

考虑气体加速效应的高压气井 产能方程推导及其应用*

姜海龙¹, 朱培旺², 徐东华³

(1. 西安石油大学 机械工程学院, 西安 710065;

2. 中油国际管道有限公司, 北京 100029;

3. 北票市市场监督管理局质量(食品)检验检测中心, 辽宁 北票 122100)

摘要: 高压气体径向渗流中气体加速效应非常显著,因此传统二项式或三项式产能方程中的非 Darcy 项不能反映带有气体加速效应的非 Darcy 渗流特征.气体加速效应影响的忽略导致无阻流量计算的误差增大,不利于合理产能和开发方案的确定.采用考虑了气体加速效应的高压气体运动方程,通过质量守恒方程、真实气体状态方程和气体运动方程,推出考虑加速效应的高压气井产能新方程,此方程同样可反映传统的二项式产能方程,提高了无阻流量的预测精度.由于此方程没有解析解,采用类比法进行简化,再利用试凑法,求解此产能方程的相关系数.为了验证准确性,将该方程应用到了四川盆地高压气藏西 35-1 井的试井资料中,其解释结果与陈春燕和罗银富等所得结果进行对比分析,结果表明该方法所获得的产能精度明显提高,并且能够消除随着压差增大而产能相对误差增大的弊端,更加有利于高压气井无阻流量的精确计算.研究结果丰富了高压气井产能预测方法,同时无阻流量的准确计算保障了高压气井合理产能的确定.

关键词: 加速效应; 高压气藏; 产能方程; 无阻流量

中图分类号: O35

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.400030

引 言

通过拟合气井产能测试数据,建立描述井底流压与产量关系的产能方程,最终目的是获得气井的无阻流量,而无阻流量是确定气井潜在产能的重要指标和合理配产的重要依据,是科学、合理开发气田的基础.为了更好地拟合气井产能测试数据,研究者们提出了很多气井相关的产能方程,一部分是在 Darcy 定律产能方程的基础上添加启动压力梯度项和应力敏感项^[1-4];另一部是在 Forchheimer 非 Darcy 渗流产能方程的基础上添加各种附加项^[5-11].高压气井产能试井中,往往采用 Forchheimer 非 Darcy 渗流产能方程或者带有附加项的 Forchheimer 非 Darcy 渗流产能方程确定高压气井的无阻流量,但是随着气藏压力和测试压差的增大,不同产能方程计算的无阻流量结果相差很大,并且拟合方程的相关系数不高.其最主要原因是这些基

* 收稿日期: 2019-01-14; 修订日期: 2019-04-15

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划(2019JQ-403;2017JQ5114)

作者简介: 姜海龙(1989—),男,讲师,博士(通讯作者. E-mail: jianghl_xapi@126.com).

引用格式: 姜海龙,朱培旺,徐东华.考虑气体加速效应的高压气井产能方程推导及其应用[J].应用数学和力学,2020,41(2):134-142.

于 Forchheimer 非 Darcy 渗流机理的产能方程没能考虑高压气井测试过程中的气体加速效应。实际上,高压气井测试生产过程中,随着高压气体向井筒内流动,气体体积会迅速膨胀,导致气体流动具有不可忽略的气体加速效应。随着井底压力的降低,这种气体加速效应会更加显著。特别在计算无阻流量时,井底压力为 0.101 MPa,此时气体加速效应非常显著^[12-18],严重影响无阻流量的精确计算结果,如果不考虑气体加速效应的影响,那么计算出来的无阻流量一定偏高,不利于指导气藏的合理开发。Jin 等^[12-14]通过研究高压气井压力波动,首次发现了高压气体在近井区域流动时气体加速效应非常显著,主要分析了高压气体压力分布特征和波动特征,但没有提出相应的高压气井产能方程。Jiang 等^[15-18]在 Jin 等^[12-14]研究成果的基础上,通过等效渗透率的方法,给出了高压气藏压裂井的产能计算方法,但也没有提出相应高压气井简洁的产能方程。基于此,本文针对高压气藏测试开采过程中气体具有高可压缩性的流动特征,建立了考虑气体加速效应和非 Darcy 效应影响的产能方程,通过生产实践检验,所获得的气井产能方程具有非常高的精度,并且得到的无阻流量更加真实可靠。这为开发高压气藏提供了一种新的产能评价手段,同时也是合理产能确定的重要依据。

