

煤层气井注入/压降试井研究进展

方世跃¹, 许哲², 何建琴², 陈跃¹, 马东民¹

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 甘肃省科学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为更好地指导煤层气注入/压降试井设计、施工和解释,介绍了国内外煤层气注入/压降试井设备工艺与试井解释方面的研究现状和发展概况,重点分析了测试设备与工具、测试工艺、试井解释理论与方法、试井解释参数选取与结果检验 4 个方面存在的主要问题,指明未来煤层气注入/压降试井重点发展方向是注入/压降试井在套管射孔井中应用研究、设备工艺优化技术、室内试验模拟研究、数值试井技术等 4 个方面。从试井设计、资料录取、模型选择、数学算法等方面减少多解性是现阶段急需解决的问题。

关键词:煤层气井;注入/压降试井;设备与工艺;试井解释

中图分类号:P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)09-0227-06



Study progress of injection/pressure drop test well for coalbed methane well

FANG Shiyue¹, XU Zhe², HE Jianqin², CHEN Yue¹, MA Dongmin¹

(1. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to well guide the design, construction and explanation of the injection and pressure drop test well in the coalbed methane, the paper introduced the study status and development of the equipment technology and the test well explanation for the injection and pressure drop test well in the coalbed methane wells at home and abroad. The paper focused on the analysis on the main problems existed in the four aspects of the test equipment and tools, the test technology, the test well explanation theory and method and the test well explanation parameter selection and the results. The paper pointed out that the key development orientation of the future coalbed methane injection and pressure drop test well would be the injection and pressure drop test well applied to the casing perforation well, the optimized technology of the equipment technology, the indoor test simulation study and the numerical test well technology aspects. At present, from the test well design, information selection, model selection, mathematical algorithm and other aspects, the reduction of the multiplicity would be the problem to be solved immediately.

Key words: coalbed methane well; injection/pressure drop test well; equipment and technique; explanation of test well

0 引言

煤层气注入/压降测试方法是一种单井压力瞬变测试方法,其是以一定排量和低于煤层破裂压力的注入压力将水或者 2% 的 KCl 水溶液注入地层一段时间,然后关井进行压力恢复测试,使压力与原始储层压力逐渐平衡的试井方法,测试过程中用压力计记录注入和关井阶段的井底压力随时间的变

化^[1-2]。国外首次利用注入/压降试井方法是 1989 年 Taurus 勘探公司在 Black Warrior 盆地为获得煤层气储层渗透率而进行的^[3]。1992 年,联合国发展计划署在中国资助了一个有关注入/压降测试的培训课程,国内从此开始使用该项技术^[4]。2009 年起草制定了国家标准 GB/T 24504—2009《煤层气井注入/压降试井方法》^[5]。二十多年来,国内大部分煤层气井均使用注入/压降试井方法获得渗透率、表皮

收稿日期:2018-04-17;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.09.035

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2017JM4003);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05061-005-002)

作者简介:方世跃(1975—),男,安徽太湖人,副教授,博士。E-mail:fangshiyue@xust.edu.cn

引用格式:方世跃,许哲,何建琴,等.煤层气井注入/压降试井研究进展[J].煤炭科学技术,2018,46(9):227-232.

FANG Shiyue, XU Zhe, HE Jianqin, et al. Study progress of injection/pressure drop test well for coalbed methane well[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 227-232.

系数、原始地层压力等煤储层参数。国内外对注入/压降理论和测试方法的研究已有一定的进展^[2],但由于施工设计不合理、现场操作不规范、模型选择不正确等问题,使得测试分析结果偏离真实值,以至于很多人都认为注入/压降测试的数据不可靠,无法指导后期工作^[6]。鉴于此,笔者分析评述国内外近年来注入/压降试井在测试设备工艺与试井解释方面的研究现状和发展概况,重点分析测试设备与工具、测试工艺、试井解释理论与方法、试井解释参数选取与结果检验 4 个方面存在的主要问题^[7],简要探讨煤层气注入/压降试井的主要发展趋势,以期对煤层气井注入/压降现场测试设计、施工及试井解释提供有效借鉴。

