也谈钻孔偏离勘探线时计算矿体厚度的方法

刘 德 正

钻孔偏离勘探线时计算矿体真厚度的公式，屡见于各种地质书刊。下面是作者所见到的一部分这种公式。

（1）列昂托夫斯基，1905年：

$$M = L_1(\cos\beta\cdot\sin\delta_1 + \sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma)$$

（2）波查里茨基等，1940年：

$$M = L_1\cdot\cos\left[\beta - \arctan\left(\frac{\tan\alpha_1}{\cos\gamma}\right)\right]\cos\gamma$$

或

$$M = L_1\cdot\cos(\beta - \alpha_1)\cos\gamma$$

（3）雷诺夫，1941年：

$$M = L_1\cdot\cos\beta\cdot\cos\delta_1(\tan\delta_1 + \tan\beta\cdot\cos\gamma)$$

（4）乌沙阔夫，1951年：

$$M = L_1\cdot\cos\left[(90^\circ - \beta_1)\pm\delta_1\right]\cos\beta\cdot\sec\beta_1$$

（5）周启荣，1957年：

$$M = L_1\cdot\sin\beta\cdot\cos\gamma(\mathrm{ctg}\beta_1\cdot\sin\delta_1 \pm \cos\delta_1)$$

（6）王士，1957年：

$$M = L_1\sqrt{\sin^2\delta_1 + \cos^2\delta_1\cdot\cos^2\gamma}\cdot\sin\left(\beta\pm\arcsin\frac{\sin\delta_1}{\sqrt{\sin^2\delta_1+\cos^2\delta_1\cdot\cos^2\gamma}}\right)$$

（7）朱显芝，1964年：

$$M = L_1\cdot\sin\theta_1$$

（8）周瑞，1965年：

$$M = L_1\cdot\sin\left|\beta_1\pm\delta_1\right|\frac{\cos\beta}{\cos\beta_1}$$

为了便于讨论，上面这些公式中的符号已统一规定为：

M —矿体（岩层）真厚度；

L_1—矿体视厚度（斜孔穿矿处的矿心长度）；

L —矿体视厚度在与矿体倾向一致的剖面上的投影；

β_1 —斜孔穿矿处的矿体视倾角；

β —矿体真倾角；

α_1—钻孔天顶角（孔轴与铅垂线的夹角）；

α —钻孔天顶角在与矿体倾向一致的剖面上的投影；

δ_1—钻孔倾角；

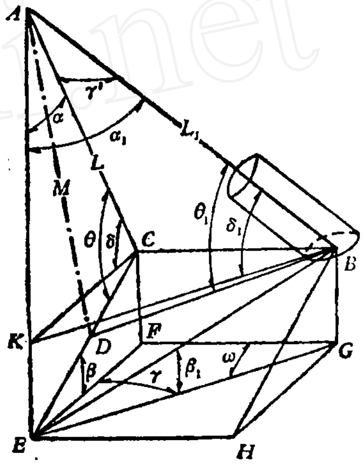
δ —钻孔倾角在剖面上的投影；

γ —斜孔轴线与矿体仰向线方位的夹角；

θ_1 —相遇角（孔轴与矿体层面的夹角），在矿心上为层面椭圆长轴与矿心轴线的夹角）；

θ —相遇角在剖面上的投影。

我们在钻孔编录和储量计算中，反复研究了这些公式后，得出了以下认识。



钻孔偏离剖面线时
矿体真厚度计算图解

公式的分类

按其原理和使用条件来说，这些公式可分为两类。朱显芝公式自成一类，它是根据岩矿心上测得的相遇角（岩心顶角、轴心角）来直接计算矿体真厚度的方法。如果量出了相遇角的余角（岩心倾角），真厚度即等于视厚度与岩心倾角余弦的乘积（可由朱式导出）。以列昂托夫斯基公式为代表的其余公式，应全部划为第二类，它们是根据矿体倾角、钻孔倾角（或天顶角）和钻孔与矿体方位的夹角来计算矿体真厚度的方法。

