

钻孔弯曲的防治及在一定条件下各种定向钻孔的应用,是钻探技术中的重大课题。根据钻进方法、钻孔深浅、钻孔所通过的岩层地质情况,钻孔所产生的自然弯曲不同。无论在国内和国外,都进行了大量实践,在此

基础上的理论研究工作,也取得了不少进展。

本文从实践出发,联系有关情况,就钻孔自然弯曲规律的应用问题,提出些初步看法。

广东新会某钨区钻孔弯曲情况

表 1

脉号	线号	孔号	孔深(米)	倾角			方位		
				开孔(°)	终孔(°)	影响中段(±米)	开孔(°)	终孔(°)	脱线偏距(±米)
V ₁	1	1	132.84	69	68	+10.5	225	235	右4
	8	8	217.36	70	68	-9	225	247	右11.5
		4	232.84	70	64	+4	225	268	右27
	5	5	220.21	70	63	+3.5	225	239	右6.5
	7	7	195.42	74	73	-37	225	241	右9.5
		8	186.62	70	70	-13	225	200	右24
9	9	86.88	69	63	+11	225	232	右2	
V ₂	2	11	115.60	71.5	69	+15.5	220	226	左2
		12	170.94	76	69.5	-3.5	220	226	右2
	4	13	172.89	70.5	63.5	+16	218	220	右0.5
		14	234.73	70	60	+1	217	227	左2.5
	6	15	216.28	76.5	70	+7.5	223	235	右3.2
		16	286.00	75	55°40'	+5.5	217	227	左1.5

钻孔自然弯曲规律的实际应用

在广东新会某钨矿区的实践^[1] 我们在该矿区的两条主矿脉V₁、V₂上共施工了13个钻孔,其情况见表1。

该矿床系燕山期酸性花岗岩中的黑钨矿,赋存于石英脉中。矿体走向N45°W,倾向NE,倾角85°~90°。上部地层以中细粒花岗岩为主。可钻性7~8级。节理发育,成矿前和成矿后两组节理接近垂直。成矿前的节理走向NW,倾向NE、SW,倾角85°~90°;成矿后

节理,以走向N38°~70°E,倾向SE、SW,倾角62°~82°的一组较多。经259次测定,按施密特赤平投影法作图,如图1。

除表土外,均用钢砂钻进,终孔口径φ110毫米。网度100×60,80×60米。

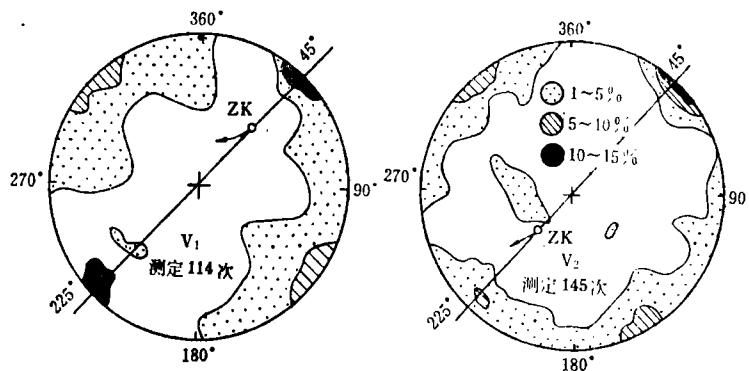


图 1 广东新会某钨矿区V₁、V₂脉定向节理等密度图

V₁脉未利用自然弯曲规律的七个钻孔，方位超差的三个，倾角超差的五个，其中一个钻孔（7号）只能作为下一中段的参考孔。

在分析V₁脉七个钻孔测斜资料和矿体主要围岩—花岗岩的定向节理发育情况的基础上，得出如图2所示的统计规律。分析所得经验曲线得出：

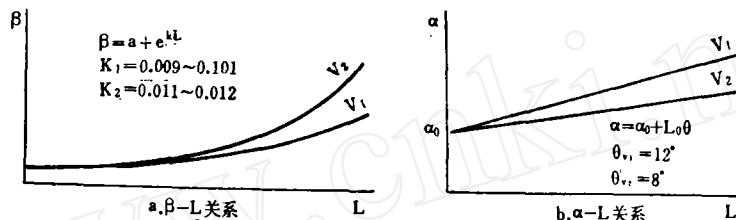


图2 广东新会某钨矿区钻孔自然弯曲规律

1. 钻孔顶角上漂值随孔深增加，呈指数增长规律。其经验方程为

$$\beta = a + e^{kL}$$

式中 β —钻孔顶角上漂值，度； L —孔深，米； e —自然对数底； k —系数，取决于所钻岩石的物理机械性质、钻进异向性、钻孔及钻具结构、钻进参数； a —待定常数，由曲线反推， $a = -1$ 。