1 测试设备与工艺

1.1 注入设备与工具

注入/压降试井设备包括地面设备系统和井下设备系统两大部分。地面设备系统由泵注系统、绞车系统和井口系统组成;井下设备系统包括井下管柱系统、井下关井系统和井下测试设备(图 1)^[2]。

井下管柱系统中最重要的是封隔器,其是分隔测试层的关键工具。现场使用最多的是膨胀式封隔器 K341-113,但易出现胶皮破碎、中心管损坏、不锈钢骨架钢带脱落入井等问题,中国石化华东分公司非常规指挥部 2012 年将封隔器的导压孔改为导压槽,并将数量提高为 6 个,有效解决其泄压困难问题^[8]。孔庆虎等建议选用凡尔式结构 K341 型封隔器^[9]。

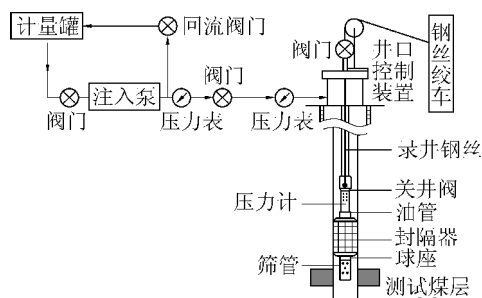


图 1 注入/压降试井设备组成示意^[8]

Fig.1 Schematic diagram of equipment during the injection/falloff testing^[8]

为快速准确量测煤储层渗透率,应尽可能进行裸眼注入/压降试井,如因坐封失败,可进行套管测试^[8]。由于煤层气井井壁常形成一层薄泥皮,摩擦力小,当注入压力大于临界压力后,封隔器和管柱就像活塞一样被顶起来向上移动,无法坐封,因此套管测试比例逐年提高^[8]。

裸眼井中最好不要采用双封隔器跨隔测试^[10],

而采用单封隔器,钻开一层,测试一层^[9],不过,双封隔器跨隔测试可大幅度降低井筒储集系数,提高测试准确性^[11]。关井方式是影响试井测试效果的一个关键因素,有地面关井和井下关井 2 种方式^[10]。对于低压储层,地面关井的井筒储集效应较大,加大了试井解释的难度^[10]。由于我国煤层储层压力普遍偏低^[12],大部分测试都采用井下关井方式。井下关井系统主要由绳帽、加重杆、震击器、万向节、平衡阀、关井阀等工具组成。

高精度电子压力计是煤层气井注入/压降测试的关键设备,目前最常用的为 PANEX 型和 DDI 型电子压力计^[13]。煤层气井注入/压降试井对压力计的的压力和温度量程范围要求不高,但对压力计的精度和分辨率要求较高^[10]。具体来说,精度不低于 0.025%FS,分辨率不低于 0.000 1 MPa,以保证能监测到井底压力的变化^[5]。针对前期施工工艺中开井与关井状态中压力计位置并不是直接量测煤层压力温度的问题,岑明锋指出应将压力计置于上、下封隔器中间的筛管处,筛管对准煤层^[14](图 2),可避免关井压力瞬间升高,短时间内出现峰值。每次施工至少使用 2 只压力计,以防其中一只出现故障,或出现压力异常时进行对比^[15]。需要注意的是,温度过低或温差过大、碰撞或震动均可造成压力计数据漂移,文献[3,14]还建议使用地面直读设备,以便随时监测和分析数据,避免过早停止测试导致测试失败^[13]。

