

高温硬岩空气潜孔锤钻头设计

罗宏保, 李俊萍, 吴金生

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:干热岩试验性开发井钻井施工,在高温硬岩的地层条件下,如何实现高效钻进仍存在很多技术难点。空气潜孔锤钻进技术是解决硬岩地层钻进的有效方法之一,潜孔锤钻头是空气潜孔锤钻进的关键器具。根据青海共和干热岩GH-01井空气潜孔锤钻进技术应用情况,分析探讨了空气潜孔锤钻头断齿、掉齿、磨损严重、使用寿命短等问题,从钻头结构设计、钻头材料选取、钻头冷压固齿工艺等几个方面对空气潜孔锤钻头进行了优化。固齿优化过程中采用有限元分析方法,对钻头冷压固齿过盈量进行仿真分析计算,根据分析计算结果确定最优固齿过盈量。通过对潜孔锤钻头结构、材料、加工等优化,为适用于高温硬岩的空气潜孔锤钻头研制提供了借鉴。为提高空气潜孔锤钻进综合效率,为干热岩钻探开发提供了技术支持和技术储备。

关键词:干热岩;试验性开发井;高温硬岩;潜孔锤钻头;仿真分析;钻头结构;固齿工艺

中图分类号:P634.4+1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)04-0060-06

Development of the air DTH hammer drilling bit for high temperature hard rock

LUO Hongbao, LI Junping, WU Jinsheng

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Experimental hot dry rock development wells are drilled under high-temperature and hard rock formation conditions where there are still many technical difficulties in how to achieve efficient drilling. Air DTH hammer drilling technology is one of the effective methods to solve the problems with drilling in hard rock formations. The DTH hammer bit is the key tool for air drilling. Through the application of air DTH hammer drilling technology in the hot dry rock well GH-01 in Gonghe of Qinghai, the paper analyzes and discusses the problems of broken teeth, severe wear and short service life of the air DTH hammer bits. The air DTH hammer drill bit was optimized from several aspects, such as drill bit structure design, drill bit processing material selection, and drill bit cold pressing and tooth fitting technology. The finite element analysis method was used in the optimization process of tooth fitting to simulate and calculate the interference of the cold-pressing tooth fitting process, and according to the results of analysis and calculation, the optimal interference of tooth fitting was determined. The optimized structure, materials, and processing of the DTH hammer bit can provide some reference for the development of air DTH hammer bits suitable for drilling high-temperature hard rock, improve the comprehensive drilling efficiency of air DTH hammer drilling, and provides technical support and reserve for the development of hot dry rock.

Key words: hot dry rock; experimental development well; high temperature hard rock; DTH hammer bit; simulation analysis; bit structure; tooth fitting technology

收稿日期:2020-07-24; 修回日期:2021-01-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.04.008

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“青海共和盆地干热岩调查评价与勘查示范(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20201104)

作者简介:罗宏保,男,汉族,1981年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,从事探矿工程技术研究工作,四川省成都市郫都区红光镇现代工业港(北区)港华路139号,luohb_cgiet@163.com。

引用格式:罗宏保,李俊萍,吴金生.高温硬岩空气潜孔锤钻头设计[J].钻探工程,2021,48(4):60-65.

LUO Hongbao, LI Junping, WU Jinsheng. Development of the air DTH hammer drilling bit for high temperature hard rock[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):60-65.

0 引言

目前我国干热岩开发仍处于试验性阶段,干热岩的开发应用是一项涉及多个方面的工程,其中干热岩钻井施工效率是评价干热岩开发经济性的一个非常重要的因素^[1-2]。干热岩地层温度高、岩石致密坚硬,在这样的地层条件下如何实现高效钻井仍存在很多技术难点^[3-4],比如全井采用常规回转钻进工艺,钻进进尺较慢,不能满足勘探开发要求^[5]。根据不同井深地层环境,现在一般采用多工艺钻进施工,而在干热岩钻井部分钻井段根据干热岩地层特性,发挥空气潜孔锤钻进技术优势,是解决硬岩地层钻进进尺速度慢的有效方法之一^[6-8]。

