

钢管穿孔过程的三维热力耦合模拟

3-D Thermo-mechanical Coupling Simulation of the Tube Forming Process in Mannesmann Mill

陆璐^{1,3}, 王辅忠², 朱光亚⁴, 王照旭¹

(1 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300160;

2 天津工业大学 物理系, 天津 300160; 3 渤海大学 信息科学与工程学院, 辽宁 锦州 121000; 4 无锡西姆莱斯钢管有限公司, 江苏 无锡 214026)

LU Lu^{1,3}, WANG Fuzhong², ZHU Guangya⁴,

WANG Zhaoxu¹ (1 School of Materials Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2 Department of Physics, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 3 Department of Information Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, Liaoning, China; 4 Wuxi Seamless Steel Tube Company, Ltd., Wuxi 214026, Jiangsu, China)

摘要: 描述了使用有限元方法(FEM)模拟钢管在曼内斯曼式穿孔机上的穿孔过程,建立了三维有限元模型,并考虑了在金属成形过程中出现的热力学现象。模拟的结果动态地显示了在工件内部等效应变、等效应变率和温度的分布。基于这些参数,分析了钢管的穿孔过程,同时通过实验测试与有限元模拟的结果进行对比。结果表明,测试的结果与有限元模拟的结果比较吻合。

关键词: 热力耦合模拟; 有限元方法(FEM)分析; 钢管穿孔过程

中图分类号: TG335.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2010)03-0066-04

Abstract: The finite element method (FEM) is used for simulation of piercing process of the tube in Mannesmann mill. The numerical model is described and takes into consideration for example thermal phenomena present in metal during forming. The simulation results visualize dynamic distributions of equivalent strains, equivalent strain rates and temperature, especially inside the workpiece. On the basis of the basic parameters, the phenomenon in the piercing process is analyzed. The model was verified by comparing the values of calculated force parameters of the piercing process and those measured in laboratory conditions.

Key words: thermo-mechanical coupling simulation; FEM analysis; tube piercing process

钢管分为两种类型: 焊接管和无缝管。其中, 无缝管的可靠性远远高于焊接管, 因此被广泛的使用运输石油和天然气的工业中。一般来讲, 无缝钢管的生产过程分为三个步骤: 首先, 通过顶杆在穿孔轧制中生产出厚壁管; 然后, 通过延长轧制生产出薄壁管; 最后, 通过减径生产出最终的无缝钢管。因此, 穿孔轧制是无缝管生产的第一步。根据轧辊数量的不同, 斜轧机可以被分为两辊和三辊斜轧机。两辊斜轧机由两个轧辊和两个引导设备组成, 根据引导设备的不同, 它又可以分为斯蒂芬尔(Stiefel)穿孔机、狄塞尔(Diescher)穿孔机和曼内斯曼式(Mannesmann)穿孔机。在两辊斜轧机中, 曼内斯曼式穿孔机使用比较广泛。虽然, 这项技术的发展已经有 100 多年了, 但由于金属流动的复杂

性, 使得它远非成熟。而在研发中, 成形过程的设计和优化通常通过大量实验来验证的经验模式。因此, 开发的成本是相当高的^[1]。

为了避免这种经验主义同时降低成本, 在设计和开发新产品的过程中, 数值模拟变成一种重要的方法。这种方法不仅能够验证生产过程的可行性, 而且能够预测出通过实验不能获得的微观结构^[2]。

在 20 世纪 90 年代, 使用有限元方法(FEM)数值模拟斜轧穿孔机轧制过程的研究已经开始, 并建立了二维模型^[3]。近期, Yoshinura, Pietsh, Thie vien, Ceretti, Komori^[4-7]等学者, 已经尝试建立穿孔过程的三维模型。在他们的文章中, 通过模拟软件计算出塑性应变, 应变率和温度等参数。这些参数对于预测产品