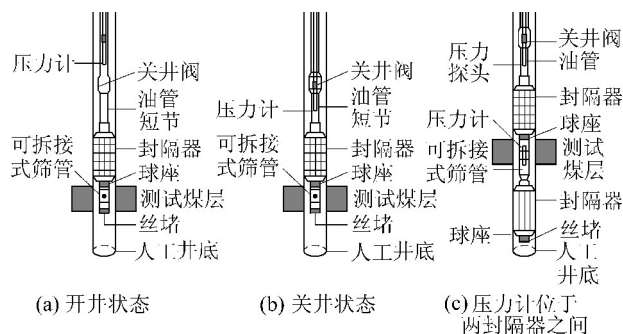


图 2 压力计位置示意^[14]

Fig.2 Schematic diagram of gauge location^[14]

为防止局部压力过大造成垮塌,使测试液更均匀地注入煤储层,要尽可能使筛管长度大约等于煤储层厚度^[14]。

1.2 测试工艺

保持注入流体流量稳定是准确获取储层参数的基本前提^[14],但稳定性受注入设备的稳定性和操作人员的控制经验影响较大,因此可以增加地面控制监测系统来保证注入流量稳定^[14]。由于注入流体

中的固体颗粒易堵塞割理孔隙空间,导致煤层孔隙的连通性降低,因此对注入水的水质应加以控制,注入水中不应含有固体颗粒及易导致沉淀的铁离子、酸根离子等^[16],应优先选择被测试层中的地层水,如果没有则采用附近机井所抽采的深层水或 2% 的 KCl 水溶液^[17]。对于不含水和富含游离气的煤层,应选择注入氮气进行测试。HOPKINS 等^[18]指出,在低渗透储层中,为保证不压裂煤储层,注入流量必须非常低,如果储层被压裂,压降数据分析时会遇到很多困难,因为注入水有很大一部分用来造缝,无法估计进入孔隙/割理的水量。如果没有力学数据和岩心数据,将无法用历史拟合的方法来分析注入/压降数据。HOPKINS 还建议,在进行注入/压降试井之前,进行微型压裂或者进行台阶状流量试井用来测量闭合压力和吸水率。自然裂缝储层在测试前一定要沟通裂缝系统和井筒,否则近井筒压力降会扭曲测试数据,从而导致不正确的分析。

标准测试程序规定关井时间不低于注入时间的 2 倍^[5],也有专家建议最好要大于 4 倍注入时间,但对于低渗透的煤层来说,关井时间不能太长,以减少井壁坍塌风险。注入时间可按 GB/T 24504—2009《煤层气井注入/压降试井方法》进行计算。

2 试井解释

2.1 试井解释理论与方法

煤层气注入/压降试井解释基于压力恢复,并假设煤层是无限大、均质、各向同性,煤层中的流体是微可压缩、不随压力而变的单相液体的^[19]。测试过程压力变化如图 3 所示。

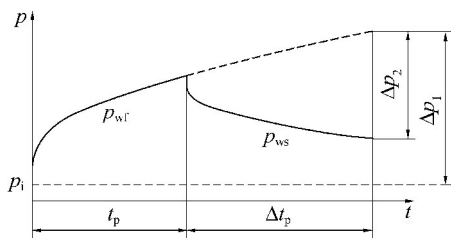


图 3 注入/压降测试压力变化

Fig.3 Changing pressure in injection/falloff testing

压降阶段关井井底压力可写成

$$p_{ws} = p_i + 2.12 \times 10^{-3} q B \mu \lg[(t_p + \Delta t_p) / \Delta t_p] / kh \quad (1)$$

式中: p_i 为原始储层压力,MPa; q 为注入流量, m^3/s ; B 为体积系数; μ 为流体黏度, $mPa \cdot s$; p_{wf} 为注入阶段井底压力,MPa; Δp_1 为注入阶段总的压力变化,MPa; Δp_2

为压降阶段总压降,MPa; t_p 为生产时间, s ; Δt_p 为关井时间, s ; k 为渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为储层有效厚度,m。

