华, 等. 异形PDC齿切削破岩提速机理研究[J]. 中国机械工程, 2022(17): 2133-2141.
- [8] Xiong C, Huang Z, Yang R, et al. Comparative analysis cutting characteristics of stinger PDC cutter and conventional PDC cutter(Article)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 106792.
- [9] 唐胜利, 曹小军, 高欣, 等. PDC切削齿后倾角与破岩关系的数值模拟[J]. 煤炭技术, 2019(4): 154-157.
- [10] 高科, 孙阳, 刘婧, 等. 石灰岩地层PDC钻头仿生PDC齿工作角优化试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(11): 70-73.
- [11] 潘军, 王敏生, 光新军. PDC钻头新进展及发展思考[J]. 石油机械, 2016, 44(11): 5-13.
- [12] 思娜, 王敏生, 李婧, 等. PDC钻头新技术及发展趋势分析[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(2): 1-7.
- [13] 王传留, 金新, 高晓亮, 等. 硬岩PDC定向钻头优化设计及其表面增材技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 157-164.
- [14] 聂孟杰, 裴黄崑, 黄成志, 等. PDC性能优化及其钎焊技术研究现状[J]. 电焊机, 2023, 53(4): 63-72.
- [15] 李清. ONYX360旋转PDC切削齿钻头技术及其应用[J]. 石油和化工设备, 2017(7): 61-66.

(编辑 王文)