的微观结构质量是很重要的,例如使用再结晶模型预测奥氏体结晶粒度。然而,这些数值模型大都经过了简化处理,忽略了金属成形过程中的热力学现象^[4-7],有的仅仅是对于稳定状态的计算^[7],有的是穿孔过程才刚开始的模拟^[5,6]。因此,在考虑热力学现象的基础上,建立穿孔过程的数值模型是非常有意义的。2006年,Z. Pater^[8]等作者成功建立了狄塞尔(Diescher)穿孔机穿孔过程的三维模型。在这个模型充分考虑了被其他作者忽略的各种因素。而本工作在考虑穿孔过程中热力学现象的基础上,建立了曼内斯曼式(Mannesmann)穿孔机穿孔过程的三维热力耦合模型。

1 三维有限元模型的建立

曼内斯曼式穿孔机的有限元模型来源于无锡西姆莱斯钢管有限公司,有限元模型与实际设备是按照1:1的比例建立的,有限元模型各个组件的尺寸和相

对位置均与实际生产中相符。本工作主要考虑轧辊和顶头在穿孔过程中对钢管成形的影响,因此建立模型中导板被忽略。图1为模型的平面图。这里假设被轧制的钢坯材料为C45号钢,尺寸为 $\phi 110\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。C45号钢的具体参数为:线胀系数为 $5.35 \times 10^{-8} \cdot \text{K}^{-1}$,比热为 $2.09\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,导热系数为 $128 \times 10^{-3} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。模型的材料来自于软件MSC. SuperForm 2005^[9]自带的材料库。

表1中给出了模型中工具和工件的主要参数,这些参数都来源于无锡西姆莱斯钢管有限公司。

在模拟中,使用了再划分网格技术^[9],内部孔隙的形成依靠于再划分网格的成功和网格形变。在耦合计算中,使用了隐式有限元算法。在模拟中,工件的温度设为 1255°C ,轧辊的温度设为 100°C ,顶头的温度设置为 300°C 。设定在工具和工件间的热传递系数为 $10000 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,工件和环境的热传递系数为 $200 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。轧辊和工件间的摩擦系数为 $1.0^{[10]}$ 。

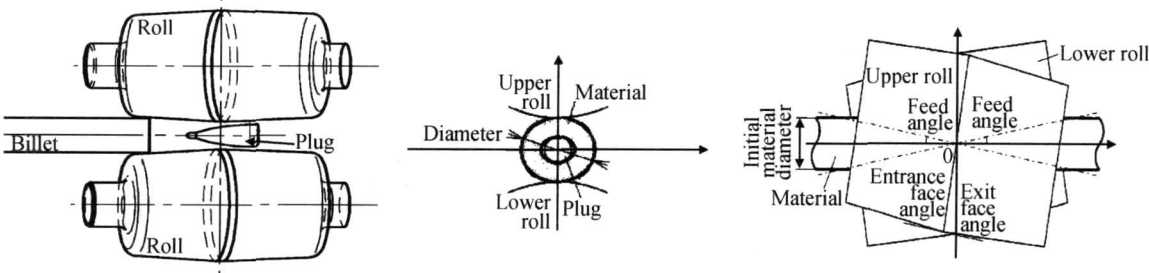


图1 模型的平面图
Fig. 1 Ichnography of the model

表1 曼内斯曼式穿孔机参数
Table 1 Parameters of the Mannesmann mill

| Parameter | Value |
|---------------|----------|
| Roll radius | 300 mm |
| Roll distance | 95.5mm |
| Roll speed | 141r/min |
| Plug radian | 3° |
| Plug diameter | 70mm |
| Billet radius | 55mm |
| Feeding angle | 7° |

2 结果与讨论

通过有限元模型,可以分析在穿孔过程中工件的精确形变。图2显示了这一过程,首先,工件被轧辊咬住产生一个旋转的向前冲力,工件被这个前冲力拽入轧辊的轧制区。在大约1.5s后,工件的前表面接触到

顶头,这时孔隙成形开始。在大约2s后($t \approx 3.5\text{s}$),当工件被轴向力拽入顶头的1/3处时,再划分网格开始。大约7.5s时候,成形力相对稳定,穿孔过程达到一个稳定的状态。同时,有限元方法能够精确地分析在穿孔过程中应变的改变。

