文章编号: 1673-5005 (2009) 05-0080-04

基于平衡流速的水平井砾石充填 α波砂床平衡高度预测与试验

董长银, 武 龙, 王爱萍, 李明忠, 周生田, 张 琪

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:基于 Gruesbeck, Oroskar和 Penberthy 3种固液两相管流平衡砂床上部平衡流速经验公式,考虑复杂的井底管柱结构和筛管偏置等情况,提出水平井砾石充填 α波砂床平衡高度预测方法;利用自行研制的水平井砾石充填全尺寸试验模拟装置进行筛管偏置度、流量、砂体积分数对 α波砂床平衡高度影响的试验。结果表明:基于 Penberthy与 Oroskar平衡流速经验公式的砂床平衡高度计算结果与试验值偏差较大,基于 Gruesbeck经验公式的预测模型的计算结果与试验结果比较吻合,进行必要的修正后可用于水平井砾石充填 α波砂床平衡高度预测;筛管偏置趋向于增大砂床高度,在实际施工过程中,应尽量避免筛管偏置下垂情况的发生;试验中砂体积分数为 2%～8%,属于较低值范围,试验条件下砂床平衡高度随砂体积分数的增大而增大。

关键词:水平井; 砾石充填; α波充填; 平衡流速; 砂床平衡高度; 计算模型; 试验模拟

中图分类号: TE 257. 3; TE 355. 6 **文献标识码**: A

Prediction and experiment for α wave equilibrium sand bed height in horizontal well gravel-packing based on equilibrium velocity

DONG Chang-yin, WU Long, WANG Ai-ping, LI Ming-zhong, ZHOU Sheng-tian, ZHANG Qi

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Considering the complicated downhole string structure and screen bending in horizotal well gravel-packing, an integrated α wave sand bed height model and its calculation method were evolved based on Gruesbeck, Oroskar and Penberthy empirical formulas for equilibrium velocity above the sendiment bed in solid-liquid flow in pipeline. A self-designed experimental system for inside-casing gravel-packing simulation was used to analyze the effects of screen bending degree, flow rate and sand percentage by volume on α wave sand bed height and verify the mathematical model. The results indicate that the α wave sand bed height models based on Penberthy and Oroskar equilibrium velocity formulas are not feasible to calculate the α wave sand bed height of horizontal well gravel-packing because of their high error to experimental results. The model based on Gruesbeck formulas is relatively accordant to the experimental data and more reasonable to predict α wave sand bed height by necessary rectification. Screen bending helps to increase the sand bed height, which is negative to complete packing job. The sand percentage by volume is lower of 2% - 8% in this experiment, and the α wave sand bed height increases with the sand percentage by volume increasing.

Key words: horizontal well; gravel-packing; α wave packing; equilibrium velocity; equilibrium sand bed height; calculation model; experimental simulation

水平井砾石充填过程分为 α波和 β波两个阶段,其中 α波充填过程中砂床平衡高度的控制是顺利达到完全充填的关键[1-4]。准确预测 α波砂床平衡高度是水平井砾石充填过程数值模拟及施工参数优化设计的核心和难题之一[5-6]。Gruesbeck等[7]、Oroskar等[8]和 Penberthy等[9]先后基于水平井砾石充填及普通固液管流试验提出了计算沉积砂床顶部空间中平衡流速的经验公式,3种方法的计算结果

收稿日期: 2009 - 07 - 31

基金项目:国家"863"计划项目 (2006AA09Z351)和国家自然科学基金项目 (50704035)

作者简介:董长银 (1976 -),男 (汉族),河南卫辉人,副教授,博士,从事采油工程、多相流及油气井防砂技术研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及准确性相互间存在较大的差异。为了获得准确可靠的砂床平衡高度预测计算方法,提高水平井砾石充填过程数值模拟及施工参数优化的准确性与可靠性,笔者考虑水平井砾石充填过程中复杂的井底管柱结构以及筛管偏置等特殊情况,建立基于上述 3种平衡流速经验公式的砂床平衡高度计算方法,并根据水平井砾石充填机理与过程建立考虑筛管偏置的全尺寸试验模拟装置,模拟水平井管内砾石循环充填过程,进行筛管偏置度、流量、砂体积分数对 α波砂床平衡高度影响的试验,利用试验结果对 3种计算模型的计算结果进行对比分析,为充填过程的计算机数值模拟及施工参数优化设计提供依据。

