

低渗油藏垂直裂缝油井产能计算新模型

田冷¹, 常铁龙², 郑荣臣², 张杰²

1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249
2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 应用常规的油藏工程方法进行低渗透油藏动态预测普遍存在较大的误差。对此,在考虑启动压力梯度、应力敏感性及牛顿流体微压缩性的基础上,运用复变函数理论,建立了低渗油藏垂直裂缝井的产能模型,应用解析方法对模型进行求解。结合低渗透某井区的开发参数,对影响油井的产能因素进行参数敏感性分析,绘制了不同参数下油井的产能曲线。提出该模型可用于评价低渗油藏油井产能以及进行产能预测。分析认为低渗油藏渗透率低,压力传播速度较慢,宜采用小距离井网系统;在开采过程中地层压力下降较快时,应采用超前注水来保持地层压力。

关键词 低渗透油藏;非线性渗流;垂直裂缝井;产能模型

中图分类号 TE344

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.004

A New Production Calculation Model for Vertical Fractured Well in the Low Permeable Reservoir

TIAN Leng¹, CHANG Tielong², ZHENG Rongchen², ZHANG Jie²

1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Sinopec Petroleum Exploration & Development Research Institute, Beijing 100083, China

Abstract Currently, conventional reservoir engineering methods for dynamic analysis and low permeable reservoir performance forecast are often inaccurate, especially they are not suitable for oil well productivity forecast. Aiming at this problem, taking threshold pressure gradient, reservoir stress-sensitivity, micro-compressibility of Newton fluid, and pressure dependent viscosity into consideration, a nonlinear radial stable flow model for low permeable reservoir has been built by using the complex function theory; an analytical solution method is adopted for the solution. Combining with the concrete parameters collected from the certain well area in Changqing low permeable oilfield, all parameters' sensitivity on production performance in the productivity equation have been analyzed and the deliverability curves with different parameters have also been drawn. At last, the superiority, adaptability, and feasibility for evaluating productivity and forecasting oil productivity of the model are also discussed in comparison with a linear flow model. As a result, low permeable reservoir should be developed with a short pattern system due to its low permeability and low pressure transmitting speed. When formation pressure drops rapidly, advanced water injection should be adopted to remain formation pressure.

Keywords low permeable reservoir; nonlinear fluid flow; vertical fracture well; productivity model

0 引言

关于考虑启动压力梯度的低渗透油藏渗流机制及非线性渗流油井产能方程,国内外的研究工作一直在不断进行。邓英尔、刘慈群等^[1-3]提出低渗透油藏非线性渗流的连续模型,建立了低渗透非线性定常流和非定常流的模型,基于此导出了非线性定常渗流的压力及产量公式;Torsten等^[4]采用

波尔兹曼变换分别对渗透率的线性模型和指数模型进行求解。然而,目前研究方法有的较复杂,有的考虑因素较单一,而且低渗透油藏,除了具有存在启动压力梯度和应敏感性两个特点外,由于其储层渗透率较低,只有压裂才会使其具备出油能力。尤其当存在着裂缝时,低渗油藏产能预测的难度比其他类型的油藏更大。

收稿日期:2012-07-18;修回日期:2012-08-11

基金项目:中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-02-24);国家科技重大专项(2008ZX05009-004-03)

作者简介:田冷,讲师,研究方向为油气田开发工程,电子信箱:tianleng2008@126.com

本文考虑启动压力梯度、应力敏感性及牛顿流体微压缩性等因素,基于复变函数理论综合建立低渗油藏垂直裂缝井的产能模型,获得更加准确的垂直裂缝油井产能预测方程。

1 模型建立

如图 1 所示,水平、均质、等厚的圆形地层中,其外边缘处有充足的液源供给,中心钻有一口生产井,该井钻穿全部油层,有一条垂直裂缝对称分布于油井的两边,裂缝剖面为矩形,裂缝高度恒定并等于油层有效厚度,裂缝宽度相对油藏的供给半径来说非常小,裂缝内为无限导流能力,油藏及裂缝内为单相流动,存在启动压力及应力敏感,呈稳态渗流,且不考虑地层的垂向流动,不考虑地层和裂缝内的污染,忽略重力和毛管力的影响^[4]。

