

水力输岩过程中岩心的堵塞及预防

中国地质大学(武汉)

张希浩 冯德强 韦念龙

水力反循环连续取心钻进(或称水力反循环钻进)是当前国内外正在迅速发展的一项钻探新技术,其主要特点是钻进过程中所产生的岩心和破碎产物能够通过冲洗液的压力由钻杆的中心通道输送到地表,可以实现边钻进边取岩心的目的。由于此种方法不需要单独的取心作业,因此与任何提钻取心和绳索取心相比较,则具有辅助时间少、取心质量好、钻进效率高及工人劳动强度低的特点,具有明显的经济和社会效益。以采用水力反循环钻进比较普及的苏联为例,由于采用了水力输送岩心的方法,因而极大地减少了钻进过程中的起下钻次数,据统计,采用KTK-300钻机组每钻进100 m平均提钻0.6次,而常规岩心钻进则需要24.1次。十分明显,这样的高效益只能建立于岩心在管道中能够顺利输送,即基本不产生堵塞的前提下才能获得。然而,岩心在管道中的输送是一个极为复杂的过程。钻进时,岩心通过漫长的管道,由孔底输送到地表,受多种因素的制约,如果对其任何一种因素未能很好控制,便可能引起岩心正常输送过程的中断,造成岩心(屑)在管道中的堵塞,从而丧失了水力输送岩心的优点。

岩心、岩屑在输送管道中的运动状态是反映水力输送能否正常进行的主要依据。根据二相流中密度较小的一相倾向于以较高速度流动的规律,在以岩心和冲洗液组成的二相混合物中,冲洗液在水泵压力的作用下,以一定的流速,沿钻杆通道按反循环方式流动,而钻进过程中所产生的岩心、岩屑(一般密度大于冲洗液)在整个体系中以三种状态存在,即:静止状态、悬浮状态及流动状态(在与冲洗液保持一定速度差的情况下,按冲洗液流动的方向流动)。三种状态的存在与转化,取决于冲洗液的特征(如密度、粘度)、流动参数(如流速、流量和压力梯度)和岩心(屑)的性状如岩心(屑)的形状、密度、岩心的长度、直径等。通常在一定条件下,如岩心(屑)性状及冲洗液特性固定时,若冲洗液的流速(V_L)较低时,则岩心(屑)在孔底处于静止状态,即水力输送过程没有发生;若冲洗液流速增高时,则岩心(屑)可悬浮于冲洗液中,但不随冲洗液流动,此时,冲洗液的流速称为平衡流速(V_{LP}),而与之对应的冲洗液的流量称为平衡流量(Q_{LP});当冲洗液流速大于平衡流速($V_L >$

V_{LP})时,则岩心(屑)开始随冲洗液一齐向上流动,但流动速度(V_c)始终低于冲洗液的流速。两速度之差称为滑移速度(S),表示为 $S = V_L - V_c$,即岩心与冲洗液之间产生了“滑移”,或称为岩心相对于冲洗液的“滞留”。

滞留现象可定量地以滞留率(H)表示:并定义为 $H = \frac{V_L}{V_c}$ *。这是一个非连续性的方程,表示在管

道中岩心与岩粉实际处于不连续的状态,因为冲洗液和岩心的上升速度(V_L 和 V_c)远远大于岩心的生成速度(即机械钻速)。滞留率的大小表示岩心与冲洗液之间滑移速度的大小。本文以岩心上升速度与冲洗液上升速度的接近率(K)(以下简称速度接近率)表示微滞留现象,并定义为; $K = \frac{V_c}{V_L}$ 。其大小表示岩心

上升速度与冲洗液上升速度的接近程度,即滞留率越小,速度接近率越高,其极限值为1。

滞留现象存在于固液两相混合物流动的全过程并对岩心的输送和堵塞有十分密切的关系,特别是当心底破碎产物比较复杂,其中即含有属于细分散体系的岩粉,又含有属于粗分散的岩碴、岩块或柱状岩心时,则更为明显。试验表明,当管道中被输送的岩心(屑)具有不同的速度接近率时,则表现为它们在管道中具有不同的上升速度。当上升速度较快的小岩屑逐步挤塞于岩心与内管壁之间的环隙中时,便造成岩心在管道中的堵塞。由于此种堵塞是由岩心及岩屑的滞留现象所引起的,故称为“滞留堵塞。”

