

压回法阶段压井数学模型与模拟分析

孙晓峰¹, 闫铁¹, 王克林¹, 吴延泽², 张杨³

1. 东北石油大学石油工程学院, 大庆 163318
2. 中国石化国际石油工程有限公司, 北京 100018
3. 塔里木油田油气工程研究院, 库尔勒 843300

摘要 根据压回法压井过程中气体压缩规律和气液两相流特性, 提出了压回法压井过程可分为3个阶段, 并建立了考虑气体滑脱的阶段压井数学模型, 用于压回法作业井底压力和套压变化规律的定量计算。压井参数敏感性模拟分析表明, 压井排量越大, 压井持续时间越短, 产生的井底压力和套压越大; 地层渗透率和渗透性地层厚度对压井第一阶段的井底压力和套压影响不大, 但当高渗透或高厚度地层进入压井第二、第三阶段, 随渗透率或地层厚度增加, 压井产生的井底压力和套压减小, 且降幅减缓。通过分析压井过程中井底压力和套压变化规律, 绘制了压回法典型压井曲线模型。预测结果与实测数据对比表明: 该数学模型具有较高的预测精度, 能够为溢流压井方法的选择和压回法施工设计提供理论依据与指导。

关键词 压回法; 非常规压井; 井喷; 气液两相流

中图分类号 TE28

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.07.007

Staged Well Killing Mathematical Model and Simulation for Bullheading

SUN Xiaofeng¹, YAN Tie¹, WANG Kelin¹, WU Yanze², ZHANG Yang³

1. College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
2. Sinopec International Petroleum Service Corporation, Beijing 100018, China
3. Research Institute of Oil and Gas Engineering, Tarim Oilfield Company, Korla 843300, China

Abstract A bullheading process could be divided into three stages based on the gas compressibility law and the gas-liquid two-phase flow law, and a mathematical model for each stage with consideration of the gas slippage is developed to quantitatively calculate the bottom pressure and the casing pressure under different well killing conditions. The simulations of the bullheading parameters show that, the kill time decreases and the bottom pressure and the casing pressure increase with the increase of the pump displacement; both the formation permeability and the permeable formation height have a little influence on the pressure in the first stage, but when the high permeable formation or the high height formation enters into the second and third stages, both the bottom pressure and the casing pressure decrease with the increase of the formation permeability or the formation height, and the change range becomes small. In addition, typical bullheading curves are obtained by analyzing the characteristics of the bottom pressure and the casing. The predicted model had a good agreement with the field test. This can provide a theoretical basis and guidance for the selection of killing methods and the design of bullheading.

Keywords bullheading; unconventional well killing; blowout; gas-liquid two-phase flow

压回法是一种非常规压井技术, 适用于高压高渗透性地层气井溢流或井喷压井, 通常是在常规方法循环压井不可行

或者是常规循环方法压井导致了更严重的井控问题时考虑使用^[1]。该方法是在气侵或井喷发生后, 通过压井管汇或直

收稿日期: 2013-06-03; 修回日期: 2013-12-16

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05009-005)

作者简介: 孙晓峰, 讲师, 研究方向为井控理论、油气井流体力学等, 电子信箱: sunyey@126.com; 王克林(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为井控理论、井眼清洁等, 电子信箱: wwangkelin@163.com

引用格式: 孙晓峰, 闫铁, 王克林, 等. 压回法阶段压井数学模型与模拟分析[J]. 科技导报, 2014, 32(7): 51-55.

接向井眼内泵入加重钻井液或原钻井液将气体和已受污染的钻井液顶回到渗透性地层,重新平衡地层压力。目前国内针对压回法压井技术的理论研究相对较少,Vallejo-Arrieta等^[2,3]讨论了压回法作业过程中气液两相流动的各相分布特性,并建立了数学模型,但模型没有考虑气体滑脱的影响。Oudemans等^[4,5]的研究虽然考虑气体滑脱,但并未就压井过程建立完整的气液两相流动模型。由于缺少精确的压回法定量计算数学模型,很大程度上制约了该方法的应用和推广。本文拟根据压回法施工过程的气体压缩规律和两相流特性,建立符合井眼内气液两相相向流动的数学模型,定量讨论不同地层渗透率、渗透性地层厚度、压井排量等因素对压回法施工过程中的井底压力、套压影响规律,并绘制压回法的典型压井曲线。同时对模型预测结果与实测数据进行对比,验证该数学模型的预测精度,为溢流压井方法的选择和压回法施工设计提供理论依据与指导。