朱式和列式都是正确的。但在实际运用中，它们都各有其优缺点。

哪一个公式更实用？

根据我们的经验，这两类公式中，最实用的是朱显芝提出的公式。除了形式简单、便于记忆、计算方便、不易出错等特点外，其最大优点在于：矿心长度和相遇角这两个参数可直接由矿心测出。在一般情况下，它显然比用间接方法获得的(或由其他参数推算出来的)数据更真实和更可靠。同时，相遇角也是能反映钻孔与矿体相互关系的唯一实测数据，它恰恰是矿体倾角、钻孔倾角和它们的方位夹角的函数。该公式无需象其他公式那样，要先用别的方法得出矿体倾角、钻孔倾角（或天顶角）和它们的方位夹角之后，再经过烦琐的运算，才能求得矿体真厚度。特别是由于客观情况的复杂性，用直接或间接的方法（如常用的三点高程法等）求出斜孔穿矿处的矿体产状要素，往往不够准确。在地质构造十分复杂而研究程度又非常不足的情况下，这甚至是不可能的。

在矿体层理清晰可辨和界面较为规整时，朱式尤为适用。如果不能从矿心上准确测出相遇角θ_1，也可以根据矿体和钻孔的产状按下式把它算出：

$$\theta_1=\arcsin(\cos\beta\cdot\sin\delta_1+\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma)$$

但是这样做与列昂托夫斯基的方法已经没有什么区别，因此也无需再套入朱式计算了。

用朱式计算矿体真厚度时，为了提高精度，必须尽可能精确地测出相遇角θ。用地质罗盘或量角器多次反复测量虽然是一种正确的方法，但采用“纸条法”的效果有时更好。编制用“纸条法”换算相遇角的对照表，有助于提高工作效率和准确性。广大钻孔编录人员创造的这种行之有效的方法，应该不断总结，及时推广。

关于第二类公式

很多同志对列昂托夫斯基公式是有所了解的。根据本文插图，该式也是不难证明的。与

朱式相比，列式虽较为繁琐和精度较差，但在无法直接从矿心上量出相遇角（例如通过放射性测量来确定矿石与围岩的界限的一些铀矿）和因矿石构造不容准确测定相遇角时，它仍有一定的实际用途。这时，采用各种可能的方法去提高测定矿体产状的精确度，就成为使用列式的先决条件。

列式的表达方式很多。如果将式中的钻孔倾角δ_1改用不少同志惯用的天顶角α_1时，它可写为

$$M=L_1(\cos\beta\cdot\cos\alpha_1+\sin\beta\cdot\sin\alpha_1\cdot\cos\gamma)$$

如果用方位夹角的余角ω代替方位夹角γ，又可将该式写为

$$M=L_1(\cos\beta\cdot\sin\delta_1+\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\sin\omega)$$

或

$$M=L_1(\cos\beta\cdot\cos\alpha_1+\sin\beta\cdot\sin\alpha\cdot\sin\omega)$$

由于钻孔与矿体的方位夹角γ有不同的表示方法，所以又可以将列式化为不同的表达式。如果象前面说明的那样：方位夹角表示“斜孔轴线与矿体仰向线方位的夹角”，那么列式有前面提到的一种表达式就够了。因为当钻孔与矿体倾向夹角大于90度时，式中第二项为负值，这时由前项减去该项，即可求得真厚度。也就是说，

$$M=L_1(\cos\beta\cdot\sin\delta_1+\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma)$$

这一公式不论在矿体与钻孔倾向夹角是否大于90度时都是适用的。

如果方位夹角不都是从矿体仰向线算起（例如，可从矿体倾向线算起），可针对钻孔与矿体方位的不同关系写出不同的列式表达式。前面所举各式只适用于钻孔与矿体倾向夹角大于90度的情况。当这一夹角小于90度，且钻孔倾角大于矿体倾角时，列式可写为：

$$M=L_1(\cos\beta\cdot\sin\delta_1-\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma)$$

