

# PDC 钻头切削齿布齿设计的新思路

金永男<sup>1</sup>, 陈宗涛<sup>2</sup>, 由昌英<sup>3</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>

(1. 金策工业综合大学, 朝鲜 平壤; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 平壤建筑综合大学, 朝鲜 平壤)

**摘要:** 切削齿布齿设计是 PDC 钻头设计的关键。为提高 PDC 钻头的钻进效率, 综合考虑 PDC 钻头切削齿的设计特点和切削先后顺序等因素, 并且通过对 PDC 钻头单切削齿实验结果进行分析, 提出了以冠部轮廓法线为基准的切削齿布齿设计方法。

**关键词:** PDC 钻头; 布齿; 切削齿; 冠部轮廓法线

中图分类号: P634.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2015)05-0072-05

**New Idea of Cutting Teeth Arrangement Design for PDC Rock Bit/KIM Yong-nam<sup>1</sup>, CHEN Zong-tao<sup>2</sup>, YU Chang-yong<sup>3</sup>, DUAN Long-chen<sup>2</sup>** (1. Kim Chaek University of Technology, Pyongyang D. P. R of Korea; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. Pyongyang University of Architecture, Pyongyang D. P. R of Korea)

**Abstract:** Cutting teeth arrangement is the key of PDC rock bit design, in order to improve the drilling efficiency, the design features of cutting teeth of PDC bit, the cutting order and some other factors are taken into account; by the analysis on the experimental results of PDC bit single tooth, a new design method of cutting teeth arrangement is put forward, which is based on crown surface normal line.

**Key words:** PDC bit; cutting teeth arrangement; cutting teeth; crown surface normal line

## 0 引言

切削齿布齿设计是 PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 钻头设计的关键, 切削齿的布齿设计决定着 PDC 钻头钻进效率、工作寿命和工作过程的稳定性。布齿设计包括切削齿尺寸的选择、切削齿数量及布置方式的确定、切削齿设置位置的确定、切削齿工作角设计等内容。现在大部分 PDC 钻头设计者首先采用单切削齿实验来确定切削齿的合理齿前角和侧转角并建立 PDC 切削齿与岩石相互作用模型, 选择适合的对象岩层并设计钻进参数, 然后根据这些资料进行钻头运动学、动力学分析, 最后设计出符合要求的钻头。对一个特定岩层来说, 经过单切削齿实验而确定的参数都是比较理想的。可是由于 PDC 钻头冠布轮廓的独特性和现有布齿设计方法的局限性, 装配角的不同将引起切削齿工作角的变化。对于在不同部位的切削齿来说, 由于它们的工作部位不同, 使得在给定的冠部曲线上排布的切削齿处于跟单切削齿实验条件不一致的状态, 这样

势必会影响切削齿的实际工作。

笔者认为切削齿最理想的切削状态是尽可能满足单切削齿实验时确定的数值, 由此提出新的以冠部轮廓法线为基准的 PDC 钻头切削齿布齿方法来保证使切削齿处于比较理想的切削状态, 并根据新的布齿方法开发了 PDC 钻头切削齿布齿软件。

## 1 通用 PDC 钻头切削齿布齿方法分析

通用 PDC 钻头切削齿布齿方法大概如下。

(1) 首先通过单切削齿实验确定切削齿的合理齿前角、侧转角、切削速度、切削量和切削齿冲击载荷等钻进参数, 并建立 PDC 切削齿与岩石相互作用模型。很多研究者用单切削齿实验来研究 PDC 切削齿与岩石相互作用<sup>[1-6]</sup>。

切削齿的齿前角是 PDC 钻头的一个重要设计参数, 对钻头性能有着很大影响。从以往的实验结果中可以归纳出 2 个重要的结论: 齿前角越小(最小 7°~10°), 切削齿越容易吃入地层, 钻进速度越

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-04-09

作者简介: 金永男, 男, 朝鲜族, 1973 年生, 朝鲜人, 朝鲜金策工业综合大学资源勘探系教师, 现在中国地质大学(武汉)进修, 探矿工程专业硕士, 从事钻探技术研究及金刚石钻头开发工作, 湖北省武汉市鲁磨路 388 号, jyncoryo@163.com。