1 平衡流速经验模型

平衡流速即 α波沉积砂床达到平衡状态时的砂床顶部砂浆的平均流速。平衡流速的经验模型主要有 3种。

(1) Gruesbeck经验公式。 Gruesbeck等[7]通过水平井砾石充填试验得到的平衡流速经验公式为

$$v_c = 15 v_t \left(\frac{D_H v_t \rho_l}{\mu_l}\right)^{0.39} \left(\frac{d_g v_t \rho_l}{\mu_l}\right)^{-0.73} \left(\frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_l}\right)^{0.17} C_g^{0.14}. \tag{1}$$

式中, v_t为颗粒沉降末速, m / s; μ_l为携砂液黏度, Pa·s; D_H为沉积砂床上部流动空间水力直径, m; C_g为沉积砂床上部空间的砂体积分数; v_c为平衡状态下砂床上部空间的平衡流速, m / s; d_g为颗粒直径, m; ρ_l和 ρ_g分别为携砂液与砾石材料密度, kg/m^3。

(2) Oroskar经验模型。 Oroskar等[8]通过化学物料的固液两相水平管流试验提出的平衡流速计算公式为

$$v_c = 1.85 C_g^{0.1536} (1 - C_g)^{0.3564} \left(\frac{D_H}{d_g}\right)^{0.378} \times \left(\frac{\rho_l D_H v^*}{\mu_l}\right)^{0.09} x^{0.3} v^*. \tag{2}$$

其中

$$v^* = \sqrt{g d_g \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} - 1\right)}.$$

式中, x为经验常数,计算时可取 0.96; g为重力加速度。

(3) Penberthy经验公式。 Penberthy等[9]通过水平井砾石充填试验提出的砂床顶部环空平衡流速经验公式为

$$v_c = \max(v_1, v_2), \tag{3}$$

其中

$$v_1 = 0.3084 \left[0.082328 g d_g \left(\frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_l}\right) \times \left(0.3048 \frac{D_H \rho_m}{\mu_l}\right)^{0.775}\right]^{0.816},$$

$$v_2 = 0.41634 \left[\frac{2 g D_H (\rho_g - \rho_l)}{\rho_l}\right]^{0.5}.$$

式中, ρ_m为砂液混合物密度, kg/m^3。

2 α波砂床高度预测方法

上述 3种计算模型表达了平衡流速 v_c与流动条件参数之间的经验关系,没有考虑实际作业时筛管偏置的情况。笔者考虑水平井砾石充填过程中复杂的井底管柱结构以及筛管偏置等特殊情况,建立基于 3种经验公式的水平井砾石充填 α波砂床高度预测方法。

对于给定的水平井砾石充填井底管柱结构而言,平衡流速与平衡砂床高度是一一对应的。计算出平衡流速,根据各流动空间的几何尺寸,即可计算得到对应的平衡砂床高度。现有平衡流速经验公式用于砂床高度预测之前,还需要解决存在冲筛环空之间窜流情况下的井筒 -筛管环空中计算点的分流量、砂体积分数、流速、水力几何参数的计算问题,这些参数都与砂床高度 H_b相关,而 H_b又是求解目标。

如图 1所示,给定井底管柱结构及筛管偏置度 δ,水平井砾石充填入口固液混合物流量为 Q_{mi},砂体积分数为 C_{gi},由于滤失造成计算点总流量降低为 Q_m。