1 传统非 Darcy 渗流产能方程

高压气井生产中,高压气体流入井筒内是一个高速平面径向流过程,特别在井筒附近,渗流速度急剧增加,此时流动的 Reynolds 数达到湍流水平。因此,Forchheimer 在传统 Darcy 渗流定律中添加了二次项,用于描述这种传统非 Darcy 渗流的二次流动规律^[5-8]:

$$\frac{dp}{dx} = - \left(\frac{\mu}{\kappa} v + \beta \rho v^2 \right), \quad (1)$$

式中, κ 为岩石的渗透率; ρ, v, p, μ 分别为气体的密度、流速、压力、黏度; β 为 Forchheimer 系数; x 为流动距离。

部分学者认为该传统的二项式渗流方程还不能准确描述高压气藏中气体的高速渗流问题,并在包含 Darcy 项和非 Darcy 项的传统二项式产能方程基础上增加了一个三次方项,提出了高压气藏中气体渗流三项式产能方程^[9-11]:

$$\frac{dp}{dx} = - \left(\frac{\mu}{\kappa} v + \beta \rho v^2 + \gamma \rho^2 v^3 \right), \quad (2)$$

式中, γ 为边界阻力系数。

将式(2)简化后,可得到径向渗流三项式压力平方方程:

$$P_e^2 - P_w^2 = Aq_g + Bq_g^2 + Cq_g^3. \quad (3)$$

上述二项式和三项式产能方程中的非 Darcy 项,仅在近井附近的高速区或高压降区较为明显。因此,通常也可以按照处理表皮效应的思想,用一个与流量相关的视表皮系数来描述非 Darcy 项^[19]。

2 产能新模型的建立及求解

2.1 产能方程的建立

假设一个圆形外边界的等厚高压气藏,垂直气井位于其中心并以定产量生产,外边界为定压边界,气体在储层中的高速流动为平面径向流且温度不变。高压气藏原始地层压力为 P_e , 气藏半径为 R_e , 井底流压为 P_w , 井半径为 R_w , 如图 1 所示。

由于高压气藏的压力系数较高,气体在地层中的流动不可忽略气体加速效应,因此高压气

体的流动应满足考虑气体加速效应的非 Darcy 渗流方程:

$$\frac{\rho}{\phi^2} v \frac{dv}{dr} = -\frac{dp}{dr} - \frac{\mu}{\kappa} v - \beta \rho |v| v, \quad (4)$$

式中, ϕ 为岩石的孔隙度, r 为平面径向距离. 当气体速度不再变化时, 即 $dv/dr = 0$ 时, 式(4)退化为式(1).

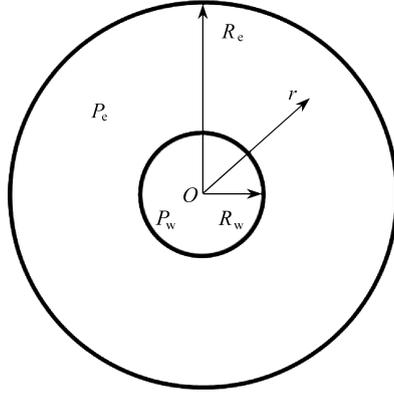


图 1 高压气藏平面径向流示意图

Fig. 1 The radial flow configuration for the high-pressure gas reservoir

地层条件下的气体密度为

$$\rho = \frac{28.97\gamma_g p}{ZRT} = ap, \quad (5)$$

式中, Z 为气体的压缩系数, R 为气体常量, T 为气体温度, γ_g 为地层气体的相对密度, a 为关联性系数.

