

文章编号: 1000-7598 (2011) 06-1620-06

封闭式可缩性金属支架解析计算

蒋斌松, 冯 强, 王 涛, 刘志强

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 对于深埋、软弱矿山巷道, 可缩性金属支架是常用的支护形式, 以适应围岩发生较大变形及其压力。针对封闭式可缩性金属支架, 考虑在较大荷载作用下或围岩产生较大变形情况下支架节产生缩动时, 进行其内力的计算。实际上, 地下结构为超静定结构, 支架缩动为非可逆过程, 且缩动后支架形状会产生变化、卡缆将限制支架变形, 这些都将使支架产生残余内力。通过计算支架的缩动残余内力、卡缆作用残余内力和荷载作用内力, 并相叠加, 进而获得支架缩动后支架的真实内力, 从而为可缩性支架的设计计算提供依据。

关 键 词: 可缩性金属支架; 残余内力; 卡缆; 支架内力

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

Mechanical analysis of close type yieldable steel support

JIANG Bin-song, FENG Qiang, WANG Tao, LIU Zhi-qiang

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Yieldable steel supports are common support forms in deep and weak roadways of a mine, to accommodate the large deformation of their surrounding rocks. The internal forces of a close type yieldable steel support are calculated, in which the support nodes are yielded in the cases of the great loads or large deformation of the surrounding rocks of a roadway. Actually, the underground structure is a hyperstatical structure. The yielding of the support is an irreversible process. And the shape of the support would be changed and the deformation of support would be limited by the atapes of the support nodes after yielding. So, they would produce the internal force in the yieldable steel support. The true internal force of the support after yielding could be got by calculating the residual internal forces due to the yielding of support and the staple's limited and by adding the internal force due to loads. The results provide a theoretical basis for the design and calculation of yieldable steel supports.

Key words: yieldable steel support; residual internal force; staple; internal force of support

1 前 言

矿用 U 型钢可缩性支架由于其在承受较大荷载时产生缩动, 适合于围岩变形量大的软岩巷道和受采动影响的采准巷道, 因而得到广泛的应用。但已有的 U 型钢可缩性支架内力的计算方法^[1], 未反映出“可缩性”这个主要特点, 其计算方法只能用于支架缩动前, 而不能用于缩动后。

事实上, 支架是由支架节通过卡缆搭接而成, 由于卡缆预紧拉力的作用, 支架节间的滑动, 即支架缩动是不可逆的, 因此支架缩动将在支架内产生内力, 该内力称为缩动残余内力, 与支架受到的外荷载无关。此外, 支架缩动后支架形状及其曲率将

发生变化, 若没有卡缆作用, 在缩动处支架节将出现分离。显然, 卡缆将限制支架发生分离, 从而使支架产生内力, 这称为卡缆作用残余内力。因地下结构为超静定结构, 支架安装后对支架节施加预紧力, 使支架产生残余内力, 文献[2]称为卡缆预紧残余内力。因此支架缩动后的总内力应由 3 部分组成: 缩动引起的残余内力、卡缆作用引起的残余内力和外荷载引起的内力。

文献[3-4]针对 3 节半圆拱和 3 节 3 心拱直腿可缩性支架, 分析了缩动引起的支架形状变化, 分别采用解析方法和有限元数值方法建立了缩动残余内力的计算方法。文献[5]针对 3 节直腿可缩支架, 将支架搭接段按等效截面处理, 进行了支架缩动内力

收稿日期: 2009-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 50774082)。

第一作者简介: 蒋斌松, 男, 1961 年生, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事岩石力学理论与应用研究。E-mail: jiangbs@cumt.edu.cn

计算,但是没有考虑支架缩动后其形状的变化,文献[6]进行了支架初始缩动条件的分析。然而,这些研究及分析结果不能反映封闭式可缩性支架的特点,如封闭式可缩性支架与拱形直腿可缩性支架相比,二者的超静定次数不同、缩动后支架的形状和曲率变化都不相同。因而有必要对封闭式可缩性支架内力进行系统地分析和建立计算方法。

