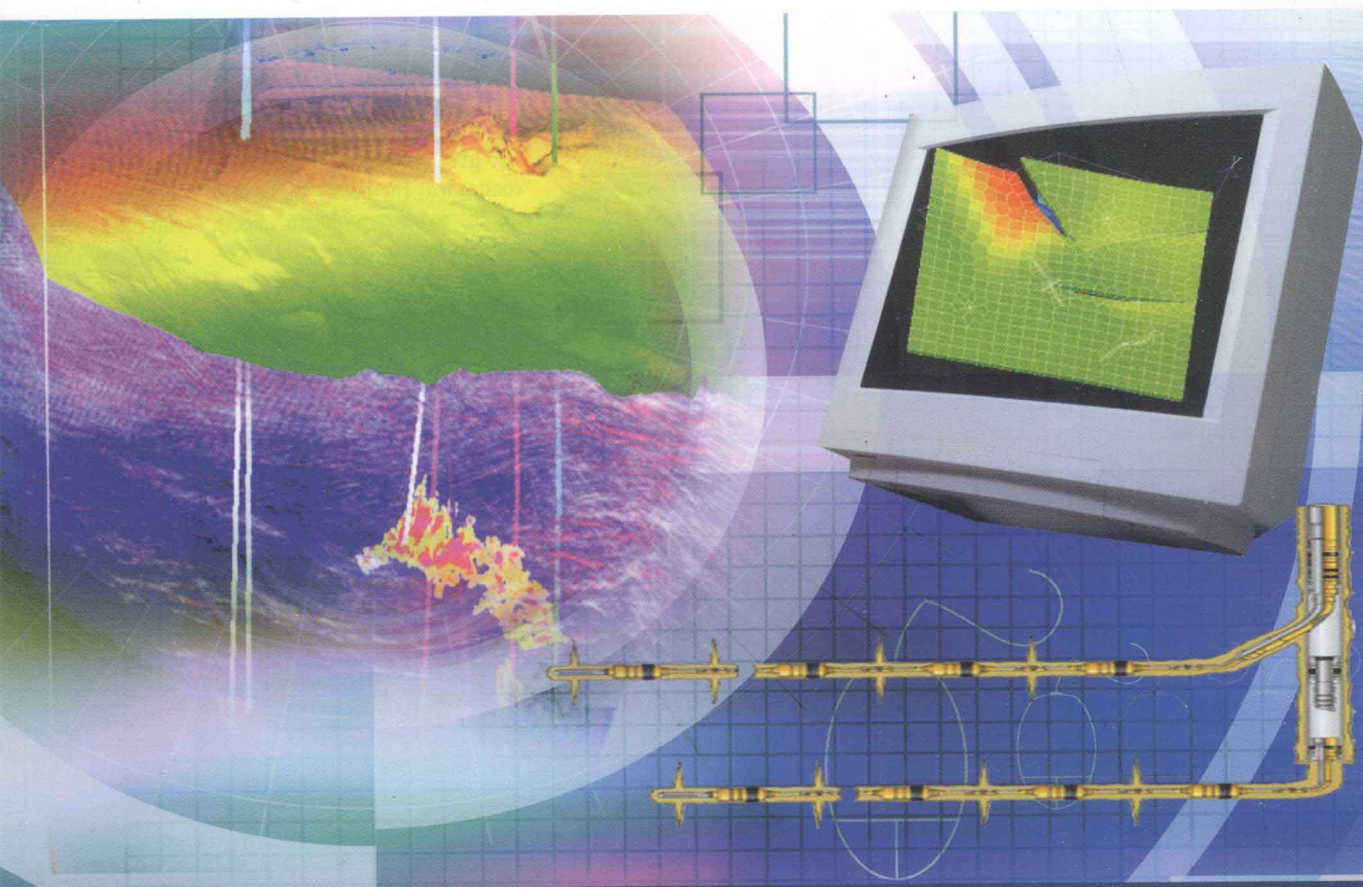


复杂结构井完井 优化理论及应用

FUZA JIEGOUJING WANJING YOUHUA LILUN JI YINGYONG

汪志明 著



石油工业出版社

复杂结构井完井优化理论及应用

汪志明 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对水平井筒变质量复杂流动、非均质油藏渗流与井筒管流耦合流动及复杂结构井目标井段参数优化做了较全面的论述。全书共八章，主要包括：水平井筒变质量复杂流动、非均质油藏井筒附近复杂流动、油藏渗流与井筒管流耦合流动、生产动态预测及完井方式评价、目标井段几何参数整体优化、目标井段完井参数分段优化、煤层气藏水平井生产动态预测、煤层气藏鱼刺井目标井段参数优化。

本书可作为从事石油工程理论与技术研究人员、开发人员的参考书，也可作为石油天然气工程学科相关专业研究生教材和本科生选修课教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂结构井完井优化理论及应用/汪志明著.

北京: 石油工业出版社, 2010. 4

ISBN 978 - 7 - 5021 - 7661 - 7

I. 复…

II. 汪…

III. 完井

IV. TE257

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 031569 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010)

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京时代澄宇科技有限公司

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.25

字数: 387 千字 印数: 1—1000 册

定价: 68.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

随着油气田开发难度的加大及钻完井技术水平的提高,大斜度井、大位移井、多分支井等复杂结构井占总开发井的比例逐年增加,并已被广泛地应用于低渗透油藏、多层油藏、薄层油藏和稠油油藏开发。复杂结构井完井优化技术是提高油气井单井产能、油藏采收率及油田整体开发效益的关键技术,复杂结构井完井优化理论是石油天然气工程领域多学科交叉融合的前沿课题,它的研究对象随着生产的需要和科学的发展在不断地更新、深化和扩展,目前主要有三方面发展趋势:一是复杂结构井井型、完井方式、分支井完井级别等趋于多样化;二是目标井段几何参数、完井参数、防砂筛管等设计趋于精细化;三是复杂井完井控制技术趋于智能化。