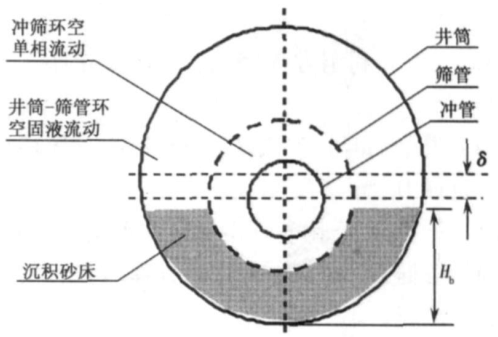

图 1 筛管偏置条件下水平井砾石充填井筒剖面

Fig. 1 Profile of horizontal well gravel-packing with screen bending

由于井筒 -筛管环空与冲筛环空两个流动系统通过筛管缝隙连通,忽略筛管缝隙的流动阻力,则井筒 -筛管环空砂床上部的固液流动及冲筛环空携砂液单相流动的压力梯度在平衡条件下相等[1, 7, 10],即

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$f_{sw}\frac{\rho_l v_{sw}^2}{2D_{sw}} = f_{cs}\frac{\rho_m v_{cs}^2}{2D_{cs}}. \tag{4}$$

式中, f_{cs}和 f_{sw}分别为井筒 - 筛管环空和冲筛环空流动的综合摩阻系数; v_{cs}和 v_{sw}分别为井筒 - 筛管环空和冲筛环空流动的平均流速, m/s; D_{cs}和 D_{sw}分别为井筒 - 筛管环空和冲筛环空流动的当量直径, m。

令 $R_f = f_{sw}/f_{cs}$, 结合流通面积, 得到井筒 - 筛管环空与冲筛环空流动的流量比为

$$R_Q = \frac{Q_{cs}}{Q_{sw}} = \frac{A_{cs}v_{cs}}{A_{sw}v_{sw}} = \frac{A_{cs}}{A_{sw}}\sqrt{R_f\frac{\rho_l}{\rho_m}\frac{D_{cs}}{D_{sw}}}. \tag{5}$$

根据计算点总流量 Q_m, 可计算出各子系统中的分流量为

$$Q_{sw} = \frac{Q_m}{1+R_Q},\quad Q_{cs} = \frac{R_Q}{1+R_Q}Q_m. \tag{6}$$

根据固相质量平衡方程可得到计算点井筒 - 筛管环空的砂床顶部固液流动砂体积分数 C_{gcs}与混合砂浆密度为

$$\begin{cases} C_{gcs} = \dfrac{Q_{mi}C_{gi}}{Q_{cs}}, \\ \rho_m = \rho_g C_{gcs} + \rho_l(1 - C_{gcs}). \end{cases} \tag{7}$$

实际计算时, 砂床高度 H_b是要求解的目标, 采用试算法求解, 初设 $H_b = 0$及计算步长 ΔH_b, 具体的方法和步骤如下:

(1)根据几何关系 (图 1)和 H_b计算出 D_{cs}, D_{sw}, A_{cs}, A_{sw}等几何参数。

(2)给定经验的比例系数 R_f, 估算砂体积分数 C_{gcs}和砂液混合物密度 ρ_m, 利用方程 (5), (6)计算出 Q_{cs}和 Q_{sw}。

(3)利用方程 (7)重新计算砂体积分数 C_{gcs}和砂浆密度 ρ_m, 并利用方程 (5), (6)重新计算得到准确的 Q_{cs}和 Q_{sw}。

(4) 根据几何关系和 H_b计算井筒 - 筛管环空流动水力直径 D_H。

(5) 计算井筒 - 筛管环空流量和平均流速 v_{cs}。

(6) 根据 D_H, ρ_m, C_{gcs}等选择方程 (1), (2), (3)计算平衡流速 v_c。

(7) 比较 v_c和 v_{cs}: 如果 $v_c < v_{cs}$, 则说明 $H_b = 0$, 计算结束; 如果 $|(v_c > v_{cs})/v_{cs}| < \varepsilon$, 则结束, 此时的 H_b即为砂床平衡高度; 如果 $|(v_c > v_{cs})/v_{cs}| > \varepsilon$, 返回 (1)重新计算。

对于 3种平衡流速经验公式, 计算砂床平衡高度的步骤是相同的, 只需要在步骤 (6)中选择合适的平衡流速计算模型。经计算对比, 采用 3种平衡流速经验公式计算得到的砂床平衡高度结果及准确性各有差异, 须通过试验手段加以对比验证。