青海共和干热岩 GH-01 井在二开阶段井深 1508~2256 m 段采用空气潜孔锤钻进,纯钻时间内平均机械钻速达 4.49 m/h,较回转钻进钻速提高 2~3 倍。实践证明,空气潜孔锤钻进技术在硬岩地层可大幅度提高钻井效率,但是由于空气潜孔锤钻头在高温硬岩条件下短时间内磨损严重,易出现钻头掉齿、断齿情况(如图 1 所示),无法保证井眼尺寸,而且小井眼还会导致其它钻进问题的出现致使无法正常钻进^[9]。实际施工中就需要重新更换钻头,花费大量时间进行修孔,消耗的油料、时间成本较高,综合钻进效率较低^[10-11]。



图1 GH-01井空气潜孔锤钻头磨损情况

Fig.1 Wear situation of the air DTH hammer bit used in GH-01

空气潜孔锤钻进技术已经发展了几十年^[12],潜孔锤钻头无论是规格型号还是结构设计上都是相对比较成熟的产品,但是鉴于在青海共和干热岩 GH-01 井应用情况,需要进行空气潜孔锤钻头优化,对其优化主要从结构设计、钻头材料选型、固齿工艺等几个方面来进行,研制适用于高温硬岩的空

气潜孔锤钻头,提高空气潜孔锤钻进综合效率,为干热岩勘探开发提供技术支持和技术储备^[13-14]。

1 钻头结构优化设计

针对青海共和干热岩 GH-01 井使用空气潜孔锤钻进出现的问题对钻头结构进行针对性优化。从青海共和干热岩 GH-01 井潜孔锤钻头磨损情况可以看出,边齿基本全部脱落或断裂,但中齿磨损较少。经过分析认为:钻头体磨损较快,导致边齿外露是边齿脱落的重要原因之一,而边齿脱落又会使得钻头上单个硬质合金齿承受的冲击功增大,造成钻头中间断齿。因此首先在钻头体保径方面进行优化设计,增强钻头体的保径能力。保径设计是采取在边齿附近镶嵌硬质合金的方式,并且增加保径硬质合金齿颗粒数。通过保径硬质合金齿延缓钻头体在高温硬岩中的磨损,从而延缓边齿的脱落,保证钻孔孔径满足要求。

钻头结构优化的另一个方面是风路设计,风路设计关系到钻头钻进排渣的效果,排渣不畅会导致岩屑在钻头周围不断地磨损钻头。根据选用的新型冲击器的密闭气流系统,在风路优化上创新了外部吹渣排风孔设计。高速气流不再是从锤柄的中心孔进入孔底排渣,而是从锤柄侧面的气孔进入,这样的设计气流更加直接地进入孔底,排渣效果更好,并且原先的空心锤柄设计变为实心锤柄,提高了钻头锤柄的强度,而潜孔锤钻头钻进过程中常见的事故就是锤柄断裂^[15]。

通过对空气潜孔锤钻头保径和风路 2 个方面进行优化设计(参见图 2),可延长钻头的使用寿命。

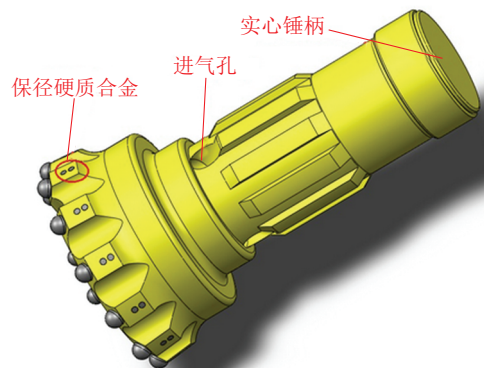


图2 钻头结构优化设计

Fig.2 Optimized design of the bit structure

2 钻头材料优化选型

空气潜孔锤钻头加工材料是钻头使用寿命保证的最基本要素,主要包括钻头体加工合金钢和硬质合金。

潜孔锤钻头刚体材料选择的原则^[16]:

- (1)坚韧耐磨,具有良好的刚性和韧性配合;
- (2)加工工艺性能良好。易切削,退火后硬度不大于HB260,但也不宜过软,以免粘刀影响粗糙度,同时可淬性和淬透性要好。

目前常用的钻头体合金钢是35CrMo材料,该材料能够满足钻头在硬度较低的基岩中的钻进需求且成本相对较低,但是无法满足在高温高硬的花岗岩中钻进的需求,因此我们选用了机械属性更好的30NiCrMo16-6材料,2种材料的属性对比如表1所示。

