

## • 探矿工程 •

# 空间定向钻孔轨迹设计

李巨龙 马植侃 (中国矿业大学资环学院 徐州 221008)

**摘要** 针对目前在煤层气勘探开发领域尚未解决的空间定向钻孔轨迹设计问题,提出了分支孔斜平面设计法。该法使空间定向钻孔设计简化为斜平面内定向钻孔设计。而斜平面内定向钻孔设计又可借助于垂直平面内定向钻孔的设计方法。因此,使用该法不仅解决了空间定向钻孔轨迹设计问题,而且方法简单,设计灵活。

**关键词** 定向孔 斜平面 设计

**中国图书资料分类法分类号** P634.2

**作者简介** 李巨龙 男 33岁 工程师 硕士 钻探工程

## 1 引言

煤层气勘探开发已成为当前世界能源工业的热点。但要成功地进行煤层气商业开发,其中一个必备条件就是要具备先进高效的开采技术,如钻井、完井等一系列技术工艺。在煤层气勘探领域中,采用先进的定向钻进技术不仅能节省大量钻探工作量,加快勘探开发速度,而且能减少大量地表工程。

目前定向钻孔轨迹设计方法多集中在垂直平面内,而在煤层气勘探开发中,为了充分利用地质规律,有时需要沿煤层定向钻进或超前勘探,以获得理想的地质和经济效果。垂直平面内定向钻孔有很大的局限性,满足不了工程施工多样化和复杂的要求,因此很有必要采用空间定向钻孔。本文运用有关数学理论,并针对矿层特点,按照钻孔遇层角以及造斜钻具的造斜特性,提出分支孔斜平面设计法,其目的是把空间定向钻孔轨迹简化在斜平面内,再借助于已经完善的垂直平面内定向钻孔轨迹设计方法来设计空间定向钻孔。一般情况下,主干钻孔轴线是一根直线,如主干钻孔轴线是一根斜直线,靶点不在主干孔的垂直平面内,则该轴线与分支孔(或造斜孔)所决定的平面是一个斜平面,在此斜平面内设计的空间定向钻孔轨迹方法则为分支孔斜平面设计法。

## 2 空间定向钻孔轨迹设计

在分支孔斜平面内设计空间定向钻孔,首先要求出分支孔斜平面的产状,继而计算分支孔轴线上任一点的坐标、顶角和方位角。

### 2.1 分支孔斜平面产状

如图 1,AB 为主干孔,BC 为分支孔,A、B、C 分别为开孔点、分支点和靶点。斜面 M 为矿层面,矿层倾角为  $\beta$ ,由主干孔 AB 和靶点 C 确定的平面 N 为分支孔斜平面,D 为主干孔与水平面 CFGH 的交点,E 为主干孔与矿层面 M 的交点。取靶点 C 为坐标原点 O;取过 C 点的矿体走向线(即矿层面与水平面的交线)为 x 轴,正向方位为  $\alpha$ ;取过 C 点的矿体

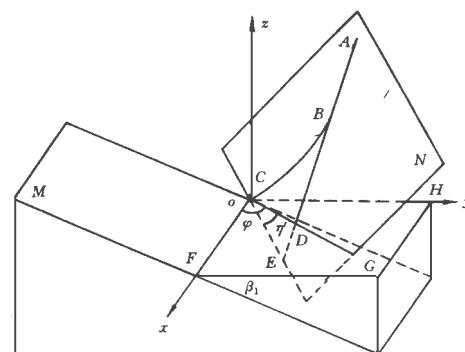


图 1 分支孔斜平面与矿层面相互关系

倾向线为  $y$  轴, 正向方位为  $\alpha = \alpha - 90^\circ$ ; 取过  $C$  点的铅垂线为  $z$  轴, 正向向上建立坐标系  $O-xyz$ 。定向孔设计时, 根据设计靶点位置、地层情况及造斜工具的造斜特性, 选定好开孔点  $A$  和分支点  $B$  的空间位置, 故在坐标系  $O-xyz$  中, 开孔点  $A$  和分支点  $B$  的坐标  $(x_A, y_A, z_A)$  和  $(x_B, y_B, z_B)$  均为已知。

