

油气钻井 工程力学进展

刘希圣教授70寿辰暨执教45周年纪念文集

高德利 主编

石油大学出版社

0565688

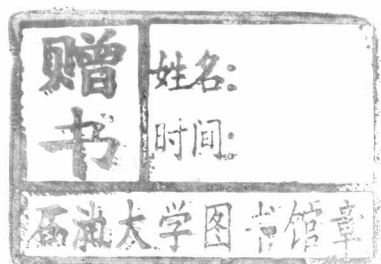
3

TE21-53
003

石油工程力学进展

刘希圣教授 70 寿辰暨执教 45 周年纪念文集

高德利 主编



石油大学出版社

油气钻井工程力学进展

高德利 主编

*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

山东电子工业印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 15.125 印张 插页 1 380 千字

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—1000 册

ISBN 7-5636-0932-6/TE · 185

定价: 40.00 元



刘希圣教授近照

四十五載辛勤耕耘
鉛井戰綫桃李芬芳

刘希圣教授从教

四十五年紀念

董凱
一九九六
十月廿六

忠心于石油钻井教育事业，
倾心培养站井科技人才。

一九九六年十月范明珍

帝聖學長七秩壽辰暨執教四十五周年誌慶

七秩猶作鯤鵬搏
四週過去滿園春

弟楊光弼賀

一九九六年
深秋月

为人师表 无上光荣

敬祝希聖學兄七十歲壽暨執教
四十五年

趙國珍賀
九六年十月

教学育才桃李满天下
科研攻关钻井结硕果

王关涛

一九九二年十月

序

刘希圣教授执教四十五年来,为我国石油钻井高等教育事业的创建和发展、为我国的石油钻井科技事业做出了重要贡献。

刘教授早在 50 年代初就参与领导创建了我国石油钻井学科,并建立了专业实验室。他长期担任教研室主任工作,为制订专业教育、教师培训计划,编写专业教材及培养年轻教师,做了卓有成效的工作,成为钻井学科的第一代学科带头人之一。他在教学、科研和梯队建设等方面的成就,得到了公认。

刘教授在长期的教学实践中,主编了《油井工程》、《钻井工艺原理》等多种具有较高学术水平和实用价值的专业教材,这些教材被指定为全国石油院校钻井专业的统一教材,为培养大批钻井人才做出了突出贡献。1986 年他被批准为我国钻井学科的第一位博士生导师,十多年来,先后培养了近三十名博士和硕士研究生及一大批本科生,现在他们已在各自的生产、教学、科研和管理岗位上,为促进我国石油钻井技术的发展和提高,发挥着重要的作用。

刘教授长期致力于喷射钻井、定向钻井、水平井环空水力学等领域的科学研究工作,多次参加国家重大科技项目攻关,取得了重要的科技成果,其中一些成果达到了国际先进水平,并先后获得过国家科技进步一等奖、总公司科技进步特等奖、总公司重大科技成果奖等重大奖励。

刘教授在喷射钻井、定向井、水平井环空水力学及携岩理论和实验研究上有很深的造诣,先后在国内外重要刊物和国际会议上发表论文近七十篇,撰写了《钻井环空水力学及携岩理论基础》等专著,基于非牛顿流体在定向井、水平井偏心环空中螺旋流流场理论及携岩规律的研究,建立了有关数学模式及水力参数设计方法,对推动我国钻井科学技术的发展和提高,做出了重要贡献。因此他先后被国务院授予享受政府

特殊津贴科技专家、被石油大学授予劳动模范等光荣称号。

刘教授在他从事的石油高教及石油科技事业中,以他的聪明才智和全部精力,为我们创造了宝贵的科技财富,同时也以他的顽强奋斗、无私奉献、严于律己、宽以待人、坦荡磊落的为人,给我们树立了榜样。

仅籍此机会,简书此序,以表对刘教授的衷心祝愿!