2. 钻孔方位右偏值随孔深增加，呈线性增长规律。其经验方程为 $\alpha = \alpha_0 + L \cdot \theta$

式中 α —钻孔在任意孔深下的方位角，度； α_0 —开孔方位角，度； L_0 —钻孔的等价深度，无量纲，孔深100米， $L_0 = 1$ ；200米， $L_0 = 2$ 等等。

根据上述认识，我们开始施工V₂脉钻孔。顶角设计，按指数规律；方位角设计，按线性规律的中值左扭。同时规定，施工中的钻具组合技术措施，仍按V₁脉的常规执行，不得改变。

一开始我们就发现，V₂脉的顶角上漂值大于V₁脉，方位右偏值则小于V₁脉。在加强测斜观测、及时作图的基础上，我们调整了V₂脉的 k 值和 θ 值（即图2中V₂脉的曲线），使V₂脉钻孔的弯曲程度显著减小。

在云南某砂岩铜矿区的实践^[2] 该矿有南北两个矿床，均为砂岩沉积铜矿。岩层走向335°~155°，倾向SW，北矿床岩层倾角30°，南矿床19°，为一缓倾斜单斜构造。北矿床有一组与岩层走向相同、倾向相反、与层面接近垂直的节理，极为发育。

全区为砂质泥岩和砂岩的互层，可钻性4~8级，约40~45%的孔段用钢砂钻进。网度为200×100、100×100、75×75、50×

50米四种，大网度为勘探工程，小网度为加密工程。孔深100~1000米不等，400~700米者居多。终孔口径 $\phi 91$ 毫米。

南矿床钻孔，均呈顶层进规律。我们利用顶层进规律移孔位，成功地施工了一个984米的深孔，质量完全合格。

北矿床施工的钻孔，1967、1970两年，两度闹斜。1967年我们曾总结该矿床的孔斜规律，采取了综合防斜措施，孔斜情况一度好转。

根据127个钻孔结构，464次合金钢砂互换，442个岩层倾角数据，418个测斜点资料，19条勘探线剖面 and 5个典型钻孔柱状图，以及各种会议资料，进行了反复的对比分析。发现：

1. 根据直孔或斜孔，方位角变化有两种情况（图3）。顶角 $>8^\circ$ 的斜孔，其方位稳定，在北东象限内向40°方向集中。直孔和顶角 $<8^\circ$ 的斜孔，一般方位均转向南西，并向245°左右的方向集中（个别例外）。

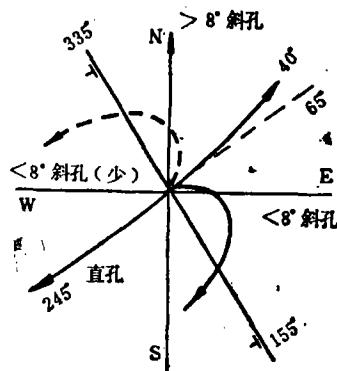


图3 云南某砂岩铜矿区北矿床钻孔的方位弯曲规律

由此可见，北矿床的钻孔轴线，均力图与岩层走向垂直，开孔顶角 $>8^\circ$ 者呈顶层进

规律，开孔顶角 $<8^\circ$ 者及直孔呈顺层跑规律。

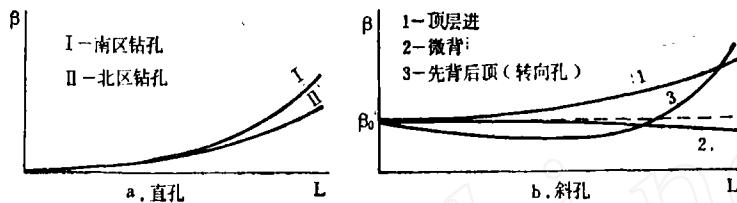


图4 云南某砂岩铜矿区北矿床钻孔顶角(β)—孔深(L)规律

2. 钻孔顶角的变化，直孔和斜孔有两种不同的规律，如图4。直孔的顶角上漂，矿床南部较大，北部较小。斜孔根据开孔顶角， $\beta_0 > 8^\circ$ 的斜孔，顶角轻微顶层进上漂； $\beta_0 = 5 \sim 8^\circ$ 的斜孔，呈微背规律； $\beta_0 < 5^\circ$ 的斜孔，先背后顶，当顶角为零时发生转向南西，呈南西向顺层跑规律。

