

Ø76 mm小直径钢齿三牙轮钻头设计

樊腊生

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:针对小口径不取心钻孔,开展了Ø76 mm钢齿三牙轮钻头规范性的系统设计。本文参考国产石油三牙轮钻头结构设计参数取值,设计了Ø76 mm钢齿三牙轮钻头结构参数值,校核了牙轮钻头计算直径。系统介绍了井底击碎图和齿圈啮合图的绘制方法,并对铣齿牙轮的齿圈布置进行了优化。采用非密封滑动轴承结构,钢球锁紧牙轮,对滚珠轴承进行了设计计算,确定了滚珠数量、滚道尺寸及间隙。精确计算了楔形齿的相关参数,确定了铣刀角和铣刀安装角。阐述了小直径钢齿三牙轮钻头的零件细节、加工工艺。利用Excel函数运算功能和三维参数化实体模拟软件,解决了牙轮钻头传统繁重的手工计算和繁琐的二维投影手工绘图的问题,提高了设计效率和设计精度,为类似牙轮钻头的设计提供了借鉴。

关键词:小直径钻头;钢齿;三牙轮钻头;齿圈布置;非密封滑动轴承;滚珠轴承;楔形铣齿;加工工艺

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)06-0145-09

Design of Ø76mm steel tooth tricone bit

FAN Lasheng

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

Abstract: Normative system design of Ø76mm steel tooth tricone bit was carried out, aiming at the small diameter non-coring drill. The paper designed the value of the structure parameters and checked the calculated diameter of Ø76mm steel tooth tricone bit, referring to the value of structure design parameters of domestic petroleum tricone bits. The drawing method of crushing-diagram at the drilling-hole bottom and gear ring meshing-diagram, as well as the optimization method for the tooth ring arrangement of milling tooth cone are introduced systematically. Using steel ball to lock cone, with the unsealed sliding bearing structure. And the ball bearings are designed and calculated, to determine the number of balls, rolling track size, and clearance. The parameters of wedge teeth are calculated accurately, to determine the angles and installation angles of the milling cutters. The part details and processing technology of small diameter steel tooth tricone bit are described. The problems of the traditional heavy manual calculation and cumbersome 2D projection manual drawing have been solved, by utilizing Excel functions and 3D parameterized solid simulation software, improving the design efficiency and accuracy, to provide a reference for the design of similar roller cone bit.

Key words: small diameter bit; steel tooth; tricone bit; tooth row arrangement; non-sealed journal bearing; ball bearing; wedge milling tooth; machining technology

地质钻探中常用的钻孔公称口径有Ø76、96、122、150 mm^[1],一般进行取心钻进,在局部孔段或其他工程用途的钻孔中可以全面钻进(不取心)。全面钻进一般使用PDC钻头或牙轮钻头;牙轮钻头钻进时牙齿交替接触孔底,具有碎岩扭矩小、比压

高的特点,适应地层范围广,可采用泥浆、空气循环冷却钻头和携带岩粉。国内小直径镶齿三牙轮钻头已有研究报道,如Ø75、95、104 mm镶齿三牙轮钻头^[2-4];其中,Ø75 mm地质钻探牙轮钻头采用拼装式结构,由钻头体、牙掌、牙轮、滚珠、塞销、螺栓等

收稿日期:2023-04-07; 修回日期:2023-07-06 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.06.019

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“西部地区战略性矿产快速查证与技术支持”(编号:DD20230320);地质矿产部“八五”重点科技攻关项目“无岩心钻探技术的研究”(编号:8501012-3)

作者简介:樊腊生,男,汉族,1964年生,正高级工程师,探矿工程专业,从事深部钻探技术研究工作,四川省成都市郫都区红光镇港华路139号,gyflscd@163.com。

引用格式:樊腊生.Ø76mm小直径钢齿三牙轮钻头设计[J].钻探工程,2023,50(6):145-153.

FAN Lasheng. Design of Ø76mm steel tooth tricone bit[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):145-153.

组成,牙轮上镶球形硬质合金齿,掌背镶保径齿; $\Phi 95$ 、 104 mm地质钻探牙轮钻头按石油牙轮钻头设计的理念,采用了楔形硬质合金镶齿、滑动轴承密封润滑、储油压力平衡补偿系统等结构;而小直径钢齿三牙轮钻头的研究未见报道。前苏联的地质勘探用牙轮钻头已成系列,如 $\Phi 46$ 、 59 、 76 、 93 、 112 、 132 、 151 mm^[5],有单牙轮、双牙轮、三牙轮等类型,牙轮上的牙齿有钢齿(铣齿)、镶齿、组合齿(钢齿+镶齿)等结构形式。随着计算机技术(Excel函数、三维参数化实体模拟)、数控加工技术的发展和运用,给结构形状复杂的小直径钢齿三牙轮钻头设计和加工带来了便利。

1 总体方案

针对物探爆破孔、注浆孔及其他不取心钻孔等,开展 $\Phi 76$ mm钢齿三牙轮钻头的研究设计。该钻头主要用于第四系覆盖层钻进,按国产石油三牙轮钻头“4型(Z)”、地层性质“中”进行结构设计。钻头由牙掌、铣齿牙轮(复锥牙轮)、接合销、钢球(滚珠)、塞销、骑缝钉等组成(图1),钻头为无体式结构,每个牙掌各带1/3壳体,互焊成一体,上端车成公扣^[6]。