表1 2种钻头体材料属性对比
Table 1 Comparison of two material properties of bit body

材料	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	硬度/ HB
30NiCrMo16-6	1000	900	330
35CrMo	610	425	187~269

硬质合金质量是钻头质量最重要的保证条件之一。对硬质合金的基本要求是:抗冲击,耐磨损。其选用原则为:硬质合金的性能必须与岩石和冲击器、钻机类型相适应^[16]。对于硬质合金的选择,根据青海共和干热岩GH-01井空气潜孔锤钻头磨损情况,针对高温硬岩地层特点,我们对硬质合金进行了优化选型,选择硬度、抗弯强度和冲击韧性更好的硬质合金,所选择的硬质合金硬度达到HRA89.5~90.5、抗弯强度 ≥ 2800 MPa、耐温 ≥ 800 °C。

3 钻头冷压固齿工艺

钻头失效形式最主要的是硬质合金齿磨损、破碎、脱落,这除了与钻头钻进过程中服役条件恶劣有关外,还与钻头固齿工艺有很大的关系。目前我国球齿钻头的固齿工艺主要有冷压、钎焊、热嵌3种方法。不论采用何种固齿工艺,都必须保证钻头在使用过程中不掉齿,这是球齿钻头的关键问题,因此对钻头的固齿工艺进行研究非常重要^[17]。

目前潜孔锤钻头的固齿工艺采用较多的是冷压固齿,冷压固齿属于压配合固齿,其固齿力是由硬质合金齿、固齿孔之间的过盈量引起齿孔壁钢体产生的弹塑性变形提供的。冷压固齿的工艺流程:固齿孔钻孔机加工—钻头体热处理—固齿孔铰孔—测孔径—硬质合金磨齿—压齿。整个冷压固齿流程中要注意以下几点:

(1)固齿孔的钻、铰中应尽量提高加工精度和孔壁表面光洁度,以提高对合金齿的固紧力。根据硬度不同的材料,分为先钻孔后热处理再铰孔和先热处理后再钻孔、铰孔2种加工方式。

(2)测孔径使用浮标式气动量仪测孔,精度达到0.001 mm(微米)级别,并做好相应的数据记录统计和每个孔的标注工作。数据记录统计是为后续硬质合金磨齿做准备,标注每个孔是为压齿做准备。

(3)磨齿根据测孔统计的数据加上确定的过盈量后在液压磨床上从大到小逐级磨齿,精度达到0.001 mm(微米)级别。硬质合金齿磨完后需用柴油对合金齿进行清洗。

(4)压齿时一定要尽量保证压头、硬质合金齿、齿孔三者的中心线重合。

在注意以上几点的基础上,固齿过盈量大小的选择则是冷压固齿的关键^[18-19],过盈量过小,提供的固紧力小,钻头工作过程中容易引起硬质合金齿的脱落;过盈量过大,固齿困难且易引起硬质合金齿破碎或者钻头体孔壁开裂。为了确定硬质合金齿和齿孔间的最佳过盈量,我们采用有限元仿真分析的方法对冷压固齿过程进行模拟。通过建立有限元模型,仿真计算得到不同过盈量在压齿过程中的关键参数,为冷压固齿提供指导^[20]。

3.1 模型建立和网格划分

如图3所示的潜孔锤钻头三维模型,在不影响分析结果的基础上为了减少计算量,通过对三维模型简化得到单个硬质合金齿压齿过程的二维模型,模型采用二维轴对称模拟^[21-22]。有限元网格划分在ANSYS Workbench平台实现,网格划分工具为ANSYS Meshing 2019R3。图4为二维有限元模型网格图划分。

