

钻井工程师进修丛书·钻井工程师进修丛书



郭学增 编

最优化钻井理论 基础与计算

石油工业出版社

· 29044

钻井工程师进修丛书

最优化钻井理论基础与计算

郭 学 增 编 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从理论上阐述了最优化石油钻井的基本原理,可运用其原理去规划、设计、预测和分析钻井过程中的工艺技术问题,还介绍了一些油田现场可行的计算方法。为了便于学习,书中编入了一定数量的例题。全面介绍了最优化钻井的基本概念、钻进过程的基本规律、钻进目标函数分析、钻进资料数据处理和参数优选的计算方法。

本书可作为钻井工程师进修用书,也可作为院校钻井专业师生的参考书。

钻井工程师进修丛书 最优化钻井理论基础与计算

郭 学 增 编 著

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)

安徽阜阳印刷总厂排版

北京昊海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 7 1/4印张 166千字 印1—2,000

1987年3月北京第1版 1987年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2651 定价: 1.45元

出版者的话

为了能使钻井工程技术人员系统学习掌握钻井基础理论知识和国内外先进钻井技术，提高工作水平，适应我国石油工业发展的需要，我们将陆续出版钻井工程师进修丛书。本书是该丛书的一本，可作为钻井工程师进修用书，也可作为大专院校有关师生和钻井技术人员的参考书。

编辑出版钻井工程师进修丛书，对于我们来说还缺乏经验，恳请读者批评指正。

前 言

最优化钻井理论基础与计算,是指钻井工程技术人员创造性的运用最优化科学原理去规划、设计、预测、计算和分析钻井过程中所必须解决的工艺技术问题。为了适应科技形势的发展,为了满足广大从事钻井工作人员迫切要求掌握实用的优化钻井理论与计算方法,运用微型计算机或程序式计算器及时的进行运算、分析和处理生产上的大量资料的愿望,以便从中得到指导实际工作的有效措施。为此石油部领导多次指示,钻井工作的技术领导干部和骨干需要培训,由华东石油学院组织编写相应的教材。

本书是以基础理论和计算方法为主,力求从理论上阐述最优化钻井的基本原理,并介绍一些曾在中原油田试用过的计算方法,使钻进参数优选的推广工作成为可能。为了便于读者掌握优化钻井的原理,书中编入了一定量的实例,作者提出需要解决的问题,阐明解题思路,给出了解决问题的方法、步骤及结果,以便读者能正确的理解方法的实质及其应用范围。

第一、二章为基本概念和基本规律;第三章为目标函数的分析;为使本书的有关模式服务于生产实际,作者参加了中原油田国家科技攻关项目“优选钻井参数、平衡压力钻井及井控研究”,收集了大量的实际生产资料,总结出现场可行的数据处理方法,运用TRS-80Ⅱ型、Ⅲ型和IBMPC型计算机,编制了程序、进行了实践,并经过整理写成本书的第四章;而第五章着重介绍几种计算方法;并在附录中给出经典迭代法和有关公式的推导;注明参考文献,供读者自行查阅。

书中内容除可用作教材外,还适合于自学。在本书出版前,承蒙华东石油学院副院长胡湘炯副教授审阅,提出了许多宝贵的意见。在收集资料的过程中,曾得到中原油田李元子、杜成武等同志的支持。在本书作为石油勘探开发技术培训中心教材试用期间,曾得到校内外许多同志的关心和帮助。华东石油学院钻井教研室的一些同志还参加了誊写等工作。谨此一并表示感谢。

著者的水平有限,加以编写时间匆促,本书难免有缺点和错误,敬请读者批评指正。

作者 1984年9月

于华东石油学院北京研究生部

目 录

第一章 最优化钻井基本概念.....	(1)
第一节 最优化钻井发展的历史背景.....	(1)
第二节 最优化与最优化钻井.....	(1)
第三节 一口井的最优化设计与最优化施工.....	(2)
第四节 计算机与计算数学在最优化钻井中的地位.....	(3)
第二章 钻进过程的基本规律.....	(5)
第一节 钻进速度模式.....	(5)
第二节 钻头磨损速度模式.....	(14)
第三章 钻进目标函数分析.....	(23)
第一节 目标函数的几种模式.....	(23)
第二节 目标函数的极值与约束条件.....	(26)
第三节 最优磨损量、最优钻压与最优钻速.....	(31)
第四节 目标函数的等值面.....	(42)
第四章 钻进资料数据处理.....	(47)
第一节 钻速实验数据处理.....	(47)
第二节 钻头资料数据处理.....	(54)
第三节 钻时录井资料分析.....	(59)
第四节 钻时录井曲线的数据处理.....	(66)
第五章 参数优选的计算方法.....	(78)
第一节 参数优选的顺序与无极值参数的优选.....	(78)
第二节 单纯形法.....	(79)
第三节 经典最优化方法.....	(83)
第四节 拉格朗日乘子法.....	(87)
第五节 极限磨损面上寻优逻辑分析.....	(99)
附 录	(101)
一、直接迭代法确定轴承磨损区的分界钻压值	(101)
二、牛顿迭代法确定最优牙齿磨损量	(102)
三、Melrose法求环空压降和ECD.....	(103)
四、求全局最优点公式推导	(106)
五、 $H_f=1$ 条件下寻优公式推导.....	(107)
六、常用许用单位和非许用单位换算表	(108)
参考文献	(109)

