

层流单分支管路流量分配的理论分析与CFD模拟

高雪菲^{1,2,3}, 杨鹏⁴, 王磊^{1,2,3}, 林春阳^{1,2,3*}

(1. 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化地热资源开发利用重点实验室, 北京 102206; 3. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 4. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:为揭示层流状态下单分支管路的流量分配规律, 本文采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 基于并联管路压降平衡假设, 结合 Darcy-Weisbach 公式与层流本构关系, 推导出流量配比理论公式, 揭示了流量分配与管径四次方成正比、与管长成反比的定量关系。通过 CFD 数值模拟对不同几何参数及不同注入流量工况进行验证, 结果表明: 仿真值与理论值的最大误差小于 5%, 证实了理论模型具备良好的工程适用性; 流量分配比例仅由几何参数决定, 与注入流量无关。本研究可为分支井结构优化提供理论依据, 所提出的方法亦可扩展至多分支管路系统分析。后续研究将延伸至湍流模型及动态流动过程, 以进一步提升模型的适用广度。

关键词:分支井; 单分支管路; 流量分配; 层流; CFD 模拟; 理论模型

中图分类号: TE355.6; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0052-08

Theoretical analysis and CFD simulation on flow distribution in single-branch pipelines under laminar flow condition

GAO Xuefei^{1,2,3}, YANG Peng⁴, WANG Lei^{1,2,3}, LIN Chunyang^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Deep Geothermal Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China; 2. Sinopec Key Laboratory of Geothermal Resources Exploitation and Utilization, Beijing 102206, China; 3. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing 102206, China; 4. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: To elucidate the governing principles of flow distribution within a single-branch pipe under laminar flow, this paper presents a comprehensive investigation combining theoretical analysis and numerical simulation. Grounded in the principle assumption of pressure drop equilibrium in parallel pipelines, a theoretical expression for the flow rate ratio was deduced by integrating the Darcy-Weisbach equation with the laminar flow constitutive relation. This expression establishes a quantitative correlation, indicating that the flow distribution is proportional to the fourth power of the pipe diameter and inversely proportional to its length. The robustness of the theoretical model was rigorously examined via CFD simulations under diverse geometric parameters and injection flow conditions. The results demonstrated a maximum discrepancy of below 5% between simulated and theoretical values, thereby affirming the model's practical utility for engineering applications. Furthermore, it was concluded that the flow distribution ratio is an intrinsic property dictated exclusively by geometric parameters, showing insensitivity to the injection flow rate. The findings herein offer a robust theoretical underpinning for the structural optimization of branch wells, and the proposed methodology is extensible to more complex, multi-branch pipeline networks. Subsequent research will be directed towards turbulent

收稿日期: 2025-07-14; 修回日期: 2025-09-22 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.006

基金项目: 中国石化地热资源开发利用重点实验室开放基金“超短半径多分支地热井采热机制及关键钻具技术的研究”(编号: 36650000-23-ZC0607-0054)

第一作者: 高雪菲, 女, 汉族, 1999年生, 工程师, 地球环境工程专业, 硕士, 主要从事地热开发及碳捕获、利用与封存相关研究工作, 北京市昌平区沙河镇百沙路 197 号, gaof6666.sripe@sinopec.com。

通信作者: 林春阳, 男, 汉族, 1982年生, 高级工程师, 渗流力学专业, 博士, 主要从事地热开发及碳捕获、利用与封存相关研究工作, 北京市昌平区沙河镇百沙路 197 号, linchy953.sripe@sinopec.com。

引用格式: 高雪菲, 杨鹏, 王磊, 等. 层流单分支管路流量分配的理论分析与 CFD 模拟[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 52-59.

GAO Xuefei, YANG Peng, WANG Lei, et al. Theoretical analysis and CFD simulation on flow distribution in single-branch pipelines under laminar flow condition[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 52-59.

models and dynamic flow processes to enhance the model's universality.

Key words: branch well; single-branch pipeline; flow distribution; laminar flow; CFD simulation; theoretical model

0 引言

分支井是一种通过主井眼侧向钻出多个分支井筒的复杂井型技术,广泛应用于油气田开发、地热开采及地下水管理等领域。其核心优势在于通过扩大泄油面积、提高储层接触效率,显著提升资源采收率并降低开发成本^[1-3]。20世纪70年代,苏联率先将分支井技术应用于老井改造,初期产量较直井提升1.2~3.8倍^[4]。近年来,随着水平井与分支井技术的融合,鱼骨状分支井等复杂结构逐渐成为研究热点^[5-8]。很多学者通过数值模拟分析了分支角度和分支长度对流动特性的影响,发现增加分支长度可显著提高压力分布均匀性^[9-12]。但分支井的流量分配受几何参数(如管径、长度)与流动状态的复杂耦合影响,精准预测主管路与支管路的流量配比仍是工程优化的核心挑战^[13-15]。