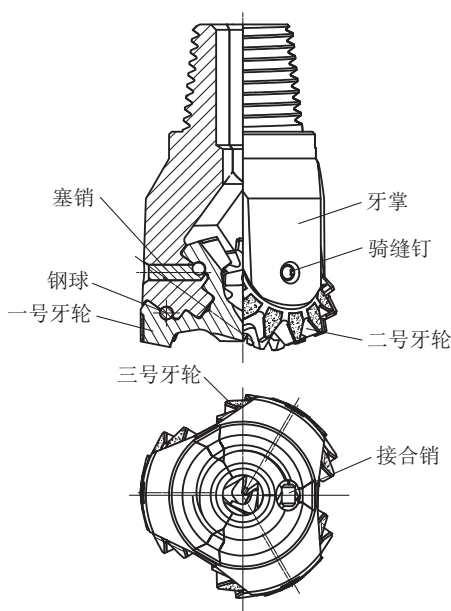


图1 $\Phi 76$ mm钢齿三牙轮钻头

Fig.1 $\Phi 76$ mm steel tooth tricone bit

牙掌采用20CrNiMo合金钢锻件(胎膜锻)加工,牙掌上部车有总装焊接后加工丝扣的圆锥体,下部车有安装牙轮的轴颈,内侧钻有水眼,掌背钻有便于锁紧钢球装入的塞销孔,120°面外侧铣有焊接的

坡口。

牙轮采用20Ni4Mo合金钢锻件(胎膜锻)加工,牙轮内侧车有轴承跑道及台肩(止推面),外侧圆锥面切有齿圈槽、铣有牙齿。

牙轮配置方式为自洁式,牙轮复锥、超顶和移轴布置,具有压碎、冲击、剪切碎岩的特点。牙轮复锥和超顶引起的切向滑动可以剪切掉同一齿圈相邻牙齿破碎坑之间的岩石,牙轮移轴布置可使牙轮产生轴向滑动剪切掉齿圈之间的岩石。受钻头直径的限制,采用非密封滑动轴承结构,由大轴滑动副(渗碳钢滑动轴承)、锁紧钢球、第二道止推(渗碳钢)、小轴滑动副(渗碳钢滑动轴承)等组成。

2 主要结构参数设计

三牙轮钻头的几何形状复杂,小直径钻头的空间有限,各个参数之间又相互影响,相互制约,在设计钻头时需要相互配合,使各主要参数尽量合理。

2.1 主要结构参数选取

牙轮钻头的主要结构参数(图2)有钻头设计直径 D 、牙轮轴线与钻头轴线交角(轴颈角) β 、牙轮直径 d 、牙轮底平面直径 d' 、牙掌(牙爪)牙轮基准尺寸 C 、牙轮锥高 h 、牙轮全高 H 、牙轮牙掌装配后的间隙 e 、牙轮主锥角 2φ 、牙轮副锥角 2θ 、牙轮背锥角 2γ 、主锥井底角 α 、牙轮轴线和钻头轴线的交点与牙轮锥顶距离(超顶距) M 以及牙轮轴线偏移值即牙掌的轴颈沿钻头旋转方向平移一段距离(移轴距) S 等。

2.1.1 主要结构参数取值

钻头设计直径 D 涉及到公称口径、产品直径的公差(一般为正公差)、以及3个牙轮掌组装焊接后的直径收缩, $\Phi 76$ mm钢齿三牙轮钻头的设计计算直径 D 取77 mm。

相关文献给出了国产石油三牙轮钻头主要结构设计参数的选取范围^[6-7], $\Phi 76$ mm钢齿三牙轮钻头的主要结构参数设计取值见表1。在不移轴的情况下, $\Phi 76$ mm钢齿三牙轮钻头的 $2\gamma=108^\circ$ ($2\gamma=2\beta$)、 $C=30.15$ mm [$C=0.5(D-d\cos\beta)+(H-h+e)\sin\beta$];在移轴的情况下, C 值小于30.15 mm。

2.1.2 钻头计算直径校核

根据结构参数(β 、 S 、 d 、 C 、 e 、 H 、 h)需校核牙轮钻头的计算直径,计算直径不合适的话,通过微调 C 值或其他结构参数,使计算直径 D 达到设计要求。

牙轮钻头计算直径 D 的计算采用参考文献[8]

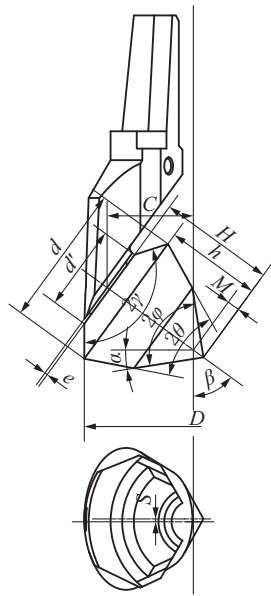


图2 牙轮钻头的主要结构参数示意

Fig.2 Schematic diagram of main structural parameters of roller cone drill bit

表1 自洁式4型(Z)钢齿三牙轮钻头结构参数

Table 1 Structural parameters of self-cleaning Type 4 (Z) steel tooth tricone bit

参数项	取值范围			设计取值
	文献[6]	文献[7]	计算值	
D/mm			77	77
β/(°)	55或57	54或57		54
α/(°)	8~12(α=φ-90+β)			9
S/mm	S=0.01D~0.021D		0.77~1.617	1
2φ/(°)	90~92			90
2θ/(°)		-5~25°		50
2γ/(°)		直径投影图		108
d/mm	d≈0.645D		49.665	49
d'/mm				29.5
H/mm	H≈0.5D		38.5	40
h/mm		h≈0.41D	31.57	32.92
e/mm				0.4
C/mm		直径投影图		29.7

注:成都石油总机厂钻头室、上海石油机械配件厂编写的“三牙轮钻头计算书”内部资料,副锥角2θ取值范围为30°~50°。

推导的有关公式。用牛顿法(切线法) $x_{i+1}=x_i-f(x_i)/f'(x_{i+1})$ 在 $0\leq\delta\leq90^\circ$ 内迭代求解方程(1)的 $\tan(\delta/2)$ 在 $[0,1]$ 区间的实根 $\tan(\delta_n/2)$ (即 δ_n),再用式