第一章 最优化钻井基本概念

第一节 最优化钻井发展的历史背景

最优化钻井的概念,是在六十年代末期提出来的。但它作为一种完整的工艺措施进入技术领域,有其深远的历史背景。这就要追溯到1948年开始的“钻井科学化阶段”。

在“钻井科学化阶段”的前十年中(1948~1958),主要的技术成就是喷射钻井。有关喷射的经典著作,诸如水马力和冲击力理论,以及各式各样喷射钻头的应用,均出现在这十年中。喷射钻井的应用,第一次解放了钻井速度,把钻井科学推上了一个新的高度。

钻井科学化阶段的后十年中(1958~1968),主要的技术成就是平衡钻井。由压差理论的提出,到有关地层孔隙压力梯度,破裂压力梯度的理论和测定方法,一整套实施平衡钻井的装置和设备,到形成系统的压力控制理论,贯穿在整个六十年代。科学化阶段后十年的技术成果,使钻速获得了第二次解放,钻井的科学水平,爬上了另一个台阶。

由科学意义上讲,钻井已经由一门凭经验实施的工业技术,上升到一门由若干基础学科组合而成的,并具有独特内容的科学范畴。钻井中的各种参数,已经可以用数学符号联系起来,形成若干完整的数学表达式。因此,利用各种规化理论于钻井科学,已成为可能。

正是在这样的历史背景下,提出的最优化钻井。因此可以说,最优化钻井是在喷射钻井和平衡钻井基础上发展起来的钻井工艺技术,是集科学化钻井阶段的大成。

第二节 最优化与最优化钻井

最优化是在复杂的实际环境中,从遇到的许多可能决策中挑选最好决策的科学。它是运筹学、管理科学、工程、经济、系统分析和计算机科学领域中的一项重要数学理论学科。

由古老的经典最优化理论,到现今的具有各种约束条件的线性和非线性规划,特别是高速电子计算机出现以后,最优化理论已普遍应用于各个领域,成为各门科学技术不可分割的一部分。

最优化钻井,就是用最优化数学理论,分析和处理钻井中的数据 and 资料,从而使钻井获得最佳的工艺技术。

钻井的数据和资料,不外乎两大类。一类是完钻井的资料,这类资料经过加工和处理,是新井设计的重要依据。另一类是钻井施工中的数据,这类数据经过实时的加工和处理,可以优选措施,预测指标,使钻井进程保持在最优的经济状况下。

最优化钻井的核心问题是创造、发展和应用符合钻井客观规律的数学模式。这里,首要的内容是创建模式和发展模式。要创建模式,就要确定变量,收集有关的数据,列出有待最优化的目标函数,根据数据的规律把变量组成一组有约束的数学关系式。这便是创造模式。

应该承认的是,钻井是一门复杂的科学。随着科学技术水平的提高和科学实验的进展,会不断总结出新的规律,不断引入新的变量,不断完善成新的数学关系式。这样,目标函数会起变化,求解的方法也会相应变化。这就是发展模式。

有了模式和方法,重要的问题在于使用这些模式和方法,去解决钻井中的实际问题。编制出各种计算程序到现场去应用模式和方法。

第三节 一口井的最优化设计与最优化施工

按最优化的原则去规划一口井,必须经历以下几个步骤:

1. 收集邻井的原始资料和数据

这些资料包括本地区地球物理资料,邻井的泥浆资料、钻头资料等。

2. 制定钻井基础程序

根据地球物理资料,计算地层压力剖面,确定井身结构,完成套管柱设计,选择钻井和压力控制设备,选择和校核钻柱。

根据邻井泥浆资料,确定泥浆设计,选择固相控制设备。根据泵的功率分段确定最优的水力参数。

根据邻井的钻头资料,确定地层的特性,优选钻头类型,优选钻压和转速,并进行指标预测。

上述设计原则的确定,是把平衡钻井的需要放在首位,用井身结构确保油井工程能在近平衡条件下实施。在这基础上,充分发挥水力功率,优选钻头类型、优选钻压·转速配合,才能发挥作用。