气体的质量守恒方程为

$$\frac{d(\rho vr)}{dr} = 0. \quad (6)$$

由式(4)~(6)可以得到

$$\frac{dp^2}{dr} = \frac{-\frac{2\rho\mu}{\kappa} v + \left(2\beta\rho^2 + \frac{2}{\phi^2 r} \rho^2\right) v^2}{1 - \frac{1}{a\phi^2} v^2}. \quad (7)$$

显然式(7)没有解析解, 对其进行简化处理. 对于整个油藏渗流区域的两端有

$$\frac{dp^2}{dr} = \frac{P_e^2 - P_w^2}{R_e},$$

气体流量 q_g 正比于气体流速 v , 因此方程(7)可简化为方程(8), 即高压气井产能新方程.

$$P_e^2 - P_w^2 = \frac{Aq_g + Bq_g^2}{1 - Cq_g^2}, \quad (8)$$

式中, A, B 和 C 为待求系数; 系数 A 反映了 Darcy 渗流阻力, 系数 B 反映了 Forchheimer 惯性阻力, 系数 C 反映了气体加速效应; q_g 为气体流量; 压力的单位为 MPa. 对于常压气藏, 加速效应不显著, $C = 0$, 此时高压气井产能新方程(8)退化为传统的二项式产能方程.

2.2 产能方程和无阻流量的求解

只要求出式(8)中的系数 A, B 和 C , 那么就唯一确定了该井的流入动态曲线, 进而求得气井的无阻流量. 将式(8)变成

$$(P_e^2 - P_w^2) \frac{1 - Cq_g^2}{q_g} = A + Bq_g. \quad (9)$$

由式(9)可知, 以 $(P_e^2 - P_w^2) [(1 - Cq_g^2)/q_g]$ 为纵坐标, 以 q_g 为横坐标, 则在理论上应得一条直线, 可以采用试凑法, 不断尝试 C 的值, 每尝试一次 C 的值, 进行一次线性回归, 求得相应的 A 和 B 值以及回归的相关系数, 在求得 A, B 和 C 均大于零的情况下, 寻找最大相关系数对应的 A, B 和 C 值.

确定了 A, B 和 C 的值, 便可获得气井产能方程. 令 $P_w = 0.101$ MPa, 所对应的气井产量即是无阻流量. 此时有

$$P_e^2 - 0.101^2 = \frac{Aq_{\text{AOF}} + Bq_{\text{AOF}}^2}{1 - Cq_{\text{AOF}}^2}. \quad (10)$$

求解式(10), 正实根即为无阻流量.

2.3 产能方程的特点

取 $P_e = 40$ MPa, $A = 18$, $B = 4$, $C = 0.009$, 利用本文所提出的产能方程和传统二项式产能方程绘制流入动态曲线 (IPR), 如图 2 所示. 当井底压力开始降低时, 这两种产能方程所描述的气井产量一样, 这是因为测试压差较少, 气体流速缓慢, 加速效应不显著; 但井底压力降低到一定程度时, 这两种产能方程所描述的气井产量开始有明显的差异, 这是因为随着测试压差的增大, 气体流速增大, 加速效应开始显著; 当井底压力向零接近时, 本文所提出的产能方程反映的气井产量不再明显变化, 这比较符合现场工况. 从图 2 可以看出, 本文所提出的产能方程能够较好地反映出随着井底压力的降低, 即测试压差增大后, 气井产量增加的程度不再明显, 即本文所提出的产能方程能更好地拟合气井产量增加不再随着测试压差增大而显著增加的这种情况.