(2)计算牙轮钻头的计算直径D。同理,可求解出牙轮背锥处(牙轮底平面圆处, $P=C/\sin\beta-e$, $d=d'$)的 $\tan(\delta_n'/2)$ (即 δ_n')及D'。

$$\left(\tan\frac{\delta}{2}\right)^4 + \frac{2S-d\sin\beta\sin\beta}{P\sin\beta\cos\beta}\left(\tan\frac{\delta}{2}\right)^3 + \frac{2S+d\sin\beta\sin\beta}{P\sin\beta\cos\beta}\tan\frac{\delta}{2} - 1 = 0 \quad (1)$$

式中:δ——牙轮大圆水平投影的椭圆上任一点绕椭圆长轴的转角,(°);P——牙轮轴线和钻头轴线的交点到牙轮大圆的距离, $P=C/\sin\beta-(H-h+e)$,mm;S、d、β、C、H、h、e——意义及单位如前述。

$$D=2\sqrt{(P\sin\beta+0.5d\cos\beta\sin\delta_n)^2+(S+0.5d\cos\delta_n)^2} \quad (2)$$

式中:P、β、d、S——意义及单位如前述;δ_n——式(1)的解,(°)。

利用Excel的函数功能,编入计算公式,在电子表格中可以很方便的迭代出 $\tan(\delta_n/2)$ 、 $\tan(\delta_n'/2)$,并计算出D、D',任何参数的微调都可以很方便得出计算结果(表2),背锥角 $2\gamma=108^\circ$,C值为29.7mm,钻头最大计算直径为77.03mm。

在结构参数中背锥高度H-h与牙轮直径d、牙轮底平面直径d'、牙轮背锥角2γ有关联, $H-h=0.5$

表2 Ø76mm钢齿三牙轮钻头的计算直径校验结果

Table 2 Calculated diameter check result of Ø76mm steel tooth tricone bit

参数项	数	值		
β/(°)	54	54	54	54
S/mm	1	1	1	1
d/mm	49	49	49	49
d'/mm	29.5	29.5	28.5	28.1
H-h/mm	7.08	7.08	7.45	7.45
e/mm	0.4	0.4	0.4	0.4
C/mm	30	29.7	30	30
$\tan(\delta_n/2)$	0.4957	0.4870	0.4870	0.4869
迭代次数	4	5	4	5
D/mm	77.58	77.03	77.04	77.03
$\tan(\delta_n'/2)$	0.8809	0.8784	0.8853	0.8869
迭代次数	5	5	4	4
D'/mm	76.77	76.17	76.18	75.94
2γ/(°)	108	108	108	109
H/mm	40	40	40	40
M/mm	3.32	3.69	3.32	3.55

$(d-d')/\tan\gamma \approx 0.09D$; 超顶距 M 与牙轮全高 H 、间隙 e 、 C 值、 β 角有关联, $M=H+e-C/\sin\beta$ 。

2.2 钢齿牙轮的齿圈布置

自洁式布置牙轮齿圈有利于相邻 2 个牙轮的牙齿互相铣去齿圈间的岩屑(可以减轻钻头的泥包)、有利于轴承的加强(可以增大牙轮的体积),但 3 个牙轮的齿圈互相牵连、齿圈的布置需统筹考虑。常用总覆盖系数(3 个牙轮的全部齿长之和与牙轮主锥长、副锥长之和的比值)及井底击碎图来表示齿圈分布是否合理,用齿圈啮合图校核齿圈布置是否可行,并且各个牙轮的齿长之和尽量接近相等。

相关文献给出的 4 型(Z)自洁式钻头的总覆盖系数为 1.1~1.3,铣齿牙齿高度为 $0.074d_i+(4\sim10)$ mm,其中 d_i 为各齿圈大端直径^[6-7]。针对 $\varnothing 76$ mm 口径,牙轮主锥长仅为 24.25 mm、副锥长 17.40 mm,每个牙轮布置 2 个齿圈(外排齿圈、内排齿圈),总覆盖系数、齿圈槽深度取值接近推荐值的下限,同时齿圈槽深度还需兼顾轴承内跑道。

运用三维参数化实体模拟软件,根据已知的 d 、 d' 、 2φ 、 2θ 、 2γ 、 H ,分别构建布有齿圈的一号牙轮、二号牙轮、三号牙轮的半个实体零件。

绘制井底击碎图:在一个平面内定位装配一号半个牙轮、二号半个牙轮、三号半个牙轮的实体零件成部件,剖视后形成二维工程图,隐藏二号牙轮、三号牙轮的内跑道,添加各个牙轮的各齿圈的齿长并标注出间隙即成井底击碎图(图 3)。

采用相关文献给出的齿圈啮合图传统绘制方法^[9-10],在牙轮钻头结构参数 $C=29.7$ mm、 $\beta=54^\circ$ 、 $e=0.4$ mm、 $H=40$ mm、 $S=1$ mm 及 $q=3$ (钻头的牙轮数)已知的情况下,用电子表格计算 2 个牙轮轴线间的夹角 $2\alpha_1=88.9550^\circ$ [$\sin\alpha_1=\sin(180^\circ/q)\cos(90^\circ-\beta)$]、超顶距 $M=3.6888$ mm ($M=H+e-C/\sin\beta$)、两个牙轮轴线所决定的平面与水平面之间的夹角 $\rho=55.4646^\circ$ [$\tan\rho=\tan(90^\circ-\beta)/\cos(180^\circ/q)$]、外形的偏移量 $U=0.6881$ mm [$U=S\sin(180^\circ/q)\cos\rho/\cos\alpha_1$]以及 $W_1=3.0007$ mm ($W_1=M-U$)和 $W_2=4.3769$ mm ($W_2=M+U$)。