基础程序的制订步骤,可用以下方框流程图表示。见图1—1

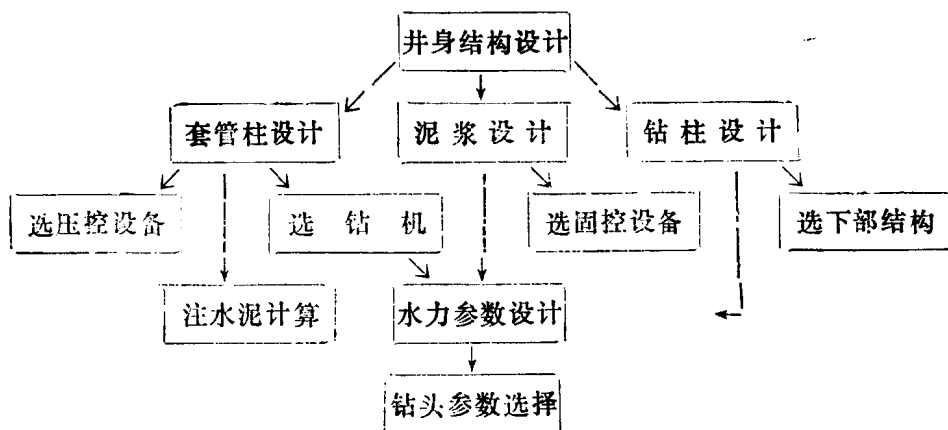


图1—1 钻井基础程序制订步骤

3. 现场执行基础程序

为了使基础程序得以顺利的实施,必须配备技术上支撑基础程序的辅助程序。遇到技术问题时,辅助程序可以根据最优化原则,局部修正基础程序。

这些辅助程序应包括:随钻过程中地层孔隙压力梯度的确定,地层破裂压力梯度的校核,工艺措施中允许使用的井口套压,抽吸和压力激动的数值,具体环境中水力参数的计算,

泥浆参数变化后钻头指标的修正,钻头类型变化后技术措施的修正,井斜方位偏差计算等。在辅助程序的支撑下,这口规划的油井得以完钻。

4. 全井整体技术经济评价

完钻井的实际技术经济指标,往往不同于设计时的预测指标,这是正常出现的现象。但实际的技术经济指标,是客观实际的反映。这些技术资料是应该经过加工处理,作为今后设计的参考资料。因此,加工完钻井资料,做出整体经济评价,绘出理论与实际施工进度图,是非常必要的。加工后的钻井资料,立档存入数据库。

第四节 计算机与计算数学在最优化钻井中的地位

上节列出了按最优化原则规划一口井的全部进程。分析上述进程可以看出,除了收集资料和数据是由主持规划的人员进行以外,其余三个步骤,都需要计算工具的配合。

基础程序的制订,需要大量地球物理资料的对比、计算和分析,需要大量水力参数的计算和选择,需要大量钻头资料的对比,中间参数的计算,参数的优选和指标预测等。这些工作需要用计算中心的计算机去完成。

到现场执行基础程序,需要多种辅助程序的支撑。这些繁琐的计算,要求的时间急,准确性好,而且还要在井场进行。这就是说,井场也要配备计算工具。

完井后的资料整理和归档,更是离不开计算工具。

因此可以说,计算机是最优化钻井中不可少的计算工具。它不但要配备到指挥部一级的计算中心或计算站,而且还要考虑到井场上的实际需要。

根据国外的资料报导,井场上可以有以下四种方式,配备和使用计算机。

(1) 对于海上钻井、超深井,可以用装有专用计算机和台式机的综合录井装置,使井上的数据得以实时处理。这种方法用起来最昂贵,它的服务费用高达每天1000美元。像贝来德(Earoid)公司的CAD T装置等,均属于这种类型的录井装置。