中国石油大学(北京)井筒复杂流动与控制技术研究室自1995年以来,长期围绕完井优化方法、井筒多相流动和近井地带耦合流动开展理论和实验研究,先后获国家科技进步二等奖2次,省部级科技进步一等奖2次、二等奖1次。结合研究课题已培养博士后、博士生和硕士生50多名,其中4人已晋升为教授、研究员或教授级工程师,3人走上国有特大型或大型企业局级领导岗位,1人获2007年SPE(国际石油工程师协会)博士论文竞赛第一名。结合本科生、研究生培养的需要,开设了《完井工程》和《现代完井工程》课程,这部著作主要是在总结15年来研究室科研成果和讲授本科生、研究生课程讲稿基础上撰写而成的。同时,对国外完井优化理论的最新研究进展也做了相应的介绍。

全书共八章,主要内容包括:水平井筒变质量复杂流动、非均质油藏井筒附近复杂流动、非均质油藏渗流与井筒管流耦合流动、生产动态预测及完井方式评价、目标井段几何参数整体优化、目标井段完井参数分段优化、煤层气藏水平井生产动态预测、煤层气藏鱼刺井目标井段参数优化。本书可作为从事石油工程理论与技术人员、开发人员的参考书,也可作为石油天然气工程学科相关专业研究生教材和本科生选修课教材。

在本著作的撰写过程中,魏建光博士、张健博士协助收集整理了大量文献资料和图表;也得到了中国石油大学(北京)国家重点学科“油气井工程”老一辈学科带头人沈忠厚先生、刘希圣先生的关心和支持,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中不当之处,恳切欢迎同仁及读者批评指正。

汪志明

2009年12月于中国石油大学(北京)

目 录

第一章 水平井筒变质量复杂流动	(1)
第一节 水平井筒变质量流动研究现状	(1)
第二节 水平井简单相变质量流动	(5)
第三节 水平井筒油水两相变质量流动	(15)
第四节 水平井筒气液两相变质量流动	(24)
第二章 非均质油藏井筒附近复杂流动	(32)
第一节 完井表皮系数研究现状	(32)
第二节 完井表皮系数积分表达式	(34)
第三节 非均质油藏完井表皮系数模型	(36)
第四节 非均质油藏表皮系数规律分析	(47)
第三章 油藏渗流与井筒管流耦合流动	(53)
第一节 水平井油藏与井筒耦合流动研究现状	(53)
第二节 常规水平井油藏与井筒耦合流动	(55)
第三节 阶梯水平井油藏与井筒耦合流动	(63)
第四节 压裂水平井油藏与井筒耦合流动	(69)
第五节 多分支水平井油藏与井筒耦合流动	(79)
第四章 生产动态预测及完井方式评价	(90)
第一节 生产动态准确预测	(90)
第二节 完井方式适应性评价	(96)
第三节 完井方式精细评价	(108)
第四节 分支井完井级别适应性评价	(110)
第五章 目标井段几何参数整体优化	(113)
第一节 目标井段几何参数优化数学方法	(113)
第二节 目标井段几何参数优化基础模型	(116)
第三节 目标井段几何参数整体优化设计方法	(120)
第四节 目标井段几何参数多目标优化设计方法	(126)
第六章 目标井段完井参数分段优化	(134)
第一节 遗传优化算法	(134)
第二节 目标井段完井参数分段优化方法	(136)
第三节 目标井段完井参数分段优化设计分析	(143)
第四节 目标井段完井参数分段优化应用实例	(153)

第七章 煤层气藏水平井生产动态预测	(160)
第一节 煤层气井生产动态预测研究现状	(160)
第二节 煤储层渗透率计算模型	(163)
第三节 水平井生产动态预测解析方法	(167)
第四节 水平井生产动态预测数值模型	(172)
第五节 水平井生产动态预测数值模拟	(180)
第八章 煤层气藏鱼刺井目标井段参数优化	(200)
第一节 煤储层与井筒耦合模型	(200)
第二节 鱼刺井井型参数分析	(204)
第三节 鱼刺井目标井段整体优化基础模型	(211)
第四节 鱼刺井目标井段整体优化设计	(213)
参考文献	(232)

第一章 水平井筒变质量复杂流动

20 世纪 80 年代后期,各国学者开始研究水平井筒变质量流动。一方面由于水平井生产过程中沿井筒有流体不断流入,是一种沿流动方向质量流量逐渐增加的变质量流动;另一方面由于井筒流动介质可能是单相、油水两相、气液两相、油气水三相等,导致水平井筒变质量流动非常复杂,其规律分析和模型建立的难度较大,目前井筒多相流动仍是石油界的前沿课题。本章回顾了水平井筒变质量复杂流动研究的历程,给出了井筒单相、油水两相、油气两相变质量流动规律,为水平井筒变质量复杂流动模型建立与规律分析进一步深入研究奠定了理论基础。

第一节 水平井筒变质量流动研究现状

水平井筒变质量复杂流动的研究方法主要有三种,即理论分析方法、室内实验方法、数值计算方法。理论分析是水平井筒变质量流动实验研究和模型建立的理论基础,室内实验是水平井筒变质量流动压降模型与壁面摩擦系数模型建立及验证的有效手段,而数值计算更适用于水平井筒变质量流动微观机理研究。

一、理论分析方法

1989 年 Dikken^[1]首次提出解析模型来预测水平井筒中单相紊流造成的摩擦压降,利用井筒单元内的质量守恒方程把井筒流动和油藏渗流结合起来,得到了单位井筒长度恒定生产指数的井筒流动方程,模型方程中取常规管流摩擦系数表达式,并对所建方程进行了求解。该模型存在三点不足:单位井筒长度上的产液指数恒定的假设不具代表性;忽略油藏中井段之间的相互影响;所采用定质量流动的摩擦系数无法准确模拟水平井流动特性。之后 Novy^[2]采用了与 Dikken 相似的方式,把油藏渗流和井筒流动通过质量守恒联系起来,形成了边界值问题,所提出的对层流的解决方法是解析法,而对其他情形如单相气体和液体的紊流,使用 IMSL Fortran 提供的常规算法进行了数值计算。Ozkan 和 Sarica 等^[3,4]把油藏垂直裂缝的一些结论应用到水平井中,研究了水平井筒流动和水平井压力响应之间的关系,证明了如果水平井很长或者以高产量生产,则无限导流能力的假设不再适用;如果水平段内流动阻力很大,则进入井筒中的大部分流体将来自水平段的生产端附近。