绘制齿圈啮合图:在一个平面内,首先装入一号半个牙轮,牙轮底平面定位于钻头中心线(工作轴)距离 35.6231 mm ($H-M-U$),再装入一个一号半个牙轮,此半个牙轮底平面定位于前一号半个牙轮底平面的偏移量 1.3762 mm ($2U$);顺时针方向装入

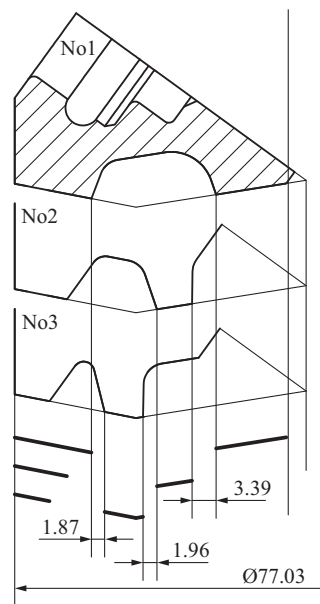


图3 井底击碎图

Fig.3 Diagram of bottom breakage layout

三号半个牙轮,此牙轮底平面定位于钻头中心线(工作轴)距离 35.6231 mm ($H-M-U$),在同一个平面内三号牙轮的轴线与一号牙轮的轴线夹角为 $88.9550^\circ(2\alpha_1)$,再装入一个三号半个牙轮,此半个牙轮底平面定位于前三号半个牙轮底平面的偏移量 1.3762 mm ($2U$);顺时针方向装入二号半个牙轮,此牙轮底平面定位于钻头中心线(工作轴)距离 35.6231 mm ($H-M-U$),在同一个平面内二号牙轮的轴线与三号牙轮的轴线夹角为 $88.9550^\circ(2\alpha_1)$;逆时针装入二号半个牙轮,此牙轮底平面定位于钻头中心(工作轴)距离 36.9993 mm ($H-M+U$),在同一个平面内二号牙轮的轴线与一号牙轮的轴线夹角为 $88.9550^\circ(2\alpha_1)$ 。上述构建的部件,剖视后形成二维工程图,添加 $2W_1$ 、 $2W_2$ 圆等并标注尺寸即成齿圈啮合图(图 4)。

一号牙轮的锥顶齿、外排齿之间的齿圈槽需容纳二号牙轮和三号牙轮的内排齿,并留有间隙(图 3、图 4);二号牙轮的齿圈槽需容纳三号牙轮的内排齿,并避免与一号牙轮外排齿内侧的碰撞;三号牙轮的齿圈槽需避免与一号、二号牙轮外排齿内侧的碰撞。二号牙轮的削顶深度需容纳一号牙轮的锥顶齿;三号牙轮的内侧齿圈槽需容纳二号牙轮的内排齿,削顶高度需避免与一号牙轮锥顶齿的碰撞。设计的 $\varnothing 76$ mm 钢齿三牙轮钻头的总覆盖系数为 1.06,齿

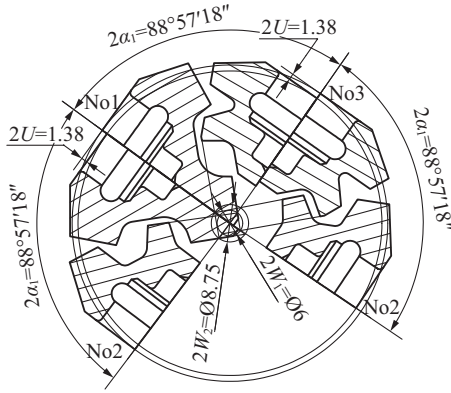


图4 齿圈啮合图

Fig.4 Interfit diagram of tooth row

圈槽深为7 mm(为兼顾滚珠内跑道,三号牙轮外排齿与内排齿之间的齿圈槽深度为6.42 mm)。

对3个牙轮半个实体零件的齿圈布置进行调整、更新后,井底击碎图、齿圈啮合图随之更新,具有简便和一目了然的特点。虽然传统方法绘制的齿圈啮合图反映的啮合间隙是近似的^[10],但在移轴距 S 较小时误差是可以接受的,必要时可在装配的三维部件(布有齿圈的3个牙轮装配在3个牙掌上)中精确测量啮合间隙值。

2.3 轴承结构设计

牙轮与牙掌之间的轴承一般采用大轴径向轴承副、锁紧组件、二道止推轴承、小轴径向轴承副和一道止推轴承等,轴承结构有滚动轴承和滑动轴承两大类,锁紧组件有钢球锁紧、卡簧锁紧、螺纹环锁紧等结构形式^[11],轴承系统有非密封和密封2种方式。针对牙轮底平面直径 d' 仅有29.5 mm,采用非密封的渗碳钢对渗碳钢的滑动轴承形式,尽可能增大轴轴径及长度,使用传统的钢球(滚珠)锁紧牙轮,二道止推面承受轴向力。

密封滑动轴承的大、小轴的径向间隙应采用相同的尺寸,且在实际加工中将间隙值控制在0.07~0.13 mm^[12]。针对非密封滑动轴承,设计的大轴承配合为Ø21 H9/d9、间隙值为0.065~0.169 mm,小轴承配合为Ø10 H10/c10、间隙值为0.080~0.196 mm。