3.2 边界条件设置

钻头体模型采用双线性各向同性硬化弹塑性本构,根据钻头体30NiCrMo16-6材料属性,设置参

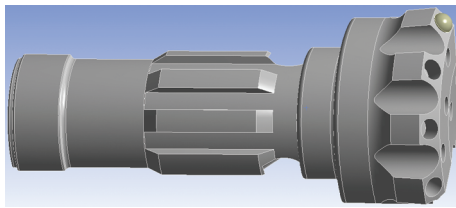


图3 潜孔锤钻头三维模型

Fig.3 3D model of the DTH hammer bit

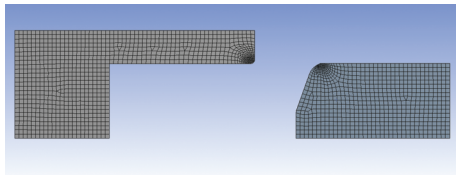


图4 二维有限元模型网格图划分

Fig.4 2D FEM model of the drill teeth and hole

数为:密度 7800 kg/m³、弹性模量 210 GPa、泊松比 0.3。根据硬质合金材料属性,设置参数为:密度 15000 kg/m³、弹性模量 600 GPa、泊松比 0.22。

仿真模拟分析硬质合金齿过盈压入和拔出过程,具体边界条件(参见图5)如下:

(1)钻头体左侧采用Fixed固定约束。

(2)硬质合金齿右端夹持段采用位移边界条件,整个过程分2步,第一步沿水平方向向左压入钻头体齿孔,第二步沿水平方向向右拔出硬质合金齿。加载的位移值如表2所示。

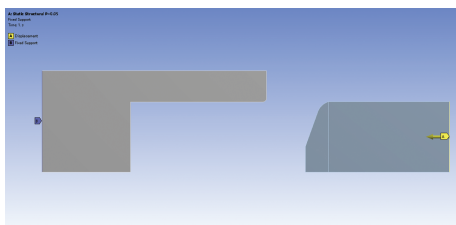


图5 边界条件

Fig.5 Boundary condition

表2 各工况边界条件加载

Table 2 Boundary condition loading under various working conditions

加载时间步	Y向位移/mm
0	0
1	22.5
2	0

为了模拟不同过盈量的影响,选取0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 mm 5种不同过盈量进行分析。利用ANSYS接触设置中的过盈量设置功能,实现不同过盈量的添加。具体接触和过盈量设置见图6,图中红色线代表的是接触面,蓝色线代表的是目标面,接触摩擦系数设置为0.1。

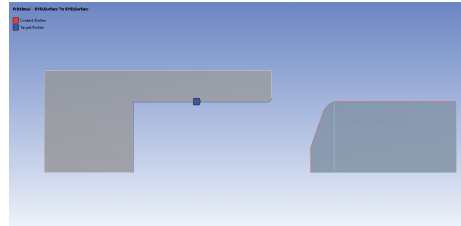


图6 接触示意图及接触设置

Fig.6 Contact diagram and contact setting

3.3 计算结果分析

计算得到硬质合金齿不同过盈量压入和拔出过程中钻头体和合金齿的等效应力云图如图7、图8所示。

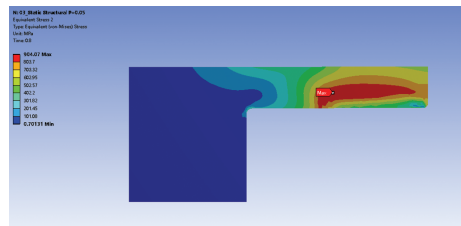


图7 压入过程等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress cloud map of the pressing process