二、模拟实验方法

水平井筒流动不同于常规管流,影响井筒中流动阻力的因素很多。目前研究者提出的计算模型大都是针对各自实验目的、实验装置采集相应的实验数据,得到相应的经验相关式,

Asheim^[5]进行了单相流的单孔眼和两孔眼注入实验,所采用装置的主管内径为 42.6mm,孔眼的直径为 10mm,主流流速范围为 0.33 ~ 2.0m/s,孔眼注入速度为 0 ~ 3m/s。Asheim 认为孔眼注入流体影响井筒中主流流动的原因为:干扰井筒壁面上的边界层,从而改变了管壁摩擦力;孔眼注入的流体使井筒中的流体平均流速增加,这将消耗一部分压能,因而他将水平井中压力损失归结为摩擦损失(Δp_f)和加速度损失(Δp_{acc})两部分:

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_{acc} \quad (1-1)$$

其中摩擦压力损失按定质量常规流动计算,加速度压力损失按动量增加计算,这两种压降的计算方法被以后的研究人员广泛采用。但是从 Asheim 的数据我们不难发现实验中注入比过高,其实验更类似单支管实验,而并非水平井注入实验。Su 等^[6,7]为得到射孔管道中变质量流的摩擦系数进行了一系列的实验。通过实验,首先得到了无注入条件下仅考虑射孔粗糙度时的摩擦系数。而后,Su 等人进行了孔眼有流体注入的流动实验,其中实验管内径 22.2mm,长 2m,射孔密度为每英尺 12 个孔眼,相位角 60°,孔眼内径 3mm。在实验中,Su 等人大部分实验点的注入比都控制在 0.01 以下,根据实验结果,将水平井筒中压降(Δp)分为四部分:管壁摩擦压降(Δp_{wall})、加速度压降(Δp_{acc})、孔眼粗糙度压降(Δp_{perf})和混合压降(Δp_{mix})

$$\Delta p = \Delta p_{wall} + \Delta p_{acc} + \Delta p_{perf} + \Delta p_{mix} \quad (1-2)$$

通过数据分析,他们得到了混合压降的经验计算式,此外还得到了各部分的相对大小,在水平井流动总压降中,摩擦压降占 80%,加速度压降占 5%,孔眼粗糙度压降和混合压降共占 15%。

自 1992 年以来,日本学者 Ihara 等^[8,9]进行了一系列的水平井筒模拟实验,建立了两套模拟装置,其中大型装置的内径为 54.9mm,水平实验段长度为 105m,小型装置的内径为 25.4mm,水平段长 7.9m。Ihara 等人的实验采用在实验段的不同点注入气液混合流体的方法来模拟水平井的变质量流流动,在 1992 年发表的两篇论文中,采用常规的气液两相流的机理模型来分别模拟注入点上游段和下游段的流动特性,并建立了预测水平井压力剖面的计算程序,但程序在预测高注入比流动时产生了较大偏差。1993 年 Ihara 改进了计算模型,考虑到流体注入而引起的加速度压降的因素。该模型的计算精度虽有一定提高,但在预测高注入比流动时仍存在一定误差,因而他们建立的计算程序的实用性有待研究。1994 年 Ihara 等人对矩形管道中的水平变质量单相流动进行了模拟实验,该管道测试段顶、底两面为渗透率 0.75D 的多孔介质板,管道截面为 90mm × 30mm 的矩形,实验中主流雷诺数范围为 $1.0 \times 10^4 \sim 12.0 \times 10^4$,流量为 1.27 ~ 15.3m³/h,注入量为 0 ~ 10.8m³/h。通过实验,他们将总压降划分为汇流损失和摩擦损失,并得到了总压力梯度的经验计算式。

1995 年 Plaxton^[10]建立了封闭式循环装置来分析单孔眼注入对油水两相管流的影响。其实验的管道内径为 1in,注入流体为水,主流为油水混合流动,且在实验中所有射孔水流的速度都大于主流流速的 3 倍,在分析数据时,Plaxton 发现 Asheim 模型不能很好地预测实验数据,因而得出结论:在射孔注入速度较大时,会引起管中流态和边界层的破坏,使得该条件下注入造成的压降要比管壁摩擦压降与加速度压降之和大得多。1995 年 Yuan^[11]对单孔眼注入的变质量单相流进行了实验研究,他们采用管道直径为 25.6mm,注入孔直径 3.175mm,主流雷诺数范围为 5000 ~ 60000,流量为 0.36 ~ 4.34m³/h,注入比为 1/100 ~ 1/5。Yuan 引入综合阻力系数来反映注入产生的压力损失,该系数包含了管壁摩擦、加速度压降以及注入干扰等因素的影

响,通过数据分析,Yuan 用公式 $f_t = \frac{\Delta p / \Delta x}{\rho u^2 / 2d}$ 分别得到了高注入比和低注入比条件下的综合阻力系数计算式

$$f_t = \begin{cases} 80.45 Re^{-0.846} + \frac{3.6d}{\Delta x} \frac{q_{in}}{Q + q_{in}} & \frac{q_{in}}{Q} < 0.06 \\ 80.45 Re^{-0.846} + \left[3.6 - 0.207 \left(\frac{q_{in}}{Q} \right)^{-0.76} \right] \frac{q_{in}}{Q + q_{in}} & \frac{q_{in}}{Q} > 0.06 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中 Re ——雷诺数,无量纲;
 Q ——主流流量, m^3/s ;
 q_{in} ——孔眼流量, m^3/s ;
 Δp ——观测段压降, Pa ;
 u ——平均流速, m/s ;
 ρ ——流体密度, kg/m^3 ;
 Δx ——观测段长度, m ;
 d ——实验管内径, m 。