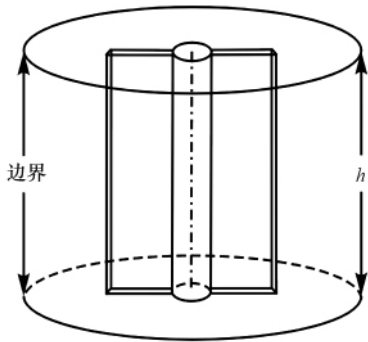


图 1 垂直裂缝井模型

Fig. 1 Vertical fractured well model

假设供给边缘半径为 R_e ,井半径为 R_w ,渗流半径为 r ,地层厚度为 h ,供给边缘上压力为 P_e ,井底压力为 P_w ,地层渗透率为 K ,地层初始渗透率为 K_0 ,流体黏度为 μ ,缝长为 L_f ,启动压力梯度为 G ,渗流速度为 v 。

考虑启动压力梯度及压力下降所引起的应力敏感性,建立的渗流力学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv) = 0 \\ P(r)|_{r=r_w} = P_w \\ P(r)|_{r=R_e} = P_e \\ v = \frac{K}{\mu} \left(\frac{dP}{dr} - G \right) \\ K(P) = K_0 e^{-\alpha_k (P_0 - P)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, α_k 为渗透率模数。

将式(1)中的介质变形状态方程代入含启动压力的达西渗流公式,即得到考虑启动压力梯度及应力敏感性的非达西渗流公式^[5]

$$v = \frac{K_0 e^{-\alpha_k (P_0 - P)}}{\mu} \left(\frac{dP}{dr} - G \right) \quad (2)$$

通过保角变换函数^[5] $z = L_f ch w$,原 z 平面上的垂直裂缝井

的渗流变为 w 平面上带状地层单向流动^[6]。若流体不可压缩,则 w 平面上带状地层单向渗流的产量公式

$$\frac{Q/2}{\pi h} = v = \frac{K_0 e^{-\alpha_k (P_0 - P)}}{\mu} \left(\frac{dP}{du} - G \right) \quad (3)$$

其中, Q 为产量; u 为 w 平面任意点所对应的横坐标。

引入新的变量

$$m = \frac{e^{-\alpha_k (P_0 - P)}}{\alpha_k} \quad (4)$$

将式(4)引入方程(3),得

$$\frac{dm}{du} - m \alpha_k G = -\frac{\mu Q}{2\pi K_0 h} \quad (5)$$

解一阶线性微分方程,可得

$$m = e^{-\alpha_k G(u-u_0)} \left(\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\mu Q}{2\pi K_0 h \alpha_k G} \right) - \frac{\mu Q}{2\pi K_0 h \alpha_k G} \quad (6)$$

将式(4)代入式(6),得

$$Q = \frac{2\pi K_0 h G}{\mu} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_k [(P_0 - P) - G(u-u_0)]}}{e^{\alpha_k G(u-u_0)} - 1} \quad (7)$$

当 u 取在边界上时,由于 u 较大,所以 $chu \approx shu \approx \frac{u_c}{2}$,且有 $x^2 + y^2 = R_c^2 e^{-8t}$,则可知

$$x^2 + y^2 \approx L_f^2 ch^2 u_c (\cos^2 v_c + \sin^2 v_c) = L_f^2 ch^2 u_c = L_f^2 \frac{e^{-2u_c}}{4}$$

因此, $u_c = \ln \frac{2R_c}{L_f}$ 。

当 u 取 u_w 时,与 z 平面的井底相对应,由假设条件可知裂缝宽度相对于供给半径可以忽略不计^[4],故变换后忽略不计,将边界条件代入式(7),得

$$Q = \frac{2\pi K_0 h G}{\mu} \frac{e^{-\alpha_k G \ln \frac{2R_c}{L_f}} - e^{-\alpha_k (P_e - P_w)}}{1 - e^{-\alpha_k G \ln \frac{2R_c}{L_f}}} \quad (8)$$