3 试 验

3.1 试验装置与试验方法

全尺寸水平井砾石充填试验模拟系统主要由主体模拟井筒、泵后加砂装置、泵、储液罐、起升系统、控制面板及数据采集系统、流量计及压力传感器、管路与控制阀等组成 (图 2)。

为使模拟结果更接近于实际情况, 模拟井筒及筛管、中心管等的尺寸均与油田现场实际使用的尺寸相等或接近。主体井筒模拟装置采用透明耐压材料制成, 内径 140 mm, 长度 5.5 m, 模拟实际的 139.7 mm 套管; 模拟井筒内安装绕丝筛管, 外径 95.2 mm, 内径 74 mm, 内置外径 45 mm 的冲管, 可模拟不同偏置度。主体井筒倾角 0°～30°内可调。试验系统采用泵后加砂设计, 加砂体积分数调节范围 0～15%。在管路及主体井筒上安装流量计及压力传感器, 将试验数据采集到计算机系统。

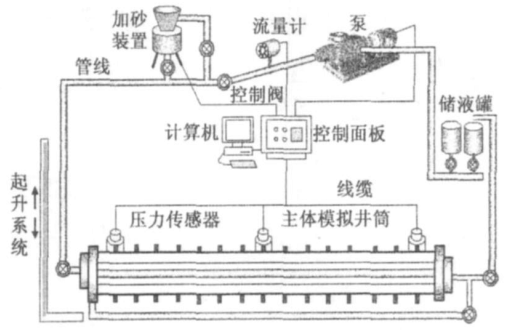

图 2 试验模拟系统

Fig. 2 Experimental simulation system

试验使用清水和普通石英砂 (砾石), 粒径 0.4～0.8 mm, 相对密度 2.632。试验方法与步骤如下:

(1)砂液蓄满, 数据采集系统调零, 按要求设置好加砂速度, 启动数据采集系统。

(2)不加砂开泵循环, 根据流量计指示调整流量控制阀直至达到试验流量。

(3)打开加砂主控阀, 启动加砂开关, 按照设定的加砂速度开始加砂。

(4)观察记录井筒内充填情况, 形成稳定的 α 砂床时, 手动测量砂床平衡高度 (需多次多点测量)。

(5)待 β 波充填即将结束时, 关闭加砂阀与加砂开关, 直到管路内无砂进入井筒后停泵。

(6)更换至冲砂流程, 冲出井筒内填砂, 整理试验物品, 一次试验结束。

3.2 试验结果分析

为了验证 3种砂床高度计算模型的准确性, 使

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用上述试验装置进行模拟试验。试验条件如下:滤失关闭,井筒水平,携砂液使用清水,砂体积分数为 2%～8%,筛管偏置度分别为 0和 20 mm,流量为 150～600 L/min。

设定砂体积分数为 5%,进行多次充填模拟试验,测量 α波砂床平衡高度,并与 3种计算模型的计算结果进行对比,如图 3所示。

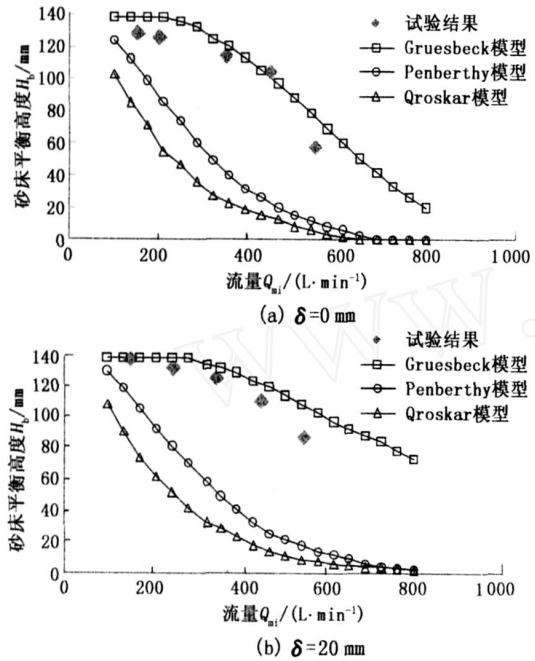

图 3 不同筛管偏置度下砂床高度计算与试验结果对比

Fig 3 Experimental and calculated results of α wave sand bed height with different screen bending