参考文献^[7]给出的滚珠轴承(锁紧钢球轴承)的总周向间隙和轴向间隙计算公式分别为:

$$A = n \times (D_i \sin \pi/n - d_0) < 0.5d_0 \quad (3)$$

式中: A ——总的周向间隙,mm; n ——滚珠(锁紧钢球)的数量; D_i ——轴承滚珠中心所构成的圆的直径

(轴承的节圆直径),为牙轮滚道大径与牙掌滚道底径之和的一半,mm; d_0 ——钢球直径,mm。

$$m = 0.5 \sqrt{\epsilon(8R - 4d_0 - \epsilon)} \quad (4)$$

式中: m ——轴向间隙,mm; ϵ ——钢球轴承的径向间隙,mm; R ——钢球轴承的滚道圆弧半径,mm; d_0 ——钢球直径,mm。

结构设计上,滚珠轴承在正常钻进时不承受轴向力,或仅承受轻微的反向轴向力,只是在其他轴承磨损到一定程度后,才承受一部分径向及轴向载荷^[13]。选取钢球直径 $d_0 = 4.7625$ mm(3/16 in),牙轮、牙掌的滚道圆弧半径 $R \geq 0.515d_0$ ^[14] = 2.45 mm,取 $R = 2.45$ mm。钢球锁紧轴承设计结果见表3,Ø4.7625 mm钢球数量为13,牙轮滚珠跑道大径为25.4 mm,牙掌滚珠跑道底径15.7 mm,总的周向间隙为2.02 mm,轴向间隙为0.13 mm。

2.4 铣削牙齿几何参数设计

钢齿牙轮钻头的牙齿是由牙轮毛坯经过铣削加工形成,在牙齿表面敷焊1层碳化钨粉以提高耐磨性,在牙轮的背锥部位敷焊碳化钨粉以防止钻头直径磨小。牙齿主要是楔形形状,有齿高 H_c 、齿尖角 $2\gamma_c$ 、齿顶宽 b 、齿长 l 、齿距 t 等结构参数,通过选择齿数 Z 、铣刀角 $2\alpha_x$ 及铣刀安装角 β_x 来满足牙齿的结构参数。

2.4.1 牙轮各齿圈齿数选择

相关文献给出的4型(Z)自洁式铣齿钻头的牙齿齿高、齿距、齿尖角等结构参数见表4^[6-7]。

各齿圈齿数 Z 的计算公式为:

$$Z = \frac{\pi}{\sin^{-1}(t/d_i)} \quad (5)$$

式中: Z ——各齿圈的齿数; t ——同一齿圈相邻牙齿齿顶间的距离,mm; d_i ——齿圈大端直径,mm。

各齿圈的齿距 t 及齿圈大端直径 d_i 代入式(5)的计算结果及取值情况见表5。

2.4.2 楔形铣齿参数计算

相关文献推导的过牙齿大端垂直于牙轮轴线的截面与齿两侧面交线所成的夹角 $2\gamma'_c$ 、铣刀安装角 β_x 、铣刀角 $2\alpha_x$ 、齿谷深 H_g 、计算齿高 H_c 的计算公式分别为^[15]:

$$\tan \gamma'_c = \tan \gamma_c \cos \varphi_y - \frac{(b - b') \sin \varphi_y}{2l} \quad (6)$$

式中: γ'_c ——过牙齿大端垂直于牙轮轴线的截面与齿两侧面交线所成的夹角的一半,(°); γ_c ——过牙

表3 Ø76 mm 钢齿三牙轮钻头滚珠轴承的设计结果

Table 3 Design results of Ø76mm steel tooth tricone bit ball bearing

参 数 项	式(3)、式(4)计算情况		设计取值
	公 式 及 说 明	计算值	
滚珠直径 d_0 /mm			4.7625
大轴直径 d_z /mm			21
滚珠数量 n	式(3)中 $A=0$ 、 $D_i=d_z$, 零间隙下最多钢球数	13.7322	13
估算轴承的节圆直径 D_i /mm	式(3)中取 $A=0.4d_0$, $n=13$	20.5128	
牙轮滚珠跑道大径 D_g /mm	$D_g=D_i+d_0+0.1$ (经验取值)	25.3753	25.4
牙掌滚珠跑道底径 d_g /mm	$d_g=D_i-d_0-0.1$ (经验取值)	15.6503	15.7
轴承节圆直径 D_i /mm	$D_i=(D_g+d_g)/2$	20.55	20.55
总的周向间隙 A /mm	式(3)中 $n=13$ 、 $D_i=20.55$ 、 $d_0=4.7625$	2.0207	2.0207
钢球轴承的径向间隙 ϵ /mm	$\epsilon=D_g-d_g-2d_0$	0.1750	0.1750
钢球轴承的滚道半径 R /mm	$R=0.515d_0$	2.45	2.45
轴向间隙 m /mm	式(4)中 $\epsilon=0.1750$ 、 $R=2.45$ 、 $d_0=4.7625$	0.1281	0.1281

表4 自洁式4型(Z)钢齿三牙轮钻头牙齿结构参数

Table 4 Structural parameters of self-cleaning Type 4 (Z) steel tooth tricone bit

参 数 项	取 值 范 围			设计取值
	文献[6]	文献[7]	计算值	
齿高 H_c /mm	$d_i=49$		7.63~13.63	6.37~7.16
	$d_i=18.14$		5.34~11.34	4.30
	$d_i=30.07$	$H_c=(4\sim10)+0.074d_i$	6.23~12.23	5.68
	$d_i=38.10$		6.82~12.82	5.74
齿距 t /mm	外排齿圈	$t=(7\sim12)+0.06D$	$t=(0.105\sim0.14)D$	11.62~16.62
	其他齿圈	$t=(5\sim10)+0.06D$		9.62~14.62
齿尖角 $2\gamma_c/(\circ)$	外排齿圈	38~40		41.70~49.21
	其他齿圈	40~42		45.99~50.91

注: d_i 为各齿圈大端直径(mm); D 为钻头设计直径(77 mm); 成都石油总机厂钻头室、上海石油机械配件厂编写的“三牙轮钻头计算书”内部资料, 外排齿圈齿距为 $10.4+0.06D=15.02$ mm、其他齿圈齿距为 $7.4+0.06D=12.02$ mm