影响滞留现象的因素很多,且所有这些因素也都是影响岩心滞留堵塞的因素,其中与钻进过程有关的主要因素是冲洗液的上升速度、岩心的直径、密度和长度。实验结果表明:(1)不同形状的岩心。在同一流速的冲洗液中,具有不同的速度接近率,其中细分散的岩粉随颗粒直径和密度的增大,速度接近率降

*若将钻进产物看作为假均匀流体(如钻进某些砂、粘土类地层时),则 H 以连续性方程表示,即 $H = \frac{C_c}{C_L}$ 。

$\frac{E_c}{E_L}$ 。式中: E_L 、 E_c 、 C_L 、 C_c 分别表示冲洗液与岩粉的截面就地体积分数与入口体积分数。

低,而柱状岩心则随岩心直径的增大,速度接近率增高,但随岩心长度和密度的增大,速度接近率降低,介于细分散岩粉与柱状岩心间的大小不等,形状复杂的岩碴、岩块,其速度接近率通常均低于以上两种情况,但由于形状大小各异,目前尚未做具体分类;

(2)当冲洗液的流速较低(介于平衡流速与二倍平衡流速之间,即 $V_P < V_L < 2V_P$,一般为1.5m/s以下)时,各种不同形状的岩心(屑),其速度接近率相差幅度很大;(3)随着冲洗液流速的提高,各种形状岩心(屑)的速度接近率均有所提高,当流速达到2.5m/s以上时,其速度接近率将趋于一致,即都接近于1。

从试验的结果可以看出,当冲洗液上返速度较低时,各种不同形状的岩心(屑)的速度接近率相差很大,这是输送岩心的最不利的条件,也是造成岩心堵塞的重要原因之一。曾对低流速条件下岩心(屑)堵塞进行了专门的试验。试验时内管中冲洗液的流速 $V_L = 1.14\text{m/s}$,钻进过程中所产生的岩心直径41mm(内管直径为46mm),岩心在内管中的上升速度 $V_c = 0.8\text{m/s}$,其速度接近率 $K = V_c/V_L = 0.8/1.14 = 0.7$ 。在这种条件下钻进时,曾多次产生岩心堵塞,说明此种水力参数不适应水力输送岩心的要求。笔者曾目睹岩心在钻具观察照相段(装于钻具中的有机玻璃管段)产生堵塞的状况,其基本形式如图1所示。其中A、B两种形式是大块岩心被周围充填的岩粉所堵塞,其原因是岩心上升速度(0.8m/s)与岩粉上升速度(接近于冲洗液的上升速度,即1.14m/s)之间较大的速度差,因而在输送过程形成滞留堵塞。由岩石节理处斜劈破裂的岩心(如图1B所示)产生堵塞的概率高于柱状岩心。因为在斜劈岩心之间,即使存在较小的速度差,也因轴向位置的错动而极易造成堵塞。

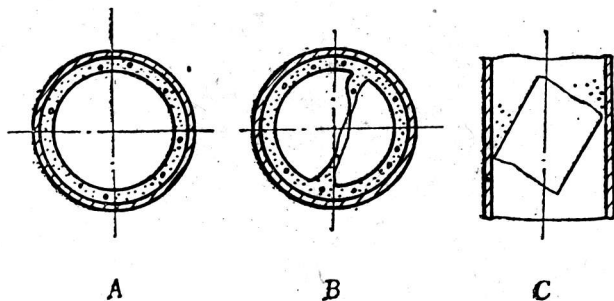


图1 岩心堵塞状况

在试验中观察到,当冲洗液中含有细分散的岩粉并以较高速度在静止管道中流动时,岩粉颗粒具有明显的向管道中心集中,形成沿管道轴线的条带状分布状

态(如图2A所示)。当管道旋转时,则条带状分布变化为螺旋曲线状(如图2B所示)。冲洗液的此种流动型态,对岩心的输送有一定影响。试验还观察到,当岩心被管道中高速流动的冲洗液携带向上运动时,岩心表现为沿管道轴线上升并伴有与钻具相反方向的旋转(旋转速度比钻具转速低),而在岩心的周围则由一层高速流动的液膜所包裹,使其与管壁隔开,形成岩心在管道中沿轴线稳定上升的形态。然而,当冲洗液流速降低时,岩心沿管道轴线运动的稳定性及水膜的“分隔作用”随之降低,而且速度越小,下降幅度越大。结果,岩心在低速冲洗液中的运动状态表现为不稳定的摆动,而对于一些长度小于或等于管道直径的岩心,则表现为在管道中的翻滚,最终导致岩心的最长边与管道内壁产生卡挤(如图1C所示),形成堵塞。此种堵塞是由于岩心在运动过程中丧失稳定性所引起的,故称为“失稳堵塞”。