通过实验,Yuan 等人发现在注入比较大时,综合阻力系数高于无注入阻力系数;但当注入比足够小时,综合阻力系数小于无注入阻力系数。同时 Yuan 还指出他们的公式比 Asheim 公式的计算精度高。后来,Yuan 等^[12,13]又进行了多孔注入的单相流实验,研究了射孔密度对流动特性的影响,实验中管道仍采用 25.4mm 不锈钢管,孔眼直径 3.175mm,射孔密度分别为每英尺 5 孔、10 孔、20 孔,相位角分别为 360° 、 180° 、 90° ,主流雷诺数范围为 5000 ~ 60000,注入比为 $1/2000 \sim 1/100$,此外在管道上缠了 50 层纱布以达到均匀注入的目的。通过数据分析,Yuan 等人发现在注入比为 $1/200$ 时,在同一雷诺数条件下的综合阻力系数随射孔密度的增加而增加;在注入比为 $1/500$ 时,综合阻力系数几乎不随射孔密度的变化而变化;在注入比为 $1/1000$ 时,综合阻力系数随射孔密度的增加而减小。Ouyang 等^[14,15]研究了水平井筒中单相质量流动时给出阻力计算模型,在他们的实验条件和范围内,对于生产井,若井筒中为层流,则阻力系数为

$$f = f_0 (1 + 0.04304 Re_w^{0.6142}) \quad (1-4)$$

若井筒中为湍流,则阻力系数为

$$f = f_0 [1 - 0.0153 Re_w^{0.3987}] \quad (1-5)$$

式中 Re_w ——壁面入流雷诺数,无量纲;
 f_0 ——普通管流摩擦系数,无量纲。

1997 年挪威学者 Schulkes 等^[16]进行了多次变质量单相流和气液两相流实验,定量研究注入对轴向压降的影响。首先他们采用一内径为 0.16m 射孔套管进行了实验,在 6m 的射孔段上共有射孔 380 个,孔眼面积约占射孔段套管面积的 0.91%,为达到均匀注入的目的,射孔段上也蒙上了纱布。单相流实验中主流流量范围为 $50 \sim 200 m^3/h$,每米注入流量为 $0 \sim 3.9 m^3/h$ 。Schulkes 等人将总压降分为摩擦压降、加速度压降及混合压降三部分

$$\Delta p = \Delta p_{wall} + \Delta p_{acc} + \Delta p_{mix}$$

$$\Delta p_{\text{mix}} = \alpha d \frac{q}{Q} \Delta p_{\text{wall}} \quad (1-6)$$

式中 d ——实验管内径, mm;
 q ——单位长度注入量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;
 Q ——主流流量, m^3/s ;
 α ——实验系数, 无量纲。

1997年, 周生田等^[17]进行了变质量单相流的实验。采用实验管道内径 26.5 mm, 沿管道下部 120°射孔, 孔眼直径 8 mm, 射孔相位角 60°, 孔间间距为 0.2 m, 采用流体为水, 实验中主流与孔眼的流量分别计量, 主流流量为 1.2 ~ 4.2 m^3/h , 每个孔眼流量范围为 0 ~ 1.0 m^3/h , 注入流量比为 0 ~ 0.83, 注入速度比范围为 0 ~ 9.1。在该装置上, 分别进行了单孔眼、两孔眼及三孔眼的注入实验。数据处理时, 将总压降分为摩擦压降、加速度压降和混合压降三部分, 摩擦压降和加速度压降都已经有了公认的计算公式, 在他们的实验条件下得到了混合压降 Δp_{mix} 的经验相关式

$$\Delta p_{\text{mix}} = -1953.48 + 1838.47 v_m - 432.55 v_m^2 + 487.08 v_p / v_m - 37.858 (v_p / v_m)^2 (1 - 7)$$

式中 Δp_{mix} ——混合压降, Pa;
 v_m ——井筒主流流速, m/s;
 v_p ——井筒壁面入流速度, m/s。

1998年 Ouyang 对水平井筒气液两相流动做了大量的实验, 将水平井筒多相流动划分为四种基本流型: 分层流、环空雾状流、泡状流和过渡流, 并针对每一流型建立了相应的压降计算模型, 是目前水平井筒气液两相流动压降计算比较成熟的模型。2003年吴宁^[18]应用与 Ouyang 同样的方法, 建立了水平井筒气液两相压降计算模型。2004年汪志明等^[19]对水平井筒油水两相流动做了大量的实验, 他们发现水平井筒油水两相流动更加复杂, 流型及压降受壁面入流条件和油水比的影响非常敏感。

综合以上分析, 可见水平井变质量流动机理的研究已引起广大科技工作者的兴趣, 前期的研究工作主要集中于射孔管道中的单相流动, 同时通过实验数据分析得到了一些预测其流动压降的计算公式, 但各自公式的适用范围有待继续研究。变质量多相流动问题仍是一个较少涉足的研究领域。

三、数值计算方法

随着计算机及计算方法的发展, 用数值方法对水平井筒流动问题进行分析和研究已成为可能。水平井水平段中的流动上游端部分为层流流动, 下游部分转化为复杂的湍流流动, 可借助湍流理论对水平井流动进行研究。水平井筒流动是一种管内流动, 但这种管内流动有其复杂的边界条件, 即沿管壁上的孔眼有流体不断地流入。1990年 Islam 等^[20]在柱面坐标系下推导了井筒流动基本控制方程, 假设井筒流动为湍流, 应用 Patankar 提出的 SIMPLE 的算法进行求解。数值计算结果和试验结果对比可以看出, 对低黏油数值解与实验结果非常一致, 高黏油偏差很大。

1997年周生田等应用三维柱坐标系下湍流 $k-\varepsilon$ 模型对水平井筒变质量流动进行了数值研究, 并分别计算了单孔眼流动、同方位两孔眼流动、不同方位两孔眼流动三种情况, 获取了大量的数据, 对每一种情况根据不同的主流流速和孔眼流速绘制了各个方位的二维 $u-v$ 合成速

度矢量图,研究各个不同情况下孔眼流入对井筒内流场的干扰情况。结果表明,与主流流速相比,当孔眼流速较小(孔眼流速/主流流速 < 0.01) 时,孔眼的流入对井筒中的流场影响较小,此时井筒中的流动阻力较孔眼没有流入时小,当孔眼流速到达一定值时,井筒中的流动阻力迅速增加。