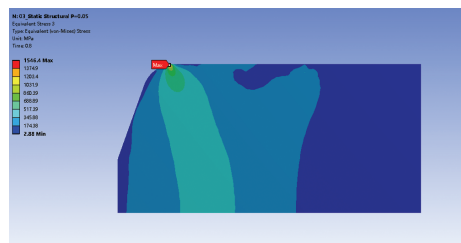


图8 拔出过程等效应力云图

Fig.8 Equivalent stress cloud map of the pullout process

将硬质合金不同过盈量压入和拔出过程中所需外力变化曲线图,通过拟合形成外力对比图,如图9、图10所示。

根据仿真模拟分析计算结果,我们得出以下结论:压齿过程中最大压入力随着过盈量的增大而增

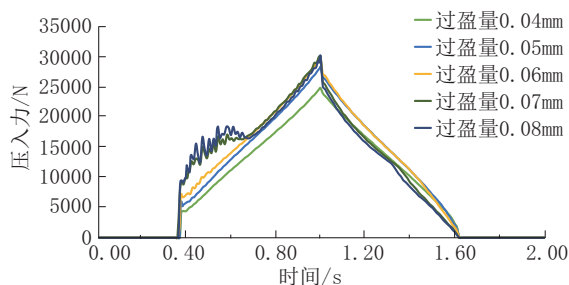


图9 不同过盈量压入力对比

Fig.9 Comparison of press forces at different interferences

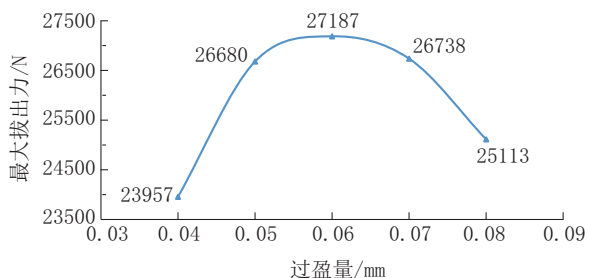


图10 不同过盈量最大拔出力变化

Fig.10 Comparison of pullout forces at different interference

大,过盈量达到0.07 mm时,压入力增大放缓,0.08 mm过盈量压入力与0.07 mm过盈量压入力接近;拔出过程中最大拔出力随着过盈量的增大而呈现出先增大后减小的趋势,在过盈量为0.06 mm时,初始拔出力最大,达到了27187 N。

因此,通过钻头固齿有限元仿真分析计算,我们得到了理论计算上冷压固齿的最佳过盈量,为后续钻头试制的固齿工艺提供了技术指导和支持。

4 结语

针对青海共和干热岩GH-01井空气潜孔锤钻进技术应用中钻头磨损较快、掉齿、断齿的问题,从结构设计、材料选型、固齿工艺等几个方面对空气潜孔锤钻头进行了优化。结构上增强保径设计,延缓了钻头体磨损速度;创新排渣风路的设计,增强了排渣效果,减少了岩屑对钻头的重复磨损;钻头材料选择了更适用于高温硬岩的合金钢和硬质合金,提高了钻头寿命;优化了固齿工艺,运用有限元仿真分析计算最优冷压固齿参数,为钻头冷压固齿提供了技术支持。

通过以上研究的开展,为试制适用于高温硬岩的空气潜孔锤钻头奠定了基础,后续将在室内模拟

花岗岩地层开展钻头钻进试验,在条件合适的情况下开展野外生产试验,根据钻头钻进试验效果对高温硬岩空气潜孔锤钻头进行完善、改进,并对干热岩钻井空气潜孔锤钻进技术工艺进行研究,为干热岩钻井多工艺高效钻进提供技术支持和技术储备。

参考文献(References):

- [1] 曾义金.干热岩热能开发技术进展与思考[J].石油钻探技术,2015,43(2):1-7.
ZENG Yijin. Technical progress and thinking for development of hot dry rock (HDR) geothermal resources[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(2):1-7.
- [2] 彭新明.我国干热岩地热资源钻采工艺浅议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(S1):167-169.
PENG Xinming. Discussion on drilling and production technology of dry hot rock geothermal resources in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(S1):167-169.
- [3] 王勇军,代娜,郑宇轩.干热岩钻探关键技术探索[J].山东国土资源,2019,35(2):64-68.
WANG Yongjun, DAI Na, ZHENG Yuxuan. Study on key technologies of dry hot rock drilling[J]. Shandong Land Resources, 2019,35(2):64-68.
- [4] 刘伟莉,马庆涛,付怀刚.干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J].石油机械,2015,43(8):11-15.
LIU Weili, MA Qingtao, FU Huaigang. Difficulties and countermeasures of drilling technology for geothermal development in dry hot rock[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(8):11-15.
- [5] 冉恒谦,冯起赠.我国干热岩勘查的有关技术问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):17-21.
RAN Hengqian, FENG Qizeng. Some technical issues on hot dry rock exploration in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(10):17-21.
- [6] 阴文行,冯红喜,左科峰,等.气举反循环钻进技术在干热岩开发中的应用分析[J].地质装备,2017,18(2):33-37.
YIN Wenhong, FENG Hongxi, ZUO Kefeng, et al. Application analysis of air lift reverse circulation drilling technology in dry hot-rock development[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2017,18(2):33-37.
- [7] 郑宇轩.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.
ZHENG Yuxuan. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai province [J]. Geology and Exploration, 2018,54(5):1038-1045.
- [8] 刘海波.空气泡沫潜孔锤钻进技术在大直径基岩深井中的应用试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):31-34.
LIU Haibo. Application test of air foam DTH drilling in large di-