滞留堵塞与失稳堵塞都是由于冲洗液上升速度低引起的,是一种技术性的堵塞,其影响效果对管道的任何部位都是一样的。因此,堵塞可以在管道的任何部位及任何时间内发生,是一种没有规律的随机过程。然而,当岩心规格不适当,如卡断长度太大,直径太小或卡断长度与管道内径相接近等因素都影响岩心的上升速度和稳定性,因而也加剧了岩心堵塞的可能性。

试验还表明,在钻进过程中所有造成内管冲洗上返速度降低的因素,同时也是形成管道中岩心堵塞的条件。其中内管接头密封质量不好,丝扣松脱造成冲洗液循环短路,致使脱扣部分以下的冲洗液不能上返,或上返速度极度下降。在这种情况下,岩心堵塞

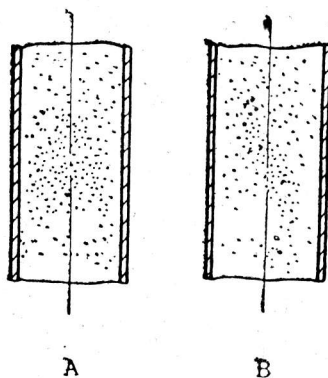


图2 含岩粉的冲洗液在内径为46mm管道中流动的流型

A—管道为静止状态; B—管道下部旋转

的概率极高,而且在地表观察不到任何能反映堵塞的迹象(加憋泵现象)冲洗液仍以正常的速度返回地表,钻进过程在一定时间内仍可正常进行,只是岩心不能返出。实际上,岩心已可能在断流部位以下形成堵塞,此种堵塞称为“孔内断流堵塞”。

岩心在沉降过程中也可能形成堵塞。理论分析和试验结果都表明,在输岩管道中,不同大小、形状的岩心和岩屑在冲洗液中具有不同的沉降速度。在钻进过程中,当钻完一根钻杆后,一般都要根据孔深情况进行一定时间的冲孔(按岩心上升速度为 1.5m/s 计,则 100m 孔深至少需要冲孔两分钟),以便把所钻岩心(屑)全部冲出孔外。然而,当钻孔深度较大、冲孔时间较长时,为节约冲孔时间,可利用岩心(屑)在冲洗液中下降速度较慢($0.4\sim 0.7\text{m/s}$)的特点,即不必将全部岩心冲出孔外便可进行加接钻杆的操作。一般在这一段时间内,岩心尚不致落于孔底,待加接钻杆完成并继续钻进时,岩心在内管中仍按一定间距顺序上升。然而,当孔内岩屑较多,岩屑与岩心的下降速度相差很大时,若在加接钻杆中未将全部岩心冲出孔外,也可能由于下降速度差而造成岩心堵塞。或者,由于加接钻杆的时间较长,在此期间有多段岩心及岩屑沉降于孔底,扫孔时,由于各段岩心相距较近、岩粉较多,也容易造成岩心堵塞。这两种堵塞可分别称为“沉降堵塞”和“扫孔堵塞”。

此外,由于输岩管道变形、有台阶、或弯管处曲率半径太小,岩心不能通过,以及一切直接影响岩心正常输送所造成的堵塞现象,统称为“直接卡塞”。试验表明,当水力参数适当时(试验采用 $V_1 > 2.3\text{m/s}$ 的上返速度),只要内管直径与岩心直径相适应,那么在内管中有小的台阶或凹槽,对岩心堵塞的影响并不是很显著的,这种现象可以用高速流动的两相流的流型和岩心在输送过程中保持沿输岩管道中心稳定的现象进行解释。然而,当两相流体系中的岩心处于失稳状态时,则管道中的凹槽及管壁的粗糙等因素将对岩心的堵塞起明显的影响。

在生产钻进中,曾多次发现岩心在输岩管道出口段的胶管中发生堵塞的现象,对输岩过程有很大的影响。出口段岩心堵塞是由于岩心及冲洗液由上升运动转变为下降运动,在重力加速作用下使岩心输送状态失去稳定所引起。在实际生产中,出口段采用易于弯曲的波纹胶管,呈倾斜下垂或弯曲状态并随水龙头的上下运动而变化。岩心在出口段中受自重所产生的与管壁的摩擦力及高速跌水紊流的冲击作用,极易产生翻滚运动。当岩心长度与管径大小相近时,便可能形成岩心的堵塞。虽然此种堵塞易于排除,但毕竟给操

