

有关金刚石钻进原理的研究

李世忠

(中国地质大学 北京 工程技术学院 北京 100083)

摘 要 结合试验研究及国内外经验,提出以控制钻头切入量为准的钻进规范,获取最优化钻进;依据增大切入量原则,分析、论述研究优质大粒聚晶体的必要性和可能性,突破现用金刚石钻进的局限;分析了当前专业技术状况,提出加强科学试验和研究的重大意义。

关键词 钻头切入量;定切入量钻进;锐化比压;每英寸的转速(rpi);聚晶复合片(PDC);聚晶体(PCD)

中图分类号:P634.5+3 文献标识码:A 文章编号:1000-3746(2000)05-0007-04

Research on Diamond Drilling Theory/Li Shi-zhong (China University of Geo-sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Drawn upon the experiment and the experience home and abroad, the drilling criteria which is based on the control of the bit penetration amount is proposed to achieve optimum drilling performance. According to the principle of increasing the penetration value, it is necessary and possible to develop quality large size PCDs so as to transcend the limitation of existing diamond drilling. The status quo of the technique is reviewed, and the significance of beefing-up scientific experiment and research is emphasized.

Key words: bit penetration value; drilling at fixed penetration value; specific pressure; rpi; PDC; PCD

近 10 余年来,我国金刚石钻进技术有了巨大的发展,取得了重大的成就,这是大家所公认的。在此期间,我们着力于钻头、钻具、钻探设备、钻进方法方面的研制,这是发展该项技术的基本要求和必要条件。但是为了进一步发挥该项技术的有效作用,必须深入研究其钻进工艺原理,揭示钻头在井底工作的过程及其工作规律。这是深入掌握其技术、充分发挥其效用的基础。否则我们就只能处于凭经验和靠感觉办事的水平上,难以提高其科学水平。正如 1964 年《The Oil and Gas Journal》开始连续发表 M. Grant Bingham 研究成果时,开始的标题就是“Why Do We Still Drill Wells By The Seat of Our Pants?”(为什么我们还要靠我们的感觉来钻井呢),事隔近 30 年,这句话仍然对我们是适用的!

1 调控钻进工作的途径

长期以来,我们一直是靠调节钻进的压力(钻压)、转速和泵量(冲洗液量)3 个基本参数来控制我们的钻进工作,并把它们称之为“钻进三要素”。其意思是只要我们调控这 3 个参数就可控制钻进工作状态,取得良好效果。根据我们的试验研究而发现,钻进中刀具对岩石的切入量是调控钻进工艺的最基本的参量,它是钻进工作控制的主要依据。实际上,钻压、转速、泵量是服从于此的第二位因素。在钻进中切入量直接影响着孔底工作状态,影响孔底的功率消耗,影响金刚石和胎体的工作条件,影响冷却和清洗效果,影响岩粉的粒度和数量。总之,刀具对岩石的切入量是钻进工艺的一个关键参数。钻进的效果依此参量而定。

对于刀具对岩石的切入量较为方便的度量办法是钻头

每转的进尺量,简称“钻头切入量”或“切入量”。切入量的控制方式有许多种,但现在常用的为定切入量钻进。

当前我国所用的金刚石钻头主要是人造单晶孕镶方式的钻头。因此,如何合理地使用这种钻头,怎样控制其钻进规程,使它们在最优状态下工作,以获得最佳效益,这是一个急待解决的问题。当然,从目前的实际情况看,钻头的质量、钻头的品种及它们对岩层的适应程度仍需继续研究和提高,但钻进工艺的优化与科学调控是急待解决的问题,必须解决如何合理地用好一个钻头,才能获得综合最优效益。

通过对人造金刚石孕镶钻头最优化钻进的试验研究以及对其孔底钻进过程的分析论证,我们发现:对于孕镶金刚石钻头应根据岩层性质和钻头品质,控制其每转的切入量,这是优化钻进工艺、确定合理的钻进规程、控制钻进的中心环节。也就是说,对孕镶金刚石钻头不宜采用恒压钻进,恒压钻进可能使钻速随钻刃的磨钝而不断衰减,直至失效。钻压过大会造成钻头过量消耗、降低钻头寿命;钻压过小会使钻刃抛光而致无法钻进。所以孕镶金刚石钻头必须采用控制每转切入量的钻进工艺,钻压应随切入量的需要而变,以使其机械钻速和钻头寿命处于最佳状态下工作。控制每转切入量的定切入量钻进方法数值上表现为一定钻具转速下的定速钻进。但这仅属数学上的换算。实际上,定切入量是控制孔底碎岩状态及工作过程,表现着钻进的本质及状况。定钻速表示钻进的要求,可通过调节钻压和转速而获得。