3. 钻孔顶角和方位角之间的变化具有规律联系，钻孔方位严格受地层产状控制。北东向的斜孔，顶角变化极小，呈轻微的上漂或下背趋势；轴线在南西方向的钻孔，顶角变化最大，顶角达 $3 \sim 5^\circ$ 时，即稳定在南西方向，顶角顺层跑急剧增大，方位愈在南西方向稳定，顶角上漂也愈大，顶角的增加，又保持了方位的稳定。而在北西、南东两个象限内的钻孔不稳定，顺时针、或逆时针转向南西，极少例外(图5)。

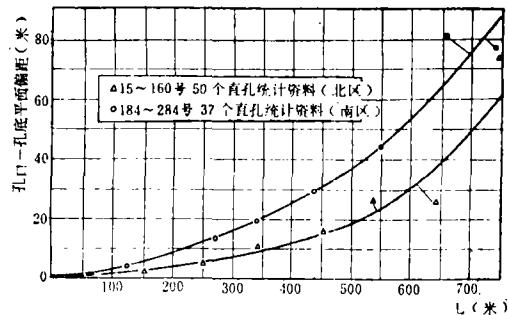


图6 云南某砂岩铜矿区北矿床孔口—孔底平面偏距与孔深关系

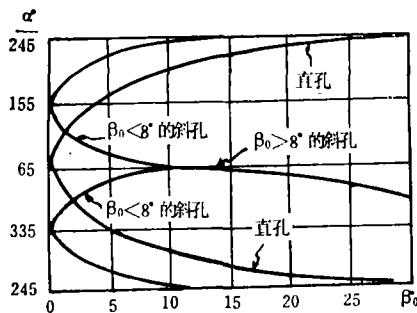


图5 云南某砂岩铜矿区北矿床钻孔的顶角(β)—方位角(α)依存规律

根据87个直孔的孔口—孔底平面偏距与孔深关系的资料统计，得出图6。与图4a比较，两者约略相应。因此可以认为，直孔孔口—孔底偏距的大小，主要受顶角大小的制约。

据此，我们提出了利用规律、将斜就斜的设计(图7)，前后在八个钻孔中进行了

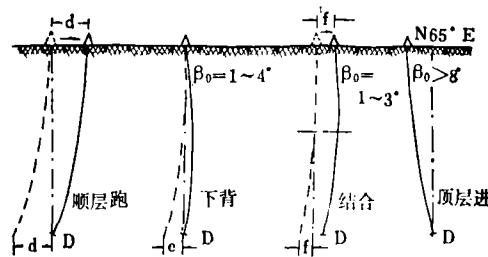


图7 云南某砂岩铜矿区北矿床利用规律、将斜就斜的设计

试验，其结果如表2所示。

试验结果表明，利用规律后的钻孔质量，均显著提高；而后施工的钻孔，也采用了这一措施，从而保证了加密工程的钻孔质量。

若干其他矿区的实践 据见诸文献而又有典型意义的，如广东某钨矿区^[3]、河南八宝山矿区^[4]、湖南某矿区^[5]、辽宁某矿区^[6]、江苏某矿区^[7]、辽宁煤田^[8]等沉积岩、变质岩、火成岩地区，均发现有若干的共同规律，各地区掌握和利用所得规律指导施工，钻孔质量也均有了显著提高。

云南某砂岩铜矿区北矿床钻孔利用规律的试验结果

表 2

利用的规律	孔号	孔深(米)	孔口沿线路移(米)或开孔顶角(°)、方位(°)	距设计孔底的实际平面偏距(米)	备注
顺层跑	25610	348.38	16	18	限于地形只移13米 移成38米
	26817	470.57	13	10	
	26215	242.44	38	16.5	
	24017	397.21	24	2	
下背	26217	355.41	方位65°, 顶角3°	4	
结合	25619	531.15	21, 方位15°, 顶角1°	21	
顶层进	25013	267.67	方位87°, 顶角9°	12.3	
	26816	378.38	方位72°, 顶角8°30'	16	