在地压、变形特别大的软岩和深部巷道常常需要采用封闭式可缩性支架,此外,如北京昊华能源股份有限公司长沟峪煤矿在急倾斜煤层开采过程中将圆形封闭式可缩性支架通过轴向钢梁连接可成为悬式结构,以便在开采工作面通过时维持石门巷道运输畅通,达到开采顺利、节省石门保护煤柱。封闭式支架有圆形、环形和马蹄形等形式,支架搭接段有4节、5节和6节等^[7]。考虑到加工和受力性能等方面,实际应用中所采用的封闭式可缩性支架更多的是圆形,图1(a)为4节圆形封闭式可缩性支架,其支架节搭接段横截面如图1(b)所示。

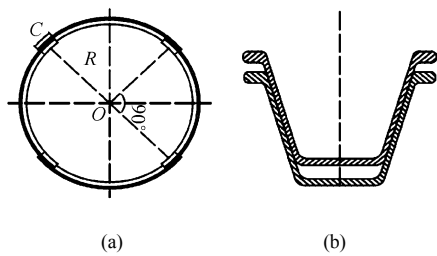


图1 圆形封闭式可缩性支架
Fig.1 Circular close type yieldable steel support

本文针对圆形封闭式可缩性金属支架,着重于建立支架节产生缩动时内力的计算方法,以期完善可缩性金属支架的计算理论,并为其设计计算提供依据。对于不同的地面结构,地下结构由于受围岩的约束作用,需要充分考虑其结构、变形特征才能真正反映出地下结构的真实受力特性,充分揭示和利用地下结构的承载性质,以维护地下工程的稳定与安全^[8-10]。

2 缩动残余内力计算

对于图1(a)中4节圆形封闭式U型钢可缩性支架,设支架结构曲率半径为 R ,某一支架节如搭接段 C 缩动量为 S 。本章节分析支架节产生缩动量 S 后支架所产生的残余内力。

封闭式地下结构实际是一个3次超静定问题,但由于支架结构形状对称,支架中不产生剪力内力,仅产生轴力和弯矩内力。在进行支架缩动残余内力计算时问题实际为2次超静定,即结构有2个

多余未知力。

采用力法进行多余未知力计算,即取内力轴力和弯矩为多余未知力,基本体系如图2所示,其轴力和弯矩分别用 x_1 、 x_2 表示。本文规定支架轴力受拉为正,受压为负,弯矩是使支架内侧受拉为正,反之为负。

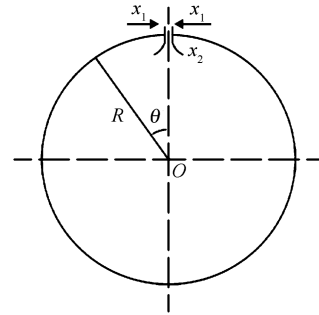


图2 缩动残余内力计算基本结构
Fig.2 Elementary structure to calculate the yield residual internal force

根据基本体系在缩动点应满足位移协调条件,其力法方程^[11]为

$$\begin{cases} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 = S \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_{ij} = \delta_{ji} = \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} ds, (i, j = 1, 2) \quad (2)$$

式中: $\bar{M}_1$ 、 $\bar{M}_2$ 分别为单位力 $\bar{x}_1=1$ 和 $\bar{x}_2=1$ 在基本结构中任一截面产生的弯矩; ds 为积分线元, $ds=Rd\theta$,而 θ 为圆弧角; EI 为支架的抗弯刚度。在力法方程的系数计算式(2)及以下分析中忽略轴力和剪力的影响。