在现场实际操作时,注入/压降试井解释往往是选择专业的试井解释软件,对压降数据按照诊断曲线(双对数)分析法和霍纳(半对数)分析法进行拟合分析,并对结果进行检验后获得煤储层参数^[5]。根据双对数图显示的特征,一般将压降中后期的水平直线段作为径向流段^[19],但该水平段选择具有很大的随意性;另外在很多实测资料中,双对数和半对数曲线并未出现明显的径向流段,而部分分析人员却将类似于直线的过渡段或尾部效应段作为“径向流”分析,从而使解释结果与真实值大相径庭^[6]。

SEIDLE^[20]指出注入/压降试井对于饱水的煤层适应性较好而当有自由气存在时,由于相对渗透率效应而变得很复杂。尽管 ZUBER^[3]认为大部分煤层在原始储层条件下是饱水的,实际上煤层割理中确实分布有游离气,但量小而难以形成连续相,以大小不等的气泡形式存在,这些气泡在外来流体注入时,开始移动,当移动到孔隙喉道处便产生贾敏效应,贾敏效应的产生必然要破坏水在割理中流动的达西定律^[21],而半对数和双对数分析是以达西定律作为基础导出的。注入/压降试井理论最关键的假设为储层在开始试井的时刻为平衡状态,然而,对于我国低压储层,此假设是不成立的,煤层实际是暴露在过平衡(超压)的状态中^[22]。注入也很难保证恒流量,一是由于注入设备很难保证一直稳定,操作人员的控制经验也不一致,二是由于煤层径向上不同距离内吸水能力不同,导流能力不同,注入水在波及、渗滤过程中,不可避免地存在不同程度的时堵时解现象^[21]。生产时间(包括取心、测井、测试的时间)也远大于测试时的注入时间(通常为 12 h),有些注入/压降试井还采用多个排量分段注入^[23]。同时煤层是应力敏感性储层,也就是说孔隙压力变化会引起煤层中有效地应力变化,从而显著改变割理裂缝的张开度、流体流动速度和压力在割理裂隙中的分布^[24],割理渗透率随有效地应力增加而降低^[23]。均质、各向同性的假设也与实际煤层有悖。因此,煤层气注入/压降试井直接使用压力恢复试井理论是欠妥的。因此,有学者建议在适当变换后使用,如李士才等依据物质平衡原理,通过时间转化将多排量试井等效为单排量试井,然后再用压力恢复试井来解释注入/压降试井数据^[23]。假设在 0 时刻以流量 q_1 开始注入,在 t_2 时刻以流量 q_2 ($q_2 > q_1$) 注

入,并令

$$t_x = t - t_2 + q_1 t_2 / q_2 \quad (2)$$

当 t 足够大时,井底压力可以表示为:

$$p(r_w, t) = p_i - q\mu B \ln[t_x / (t_x - t_{x0})] / 4\pi k h \quad (3)$$

式中: r_w 为井半径; t_x 为转换时间,s; t_{x0} 为 $t=0$ 时的转换时间。

还有学者尝试建立新的试井模型和方法,如刘立军等^[21]建立考虑贾敏效应的关井压力降落阶段的霍纳分析模型;安杰等^[22]用变产量叠加函数法对低压煤储层井试井资料进行分析,取得了很好效果^[22];张公社^[23]根据煤层应力敏感的特点,应用 Duhamel 原理,导出了分析压降数据的解释方法;欧阳伟平等^[24]建立了考虑解吸作用的煤层气无限导流垂直裂缝井试井模型和考虑煤层气解吸作用的煤层气稳定解吸均质试井模型^[25]。周芊芊指出煤层虽然有双重结构,却不具备双重的渗流条件,提出用三孔双渗试井解释模型和解释方法来进行注入/压降试井解释^[26]。不过,大部分学者还是立足于压力恢复基本理论,采用多方法联合和相互验证的方法,如 ZHOU 等利用无限大定压缩率、径向各向同性模型解释注入/压降试井数据获得煤层渗透率,并与测井阿尔奇公式计算的渗透率对比的方法获得了较为准确的沁水盆地南部 3 口井的渗透率^[27];注入/压降试井与历史拟合相结合的方法已在沁水盆地、鄂尔多斯盆地、晋城矿区的成庄、寺河井田等地成功应用^[28],关键是历史拟合可以同时利用注入和压降的数据^[29]。