管路流动损失的计算是流量分配分析的基础,其核心在于量化沿程阻力与局部阻力。经典Darcy-Weisbach公式通过引入沿程阻力系数 λ ,将压降与流速、管径及管长关联,成为层流与湍流计算的通用方法^[8]。对于层流($Re < 2300$),Hagen-Poiseuille理论进一步建立了 λ 与雷诺数 Re 的线性关系($\lambda = 64/Re$),为低雷诺数流动提供了理论支撑^[16-18]。在此基础上,基于Navier-Stokes方程的解析解被用于推导流量分配公式,但假设条件(如理想流体、忽略局部阻力)限制了其实际应用^[19]。Liu等^[20]通过室内实验,研究了生产过程中水平井的压力分布特征,实验结果与理论模型的预测对比,相对误差小于20%。然而,对于层流状态下特定分支结构局部阻力系数的系统研究仍显不足,理论值与实测值常存在偏差^[21]。

在实验研究方面,Zhai等^[22]研究了分支之间对采油的干扰效应,建模结果与实验现象吻合良好。通过数值模拟结果分析了各分支水油产量的变化趋势,结果表明产量强烈依赖于分支角度,在45°分支角度下的最高回收率为60.2%。Ma等^[23]则通过微流控实验验证了管径四次方关系的有效性,但受限于实验尺度,难以覆盖工程实际工况。

近年来,计算流体力学(CFD)成为研究主流,其准确性直接影响数值模拟结果的可靠性和工程

决策的正确性^[24]。层流作为流体流动的基本形态之一,在低雷诺数条件下广泛存在于各种工程中。Rito等^[25]通过微粒子图像测速技术(micro-PIV)比较了层流和湍流模型的预测结果,研究证明在微通道流动条件下,层流模型足以提供可靠的预测结果。Ray等^[26]扩展了低雷诺数区域($Re < 100$)的微通道入口长度预测能力。Liao等^[27]通过网格无关性分析指出,当网格数量达到阈值后,流量分配误差趋于稳定,但针对分支管路的系统研究仍较少。此外,现有研究多聚焦单一工况,缺乏对多参数(如管长、管径、流量)耦合影响的综合评估^[28-31]。

针对当前分支管路管径为150~800 mm的工况,本文以水为流动介质,在较低流速条件下,经计算分析其雷诺数($Re < 2300$),确定该工况处于层流状态。基于实际工作中可通过调节水泵功率进而调节入口压力的特点,将入口压力与出口压力设定为恒定值,以保证流量分配比例相对稳定。鉴于上述研究空白,提出“理论-数值模拟”相互验证的研究框架,系统探讨层流状态下单分支管路的流量分配规律,具体包含:

(1)理论模型构建,基于并联管路压降平衡假设,结合Darcy-Weisbach公式与层流本构关系,推导出流量分配与管径四次方成正比、与管长成反比。

(2)CFD数值模拟多工况仿真验证,设计5组不同几何参数(管长、管径)及3组注入流量(2000~4000 kg/d)的工况进行仿真。结果显示,仿真与理论值的最大误差均低于5%,验证了理论模型的工程适用性。此外,流量配比与注入流量无关的特性为优化工况设计提供了理论依据。

1 理论模型

分支井主管路-分支管路流量分配比例是评价分支井注入能力的关键因素。为验证实际尺寸分支井注入能力的仿真模拟精度,通过理论分析得出分支井流量分配比例的理论值,然后通过仿真值与理论值的对比,进一步验证仿真结果的可靠性,最终得到适合的主管路-分支管路流量配比数据。

如图1所示,单分支管路由主管路和分支管路

组成。若两条管路的出口压力相同,即 $P_2=P_3$,则每个分支管路的起点压力(P_1)和终点压力(P_2 或 P_3)之差相同,即各分支管路的总压力损失相同。

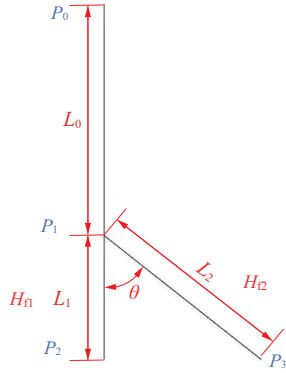


图1 单分支管路结构

Fig.1 Single-branch pipeline configuration

$$H_{f1} = H_{f2} \quad (1)$$

总压力损失包括沿程损失及局部动能损失。真实井筒条件下,沿程损失为主要影响因素,其计算公式(即 Darcy-Weisbach 公式)为:

$$H_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中: λ ——沿程损失系数; L ——管长; D ——管径; v ——流体速度; g ——重力加速度。