单位力 $\bar{x}_1=1$ 、 $\bar{x}_2=1$ 在基本结构中任一截面产生的弯矩 $\bar{M}_1$ 和 $\bar{M}_2$ 为

$$\bar{M}_1 = R(1 - \cos \theta); \quad \bar{M}_2 = 1 \quad (3)$$

在支架搭接段,抗弯刚度 EI 应不同于其他部位,但由于其长度相对于整个结构不大、其对支架内力的影响亦不大。故为了计算简便,在下面的分析计算中取 EI 不变。

将式(3)代入式(2)有

$$\delta_{11} = \frac{3\pi R^3}{EI}; \quad \delta_{22} = \frac{2\pi R}{EI}; \quad \delta_{12} = \delta_{21} = \frac{2\pi R^2}{EI} \quad (4)$$

将系数式(4)代入力法方程式(1)可得

$$x_1 = \frac{SEI}{\pi R^3}; \quad x_2 = -\frac{SEI}{\pi R^2} \quad (5)$$

根据多余未知力 x_1 和 x_2 ,支架缩动引起的残余内力弯矩 M_s 为

$$M_s = x_1 \bar{M}_1 + x_2 \bar{M}_2 \quad (6)$$

将式(3)、(5)代入式(6), 支架缩动引起的残余内力 M_s 可表示为

$$M_s = -\frac{SEI}{\pi R^2} \cos \theta \quad (7)$$

即为支架节缩动 S 后由于缩动不可逆而引起的支架残余内力弯矩的计算公式。

3 卡缆作用残余内力计算

可缩性支架是通过支架节搭接而成。在支架缩动前, 圆形支架可用同一的曲率半径 R 表示, 而支架节每次缩动量一般不小于 100~200 mm, 累计缩动量有时可达 1~2 m 以上, 因此其缩动量不能作为小变形, 以致圆形支架的曲率半径将发生变化。若没有卡缆作用, 支架的曲率半径发生变化后, 支架节在搭接段将要产生分离, 如图 3 所示。

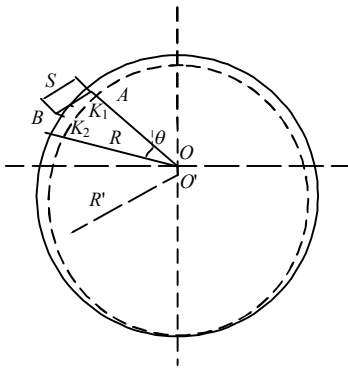


图 3 支架节分离及卡缆作用
Fig.3 Apart support node and staple's effect

实际工程中, 为保证支架具有较好的整体性和并能控制其可缩量, 安装支架时都要对卡缆施加一定的预紧力。而支架出现缩动或卡缆失效支架节分离量较大时, 会继续拧紧卡缆, 以使支架保持稳定并仍具有一定的承载能力。这样认为支架缩动后卡缆具有足够的预紧力仍可使支架节保持接触。显然, 卡缆作用将使支架内产生残余内力。卡缆作用产生的残余内力计算分 2 步进行。

(1) 计算缩动后支架节分离量

支架节分离量是指支架缩动后其曲率半径发生变化而无卡缆约束时支架节的自然张开量。

设在支架搭接段 C 处支架节缩动量为 S , 则缩动后支架的曲率半径 R_s 为

$$R_s = R - \frac{S}{2\pi} \quad (8)$$

根据图 3, 缩动后支架节分离量 U_s 为

$$U_s = R - R_s = \frac{S}{2\pi} \quad (9)$$

(2) 支架残余内力计算

根据图 3, 设支架节缩动后在自然状态下的分离点为 A , 端点为 B , 卡缆作用是使上支架节 AB 与相应下支架节相接触, 这时卡缆作用力所产生的支架内力, 就是卡缆作用残余内力。显然, 上、下支架节在 A 的相互作用可按铰结点处理, 则问题可化为在对卡缆施加作用力 (该作用力可以是支架装配时卡缆预紧力的一部分, 或者是支架缩动后再施加的力), 使支架节在 B 产生相对位移 U_s 。