表5 牙轮各齿圈齿数取值

Table 5 Number of teeth in each ring of the cone

参 数 项	外 排 齿 圈				内 排 齿 圈			
	t /mm	d_i /mm	Z		t /mm	d_i /mm	Z	
			计算值	设计取值			计算值	设计取值
一号牙轮				11		18.14	5.62~3.35	4
二号牙轮	11.62~16.62	49	13.12~9.08	12	9.62~14.62	30.07	9.65~6.19	7
三号牙轮				13		38.10	12.31~7.98	10

齿大端垂直于齿顶的截面与齿两侧面交线所成的夹角(真实齿尖角)的一半, $(^\circ)$; φ_y ——牙齿所在牙轮母线的夹角(牙轮副锥角或牙轮主锥角)的一半,

$(^\circ)$; b ——牙齿大端齿顶宽度, mm; b' ——牙齿小端齿顶宽度, mm; l ——牙齿齿顶长度, mm。

$$\tan \beta_x = \frac{\sqrt{d_i^2 - b^2} \tan \gamma_c' - \sqrt{(d_i - 2l \sin \varphi_y)^2 - b'^2} \tan \gamma_c' + b - b'}{2l \left(\cos \frac{\pi}{Z} \tan \gamma_c' + \sin \frac{\pi}{Z} \right) \cos \varphi_y} \quad (7)$$

式中: β_x ——铣刀安装角(圆盘铣刀轴线与牙轮轴线的夹角), ($^\circ$); d_i ——齿圈大端直径, mm; Z ——牙齿所在齿圈的齿数。

$$\tan \alpha_x = \frac{\tan \left(\frac{\pi}{Z} + \gamma_c' \right)}{\cos \beta_x} \quad (8)$$

式中: α_x ——铣刀角的一半, ($^\circ$)。

$$H_g = \frac{d_i \sin \frac{\pi}{Z} - b \cos \frac{\pi}{Z}}{2 \tan \alpha_x} - \frac{R_x (1 - \sin \alpha_x)}{\sin \alpha_x} \quad (9)$$

式中: H_g ——齿谷深(指过牙齿大端垂直于齿根的截面内的齿深度), mm; R_x ——铣刀圆角半径, mm。

$$H_c = 0.5 d_i \cos \beta_x - \frac{\sqrt{d_i^2 - b^2} \tan \gamma_c' \cos \beta_x + b \cos \beta_x}{2 \cos \frac{\pi}{Z} \tan \gamma_c' + 2 \sin \frac{\pi}{Z}} - \frac{R_x (1 - \sin \alpha_x)}{\sin \alpha_x} \quad (10)$$

式中: H_c ——计算齿高, mm。

在牙轮齿圈锥角 $2\varphi_y$ 、齿圈大小端齿顶宽度 b 及 b' 、齿圈齿数 Z 、齿圈大端直径 d_i 、齿圈齿顶长度 l 已

知的情况下, 利用 Excel 的函数功能, 编入计算公式即式(6)至式(10)。在电子表格中, 利用推荐齿尖角 $2\gamma_c$ 的计算结果, 能很方便的通过调整齿尖角 $2\gamma_c$ 的数值使铣刀角 $2\alpha_x$ 的数值为 5 的整数倍并使计算齿高 H_c 在合理的范围内, 计算设计结果见表 6。

3 零件设计

Ø76 mm 钢齿三牙轮钻头由牙掌、牙轮、接合销、钢球、塞销、骑缝钉等组成, 牙掌、牙轮结构较为复杂。

3.1 牙掌结构设计

牙轮钻头的螺纹采用《地质钻探钻杆锁接头》(DZ 25—83) 标准的 Ø42 mm 钻杆锁接头公扣^[16], 中心水眼 Ø15 mm。牙掌外形上由上部的拟加工公螺纹的 1/3 圆锥体、中间的 1/3 圆柱体、下部的 2 个 1/3 圆锥体、底部的轴颈等组成(图 5)。牙掌拟加工螺纹的锥体预留 2 mm 的加工余量(锥体大端直径 49 mm), 螺纹根部台肩圆直径 55 mm。为减少磨损和利于排粉, 掌尖径向尺寸 37.5 mm, 掌背内倾斜角度 2° 。掌背两侧分别铣成 82° 、 86° 斜平面, 增大排粉

表 6 Ø76 mm 钢齿三牙轮钻头楔形铣齿的设计结果

Table 6 Design result of wedge milling teeth of Ø76mm steel tooth tricone bit

参数项	一号牙轮				二号牙轮				三号牙轮			
	外排齿圈		内排齿圈		外排齿圈		内排齿圈		外排齿圈		内排齿圈	
	推荐	取值	推荐	取值	推荐	取值	推荐	取值	推荐	取值	推荐	取值
$2\varphi_y/(^\circ)$	50	50	90	90	50	50	90	90	50	50	50	50
b/mm	1.5	1.5	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
b'/mm	1.5	1.5	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Z	11	11	4	4	12	12	7	7	13	13	10	10
d_i/mm	49	49	18.1421	18.1421	49	49	30.0711	30.0711	49	49	38.0964	38.0964
l/mm	11	11	10	10	7.5	7.5	5	5	5	5	4.5	4.5
$2\gamma_c/(^\circ)$	40	49.2101	42	50.9099	40	41.7045	42	46.4097	40	43.9653	42	45.9927
$\gamma_c'/(^\circ)$	18.2561	22.5402	15.1861	18.6027	18.2561	19.0457	15.1861	16.8640	18.2561	20.0952	19.1827	21.0386
$\beta_x/(^\circ)$	14.4276	15.8966	17.1784	20.0348	14.9237	15.2133	21.8379	23.2418	15.3772	16.0184	14.2380	14.8965
$2\alpha_x/(^\circ)$	70.9659	80.0000	122.6016	130.0000	68.3274	70.0000	86.0422	90.0000	66.0998	70.0000	76.0939	80.0000
R_x/mm	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2
H_g/mm	7.23	6.26	2.74	2.38	6.71	6.53	4.87	4.61	6.22	5.85	5.36	5.05
H_c/mm	7.99	7.01	4.69	4.30	7.34	7.16	5.96	5.68	6.74	6.37	6.05	5.74
t/mm	13.80	13.80	12.83	12.83	12.68	12.68	13.05	13.05	11.73	11.73	11.77	11.77