快;在相同的钻速水平下,齿前角越小,切削齿受力越小,钻压和扭矩越小。

研究表明,钻压和扭矩越大,PDC 钻头切削齿越容易磨损和碎裂。因为在大钻压和大扭矩下,切削齿要承受较大的压力和切削力。较大的压力容易引起热加速磨损和较大的纵向冲击载荷;较大的切削力容易引发较大的扭转振动,结果导致 PDC 切削刃热加速磨损和冲击碎裂。切削齿侧转角的主要作用是提高切削齿排屑能力,防止钻头泥包。研究和现场经验表明,随着水力清洗效果的提高,切削齿的侧转角对 PDC 钻头的性能没有明显的积极作用。在现代 PDC 钻头设计中,对直线形刀翼结构的钻头,其切削齿侧转角一般取零;对螺旋形刀翼结构的钻头,因切削齿侧转角随切削齿在螺旋线的位置而变化,需根据刀翼的具体形状确定。

(2)在等切削、等功率和等磨损 3 个设计原则的基础上确定理论冠部形状模型,进行切削齿径向布齿设计和周向布齿设计。

径向布齿设计一般应满足以下 2 方面的要求<sup>[4]</sup>。

①在设计钻速水平下,保证井底覆盖良好。经验表明,要使井底覆盖良好,给定切削齿中心与内侧相邻切削齿中心的径向间距不应超过切削齿直径的 60%。

②内疏外密,使各切削齿的磨损相对均匀。对 PDC 钻头磨损的分析发现,钻头内侧附近切削齿一般都没有明显的磨损。因此,在 PDC 钻头设计中,内侧部位一般设计较少的切削齿,布齿密度最低,由内向外,布齿密度越来越大。

关于径向布齿设计现在有不少办法利用,例如用各种螺线来调整布齿密度与切削齿位置。但是所用办法具有以下缺点:一是在 PDC 钻头切削齿布齿上,不能完全体现单切削齿实验结果;二是在径向布齿设计中没办法充分考虑切削顺序;三是不可避免 PDC 钻头切削齿基体井底干涉。

## 2 为实现单切削齿实验结果的 PDC 钻头径向布齿设计

### 2.1 PDC 钻头切削齿工作区域的概念

切削齿切削区域(或称“工作区域”)的概念有 2 方面的含义<sup>[7]</sup>:一方面是指齿刃切削区域,即切削齿边缘轮廓线上参与岩石切削的区域;另一方面则指齿面切削区域,即切削齿工作平面(金刚石平面)

上与未破碎岩石相接触的区域。如图 1 所示,切削齿的齿面切削区域是一个曲边多边形,多边形的下底边就是齿刃切削区域,另外数边分别是切削齿前方的井底曲面与齿的工作平面的交线。

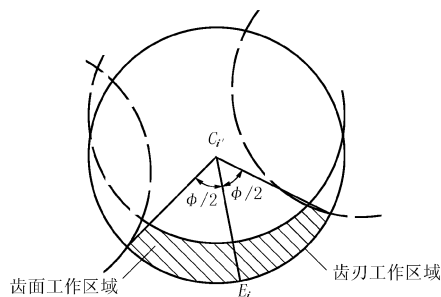


图 1 齿刃切削区域和齿面切削区域

决定一个切削齿工作区域的因素有该切削齿与该齿相邻的切削齿的尺寸和轮廓形状、在钻头上所处的位置和方向、钻头每转的进尺(即切削深度)、切削前后顺序等。齿面工作区域的范围可以用 2 个参数来描述:一是工作区域面积;二是工作区域多边形几何中心点的坐标。如果假设切削载荷在齿面工作区域内是均布的,则后者即是齿的切削力的作用点。除了上述 2 个关于工作区域面积、位置的参量外,工作区域多边形的几何形状也是一个与切削载荷分析计算有重要关系的因素。

本文要关注的是齿刃工作区域。齿刃工作区域可以用 3 个参数来描述:一是工作区域起始点的位置角;二是工作区域终点的位置角;三是齿刃工作区域的中点。前 2 个参数反映了工作区域在切削齿上的位置和参与岩石切削的切削刃长度。因为 PDC 齿圆弧形切削刃上的每一点都具有不同的切削工作角度,所以两个参数对齿的切削载荷分析,尤其是切削载荷在齿刃上分布规律的研究具有重要的意义。第三个参数在实现以冠部轮廓法线为基准的布齿设计上具有很重要的意义<sup>[8]</sup>。