式(8)即为低渗油藏垂直裂缝井单相平面径向流的产能新计算公式。

2 产能敏感因素分析

结合低渗油藏的实际条件将式(8)中各参数进行赋值,参数的取值为: $h = 10\text{m}$; $K_0 = 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; $\mu = 1.2\text{mPa} \cdot \text{s}$; $G = 0.02\text{MPa/m}$; $R_c = 150\text{m}$; $P_e - P_w = 5\text{MPa}$; $L_f = 50\text{m}$; $\alpha_k = 0.02\text{MPa}^{-1}$ 。通过改变参数来分析渗透率、应力敏感、井距、启动压力梯度和裂缝长度对产能的影响。

2.1 渗透率对产能的影响

当生产压差不变时,渗透率的变化对产能的影响呈线性关系(图 2(a)),这与常规油藏的开采时产能的变化规律是一致的。但当渗透率恒定,生产压差变化时,生产压差与油井的产量呈非线性关系(图 2(b)),且渗透率越低,生产压差越大,两者之间的非线性关系越明显。这是因为压差的变化会引起储层岩石的渗透率发生变化,进而改变油井的产量。

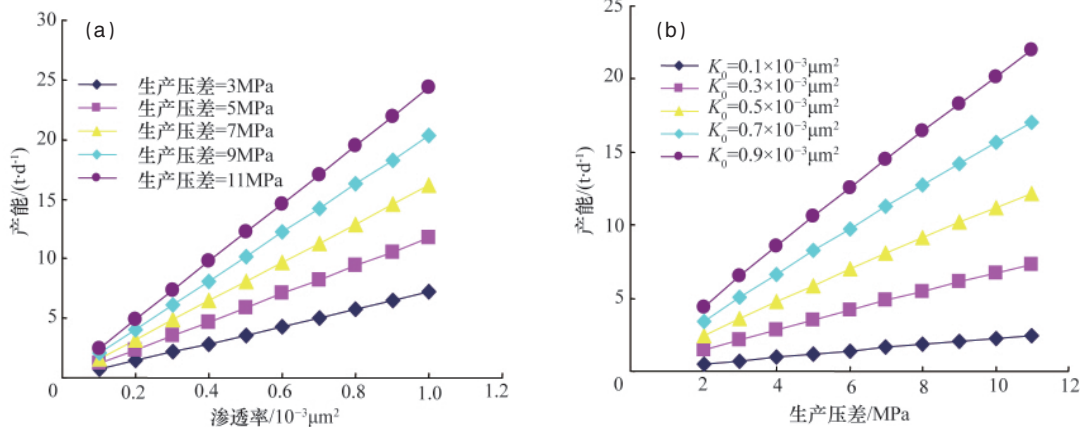


图2 渗透率对产能的影响曲线
Fig. 2 Impact of permeability on production

2.2 应力敏感性对产能的影响

如图3(a)所示,生产压差不变时,油井的产能随应力敏感系数的增加而降低,生产压差越高,产能下降的幅度越大。应力敏感系数越大,产量下降越明显,如图3(b)。这是因为随着地层压力的降低,岩石承受的上覆压力增加,岩石发生变形,进而导致渗透率下降,从而引起油井产量的下降。因此,