(2) 对于边远地区的油井、重点井,可以使用带辅助程序的台式机(微计算机)进行必要计算。这样的服务费用,可以减少一半。

(3) 对于一般的油井,可以在井场装有无线电联系的分时终端机,把若干口井联在一个网络上,共享一台网络计算机资源。这种装备的服务费用,就降低到每天100美元左右。

(4) 对于近区的一般井,可以使用电话线联系的地区分时终端机,其服务费用又

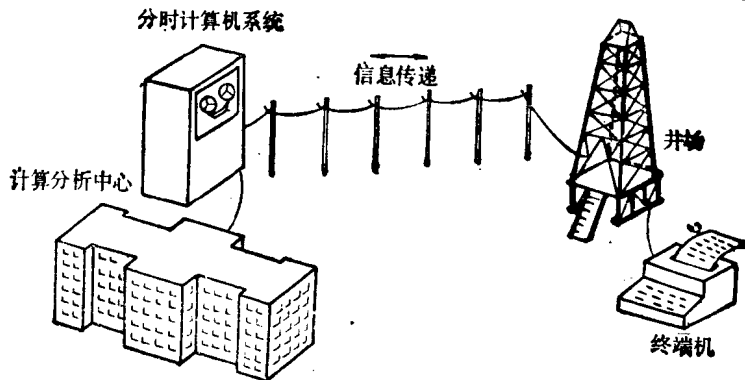


图1-2 用电话线传递钻井信息

可以比前者节约一半左右。这种使用计算机的方法，是最经济、最有发展前途的方法。

利用电话线联系的分时计算机网络，传递钻井辅助程序信息情况，可以示意如图 1—2。

随着先进计算工具在钻井规划中的使用，计算数学将成为钻井行业中一门不可缺少的理论学科。计算数学帮助钻井工程人员分析数据，进行最优化设计，运用和发展模式，指导最优化施工，进行指标预测，实现最优化技术管理，建立各种数据库等。总之，计算数学会使钻井工作进入更加科学的时代。钻井工程技术人员，应该看到这个远景。

第二章 钻进过程的基本规律

钻进过程是油井工程中的重要阶段。描述这一过程的数学模式,充分地反映了钻进过程的基本规律,揭示了各种影响因素之间的矛盾关系。认识和掌握诸因素的特征,充分地利用这些基本规律,是实现最优化钻井所必要的基础知识。

描述钻进过程的数学模式,是不断发展完善的。1958年穆尔(Moore P.L.)提出影响钻速的因素以后,1960至1963年间盖尔和伍兹(Gale E.M. & Woods H.B.)创建出两元的钻进模式,当时该模式在钻井工业上得到了广泛的应用。1969年扬(Young F.S.)发表了用两元模式在现场实验成功的重要文章。此后,出现了钻进模式应用的高潮。一些新的更加全面的模式,不断在Young模式的基础上出现。特别应该强调的是在Young的磨损模式中,把钻头按其磨损规律进行分组,具有重要的工业价值。从此以后阿姆科(AMOCO)钻井研究中心从事钻头的科学分类工作,一直进行到现在。

Young的钻速模式,有一定的局限性。此后不断有人补充和修正Young的钻速模式。由两元模式,发展到三元、四元……乃至多元。1974年布戈尼和扬(Bourgoyne A.T. & Young F.S.)协作,发表了利用数理统计取得的多元钻速模式。此后1980年哉,阿斯瓦得(Zeiad Aswad)也发展了Young钻速模式,阿姆科和D.W.C.研究机构等,也都在Young模式的基础上发展了多元的钻速模式。

到目前为止,修正的Young模式,成为当前国外应用较广泛的模式之一。

本书为了说明最优化的科学原理,援引了修正的Young模式,作为分析对象。读者可根据这些原理,扩展到其他模式。

第一节 钻进速度模式

用数学表达式描述钻进速度,是钻井走上科学化的必要条件。应该肯定,影响钻速的因素是非常多的,只能选取其中影响大的,规律比较明显的,作为钻速模式中的变量,而其他的、次要的因素予以忽略。

一、钻压对钻进速度的影响

钻压是影响钻进速度最直观的、最明显的因素之一。过去国内外不少科研人员做试验,得出各自不同的模式。对比这些模式,可以看出,下列试验的条件是个重要因素:

- (1) 井底净化条件一定;
- (2) 岩石破碎方式,必须以机械破碎为主。

在这样的条件下,典型的钻压-钻速关系曲线,如图2—1所示:

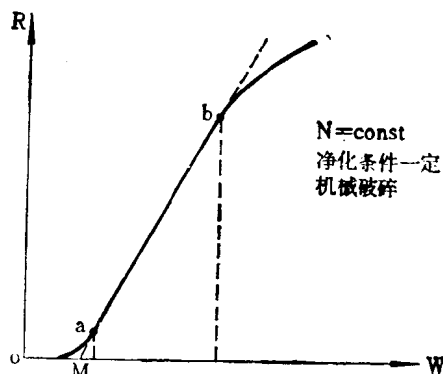


图2—1 钻压与钻速的典型关系

钻压与钻速在较大的范围内,是近似于线性关系的。它们的关系可用一个线性式(2-1)描述。

$$R \propto (W - M) \quad (2-1)$$

式中W表示钻压,单位为吨。M为门限钻压,它是把钻速和钻压关系线性化后的截距,单位也是吨。只有当W超过M而达到a点时,钻速与钻压才成线性变化关系。

门限钻压M值,取决于岩石的压实程度、应力状态和外界的作用条件。岩石的压实程度和应力状态,是由埋藏深度、上覆岩层的密度和岩石的矿物成分和结构决定的,这些是内在的特征因素。外界作用条件指的是,除钻压转速以外的作用条件,即水力参数的作用。