图3显示,在稳定的穿孔阶段($t = 7.5\text{s}$),工件等效塑性应变的分布。由图可见,工件在轧制和穿孔阶段的等效塑性应变是薄层状分布的。穿孔过程开始时,在钢管轴线方向的等效塑性应变逐渐增加。工件内外表面的最大等效塑性应变都是出现在顶头的2/3处。内表面的最大等效塑性应变要远远大于外表面,这是由于在穿孔过程中,内表面与顶头接触面较大,内表面与顶头接触的表层产生黏滞所致。而后,钢管轴线方向的等效塑性应变逐渐减小。总之,图3显示了在变形和穿孔过程中,等效塑性应变分布的变化。虽然在工件的局部区域形变是不均匀的,但最大等效塑性应变是稳定和均匀地分布在这个区域。

图4显示,在穿孔过程中,工件的横截面成椭圆形

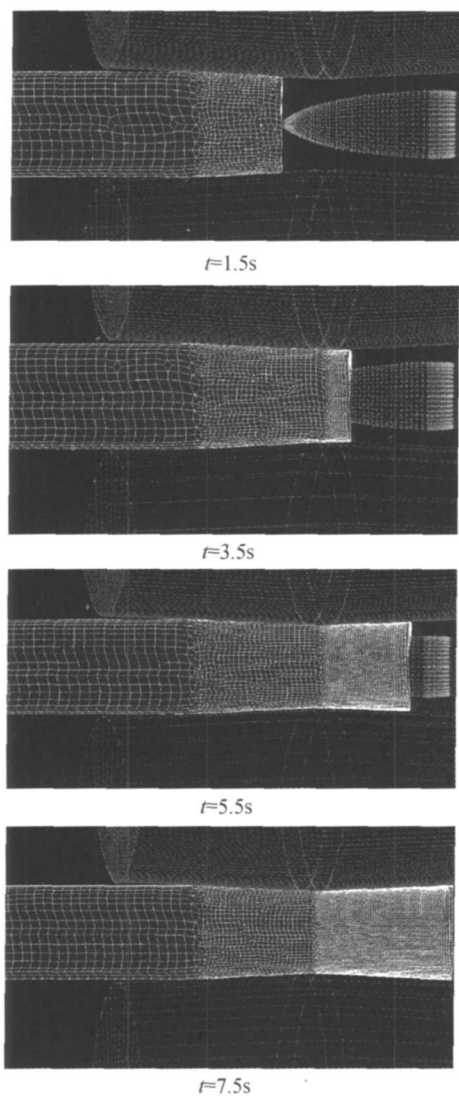


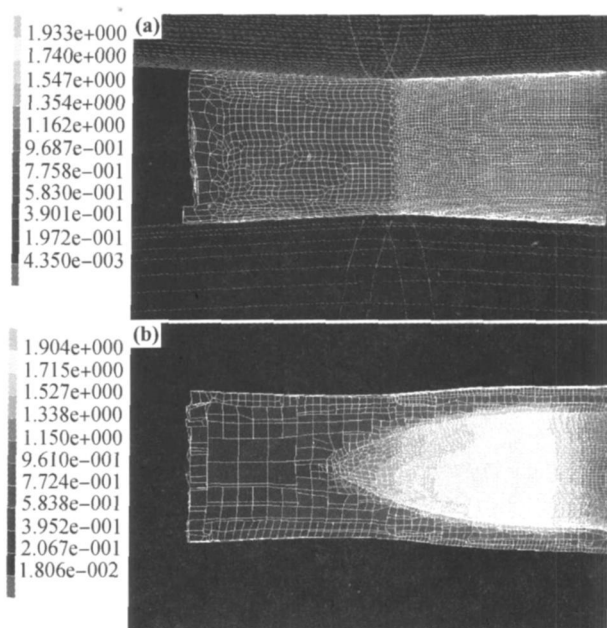
图2 工件穿孔形变过程

Fig. 2 Process of deformations and piercing

状。这是由于,当工件逐渐进入变形区后,质点运动将在轧辊和顶头的作用下向金属内部靠拢,内外表面速度将沿着变形工具表面运动。工件被横向轧制后,金属质点并非沿圆周方向运动,而企图向横向速度出口的方向继续运动。这就是横截面成椭圆形状的主要原因。