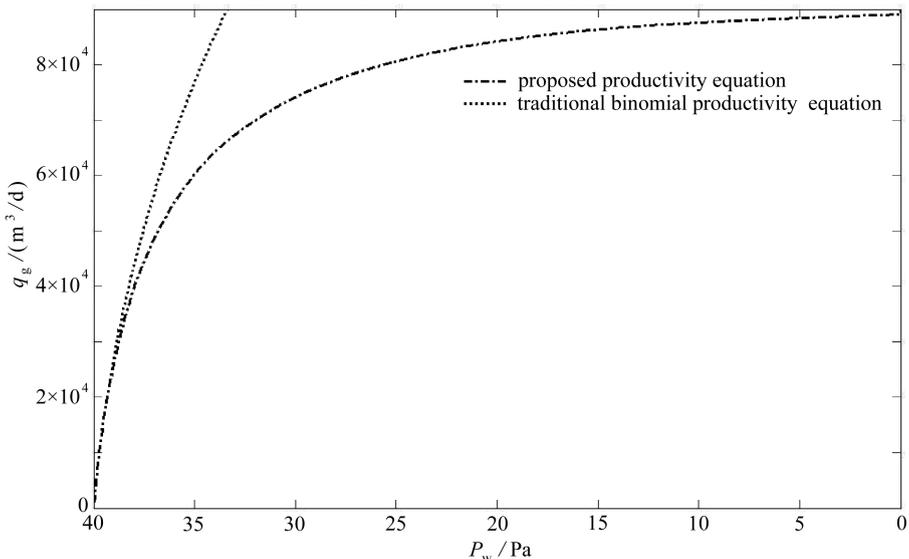


图 2 两种方程对应的流入动态曲线对比

Fig. 2 Inflow performance curves for the 2 productivity equations

3 实例分析

西 35-1 井是位于四川盆地南充构造的一口高压气井,气藏深度 2 610.0 m,开井前测得地层静压 42.27 MPa,地层压力系数 1.6,符合标准 GB/T 26979—2011 天然气藏分类中高压气藏的定义,即地层压力系数 $1.3 < 1.8$ 的气藏,定义为高压气藏.对该井进行了修正等时试井,其测试数据见表 1^[9-10].

表 1 西 35-1 井修正等时试井测试数据表

Table 1 Data from the corrected isochronous well testing for well XI 35-1

well test	testing time t/h	gas production rate $q_g/(m^3/d)$	fluid pressure P/MPa
build-up time	0.25	0	41.781
initial opening	24	30 108	40.520
shut in well	24	0	41.683
second opening	24	39 388	39.733
shut in well	24	0	41.631
third opening	24	55 870	37.805
shut in well	24	0	41.631
forth opening	24	61 297	36.357
long term test	240	44 124	38.580

利用本文提出的产能新方程,在试凑法分析时得到当 $C = 0.009$ 时, $(P_e^2 - P_w^2) [(Cq_g^2 - 1)/q_g]$ 和 q_g 有良好的线性关系,相关系数为 1.因此,当 $C = 0.009$ 时,则有 $B = 3.781 7$, $A = 17.936$, 于是产能方程为

$$P_e^2 - P_w^2 = \frac{3.781 7q_g^2 + 17.936q_g}{1 - 0.009q_g^2}. \quad (11)$$

令井底压力 $P_w = 0.101$ MPa, 求解式 (11), 得到气井无阻流量 $q_{AOF} = 9.04 \times 10^4$ m^3/d .

为了证明本文所建立的产能方程准确性,将式 (11) 计算得到的井底压力与实测的井底压力进行对比 (结果见表 2), 可见计算得到的压力值与实测值完全吻合, 该方法的准确性得到了充分验证. 为了对比所建立方程的准确性, 将陈春燕^[9] 和罗银富等^[10] 关于该井的计算结果也列于表 2. 可以看出文献 [9-10] 解释的相对误差随着实测压力的降低而增大, 而笔者提出的产能方程所得压力值与实测值完全吻合并且相对误差不会随着实测压力的降低而增大, 说明该产能方程计算得到的无阻流量更加真实可靠. 这是因为随着实测压力的降低 (即测试压差增大), 气体加速效应更加显著^[12-18], 无阻流量的计算必须考虑. 其他产能方程计算方法得到的西 35-1 井无阻流量结果见表 3, 可以看出本文所建立的产能方程计算气井无阻流量更加准确.