对钻孔自然弯曲规律的认识

钻孔的实际弯曲情况证明, 不同矿区有它们各自的独特规律, 也有共同的规律。

现就上述八个矿区中地质因素对钻孔自然弯曲的影响, 提些综合性的看法。

岩层的产状是影响钻孔自然弯曲的经常起作用的因素 从上述八个矿区钻孔的自然

弯曲情况来看, 其普遍规律是:

1. 钻孔方位角的变化, 其轴线均力图垂直于岩层的走向; 至于是逆倾向顶层进, 还是顺倾向顺层跑, 具体矿区的规律不完全一样, 而以逆倾向顶层进为主。其方位的顺时针或逆时针向扭转, 取决于钻孔轴线与岩层走向的关系和钻孔方位因岩层、钻进因素所呈现的顺、顶层趋势, 如图 8 所示。

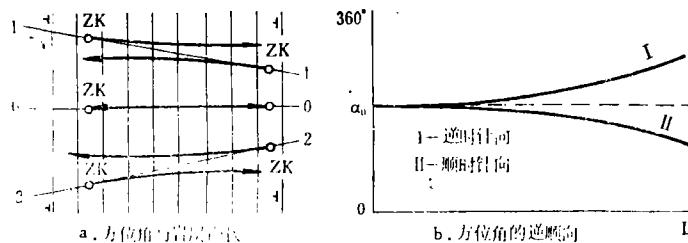


图 8 钻孔方位弯曲规律

2. 钻孔顶角的变化, 根据岩层的产状, 直孔或斜孔, 钻孔轴线与层面夹角的关系, 在

一定的钻进技术措施之下, 有三种弯曲类型, 如图 9。

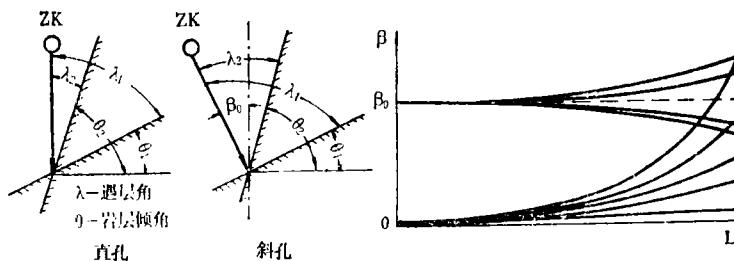


图 9 钻孔顶角弯曲规律

一般认为, 岩层软硬相差悬殊, 交替频繁, 容易发生钻孔顶角的严重变化。我们在云南某砂岩铜矿区施工的钻孔, 就是在这种条件下出现钻孔弯曲的。

但在火成岩中, 岩石结构较均匀完整,

也仍然发生程度不等的顶角、方位角弯曲。我们在广东新会某钨矿区钻探时, 曾发现 V_2 脉的钻孔上漂要比 V_1 脉者大, 而方位弯曲, 则 V_1 脉大于 V_2 脉。条件相同, 而孔斜各异, 这是为什么呢?

根据我们对该矿区出露花岗岩定向节理进行的259次测定,从其等密度分布情况看(图1), V_1 脉中,平行于勘探线方向的北西倾和南东倾两组节理比较发育,但较 V_2 脉分散;垂直于勘探线方向的北东倾和南西倾节理, V_1 脉的两组约略相当, V_2 脉的北东组节理要比南西组发育强烈而且集中。于是,钻孔方位受北西、南东组节理制约, V_1 脉右偏大,而 V_2 脉右偏小;钻孔顶角, V_1 脉北东、南西两组约略相当,互相制约,上漂不大,而 V_2 脉的北东组要强烈而集中得多,引导钻孔轴线力图与该组节理面垂直,故钻孔上漂较大。

可见,在较均质的火成岩中钻进,钻孔的弯曲也是有选择性的,即钻孔轴线力图与其发育最强烈、最集中的节理(劈理)面垂直。而这种选择性,还与岩石的矿物结构、成岩前后的地质条件及由此所构成的岩石定向强度的差异等有关。