将式(2)代入(1)可得:

$$\lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{v_1^2}{2g} = \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

雷诺数计算公式为:

$$Re = \rho v D / \mu \quad (4)$$

式中: ρ ——流体密度; μ ——动力黏度。

主管和支管直径均为 177.8 mm,动力黏度为 $8.8871 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度为 997.561 kg/m^3 ,选取最大入口流量 3000 kg/d ,流速 0.0014 m/s ,计算得到雷诺数 $Re=280$,雷诺数小于 2300。

对于直径为 D 的管路,在充分的流动状态下 ($Re < 2300$),流动表现为层流^[32], λ 与相对粗糙度无关,只是雷诺数 Re 的函数,即:

$$\lambda = 64 / Re \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(3)并整理得:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{v_2}{v_1} \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (6)$$

流量:

$$Q = \pi (D/2)^2 v \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)并整理得:

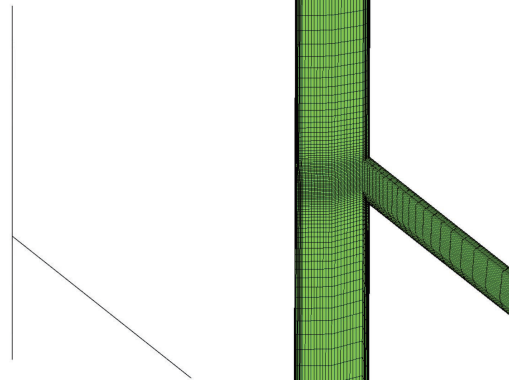
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{L_2}{L_1} \frac{D_1^4}{D_2^4} \quad (8)$$

由式(8)可知,流量配比 Q_1/Q_2 主要受管路直径、长度的影响,即 Q_1/Q_2 与主路和支路管径之比的 4 次方成正比,与主路和支路管长之比成反比。

2 模型的建立及网格划分

2.1 网格划分

本文利用 Quad 网格形式及 Map 网格种类对模型进行网格划分,图 2(a)为单分支管路模型网格立体图,图 2(b)为局部加密网格图。



(a) 单分支管路模型网格

(b) 局部加密网格

图2 单分支管路仿真模型

Fig.2 Single-branch pipeline simulation model

根据式(4)计算得出 $Re < 2300$,分支井主管路及分支管路的流动处于层流状态。此时,流体层平行于管轴流动,层流层覆盖了管壁的粗糙面;同时流体流速相对较低,粗糙度对流体运动产生的阻力较小。Nikuradse^[33]通过人造粗糙度管实验证实,层流状态的沿程阻力系数计算公式为 $\lambda = 64 / Re$ 。所以,沿程阻力与沿程长度、管径、流速等有关,管壁的相对粗糙度对沿程损失系数没有影响。

模拟过程中,流体等效为不可压缩流体,采用稳态计算方法,管路内相关守恒方程:

(1)连续性方程:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (9)$$

(2)动量方程:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = \nabla \bar{\tau} - \nabla p + \rho \vec{g} \quad (10)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{v}) \cdot I \quad (11)$$

式中: $\vec{v}$ ——混流体的速度矢量; $\bar{\tau}$ ——应力张量; p ——压力; $\vec{g}$ ——重力加速度矢量; I ——单位张量。

2.2 网格无关性验证

理论上, 网格数量越密, 模型越准确, 但计算量也越大, 同时计算所保存的数据特别大, 处理数据不便, 因此有必要探索网格数量对结果的影响。网格无关性是指, 当网格数量达到一定数量时, 随着网格数量进一步增加, 仿真结果基本不变。

本文对网格数量作均匀加密处理, 计算得出每组方案的主管路与分支井流量比, 并比较每组主管路与分支井流量比的误差, 以探索网格无关性, 具体情况如表1所示。

表1 网格加密情况

Table 1 Mesh refinement condition

方案	网格单元数量	对方案1加密倍数
方案1	21万	1
方案2	42万	2
方案3	105万	5
方案4	210万	10
方案5	820万	40

通过对网格数量从21万(方案1)逐步加密至820万(方案5)的模拟分析, 验证了主管路与分支井流量比(Ratio)的网格无关性(表2、图3)。结果显示: 当网格数量增至105万(方案3)时, 流量比误差降至0.8%, 相关系数达0.951, 表明数值与变化趋势趋于稳定; 进一步加密至210万(方案4)后, 误差仅0.7%, 与基准方案5的相关系数达0.996, 收敛速率显著放缓。综合分析, 方案3及以上网格密度(≥ 105 万)已满足工程精度要求(误差 $<1\%$), 兼顾计算效率与可靠性, 故采用方案4(210万); 方案1和方案2(误差3%~5%)适用于快速估算, 但需注意初期网格敏感性导致的数据波动。该结论通过误差收敛与趋势相关性双重指标验证, 为后续模拟提供高效网格选择依据。