表 2 西 35-1 井实测压力与计算压力对比表

Table 2 Comparison of measured pressures and calculated pressures for well XI 35-1

well test	gas production rate $q_g/(m^3/d)$	P_w/MPa			relative error $\varepsilon_1/\%$	relative error from ref. [9] $\varepsilon_2/\%$	relative error from ref. [10] $\varepsilon_3/\%$
		observed bottom	calculated bottom	absolute			
		hole pressure	hole pressure	error			
1	3×10^4	40.520	40.520	0	0	0.043	0.017
2	3.94×10^4	39.733	39.733	0	0	0.121	0.003
3	5.59×10^4	37.805	37.805	0	0	0.701	1.015

表3 不同产能方程得到的西35-1井无阻流量误差表

Table 3 Relative errors and absolute open flow by different productivity equations for well XI 35-1

method	absolute open flow $q_{AOF} / (m^3/d)$	relative error $\varepsilon_1 / \%$
proposed productivity equation	90 400	0
binomial pressure method	108 200	19.69
exponential pressure square method	102 800	13.72
exponential pressure method	134 600	48.89
binomial pressure square method	120 900	33.74
binomial pressure method	162 300	79.54
one point pressure square method	146 500	62.06

为了进一步验证本文所提出的产能新方程的准确性,利用该产能新方程对文献[20]中威2井和文献[21]中A井的测试数据进行拟合,两口井的测试数据见表4.对威2井测试数据,进行试凑法计算,得到当 $C = 3 \times 10^{-5}$ 时, $(P_e^2 - P_w^2) [(Cq_g^2 - 1)/q_g]$ 和 q_g 有良好的线性关系,相关系数为0.999 9,此时 $B = 0.107 2, A = 2.943 2$;对A井测试数据,进行试凑法计算,得到当 $C = 4.6 \times 10^{-4}$ 时, $(P_e^2 - P_w^2) [(Cq_g^2 - 1)/q_g]$ 和 q_g 有良好的线性关系,相关系数为0.999 94,此时 $B = 2.861 8, A = 12.617$.从拟合的相关系数可以看出,本文所提出的产能新方程具有良好的拟合效果,进而保证了气井无阻流量的计算准确性.

表4 威2井^[20]和A井^[21]试井测试数据表

Table 4 Well testing data for well WEI 2 and well A

well test	gas production rate $q_g / (m^3/d)$	bottom hole pressure P_w / MPa	reservoir pressure P_e / MPa
well WEI 2	1	2.619×10^5	25.269
	2	3.132×10^5	24.275
	3	3.546×10^5	23.307
	4	3.974×10^5	22.173
well A	1	7.2×10^4	67
	2	1.15×10^5	64.6
	3	1.52×10^5	61.5
	4	2.02×10^5	54.6

4 结 论

本文针对高压气井产能和无阻流量预测问题,用系数 C 反映高压气体的加速效应,提出了一种高压气井产能预测新方程,可更加准确地计算出气井的无阻流量.当系数 $C = 0$,所提出的高压气井产能新方程可退化为传统的二项式产能方程,因此该方程同样适用于常压气井.该方程在拟合现场测试数据时,相关系数为1,具有很好的拟合结果.该产能方程计算的准确性与陈春燕^[9]和罗银富等^[10]建立的产能预测方法做了对比,结果表明该产能方程计算的准确性高于陈春燕^[9]和罗银富等^[10]建立的产能预测方法.另外,该产能方程在高压气井的无阻流量预测上,能够消除随着压差增大而产能相对误差增大的弊端,相比文中所列其他产能方程计算的结果更加准确.