2.2 试井解释参数选取与结果检验

有少数煤储层基础数据在试井分析中难以精确确定,但其选值对试井解释结果有影响^[10,30],试井解释时需慎重选择。

1) 煤层有效厚度:分析时一定仔细查验封隔器坐封位置,测试结果应该为封隔器密封段内岩层与测试煤层的综合效应^[14],有效厚度应该包含其他具有一定渗透性的岩层,解释时如果简单地使用煤层厚度,将会使计算渗透率值出现偏差^[10,30]。对于复杂结构煤层,实际解释中煤层有效厚度应为扣除夹矸后的有效厚度,当夹矸厚度不均且分布不稳定时,简单扣除夹矸会带来较大误差。

2) 水黏度:尽管测试流体(一般是清水)黏度的变化范围比较小^[10,30],按照国内外计算经验和现场经验,其值在 0.96~0.99 mPa·s,据此计算得到的渗透率相差也不会超过 10%^[30],但对于低、超低渗透率的煤储层,由于渗透率值的低量级,任何微小扰动

均可能引起较大误差。

3) 孔隙度:由于煤层节理裂隙较发育,岩心一般都很破碎,测定煤储层岩心孔隙度难度很大,因此常使用电测井资料,然而测井孔隙度往往偏高,因其包括基质孔隙度^[30]。在注入/压降试井解释过程中,实际需要的是割理、裂隙孔隙度^[10],根据煤层埋深、有效应力、煤阶的变化等情况在 0.01~0.05 中选值较为合理。如果利用双对数和半对数联合分析的方法进行试井解释,孔隙度对渗透率及储层压力的计算无影响,但对表皮系数、调查半径、边界距离的影响较大^[30]。

4) 综合压缩系数:煤层气注入/压降试井中综合压缩系数 C_t 是水的压缩系数 C_w 和煤的压缩系数 C_f 之和^[30]。一般来说,煤的压缩系数 C_f 大于水的压缩系数 1~2 个数量级,但 C_f 是一个非常难确定的参数^[10],因此在试井分析过程中很难对 C_t 准确选值,但在 $1.00 \times 10^{-4} \sim 9.90 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ 选值较为合理。尽管综合压缩系数对渗透率值的计算结果无影响,而对表皮系数、影响半径、断层距离及裂缝半长的计算结果影响很大^[30]。

煤层气注入/压降试井解释在做好选模、参数选取等工作外,压力数据合格性检验以及试井解释结果检验也尤为重要。用井储系数和奇异点分析来判断检验封隔器和关井工具的密封性,从而分析压力数据合格与否^[6,19]。利用末点压力大于外推压力值的关系判断试井解释结果是否正确^[6]。GB/T 24504—2009《煤层气井注入/压降试井方法》规定结果检验包括一致性检验和可靠性检验 2 个部分^[5]。一致性检验是将双对数分析结果和半对数分析结果进行对比,规定两者差值不能超过 10%,但煤储层渗透率数量级比较小,一致性检验经常通不过。对比压力历史拟合曲线和实测曲线,曲线重合则通过可靠性检验,实际操作时也存在困难,尤其是注入阶段很难保证流量恒定^[31],曲线重合几乎不可能,不过关井阶段压力变化平稳,排量稳定(为零),可靠性检验还是有可能通过的,这也是常采用压降阶段的压力数据进行试井解释的主要原因^[30]。

3 注入/压降试井法发展趋势

注入/压降试井是目前获得煤储层参数使用最多的一种试井方法,尤其是煤层气勘探阶段裸眼井中使用最多,而对套管内测试的现场试验和研究较少。然而套管射孔后测试对于测试时间没有具体限

制,应尽可能地延长注入和关井时间,从而争取在分析曲线上出现“径向流”特征,从而使注入/压降测试结果可以更接近煤储层本身的特点^[30]。因此注入/压降试井在套管射孔井中应用将越来越多。