李相

1996年10月

目 录

钻井环空水力学及携岩理论研究进展	刘希圣 汪海阁(1)
固相浓度对固相颗粒在液相中运动规律影响的实验研究	朱国新 刘希圣 丁 岗(11)
幂律流体在定向井偏心环空内流动规律的研究	刘希圣 樊洪海 丁 岗(20)
钻头与地层相互作用的新模型	高德利 刘希圣(31)
宾汉流体环空螺旋流层流流场的研究	石建新 刘希圣 丁 岗(37)
钻头与地层相互作用模型用于井眼轨迹分析	田效山 刘希圣(46)
大斜度井中岩屑床厚度模式的研究	刘希圣 郑新权 丁 岗(55)
幂律流体在倾斜旋转内管的偏心环空中层流流动近似解法	刘希圣 崔海清(62)
PDC 钻头切削齿工作角设计理论	翟应虎 蔡镜仑 刘希圣(69)
水平井段环空携岩的实验研究	陈 俊 刘希圣 丁 岗(79)
水平井底部钻具组合三维大挠度分析方法	高德利 刘希圣 徐秉业(84)
气液两相流中的偏微分方程组求解	李相方 刘希圣 胡湘炯 陈庭根 鲁钟琪(94)
导向钻具组合三维小挠度力学分析	李子丰 刘希圣(100)
赫谢尔-巴尔克莱流体同心环空轴向流流核及压降计算	樊洪海 刘希圣(107)
赫谢尔-巴尔克莱液体直井稳态波动压力计算模式	樊洪海 刘希圣(114)
水平井岩屑床止动模型的建立	李洪乾 刘希圣(120)

PDC 钻头设计基础理论和方法的研究	翟应虎 蔡镜仑 刘希圣(126)
水平井段钻井液携带岩屑的实验研究	汪海阁 刘希圣 李洪乾 丁 岗(134)
PDC 钻头条件下圆喷嘴撞击射流井底流场的数值模拟	管志川 刘希圣 陈庭根 周广陈(142)
井底条件下倾斜撞击射流流动特性的数值研究	管志川 陈庭根 刘希圣 蔡镜仑(149)
井眼轨迹预测的数学模型	李子丰 孙玉学 刘希圣(153)
直井洗井分析模型的建立	刘正玉 刘希圣(158)
定向油气井出砂模型的建立与参数分析	王艳辉 刘希圣(164)
PDC 钻头井底液流分布特性的实验研究	管志川 陈庭根 刘希圣(170)
地层抗钻强度与钻头磨损实用评估方法	詹俊峰 高德利 刘希圣(176)
AN ANALYSIS OF PROPERTIES OF LAMINAR FLOW FIELD OF POWER-LAW FLUID IN ANNULAR SPACE	Liu Xisheng Zhai Yinghu(185)
THE HELICAL FLOW OF THE HERSCHEL BUCKLEY FLUID IN AN ANNULAR SPACE	Cui Haiqing Liu Xisheng(199)
THE STREAM FUNCTION-AXIAL VELOCITY EQUATIONS OF THE HELICAL FLOW OF THE POWER LAW FLUID IN AN ECCENTRIC ANNULAR SPACE AND THE ANALYTICAL SOLUTIONS OF NEWTONIAN FLUID	Cui Haiqing Liu Xisheng(203)
WELLBORE UNSTEADY FLOW AND SURGE PRESSURE PREDICTIONS WHILE TRIPPING	Fan Honghai Liu Xisheng Chu Yuanlin(208)
STUDY ON STEADY SURGE PRESSURE FOR YIELD-PSEUDOPLASTIC FLUID IN A CONCENTRIC ANNULUS	Wang Haige Liu Xisheng(217)
附 录	(225)

钻井环空水力学及携岩理论研究进展

刘希圣 汪海阁

摘要 本文综合介绍了石油大学钻井环空水力学课题组近 10 年来所研究的成果。重点介绍了:(1) 垂直井同心环空中幂律流体及牛顿流体轴向流层流流场的研究,建立了速度、视粘度、排量及压耗等模式;(2) 垂直井同心环空中纯粘性流体螺旋流层流流场的理论分析;(3) 定向井偏心环空中幂律流体流动规律及宾汉流体轴向流层流流场的研究;(4) 定向井及水平井岩屑运移机理与规律的研究,从实验架上实际观察得出了反映岩屑运移机理的四种流动物理模型,分析了影响岩屑运移的因素;根据双层理论导出了大斜度井岩屑床厚度的理论模式,并通过大量室内实验得出了大斜度井及水平井段岩屑床厚度的经验模式,这些研究成果都得到了现场的验证,并成功地应用到定向井钻井施工中。