参考文献(References):

- [1] 孙晓旭, 杨胜来, 李武广. 考虑启动压力梯度和压敏效应的超深层气藏产能方程的建立[J]. 断块油气田, 2011, **18**(3): 360-362. (SUN Xiaoxu, YANG Shenglai, LI Wuguang. Establishment of productivity equation for ultra-deep gas reservoirs considering threshold pressure gradient and pressure-sensitive effect[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, **18**(3): 360-362. (in Chinese))
- [2] 高大鹏, 刘天宇, 王天娇, 等. 非常规井数值模拟技术研究进展与发展趋势[J]. 应用数学和力学, 2015, **36**(12): 1238-1256. (GAO Dapeng, LIU Tianyu, WANG Tianjiao, et al. Research progress and development trend of numerical simulation technology for unconventional wells [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, **36**(12): 1238-1256. (in Chinese))
- [3] 赵天武, 申永宽, 陈杰, 等. 页岩裂缝系统产量预测的敏感性研究[J]. 应用数学和力学, 2016, **37**(7): 718-728. (ZHAO Tianwu, SHEN Yongkuan, CHEN Jie, et al. Research progress and development trend of numerical simulation technology for unconventional wells[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(7): 718-728. (in Chinese))
- [4] 杜鑫, 卢志炜, 李冬梅, 等. 缝洞型油藏波动和流动耦合模型井底压力分析[J]. 应用数学和力学, 2019, **40**(4): 355-374. (DU Xin, LU Zhiwei, LI Dongmei, et al. Pressure transient analysis of the fractured vuggy reservoir model coupling oil flow and wave propagation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, **40**(4): 355-374. (in Chinese))
- [5] 董长银, 饶鹏, 冯胜利, 等. 高压砾石充填防砂气井产能预测与评价[J]. 石油钻采工艺, 2005, **27**(3): 54-57. (DONG Changyin, RAO Peng, FENG Shengli, et al. Integrated productivity model for gas well with high-pressure gravel-pack sand control[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, **27**(3): 54-57. (in Chinese))
- [6] 石德佩, 李相方, 刘一江. 考虑相变的凝析气井产能方程[J]. 石油钻采工艺, 2006, **28**(4): 68-70. (SHI Depei, LI Xiangfang, LIU Yijiang. Deliverability equation study of gas condensate well considering phase change[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006, **28**(4): 68-70. (in Chinese))
- [7] 齐明明, 雷征东, 康晓东, 等. 综合高速效应的凝析气藏流入动态[J]. 石油钻采工艺, 2006, **28**(3): 74-77. (QI Mingming, LEI Zhengdong, KANG Xiaodong, et al. Study on inflow performance relationship of condensate reservoir considering high velocity flow effect[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006, **28**(3): 74-77. (in Chinese))
- [8] 谭晓华, 李晓平, 刘从领, 等. 确定气水同产水平井流入动态关系的新方法[J]. 石油钻采工艺, 2014, **36**(3): 59-64. (TAN Xiaohua, LI Xiaoping, LIU Congling, et al. A new method for ascertaining the influx dynamic relation in water-gas producing horizontal wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, **36**(3): 59-64. (in Chinese))
- [9] 陈春艳. 异常高压气藏气井产能方程求解的简易方法[J]. 天然气工业, 2007, **27**(4): 88-89. (CHEN Chunyan. A simple method to solve the deliverability equation of a gas well in abnormally high pressure gas reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, **27**(4): 88-89. (in Chinese))
- [10] 罗银富, 黄炳光, 王怒涛, 等. 异常高压气藏气井三项式产能方程[J]. 天然气工业, 2008, **28**(12): 81-82. (LUO Yinfu, HUANG Bingguang, WANG Nutao, et al. Trinomial deliverability e-