2004 年汪志明等^[21-24]利用 CFD 商业软件求解了存在壁面入流条件下的水平井筒变质量湍流模型,描述了存在壁面入流条件下水平井筒内的湍流流动结构和特性,获得了 90° 相位角平面均匀射孔、 120° 相位角平面均匀射孔和 90° 相位角螺旋射孔三种不同射孔格式下的水平井筒壁面入流对井筒主流的影响规律。处理数据时发现,当入流速度与主流速度比小于某值时,入流对井筒流动影响较小;当入流速度与主流速度比大于此值时,入流对井筒流动影响较大。汪志明将此值定义为临界注入比,并发现对于不同管径不同流体性质临界注入比不同。同时利用水平井筒模拟实验装置开展了水平井单相变质量流流动的室内模拟实验,获得了不同射孔格式、不同主流雷诺数以及不同的壁面入流与主流流量比对水平井简单相变质量流动压降的影响规律,验证了数值计算的结果,结果表明数值计算结果与试验结果吻合较好。

第二节 水平井简单相变质量流动

水平井简单相变质量流动的研究重点是压降模型与壁面摩擦系数模型的建立,目前水平井简单相变质量流动的研究已比较成熟,本节推导了水平井简单相变质量流动压降模型,介绍了壁面摩擦系数的确定方法,对比评价了不同壁面摩擦系数模型的计算精度。

一、井筒流动压降模型

1. 质量守恒方程

水平井筒流动微元控制体如图 1-1 所示。假设井筒中流体流动为一维单相流动、流体为不可压缩的牛顿流体、水平井筒中流动为等温稳态流动、流体与环境之间不存在热传递、流体在流动过程中流体与壁面之间不做功。

根据质量守恒原理,流入控制体的质量流量速率与流出控制体的质量流量速率之差等于控制体内质量增加速率,即

$$\iint_{CS} \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho dV = 0 \quad (1-8a)$$

如图 1-1 所示的控制体,方程式(1-8a)展开可得

$$\rho_2 A_2 U_2 - \rho_1 A_1 U_1 - \Delta x \rho q_1 + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \bar{A} \cdot \Delta x) = 0 \quad (1-8b)$$

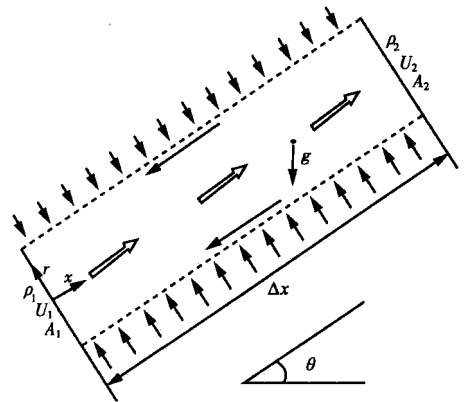


图 1-1 微元水平井段变质量流流动示意图

令 $\Delta x \rightarrow 0$, 那么 $\bar{A} \rightarrow A$, 方程式(1-8b)可写成微分形式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A U) = \rho q_1 \quad (1-8c)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

A ——水平井筒任意横截面面积, m^2 ;

$\bar{A}$ ——微元水平井段平均横截面面积, m^2 ;

U ——任意横截面的平均流速, m/s ;

q_1 ——单位井筒长度壁面流入流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

2. 动量守恒方程

根据动量守恒原理, 控制体的动量流出速率与控制体的动量流入速率之差加上控制体内动量增加速率等于作用在控制体上的合力, 即

$$\iint_{CS} \rho \mathbf{u}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho \mathbf{u} dV = \sum \mathbf{F} \quad (1-9)$$

由于井筒整个截面上的流速不均匀, 所以引入动量修正因子 β 简化横截面上动量的流入速率^[24], β 取值主要取决于流速剖面, 对于充分发展的湍流, β 一般取 0.9643 ~ 0.9895, 对于实际流动, β 可以近似取值为 1.0, 从而动量流入速率可简化为

$$\iint_{CS} \rho \mathbf{u}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dA = \frac{1}{\beta} (\rho A U^2)_2 - \frac{1}{\beta} (\rho A U^2)_1 \approx (\rho A U^2)_2 - (\rho A U^2)_1 \quad (1-10)$$

控制体内动量变化速率为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho \mathbf{u} dV = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{A} U \Delta x) \quad (1-11)$$

控制体受到的合力为

$$\sum \mathbf{F} = (pA)_1 - (pA)_2 - \rho g \bar{A} \Delta x \sin \theta - \tau_w S \Delta x \quad (1-12)$$

3. 单相稳态变质量流动压降模型

将方程式(1-10)、式(1-11)、式(1-12)代入式(1-9)则有

$$(pA)_1 - (pA)_2 - \rho g \bar{A} \Delta x \sin \theta - \tau_w S \Delta x = (\rho A U^2)_2 - (\rho A U^2)_1 + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{A} U \Delta x) \quad (1-13)$$

令 $\Delta x \rightarrow 0$, 那么 $\bar{A} \rightarrow A$, 方程式(1-13)可写成微分形式

$$-\frac{\partial(pA)}{\partial x} - \rho g A \sin \theta - \tau_w S = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A U) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A U^2) \quad (1-14)$$

对方程式(1-14)等式右边第二项求偏导数并展开有

$$-\frac{\partial(pA)}{\partial x} - \rho g A \sin \theta - \tau_w S = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A U) + U \frac{\partial}{\partial x}(\rho A U) + \rho A U \frac{\partial U}{\partial x} \quad (1-15)$$

将方程式(1-8c)代入方程式(1-15)有

$$-\frac{\partial(pA)}{\partial x} - \rho g A \sin \theta - \tau_w S = \rho q_1 U + \rho A \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (1-16)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} f \rho U^2$$

式中 S ——水平井井筒周长, m;
 τ_w ——壁面剪切应力, N/m²;
 θ ——井筒倾角, (°);
 f ——变质量管流壁面总摩擦系数;
 g ——重力加速度, m/s²;
 p ——水平井筒任意横截面压力, MPa。

对于稳态流动, $\partial/\partial t = 0$, 则方程式(1-8c)简化为

$$A \frac{\partial U}{\partial x} = q_1 \quad (1-17)$$

将方程式(1-17)代入方程式(1-16)整理后得

$$\frac{dp}{dx} = -2\rho q_1 \frac{U}{A} - \tau_w \frac{S}{A} - \rho g \sin \theta \quad (1-18)$$