设支架节在铰 A 点相互之间的传递力为 x_1 、 x_2 , 所需施加的卡缆拧紧力为 x_3 , 即采用的基本结构如图 4 所示。

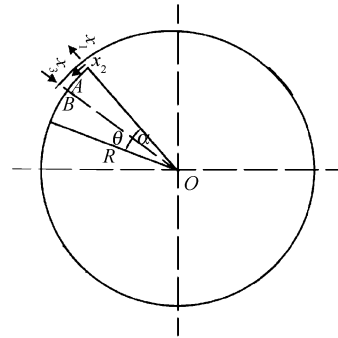


图 4 卡缆作用内力计算基本结构
Fig.4 Elementary structure to calculate the internal force arising from the staple's effect

由位移协调条件可得力法方程:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \delta_{13}x_3 &= 0 \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \delta_{23}x_3 &= 0 \\ \delta_{31}x_1 + \delta_{32}x_2 + \delta_{33}x_3 &= U_s \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\delta_{ij} = \delta_{ji} = \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} ds, \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (11)$$

式中: $\bar{M}_i$ ($i=1, 2, 3$) 为单位力 $\bar{x}_i=1$ 作用下基本结构中的弯矩, 即

$$\bar{M}_1 = \begin{cases} R \sin \theta, & (0 \leq \theta \leq 2\pi) \\ 0, & (2\pi \leq \theta \leq 2\pi + \alpha) \end{cases} \quad (12)$$

$$\bar{M}_2 = \begin{cases} R(1 - \cos \theta), & (0 \leq \theta \leq 2\pi) \\ 0, & (2\pi \leq \theta \leq 2\pi + \alpha) \end{cases} \quad (13)$$

$$\bar{M}_3 = \begin{cases} 0, & (0 \leq \theta \leq \alpha) \\ R \sin(\theta - \alpha), & (\alpha \leq \theta \leq 2\pi + \alpha) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\alpha = S/(2\pi R - S)$ 。

将式(12)~(14)代入式(11)有

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} = \delta_{33} &= \frac{\pi R^3}{EI}; \quad \delta_{22} = \frac{3\pi R^3}{EI}; \quad \delta_{12} = \delta_{21} = 0 \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= \frac{R^3}{EI} \left[\left(\pi - \frac{\alpha}{2} \right) \cos \alpha + \frac{1}{2} \sin \alpha \right] \\ \delta_{23} = \delta_{32} &= \frac{R^3}{EI} \left[\left(\pi - \frac{\alpha}{2} \right) \sin \alpha + 1 - \cos \alpha \right] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将系数表达式(15)代入力法方程式(10), 并解该代数方程组可得到未知力 x_1 、 x_2 、 x_3 :

$$x_1 = -3\delta_{13}\Delta; \quad x_2 = -\delta_{23}\Delta; \quad x_3 = 3\delta_{11}\Delta \quad (16)$$

式中: $\Delta = \delta_{11}U_s / (3\delta_{11}^2 - 3\delta_{13}^2 - \delta_{23}^2)$ 。

由多余未知力式(16), 利用叠加原理, 可得到相应的支架内力:

$$M_k = x_1\bar{M}_1 + x_2\bar{M}_2 + x_3\bar{M}_3 \quad (17)$$

即为支架缩动后卡缆限制支架节分离所产生的残余内力弯矩的计算式。

支架搭接部位通常设有 2 付卡缆, 有时有 3 付, 实际固定支架一般是交替对各个卡缆施加拧紧力。而对卡缆施加拧紧力的顺序也会影响支架内总的卡缆作用残余内力, 但按照上述计算方法可以把各个卡缆所对应的拧紧残余内力相叠加来得到总的卡缆作用残余内力, 只要在上述有关式中将卡缆所对应的圆弧角 α 作相应调整即可。