注入阶段很难保证流量恒定,研究性价比高的地面监测控制系统以尽量使注入流量稳定,结合测试煤层和煤层气井的具体工况做好测试管柱优化或者发展多级流量注入/压降测试方法也是重要研究方向。但由于现场试井方法研究成本较大,现场影响因素较多,控制参数稳定性差,开展室内模拟试验可以避免上述缺点,且地层参数、输入流量等参数可控性强,适合试井方法的进一步研究,更有利于验证解释模型的合理性和精度^[32]。

由于实际煤储层与注入/压降试井解释理论所依托的储层模型具有巨大差距,解释理论与方法有明显缺陷,试井获得的储层参数也仅是储层平均情况的反应,现场应用受到一定的限制^[33],因此充分考虑煤层特点,建立更多的适合于煤层气试井资料分析的试井模型及资料分析方法是未来重要的发展方向^[8]。模型需要考虑多因素,以尽可能反映注入/压降过程中注入流体在实际煤储层中的流动情况,很显然其无法用解析方法来描述,因此各种数值模拟方法(四维试井模型)将是注入/压降试井的重点发展方向^[33]。煤层气注入/压降试井解释多解性严重制约着试井成果的准确性和可靠性,从而降低了实用价值^[34]。从试井设计、资料录取、模型选择、数学算法等多方面减少多解性的可能性是现阶段注入/压降试井最急需解决的问题。

4 结 语

近年来,煤层气注入/压降试井现场应用十分广泛,尽管无论是设备工艺还是试井解释还存在诸多不足,但也取得了一系列进展。从测试设备和工艺上来说,注入流体与地层流体的配伍,注入流量恒定的地面监测控制系统,井下管柱中所使用的封隔器的数量、结构、坐封位置,关井方式,电子压力计使用数量、精度、下入位置,筛管的位置等都取得了进展,但仍然有进一步改进的空间。从试井解释来说,试井所依托的模型与煤储层相差较远,解释理论与方法有明显缺陷,也有一些改进模型投入使用,但减少解释多解性仍然是急需解决的重要问题。

注入/压降试井在套管射孔井中应用将越来越多,建立更多的适合于煤层气试井资料分析的试井

模型及资料分析方法,开展室内试验模拟和数值模拟,发展更加适合煤储层的改进型注入/压降试井方法是煤层气注入/压降试井发展的主要方向。

参考文献(References):

- [1] 赵培华,刘曰武,鹿倩,等.煤层气测试方法的分析评价[J].油气井测试,2010,19(6):12-18.
ZHAO Peihua, LIU Yuewu, LU Qian, *et al.* Evaluation of CBM Well Test Methods[J]. Well Testing, 2010, 19(6): 12-18.
- [2] 刘曰武,方惠军,徐建平,等.煤层注入/压降测试的设备及工艺问题[J].油气井测试,2010,19(6):19-22,36.
LIU Yuewu, FANG Huijun, XU Jianping, *et al.* Study on equipment and process in injection falloff test in coalbed[J]. Well Testing, 2010, 19(6): 19-22, 36.
- [3] ZUBER M D, SPARKS D P, LEE W J. Design and interpretation of injection/falloff tests for coalbed methane wells[J]. SPE, 1990, 425-434.
- [4] TIAN Lin, CAO Yunxing, CHAI Xuezhou, *et al.* Best practices for the determination of low-pressure permeability coalbed methane reservoirs, Yuwu Coal Mine, Luan Mining Area, China[J]. Fuel, 2015, 160: 100-107.
- [5] GB/T 24504—2009,煤层气井注入/压降试井方法[S].
- [6] 安杰,柳光伟.煤层气储层注入/压降试井可靠性判识方法探讨[J].中国煤炭地质,2013,25(2):24-26,70.
AN Jie, LIU Guangwei. Probe into CBM reservoir injection/pressure drop test reliability identification method[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(2): 24-26, 70.
- [7] 秦勇.中国煤层气成藏作用研究进展与述评[J].高校地质学报,2012,18(3):405-418.
QIN Yong. Advances and reviews on coalbed methane reservoir formation in China[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 405-418.
- [8] 杨怀成,钱卫明,房国平,等.煤层气井注入/压降测试工艺技术与进展[J].油气藏评价与开发,2012,2(2):70-75.
YANG Huaicheng, QIAN Weiming, FANG Guoping, *et al.* Technology of CBM wells injection/falloff test and its progress[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(2): 70-75.
- [9] 孔庆虎,孔令瑶.K341型封隔器在煤层气裸眼井注入/压降测试中的应用[J].中国煤层气,2014,11(2):30-32.
KONG Qinghu, KONG Lingyao. Application of Type K341 Packer in the injection/falloff test for CBM open hole wells[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(2): 30-32.
- [10] 陈志胜,廉有轩.煤层气井注入/压降试井测试中有关技术问题探讨[J].煤田地质与勘探,2003,31(4):23-25.
CHEN Zhisheng, LIAN Youxuan. Discussion on technological problems in the injection/falloff test for CBM well[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(4): 23-25.
- [11] 房国平,杨松.煤层气测试工艺技术优化及应用[J].油气藏评价与开发,2013,3(5):75-79.
FANG Guoping, YANG Song. Optimization and application of CBM testing technology[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(5): 75-79.