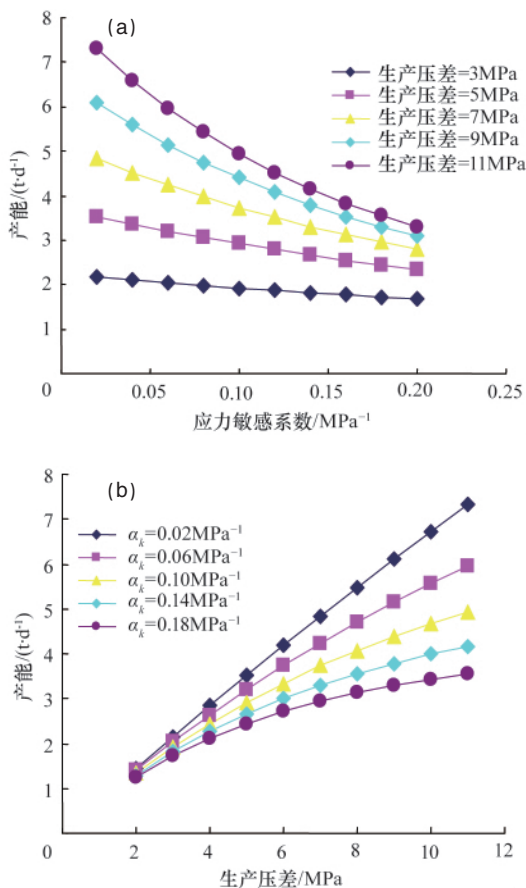


图3 应力敏感性对产能的影响曲线
Fig. 3 Impact of stress sensitivity on production

超低渗透油藏的开采,生产压差不宜过大,以免导致储层渗透率下降,造成储层伤害。此外,实际生产经验表明,低渗油藏在开采的过程中地层压力下降较快,应采用超前注水方法来保持地层压力。

2.3 井距对产能的影响

如图所示4(a)所示,生产压差恒定时,油井产能随着井

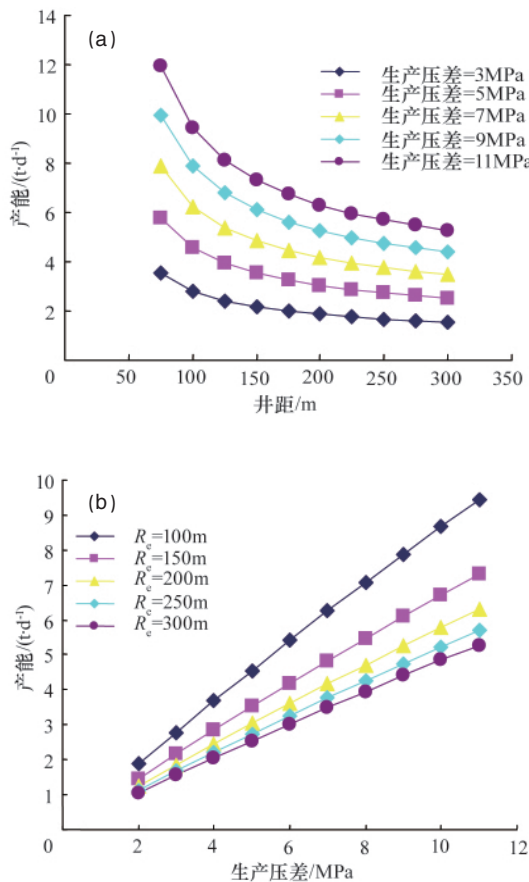


图4 井距对产能的影响曲线
Fig. 4 Impact of well spacing on production

距的增加而降低,且井距较小时,产量随井距的增加降低程度更明显,当井距增加到一定程度时,油井产量增加幅度较小。当井距一定时,油井产量随着生产压差的增加而增大,如图4(b)所示,且井距越小,油井增产的幅度越大。这是因为超低渗油藏渗透率低,压力传播速度较慢,单井控制面积较小。因此,低渗油藏的开采应采用小距离井网系统,从而建立有效的驱替系统。

2.4 启动压力梯度对产能的影响

如图5(a)所示,生产压差不变时,随着启动压力的增加,油井产量随之下降,但是下降幅度并不明显。这是因为裂缝

的存在改变了原油的渗流状态,其流动过程变为:岩石—裂缝—井筒,裂缝的存在增加了过流面积,原油在地下流动的阻力减小,从而减弱了启动压力的影响。当启动压力相同时,随着生产压差的增大,油井的产量增加,如图5(b),当生产压差较大时,曲线稍稍下弯,这是应力敏感所致。超低渗油藏经过压裂后,启动压力梯度对油井产量的影响已经减小。提高生产压差可以增加油井产量,但当储层存在着应力敏感性时,容易导致渗透率下降,因此,对于低渗油藏,生产压差应保持在一个合理的范围内,既可以增加油井产量,也不会造成应力敏感。