从方程式(1-18)可以看出, 方程右边第一项是由于壁面入流引起的加速度压降; 第二项是由于流体与壁面摩擦引起的摩擦压降; 第三项是由于重力引起的重力压降, 当水平井筒绝对水平时, 此项压降为零。将方程式(1-18)离散可得压降方程为

$$\Delta p = 2\rho q_1 \frac{U}{A} \Delta x + \tau_w \frac{S}{A} \Delta x + \rho g \sin \theta \Delta x = \Delta p_{acc} + \Delta p_{wall} + \Delta p_g \quad (1-19)$$

变质量流动与普通流动的本质区别就是由于存在壁面入流, 一方面改变了壁面摩擦系数, 从而改变了摩擦压降; 另一方面由于流体混合产生混合压降和加速度压降。不同学者研究变质量流动压降模型时处理方法不同, 但主要有两种处理方法, 第一种方法是利用方程式(1-19)计算变质量管流压降, 通过实验方法确定壁面总摩擦系数 f_t ; 第二种方法是在方程式(1-19)的基础上加一项混合压降, 此时壁面摩擦系数可利用普通管流壁面摩擦系数, 然后通过实验确定混合压降, 即

$$\Delta p = \Delta p_{acc} + \Delta p_{wall} + \Delta p_g + \Delta p_{mix} \quad (1-20)$$

式中 Δp ——井筒总压降, Pa;
 Δp_{acc} ——井筒加速度压降, Pa;
 Δp_g ——井筒重力压降, Pa;
 Δp_{wall} ——井筒壁面摩擦压降, Pa;
 Δp_{mix} ——井筒混合压降, Pa。

通过上述分析可知, 水平井单相变质量流动研究的本质就是壁面总摩擦系数或混合压降如何确定。

二、室内模拟实验方法

1. 水平井简单相变质量流动模拟实验

水平井简单相变质量流动模拟实验装置分为三大部分:水平井射孔完井模拟实验段、实验流体供给与控制系统、流量与压力采集系统。

模拟实验段结构示意图见图 1-2,实验段由双层无缝钢管制成,总长为 2.5m,其中射孔段长为 2m,管内直径为 5.08cm,孔眼密度为 16 孔/m,孔眼直径为 3mm。共加工 3 个实验段,射孔格式分别为 90° 相位角平面均匀射孔、 120° 相位角平面均匀射孔、 90° 相位角螺旋射孔,分别见图 1-3A、图 1-3B、图 1-3C。观察段是由有机玻璃制成,长度为 1m,实验段与观察段之间采用法兰连接。

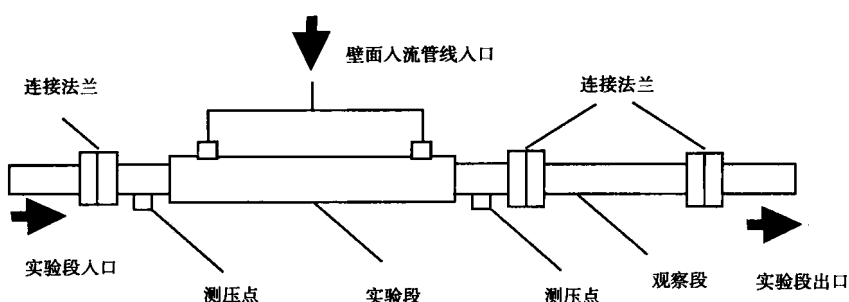


图 1-2 水平井筒变质量流动模拟实验水平实验段及观察段示意图

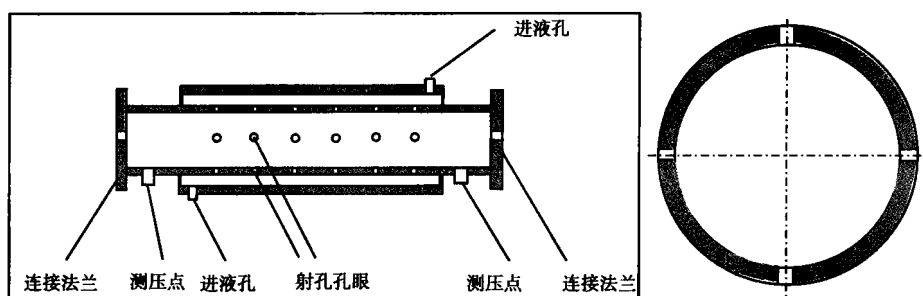


图 1-3A 90° 相位角平面均匀射孔实验段示意图

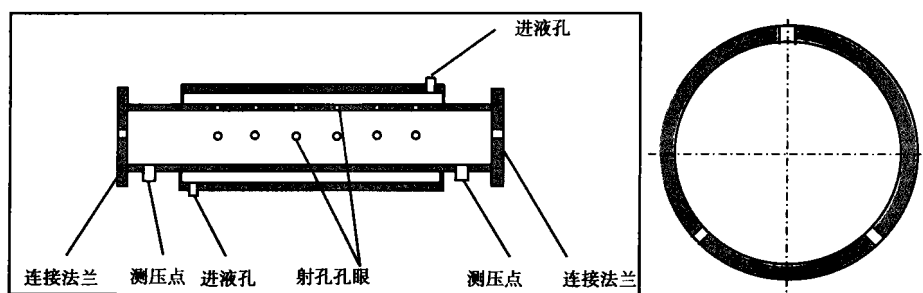


图 1-3B 120° 相位角平面均匀射孔实验段示意图

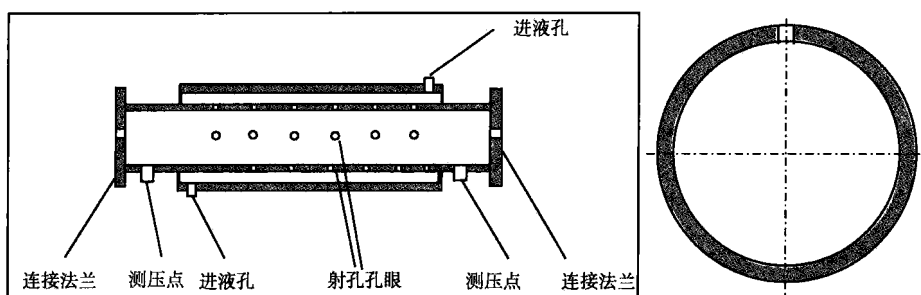


图 1-3C 90°相位角螺旋射孔实验段示意图

实验流体供给与控制系统主要由储液罐、动力泵、阀门和流量计组成,见图 1-4,动力泵向水平井模拟实验段供给实验流体,在实验流体进入水平井模拟实验段之前由各自流量计测量其流量值,实验流体流量由控制阀门调节。