图5显示了工件内外表面等效塑性应变率的分布。如图5所示,斜轧过程具有强烈的等效应变率。其主要原因是在斜轧穿孔过程中,轧辊转速较高,并且轧辊与工件之间的直径比相当大,使得变形在单位时间内的值很大。图5(a)显示,在工件的外表面,等效塑性应变率最高值处于轧辊和工件接触的表面。图5(b)显示在工件内表面,等效塑性应变率最高值处于轧辊和顶头之间接触表面。

工件在轧制穿孔过程中的温度分布也是很重要的。图6显示工件在轧制穿孔过程中的温度分布。由

图3 等效塑性应变分布 $t=7s$

(a) 工件外表面; (b) 工件内表面

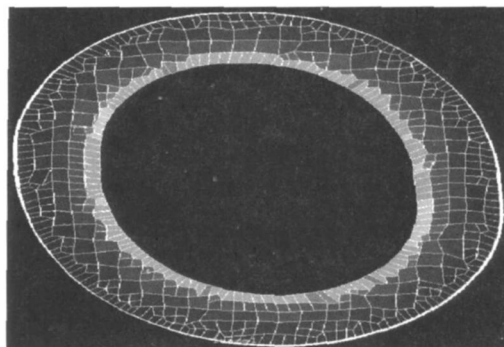
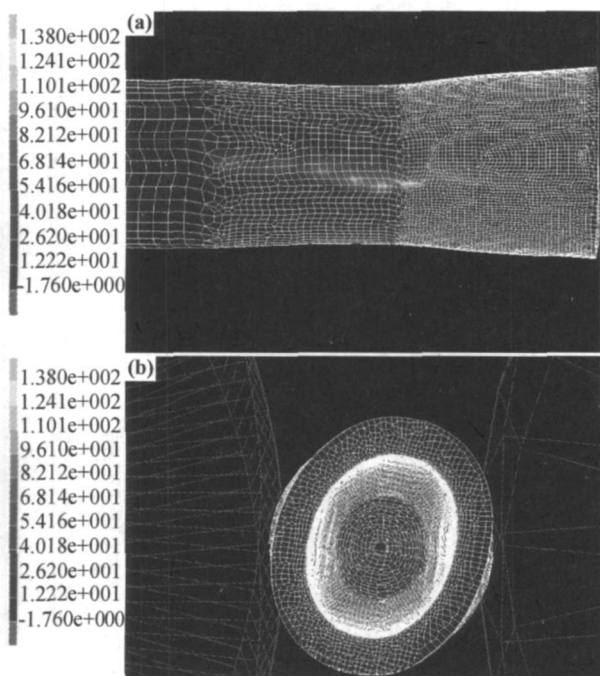
Fig. 3 Strain distribution in the workpiece determined for $t=7s$
(a) external surface of workpiece; (b) internal surface of workpiece

图4 工件横截面

Fig. 4 Cross section of workpiece

图6(a)可以看出,工件外表面的温度分布与其等效应变的分布类似。这是由于轧辊的转速很高,工件外表面在轧辊的轧制下,外表面的温度逐步提高,在轧辊和顶头对应的接触弧段,其强大的应变速度,使得外表面温度达到最高。尽管工件在斜轧穿孔过程中存在散热现象,但局部的变形热仍使其温度有明显的提高。

由图6(b)可以看出,内表面的温度随着顶头穿入逐渐提高,在顶头完全穿入时,温度达到最高值,然后冷却回落。而且,内表面的温度要远远的高于外表面。这是由于在顶头完全穿入后,工件在顶头的作用下剧烈产生孔腔,工件内壁与顶头的表面大面积接触,在强大摩擦力的作用下,产生大量的热。并且工件内表面的散热条件较差,所以内表面的温度在这个时候达到最高,并远远高于外表面的温度。