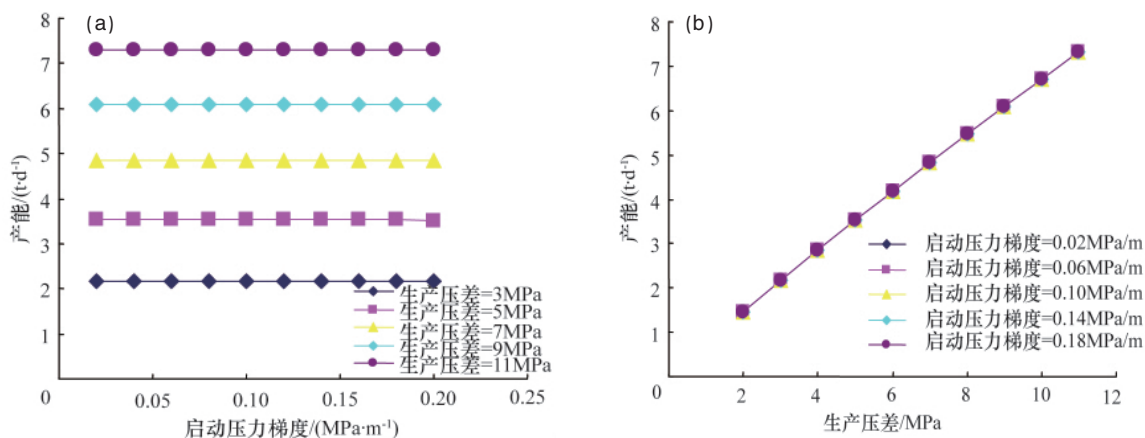


图5 启动压力梯度对产能的影响曲线

Fig. 5 Impact of threshold pressure gradient on production

2.5 裂缝长度对产能的影响

如图6(a)所示,生产压差不变时,随着裂缝长度的增加,油井产量随之增加,且增幅越来越大。由于模型中假设裂缝为无限导流能力,因此,根据该模型所推导得到的公式得到的结论必然是裂缝越长,油井产量越高,与实际生产情况不符,这是该模型的不足之处。当裂缝长度相同时,随着生产压

差的增加,油井产量随之增加,压差增加到一定程度时,由于应力敏感影响,油井产量增加的幅度变缓。此外,当生产压差较大时,裂缝较长油井的增产幅度依然比较高,如图6(b)所示,这是因为裂缝的存在增加渗流面积,压降损失减小,从而减弱了岩石的应力敏感特性。因此,增加裂缝长度可以适当提高油井的生产压差。

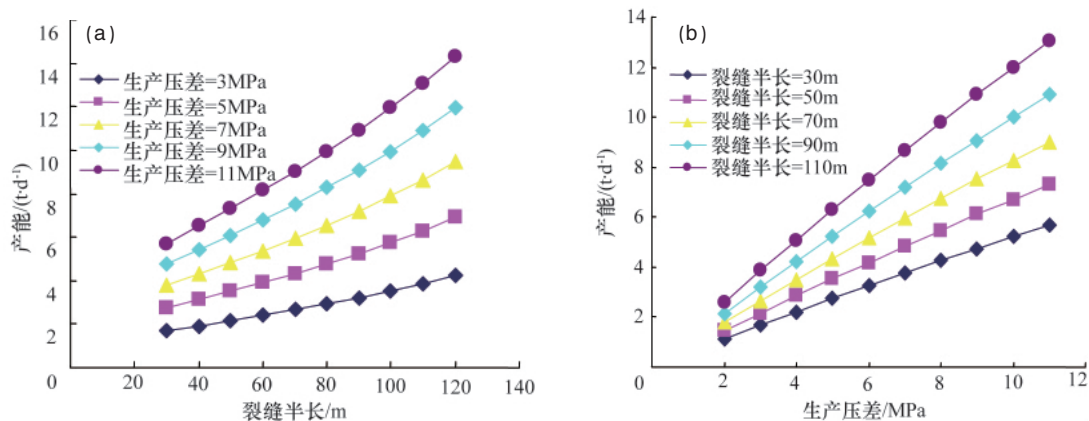


图6 裂缝长度对产能的影响

Fig. 6 Impact of fracture length on production

3 结论

(1) 考虑启动压力梯度、应力敏感性以及微可压缩性随压力的可变性,建立了非线性稳定渗流的垂直裂缝井产能方程,适用于低渗透油藏油井产能的预测。

(2) 通过低渗透油藏产能计算模型分析认为,渗透率越低,生产压差越大,两者之间的非线性关系越明显,且当井距一定时,油井产量随着生产压差的增加而增大,井距越小,油井增产的幅度越大。因此,低渗油藏渗透率低,压力传播速度较慢,宜采用小距离井网系统。