为了及时清除井底的岩屑,通常采用高能量的洗井液完成净化功能。井底的岩石在钻压作用下,常常会形成一些微裂缝,当水力能量足够大时,就可以使微裂缝扩大乃至使岩石破碎,故此时水力参数的作用已不可忽视。在机械和水力联合作用下,钻速——钻压曲线会向左平移,门限钻压M逐渐减小,甚至有可能变成负值。这就是水力和机械联合破岩的效果。在浅地层中岩石压实程度差,胶结松散,可以用水力冲蚀造斜,这就是水力破岩的实际例子。

表 2-1 门限钻压值与埋藏深度的关系

① 中 原 油 田		② 任 邱 油 田		③ 美 国 墨 西 哥 湾	
埋 藏 深 度	M 值	埋 藏 深 度	M 值	埋 藏 深 度	M 值
明 化 镇 1270	-1.1913	明 化 镇 上 1460	-1.1659		-2.50
馆 陶 组 1520	+1.1372	明 化 镇 下 1930	+1.6310		
东 营 组 2210	+2.2719	馆 陶 组 2180	+1.050		
沙 一 段 2580	+4.5018	东 营 组 3223	+1.600	3000	0.0
沙 二 段 3230	+6.3179			3300	
沙 三 段 3450	+7.7562	沙 一 段 上 3615	+2.1394		+2.50
		沙 一 段 下 3800	+2.3830		

①引用的是中原油田1983年的实验资料。

②引用的是任邱油田1982年的实验资料。

③引用的美国PTS培训中心的资料。

在现有的水力功率条件下，接近地表的门限钻压值常为负值，随着埋藏深度的增加，门限钻压逐渐上升为正值，但上升的幅度逐渐平缓，形成与岩石压实规律相一致的变化趋势。门限钻压的具体数值是因油田而异的。上面列出中原油田、任邱油田及美国墨西哥湾地区的门限钻压值，见表2—1。

表2—1列出的门限钻压值，说明了它具有强烈的地区性，不同地区的门限钻压不可以互相引用。必须依据本地区的实验资料回归出该地区的门限钻压变化规律。门限钻压值与使用的水力功率水平有关，随着钻井工艺技术的提高，会逐步采用更强的水力功率，则门限钻压值也会逐步地发生变化。因此也必须逐年得到修正。

由图2—1中还可以看出，钻压超过(b)点，钻速与钻压的关系，偏离了直线关系。这是因为净化条件已经限制了钻速增长的缘故。可以想象，如果净化条件进一步改善，(a)、(b)两点间的直线段，可以进一步延伸。

二、转速对钻进速度的影响

转速对钻速的影响关系，也是早期就得到研究的关系之一。

随着转速的提高，钻速是以指数函数关系变化的，但指数一般都小于1。这反映了岩石破碎时的时间效应问题。转速提高后，钻头工作刃与岩石接触时间缩短，不利于岩石的破碎，故转速与钻速成指数关系。如图2—2。

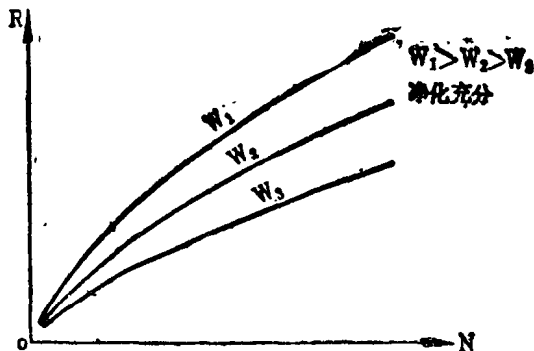


图2—2 转速与钻速的典型关系

钻速与转速的关系式，可以写成

$$R \propto N^{\lambda}$$

(2—2)

通过现场的各种钻速实验(Five Spot Test or Drill-off Test)，都可以求得门限钻压M和转速指数 λ 。

根据大量的现场实践，转速指数 λ ，一般在0.5~1.0范围内变化。地表岩石的转速指数接近于1.0。岩石埋藏得愈深， λ 值愈下降，但下降的幅度逐步变小，形成与压实规律相似的趋势。