将由(7)计算的缩动残余内力 M_s 与由式(17)计算的卡缆作用残余内力 M_k 相叠加, 即为支架缩动后的总残余内力 M_z , 即

$$M_z = M_s + M_k \quad (18)$$

可缩性支架的真实内力应由支架缩动后的总残余内力与荷载作用产生的内力相组成。

4 荷载作用内力计算

支架受到的荷载极其复杂, 与原岩应力、地层构造、岩性以及施工方法、工艺等多种因素有关, 荷载不清也一直是困扰地下结构设计计算的一大问题。支架荷载在确定情况下其内力计算可直接采用结构力学方法获得。但为了论文完整, 这一节仍说明在外荷载作用下支架内力的计算方法。假定支架缩动后受到均布竖向和侧向荷载 p 、 q (该荷载显然不同于缩动前的支架荷载), 如图 5 所示。图 5 为一个 3 次超静定问题, 但结构及荷载具有两个对称轴, 故可取 1/4 结构来分析, 计算简图见图 6(a), 仅为一次超静定。取基本结构见图 6(b), 多余未知力为弯矩 x_1 。

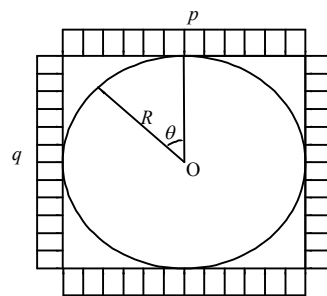


图 5 支架荷载
Fig.5 Support loads

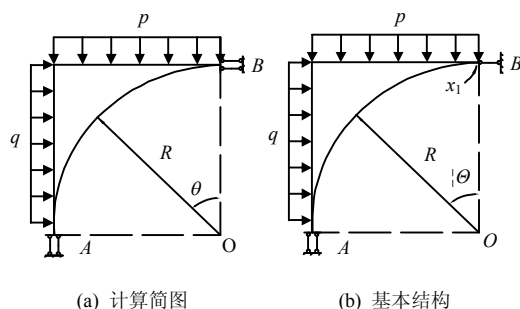


图 6 计算简图和基本结构
Fig.6 Calculation sketch and elementary structure

图 6(b)所示问题的力法方程为

$$\delta_{11}x_1 + \Delta_{1h} = 0 \quad (19)$$

$$\delta_{11} = \int \frac{\bar{M}_1^2}{EI} ds; \quad \Delta_{1h} = \int \frac{\bar{M}_1 \bar{M}_h}{EI} ds \quad (20)$$

式中: $\bar{M}_1$ 、 $\bar{M}_h$ 分别为单位力 $\bar{x}_1 = 1$ 和荷载 p 、 q 作用下基本结构中的弯矩, 即

$$\bar{M}_1 = 1; \quad \bar{M}_h = 0.5(q - p)R_s^2 \sin^2 \theta \quad (21)$$

将式(21)代入式(20), 再代入式(19)可得多余未知力 x_1 :

$$x_1 = 0.25(q - p)R_s^2 \quad (22)$$

由叠加原理, 利用式(22)、(21), 荷载 p 、 q 作用下支架内力弯矩 M_L 可表示为

$$M_h = 0.25(p - q)R_s^2 \cos 2\theta \quad (23)$$

支架缩动后总残余内力式(18)与荷载作用产生的内力式(22)相叠加, 可得支架总内力 M , 即

$$M = M_s + M_k + M_h \quad (24)$$

5 算例

取北京长沟峪煤矿 4 节圆形可缩支架 (对应图 1) 进行计算。支架为 29U 型钢, 有关计算参数为 $R = 1.7 \text{ m}$, $EI = 1.33 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 缩动量 $S = 0.1 \text{ m}$, 竖向及侧向荷载 p 、 q 分别取 200、100 kN/m。

根据式 (7)、(17)、(18)、(23)、(24) 可得支架缩动残余内力 M_s 、缩动后卡缆限制支架节分离产生的残余内力 M_k 、支架缩动引起的总残余内力 M_z 、荷载作用内力 M_h 和总内力 M 的分布规律, 如图 7 所示。由图可以看出, M_s 与 M_k 二者的方向 (符号) 相一致, M_z 为两者代数叠加, 这对支架受力非常不利, 其最大值均发生在支架缩动处。支架最大缩动残余内力 $M_{smax} = 44.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 最大卡缆作用残余内力 $M_{kmax} = 108.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 最大残余内力 $M_{zmax} = 152.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 荷载产生的最大内力为 $M_{hmax} = 129.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