3. 钻孔方位角与顶角之间,存在着相互制约和相互促进的关系。钻孔顶角愈大,方位愈稳定;方位角的稳定,又反过来控制顶角的发展。其规律如图10所示。当然,不同

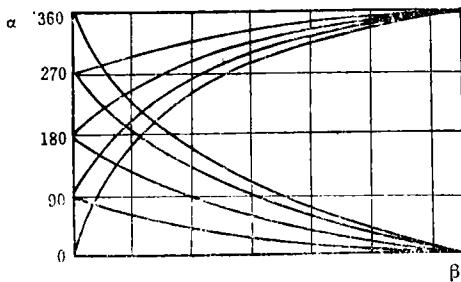


图10 钻孔顶角一方位角的制约关系

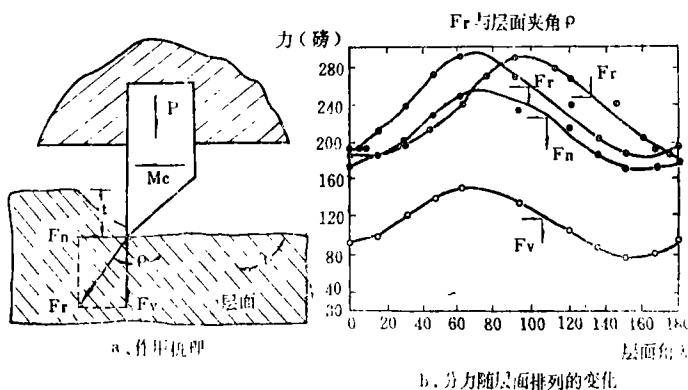


图11 岩石的定向强度(据K.E.格雷资料)

矿区使方位角稳定的顶角范围各不相同;不同矿区的方位扭转角大小及扭转方向也不一样。

例如,云南某砂岩铜矿区北矿床,使直孔方位稳定在南西方向的顶角为 $4\sim 5^\circ$,斜孔方位稳定在北东,顶角须 8° 以上。彭从斌同志^[9]介绍的情况,同我们的防斜实践结果,十分近似。他们为变质岩矿区,我们为沉积岩矿区。

岩石的定向强度是钻头上力不平衡的来源。无论是沉积岩、变质岩或火成岩,由于其矿物成分、成岩条件及地质作用的不同,它不具有均质的、各向同性的、不渗透的条件,其机械强度在不同方向上不相同。当钻孔轴线与岩层产状的几何关系不同时,岩石在不同方向上给与钻头反力的大小及方向也不相同。

K.E.格雷^[10]的研究证明,钻头上所受作用力与岩层层面的排列方向有关。在不同方向上,作用在钻头上的力大小不同,具有循环力的性质(图11)。于是,沿某一方向破碎岩石时,所需的力较大,而在另一方向则较小。

根据合金钻进(金刚石钻进与此相类似)和钢砂钻进的实际情况来看(图12):

1. 合金钻进时,岩层“顺茬”给与合金的摩擦力矩 Mfs 小于“逆茬”的摩擦力矩 Mfn 。在孔底、孔壁、岩芯壁上,摩擦力矩的性质基本相同。这是因为,顺茬的摩擦系数 fs 小于逆茬的摩擦系数 fn 。

2. 钢砂钻进时,钻头在带动钢砂滚动的同时,伴随着动力作用的冲击。此时,地层给与钢砂的摩擦力矩,在方向上同合金钻进

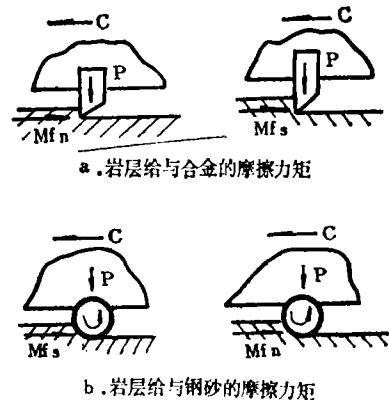


图12 岩层定向强度的作用机理

正好相反。

显然，岩层在不同方向上所反映的这种摩擦力矩的差异，虽不十分显著，但它却是钻进过程中经常起作用的因素。它对钻孔方位弯曲的发展，有重大影响。

钻进过程中岩层所表现的摩擦力矩的差异，实质上标志着岩石在不同方向上可被破碎的难易程度。岩石力学对各种岩样沿不同方向测定的强度数据表明，垂直于层面时，岩石的抗压强度最低。岩石沿某一方向反力大，可钻性降低。由此造成钻头在钻进过程中沿孔底平面上的钻进进度差。这种进度差给与钻头的的作用，实质是一力矩的作用，力图推使钻头偏离原钻孔轴线而与岩层层面垂直。我们把它定义为岩石弯矩 M_y ；只有当 M_y 完全垂直于岩层层面时，它在各个方向上才近似地接近均衡。假定该弯矩的方向垂直于岩层走向（图13）。当钻孔轴线与该岩石弯矩方向不一时，便将出现钻孔的弯曲。