图 1 是用 $\varnothing 56$ mm 普通双管孕镶人造金刚石钻头分别以定切入量 100 及 140 μm 在花岗岩中进行钻进试验的结果。

图中横座标表示钻进时间,其区段是因所钻岩块高度有限,完成一个钻程试验需钻多个钻孔,实际上钻进过程是连续则发生锐化。新刃出露,切入量大增,钻压随之急剧下降,以保持切入量不变,同时也防止磨损新出露的锋刃,避免损失。然后不断重复这样的过程。所以说孕镶钻头的整个钻进过程是不断钝化—及时锐化—再钝化—再锐化的连续交替的过程。实验表明,在此钻进过程中,钻刃的钝化是绝对的,不可避免的,而钻刃的锐化是有条件的。只有达到“锐化比压”(单位工作唇面的锐化钻压)才会发生锐化。在孕镶金刚石钻头钻进过程中,只有适时发生锐化,才能维持正常钻进。某一钻头对某一岩石只有选择合理的切入量才能获得有效的锐化条件。通过试验研究,对孕镶金刚石钻头的瞬态钻进过程予以揭示,为合理制订钻进工艺规程提供了科学基础。对于孕镶金刚石钻头而言,以定切入量控制其钻进工艺是获得优化钻进(钻速高、磨损小)的依据和准则。

表 1 给出了定切入量钻进试验的部分结果。

表 1 定切入量钻进试验结果

编号	钻头				钻 进					锐化状况	钻速 ($m \cdot h^{-1}$)
	金刚石		胎体硬度 HRC	每转切入量 / μm	锐化钻压 / kN	锐化比压 / MPa	钻头平均磨损 ($g \cdot m^{-1}$)	钻速			
	品级	目数							浓度/ $\%$		
706	RY80	70	75	29	100	21	21	0.68	可锐化	3.6	
					140	19	19	0.72	可锐化	5.04	
79	RY80	70	100	30	120	> 22	> 20	0.24	不锐化	很小	
					(100) 200	(14) 28	28	0.32	可锐化	3.96	

注(1)所钻岩石为斜长花岗岩,石英含量为35%,可钻性8~9级(2)因现有钻机给压能力达不到锐化压力,所以将79号钻头去掉4个胎块,用只有4个胎块的钻头钻进试验,为了对比,需将切入量和锐化钻压倍增。

试验表明(1)钻进该花岗岩以选用706号钻头为好,即同类金刚石、胎体硬度在HRC30左右时75%的浓度比100%的浓度好得多。这为合理选择钻头结构提供了可信的依据。(2)用706号钻头钻进该花岗岩时,以选用每转切入量为140 μm 钻进工艺为好。虽然每转切入量较大但其“锐化比压”(锐化钻压除以钻头工作唇面面积)却较低。由表1及图1可知:在同一钻头钻同一种岩石时,大切入量(140 μm)的锐化比压(19 MPa)小于小切入量(100 μm)的锐化比压(21 MPa)。这是一个值得深入探索的现象。由表1知:虽然选择较大的切入量钻头磨损稍大,但其机械钻速较高,也是合算的。这些结论为合理选择钻进工艺规程又提供了可信的依据,为工艺规程科学化提高了一步。

现在越来越多的国外金刚石钻头制造厂商采用定切入量钻进工艺的指标作为研究和考察其产品的质量或以此来指导用户合理使用其产品,不过有的标明,有的不对外宣称。例如美国长年公司对其各类QWL孕镶金刚石钻头按硬、中、软不同岩层分别提出其指导用户合理使用的最大的“rpi”(Bit Revolutions Per Inch),即每钻进1 in(英寸)应有的钻头转数。实际上,这是每转切入量的倒数,其基本概念是一样的。现摘录其部分绳索取心孕镶金刚石钻头工作参数于表2,供参考。值得注意的是其中提出“rpi(最大值)”一项,是一个基础。在其注释中特别指出:“钻速(给进率)和rpm二者都与每英寸转数rpi因数密切相关。该因数是获取成功钻进的特别有用的一个因数。过高的rpi会导致钻头抛光,过低的rpi会产生钻头过切和过早磨损。”这是十分明确和中肯的,是