### a. 分支孔斜平面方程

因分支孔斜平面  $N$  包含开孔点  $A$ , 分支点  $B$  和靶点  $C$ , 故分支孔斜平面方程为:

$$Ax + By + Cz = 0 \quad (1)$$

式中  $\begin{cases} A = y_A \cdot z_B - z_A \cdot y_B, \\ B = x_B \cdot z_A - x_A \cdot z_B, \\ C = x_A \cdot y_B - x_B \cdot y_A. \end{cases}$

### b. 分支孔斜平面倾角 $\beta$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{|C|}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (2)$$

### c. 分支孔斜平面走向 $\alpha_D$

$$\alpha_D = \alpha + \tan^{-1}(-A/B) \quad (3)$$

### d. 矿层面方程

$$y \cdot \tan \beta + z = 0 \quad (4)$$

### e. 分支孔斜平面与矿层面夹角 $\omega$

$$\omega = \cos^{-1} \frac{B \cdot \sin \beta + C \cdot \cos \beta}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (5)$$

**f. 矿层面假倾角  $\eta'$**  矿层面假倾角是指分支孔斜平面分别与水平面和矿层面的交线的夹角  $\eta'$  (见图 1)。

$$\eta' = \cos^{-1} \frac{A^2 + B^2 - B \cdot C \cdot \tan \beta}{A^2 + B^2 \cdot \sec^2 \beta + (B - C \cdot \tan \beta)^2} \quad (6)$$

## 2.2 分支孔轨迹坐标

如图 2, 分支孔轴线  $BC$  在分支孔斜平面  $N$  内,  $A$  是开孔点,  $B$  是分支点,  $C$  是靶点,  $R$  是分支孔曲率半径。分支孔斜平面  $N$  与水平面  $OIJK$  交于直线

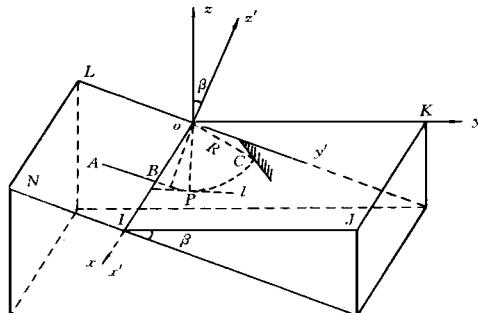


图 2 分支孔斜平面内钻孔轴线

$OI$ , 则  $OI$  为  $N$  的走向线;  $OL$  为  $N$  与铅垂面的交线;  $N$  的倾向线  $OK$  为水平面  $OIJK$  与铅垂面的交线;  $N$  的倾角为  $\beta$ 。下面重新建立坐标系  $O-x'y'z'$  (与图 1 坐标系  $O-xyz$  不同): 以分支孔曲率圆心  $O$  为坐标原点, 正向向上的铅垂线为  $Z$  轴;  $OI$  为  $X$  轴, 正向方位为  $\alpha_D$  (由式(3)求出);  $OK$  为  $Y$  轴, 正向方位  $\alpha = \alpha_D - 90^\circ$ 。为借助于垂直平面的定向钻孔设计方法, 在垂直平面内绕  $x$  轴同时旋转  $y$  轴和  $z$  轴, 使  $y$  轴在分支孔斜平面  $N$  内, 而  $z$  轴则垂直于  $N$  得到新坐标系  $O-x'y'z'$  ( $x$  轴即为  $x$  轴, 方向相同)。

图 3 是从图 2 中取出的分支孔斜平面  $N$ ,  $\eta'$  为矿层面的假倾角(由式(6)求出),  $QC = l$  是分支孔靶点与主干孔靶点的距离, 分支孔的弯曲强度为  $i$ 。