### 2.2 设计中心思想

切削齿的合理齿前角、侧转角、切削速度、切削量和切削齿冲击载荷等钻进参数都是通过单切削齿实验来决定的。这些参数是针对给定岩石比较合理。可惜,经过切削齿布齿设计后,实际切削齿的工作状态往往不能处于这些单切削齿实验结果的范围内。因为 PDC 钻头的切削齿布齿面是个曲面,装配角的不同将引起切削齿工作角的变化。

经过考察可以知道,如果经过任何切削齿的中

心的冠部轮廓的法线也经过该切削齿的齿刃工作区域的中点,那么该切削齿的工作角(前倾角和侧转角)会跟单切削齿试验时的条件一致。这一原理可以推广到钻头的所有切削齿。

设计中心思想是径向布齿设计时让钻头上的所有切削齿满足以下条件:

(1) 过任何切削齿投影中心的冠部曲线的法线就通过该齿刃工作区域的中心,即对任何切削齿,满足条件  $L' \perp C_i' E_i$ , 且同时满足  $A_i E_i = E_i A_{i',i+1'}$  或者  $A_{i,i+1'} E_{i+1} = E_{i+1} A_{i+1',i+2}$ , 此处的  $i$  是指在外锥区域内布置的切削齿号码, 其中  $i = 1, 2, 3 \dots n$ ,  $n$  是外锥区域内切削齿的总个数;  $i'$  表示转一圈后的第  $i$  个切削齿的中心。

(2) 进行径向布齿设计时决定任何切削齿的切削顺序。

通过考查 PDC 钻头径向布齿发现, 对任何切削齿, 只要满足上述 2 个条件, 就能满足单切削齿实验结果, 即任何切削齿的平均工作角等于该切削齿的齿前角和侧转角, 切削齿就处于理想工作状态。

影响一个切削齿齿刃工作区域的切削齿轮廓线只有 3 个, 即该切削齿与相邻的前后切削齿的切削齿轮廓线。决定齿刃工作区域的切削齿轮廓线因切削顺序的不同而不同。

### 2.3 布齿优化设计程序

(1) 入口参数、钻头直径  $D$ 、冠顶半径  $r_0$ 、内锥深度  $b$ 、外锥高度  $b_1$ 、冠顶圆弧半径  $R$ 、切削齿直径  $d$ 、每转吃入深度  $\delta$ 、齿前角  $\alpha$ 、侧转角  $\beta$ 。

(2) 按照入口参数和文献[1, 5, 6]中提出的冠部轮廓曲线方程, 绘制冠部轮廓曲线。

(3) 按照以下步骤进行 PDC 钻头切削齿布齿(参见图 2)。

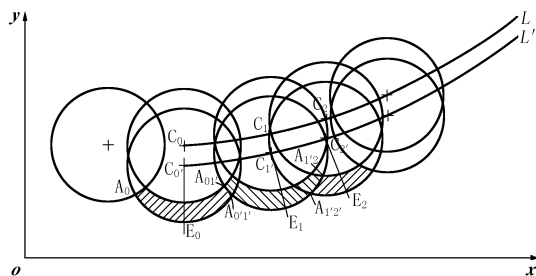
① 绘制冠部曲线  $L$  和钻头回转 1 回后冠部曲线  $L'$ ;

② 绘制冠顶切削齿  $C_0$ , 把它向  $Y$  方向为  $\delta$  平行移动, 绘图对基准面  $XOY$  的投影  $C_0'$ ;

③ 选定相邻冠顶切削齿的内锥切削齿与  $C_0'$  的交点  $A_0$ ;

④ 绘制过切削轮廓弧中心  $C_0'$  或者  $C_0$  的  $L'$  的法线  $C_0 E_0$ ,  $E_0$  为法线与切削轮廓弧  $C_0'$  的交点, 即  $L' \perp C_0 E_0$ ;

⑤ 在切削轮廓弧  $C_0'$  上探索交点  $A_{0,1'}$ , 以满足条件  $A_0 E_0 = E_0 A_{0,1'}$ ;



$L$ ——冠部轮廓线;  $L'$ ——转一回后冠部轮廓线;  $C_i$ ——冠部轮廓线上  $i$  切削齿的中心;  $C_i'$ ——转一回后  $i$  切削齿的中心;  $E_i$ ——转一回后  $i$  切削齿齿刃工作区域的中心;  $A_{ij}$ ——第  $i$  和  $j$  切削齿轮廓线的交点;  $A_0$ ——与冠顶切削齿相邻的内锥方向第 1 切削齿和  $C_0'$  的交点