的。由图可知,为了保持切入量为定值,钻压W随钻刃的磨钝(称为钝化)而不断增大。但当钻压增至某一值时,钻刃

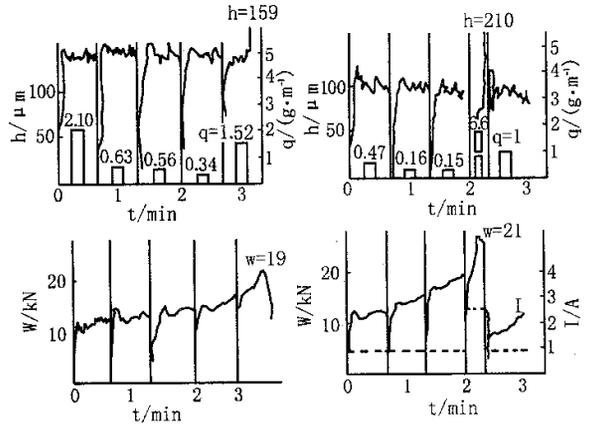


图 1 706 号钻头定切入量钻进的钝化和锐化过程

合理应用孕镶金刚石钻头的关键。

表 2 长年公司孕镶金刚石钻头工作参数

钻头	冲洗液 ($gals \cdot min^{-1}$)	岩石硬度	钻头转速 / rpm	钻头压力 / lbs	rpi (最大值) ($Bit Rev$ $\cdot in^{-1}$)	希望达到的钻速 ($in \cdot min^{-1}$)
BQWL (59.9)	7~9.5	硬	1000~1400	5000~8000	350	3~4
		中	1000~1200	3500~6000	250	3~5
		软	800~1200	2500~3500	200	4~6
NQWL (75.8)	9.5~12	硬	1000~1200	6000~8000	300	3~4
		中	800~1200	4000~6000	250	3~5
		软	600~1000	2500~3500	175	3.5~6

据报导,定切入量钻进工艺在前苏联某些地质勘探联合体实际生产中也在应用,并取得可喜的结果。他们在生产中把每转进尺量定为控制金刚石钻进工艺过程的一个标准,不仅用于孕镶钻头而且用于表镶钻头,同样获得成功。这表明在各类钻头的钻进中,刀具切入深度都是一个关键参数。

在实践中,他们要求钻头每转进尺必须保持在 $h_{min} < h < h_{max}$ 。假如 h 偏离允许范围,就会导致钻进工作的失败。钻速降低,金刚石耗量增大、成本增加。在生产实际中,他们采用调节轴向压力 W 与 h 的相应变化相比较的办法寻找合适的每转进尺量 h,具体表示于下式:

$$W_{i+1}/W_i \leq h_{i+1}/h_i \quad (1)$$

式(1)的意思是:每一钻压的增大值 W_{i+1} 与增大前的钻压值 W_i 之比应小于或等于相应的每转进尺增大的比值。

其实质是钻压的增量应有利于每转进尺的增加。这是以变化钻压选取合适进尺量的条件。实际在生产实践中合适的每转进尺量 h 还需根据钻探设备的条件而定。例如:钻机给进系统的能力、钻杆柱的工作状态和可能承受的最大轴向压力以及钻孔的条件、冲洗状况和孔底清洁程度等。

在转速的选择上也需保证 h 在合理的范围为原则,即增大转速要以 h 也相应地增大为条件。也就是增大转速不应有损于 h 。同样,在实际工作中还需根据传动系统的能力及钻杆柱的稳定状态等确定合适的转速。

在实际工作中,还可以利用钻进功率的变化做为选择合理切入量的一个参考指标。过大的切入量,即 $h > h_{max}$,可能引起钻进功率急剧增长,表明孔底冲洗液流动不畅,可能发生粘烧现象,过小的切入量,即 $h < h_{min}$,会引起钻进功率骤减,表明孔底发生打滑现象,这些都是不允许的。