3 仿真及模拟工况验证

在众多工程应用中, 管路入口或出口的压力通常是已知且确定的, 这一特点形成了流体系统设计、运行与优化的基础框架。例如泵送系统、压力

表2 加密网格的计算结果

Table 2 Simulation results with refined mesh

项目	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
流量比	1.510	1.528	1.473	1.471	1.461
误差%	3.3	4.6	0.8	0.7	0.0
相关系数	0.896	0.820	0.951	0.996	1.000

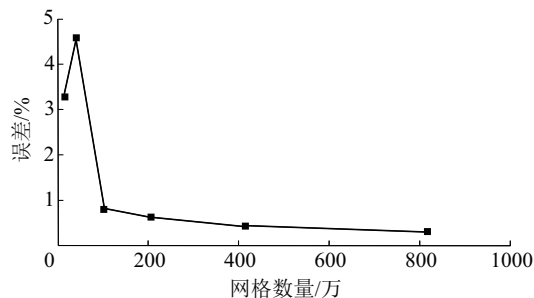


图3 加密网格的计算结果误差曲线

Fig.3 Error curve of Simulation results with refined mesh

源驱动的管路等。通过压力边界条件的合理设置, 可以精确模拟流体在已知压力作用下的流动特性, 从而提升数值模拟结果的可靠性, 确保计算结果与实际物理行为保持一致^[34-36]。本文模拟的工程实际对象为分支井, 研究重点在于带有分支管路的流量分配问题, 根据实际工作时可通过调节水泵功率进而调节入口压力这一特点, 将入口压力和出口压力设为恒定, 以保证流量分配比率相对稳定。为了使模型的整体性能精准, 先通过对分支井支管长度及直径变化进行分析, 结合理论模型证实了仿真模型的准确性, 同时研究调节分支井支管长度和直径对分支井主管与支管流量比值的影响, 最后进行同一模型不同流量工况的仿真分析, 验证不同流量对主管与支管流量比值的影响, 从而总结相关规律用于工程上分支井的结构设计方案。

3.1 管路长度不同时的仿真精度评估

为了评估支管管路长度不同时仿真模型对于主井和分支井流量分配的仿真精度, 设计了2种分支井支管长度结构进行流量分配计算, 如图4所示, 模型1支管长度为1358.5 m, 模型2支管长度为1562.5 m, 具体参数见表3。

3.1.1 模型1流量分配计算

模型1流量分配理论计算, 把 $L_1=845$ m、 $D_1=177.8$ mm、 $L_2=1358.5$ m、 $D_2=177.8$ mm 代入式(8)得到主管路与分支井流量比 $Q_1/Q_2=1.608$ 。

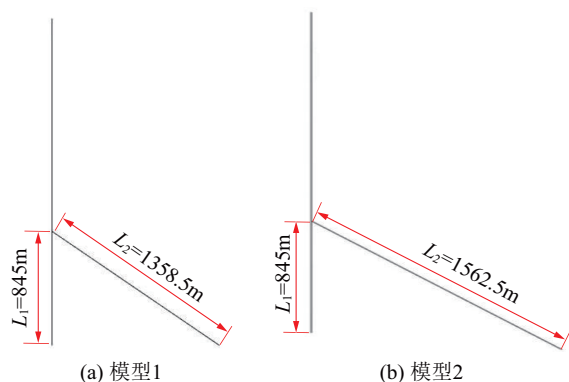


图4 管路长度的2种模型
Fig.4 Two pipeline length models

表3 2种分支井结构参数
Table 3 Two key geometric parameters of multilateral well configurations

参数	模型1	模型2
L_1/m	845	845
L_2/m	1358.5	1562.5
D_1/mm	177.8	177.8
D_2/mm	177.8	177.8

采用FLUENT软件对模型1进行仿真分析,工况参数采用 $Q=3000\text{ kg/d}$, $g=9.81\text{ m/s}^2$,边界条件为流量入口和压力出口,图5为模型1仿真计算获得管路中的速度分布。通过仿真计算得到主管和支管的流速数值转换为流量,进而获得 $Q_1/Q_2=1.681$ 。由此可见,仿真获得 Q_1/Q_2 与理论计算相差4.56%。