的空间。掌背钻有装入锁紧钢球的塞销孔。牙掌120°面上钻有2个接合销孔,满足定位、加工、装配等要求;牙掌120°面两边外侧铣有焊接用的坡口。牙掌轴颈须渗碳处理,渗碳层深度1.0~1.3 mm,表层含碳量0.75%~0.90%,淬火-回火硬度HRC60~66;掌尖、轴颈倒角等不渗碳。

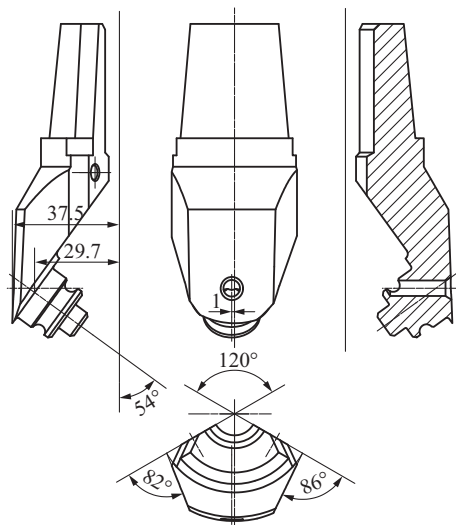


图5 牙掌图

Fig.5 Diagram of bit leg

3.2 牙轮结构设计

牙轮外形上由主锥、副锥、背锥3段圆锥体组成(图6)。主、副锥上切有齿圈槽、铣有楔形齿,牙轮内部车有轴承跑道(大小滑动轴承、滚珠轴承)及止推面,背锥上铣有便于堆焊20~30目铸造碳化钨的扇状弧槽,外排齿的啮入面敷焊碳化钨,内排齿的啮出面敷焊碳化钨。一号牙轮的外形长度最长,三号牙轮的外形长度最短,3个牙轮的轴承跑道及主锥角、副锥角、背锥角、牙轮直径、牙轮锥高等都一致。牙轮内孔及牙齿须渗碳处理,渗碳层深度1.0~1.3 mm,表层含碳量0.70%~0.85%,淬火-回火硬度HRC57~63。

3.3 其他零件

接合销采用A3钢加工成圆柱体,两端倒角。

滚珠采用55SiMoV材质的钢球,回火硬度HRC55~58。

塞销采用A3钢加工成圆柱体,一端倒角并铣有安装骑缝钉的槽,另一端车成短圆锥体(圆锥角为108°)并与牙掌装配后同时加工滚珠跑道。

骑缝钉采用 $\varnothing 2$ mm铁丝制作。

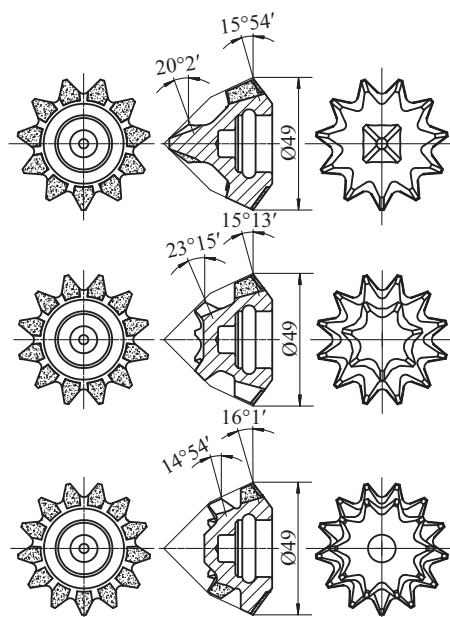


图6 铣齿牙轮图

Fig.6 Diagram of milled tooth cone

4 加工制造工艺

试制和小批量加工 $\varnothing 76$ mm钢齿三牙轮钻头时,牙掌和牙轮采用胎膜锻件,牙掌、牙轮和总装的加工工艺如下:

(1)牙掌加工制造工艺流程:下料—锻毛坯—高温回火(HB156~207)—铣长方体各面、铣120°面—钻接合销孔—划线确定轴颈端面位置—铣轴颈端面—装接合销(三件一组)—车外圆—车30°掌背锥面、2°掌背锥面—钻水眼孔、扩水眼孔—车1:5外圆锥—拆接合销—铣掌背两侧82°、86°斜面—粗车轴颈—铣焊口—钻塞销孔—装塞销—精车轴颈—精车滚道—拆塞销—修掌尖—掌背堆焊碳化钨耐磨材料—涂防渗碳涂料—轴颈渗碳(深度1.0~1.3 mm,表层含碳量0.75%~0.90%)—精车台肩外圆—淬火-回火(轴颈表面硬度HRC60~66)—喷丸处理—水煮去盐—装塞销—磨轴颈及端面—磨滚道—磨轴颈及端面—拆塞销。

(2)牙轮加工制造工艺流程:下料—锻毛坯—高温回火(HB156~207)—车端面、车工艺外圆—车端面、车外圆、钻孔、扩孔—车端面、精车内孔—车外圆、车外锥、车背锥—车端面、切槽—铣牙齿—铣背锥堆焊弧槽—敷焊碳化钨耐磨材料—涂防渗碳涂料—渗碳(深度1.0~1.3 mm,表层含碳量0.70%~0.85%)—淬火-回火(表面硬度HRC57~63)—喷丸处理—