总之,控制切入量钻进工艺,不仅在理论上而且在实践中都表明,它是金刚石钻进的科学合理的工艺指标,优化钻进的基础。特别是在我国大量使用孕镶人造金刚石钻头,的情况下,推广使用该项工艺规程,一定会获得大的经济效益,并会把我国金刚石钻进技术提高到一个新的水平。

2 提高现有金刚石钻进钻速的途径

根据上述原理和准则,综合评价现今所用的金刚石钻头,无论是孕镶式还是表镶式,由于其粒度过小,直接影响了可能的每转切入量。特别是人造金刚石孕镶式钻头,由于切入量微小,造成钻速的一个不可逾越的限值。十分明显,现用金刚石粒度偏小是影响钻速提高的关键。因此,目前人们正在积极研制各种聚晶(多晶)金刚石体或用硬合金支撑的复合体,以增大切削刃的尺寸,获得较大的每转切入量。这种认识和措施是正确的。这是大幅度提高金刚石钻进效率的一条基本的途径。

现在研制的各种金刚石聚晶体切削刃存在的一个主要问题是如何满足钻探工作对其性能方面的要求。实际钻进工作要求金刚石聚晶体在其既有超高硬度下还需有足够的强度和韧性。而这正是当今金刚石聚晶体的不足之处,归纳起来,现在采用的克服其强度和韧性不足有3种方法:(1)在聚晶层背后衬托以厚的硬合金层,称为PDC的金刚石复合片,如GE公司的Stratapax。这类复合片因其金刚石层和硬合金层以及两者之间的钴层的热膨胀系数相差很大,造成镶焊钻头困难。(2)金刚石微粒用少量粘合剂制成不同形状的聚晶块,称之为PCD,如美国的Geoset、Megaset,英国的Syndat等,使用这种聚晶块切削刃都须采用硬合金烧结的钻头体,并在切削刃后专门有适当的凸起支撑,以弥补其强度和韧性的不足。(3)积极研制具有高强度、高韧性的金刚石聚晶体,这是一项根本性的措施,美国GE公司把Geoset聚晶块中的膨胀系数很大而影响热稳定性的 Co 浸沥出去,称之为金刚石接金刚石的结构组织,这种产品称之为Ballaset,改善聚晶体的性能,获得较好的钻进效果。最近英国De Beers公司又研制成功Syndax 3金刚石聚晶体,它以 $\beta-SiC$ 代替了原来的粘结相 Co ,称之为非金属材料的热稳定的聚晶金刚石体,其性能大为提高,获得了可喜的结果,其主要性能见表3。

有相当好的性能。最难得的是该材质既有高的硬度(抗磨性能)又具有高的断裂韧性及强度。通常,在一种材质上,这2方面的性能多数是对立的,常常是根据工作所需而权衡取舍。但钻探工作在这2方面都有较高的要求,这就是难点所在。由表3可知,Syndax 3具有高于天然金刚石的断裂韧性和接近天然金刚石的硬度与抗磨性能以及优于硬合金的抗压强度的杨氏模数,并且其导热性和热膨胀系数都在硬合金和天然金刚石之间。同时从其内部组成看,其粘结相 $\beta-SiC$ 的热膨胀系数($5.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ K^{-1}$)与天然金刚石的热膨胀系数($(1.5 \sim 4.8) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ K^{-1}$)相近。这比 Co 的热膨胀系数($12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ K^{-1}$)为低。所以提高了Syndax 3的热稳定性,遇到高温或在钻进中端部偶然发热也不会过多地降低其工作能力。这为碎岩创造了有利条件。

表3 聚晶体与其它超硬材料性能对比

性 能	硅铝 磨料	碳化钨 硬合金	Syndax 3	天 然 金 刚 石
抗压强度/GPa	3.50	4.50	4.74	8.68
杨氏模数/GPa	300	620	925	1141
Knoop 硬度/GPa	13	13	50	57~104
断裂韧性/($MPa \cdot m^{0.5}$)	5.0	10.8	6.89	3.4
热膨胀系数/($^\circ K^{-1} \times 10^{-6}$)	3.20	5.4	2.8	1.5~4.8
热传导性/($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$)	20~25	100	120	500~2000
抗磨系数	0.91	0.79	2.99	2.14~5.49