### 2.2.1 分支孔轴线上任一点 $P$ 在 $O-x'y'z'$ 中坐标

如图 3, 取分支孔轴线上任一点  $P$ , 假设  $BP = L_P$ , 则  $P$  点假顶角  $\theta'_P$  为:

$$\theta'_P = 57.3 L_P / R + \theta'_A \quad (7)$$

式中  $\theta'_A = \cos^{-1}(\cos \theta / \sin \beta)$ ;

$\theta$  —— 主干孔开孔顶角, 度;

$\beta$  —— 分支孔斜平面倾角, 度。

故  $P$  点在坐标系  $O-x'y'z'$  中的坐标为  $(x'_P, y'_P, 0)$ 。

其中  $\begin{cases} x'_P = R \cdot \cos \theta'_P, \\ y'_P = R \cdot \sin \theta'_P. \end{cases}$

式中  $R = 57.3/i$ 。

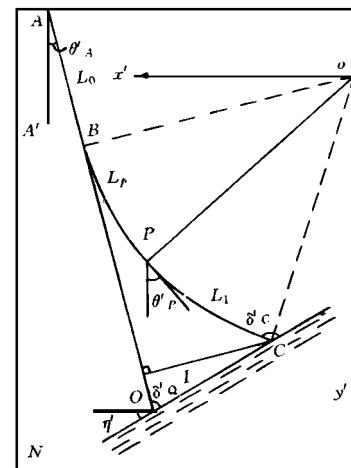


图 3 分支孔斜平面内弯曲型定向孔轴线

## 2.2.2 分支孔轴线上任一点P在O-xyz中的坐标

通过O-x'y'z'和O-xyz两坐标系的坐标转换关系得到分支孔轴线上任一点P在O-xyz坐标系中的坐标为( $x_P, y_P, z_P$ ),且有:

$$\begin{cases} x_P = x' \\ y_P = y' \cdot \cos \beta \\ z_P = -y' \cdot \sin \beta \end{cases}$$

## 2.3 分支孔轴线上任一点的顶角和方位角

如图2,在O-xyz坐标系内,过分支孔轴线上任一点P作曲线BC的切线l,则切线l与z轴的夹角即为曲线上任一点P的顶角 $\theta$ ,得:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x_P \cdot \sin \beta}{x_P^2 + (y_P \cdot \cos \beta - z_P \cdot \sin \beta)^2} \quad (9)$$

式中  $x_P, y_P, z_P$  由式(8)求出;  $\beta$  由式(2)求出。

若过切线l作一垂直面与水平面Oxy的交线为m,则m与x轴的夹角 $\alpha$ 为:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{y_P^2 + z_P^2}{x_P^2 \cdot y_P^2 + (y_P^2 + z_P^2)^2} \quad (10)$$

已知x轴的正向方位(即分支孔斜平面走向) $\alpha_D$ ,则可求得分支孔轴线上任一点P的方位角 $\alpha$ :

$$\alpha = \alpha_D + \alpha \quad (11)$$

式中  $x_P, y_P, z_P$  由式(8)求出;  $\alpha_D$  由式(3)求出。

## 2.4 空间定向钻孔设计应用

现以弯直型分支孔为例,如图4,弯直型分支孔BCD在分支孔斜平面N内,θ是主干孔开孔点A的假顶角,B是分支点,D是靶点。已知主干孔靶点垂深 $H_Q$ ,遇层角 $\delta_Q$ ,分支孔靶点与主干孔靶点的