- [12] 方世跃.煤层气井建井工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2015.
- [13] 高利民.MRO在煤层气试井中的应用及常见问题的探讨[J].邯郸职业技术学院学报,2009,22(2):54-56.
GAO Limin. The application and problems of MRO in coalbed methane well[J]. Journal of Handan Polytechnic College, 2009, 22(2):54-56.
- [14] 岑明峰.贵州煤层气注入/压降试井工艺优化[J].中国煤炭地质,2016,28(3):60-64,69.
CEN Mingfeng. Guizhou CBM injection/falloff test well process optimization[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(3):60-64, 69.
- [15] 任平.煤层气井注入/压降试井工艺方法及存在的问题[J].价值工程,2010(2):215-216.
REN Ping. Coal bed gas well pouring drawing-down techniques and problems[J]. Value Engineering, 2010(2):215-216.
- [16] 刘远志,高晓飞,张东平,等.煤层气井注入/压降测试技术及应用[J].油气井测试,2014,23(6):30-35.
LIU Yuanzhi, GAO Xiaofei, ZHANG Dongping, *et al.* Injection/pressure drop testing technology to coalbed methane (CBM) well and its application[J]. Well Testing, 2014, 23(6):30-35.
- [17] 张裕虎,曲鹏程.注入/压降试井方法在煤层气井中的应用分析[J].油气井测试,2015,24(1):20-22.
ZHANG Yuhu, QU Pengcheng. Applied analysis of injection/falloff well test in the coal bed methane well[J]. Well Testing, 2015, 24(1):20-22.
- [18] HOPKINS C W, FRANTZ J H, FLUMERFELT R W. Pitfalls of injection/falloff testing in coalbed methane reservoirs [J]. SPE39772, 1998, 9-24.
- [19] 柳光伟,安杰.煤层气注入/压降试井分析中几个问题的探讨[J].中国煤层气,2011,8(1):29-32.
LIU Guangwei, AN Jie. Discussion on problems of CBM well injection/falloff test analysis [J]. China Coalbed Methane, 2011, 8(1):29-32.
- [20] SEIDLE J P. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering [M]. USA: Penn Well Corporation, 2011:186-215.
- [21] 刘立军,王立中,张增惠,等.煤层气井注入压降试井技术研究[J].天然气工业,2004,24(5):79-81.
LIU Lijun, WANG Lizhong, ZHANG Zenghui, *et al.* Study on Pressure-drop well test with injection of coalbed gas well [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5):79-81.
- [22] 安杰,杨振东,柳光伟,等.低压煤储层注入/压降试井存在的问题及方法研究[J].油气井测试,2014,23(2):15-17.
AN Jie, YANG Zhendong, LIU Guangwei, *et al.* Problem in injection/falloff well test to low pressure coal reservoir and Its Method [J]. Well Testing, 2014, 23(2):15-17.
- [23] 张公社,林涛,吴亚红,等.考虑渗透率随压力变化的新煤层井压力衰减试井解释方法[J].天然气工业,2000,20(2):71-73.
ZHANG Gongshe, LIN Tao, WU Yahong, *et al.* An interpretation method of pressure attenuation well-test in new coal-bed well in consideration of the changing permeability with pressure [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(2):71-73.