现在Syndax 3可以制成各种不同形状和规格的刀具以适应不同钻进的要求。由于其体积大、性能好,在孔底主要是以切削方式碎岩,这是一种有利和有效的碎岩方式,因为一般岩石的抗剪强度都很小,仅为抗压强度的10%~15%。

人们用Syndax 3立方体或三角片制作了各种取心钻头,进行了多次钻进试验,取得了明显的效果。图2是用镶焊有18块Syndax 3立方体的BQWL绳索取心钻头钻进纳米比亚灰色大理岩的结果。试验采用了恒压钻进,进尺30m,钻速一直维持在平均85cm/min以上,而钻刃磨损甚少。在同一岩石中用6阶天然表镶金刚石钻头(BQWL)钻进,其最高钻速为30cm/min。由于受切入量的限制,常规的表镶金刚石钻头,其钻速只能在某一区域之内,大大地低于Syndax 3的钻速。试验表明,Syndax 3钻头很适宜于钻进中硬而研磨性小的岩层。这是切削型碎岩钻具共有的特点。但由于其性能优越,接近于天然金刚石的品级,其钻头也可用以钻进某些坚硬岩石。图3表示用Syndax 3立方体镶焊的钻头钻进坚硬的富含石英的Parl花岗岩的结果。由图3知,在钻进过程中,由于钻刃不断被磨钝,钻速会不断下降,但其钻速仍高于孕镶金刚石钻头的可能钻速范围。其所以能够获得如此高的钻速,主要原因在于大切削刃可获得大的每转切入量,这是关键所在。所以研制优质聚晶大切削刀具是突破现用金刚石钻进的一条途径。生产试验表明,使用Syndax 3钻头较常规金刚石钻头可节约成本约40%。钻进1000m的钻孔可节省1500R(南非币),详见表4。

从De Beer's公司研制成功Syndax 3金刚石聚晶块大切削刃表明,我们不但需要大颗粒金刚石聚晶大切削刃,而且能够制成性能符合要求的产品。事实上我国在研制人造金刚石聚晶柱中,早在20年前就采用了Si做为粘结相之一,并获

由表3可知,作为一种钻进用的切削研磨材料,Syndax 3具

得意想不到的耐温效果。但当时这类聚晶柱仅适用于钻头保径和扩孔器。现在国内在金刚石聚晶钻头研究方面,多因其性能不足而未获成效。Syndax 3 的研制成果对我们应有新的启示,这是介绍 Syndax 3 的主要目的。

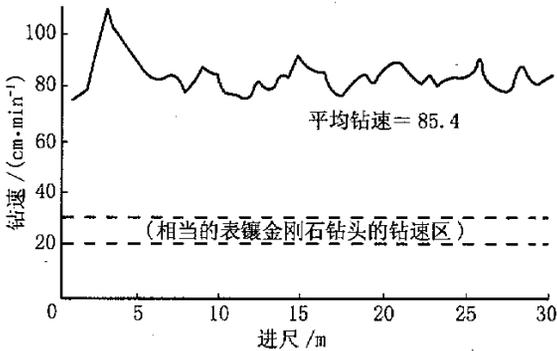


图 2 用 Syndax 3 立方体钻头钻灰色大理岩的结果
钻头 BQWL 镶有 18 个 Syndax 3 立方体,转速 1300 r/min,钻压 7.5 kN

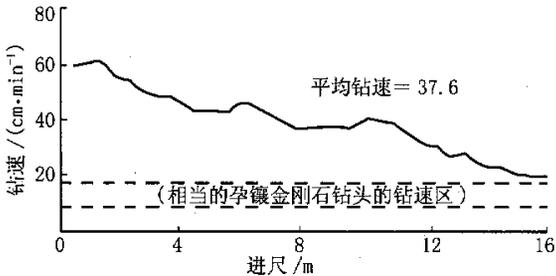


图 3 用 Syndax 3 立方体钻头钻 Paarl 花岗岩的结果
钻头 BQWL 镶有 30 个 Syndax 3 立方体,转速 1000 r/min,钻压 11 kN

表 4 Syndax 3 钻头与孕镶钻头对比

钻头类型	Syndax 3	孕镶式
钻头尺寸	BQWL	BQWL
钻头刃	18 块立方体	35 浓度, SDA100
钻头价格/R	700(估计)	450(估计)
所钻岩层	花岗岩	花岗岩
冲洗液	清水	清水
孔深/m	1000	1000
钻头寿命/m	100	90
平均转速/(m·h ⁻¹)	14.4	5.4
成本/(R·m ⁻¹)	15.28	25.94