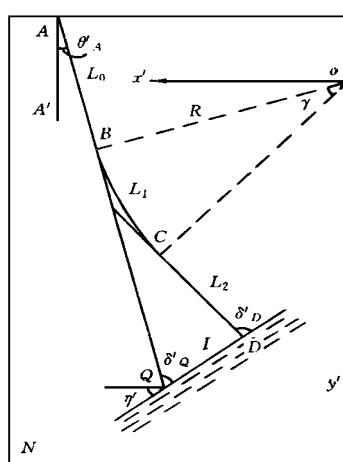


图4 分支孔斜平面内弯直型定向孔轴线

距离 $QD = l$ ,分支点的孔深 $L_0$ 和分支孔弯曲段弯曲角 $\gamma$ ,求分支孔弯曲强度 $i$ ,分支孔总长度 $L_1 + L_2$ ,分支孔各点的顶角和方位角。

a. 分支孔弯曲段曲率半径 $R$ 为:

$$R = \frac{BQ \cdot \sin \gamma - l \cdot \sin(\delta_Q + \gamma)}{2 \sin^2(\gamma/2)} \quad (12)$$

式中  $BQ = (H_Q / \cos \theta) - L_0$ ;

$$\delta_Q = \sin^{-1}(\sin \delta_Q / \sin \omega)$$

$\delta_Q$  -- 主干孔靶点的假遇层角,度;

$\omega$  -- 分支孔斜平面与矿层面夹角,度。

b. 分支孔弯曲段弯曲强度 $i$ 为:

$$i = 57.3 / R$$

c. 分支孔总长度 $L$ 为:

$$L = L_1 + L_2 = \frac{\gamma + l \cdot \sin \delta_Q - 114.6 \sin^2(\gamma/2)}{\sin \gamma} / i \quad (13)$$

d. 分支孔弯曲段上任一点P坐标由式(8)求出。

e. 分支孔弯曲段上任一点顶角 $\theta$ 和方位角 $\alpha$ 分别由式(9)和式(11)求出。

f. 分支孔直线段的顶角 $\theta$ 和方位角 $\alpha$ 分别为:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x_c \cdot \sin \beta}{x_c^2 + (y_c \cdot \cos \beta - z_c \cdot \sin \beta)^2};$$

$$\alpha = \alpha_D + \cos^{-1} \frac{y_c^2 + z_c^2}{x_c^2 \cdot y_c^2 + (y_c^2 + z_c^2)^2}.$$

式中  $x_c, y_c, z_c$  -- 弯曲段分界点的坐标;

$\beta$  -- 分支孔斜平面倾角,度;

$\alpha_D$  -- 分支孔斜平面走向,度。

## 3 实例

例1 某空间定向钻孔采用分支孔斜平面设计法设计。已知主干孔顶角 $\theta = 6^\circ$ ,主干孔靶点垂深为320 m,主干孔靶点遇层角为 $40^\circ$ ,分支点孔深180 m,分支孔靶点与主干孔靶点距离为25 m,分支孔斜平面产状经计算后为:倾角 $\beta = 86^\circ$ ,走向 $\alpha_D = 150^\circ$ ,矿层面假倾角 $\eta = 40^\circ$ ,分支孔斜平面与矿层面的夹角 $\omega = 86^\circ$ 。若分支孔设计成弯曲型,求分支孔弯曲强度 $i$ ,长度 $L_1$ ,各点的顶角和方位角,靶点遇运角 $\delta$ 。

由计算得出:分支孔弯曲强度 $i = 0.1^\circ/m$ ;长度 $L_1 = 124$  m;各点的顶角和方位角,如离分支点50 m

处钻孔顶角为  $11.2^\circ$ ; 方位角为  $170.5^\circ$ ; 离分支点  $100\text{ m}$  处钻孔顶角为  $17^\circ$ ; 方位角为  $163.2^\circ$ ; 分支点的顶角为  $19.8^\circ$ ; 方位角为  $161.2^\circ$ ; 靶点的遇层角  $\delta$  为  $69.1^\circ$ 。

例 2 已知数据与例 1 相同, 若定向孔设计成弯直型, 弯曲段弯曲角  $\gamma$  为  $10^\circ$ , 则求分支孔弯曲强度  $i$ , 总长度  $L$ , 弯曲段长度以及各点的顶角和方位角, 靶点的遇层角  $\delta$ 。