 图 5 等效塑性应变率在工件上的分布 $t=7.5s$

(a)外表面等效塑性应变率分布；(b)内表面等效塑性应变率分布

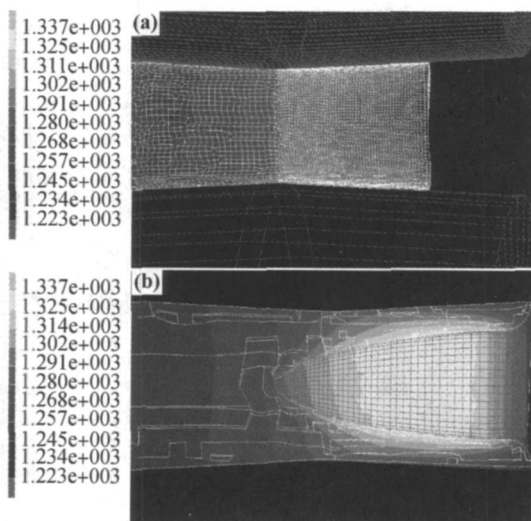
 Fig. 5 Strain rate distribution on the workpiece, calculated for $t=7.5s$ (a) strain rate distribution on the workpiece external surface; (b) strain rate distribution on the workpiece internal surface

 图 6 工件温度分布 $t=7.5s$ (a)工件外表面温度分布；(b)工件内表面温度分布

 Fig. 6 Temperature distribution on the workpiece, calculated for $t=7.5s$ (a) temperature distribution on the workpiece external surface; (b) temperature distribution on the workpiece internal surface

图 7 为有限元结果与具体实验测试结果的比较。从图中可以看出,测试结果与有限元结果吻合得比较好。模拟结果与实验值的吻合程度决定了计算精度,

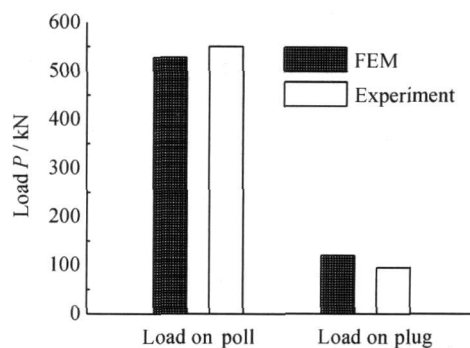


图 7 实验结果与模拟结果的力学参数比较

Fig. 7 Comparison of force parameters of calculated and measured

这样说明了有限元模型能够真实地模拟出斜轧穿孔的整个过程。

3 结论

(1) 使用 MSC. SuperForm 2005 软件,建立了钢管穿轧的三维热力耦合模型,同时对整个穿孔过程进行了数值模拟。并通过实验测试与有限元模拟的结果进行对比。结果表明,测试的结果与有限元模拟的结果比较吻合,这说明应用有限元方法可以有效的计算和模拟复杂的金属成形过程。

(2) 通过模拟的结果,将工件在穿轧过程中的等效塑性应变、等效塑性应变率和温度的分布通过可视化的形式表现出来,并分析了这些分布情况产生的原因。

参考文献

- [1] FLEISCHER M. Auslegung ausgewählter schiedeprozesse mit hilfe der FEM [J]. Dissertation, RWTH Aachen, Umformtechnische Schriften 1996, 67: 1- 10.
- [2] SINCZAK J, MAHTA J, GLOWACKI M, et al. Prediction of mechanical properties of heavy forgings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80- 81: 166- 173.
- [3] URBÁŃSKI S, KAZANECKI J. Assessment of the strain distribution in the rotary piercing process by the finite element method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45: 335- 340.
- [4] YOSHINURA H, MIHARA Y, MORI K. Simplified 3D FE simulation of rotary piercing controlling rotation of plug [A]. Simulation of materials processing: theory, methods and applications, Proc of the Seventh Int Conf on Numerical Methods in Industrial Forming Processes "Numiform 2001" [C]. Tokyo: 2001, 577- 582.
- [5] PIETSH J, THIEVIEN P. FEM simulation of the rotary tube piercing process [J]. MPT International, 2003, 2: 52- 60.