支架残余内力与所受荷载无关, 为自平衡力。这意味着缩动残余内力 M_s 、卡缆作用残余内力 M_k 和总残余内力 M_z 可能使支架内侧受拉, 也可能使支架外侧受拉。而对于所给支架及荷载, 从图 7 (KB 为总位置) 可见荷载内力 M_h 是使支架内侧受拉。

支架总内力 M 或者是荷载内力与总残余内力数值相加或者是数值相减, 支架最大总内力 $M_{max} = 264.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (支架内侧受拉), 最小总内力 $M_{min} = 69.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (支架外侧受拉)。

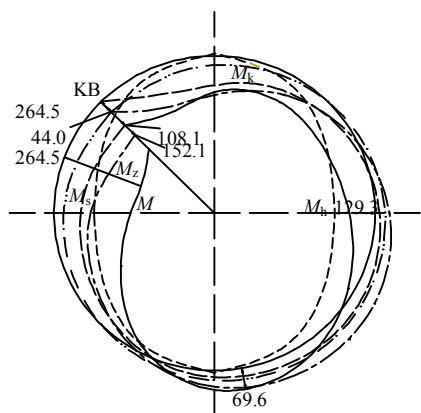


图 7 支架内力弯矩分布图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)
Fig.7 Distribution of support's internal bending moment diagrams(unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

6 结 论

(1) 基于支架缩动不可逆, 计算了缩动产生的支架残余内力。

(2) 在自然状态下 (无卡缆限制) 计算了缩动后支架节的分离量及支架曲率半径的变化, 并进而计算了卡缆限制该支架节分离所产生的残余内力, 即卡缆作用残余内力。

(3) 支架缩动后所产生的总残余内力弯矩, 由支架缩动内力弯矩和卡缆作用内力弯矩叠加而成;

对支架受力不利的是, 支架缩动内力弯矩和卡缆作用内力弯矩方向相同, 即支架的总残余内力弯矩为缩动内力弯矩和卡缆作用内力弯矩代数相加。本文给出了荷载作用内力弯矩的计算式。

(4) 支架的总内力由荷载作用内力和缩动引起的总残余内力叠加得到, 可能是数量相加, 也可能是数量相减, 意味着缩动引起的残余内力将使部分支架受力, 而另一部分受力有利。

(6) 算例显示, 缩动引起的总残余内力弯矩与荷载作用内力弯矩具有相同的数量级, 甚至出现数值更大的情形, 充分考虑支架缩动引起的残余内力对可缩性支架的设计计算是完全必要的, 且是必须的。可缩性金属支架的进一步研究作为, 缩动条件和缩动量的确定以及与围岩共同作用分析, 包括支架荷载的确定, 支架对围岩稳定的影响等。

参 考 文 献

- [1] 侯朝炯. 巷道金属支架[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [2] 蒋斌松. U 型钢可缩性支架的预应力分析[J]. 中国矿业, 1998, (2): 43—46.
JIANG Bin-song. Analysis of pre-stress force of yieldable U-steel support[J]. *China Mining Magazine*, 1998, (2): 43—46.
- [3] 蒋斌松, 陈子荫. 可缩性金属支架的计算理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(5): 493—503.
JIANG Bin-song, CHEN Zi-yin. Theory for calculation of yieldable steel arch[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(5): 493—503.
- [4] 蒋斌松, 王渭明. 可缩性金属支架的有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 145—154.
JIANG Bin-song, WANG Wei-min. Finite element method of yieldable steel arch[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(2): 145—154.
- [5] 尤春安. U 型钢可缩性支架缩动后的内力计算[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 604—607.
YOU Chun-an. Internal force calculation of U-supports considering yielding[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5): 604—607.
- [6] 尤春安. 可缩性金属支架初始缩动条件[J]. 煤炭学报, 1994, 19(3): 170—177.
YOU Chun-an. Analysis of yielding of yieldable U-steel support[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(3): 170—177.