三、牙齿磨损对钻进速度的影响

随着钻头牙齿的磨损，钻头的工作效率将明显下降，钻进速度也将随之降低。

牙齿磨损量，用牙齿的相对磨损高度表达。通常用H表示牙齿的磨损量，新钻头时H=0，牙齿全部磨损时H=1。

若钻压与转速保持恒定，则钻速与牙齿磨损量之间的关系，表现如图2—3。

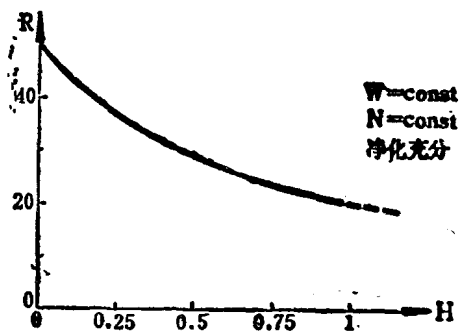


图2—3 钻速与牙齿磨损量的关系

钻速与牙齿磨损量的关系，可以写成

$$R \propto \frac{1}{1 + C_2 H}$$

(2-3)

C_2 ——牙齿磨损因数 (Tooth Wear Factor), 有时称之为钝化因数 (Dulling Factor)。它是钻头齿形结构与岩石性质之间的中间参数, 因此, 它的数值只能由现场数据加工而来。在一般条件下, C_2 的数值小于 4, 大于 0.5, 对于金刚石钻头, 则可以认为 $C_2 \approx 0$ 。

牙齿磨损因数 C_2 的物理意义可以描述为牙齿磨损到 $H_f = 1$ 时, 钻速的下降倍数。若 $C_2 = 1$, 则牙齿全部磨损时, 钻速比初始钻速下降了一倍, 即成为初始钻速的 $1/2$ 。

对于镶齿钻头, 牙齿磨损量 H 具有另外的基准。 $H = 1$ 时并不意味着是把露出的牙齿全部磨损, 而是对应于一定的磨损高度, 钻头磨损到这一高度时, 钻速变为初始钻速的 $1/3$, 换句话说, 镶齿钻头的牙齿磨损因数恒等于 2。

四、地层可钻性对钻进速度的影响

同样的钻压和转速, 使用同类型的钻头, 在不同的地层中钻进, 可以获得不同的钻速。这说明地层可以影响钻进速度的高低。这个影响可以用地层的可钻性系数 K 来描述。它的涵意是, 当钻压、转速、牙齿磨损量、水力参数、压差参数等等这些影响钻速的因素均恒定时, 钻进速度与可钻性系数 K 成正比。

根据前面的三个影响因素, 钻速的关系式可以写成

$$R \propto (W - M) \cdot N^\lambda \times \frac{1}{1 + C_2 H} \quad (2-4)$$

若在式 (2-4) 中, 引入尚未确定单位的钻速系数 K_0 , 则式 (2-4) 可以转化为等式形式

$$R = K_0 (W - M) \cdot N^\lambda \times \frac{1}{1 + C_2 H} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 便是 1969 年 Young 的钻速模式。当时的 K_0 值被定义为可钻性系数。实际上 K_0 为三个影响因素恒定时 (即钻压、转速和牙齿磨损量) 的钻速系数。在这样的定义下, 系数 K_0 中自然地包括了水力参数、泥浆性能和压差影响。

在修正的 Young 模式中, 水力参数和压差影响, 作为一个独立的因素由系数 K_0 中分离出来, 故修正 Young 模式中系数 K 只包含了岩石可钻性系数和泥浆性能, 以及一些尚未独立考虑的因素。

本书中, 仍把包含泥浆性能影响在内的 K 值, 称为可钻性系数。这个问题只有待创建了全面描述泥浆性能的模式以后, 才能彻底解决。

可钻性系数 K 的数值, 一般在 0.001 到 0.2 范围内变化。 K 的数值只有通过现场资料的加工后, 才能取得。下面列出中原油田五个层段的平均地层可钻性, 见表 2-2

表 2-2 中原油田各层的平均可钻性系数

层 段	东 营 组	沙 一 段	沙 二 上	沙 二 下	沙 三 段
K 值	5.253×10^{-2}	4.319×10^{-2}	4.473×10^{-2}	4.040×10^{-2}	3.858×10^{-2}

注: 此表系 1983 年的统计数据

五、水力参数对钻速的影响

1. 水力净化的影响

为了由Young模式的系数 K_p 中,分离出水力净化的影响,需要引用1975年阿姆科研究中心(AMOCO)发表的钻速与水力参数关系曲线,如图2-4。

由图2-4中可以看出,一定的钻进速度,意味着单位时间内钻出的岩屑总量,而该数量的岩屑需要一定的水力功率才能完全清除。低于这个水力功率值,井底的净化就不完善。若水力功率落入图2-4中的净化不完善区,则实际的钻速,就会比净化完善时的钻速低。