图 2 三个相邻切削齿的布齿状态  
(切削顺序 1-0-2 或 1-2-0)

⑥ 在  $L'$  上找到过点  $A_{0,1'}$  的切削轮廓弧的中心  $C_1'$ , 接着把切削轮廓弧  $C_1'$  向  $Y$  轴移动为  $\delta$ , 绘制切削轮廓弧  $C_1$ ;

⑦ 探索切削轮廓弧  $C_0$  与  $C_1'$  的交点  $A_{0,1'}$ ;

⑧ 在切削轮廓弧  $C_1'$  上探索中点  $E_1$ , 以满足条件  $L' \perp C_1' E_1$ ;

⑨ 在切削轮廓弧  $C_1'$  上探索交点  $A_{1,2}$ , 以满足条件  $A_{0,1'} E_1 = E_1 A_{1,2}$ ;

⑩ 在冠部轮廓线  $L$  上找到过点  $A_{1,2}$  的切削轮廓弧的中心  $C_2$ , 接着把切削轮廓弧  $C_2$  向  $Y$  轴移动为  $-\delta$ , 绘制切削轮廓弧  $C_2'$ ;

⑪ 确定切削轮廓弧  $C_2'$  与  $C_1'$  的交点  $A_{1,2'}$ ;

⑫ 用  $A_{1,2'}$  代替  $A_0$ , 重复步骤④~⑪, 到探索切削齿中心  $C_i$  的  $X$  坐标值超越值  $(D-d)/2$  为止。如果相邻切削齿的径向坐标的差大于前两个相邻切削齿的径向坐标的差, 即  $\Delta_i = x_{i+1} - x_i > \Delta_{i-1} = x_i - x_{i-1}$ , 那么终止布齿, 再调整冠部曲线的诸因素, 因为现用的冠部曲线不能满足本文的设计思想。

按照这样的步骤去布齿的切削齿能同时满足本设计思想的要求和井底覆盖、内疏外密的要求; 既然过任何切削齿投影中心的冠部曲线的法线就通过该齿刃工作区域的中心, 而且进行径向布齿设计时决定任何切削齿的切削顺序, 那么使用软件就可以计算出切削齿数目和冠部轮廓曲线上每切削齿中心的坐标。