3.1.2 模型2流量分配计算

模型2流量分配理论计算,把 $L_1=845\text{ m}$ 、 $D_1=177.8\text{ mm}$ 、 $L_2=1562.5\text{ m}$ 、 $D_2=177.8\text{ mm}$ 代入式(8)

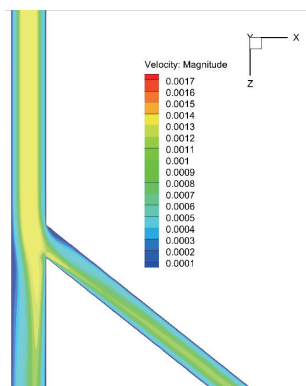


图5 模型1流场速度分布
Fig.5 Flow velocity distribution in Model 1

得到 $Q_1/Q_2=1.849$ 。

工况参数仍然采用 $Q=3000\text{ kg/d}$, $g=9.81\text{ m/s}^2$,边界条件为流量入口和压力出口,图6为仿真计算获得管路中的速度分布。通过仿真计算得到主管和支管的流速数值转换为流量,进而获得 $Q_1/Q_2=1.936$ 。由此可见,仿真获得 Q_1/Q_2 与理论计算相差4.70%。

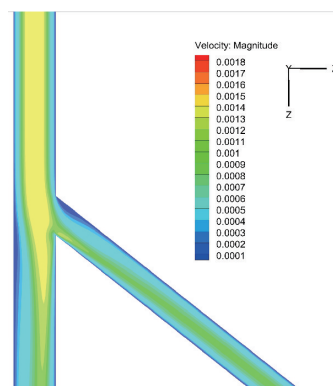


图6 模型2流场速度分布
Fig.6 Flow velocity distribution in Model 2

上面的分析结果证明了主管和支管的流量比 Q_1/Q_2 的变化受管路长度影响。支管管路长度不同时仿真模型的仿真精度在5%以内,仿真和理论计算的误差在可接受范围,调节支管长度可用于分支井的结构设计方案。

3.2 管路直径不相同时的仿真精度评估

为了验证主井与分支井管路直径不相同工况下流量分配仿真计算的精度,设计了3种分支井不同支管直径的结构进行流量分配计算,其中模型3支管直径为88.5 mm,模型4支管直径为133 mm,模型5支管直径为152 mm,具体参数见表4。

3.2.1 模型3流量分配计算

模型3流量分配理论计算,把 $L_1=1238\text{ m}$ 、 $D_1=177\text{ mm}$ 、 $L_2=1991\text{ m}$ 、 $D_2=88.5\text{ mm}$ 代入式(8)得到

表4 3种分支井不同支管直径结构参数
Table 4 Three multilateral well configurations with varying lateral branch diameters

参数	模型3	模型4	模型5
L_1/m	1238	1238	1238
L_2/m	1991	1991	1991
D_1/mm	177	177	177
D_2/mm	88.5	133	152

$Q_1/Q_2=25.732$ 。

采用FLUENT对模型3进行仿真分析,工况参数仍然采用 $Q=3000\text{ kg/d}$, $g=9.81\text{ m/s}^2$,边界条件为流量入口和压力出口,图7为模型3仿真计算获得管路中的速度分布。通过仿真计算得到主管和支管的流速数值转换为流量,进而获得 $Q_1/Q_2=26.131$ 。由此可得,仿真获得 Q_1/Q_2 与理论计算相差1.55%。

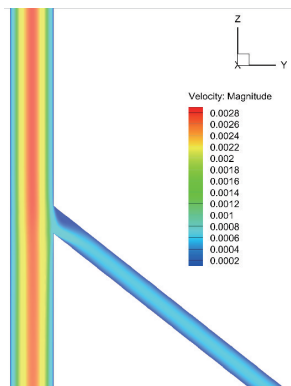


图7 模型3流场速度分布

Fig.7 Flow velocity distribution in Model 3

3.2.2 模型4流量分配计算

模型4流量分配理论计算,把 $L_1=1238\text{ m}$ 、 $D_1=177\text{ mm}$ 、 $L_2=1991\text{ m}$ 、 $D_2=133\text{ mm}$ 代入式(8)得到 $Q_1/Q_2=5.045$ 。

采用FLUENT对模型4进行仿真分析,工况参数仍然采用 $Q=3000\text{ kg/d}$, $g=9.81\text{ m/s}^2$,边界条件为流量入口和压力出口,图8为模型4仿真计算获得管路中的速度分布。通过仿真计算得到主管和支管的流速数值转换为流量,进而获得 $Q_1/Q_2=5.107$ 。由此可得,仿真获得 Q_1/Q_2 与理论计算相差1.23%。