1 压回法压井物理模型

当溢流、井喷发生后,通过压井管汇向井筒泵入压井液,压井液将与井筒气体相向碰撞,假设气液界面处存在一个胶塞或由于钻井液具有极大的黏性使气体无法向上滑脱,阻止了压井液与气体混合,使得在压井过程中井筒只存在液、气单相区。随着压井液的持续泵入,气相区不断被压缩,当胶塞到达井底,压井结束,如图1(a)所示,这是目前普遍采用的压回法理想的物理模型。该理想物理模型计算简单,应用方便,被很多学者使用^[2,3],但由于该模型没有考虑压井过程中存在气体向上滑脱等现象,使得该模型的计算结果与实际产生较大偏差。

压回法压井实际的物理过程因密度差导致气体沿井筒向上滑脱,在井筒某一井段内形成气液两相混相区,混相区上界面运动速度低于液相区,下界面速度高于液相区,混相区在压回过程中逐渐被拉长,但气液两相混相区和气相区整体仍向下运动,形成了液相区、混相区和气相区共存的现象,如图1(b)所示。根据压回过程的特点结合井筒内气体压缩规律,压回过程可以分为3个阶段。

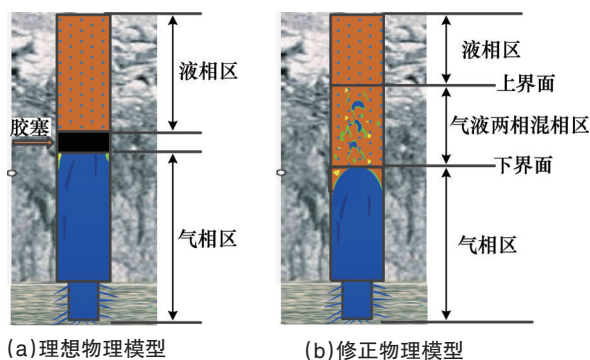


图1 压回法物理模型

Fig. 1 Bullheading physical model

第一阶段:井筒内气体仅受压缩作用,压力不断增加,体积减小,但井筒内的气体质量保持不变。当井底压力达到地层压力时,气体开始向地层泄漏。

第二阶段:随着气体向地层渗流,钻井液不断泵入使井底压力始终保持略大于地层压力,井筒内的气相区质量不断减少至完全被压回,两相区下界面到达井底。

第三阶段:随着压井液继续泵入,气液两相同时向地层渗流,当气液两相区上界面到达井底时,压井结束。

2 压回法压井数学模型建立

对于本文所建立的修正物理模型,为了数学建模的方便,特做如下假设:

- 1) 液体不可压缩,在整个系统里有相同的物理性质;
- 2) 地温梯度为常数或地温梯度函数已知;
- 3) 裸眼井段地层均质且为径向流动;
- 4) 气液混相区气液均匀混合。

2.1 第一和第二阶段数学模型

当地层侵入流体为气体时,须考虑其压缩性,气体压缩方程为

$$C_g = -\frac{dV}{V_g dp} \quad (1)$$

随着压井液的泵入,气体受到压缩,对方程(1)积分并带入文献[6]中关于 C_g 的表达式,整理得

$$p_{wf} = p_{wi} + \frac{q(t) - q}{ZV_{gi}} (Zp_c + \rho_{pr} p_c \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho_{pr}}\right)_{T_{pr}}) t \quad (2)$$

$$\rho_{pr} = 0.27 p_{wi} / (Z p_c T_{pr}) \quad (3)$$

式中, p_{wf} 为井底压力,MPa; p_{wi} 为初始井底压力,MPa; V_{gi} 为初始井筒或环空气体体积, m^3 ; C_g 为气体等温压缩系数, MPa^{-1} ; $q(t)$ 为压井排量, m^3/s ; q 为气体泄漏速度, m^3/s ; p_c 为气体临界压力,MPa; T_{pr} 为气体拟对比温度,量纲一; t 为压井持续时间, s ; Z 为压缩因子,采用Dranchuk等^[7]的方程计算。

在压井过程中,套压可以由井底压力求得:

$$p_a = p_{wf} - \rho_m L_m g - \rho_l L_l g - \rho_g L_g g + \Delta p \quad (4)$$