(4) 考虑切削顺序确定每切削齿的周向角(刀翼号码)。

(5) 为了实现力平衡及抗涡旋设计, 用遗传算法调整刀翼的周向角。软件的切削齿布齿设计界面如图 3 所示。

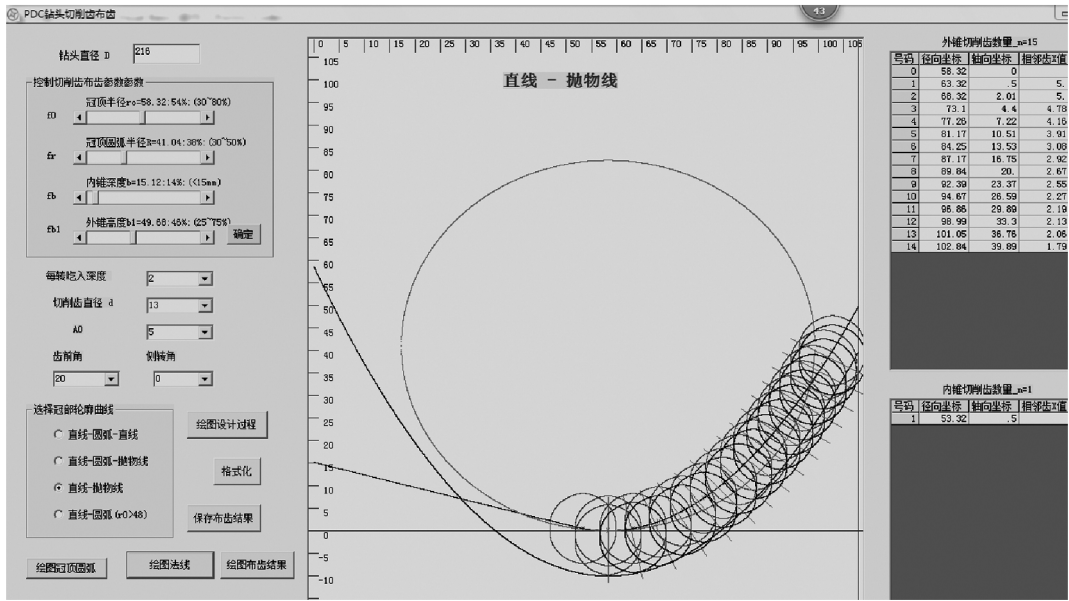


图 3 切削齿布齿设计界面

采用此方法进行内锥部分的切削齿布齿不太合适,因为一般内锥部分的冠部轮廓用直线,用本方法时布齿密度比别的方法高得多。

表 1 是各种冠部轮廓曲线上外锥部分切削齿中心的坐标。

从表 1 中可以看出,在给定的冠部轮廓因数条件下直线-圆弧-抛物线和直线-抛物线组合能满足内疏外密的原则,可是直线-圆弧-直线组合不能满足内疏外密的原则,所以要调整冠部轮廓曲线的因数。

### 3 设计特点

#### 3.1 新 PDC 钻头布齿设计的特点

(1) 经过任何切削齿投影中心的冠部曲线的法线就通过该齿刃工作区域的中心。

(2) 布齿设计过程中严密考虑切削顺序。

(3) 虽然可以满足内疏外密的布齿原则,但是本文里提出的布齿设计的重点在于提高钻进效率,而不在于提高钻头寿命;如果愿意提高某部位的布齿密度,要采用重叠的方式。

(4) 设计中切削齿尺寸、切削深度、冠部轮廓曲线方程、 $A_0$  的选择等因素都互相关联,而且都影响切削齿数量,所以设计过程中得慎重考虑。

(5) 决定冠部轮廓曲线方程的各因数时得考虑它们之间的关系。例如,冠顶半径与管顶圆弧半径

表 1 冠部轮廓外锥曲线上切削齿中心的坐标

号 码	直线-圆弧-直线			直线-圆弧-抛物线			直线-抛物线		
	X 向 坐标	Y 向 坐标	X 之 差	X 向 坐标	Y 向 坐标	X 之 差	X 向 坐标	Y 向 坐标	X 之 差
1	48.20	0.36	-	48.20	0.36	-	48.20	0.39	-
2	53.10	1.45	5.00	53.10	1.45	5.00	53.18	1.54	5.00
3	57.78	3.23	4.90	57.82	3.23	4.90	58.01	3.38	4.98
4	62.08	5.61	4.69	62.27	5.54	4.72	62.73	5.71	4.83
5	65.99	8.58	4.29	66.52	8.33	4.45	66.65	8.49	4.42
6	69.24	11.84	3.91	70.11	11.11	4.25	70.23	11.28	4.22
7	72.11	15.55	3.25	73.54	14.15	3.59	73.65	14.31	3.58
8	74.46	18.77	2.87	76.62	17.18	3.43	76.73	17.35	3.42
9	76.80	21.99	2.34	79.57	20.36	3.08	79.67	20.53	3.07
10	79.19	25.27	2.34	82.30	23.54	2.95	82.40	23.71	2.95
11	81.58	28.55	2.39	84.93	26.82	2.73	85.02	26.99	2.72
12	83.88	31.70	2.39	87.36	30.06	2.63	87.46	30.23	2.62
13	86.18	34.86	2.30	89.72	33.36	2.44	89.82	33.54	2.44
14	88.67	38.27	2.30	91.97	36.67	2.36	92.06	36.84	2.36
15	91.15	41.68	2.49	94.15	40.02	2.24	94.23	40.19	2.24
16	93.28	44.60	2.49	96.18	43.29	2.18	96.27	43.47	2.18
17	95.40	47.51	2.12	98.17	46.60	2.04	98.26	46.78	2.04
18	98.29	51.47	2.12	100.12	49.98	1.98	100.21	50.15	1.99
19	101.17	55.43	2.89	102.03	53.39	1.95	102.11	53.55	1.95
20	102.71	57.54	2.89						

注:钻头直径  $D = 216$  mm;冠顶半径  $r_0 = 43.2$  mm;内锥深度  $b = 16.2$  mm;外锥高度  $b_1 = 64.8$  mm;冠顶圆弧半径  $R = 34.56$  mm;切削齿直径  $d = 13$  mm;每转吃入深度  $\delta = 2$  mm;齿前角  $20^\circ$ ;侧转角  $10^\circ$ ;  $A_0 = 5$  mm。