实验主要测量不同射孔格式、不同主流流量、不同壁面入流与主流流量比条件下水平井简单相变质量流动实验段的压力降变化规律。采用微机数据采集系统进行参数的自动采集处理,流体黏度为 $1.0089 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,流体密度为 1000 kg/m^3 。

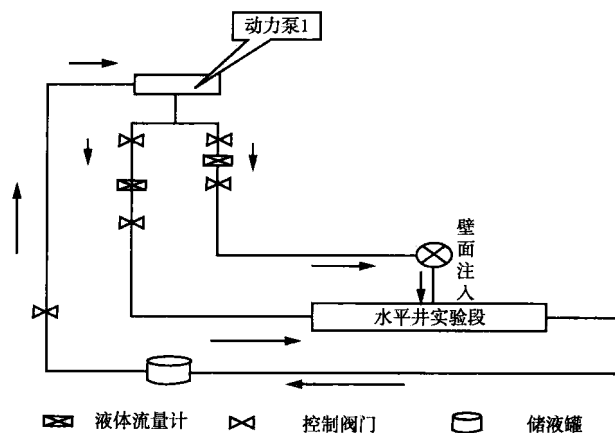


图 1-4 实验装置流程图

2. 水平井简单相变质量流动规律分析

图 1-5A、图 1-5B、图 1-5C 分别是 90°平面射孔、120°平面射孔、90°螺旋射孔的不同主流流量条件下模拟实验段压力梯度与注入比的变化规律曲线。可以看出,三种射孔格式条件下随着主流流量和壁面入流流量的增大,压力梯度均增大。这是由于随着主流流量和壁面入流流量的增加,一方面井筒内的壁面摩擦压降增大,另一方面加速度压降和混合压降也随之增大。