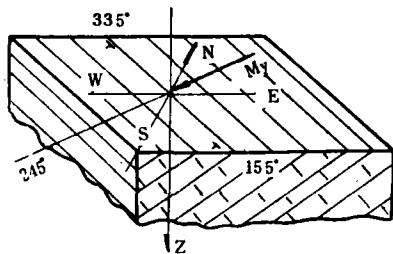


图13 云南某砂岩铜矿区北矿床的岩石弯矩 M_y

钻具在钻压 P 作用下发生弯曲，如图14。钻具在A点与孔壁相切并受孔壁的限制，于是，在钻头C处产生一反方向的弹性力矩 M_t 。在完全垂直的钻孔中，该 M_t 不具定向性；在斜孔中，一般则受钻孔轴线方向与孔底摩擦力矩的限制，具有定向性。显然，钻孔顶角 β 愈大， M_t 的定向性愈强。

这样，岩石弯矩 M_y 和钻具弯矩 M_t 在不同的方向作用时，便会加剧或减弱钻孔顶层进或顺层跑的趋势，从而使钻孔逐渐弯曲。

M_t 与 M_y 的这种空间力矩组合情况，如图15所示。根据 $M_t \geq M_y$ 的三种情况，从理论上进行矢量合成，其变化规律如图16所示。

根据我们在云南某砂岩铜矿北矿床的实

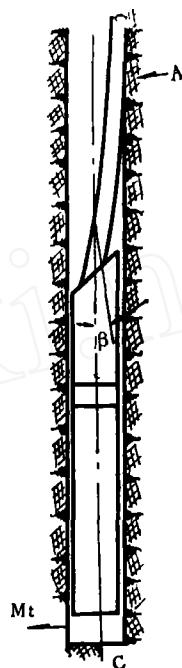


图14 钻头的弹性力矩 M_t

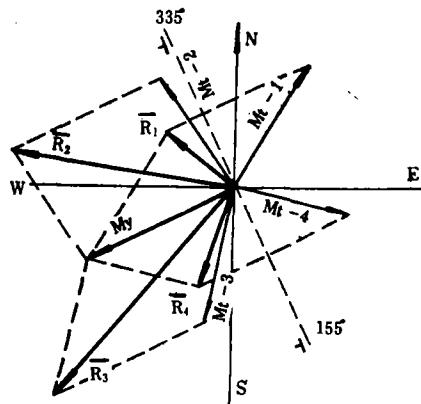


图15 钻头弯矩 M_t 与岩石弯矩 M_y 的关系

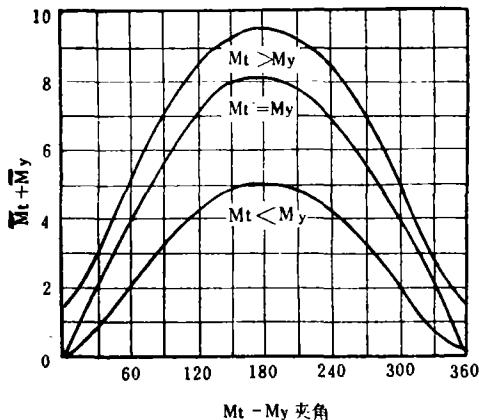


图16 $\overline{M_t} + \overline{M_y}$ 随 $\overline{M_t}$ 方位的变化规律

践,当钻孔顶角 β 在 8° 左右时,钻孔顶角基本保持不变。因此可以有根据地假定在这种角度下, $[M_t]=[M_y]$ 。也就是说, M_y 可以从该条件得出个大概的量的量度。

如图15所示,显然,钻孔的顶层进或顺层跑,可以从其合成矢量 \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 、……等来判断。这里有五种情况:1. $M_t = M_y$,方向相反,则钻孔将沿斜直线线性发展;2. $M_t > M_y$,方面相反,则钻孔将顶层进;3. $M_t < M_y$,方面相反,则钻孔将顺层跑;4. M_t 与 M_y 同向,则钻孔将出现急剧的顺层跑;5. M_t 不与 M_y 方向一致,则会出现钻孔方位的左右弯曲和顶角的上漂或下背。