作者带来许多不便,同时,其发生概率较高,稍有不慎,便可引起输送管道其它部位的堵塞。因此,是绝对不可掉以轻心。

在水力输送过程中,岩心在卡断器部分的堵塞也是经常发生的。试验表明,由于卡断器的结构设计及卡点高度确定不合理。或孔底冲洗液分布不均衡等因素,都很容易引起岩心的堵塞。楔块式卡断器是一种经常采用的卡断器,对松软岩层有较大适应性。由于岩性较软,楔块与岩心间的接触面积较大,岩心受力均匀,可以减小岩心在挤断时的破坏,能提高岩心的完整度,但当岩心与卡断器卡紧时,在钻具上下运动及水力冲刷作用下,岩心表面又可产生局部变形和剥落,不易造成岩心与卡块卡死。然而,若采用楔块式卡断器卡断坚硬岩心,则由于岩心具有较高硬度和强度,其与卡断器楔紧部分的表面,不易产生局部变形和破碎,因此极易造成岩心与楔块卡死。试验结果还表明,当卡断器卡点位置不合理,如卡点位置太低,则岩心卡断部分过分靠近孔底,致使岩心卡断处带有蘑菇头形根部,其扩大部分的直径(d')大于岩心直径(d) $2\sim 5\text{mm}$ 。(参见图3A)。因此,岩心无法通过卡断器并在此处造成堵塞。此外,在钻进节理比较发育的岩层时,由于孔底水流分布不均衡,致使被卡断的岩心不能以较高的加速度,迅速与下部岩心分离,造成岩心错位并在卡断器部分形成堵塞。

目前,通过对水力输送过程中岩心堵塞原因的分析,已基本摸清产生岩心堵塞的机理并探索出一套防止岩心堵塞的具体措施。经钻进实践,初步证明这些方法是有效的。

防止岩心在输送管道中产生堵塞的最基本条件是必须建立与保持管道中冲洗液必要的上返速度。由水力输送的基础研究和钻进试验结果得出综合结论,对于钻进松散地层,冲洗液的上返速度不得低于二倍主体岩碴(屑),即指被冲洗液携带的岩碴(屑)中数量多且最不容易输送的岩碴(屑)的平衡速度(即 $V_L \geq 2V_p$)。主体岩碴(屑)的平衡流速应通过实验具体确定。笔者曾测定了9种不同形状和大小岩碴的平衡流速,其变化范围在 $0.36\sim 0.88\text{m/s}$ 之间,说明如果仅仅是为了输送松散岩碴(屑),则冲洗液的流速在 $0.8\sim 1.8\text{m/s}$ 之间已满足要求。对于柱状岩心,则冲洗液的上返速度应达到使岩心上返速度与冲洗液的上返速度之间的速度接近率在 0.8 以上。通常在岩心直径适当时(如内管直径为 41mm ,岩心直径为 37mm),冲洗液的上返速度应大于 2.3m/s 。大量试验证明,当冲洗液的上返速度达到以上两种情况时,岩心在管道中的“滞留堵塞”与“失稳堵塞”基本可以避免。因此,建立与