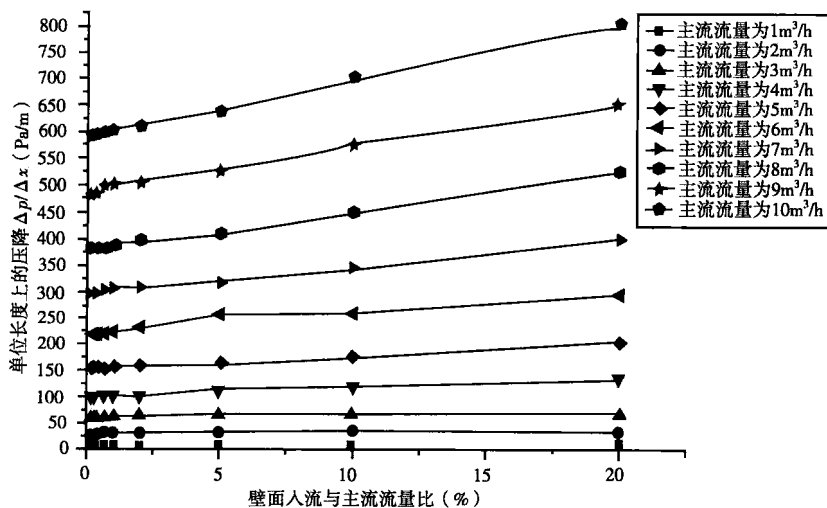


图 1-5A 90°平面射孔条件下压力梯度与注入比的变化规律

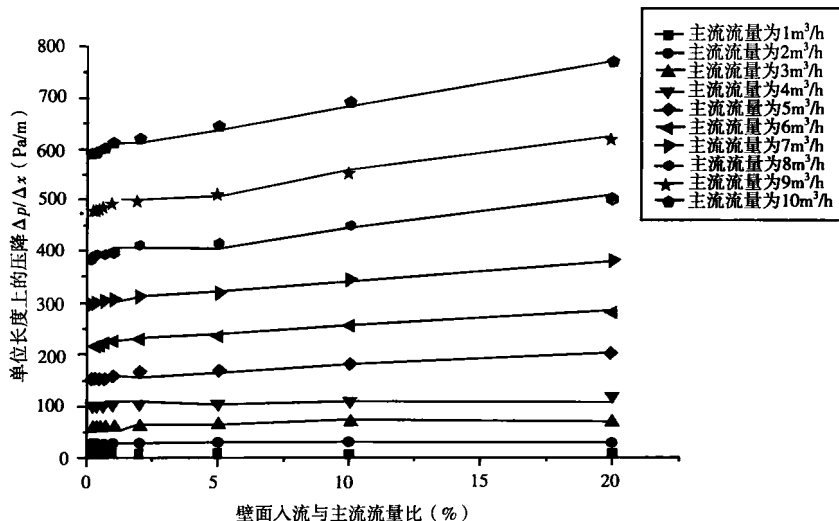


图 1-5B 120°平面射孔条件下压力梯度与注入比的变化规律

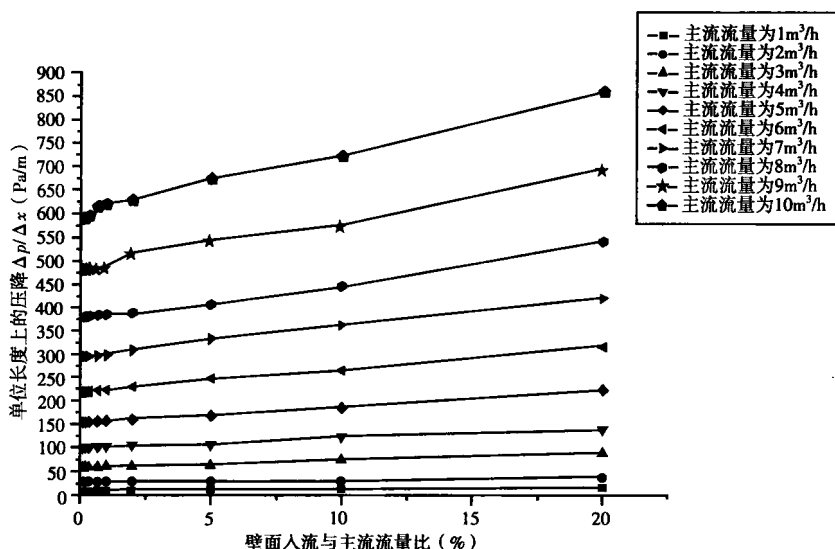


图 1-5C 90°螺旋射孔条件下压力梯度与注入比的变化规律

图 1-6A 和图 1-6B 分别给出了主流流量是 $6\text{m}^3/\text{h}$ 和 $9\text{m}^3/\text{h}$ 的不同射孔格式条件下模拟实验段压力梯度与注入比的变化规律曲线。可以看出,当主流流量一定时,不同射孔格式模拟实验段的压力梯度随注入比的增加而增大,且存在一个临界注入比,注入比在 $0 \sim 2\%$ 的范围内时,压力梯度增加缓慢,射孔格式对压力梯度的影响很小;当注入比超过 2% 后压力梯度急剧增加,射孔格式对压力梯度的影响较大,90°螺旋射孔格式所引起的压力梯度最大,90°平面均匀射孔格式次之,120°平面均匀射孔格式所引起的压降最小。

三、计算流体力学方法

利用 Fluent 软件求解定常湍流 N-S 方程,数值模拟射孔完井方式下水平井筒变质量流场,研究轴线压降随注入比的变化规律。水平井筒变质量流动属于一种特殊边界条件下的管

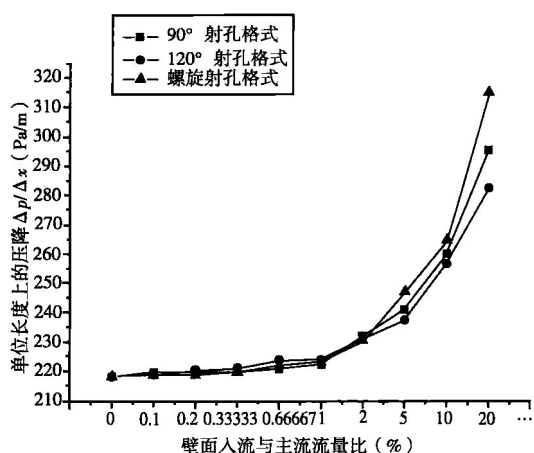


图 1-6A 主流流量为 $6\text{m}^3/\text{h}$ 条件下压力梯度随注入比的变化规律

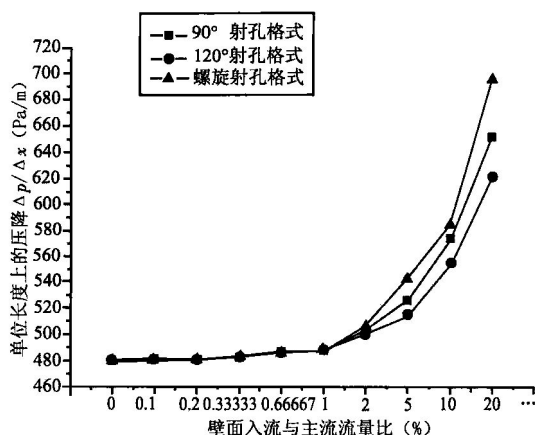


图 1-6B 主流流量为 $9\text{m}^3/\text{h}$ 条件下压力梯度随注入比的变化规律

流,而管流发生湍流的临界雷诺数很低,所以水平井筒中除趾端外,大部分流动区域都属于湍流流动。 $k-\varepsilon$ 两方程模型目前发展比较成熟,其结合壁面函数的使用,在模拟低雷诺数管流流动和分离流动方面具有突出优点,所以在此选用 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型。采用有限体积法和压力修正算法对控制方程进行离散,其中动量方程采用二阶精度格式。假定流动为等温过程,流动介质为水,流体黏度为 $1.0089\text{mPa}\cdot\text{s}$,流体密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

水平井筒长度从几百米到上千米,不可能进行全尺寸模拟。这里选择一段为研究对象,通过采用不同入口速度的方式来研究不同位置的变质量流动规律。为了与室内试验结果进行对比,单元段井筒长 2.5m ,管内直径为 5.08cm 。射孔选择了 90° 相位螺旋射孔格式, 90° 相位平面均匀射孔格式, 120° 相位平面均匀射孔格式。

射孔直径与井筒直径比是 $3:50$,大尺度管径和小尺度射孔并存,网格生成困难,且质量不高。为此采用混合网格,较好地解决了此问题。在管流区和射孔上采用结构网格,在入流和主流干扰区采用非结构网格,并在射孔附近区域加密,见图 1-7。这样既满足了孔眼附近流动分离计算的需要,又在整体上减少了网格总数,节约了计算时间。

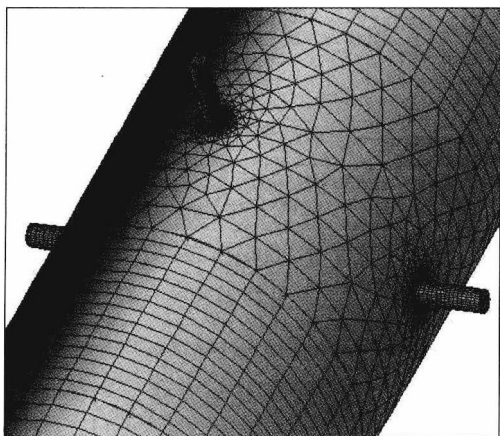


图 1-7A 90° 相位平面均匀射孔网格

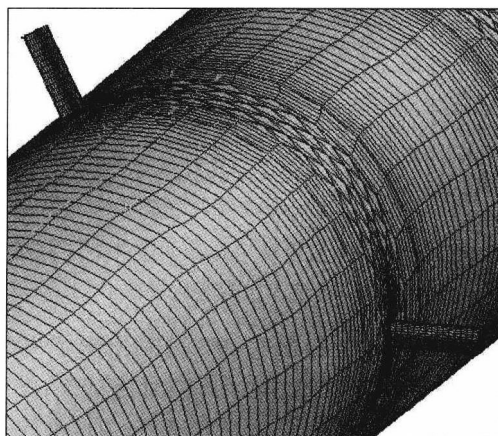


图 1-7B 120° 相位平面均匀射孔网格