的和一定小于钻头公称半径,即得满足条件  $r_0 + R < D/2$ 。

(6)并不是所有冠部轮廓曲线能够满足本论文上提出的设计思路。例如,对有些外锥高度接近钻头直径的65%~75%的冠部轮廓,随着靠近钻头外向部位不能实现本文的设计思想。这部位一般认为钻头上切削齿的磨损最严重的地方,如果发生这样的情况,应按照提高耐磨性的方法而进行布齿,避免过快的磨损,或者改变冠部轮廓曲线的因数,使得满足本文的设计思想。

### 3.2 新 PDC 钻头布齿设计的优点

(1)通过单切削齿实验,针对不同的地层已经确认最适合的切削参数的前提下,使钻头上布齿的所有切削齿都可以保持着最合理的切削参数进行切削;

(2)在切削齿布齿阶段中可以充分考虑切削先后顺序;

(3)可以避免 PDC 钻头切削齿基体井底干涉现象;

(4)给设计者探索合理的钻头冠部曲线提供可能;

(5)为 PDC 钻头动力学计算提供更正确的理论基础。

值得强调的是并不是所有冠部轮廓曲线能够满足本文提出的设计思路,笔者认为这意味着有些冠部曲线组合对提高 PDC 钻头的钻进效率不够适应。

## 4 结语

(1)通过单切削齿实验针对不同的地层已经确认最适合的切削参数的前提下,依据新 PDC 钻头布齿办法的实现,钻头上布齿的所有切削齿都可以保持着最合理的切削参数进行切削。

(2)新 PDC 钻头布齿办法可以同时满足井底覆盖、内疏外密的要求。

### 参考文献:

- [1] 杨庆理.复杂地层 PDC 钻头个性化设计及应用研究[D].山东东营:中国石油大学(华东),2007.
- [2] 邓敏凯,伍开松,胡伟. PDC 钻头切削齿破岩仿真与试验分析[J].石油机械,2014,(1):10-13.
- [3] 张绍和,谢晓红,王佳亮.复合片斜镶角对钻头钻进性能的影响[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,(1):171-175.
- [4] 蔡环. PDC 钻头关键设计参数优化研究[D].山东东营:中国石油大学(华东),2008.
- [5] 姜鑫,邹德永,王家骏,等. PDC 切削齿冲击载荷预测模型的试验研究[J].石油机械,2014,(4):1-3.
- [6] 王家骏,邹德永,杨光,等. PDC 切削齿与岩石相互作用模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,(4):104-109.
- [7] 田丰,杨迎新,任海涛,等. PDC 钻头切削齿工作区域及切削量的分析理论和计算方法[J].钻采工艺,2009,(2):51-53.
- [8] 王福修. PDC 钻头双圆弧冠部轮廓曲线研究[J].河南石油,2005,(2):61-63.

(上接第 71 页)

超过 3~10 个月后,锚固力逐渐趋于稳定,总体上呈现出递减的趋势,监测数据显示本工程锚索锚固力稳定时间在 6 个月左右,长时期监测表明,稳定后压力分散型锚索应力损失变化幅度很小。

(5)锚索应力监测作为一种信息化施工辅助手段可以用于指导边坡工程的施工,确保工程措施及时合理,保证边坡的安全稳定。同时通过监测边坡内部应力的调整变化,为判断边坡长期变形及稳定提供有效的依据。

### 参考文献:

- [1] 邓树密.压力分散型锚索在震后高边坡加固中的应用[J].四

川水力发电,2011,(5):101-105.

- [2] 谭建国,祁志强,曹继军.三峡库区地质灾害治理中预应力锚索施工的技术难点与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):184-186.
- [3] 王清标,路林海,王立华.压力分散型预应力锚索在高边坡滑坡处理施工技术[J].预应力技术,2006,(6):20-24.
- [4] 巩玉志,武换娥,袁志国,等.深基坑桩锚支护结构锚索轴力监测分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):66-68.
- [5] 王虎法.压力分散型锚索现场抗拔试验测试与分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,(6):47-49.
- [6] 陈宾杰,张有为.高速公路边坡工程预应力损失探讨[J].西部探矿工程,2007,(10):197-199.
- [7] 袁培进,吴铭江,陆遐龄,等.长江三峡永久船闸高边坡预应力锚索监测[J].岩土力学,2003,24(S1):198-201.
- [8] 韩侃.公路高边坡预应力锚索加固监测及分析[J].西部探矿工程,2008,(11):46-49.