保持内管中冲洗液的必要的上返速度是防止岩心堵塞的重要条件。

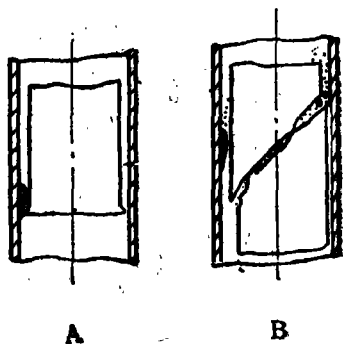


图3 岩心在卡断器部分的堵塞原因
A—岩心根部扩大；B—岩心沿节理面错动

影响内管中冲洗液上返速度的因素很多,其中最直接的是泵入循环体系中的冲洗液量和管道的通水断面面积(以管径表示)。当内管内径固定时,管内冲洗液的上返速度与冲洗液量成正比;而当冲洗液量固定时,则速度与管径的平方成反比。因此,减小内管内径,对提高冲洗液的上返速度有明显的影响。从“三环间隙”的研究中,已对岩心直径、双层钻杆内、外管组配得出了明确的结论,其基本出发点是,在保证内管中的冲洗液达到最大速度的前提下,钻杆的不同组配形式所能达到的极限钻进深度及最大的压力损失。通过计算表明,为了在 $\phi 73/63$ (外径73mm,内径63mm)外管与 $\phi 50/46$ (外径50mm,内径46mm)内管组成的双层钻杆(曾经采用过的钻杆)的内管中获得大于2.5m/s的流速,则100m孔深的压力损失将高达1.99MPa,所需的最大泵量为324.1L/min(其中包括30%的漏损),而采用 $\phi 71/61$ 外管与 $\phi 46/41$ 内管组成的双层钻杆(现采用的钻杆)时,孔深100m的压力损失为0.8MPa,所需的最大泵量为257.45L/min(包括30%的漏损)。两者压力损失比为2.49:1,前者比后者高149%。泵量比为1.26:1。若在内管中的冲洗液同样达到2.5m/s的流速,则前者的泵量比后者大26%,因此,使用第一种型式的双层钻杆并保证其内管中冲洗液的上返速度达到2.5m/s以上时,则所需的最大泵量及泵压已超过目前国内外在300m孔深范围内所常采用的水泵的容量(我国采用320/60水泵,最大泵量320L/min,泵压为5.9MPa)。

由于岩心在固定流速的冲洗中的上升速度随岩心直径的增大而增大,因此,当钻进时的流量及流速已调节于某一固定值时(如2.5m/s),岩心的上升速度便主要取决于岩心直径的大小,也就是取决于内环间

隙或钻头内出刃的大小。实际钻进资料表明,以固定的钻头内出刃钻进不同地层时,所获得的岩心往往具有不同的直径。如以水力反循环方式在石膏地层钻进时,钻头内径(以内出刃大小计)为37mm。所获砂岩岩心的直径约36.8mm,而石膏矿心小于36mm。因此,为了保证小直径岩心的速度接近率也能达到防止滞留堵塞的基本要求时,则应进一步提高冲洗液的上返速度,具体表现为泵量应比原泵量加大10—20%。

防止断流堵塞的主要途径是提高钻具的加工精度和改善钻具的使用状况。由于国内现有的双层钻杆属于无内管长度补偿的单根组配式钻杆,每单根钻杆中内、外管的长度组配是固定的,通过生产使用认为,其公差范围以 ± 3 mm为好。否则由于内管连接长,可能造成内管挤压变形或外管丝扣不能到位,影响连接强度及密封质量。再者,若内管接头处长度不够,则密封圈不能到位,造成内管密封失效,引起内管泄漏或完全“短路”。此外,由于连接长度不够,内管在外管中有轴向活动的余地,可能造成内管接头脱扣,其后果也将是冲洗液的完全“短路”,因而极易引起岩心的断流堵塞。在1988年某钻孔的生产钻进中,所使用的钻杆约50%以上存在内管长度超差现象,其中负公差在10mm以上者约占30%以上。因此,在钻进过程中多次发生内泄漏及断流现象,造成断流堵塞。为了解决这种堵塞,必须严格钻杆及接头的加工精度,同时内管与接头的丝扣连接部分要上粘结剂,以防丝扣松脱。

沉降堵塞现象是完全可以人为控制的,关键在于对孔内情况的判断。如果孔内冲洗液中岩粉含量较少,加接钻杆的时间与岩心沉降时间相适应(可在钻进过程中进行必要的标定,即在岩心尚未落至孔底时,加接钻杆已完成),则沉降堵塞是比较容易避免的,否则在加接钻杆前应将孔内全部岩心冲至地表。

防止卡断器部分的岩心堵塞,需结合所钻岩层的性质,从改善卡断器的结构、调节卡点高度及控制孔底液流分布等方面入手。前面已经分析了卡块式卡断器容易造成坚硬岩心堵塞的原因。试验表明,采用非对称球形卡断器(如图4A所示)可以改善卡挤岩心的状况。非对称球形卡断器为镶焊于取心管壁上的一块 10×40 mm的硬合金块,下部为截面呈浑圆形的斜面

* “三环间隙”是指孔壁与钻杆外径间的环隙——称外环,双层钻杆内、外管之间的环隙——称中环,双层钻杆内管内壁与岩心之间的环隙——称内环。有关“三环间隙”的合理配合,笔者将在另外的论文中论述。

导向段,上部为球形卡点。岩心在生长过程中,可沿斜面逐渐导至球形卡点最凸出的部分,可以避免小曲率球形卡断器(如图4B所示)与岩心接触时所产生的轴向分力。由于导斜面与岩心为点接触,也可避免采用楔块式卡断器(见图4C),由于楔块与岩心接触面积太大而造成的卡塞。在卡断坚硬岩心时,还需合理设计卡点的装置高度(卡点距岩心根部的距离)。当卡点位置较低时,卡断岩心所需径向力较大,岩心卡断面过分靠近岩心根部。经验表明,增高卡点位置能使岩心卡断面向上移动。如图5所示,卡断面由