- ameter deep bedrock well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(5): 31-34.
- [9] 宋继伟,赵华宣,苏宁,等.空气潜孔锤钻进典型事故原因分析及处理措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):22-28.
SONG Jiwei, ZHAO Huaxuan, SU Ning, et al. Analysis on the causes of typical accidents of air DTH hammer drilling and the treatment measures [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5): 22-28.
- [10] 谢文苹,路睿,张盛生,等.青海共和盆地干热岩勘查进展及开发技术探讨[J].石油钻探技术,2020,48(3):77-84.
XIE Wenping, LU Rui, ZHANG Shengsheng, et al. Progress in hot dry rock exploration and a discussion on development technology in the Gonghe Basin of Qinghai[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 77-84.
- [11] 刘明博,陈轶平.气动潜孔锤钻进技术在黔东南岩溶地区地源热泵勘探井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):51-55.
LIU Mingbo, CHEN Yiping. Application of pneumatic DTH hammer drilling technique in ground source heat pump exploration well in karst area of Southeast Guizhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1): 51-55.
- [12] 石永泉.潜孔锤钻进技术[M].成都:西南交通大学出版社,2013.
SHI Yongquan. DTH drilling technology [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013.
- [13] 苏长寿,阴文行,冯红喜,等.液动潜孔锤技术应用于干热岩钻井的可行性探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):14-16,26.
SU Changshou, YIN Wenhong, FENG Hongxi, et al. Feasibility study on application of hydraulic hammer technology in hot dry rock drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3): 14-16, 26.
- [14] 赵福森,张凯.青海贵德ZR1干热岩井钻进工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):18-23,35.
ZHAO Fusen, ZHANG Kai. Research on hot dry rock well drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(2): 18-23, 35.
- [15] 朱海燕,张然.空气锤钎头现状及发展趋势[J].石油矿场机械,2009,38(9):16-20.
ZHU Haiyan, ZHANG Ran. Development of air hammer bit [J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(9): 16-20.
- [16] 张国樾.凿岩钎具的设计、制造和选用[M].长沙:湖南科学技术出版社,1989.
ZHANG Guojie. Design, manufacture and selection of rock drilling tools [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1989.
- [17] 谢志莲.柱齿钎头冷压固齿工艺试验研究[J].湖南有色金属,1992,8(5):274-276.
XIE Zhilian. Experimental study on cold pressing and fixing technology of cylindrical bit [J]. Hunan Nonferrous Metals, 1992, 8(5): 274-276.
- [18] 阎耀保,张昌钧,岑斌,等.大直径气动潜孔锤钻头球齿与本体的过盈量分析[J].液压气动与密封,2013,33(12):17-20.
YIN Yaobao, ZHANG Changjun, CEN Bin, et al. Interference analysis of drill and body for large diameter pneumatic DTH hammer [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2013, 33(12): 17-20.
- [19] 谭卓英,赖海辉.柱齿钻头冷压固齿最佳参数的分析与研究[J].中南矿冶学院学报,1990,21(6):585-594.
TAN Zhuoying, LAI Haihui. Analysis and study of cold-press holding button optimum anameters of button bit [J]. Journal of Central & South Institute of Mining and Metallurgy, 1990, 21(6): 585-594.
- [20] 瞿叶高,卜长根,刘宝林,等.潜孔锤钻头球齿冲击过程数值模拟[J].现代制造工程,2008(4):10-12,22.
QU Yegao, BU Changgen, LIU Baolin, et al. Simulation study of DTH hammer bit insert impact process [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(4): 10-12, 22.
- [21] 瞿叶高,卜长根,刘宝林.网格对潜孔锤钻头球齿冲击过程数值模拟的影响[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(6):10-13.
QU Yegao, BU Changgen, LIU Baolin. Effect on numerical simulation of DTH hammer bit insert impact process by mesh size [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(6): 10-13.
- [22] 罗宏保,李子章,姜昭群,等.冲击挤压跟管钻具的设计与仿真分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7):97-99.
LUO Hongbao, LI Zizhang, JIANG Zhaoqun, et al. Design of the impact extrusion drilling tool with casing and the simulation analysis [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(7): 97-99.

(编辑 荐华)