磨内孔—磨端面—磨内孔及端面—磨内滚道。

(3) 牙轮钻头装配工艺流程: 清洗、烘干—牙轮内孔、牙掌轴涂润滑脂—装牙轮—填滚珠—装塞销及骑缝钉—焊塞销—装接合销—组合三片牙掌—用卡环夹紧—卡规测牙轮钻头直径, 调直径—焊牙轮钻头底部焊缝^[17]—冷却—去夹环, 焊牙轮钻头侧面焊缝—冷却—车螺纹外锥—车螺纹—打标—喷漆。

5 结语

从总体方案、结构参数、钻头直径校核、齿圈布置、轴承结构、铣齿几何参数、零件设计、加工制造工艺等方面, 开展了小直径钢齿三牙轮钻头的设计, 给出了相关计算所用的公式和方法, 阐述了牙掌、牙轮的结构细节, 编制了试制产品的加工工艺。以设计计算结果, 绘制的三维实体具有较好的一致性, 三维实体上测量的牙齿几何参数和计算结果相吻合, 表明了设计所采用的计算方法的准确性。设计方法和设计流程可为类似牙轮钻头的设计提供参考和借鉴。

参考文献(References):

- [1] GB/T 16950—2014, 地质岩心钻探钻具[S].
GB/T 16950—2014, Geological core drilling tools[S].
- [2] 叶祖贵. HMT-75 牙轮钻头[C]//第五届全国探矿工程学术会议论文集. 廊坊: 1988: 295-298.
YE Zugui. HMT-75 roller cone drill bit[C]//Selected Papers of the 5th National Academic Conference on Exploration Engineering. Langfang: 1988: 295-298.
- [3] 李山. DKY95XHP5 型钻头及无岩心钻进工艺[J]. 探矿工程, 1997(1): 37-40.
LI Shan. DKY95XHP5 drill bit and non-coring drilling technology[J]. Exploration Engineering, 1997(1): 37-40.
- [4] 樊腊生, 李山, 魏学仁. $\varnothing 104$ 牙轮钻头设计与加工工艺[J]. 西部探矿工程, 2001, 13(2): 100-101.
FAN Lasheng, LI Shan, WEI Xueren. Design and machining technology of $\varnothing 104$ cone rock bit[J]. West-China Exploration Engineering, 2001, 13(2): 100-101.
- [5] 颜纯文. 苏制地质勘探用牙轮钻头[J]. 国外探矿工程情报, 1992(4): 14-21.
YAN Chunwen. Soviet-made roller cone bits for geological exploration[J]. Foreign Exploration Engineering Information, 1992(4): 14-21.
- [6] 刘希圣, 等. 钻井工艺原理(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981: 93-121.
LIU Xisheng, et al. Principles of Drilling Technology (Volume I)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981: 93-121.
- [7] 罗肇丰, 等. 钻井技术手册(一) 钻头[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 39-102.
- [8] LUO Zhaofeng, et al. Drilling Technology Manual (I) Drill Bit [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 39-102.
- [9] 樊腊生. 牙轮钻头直径的计算[J]. 探矿工程, 1997(4): 28-31.
FAN Lasheng. Calculation of the rock bit diameter[J]. Exploration Engineering, 1997(4): 28-31.
- [10] 石油院校教材编写组. 石油矿场机械(中册)[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961: 164-176.
Textbook Compilation Group of Petroleum Colleges and Universities. Oil Field Equipment (Volume II)[M]. Beijing: China Industrial Press, 1961: 164-176.
- [11] 马德坤. 牙轮钻头工作力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 21-31.
MA Dekun. The Operational Mechanics of the Cone Bit [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 21-31.
- [12] 杨迎新, 朱强, 刘德明, 等. 预警——牙轮防脱落技术的发展方向[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(4): 71-74.
YANG Yingxin, ZHU Qiang, LIU Deming, et al. Cone—losing indicator represents direction of cone retention technique [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(4): 71-74.
- [13] 区全邦. 牙轮钻头滑动轴承间隙的设计及加工控制[J]. 石油机械, 2008, 36(11): 37-38.
OU Quanbang. Design and processing control of slide bearing clearance of roller cone bit [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(11): 37-38.
- [14] 罗伟. 牙轮钻头轴承结构改革探讨[J]. 石油矿场机械, 1988, 12(2): 13-20.
LUO Wei. A study on the innovation of bearing construction for cone bits[J]. Oil Field Equipment, 1988, 12(2): 13-20.
- [15] 李铁军, 朱成实, 董林福, 等. 滚动轴承设计参数的敏感性研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2010, 24(2): 160-164.
LI Tiejun, ZHU Chengshi, DONG Linfu, et al. Research on sensitivity of design parameters of rolling bearings [J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2010, 24(2): 160-164.
- [16] 夏成忠, 朱杰明. 钢齿牙轮钻头楔形齿形参数的计算[J]. 石油矿场机械, 1987, 18(3): 9-11.
XIA Chengzhong, ZHU Jieming. Calculation of wedge tooth parameters for steel tooth roller bits [J]. Oil Field Equipment, 1987, 18(3): 9-11.
- [17] DZ 25—83, 地质钻探钻杆锁接头[S].
DZ 25—83, Lock joint of geological drilling pipe[S].
- [18] 吴泽兵, 赵海超, 郭龙龙, 等. 焊接顺序对牙轮钻头牙掌焊接质量的影响[J]. 石油机械, 2022, 50(3): 24-31.
WU Zebing, ZHAO Haichao, GUO Longlong, et al. Influence of welding quality sequence on welding of bit leg [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(3): 24-31.

(编辑 荐华)