(下转第 73 页)

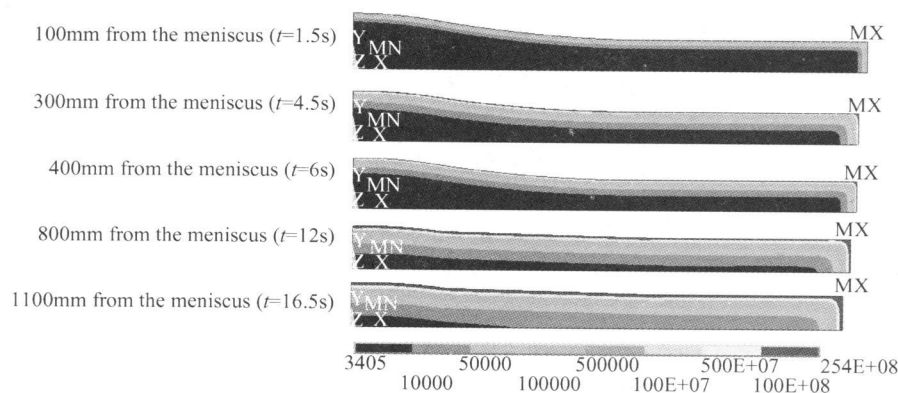


图5 铸坯在结晶器不同位置的应力场分布

Fig. 5 Distribution of equivalent stress of thin slab in the mould

3 结论

(1) 薄板坯被拉出结晶器时宽面中心位置的表面温度为 1208 ℃, 角部温度为 753 ℃, 坯壳厚度为 8mm, 与现场实际较为吻合。

(2) 铸坯角部为坯壳最大应力处, 漏斗区始端应力亦较大。

(3) 漏斗区“萎缩”现象及锥度导致的结晶器壁对坯壳的挤压可抵消一部分钢水静压力。

参考文献

- [1] 张家泉, 崔立新, 陈志平, 等. 板坯连铸结晶器内温度/应力场耦合模型[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 373- 376.

- [2] 干勇, 仇圣桃, 萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [3] 杨刚, 李宝宽, 于洋, 等. 薄板坯连铸结晶器铜板的三维传热分析[J]. 金属学报, 2007, 43(3): 332- 336.
- [4] 杨晓江, 白健, 杨春政. 薄板坯连铸结晶器传热行为的研究[J]. 河南冶金, 2004, 12(3): 13- 14.
- [5] 华维. FTSC 薄板坯连铸机 H² 结晶器内坯壳变形过程的研究[D]. 沈阳: 辽宁科技大学硕士学位论文, 2007.

收稿日期: 2008-09-20; 修订日期: 2009-12-20

作者简介: 果晶晶(1985—), 女, 硕士研究生, 钢铁冶金专业。

通讯作者: 王书桓(1964—), 教授, 博士, 炼钢方向, 通讯地址: 河北省唐山市新华西道 46 号河北理工大学冶金与能源学院(063009), E-mail: wshh88@heut.edu.cn.

(上接第 69 页)

- [6] CERETTI E, GIARDINI C, ATTANASIO A, et al. Rotary tube piercing study by FEM analysis: 3D simulations and experimental results [J]. Tube & Pipe Technology, 2004, (3,4): 155 - 159.
- [7] KOMORI K. Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimensional rigid plastic finite element method [J]. Int International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47: 1838 - 1853.
- [8] PATER Z, KAZANECKI J, BARTNICKI J. Three dimensional thermo mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 167- 170.
- [9] MSC Software Corporation. MSC SuperForm User's Guide Ver-

sion 2005 [M]. USA: South Coast Metro, 2005.

- [10] GONTARZ A, LUKASIK K, PATER Z, et al. Technology of Forming and Modeling of the Manufacturing Process of Screw Spikes [M]. Lublin: LTN, 2003.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(06YFJMJC02200)

收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-11-16

作者简介: 陆璐(1978—), 男, 讲师, 在读博士研究生, 主要从事钢铁材料的轧制, 组织演化, 有限元模拟等方面的研究, E-mail: luluisgood@yahoo.cn

通讯作者: 王辅忠(1960—), 男, 教授, 联系地址: 天津工业大学物理系(300160), E-mail: wangfuzhong@163.com.