主题词 钻井;环空;轴向流;螺旋流;幂律流体;宾汉流体;岩屑床;水力学

一、引言

自 1941 年以来,国外不少学者对环空水力学进行了系统的研究^[1~7],国内在这方面的研究起步较晚。石油大学从 80 年代初开始了环空水力学及携岩理论方面的研究,建立了垂直井和定向井(全倾角)环空模拟实验架,提供了比较先进的试验手段,结合国家“七五”、“八五”重点攻关项目,研究内容逐渐拓宽,已经研究和正在研究中的课题有:

- (1) 垂直井同心环空中幂律流体和牛顿流体轴向层流流场的研究;
- (2) 垂直井同心环空中纯粘性流体螺旋流层流流场的理论研究;
- (3) 定向井偏心环空中幂律流体流动规律及宾汉流体轴向层流流场的研究;
- (4) 直井、定向井及水平井岩屑运移机理与规律的研究等。本文将对以上内容进行综合论述。

二、垂直井同心环空水力学

1. 幂律流体及牛顿流体环空轴向流层流流场的研究^[8,9]

石油钻井领域中,探讨井内钻井液流动规律时,一般都假设钻柱是规则的同轴圆柱面。在这种情况下,若不考虑内管的旋转作用,井内流场可被理想化抽象为无限长同轴圆管间的轴向流场,井内流体在不变的压力梯度 $\partial p / \partial z$ 和重力作用下沿圆管轴向作一维直线流动。

如图 1 所示的环空轴向流场中,在点 $x(r, \theta, z)$ 处取一长度为 dz , 厚度为 dr 的流体微元薄筒。在流动达到稳定时,微元薄筒在 z 轴方向上所受外力达到平衡。由此可得:

$$2\pi r dr p + 2\pi r dz \tau_z - 2\pi(r + dr)(\tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial r} dr) - 2\pi r dr(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz) - 2\pi r dr dz \rho_1 g = 0$$

展开,略去高阶微量得:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial r} + \rho_1 g = 0 \quad (1)$$

在同轴等截面垂直环空管稳定的轴向流流场中,有 $p = p(z)$, $\tau_z = \tau_z(r)$, 从而化偏微分方程为常微分方程,得:

$$\frac{dp}{dz} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\tau_z \cdot r) + \rho_1 g = 0$$

求解上式得:

$$\tau_z = -\frac{r}{2} \left(\frac{dp}{dz} + \rho_1 g \right) + \frac{C}{r}$$

令: $a = -dp/dz - \rho_1 g = 0$, a 即为单位长度的环空管道流体的流动压耗, 简称为压耗。所以有: $\tau_z = ar/2 + C/r$ 。式中 a 和 C 均为常数。令 $k = R_i/R_o$, $\xi = r/R_o$, $\lambda^2 = -2C(aR_o^2)^{-1}$, 考虑幂律流体的本构方程

为: $\tau_z = K \left| \frac{du}{dr} \right|^n$ 或 $\tau_z = \eta' \frac{du}{dr}$ 。考虑到边界条件: $u|_{r=R_o} = u|_{\xi=1} = 0$; $u|_{r=R_i} = u|_{\xi=k} = 0$, 由此得:

$$\eta' = K^{\frac{1}{n}} \left| \frac{aR_o}{2} \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{n-1}{n}} \quad (2)$$

$$u = - \left(-\frac{aR_o^{n+1}}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \int_k^{\xi} \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \left| \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{1-n}{n}} d\xi \quad (3)$$

其中, 待定参数 λ 满足下式:

$$\int_k^1 \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \left| \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{1-n}{n}} d\xi = 0 \quad (4)$$

式(2)和式(3)便是求得的幂律流体视粘度及轴向流动表达式。将 $K = \mu$, $n = 1$ 代入幂律流体轴向流的有关公式中, 便可得到牛顿流体环空轴向流层流流场的有关理论计算公式。

根据式(3)可以得出流量计算公式为:

$$Q = \pi R_o^3 \left(-\frac{aR_o}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} B(n, k) \quad (5)$$