设定排量 400 L/min,筛管偏置度为 20 mm,进行充填模拟试验并用 3种模型计算,结果见图 4。

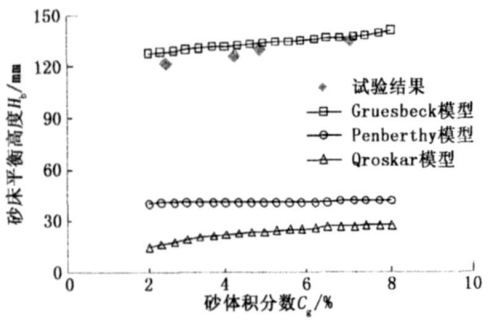

图 4 α波砂床平衡高度随加砂体积分数的变化

Fig 4 Varation of α wave equilibrium sand bed height with sand percentage by volume

由图 3,4可以看出:

(1) 无论试验结果还是模型计算结果,其他条件恒定时,砂床平衡高度随流量的增加而减小,随砂体积分数的增加而增大。Penberthy平衡流速经验公式中没有体现砂床顶部空间计算点砂体积分数的影响,计算结果中砂床平衡高度随入口砂体积分数增大几乎无变化,这与实际情况不符。

(2) Penberthy模型与 Oroskar模型的砂床平衡高度计算结果与试验值偏差很大,平均误差为 80%左右;Penberthy的试验中套管直径 100 mm,筛管直径 50 mm,比本文中试验(管径与现场实际基本一致)采用的管径小,Oroskar模型源自于化学物料输送领域的固液管流试验数据的拟合,两者计算结果与本文中试验结果偏差较大,原因可能是其试验条件与水平井砾石充填中的管柱结构、砂液性质等相差较大。上述两种模型建议不应用于水平井砾石充填砂床平衡高度的预测。

(3) Gruesbeck模型的计算结果与试验结果相对较吻合,平均误差为 8.5%,计算结果略微偏大。该模型进行必要的修正后可用于水平井砾石充填砂床平衡高度的预测。

(4)筛管偏置对水平井砾石充填 α波砂床平衡高度有一定影响。筛管向下偏置造成砂床平衡高度比无筛管偏置情况下略有升高。在该试验条件下,筛管偏置 20 mm造成砂床平衡高度上升约 17%。筛管偏置尤其当筛管底部接触井筒底部井壁时,筛管偏置为砾石颗粒的流动造成了机械屏障,并为其沉积堵塞提供了条件,加剧了沉积砂床的形成。在实际施工中,应尽量避免筛管偏置下垂情况的发生。

需要注意的是,由于试验条件所限,本试验研究使用的砂体积分数属于较低值范围。

4 结论与建议

(1) Penberthy模型与 Oroskar模型的砂床平衡高度计算结果与试验值偏差很大,应用于水平井砾石充填砂床平衡高度的预测是不合适的。Gruesbeck模型的计算结果与试验结果相对较吻合,进行必要的修正后可用于水平井砾石充填砂床平衡高度的预测。

(2)筛管偏置下垂会造成砂床平衡高度比无筛管偏置情况下略有升高。在实际施工中,应尽量避免筛管偏置下垂情况的发生。

(3)本试验研究使用的砂体积分数属于较低值范围。砂体积分数为 2%～8%时,砂床平衡高度随砂体积分数增大而增大,但增加幅度较小。较高砂体积分数条件下的结果是否与低值条件下一致,还需要进一步深入研究。

(下转第 88页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

藏满足气驱条件。

(2)冀东油田深层中低渗透油藏不适合二氧化碳驱,可考虑进行氮气驱评价。烟道气和烃类气用于气驱提高采收率的气源是充足的。考虑到烟道气的收集和运输等问题,应优先选用烃类气驱。

(3)冀东油田深层中低渗透油藏烃类气驱可达到混相或近混相,而在氮气驱或烟道气驱过程中较难混相。

(4)在冀东油田深层中低渗透率油藏水气交替烃类气驱为优选技术,技术实施后具有明显的经济效益。

参考文献:

[1] MORITIS G. CO_2 injection gains momentum [J]. Oil & Gas Journal, 2006, 104(15): 37-41.