同样可以计算出:  $i = 0.2^\circ/\text{m}$ ;  $L = 123.8\text{ m}$ ; 弯曲段长  $62.5\text{ m}$ ; 另外可得到各点的顶角和方位角。如离分支点  $25\text{ m}$  处, 顶角为  $9.4^\circ$ ; 方位角为  $175.2^\circ$ ; 离分支点  $50\text{ m}$  处, 顶角为  $13.1^\circ$ ; 方位角为  $167.5^\circ$ ; 分支孔直线段各点的顶角为  $15^\circ$ ; 方位角为  $165.1^\circ$ ; 靶点遇层角  $\delta$  为  $64.3^\circ$ 。

## 4 结论

a. 定向钻进作为一种综合性钻进技术在各种工程领域有广泛的发展前景, 对煤层气勘探开发也

具有非常重要的意义。

b. 建立直线方程、圆弧孔段方程以及各种平面方程, 将空间定向钻孔轨迹设计抽象成空间点、线、面问题, 建立数学模型, 可求解出空间定向钻进中的许多问题。

c. 分支孔斜平面设计法以矿体产状, 开孔点和分支点的空间位置作为原始数据, 通过平面简化及转换, 不仅解决空间定向钻孔轨迹设计问题, 而且方法简单, 设计灵活, 便于施工控制, 有利于安全钻进。

## 参考文献

- 1 吴光琳, 汤顺德. 钻孔弯曲和定向钻探. 成都地质学院, 1984: 159~169
- 2 南开大学地质系. 空间角析几何引论(上册). 北京: 人民教育出版社, 1978: 44~68
- 3 H·奈茨. 数学公式. 北京: 海洋出版社, 1983: 214~218

(收稿日期 1996-10-03)

## TRACE DESIGN OF SPATIAL DIRECTIONAL WELL IN COALBED METHANE EXPLORATION

Li Julong Ma Zhikan (China University of Mining and Technology)

**Abstract** With respect to the trace design of spatial directional well which is not solved yet in the field of coalbed methane exploration and development, the inclined plane design method of branch well is presented. Using this method, the design of spatial directional well could be simplified as a design of directional well in inclined plane, while the latter could use the design method of directional well in vertical plane. Therefore, this method not only solves the trace design of spatial directional well, but also is simple and flexible in design.

**Keywords:** directional well; inclined plane; design

## 海相动物群在拴马桩煤系层型剖面上的发现

拴马桩煤系是孙健初于 1934 年为位于华北地台北缘的石炭二叠纪含煤地层提出的一个术语, 层型剖面位于内蒙古自治区乌拉特前旗大余太镇之北  $5\text{ km}$ 、色尔腾山南坡的拴马桩沟。根据我们新实测的相型—地层剖面, 该煤系总厚  $1099.3\text{ m}$ , 自下而上由下余太组、上余太组和拴马桩组等 3 个岩石地层单位组成。其中含煤层( $0.3\sim2.5\text{ m}$ ) 30 余个。

拴马桩煤系由陆源碎屑沉积物构成。由于未发现石灰岩层和海相动物化石, 我国学者一直将其视为“内蒙地轴”上山间盆地的纯陆相沉积。此次重新研究中, 我们在下余太组和上余太组采获一批海相双壳类化石, 主要有 *Schizodus shan-*

*siensis* Chao, *S. Sinensis* Liu, *Pterinop ectinella kalamailiensis* Yang, *Sedgwickia attenuata* M. Coy, *Sanguinolites shiqiantanensis* Yang, *Wilkingia regularis* (King) 等; 此外, 还有一些难于确定种名的腕足类碎片。沉积学综合研究表明, 该剖面在垂向上代表着一个从海湾泻湖—障壁岛沉积(下余太组)开始, 经过三角洲沉积体系(上余太组), 并以曲流河沉积(拴马桩组)告终的沉积序列, 古流总体指向北。上述事实证明, 层型剖面的拴马桩煤系并非都是纯陆相沉积, 它可能是与蒙古海槽有关的弧后盆地沉积。

(煤炭科学研究院西安分院 张泓)