把图16中的理论分析结果同K.E.格雷的实验数据(图11b)相比较,可以发现,理论推导同实验数据之间,具有一定相关。

岩层的结构、构造情况是钻孔自然弯曲的促进因素 岩层(石)的软硬交替(硬度差的大小、各自的厚度及交替程度),结构是否完整,断层的类型、产状及发育程度,以及第四纪地质的影响(如坡堆积情况、河床流砂与卵石、地表风化层等),都对钻孔的自然弯曲有“促进”作用,其中尤以岩层(石)的软硬交替情况的影响更为经常,更为显著。

根据岩层产状与钻孔轴线的关系,岩层(石)的软硬交替有的对顶角弯曲的影响较大,对方位角弯曲的影响较小;或者相反;或者同时有影响。一般言之,钻孔倾角愈大,它对方位的影响愈小,钻孔倾角很小时,极易发生方位的急剧弯曲。

对钻孔自然弯曲机理的讨论

按照上述对钻孔自然弯曲规律的认识和理论假定,结合我们在云南某砂岩铜矿区北矿床的钻探实践,考虑到其他典型矿区的经验,对钻孔自然弯曲的机理,进行些初步的理论探讨,以期对钻孔弯曲理论的建立,起抛砖引玉的作用。

定向(斜)孔的自然弯曲 如图17,DC为弯曲钻柱的轴线,钻头C处的弹性力矩为 M_t ,岩石弯矩 M_y , M_{fa} 和 M_{fb} 分别为A点和B点的岩石摩擦力矩,其方向与钻头回转方向相反。钻孔的顶角和方位角弯曲分别为 β 和 α , M_c 为钻柱回转力矩。

据前述,合理钻进时, $M_{fa} > M_{fb}$,故

钻具有向B点扭转的趋势。其次, $\bar{M}_t + \bar{M}_y$ 的方向为逆时针向。该两项因素的作用方向

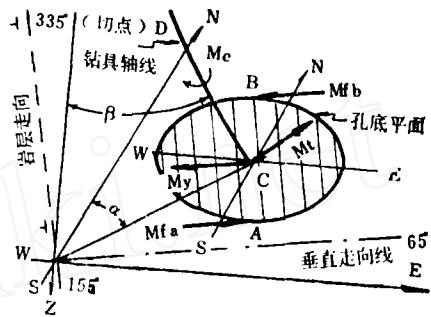


图17 定向孔的弯曲机理

相同,故方位逐渐逆时针向扭转。该矿区绝大部分斜孔合金钻进孔段的实测数据,均服从这一规律。

其顶角弯曲,根据 $M_t \geq M_y$ 的三种情况, M_t 为顶层向, M_y 为顺层向,两者互相制约,其数量级不大。当 $M_t > M_y$ 时,顶角微增; $M_t < M_y$ 时,顶角微背; $M_t = M_y$ 时,顶角保持不变。实测数据符合这一结论。

钢砂钻进时,岩石摩擦力矩大小相反,即 $M_{fa} < M_{fb}$,故钻具有顺时针扭转的趋势。但 $\bar{M}_t + \bar{M}_y$ 是逆时针向的,它同摩擦力矩又存在着另一制约关系。该矿区岩层走向线以东, $\bar{M}_t + \bar{M}_y$ 互相制约,矢量和小,摩擦力矩的影响较为主要,故方位呈轻微的顺时针向扭转。顶角弯曲,因孔壁间隙较大,钻压较高,钻柱弯曲较大(即 $M_t > M_y$),故顶角弯曲也较大。该区钢砂钻进孔段的实测数据,也符合这一结论。

上述机理是结合该矿区的实际情况分布的。如果岩层产状变化了, M_y 也将改变,因而其弯曲规律也将改变。

直孔的自然弯曲 我们所谓直孔系指直开孔一开始出现弯曲就在南西象限顺层跑的钻孔。从图18可知,钻孔轴线位于岩层走向线以西, \bar{M}_t 与 \bar{M}_y 方向相同,故方位弯曲主要受 $\bar{M}_t + \bar{M}_y$ 的控制,摩擦力矩的影响,较为次要,故钻孔方位改变不大。因 \bar{M}_t 与 \bar{M}_y 方向相同,矢量大,故顶角急剧增大,发生严重的顺层跑弯曲。实测数据符合这一结论。