式中, ρ_m 、 ρ_l 、 ρ_g 分别为混相区、液相区、气相区密度, g/cm^3 ; L_m 、 L_l 、 L_g 分别为混相区、液相区、气相区的长度, m ; Δp 为摩擦压降,可以表示为

$$\Delta p = \frac{2f_l L_l \rho_l v_l^2}{d_h} \quad \text{或} \quad \Delta p = \frac{2f_m L_m \rho_m v_m^2}{d_h} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_l = \frac{32}{Re_l}, & f_m = \frac{32}{Re_m} \text{ (层流)} \\ \frac{1}{\sqrt{f_m}} = -2.01 \times \lg \left(\frac{\varepsilon}{3.7065 d_h} + \frac{2.5226}{Re_m \sqrt{f_m}} \right) \\ f_l = 0.0295 \left(\frac{\mu_l}{\rho_l d_h v_l} \right)^{0.2} \text{ (紊流)} \end{cases} \quad (6)$$

式中, f_m 、 f_l 为气液两相流、液相流摩擦阻,量纲一; e 为井壁粗糙度, m ; d_h 为水力直径, m ; Re_m 、 Re_l 分别为混相和液相雷诺数; μ_l 为压井液黏度, $Pa \cdot s$; v_m 为混相区速度, m/s ; v_l 为压井液井筒或

环空流速,下面用来代表压井排量,可表示为

$$v_1 = q(t)/A \quad (7)$$

式中, A 为井筒或环空截面积, m^2 。

由于气体被挤压回地层的泄漏速度是时间的函数,故符合不稳定产能方程^[8]

$$p_r - p_{wf} = \frac{Z_i T \mu_{gi} q}{18160 k h p_r B_g} \left[\ln \left(\frac{kt}{250 \gamma \varphi \mu_{gi} C_i r_w^2} \right) + 2S_a \right] \quad (8)$$

式中, p_r 为地层压力, MPa; Z_i 为初始压缩因子; k 为地层渗透率, μm^2 ; T 为地层温度, K; φ 为孔隙度, %; C_i 为总压缩系数, MPa^{-1} ; r_w 为井筒半径, m; μ_{gi} 为初始气体黏度, $mPa \cdot s$; γ 、 B_g 分别为气体比重和体积系数, S_a 为气井的视表皮因子, 与气体的流量有关; h 为渗透性地层厚度, m。气体黏度采用 Carr 等^[2]的关系式。

由于气体是从井筒向地层渗流,故方程(8)可改写为

$$q = \frac{18160 k h p_r B_g}{Z_i T \mu_{gi} \left[\ln \left(\frac{kt}{250 \gamma \varphi \mu_{gi} C_i r_w^2} \right) + 2S_a \right]} (p_{wf} - p_r) \quad (9)$$

式中,

$$\gamma = M/28.97 \quad (10)$$

$$B_g = 3.4582 \times 10^{-4} ZT/p_{wf} \quad (11)$$

式中, M 为井筒侵入气体摩尔质量, g/mol 。

本文应用气液两相流动漂移模型计算气体速度^[9-12]

$$v_g = C_0 v_m - v_\infty \quad (12)$$

$$\alpha_g(t) = \frac{v_{sg}}{C_0 v_m - v_\infty} \quad (13)$$

式中, v_g 为气体速度, m/s ; $\alpha_g(t)$ 为空泡率, %; C_0 为流动系数; v_∞ 为气体在静止液体中上升速度, m/s ; 可以通过哈马赛公式计算,表达式为

$$v_\infty = 1.53 [g\sigma(\rho_1 - \rho_g)/\rho_1^2]^{1/4} \quad (14)$$

式中, σ 为界面张力, N/m 。Hasan 通过分析实验数据^[13-16], 推荐 $C_0=1.2$, $v_\infty=0.24$ m/s 。

根据漂移模型,混相区上界面的速度可以表示为

$$v_{ml} = C_0 v_1 - v_\infty \quad (15)$$

利用混相区上界面速度,下界面的速度可表示为

$$v_{mg} = \frac{dL_g}{dt} = v_{ml} + \frac{v_1 - v_{ml}}{1 - \alpha_g(t)} \quad (16)$$

方程(16)积分可得气相区长度

$$L_g = H - \left(v_{ml} + \frac{v_1 - v_{ml}}{1 - \alpha_g(t)} \right) t \quad (17)$$