如这一夹角小于矿体倾角时，该式可写为：

$$M=L_1(\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma-\cos\beta\cdot\sin\delta_1)$$

综合以上几种情况，可将列式写为：

$$M=L_1\left|\cos\beta\cdot\sin\delta_1\pm\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma\right|$$

式中加减号的用法是：“反向相加，同向相减”。

根据我们的经验，方位角γ的这两种表达方法，只要运用得当，都是可行的。但是，其中以仰向线为起点的办法较好。

当然，由相遇角也可以按公式

$$\beta=\arccos\frac{\sin\theta_1\cdot\sin\delta_1\pm\cos\delta_1\cdot\cos\gamma\sqrt{\sin^2\delta_1-\sin^2\theta_1+\cos^2\delta_1\cos^2\gamma}}{\sin^2\delta_1+\cos^2\delta_1\cdot\cos^2\gamma}$$

或相应的列线图（诺模图）反算出矿体的真倾角。但如果将所得真倾角数值再套入列式求矿体真厚度，就未免是走弯路了。

其他公式与列式的关系

周启荣公式、雷诺夫公式与列式的一致性是一目了然的。别的公式尽管与列式在形式上不同，但实际上都是列式的变换式。

以周瑞公式为例。由列式可得

$$M=L_1\left|\cos\beta\cdot\sin\delta\pm\sin\beta\cdot\cos\delta_1\cdot\cos\gamma\right|$$

$$= L_1 \left| \cos\beta \cdot \sin\delta_1 \frac{\cos\beta_1}{\cos\beta_1} \pm \sin\beta \cdot \cos\delta_1 \cdot \cos\gamma \frac{\cos\beta_1}{\cos\beta_1} \right|$$

由于

$$\tan\beta_1 = \tan\beta \cdot \cos\gamma$$

即

$$\frac{\sin\beta_1}{\cos\beta_1} = \frac{\sin\beta}{\cos\beta}\cos\gamma$$

$$\sin\beta \cdot \cos\beta_1 \cdot \cos\gamma = \sin\beta_1 \cdot \cos\beta$$

所以

$$M = L_1 \left| \cos\beta_1 \cdot \sin\delta_1 \frac{\cos\beta}{\cos\beta_1} \pm \sin\beta_1 \cdot \cos\delta_1 \frac{\cos\beta}{\cos\beta_1} \right|$$

$$= L_1 \left| \cos\beta_1 \cdot \sin\delta_1 \pm \sin\beta_1 \cdot \cos\delta_1 \right| \frac{\cos\beta}{\cos\beta_1}$$

$$= L_1 \cdot \sin \left| \beta_1 \pm \delta_1 \right| \frac{\cos\beta}{\cos\beta_1}$$

再以王士公式为例。由于

$$M = L \cdot \sin \left| \beta \pm \delta \right|$$

$$L = L_1 \sqrt{\sin^2\delta_1 + \cos^2\delta_1 \cdot \cos^2\gamma}$$

$$\sin\delta = \frac{\sin\delta_1}{\sqrt{\sin^2\delta_1 + \cos^2\delta_1 \cdot \cos^2\gamma}}$$

所以

$$M = L_1 \sqrt{\sin^2\delta_1 + \cos^2\delta_1 \cdot \cos^2\gamma} \cdot \sin \left| \beta \pm \arcsin \frac{\sin\delta_1}{\sqrt{\sin^2\delta_1 + \cos^2\delta_1 \cdot \cos^2\gamma}} \right|$$