- [24] 欧阳伟平,刘曰武.煤层气无限导流垂直裂缝井数值试井模型[J].油气井测试,2010,19(6):53-56.
OUYANG Weiping, LIU Yuewu. Numerical well test model for CBM infinite conductivity vertical fracture well [J]. Well Testing, 2010, 19(6):53-56.
- [25] 欧阳伟平,刘曰武.考虑煤层气稳定解吸的数值试井方法[J].油气井测试,2010,19(6):49-52,70.
OUYANG Weiping, LIU Yuewu. Numerical well testing method for well by considering CBM desorption [J]. Well Testing, 2010, 19(6):49-52, 70.
- [26] 周芊芊,郑世毅,薛莉莉,等.煤层气三孔双渗试井分析方法技术研究[J].油气井测试,2015,24(2):8-12.
ZHOU Qianqian, ZHENG Shiyi, XUE Lili, *et al.* Technical study on CBM three-hole double permeability well test analysis [J]. Well Testing, 2015, 24(2):8-12.
- [27] ZHOU Fengde, YAO Guangqin. Sensitivity analysis in permeability estimation using logging and injection-falloff test data for an anthracite coalbed methane reservoir in Southeast Qinshui Basin [J]. International of Journal Coal Geology, 2014, 131:41-51.
- [28] 何金菊.注入/压降试井与历史拟合在煤层气勘探开发中的应用[J].山西煤炭,2012,32(1):61-64.
HE Jinju. Application of injection/falloff test and history matching in coal bed methane exploration: in Jincheng Mine Area Case [J]. Shanxi Coal, 2012, 32(1):61-64.
- [29] 安杰.煤储层注入/压降试井中注入段曲线的分析及应用[J].中国煤炭地质,2014,26(11):31-34.
AN Jie. Analysis and application of injection interval curves in coal reservoir injection/depressurization test well [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(11):31-34.
- [30] 杨新辉.煤层气井注入/压降试井解释中参数的选取[J].陕西煤炭,2011(2):4-6.
YANG Xinhui. The selection of parameters in the interpretation of coalbed methane well injection/fall well test [J]. Shaanxi Coal, 2011(2):4-6.
- [31] 李士才,邵先杰,乔雨朋,等.韩城矿区煤层气井试井分析[J].延安大学学报:自然科学版,2015,34(2):31-35.
LI Shicai, SHAO Xianjie, QIAO Yupeng, *et al.* Analysis of CBM well test in Hancheng [J]. Journal of Yanan University: Natural Science Edition, 2015, 34(2):31-35.
- [32] 张均锋,付应乾,牛斌,等.煤层气试井注入压降法模拟实验[J].科技导报,2012,30(17):29-33.
ZHANG Junfeng, FU Yingqian, NIU Bin, *et al.* Simulated experiments on the method of injection/falloff well testing for coal bed methane [J]. Science and Technology Review, 2012, 30(17):29-33.
- [33] YAO Jun, WU Minglu. Streamline numerical well test interpretation-theory and method [M]. USA: Elsevier Inc, 2011:1-16.
- [34] 张文昌,罗沛,郝宁,等.试井资料多解性来源的探讨[J].断块油气田,2003,10(4):86-88.
ZHANG Wenchang, LUO Pei, HAO Ning, *et al.* Discussion on more explain character of well test results [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(4):86-88.