式中, H 为井深, m 。

混相区密度和气体密度的计算式为

$$\rho_m = (1 - \alpha_g(t))\rho_1 + \alpha_g(t)\rho_g \quad (18)$$

$$\rho_g = \frac{Mp_{wf}}{ZRT} \quad (19)$$

2.2 第三阶段数学模型

在该阶段,气液两相同时向地层渗流,为了避免压井过

程中产生的井底压力过大而压裂地层,该阶段使气液两相处于稳定渗流状态,故套压可表示为

$$p_a = p_{wf} - \rho_l g L_1 - \rho_m g L_m + \Delta p \quad (20)$$

3 预测模型验证

某井钻进至 4587 m 起钻过程中发生气侵,抢接顶驱后关井,共溢流约 30 m^3 ,关井套压为 17 MPa。根据钻具组合和井眼尺寸,溢流量换算成气柱高度约为 1207 m。施工井队根据该井作业地区特点决定应用压回法压井,压井排量 16~20 L/s,压井施工约 50 min,气体重新被压回产层后,等待加重开井循环,压井成功。该井其他参数:地温梯度, $3C^\circ/100$ m; 孔隙度 10%; 空泡率 20%; 钻井液密度, 1.25 g/cm^3 ; 钻杆外径, 127 mm; 井筒直径, 215.9 mm。利用上述模型对该井溢流后参数进行模拟计算,模型预测套压值与实测数据对比曲线如图 2 所示。

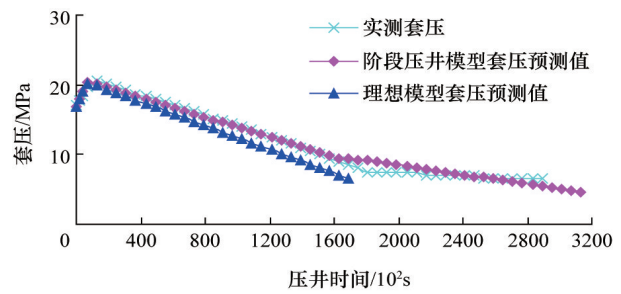


图 2 模型预测套压和实测套压对比曲线

Fig. 2 Comparison of predicted casing pressure and measured pressure

不考虑气体滑脱的理想模型,压井过程中只存在第一和第二阶段,与实测套压不符。而考虑气体滑脱下的阶段压井模型与实测套压值相比精度更高,阶段压井模型较好地表达了压回法压井过程的套压阶段变化特性。

4 压回法参数敏感性模拟分析

以实测井数据为基础,通过改变地层渗透率、地层厚度、环空流速(压井排量)等参数,定量分析其对井底压力和套压的影响规律。

地层渗透率对井底压力和套压的影响规律如图 3 所示,在整个压井过程中,渗透率为 1.2、0.12 μm^2 的高渗透地层所产生的井底压力和套压变化不大,其高渗透性使得流体流动阻力减小,容易向地层渗流。与高渗透性地层压井产生的井底压力和套压相比,渗透率为 0.012 μm^2 的中低渗透地层除在压井第一阶段井底压力和套压没有显著变化外,在压井第二、第三阶段中低渗透地层的井底压力和套压要远高于高渗透地层,压漏地层风险较高。因此,地层渗透性是是否选择压回法压井的重要参考依据。

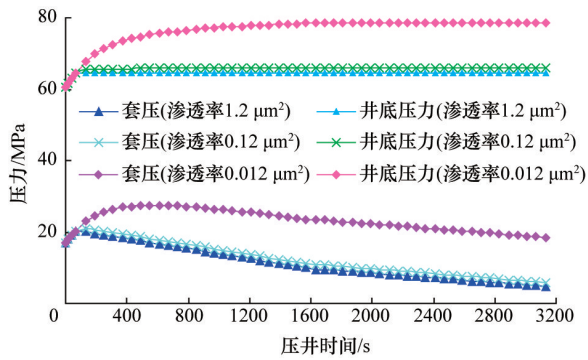


图3 地层渗透率对井底压力和套压影响规律曲线
Fig. 3 Effects of permeability on bottom pressure and casing pressure

渗透性地层厚度对井底压力和套压的影响规律如图4所示,在压井的第一阶段,渗透性地层厚度对井底压力和套压影响不大。随着高厚度地层进入压井第二、第三阶段,地层厚度由20 m升至40 m时,压井所产生的井底压力和套压急剧减小。继续增加地层厚度至60 m,井底压力和套压降幅明显减小,这表明渗透性地层提供的渗流通道已趋于满足该时刻井底压力作用下的流体渗流。因此,采用压回法压井时,渗透性地层也需达到一定厚度。