3.2.3 模型5流量分配计算

模型5流量分配理论计算,把 $L_1=1238\text{ m}$ 、 $D_1=177\text{ mm}$ 、 $L_2=1991\text{ m}$ 、 $D_2=152\text{ mm}$ 代入式(8)得到 $Q_1/Q_2=2.957$ 。

采用FLUENT对模型5进行仿真分析,工况参数仍然采用 $Q=3000\text{ kg/d}$, $g=9.81\text{ m/s}^2$,边界条件为流量入口和压力出口,图9为模型5仿真计算获得管路中的速度分布。通过仿真计算得到主管和支管的流速数值转换为流量,进而获得 $Q_1/Q_2=2.994$ 。由此可得,仿真获得 Q_1/Q_2 与理论计算相差

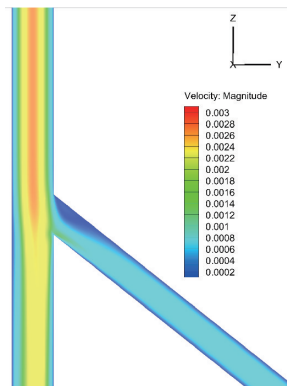


图8 模型4流场速度分布

Fig.8 Flow velocity distribution in Model 4

1.25%。

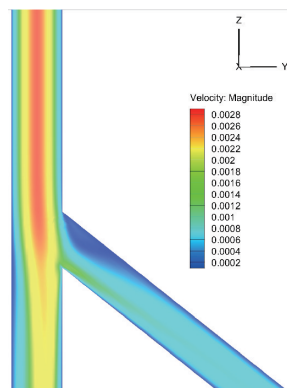


图9 模型5流场速度分布

Fig.9 Flow velocity distribution in Model 5

上面的分析结果证明了流量比 Q_1/Q_2 的变化受管路直径的影响。管路直径不同时仿真模型的仿真精度在5%以内,仿真和理论计算的误差在可接受范围,调整支管直径可用于分支井的结构设计。

3.3 注入不同流量时仿真精度评估

为了评估注入不同流量时仿真模型对于主井和分支井流量分配的仿真精度,选择模型3做不同流量下的分配计算,并选择2000、3000、4000 kg/d三种流量做对比分析,计算结果见图10、表5。

分析结果证明流量比 Q_1/Q_2 的变化不随管路注入流量的改变而变化。注入流量不同时仿真模型的仿真误差在5%以内,仿真和理论计算的误差在可接受范围,可以用来指导分支井的结构设计。

4 结论

本文通过雷诺数计算确定工况下的层流状态,

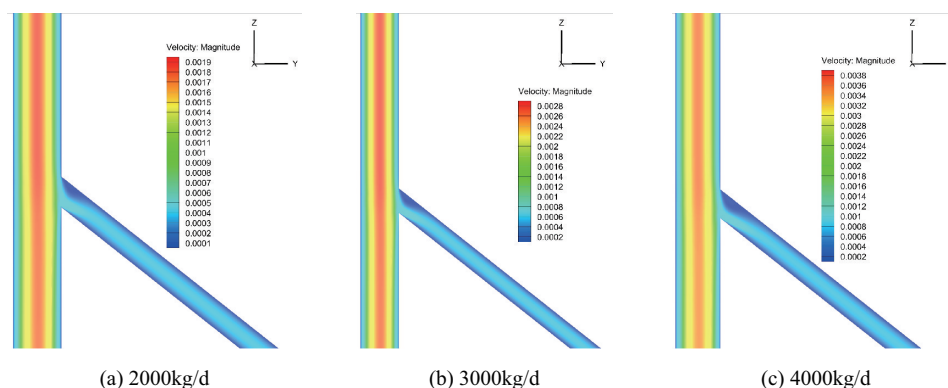


图10 不同流量下模型3流场速度分布

Fig.10 Flow velocity distribution in Model 3 under varying flow rates

表5 不同流量的仿真结果对比
Table 5 Comparison of simulation results
under varying flow rates

注入流量/(kg·d ⁻¹)	Q_1/Q_2 仿真值	Q_1/Q_2 理论值	误差/%
2000	26.057	25.732	1.26
3000	26.131	25.732	1.55
4000	26.06	25.732	1.28