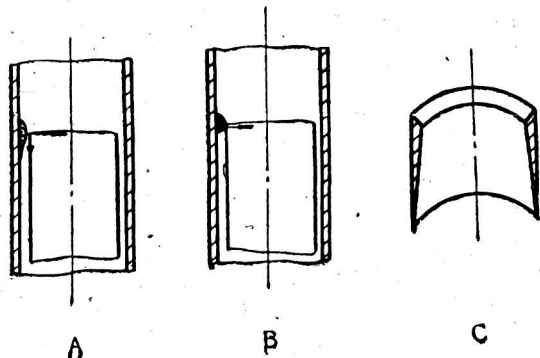


图 4

A—非对称球形卡断器; B—小曲率球形卡断器;
C—楔块式卡断器

2—2面上移至1—1面,从而可以消除蘑菇状岩心的产生。设计卡点高度还应考虑岩石的性质,若岩石抗剪强度大,则卡点位置应提高。曾采用卡点高度为120mm的卡断器。在4—6级的岩石中钻进80m,未出现蘑菇头状岩心。

孔底液流分布状态对防止卡断部分的岩心堵塞有较大影响。为了使岩心卡断后能顺利输送和防止堵塞,卡断后的岩心应以最快的速度跟根部岩心分离,或破碎岩块间尽快拉开距离,有助于防止岩块在卡断器部分造成挤楔。然而,从一般钻具的结构看(见图6),当冲洗液由内环隙中以较高流速进入岩心上部时,由于过水断面突然扩大,流速下降,岩心上部形成旋涡区,造成较大的局部阻力损失,不利于岩心迅速上升。经验表明,在卡断器上部安装喷射器(见图7),通过由喷射器喷嘴喷出的高速射流,在岩心上部形成负压区,有助于岩心卡断后的迅速上升,通过模拟试验证实,此种喷射器具有较强的抽吸力。

出口段的岩心堵塞其排除比较容易,但为了避免由此而引起输岩管道其它部位的堵塞,因此,也应给予必要的重视。通过减小排岩管内壁的阻力,缩短排岩管长度,能降低堵塞的可能性。将排岩管由长波纹胶

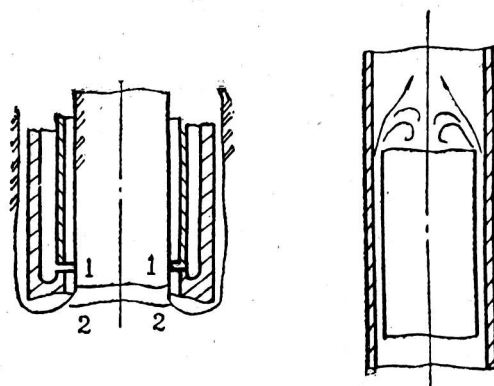


图 5 岩心卡断面的变化图

图 6 冲洗液流出内环隙时所造成的旋涡区

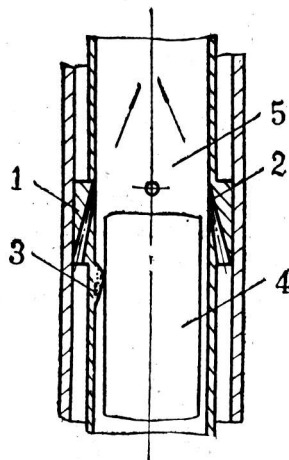


图 7 喷射器对孔底岩心上升的影响

1—喷射器; 2—喷嘴; 3—卡断器; 4—岩心; 5—负压区

管改为短透明尼龙管并插入到一段直径较大的固定管中(如 $\phi 89$ 岩心管)。当立轴上下运动时,尼龙管可在大直径管中自由伸缩,可避免不规则的过渡弯曲,能减小堵塞的可能。同时,由于岩心出口位置固定,便于采用机械化收集岩心装置。

岩心堵塞是决定水力反循环钻进能否正常进行的关键,通过试验研究已得出初步结论:

1. 在水力输送过程中,岩心的堵塞是可以防止或可以极大地减少发生的可能性;
2. 已基本探明岩心堵塞的机理,为进一步研究奠定了基础;
3. 已摸索出一套防止岩心堵塞的方法和工艺技术措施,在生产中取得了较好的效果。