这些公式有的看起来比列式简单，但其计算程序往往与列式相同，或更加复杂。因此，与其采用这些公式，不如采用列式本身。

其实，列式的变换式还可以推导出相当多种。但是结果必将再次证实：凡是以矿体倾角为计算依据的矿体真厚度公式，都是列式的不同表达方式。

波查里茨基公式的错误

有人称之为斯米尔诺夫公式或雅克仁公式的计算方法，其实是波查里茨基等人提出来的。可以证明，该公式是错误的。但是，由于许多书刊和规范的盲目抄袭，使它的不良影响流传很广。关于这个问题，朱显芝① 曾群望③ 等同志已经从不同的方面做过详细论证。这里仅说明一下：该式的主要问题在于：将

$$L = L_1 \cdot \cos\gamma'$$

一式中的γ'误认为是γ，而在任何情况下γ'皆小于γ，所以计算结果总是偏低。而在其计算结果与按朱式或列式计算的结果相近时，波式实质上即与列式一致，但计算程序却并不比后者简单。显然，波查里茨基公式没有继续存在的必要。

几 个 实 例

〔例 1〕某区14号孔中灰岩层视厚度 5 米，相遇角78°30′。该层倾向40°，倾角25°。孔轴在该层中的方位角210°，顶角14°。

按朱式，

$$M=5\times\sin 78°30'=4.90米$$

按列式

$$M=5\times(\cos 25°\cdot\cos 14°+\sin 25°\cdot\sin 14°\cdot\cos 10°)=4.90米$$

按波式：

$$M=5\times\cos(25°-14°)\cdot\cos 10°=4.83米（偏低）$$

〔例2〕某矿区48号孔矿心长度13米，钻孔方位角230°，天顶角3°30，用“三点高程法”求得该处矿体倾向160°，倾角60°，矿心相遇角28°30′。

按朱式：

$$M=13\times\sin 28°30'=6.20米$$

按列式：

$$M=13\times(\cos 60°\cdot\cos 3°30'+\sin 60°\cdot\sin 3°30'\cdot\cos 110°)=6.25米$$

按波式

$$M=13\cdot\cos(60°-3°30')\cdot\cos 70°=2.45（偏低）$$

〔例3〕某远景区1号普查孔钻穿某表外矿层20米，相遇角40°。地表实测该层倾向10°，倾角70°。穿矿处钻孔方位角212°，顶角13°。

按朱式：

$$M=20\times\sin 48°=14.86米$$

按列式：

$$M=20(\cos 70°\cdot\cos 13°+\sin 70°\cdot\sin 13°\cdot\cos 22°)=10.63米$$

按波式：

$$M=20\cdot\cos(70°-13°)\cos 22°=10.11米$$

例3中按例式和波式计算的结果显著偏低（误差在28.5%以上），是由于钻孔穿矿处的矿体产状与地表测出的矿体产状不一致引起的，而这种情况是经常出现的。所以，当不得不使用列式时，应准确地测定矿体的产状。

主要参考文献

① 朱显芝：关于斜钻孔矿层或岩层真厚度计算方法之商榷。《中国地质》1964年第4期。

② 周瑞：钻孔及剖面上真厚度计算公式的探讨。《地质论评》第23卷第2期。

③ 曾群望等：根据钻孔资料计算矿体真厚度公式的探讨。《地质与勘探》1974年第8期。

④ 斯米尔诺夫B.И.：矿物原料储量计算。地质出版社1956年中文版。

（上接第24页）

隐伏花岗岩距地表的深度直接影响围岩大理岩化白云岩化夕卡岩化的强度，故围岩蚀变强度也可作为鉴定具隐伏花岗岩体的“穹隆体”存在的间接标志。

4.“穹隆体”是预测大型成矿区的可靠依据，在此基础上，还需要有相应的细部构造的调查，含矿围岩分析，蚀变范围和强度的圈定，隐伏花岗岩体各峰波具体位置的测定，接触形态的了解等等工作与之配合，才能收到多、快、好、省找到隐伏矿床的效果。

5.“穹隆体”构造体系的格局规模、展布大小、体系完整性，对成矿规模具有明显的相关关系。格局宏伟，展布舒大，体系完整成矿规模则大。

总结全文：黄一老“穹隆体”是已知大型矿区；天一荷“穹隆体”属预测大型新矿区，同具有文中所阐述的共同特点。