(3) 生产压差不变时,油井的产能随应力敏感系数的增加而降低,生产压差越高,产能下降的幅度也越大,因此,低渗油藏在开采的过程中地层压力下降较快时,应采用超前注水保持地层压力。

(4) 压裂油井产能受启动压力梯度的影响较小,因此,低渗油藏生产压差保持一合理值,增加油井产量同时也不会造成应力敏感。

参考文献 (References)

- [1] 邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用 [J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-77.
Deng Ying'er, Liu Ciqun. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(4): 72-77.
- [2] 邓英尔, 黄润秋, 刘慈群. 非饱和低渗透黏土非线性渗流定律与固结 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(1): 99-105.
Deng Ying'er, Huang Runqiu, Liu Ciqun. *Journal of Hydrodynamics: Ser A*, 2009, 24(1): 99-105.

- [3] Torsten F, Hans-Dieter V. Analytical solution for the radial flow equation with constant -rate and constant -pressure boundary conditions in reservoirs with pressure-sensitive permeability [C]. SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Denver, Colorado, USA, April 4-16, 2009.
- [4] 张义堂, 刘慈群. 垂直裂缝井椭圆流模型近似解的进一步研究 [J]. 石油学报, 1996, 17(4): 71-77.
Zhang Yitang, Liu Ciqun. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(4): 71-77.
- [5] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998: 49-98.
Zhang Jianguo, Lei Guanglun, Zhang Yanyu. *The oil and gas flow through porous media* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998: 49-98.
- [6] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 56-68.
Ge Jiali. *Modern reservoir seepage mechanics* [M]. Beijing: Petroleum Industry Public, 2003: 56-68.
- [7] 隋先富, 吴晓东, 张明江, 等. 水平井产能预测模型在冀东油田的应用与评价 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 72-75.
Sui Xianfu, Wu Xiaodong, Zhang Mingjiang, et al. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(2): 72-75.
- [8] 束仁贵, 束莹, 李珍. 线性常微分方程的保线性变换及其应用 [J]. 大学物理, 2003, 22(7): 11-15.
Shu Rengui, Shu Xuan, Li Zhen. *College Physics*, 2003, 22(7): 11-15.
- [9] 何勇明, 王允诚, 王厉强, 等. 稠油油藏污染井产能模型及压裂增产模型研究 [J]. 石油钻探技术, 2006, 32(2): 58-60.
He Yongming, Wang Runcheng, Wang Liqiang, et al. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 32(2): 58-60.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

“2013 年全国玻璃科学技术年会”征文



由中国硅酸盐学会玻璃分会主办的“2013 年全国玻璃科学技术年会”拟于 2013 年 5 月中旬在河南洛阳召开。

征稿范围: (1) 浮法玻璃工艺技术与装备; (2) 玻璃表面镀膜技术与应用; (3) 太阳能玻璃制造技术与装备; (4) 特种玻璃的研究与应用; (5) 日用与医用玻璃; (6) 玻璃深加工技术; (7) 玻璃工业的节能与环保技术; (8) 玻璃熔窑设计与模拟; (9) 玻璃窑用耐火材料的研制与开发; (10) 玻璃组成、结构与性能的基础理论; (11) 玻璃分析测试方法与理论; (12) 玻璃与深加工技术市场预测。

论文提交日期: 2013 年 3 月 30 日

联系电话: 010-51167523

通信地址: 北京市朝阳区管庄东里 1 号中国建材总院玻璃院 (100024)

电子邮箱: oli@cbmamail.com.cn

大会网站: www.ceramsoc.com/trend/120920.doc