结合 Darcy-Weisbach 公式与层流本构关系,明确流量分配与管径四次方成正比、与管长成反比。在入口压力与出口压力保持稳定的工况下,对5组不同几何参数(管长、管径)及3组注入流量(2000~4000 kg/d)的工况进行模拟,分析归纳得到分支管路的流量分配问题。数值模拟结果与理论值的偏差低于5%,验证了模拟结果的准确性。研究表明,出口流量比 Q_1/Q_2 的变化主要受管路直径与管路长度的影响,而与注入流量无关。具体而言,流量配比 Q_1/Q_2 与主路管径和支路管径之比的4次方成正比,与主路管长和支路管长之比成反比。本研究可为分支井结构优化提供理论依据,所提出的方法亦可扩展至多分支管路系统分析。后续研究将延伸至湍流模型及动态流动过程,以进一步提升模型的适用广度。

参考文献(References):

- [1] 程万,孙家应,张毅,等.煤层底板多分支水平井渗透注浆扩散规律数值模拟研究[J].钻探工程,2023,50(5):133-139.
CHENG Wan, SUN Jiaying, ZHANG Yi, et al. Numerical simulation research on diffusion law of seepage grouting in multi-branch horizontal well of coal seam floor[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):133-139.
- [2] 刘恒,杨胜春,纪卫军.张集煤矿多分支井强封堵防塌钻井液体

系研究及应用[J].钻探工程,2024,51(S1):368-372.

- LIU Heng, YANG Shengchun, JI Weijun. Study and application of drilling fluid system for strong plugging and collapse prevention in multi-branch wells of Zhangji Coal Mine[J]. Drilling Engineering, 2024,51(S1):368-372.
- [3] 董正亮,刘加杰,王鹏,等.国内井矿盐钻井技术新进展[J].探矿工程,2019,46(8):67-72.
DONG Zhengliang, LIU Jiajie, WANG Peng, et al. Advances in drilling technology for borehole salt mining[J]. Exploration Engineering, 2019,46(8):67-72.
- [4] 黄东杰.多分支水平井挖潜技术研究及应用[J].中国井矿盐,2023,54(2):16-19.
HUANG Dongjie. Research and application of multi-branch horizontal drilling technology[J]. China Well and Rock Salt, 2023, 54(2):16-19.
- [5] 贾雍,和鹏飞,袁则名,等.海上某气田悬空侧钻水平分支井技术及应用[J].钻探工程,2021,48(4):104-109.
JIA Yong, HE Pengfei, YUAN Zeming, et al. Application of horizontal branch wells in an offshore gas field[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):104-109.
- [6] Silva H G, Conde O R, Khalifa H, et al. Optimizing fishbone multilateral well productivity forecasting with machine learning techniques [C]//Paper presented at the International Geomechanics Symposium. Al Khobar, Saudi Arabia, 2023: ARMA-IGS-2023-0141.
- [7] 张新刚,涂运中,刘汪威,等.多分支水平对接井技术在土耳其天然碱溶采中的应用[J].探矿工程,2020,47(8):43-49.
ZHANG Xingang, TU Yunzhong, LIU Wangwei, et al. Application of multi-lateral horizontal intersected well drilling technique in Turkish trona solution mining[J]. Exploration Engineering, 2020,47(8):43-49.
- [8] Yang R Y, Huang Z W, Hong C Y, et al. Modeling fishbones in coalbed methane reservoirs using a hybrid model formulation: Gas/water production performance in various lateral-cleat-network geometries[J]. Fuel, 2019,244:592-612.
- [9] Salas J R, Clifford P J, Jenkins D P. Brief: multilateral well performance prediction [C]//Paper presented at the SPE Western Regional Meeting. Anchorage, Alaska, 1996: SPE-35711-MS.
- [10] Avila M, Mellibovsky F, Roland N, et al.