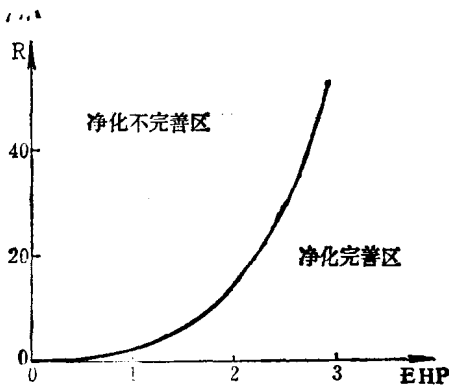


图2-4 钻速与水力净化的关系

实际钻速与净化完善时的钻速比,即为水力净化系数的涵意。用符号 C_H 表示水力净化系数,通过大量的实验数据确定其与水力喷射功率的关系式为

$$C_H = \frac{R}{R_{sf}} = \frac{E_H}{E_{rq}} \quad (2-6)$$

式中 R ——实际的钻速,米/小时;

R_{sf} ——净化完善时的钻速,米/小时;

E_H ——实际的比水力功率,比水马力/英寸²;

E_{rq} ——净化充分时要求的比水力功率,水马力/英寸²。

根据图2-4的曲线回归得出

$$E_{rq} = 0.8527 \times R_{sf}^{0.81} \quad (2-7)$$

C_H 系数不可以大于1,如果 $E_H > E_{rq}$ 时,取 $C_H = 1$,即 $R = R_{sf}$ 。系数 C_H 只描述了水力清岩的作用,因此只能用它说明井底的净化程度。现举例说明这些数值间的关系。

〔例1〕有一只9 7/8"钻头,在净化充分的条件下,可以获得80米/小时的钻速。但当时所提供的水力功率仅为153水马力。求该条件下的水力净化系数 C_H 。

解:式(2-6)中的水力功率是以每平方英寸的水马力为单位的,故水力净化系数 C_H 为

$$C_H = \frac{153/0.7854 \times 9.875^2}{0.8527 \times 80^{0.81}} = \frac{2}{3.317} = 0.603$$

此时,实际钻进速度,仅为净化充分时钻进速度的60.3%。

如果,实际提供的水力功率达到254个水马力,即比水马力为3.317水马力/英寸²,则系数 $C_H = 1$ 。

水力净化系数 C_H ,考虑的是水力清岩作用。水力破岩的作用效果,由门限钻压 M 值的变化中体现出来。

2. 水力破岩的影响

根据中原油田1983年的大量钻头数据,经过计算机的处理,取得了如下重要的统计规律。如图2-5

由图2—5可以看出,随着比水力功率的提高,进尺速度是成直线关系上升。愈接近地表,进尺速度增长的速度愈大。这也说明了水力机械联合破岩在浅井段中效果比较明显,但在较深的井段中(中原油田2800米以下),则起主要作用的是机械破碎,而水力破岩则居于次要地位。

根据图2—5的变化规律可以写出如下的模式,即

$$R \propto (W - M_0 + C_E E_H)$$

(2—8)

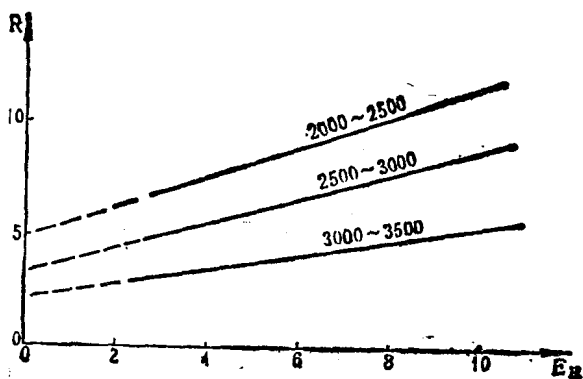


图2—5 钻速与水力破岩的关系

式中 C_E ——比水力功率的换算系数,吨/比水马力;

M_0 ——零水力功率下的门限钻压,吨。

这里需要对两个系数做说明。 C_E 的物理涵意是,在某一特定地层中每增加一个比水马力,相当于增加多少吨钻压的钻进效果。系数 C_E 是随地区和层段而变化的,地层愈疏松、埋藏深度愈浅, C_E 系数越大。系数 C_E 亦与岩性和岩石结构有关,它反映了地层抗水力冲刷的特征,是地层的另一个属性。系数 C_E 必须立足于现场资料的统计。

M_0 是纯机械破碎时的门限钻压,或称之为零水马力时的门限钻压,单位为吨。将比水马力影响钻速的关系曲线,向原点方向延伸,使之与纵轴相交,得出一个钻速值,这便是平均钻压与零水马力门限钻压之差,所取得的平均钻速值。这一钻速点,实际上是不存在的。因为岩屑是靠一定的水力功率清除的,当比水马力降至一定值以下,会进入净化不完善区,钻速将沿曲线下降到零。因此截距点的钻速值,是个理论值,故 M_0 也是个理论值。但这理论值却强烈地体现出地层的压实规律,它也是获得不同水马力下的门限钻压值的基准值。