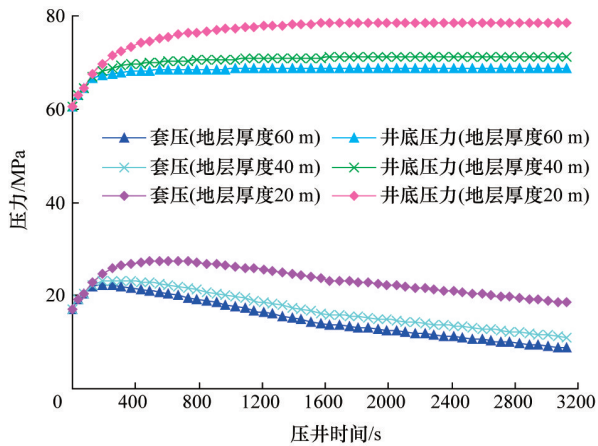


图4 渗透性地层厚度对井底压力和套压影响规律曲线
Fig. 4 Effects of permeable formation height on bottom pressure and casing pressure

环空流速(压井排量)对井底压力和套压的影响规律如图5所示,压井作业时间随流速增加而缩短,压井液流速为0.84 m/s时,压井时间明显低于0.72、0.6 m/s。对比3组不同压井排量,流速为0.84 m/s时所产生的井底压力和套压明显高于0.72、0.6 m/s。其原因是流速越大,环空摩阻越大,同时在相同时间内,注入环空的压井液液柱越高。虽然高泵速能够显著减少压井时间,但高泵速存在压漏地层的风险。因此,应用压回法进行压井作业时,实现高速压井的同时而不压漏地层,关键是准确地预测不同压井排量下的井底压力和套压,由预测值和地层破裂压力梯度选择合理的泵速。

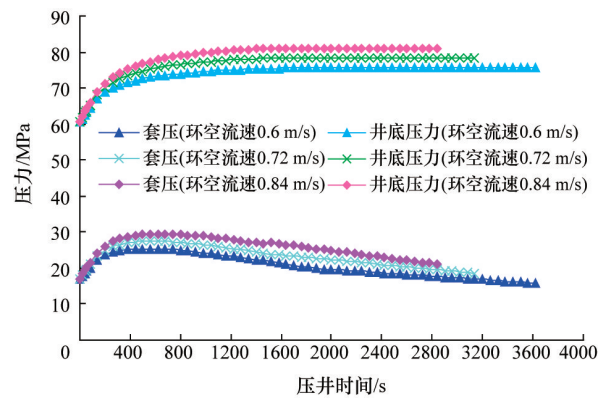


图5 环空流速对井底压力和套压影响规律曲线
Fig. 5 Effects of annular velocity on bottom pressure and casing pressure

5 压回法典型压井

由模拟结果可以绘制压回法典型压井曲线(图6)。在压井过程中, t_0-t_1 时刻的压井第一阶段,随着压井液的泵入,井底压力和套压会急剧增加,气体压缩至略大于地层压力。 t_1-t_2 时刻的压井第二阶段,气体开始向地层泄漏,此时井底压力会缓慢增加,而套压会急剧减小。 t_2-t_3 时刻的压井第三阶段,井底压力保持稳定,套压则继续减小,如应用加重压井液套压值应为零,且保持不变。

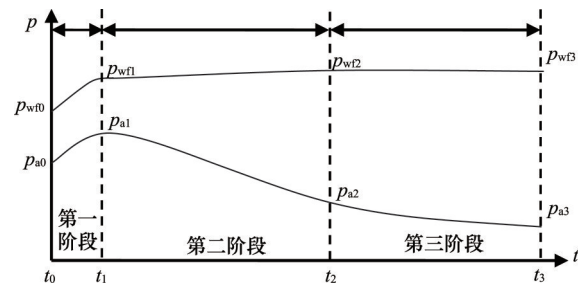


图6 压回法典型压井曲线
Fig. 6 Typical bullheading curves

6 结论

1) 根据气体压缩特性和气液两相流动规律,提出了压回法压井3阶段划分理论,建立的考虑气体滑脱的阶段压井模型,计算结果与实测数据基本吻合,能够定量指导压回法压井施工,压回法典型压井曲线可以为现场压井施工套压和井底压力变化提供走势参考。