- Streamwise-localized solutions at the onset of turbulence in pipe flow[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(22):224502.
- [11] Elkari M, Boukharfane R, Benjelloun S, et al. A CFD-based surrogate model for predicting slurry pipe flow pressure drops [J]. *Particulate Science and Technology*, 2023, 41(3):12.
- [12] Kadhim B J, Mahdy O S, Alsaedi S S, et al. Effect of rigid xanthan Gums(RXGs) on flow and pressure drops to improve drag reduction rates in horizontal pipe flow[J]. *chemEngineering*, 2023, 7(2):36.
- [13] Joshi S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1988, 40(6):729-739.
- [14] Pan L H, Freifeld B, Doughty C, et al. Fully coupled wellbore-reservoir modeling of geothermal heat extraction using CO₂ as the working fluid[J]. *Geothermics*, 2015, 53:100-113.
- [15] Rees S J, He M M. A three-dimensional numerical model of borehole heat exchanger heat transfer and fluid flow[J]. *Geothermics*, 2013, 46:1-13.
- [16] Zeng Y C, Wu N Y, Su Z, et al. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through a novel single vertical fracture at Desert Peak geothermal field[J]. *Energy*, 2013, 63:268-282.
- [17] Martins N M C, Covas D I C, Meniconi S, et al. Hydrodynamics of laminar pipe flow through an extended partial blockage by CFD[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2023, 25(6):2268-2280.
- [18] Liu B, Zhang Y P, Zuo X G, et al. Coupled effects of time and temperature on the rheological and pipe flow properties of cemented paste backfill[J]. *Minerals*, 2024, 14(12):1221.
- [19] Safari R Z, Lewis R, Ma X D, et al. Infill-well fracturing optimization in tightly spaced horizontal wells[J]. *SPE Journal*, 2017, 22(2):582-595.
- [20] Liu J B, Jiang Z H, Feng X Z, et al. An experimental study on the pressure distribution in horizontal gas wells[J]. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2020, 16(6):176-191.
- [21] Li M T, Gou Y, Hou Z M, et al. Investigation of a new HDR system with horizontal wells and multiple fractures using the coupled wellbore - reservoir simulator TOUGH2MP-WELL/Eos3[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10):6047-6058.
- [22] Zhai L, Yang M Y, Yan C S, et al. Dynamic distribution characteristics of oil and water during water flooding in a fishbone well with different branch angles[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(31):27206-27215.
- [23] Ma J C, Yang J, Yi F Y, et al. Numerical research on the heat transfer model and performance of deep borehole heat exchangers combined with geothermal wells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 214:118728.
- [24] Onyeador C N, Waligura C J, Lopez L, et al. Comparison and uncertainty assessment of CFD codes for hypersonic flow modeling[C]//Eleventh International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD11. Maui, Hawaii, 2022: ICCFD11-2022-3201.
- [25] Rito Pereira M, Silva G, Semiao V, et al. Experimental validation of a computational fluid dynamics model using micro-particle image velocimetry of the irrigation flow in confluent canals[J]. *International Endodontic Journal*, 2022, 55(12):1394-1403.
- [26] Ray D R, Das D K. Simulations of flows via CFD in micro-channels for characterizing entrance region and developing new correlations for hydrodynamic entrance length[J]. *Micromachines*, 2023, 14(7):1418.
- [27] Liao J B, Zhang Z Y, Tang H Z, et al. Simulation of fracturing and well pattern optimization of fractured tight sandstone reservoirs[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10. DOI: 10.3389/feart.2022.873617.
- [28] Tang H W, Yan B C, Chai Z, et al. Analyzing the well-interference phenomenon in the eagle Ford shale/Austin chalk production system with a comprehensive compositional reservoir model[J]. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2019, 22(3):827-841.
- [29] Cai W L, Wang F H, Chen C F, et al. Long-term performance evaluation for deep borehole heat exchanger array under different soil thermal properties and system layouts[J]. *Energy*, 2022, 241:122937.
- [30] Hu X C, Banks J, Guo Y T, et al. Retrofitting abandoned petroleum wells as doublet deep borehole heat exchangers for geothermal energy production: a numerical investigation[J]. *Renewable Energy*, 2021, 176:115-134.
- [31] Kerme E D, Fung A S. Heat transfer analysis of single and double U-tube borehole heat exchanger with two Independent circuits[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 43:103141.
- [32] Schlichting H, Gersten K. *Boundary-Layer theory* [M]. Berlin: Springer, 2017.
- [33] Nikuradse J. *Laws of flow in rough pipes*: NACA-TM-1292 [R]. 1950.
- [34] 石一丁,葛天明,张足峰.海底输气管道气体泄漏扩散模拟及影响因素研究[J]. *石油与天然气化工*, 2020, 49(5):109-115, 123.
- SHI Yiding, GE Tianming, ZHANG Zufeng. Simulation of the subsea gas pipeline leakage and the study of influence factors[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2020, 49(5):109-115, 123.
- [35] 邓智强,梁晓瑜,吴欢欢.原油输运管路冲蚀影响因素仿真研究[J]. *中国测试*, 2015, 41(5):116-120.
- DENG Zhiqiang, LIANG Xiaoyu, WU Huanhuan. Simulation studies on erosion wear factors of crude oil transport pipelines[J]. *China Measurement & Testing*, 2015, 41(5):116-120.
- [36] 林靖涛,于洋,杨春霞,等.抽水蓄能电站回水排气管道能量特性及流动特性研究[J]. *水电与抽水蓄能*, 2024, 10(3):28-35.
- LIN Jingtao, YU Yang, YANG Chunxia, et al. Study on energy characteristics and flow characteristics of return water and exhaust pipe in pumped storage power station[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2024, 10(3):28-35.

(编辑 王跃伟)