式(5)中引入了一个新的函数 $B(n, k)$, 它是环空内、外半径之比 k 及流性指数 n 的函数, 定义为流量因子。其表达式为:

$$B(n, k) = - \int_k^1 (1 - \xi^2) \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \left| \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi} \right|^{\frac{1-n}{n}} d\xi$$

压耗公式为:

$$a = -\frac{2K}{R_o} \frac{Q^n}{[\pi R_o^3 B(n, k)]^n} \quad (6)$$

在理论分析的基础上, 选用了五种浓度的聚丙烯酰胺水溶液作为实验流体, 在直井环空实验架上用激光测速仪测量流场内流体的轴向速度分布, 实验结果与理论计算结果吻合很好。研究所得结果可直接用于环空水力学计算。

2. 纯粘性流体环空螺旋流层流流场的理论分析^[10]

环空螺旋流层流流场的研究是钻井学科基础理论的重要内容之一。在石油钻井过程中, 由于内管旋转, 井内流场可被理想化抽象为两个无限长同轴圆管间的螺旋流流场(如图2所示)。当流动稳定时, 流场内任一流体运动微团受轴向不变的压力梯度 $\partial p/\partial z$ 、重力以及旋转内管的剪切作用, 在空间的运动轨迹为一等距圆柱螺旋线, 习惯上称这样的流场为螺旋流流场, 其流

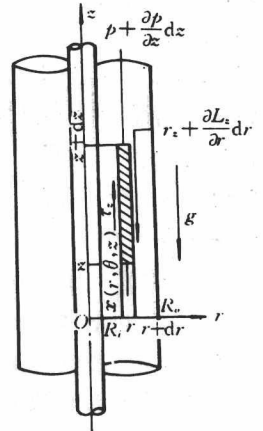


图1 环空轴向流场示意图

动为螺旋流。很明显螺旋流比轴向流更接近钻井实际情况,许多研究者都认为内管转动的作用破坏了环空流场内原有的速度及视粘度分布,使流动压耗发生改变。流体力学界和化工界对螺旋流作了一些研究,但这些研究工作与钻井没有直接的联系。在一些有关石油钻井的专著中也没有叙述钻柱旋转时环空内流体的流动情况,而用于环空水力学计算的有关公式都是在没有考虑内管旋转的条件下得到的。显然这与钻井实际情况有一定的差异。

在求解环空螺旋流流场速度与流量时,考虑用柱面坐标系来描述(如图2)。流场中的点用 $x(r, \theta, z)$ 表示,流体微团的速度向量用 $W = \{U_r, U_\theta, U_z\}$ 表示,由螺旋流流场性质可得:

$$W = \{0, U_\theta(r), U_z(r)\} = \{0, r\omega, U(r)\}$$

式中, ω 为旋转角速度。

对垂直同心环空中钻柱旋转情况下不可压缩纯粘性流体的稳定流动时的 N-S 方程化简,可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2}{r} \tau_{r\theta} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \tau_{rz} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= -\rho_1 g \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} = \text{const}$, 令: $a_1 = -\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \rho_1 g$, 代入式(7)并积分得:

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_{r\theta} &= B_1/r^2 \\ \tau_{rz} &= \frac{1}{2}a_1 r + \frac{C_1}{r} \end{aligned} \right.$$

式中, B_1 和 C_1 均为积分常数。

在考虑纯粘性流体的本构方程及环空流体流动的条件后,可得垂直同心环空纯粘性流体螺旋流场的速度及流量表达式为:

$$W(\xi) = \{0, r\omega(\xi), U(\xi)\} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \omega(\xi) &= \Omega + \beta \int_k^{\xi} \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi \eta} d\xi \\ U(\xi) &= \frac{1}{2} a_1 R_o^2 \int_k^{\xi} \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi \eta} d\xi \end{aligned}$$

流量表达式为:

$$Q = \frac{1}{2} \pi a_1 R_o^4 \int_k^1 \frac{(1 - \xi^2)(\xi^2 - \lambda^2)}{\xi \eta} d\xi \quad (9)$$