截距点的钻速值可用比例式写出

$$R_{HO} \propto (W - M_0)$$

(2—9)

对比(2—1)和(2—8)两式可以看出,门限钻压 M 可以写成

$$M = M_0 - C_E E_H$$

(2—10)

式(2—10)可以解释成,门限钻压是地层的压实性、抗水力冲刷性和水力参数的函数。当水力功率超过净化所需要的水力功率以后,门限钻压 M ,将随水力功率的增长而下降。

现举例说明系数 C_E 与其余数值间的关系。

〔例2〕某油田使用8 1/2"钻头钻进2000~2400米井段。已知比水马力为4.5水马力/英寸²时钻速为4米/小时,比水马力为6水马力/英寸²时钻速为4.5米/小时。钻进该井段的平均钻压为15吨,而纯机械破碎时的门限钻压为7.4吨。试求该层的水力功率转换系数 C_E 。

解, (1) 求每个比水马力的钻速增值

$$\Delta R_H = \frac{R_2 - R_1}{E_{H2} - E_{H1}} = \frac{4.5 - 4}{6 - 4.5} = 0.333 \text{ 米/小时比水马力}$$

(2) 求零比水马力下的钻速 R_{H0}

由图 2—6 可以导出

$$R_{H0} = R_{H1} - (R_{H2} - R_{H1})$$

$$\frac{E_{H1}}{E_{H2} - E_{H1}} = 4 - (4.5 - 4) \frac{4.5}{6 - 4.5}$$

$$= 2.5 \text{ 米/小时}$$

(3) 求每吨有效钻压下的钻速增值

$$\Delta R_W = \frac{R_{H0}}{W - M_0} = \frac{2.5}{15 - 7.4}$$

$$= 0.329 \text{ 米/小时吨}$$

(4) 求水力功率转换系数

$$C_E = \frac{\Delta R_H}{\Delta R_W} = \frac{0.333}{0.329} = 1.0125 \text{ 吨/比水马力}$$

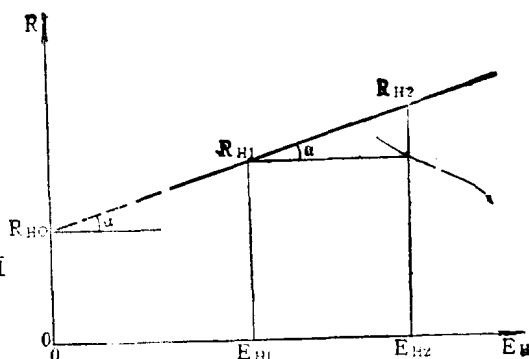


图 2—6 求零水力功率下的钻速

六、压差影响系数

为了由 Young 模式的系数 K_0 中, 分离出液柱与地层压差带来的影响, 需要引用 委 珠 因与本尼 (Vidrine D. J. & Benit E. J.) 1967 年发表的文章中的曲线。

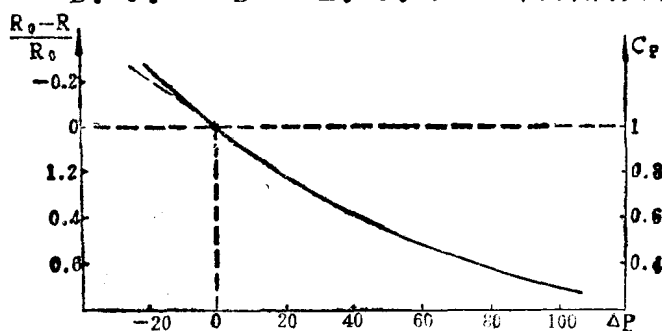


图 2—7 钻速与压差的典型关系

R_0 —零压差时的钻进速度, 米/小时; R —一定压差时的钻进速度, 米/小时;

ΔP —井底的实际压差, 工程压力

根据曲线可以导出上述参数间的函数关系

$$\frac{R}{R_0} = e^{-0.01182 \Delta P}$$

用符号 C_p 表示压差影响系数, 则 $C_p = e^{-0.01182 \Delta P}$

根据我国油田的统计资料证明, C_p 系数的指数项中并不是一个常数与压差的乘积, 而是一个与井深和压差有关的函数, 即

$$C_p = e^{-\beta \Delta P} \quad (2-11)$$

而乘子 β 又与地层的埋藏深度和压实程度有着密切的关系。

如中原油田 1400~3400 米井段用 $8\frac{1}{2}$ 寸钻头钻进, 压差乘子 β 的具体数值如表 2—3 所示。

由表 2—3 可以看出, 随着地层埋藏深度的增加, 乘子 β 的值有规律地下降, 它的下降规律与压实规律相似, 靠近地表下降得快, 埋藏愈深乘子下降的幅度也愈小。