[2] ALGHARAIB M, GHARBI R, MALALLAH A, et al. Parametric investigations of a modified simultaneous water-alternating-gas injection technique [J]. Journal of Porous Media, 2007, 10(7): 633-656.

[3] MIRZAYI B, VAFAIE-SEFTI M, MOUSAVI-DEHGHANI S A, et al. The effects of asphaltene deposition on unconsolidated porous media properties during miscible natural gas flooding[J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(2): 231-243.

[4] 侯健. 提高原油采收率潜力预测方法 [M]. 东营:中国石油大学出版社, 2007.

[5] 李士伦,郭平,王仲林,等. 中低渗透油藏注气提高采收率理论及应用 [M]. 北京:石油工业出版社, 2007.

[6] TABER J J, MARTIN F D and SERIGHT R S. EOR screening criteria revisited—part 1: introduction to screening criteria and enhanced recovery field projects [R]. SPE 35385, 1996.

[7] TABER J J, MARTIN F D and SERIGHT R S. EOR screening criteria revisited—part 2: applications and impact of oil prices [R]. SPE 39234, 1996.

[8] SHOKIR, EISSA M El-M. CO_2-oil minimum miscibility pressure model for impure and pure CO_2 streams [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 58(1/2): 173-185.

[9] DEHGHANI S A, MOUSAVI SeftiM Vafaie, AMERIA, et al. Minimum miscibility pressure prediction based on a hybrid neural genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(2): 173-185.

(编辑 李志芬)

(上接第 83页)

参考文献:

[1] 李爱芬. 应用数值模拟研究影响水平井砾石充填的因素 [J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(2): 210-215.
LI Ai-fen. Influence factors of gravel packing in horizontal well with numerical simulation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(2): 210-215.

[2] 胥锐一, 魏斌, 韩德民. 水平井砾石充填防砂模拟研究 [J]. 油气地质与采收率, 1998, 5(2): 64-68.
XU Rui-yi, WEI Bin, HAN De-min. Simulation of gravel packing in horizontal well for sand control[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 1998, 5(2): 64-68.

[3] CHEN Zhongming. Horizontal well gravel packing: dynamic alpha wave dune height calculation and its impact on gravel placement job execution [R]. SPE 110665, 2007.

[4] CALDERON A, de MAGALHAES J V M. Designing multiple alpha waves for open hole gravel-pack operations [R]. SPE 107615, 2007.

[5] 董长银,张琪. 水平井砾石充填过程实时数值模拟研究 [J]. 石油学报, 2004, 25(6): 96-100.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi. Real-time numerical simulation of gravel-packing process in horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 96-100.

[6] 董长银,贾碧霞,张迎春,等. 大斜度井砾石充填机理 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(5): 72-76.
DONG Chang-yin, JIA Bi-xia, ZHANG Ying-chun, et al. Mechanism of gravel-packing in highly deviated wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(5): 72-76.

[7] GRUESBECK C, SALATHIEL W M, ECHOLS E E. Design of gravel packs in deviated wellbores[J]. Journal of Petroleum Technology, 1979, 31(1): 109-115.

[8] OROSKAR A L, TURIAN R M. The critical velocity in pipeline flow of slurries[J]. AICHE Journal, 1980, 26: 550-558.

[9] PENBERTHY W L. Gravel placement in horizontal wells [R]. SPE 31147, 1995.

[10] 董长银,张琪,张松亭. 水平井砾石充填过程中的变质量流动 [J]. 科学技术与工程, 2005, 5(2): 69-72.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi, ZHANG Song-ting. Variable mass flow during gravel-packing in horizontal wells[J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(2): 69-72.

(编辑 李志芬)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net