2) 地层渗透率和渗透性地层厚度对压井第一阶段的井底压力和套压影响不大。但当高渗透或高厚度地层进入压井第二、第三阶段,随渗透率或地层厚度增加,压井产生的井底压力和套压随之减小,且增幅减缓。因此,地层渗透率和渗透性地层厚度是能否应用压回法的重要参考因素。

3) 在压回法压井过程中,环空流速越大,压井持续时间越短,压井3阶段所产生的井底压力和套压越大。通过模型准确预测压力变化来选择合理压井排量,避免压漏地层是压井成功的关键。

参考文献(References)

- [1] 罗伯特 D 格雷。井喷与井控手册[M]。北京:石油工业出版社,2006。
Robert D G. Blowout and well control manual[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [2] Vallejo-Arrieta V G. Analytical model to control off bottom blowouts utilizing the concept of simultaneous dynamic seal and bullheading[D]. Louisiana: University of Louisiana, 2002.
- [3] Oudeman P. Kill procedures to avoid formation damage in the high rate gas wells of an underground storage project[C]. SPE European Formation Damage Conference, Hague, Netherlands, May 31- June 1, 1999.
- [4] Oudeman P, Koninklijke D, Grodal E O, et al. Bull heading to kill live gas wells[C]. European Petroleum Conference, London, October 25-27, 1994.
- [5] 黄伟, 郝俊芳. 压井动态过程的理论分析及模拟计算[J]. 石油学报, 1994, 15(2): 147-153.
Huang Wei, Hao Junfang. Theoretical analysis and simulated calculation of dynamic well control[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15 (2): 147-153.
- [6] 谭羽飞, 杨德彬. 天然气等温压缩系数的计算[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(3): 65-67.
Tan Yufei, Yang Debin. Calculation of gas isothermal compressibility factor[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(3): 65-67.
- [7] Craft B C, Hawkins M F. Applied petroleum reservoir engineering[M]. 2nd. New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [8] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京:石油工业出版社,2005。
Li Chuanliang. Fundamentals of reservoir engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [9] Zuber N, Findlay J. Average volumetric concentration in two-phase flow systems[J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87: 453-468.
- [10] Govier G W, Aziz K. The flow of complex mixtures in pipes[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1972.
- [11] Hasan A R, Kabir C S. Predicting multiphase flow behavior in a deviated well[J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(4): 474-482.
- [12] Hasan A R. Inclined two-phase flow: Flow pattern, void fraction and pressure drop in bubbly, slug and chum flow, particulate phenomena and multiphase transport[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [13] Hasan A R. Void fraction in bubbly and slug flow in downward vertical and inclined systems[J]. SPE Production & Facilities, 1995, 10 (3): 172-176.
- [14] Beggs H D. An experimental study of two-phase flow in inclined pipes [D]. Tulsa: University of Tulsa, 1972.
- [15] Mukherjee H. An experimental study of inclined two-phase flow[D]. Tulsa: University of Tulsa, 1979.
- [16] Kokal S. Study of two-phase flow in inclined pipes[D]. Calgary: University of Calgary, 1987.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



张国成荣获2013年度国际甘地奖

2014年2月15日,印度总统普拉纳布·慕克吉在新德里向中国麻风防治协会会长张国成、印度孟买医生 Vijaykumar Vinayak Dongre 颁发了2013年度国际甘地奖,表彰他们在麻风病治疗、培训和科研等方面做出的杰出贡献。

张国成从事麻风病防治工作40多年,在麻风病残疾预防、麻风病防治人才培养、麻风病防治政策倡导等诸多领域做出了突出贡献,是中国麻风病防治的领军人物。他在麻风病整复外科领域有较高的造诣,在麻风病兔眼、睑外翻、垂足、爪形指、麻风病溃疡等矫正手术上有丰富的经验。40多年来,他带领的中国麻风防治协会国家级医疗队走遍了500多所麻风村,为麻风畸残者开展康复手术35800余例,赢得了广大患者的好评。

“国际甘地奖”于1986年由纪念甘地麻风基金会设立,专门奖励全世界在麻风领域做出卓越贡献的个人和机构,该奖每2年评选1次,每次评选1到2人,至今已有20多人获奖。张国成是继马海德1987年获得该奖之后第2个获此殊荣的中国专家。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15431899.html>。