式中, Ω 为钻柱旋转角速度; $\beta = B_1/R_o^2$; $\lambda^2 = -2C_1(a_1 R_o^2)^{-1}$, 且 β 和 λ 满足:

$$\left\{ \begin{aligned} \Omega + \beta \int_k^1 \frac{1}{\xi^3 \eta} d\xi &= 0 \\ \int_k^1 \frac{\xi^2 - \lambda^2}{\xi \eta} d\xi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在流场内的 $r = R_o \lambda$ (即 $\lambda = \xi$) 处, 轴向速度最高, 轴向流是螺旋流的一种特殊情况, 此时 Ω

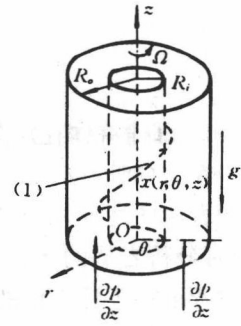


图2 螺旋流流场及坐标系

$= 0$, 对于不同的纯粘性非牛顿流体, 将具体的视粘度表达式代入有关式中可直接进行计算。

三、定向井环空水力学研究

1. 幂律流体在定向井偏心环空内流动规律的研究^[11]

在定向钻井时, 钻具由于自重的影响偏向于下井壁而形成偏心环空。在这种情况下, 钻井液和岩屑的运动规律与直井的情况产生较大的差异。因此, 研究钻井液在偏心环空内的流动规律, 对分析岩屑的运移特性及合理设计定向井的水力参数有一定实际意义。近年来钻井界有几位学者进行了这方面的研究。Guckes 利用偶级坐标系分别建立了幂律流体和宾汉流体在偏心环空内轴向层流的微分方程^[12]。并用有限差分的方法求解。但计算非常复杂, 不便于现场应用。我们采用了一种新方法对幂律流体在偏心环空内轴向层流流动规律进行了理论分析, 并在定向井偏心环空实验架上进行了模拟实验, 从而建立了较为准确的数学模式。

为便于研究, 假定井眼轴线为直线, 考虑环空倾角 φ 、偏心度 E 、环空结构及钻杆转速四个主要因素, 建立定向井环空模型如图 3。定义 e 为内外管轴线的偏离值; ρ 为内管轴心到环空中速度最大点间的距离; R 为内管轴心到外管壁的距离; θ 为偏心角; E_0 为相对于外管半径的偏心度; β 为速度径向剖面无因次外边界。则有: $E = e(R_o - R_i)^{-1}$; $E_0 = e/R_o$; $\beta_1 = R/R_o$ 。考虑流体作纯轴向定常层流流动, 可得:

$$\frac{\Delta p}{L} - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} - \frac{\tau_{rz}}{r} - \rho_1 g \cos \varphi = 0 \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (11)$$

令: $p_1 = \frac{\Delta p}{L} - \rho_1 g \cos \varphi$, 且考虑 $\tau_{rz}|_{r=\rho} = 0$, 对式(11)积分得:

$$\tau_{rz} = \frac{p_1}{2} \left(r - \frac{\rho^2}{r} \right) \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (12)$$

定向井偏心环空中幂律流体作轴向层流流动, 流变方程可写为:

$$\tau_{rz} = -\eta' \frac{du}{dr} \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (13)$$

式中

$$\eta' = -K \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1} \quad (R_i \leq r \leq R) \quad (14)$$

令 $a_2 = r/R_o$, $\lambda_2 = \rho/R_o$, 对式(12)~(14)进行无量纲化处理, 建立如下求解流场分布的无量纲定解方程组:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{rz} &= \frac{p_1 R_o}{2} \left(\frac{a_2^2 - \lambda_2^2}{a_2} \right) \\ \tau_{rz} &= -\frac{\eta'}{R_o} \frac{du}{da_2} \quad (R \leq a \leq \beta_1) \\ u|_{a_2=k} &= u|_{a_2=\beta_1} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

求解得:

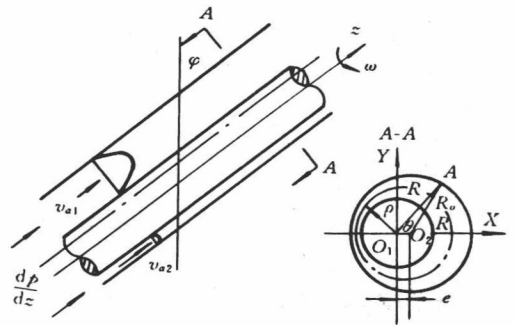


图 3 定向井偏心环空模型