过渡区的自然弯曲 如图19,在北西象限出现弯曲的钻孔, $\bar{M}_t + \bar{M}_y$ 为逆时针向,

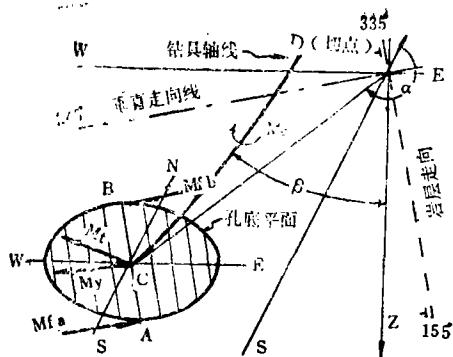


图18 直孔的弯曲机理

合金钻进时，摩擦力矩也是逆时针向，故方位很快逆时针转向南西。到图18的范围就稳定了，顶角弯曲也随之增大。钢砂钻进时，摩擦力矩的效应为顺时针向；但因钢砂钻进的 \overline{Mt} 较大，故仍以逆时针向扭转为主。

在南东象限的钻孔，则主要呈顺时针向扭转；待转到南西象限后，又趋稳定了。实测数据同上述机理相符合。

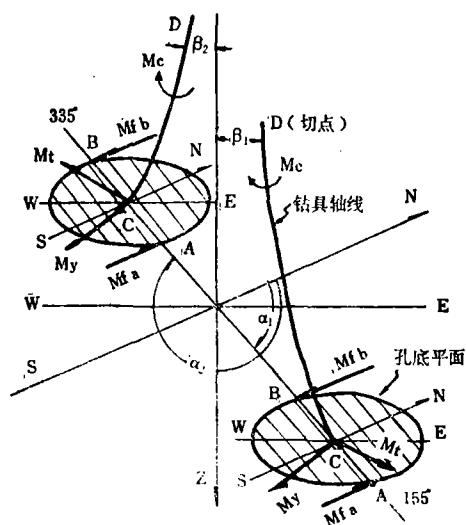


图19 过渡区的自然弯曲机理

小斜度钻孔的自然弯曲 在我们的实践中，小斜度孔是指开孔顶角 $<8^\circ$ 的北东向斜孔。这种钻孔，在同样钻具组合及钻压之下， \overline{Mt} 的北东向定向作用较小，不足以抵消 \overline{My} 的作用。因此，随着钻孔加深，顶角下背；在极小顶角范围内，钻具失去定向作用，方位急剧弯曲，很快过渡到南西象限而服从直孔弯曲规律了。实测数据证明了这种钻孔的存在。

结束语

综上所述，初步从几个典型矿区的实际钻孔自然弯曲规律中分析探讨了钻孔自然弯曲的机理。但是，它也只是质上的说明，没有作出有关量的准确计算。

从大量的生产实践中总结经验，摸索规律，以建立岩芯钻探的钻孔弯曲理论，更好地指导生产实践，是一项既现实，又有意义的工作。

初步认为：

- 1.不同矿物成分、不同性质、不同产状、处于不同应力状态的岩石（层）定向强度及其在钻具作用下的表现方式、大小和度量，是建立钻孔弯曲理论的基础。
- 2.钻柱在孔内的运动方式、弯曲形态以及在各种情况下的平衡条件，是建立钻孔弯曲理论的必要组成部分。
- 3.不同钻进方法、设备管材、工艺技术特性，以及技术参数与钻孔弯曲的实际关系、准确数据，在上述基础和必要组成部分已获解决之下，建立起钻孔弯曲理论，得出既能保证弯曲质量，又能提高效率的最优方案、方法和参数配合，以指导生产实践。

参考文献

- (1) 榕树基，云南省地质学会探矿工程专业会议文集，1965年5月
- (2) 云南冶金地质勘探公司三〇四队探矿科，冶金地质科技情报—勘探技术部分，1976年第1期
- (8) 广东省地质局七〇五队，勘探技术，1973年第2期
- (4) 河南地质局四队，勘探技术，1973年第1期
- (5) 宋希雄，地质与勘探，1966年第1期，第33页
- (6) 有色金属地质勘探公司某队，中国地质学会第一届全国探矿工程学术会议论文选集（质量部分），第128页，1965年
- (7) 江苏省地质局三队，中国地质学会第一届全国探矿工程学术会议论文选集（质量部分），第157页，1965年
- (8) 辽宁煤炭局地质勘探公司，中国地质学会第一届全国探矿工程学术会议论文选集（质量部分），第144页，1965年
- (9) 彭从斌，地质与勘探，1964年第5期
- (10) Gray K.E., Some Current Rock—mechanics Research Reported to Oil Well Drilling, API DPP, 1967

(中国金属学会探矿技术研讨会论文选登)