综上所述,提高我国金刚石钻进技术水平的途径有 2 个(1)把现用的常规表镶和孕镶金刚石钻头用好,发挥其最优效益,认清其孔底钻进过程的实质和规律,根据岩层性质和钻头结构规定最优的每转进尺量,制定合理的钻进工艺规程,提高我国金刚石钻进的科学水平(2)积极研究高性能的大粒度的金刚石聚晶切削刃,突破现用金刚石钻头的晶粒小、切入量更小的限制,把金刚石钻进的转速提高到一个新的水平。

3 努力提高探矿工程学科的科学水平

现在我们探矿工程作为一个生产行业或教学专业来说,在近 40 年中,特别是近 10 年中,都有了很大的提高和发展,

积累了许多宝贵经验,技术水平也有了大的提高。但是作为一门学科来说,尚有很大的差距。可以说,正处在形成一门学科的过程之中,尚未形成一门独立的、完整的学科。通常,作为一门学科体系来说,必须有(1)本学科所依赖的几门基础科学理论(2)本专业的较为完整而系统的专业基础理论。目前,我们在教学和专业人才的培养中碰到这个问题。相对于其它成熟的学科,我们深感我们专业在这 2 方面的不足。因此,在我们的专业教学中,只好什么基础理论都学上一点,目的是有备无患,结果是事与愿违。专业课的内容还处在某些工作经验的介绍和某些工具结构的描述或某些概念的阐述和解释,这是学科水平不高的特征和表现。有人对学科水平提出如下的论述:“当某事物到了可以用数学语言描述的时候,才算到了准确的程度,某一学科建立了一套自己完整的理论时,重大突破才有可能”。这对学科发展的程度是一个很好的评价。需要说明的是,所谓用“数学语言”描述,是用数学方法确切地表示事物变化的规律和量变的准则。对此不应简单地理解为用一个数学公式,或者是用概率统计方法处理、表示某次试验的结果,就算是用数学语言表示了,实际上这是一种误解。现在,我们的专业技术多半处于宏观性的经验描述,而缺少“去粗聚精、去伪存真、由此及彼、由表及里”的深化认识的过程。这就需要重视基础理论的科学试验和研究,从长远看,积极提高本学科的科学水平是一个根本性的问题。

在此还须说明的是对经验的评价。实践表明,经验是十分可贵的。实践经验是认识事物的基点,“实践出真知”。实践是检验真理的唯一标准。特别是对我们这样一门应用性很强的学科而言,生产实践的经验显得更为重要。但从人类认识事物的过程来说,经验只是属于认识的初级阶段。对认识事物来说是不深刻的,无实力的。必须把我们的认识进一步提高到知其所以然的理性认识阶段,才能更好地运用理论指导生产实践。因此,我们在重视实践经验的同时,更需要通过科学研究,来揭示工作的发展变化规律,深化和提高我们的认识程度和科学水平,这样才能不断地从根本上提高我们学科的科学水平。

实际上,任何一门学科的发展有一个由低级向高级的过程,只是在发展速度上,自觉或不自觉方面有所差异。例如,与我们的专业学科十分相近的石油天然气钻井专业,由于 20 世纪 50、60 年代能源的急需,促使其生产和科研有一个大发展时期,在当时学术活动十分活跃,发表了许多有科学价值的学术论文,发展了喷射钻井、平衡钻井、定向钻井、最优化钻井、新型钻井液体系等,在生产实际和科学研究相互配合中,提出了许多较为系统的、可以指导生产实践的钻井原理,使钻井工程学科的科学水平有了明显的提高。这是值得我们回顾、学习和借鉴的,为了尽快并有意识地提高我国探矿工程专业的学科水平,愿全体探矿工程工作者共识、共勉!

参考文献:

- [1] 李世忠等. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [2] P. N. Tomlinson, et. al. High Performance Drilling Syndax 3 Shows Versatility[J]. Industrial Diamond REVIEW, 1986(6).
- [3] 张润华译. 高转速钻机给进量的控制[J]. PA3BERKA И OXPA-HA HERP, 1984(4).

注 本文引自《西部探矿工程》1994 年第 6 卷第 1 期。