- quation for a gas well in abnormally high pressure gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, **28**(12): 81-82. (in Chinese))
- [11] 唐洪俊, 徐春碧, 唐皓. 气井产能预测方法的研究与进展[J]. 特种油气藏, 2011, **18**(5): 11-15. (TANG Hongjun, XU Chunbi, TANG Hao. Research and progress in gas well productivity prediction[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2011, **18**(5): 11-15. (in Chinese))
- [12] JIN Y, CHEN K P, CHEN M, et al. Short-time pressure response during the start-up of a constant-rate production of a high pressure gas well[J]. *Physics of Fluids*, 2011, **23**: 043101. DOI: 10.1063/1.3571494.
- [13] JIN Y, CHEN K P, CHEN M, et al. Gas expansion-induced acceleration effect in high-pressure gas flows near a wellbore[J]. *Journal of Porous Media*, 2012, **15**(4): 317-328.
- [14] JIN Y, CHEN K P, CHEN M. Highly compressible porous media flow near a wellbore: effect of gas acceleration[J]. *Journal of Fluids Engineer*, 2012, **134**: 011301. DOI: 10.1115/1.4005680.
- [15] JIANG H, DOU Y, XI Z, et al. Microscopic choked flow for a highly compressible gas in porous media[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, **35**: 42-53.
- [16] JIANG H, CHEN M, JIN Y, et al. Analytical modeling of acceleration-induced conductivity damage in a propped hydraulic fracture of a high-pressure gas well[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, **26**: 185-192.
- [17] JIANG H, CHEN M, JIN Y, et al. Importance of gas acceleration near the wellbore in radial compressible porous media flows for a vertical gas well[J]. *Transport in Porous Media*, 2015, **110**(1): 127-140.
- [18] JIANG H, CHEN M, JIN Y, et al. Gas expansion induced acceleration effect of a highly compressible gas flow in porous media[J]. *Journal of Porous Media*, 2015, **18**(8): 825-834.
- [19] 蒲春生, 张荣军, 聂翠平, 等. 非达西流对凝析气藏的伤害[J]. 天然气工业, 2004, **24**(11): 82-84. (PU Chunsheng, ZHANG Rongjun, NIE Cuiping, et al. Damage of non-Darcy flow on condensate reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, **24**(11): 82-84. (in Chinese))
- [20] 张虎俊, 鄢斌. 建立气井产能方程及计算地层压力的新方法[J]. 钻采工艺, 1998, **21**(1): 33-37. (ZHANG Hujun, YAN Bing. New method of establishment of gas well productivity equation and reservoir pressure calculation[J]. *Drilling & Production Technology*, 1998, **21**(1): 33-37. (in Chinese))
- [21] 李祖友, 杨筱璧, 罗东明. 高压气井二项式产能方程[J]. 特种油气藏, 2008, **15**(3): 62-64. (LI Zuyou, YANG Xiaobi, LUO Dongming. Binominal deliverability equation of high pressure gas well[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, **15**(3): 62-64. (in Chinese))

Derivation and Application of Productivity Equations for High-Pressure Gas Reservoirs With Gas Acceleration Effects

JIANG Hailong¹, ZHU Peiwan², XU Donghua³

(1. *College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University,
Xi'an 710065, P.R.China;*

2. *Sino-Pipeline International Company Limited, Beijing 100029, P.R.China;*

3. *Quality (Food) Inspection and Testing Center of Beipiao Market Supervision
and Administration Bureau, Beipiao, Liaoning 122100, P.R.China)*

Abstract: Non-Darcy flow in a gas well cannot be expressed with traditional binomial equations or trinomial equations for ultra-deep high pressure gas reservoirs, which leads to large errors of open flow capacities for the neglect of gas acceleration effects. A new method was presented with gas acceleration effects. Under the assumption of high-pressure radial gas flow, through combination of the continuity equation, the Darcy-Forchheimer equation with acceleration and the isothermal state equation, the productivity equation was derived. The proposed equation is also able to replace traditional binomial equations, but has no analytical solution. It can be simplified by analogy, and the related coefficients can be solved by trial and error. The application of the proposed method in data process of ultra-deep high pressure gas well XI 35-1 in Sichuan Basin is effective, and the comparison with the real production data proves the precision of the calculated productivity. The proposed method avoids the disadvantages of the relative error increase with the differential pressure. The work enriches the productivity prediction methods, with accurate calculation of open flow capacities and reasonable determination of high pressure gas well productivities.

Key words: acceleration effect; high-pressure gas reservoir; productivity equation; open flow capacity