

# W/Cu 梯度材料热应力分析及结构优化设计

宋月鹏<sup>1,2</sup>, 孙祥鸣<sup>1,2</sup>, 李江涛<sup>3</sup>, 李倩<sup>1,2</sup>, 陈义祥<sup>3</sup>, 郭世斌<sup>3</sup>, 高东升<sup>1,2</sup>

(1. 山东农业大学, 山东 泰安 271018)

(2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 山东 泰安 271018)

(3. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

**摘要:** 运用 ANSYS12.0 软件对 W/Cu 梯度材料进行热应力模拟分析, 并对结构进行优化设计。结果表明, 随着成分分布指数 ( $p$ ) 的增加, 最大热应力先减小后增大; 在  $p=1.3$ , 热流密度为  $30 \text{ MW/m}^2$  时, 最大热应力值最小为  $180 \text{ MPa}$ , 与非梯度材料相比最大等效热应力降低  $79\%$ ; 最优化的梯度层厚度大于  $3 \text{ mm}$ , 梯度层数  $4\sim 6$  层, 钨板的厚度  $1\sim 3 \text{ mm}$ 。

**关键词:** 有限元分析; W/Cu 梯度材料; 成分分布指数; 热应力

中图分类号: TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)03-0603-05

偏滤器是现代磁约束核聚变堆试验装置一个非常重要的组成部分<sup>[1]</sup>, 是构成高温等离子体与材料直接接触的过渡区域: 一面是温度高达几亿度的等离子体, 另一面是面壁材料 PFC (Plasma facing components)<sup>[2-5]</sup>。钨由于其溅阈值高 (约  $200 \text{ eV}$ )、熔点高、硬度高、高温特性好, 被广泛的应用于面壁材料的第一壁材料 PFM (plasma facing materials), 铜导热率高、焊接性能好、传热快被选作热沉材料<sup>[6,7]</sup>。但由于 W 和 Cu 的物性参数相差很大, 当钨表面承受大的热载荷时, 在两者的结合处产生很大的热应力而产生裂纹, 导致材料失效<sup>[4]</sup>。W/Cu 梯度材料 (下文简称 W/Cu FGM) 连续改变材料的组成和结构, 能有效的降低异种材料连接界面的应力集中<sup>[8-10]</sup>。陶光勇、刘彬彬、冯云彪和肖鹏用有限元软件分析 W/Cu 合金的热应力, 但研究的不是很系统, 不够深入<sup>[6,10-12]</sup>。凌云汉和 Zhou Zhangjian 曾系统地研究 W/Cu FGM, 并得到了很好的结果, 只是 W 和 Cu 材料的物性参数太过于简单, 梯度层的物性参数计算不够准确<sup>[7,13]</sup>。

本研究根据偏滤器的服役环境与结构特征, 运用 ANSYS12.0 有限元分析软件采用大塑性变形非线性计算算法 (Large displacement transient) 对偏滤器第一壁 W/Cu FGM 进行热应力分析, 详细考察梯度材料的成分分布指数、梯度过渡厚度、层数以及金属 W 表面层厚度的变化对热应力大小、分布以及梯度材料表面工作温度的影响。

## 1 W/Cu PFM 的制备和分析模型的创建

### 1.1 W/Cu PFM 的制备

W/Cu PFM 是根据文献[14]介绍的超重力熔铸制备的, 实验所用原料为工业纯 W、Al 和 CuO 粉末 (纯度均在  $99.2\%$  以上), 将各粉末按一定质量分数充分混合, 以无水乙醇为介质, 在 GN22 型高能球磨机上以  $800 \text{ r/min}$  球磨  $24 \text{ h}$ ,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干后, 在 769YP464F 型粉末压片机上  $10 \text{ MPa}$  下压制成  $\Phi 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的反应压块。将其置于超重力燃烧合成装置的坍塌炉底部, 上面放置铝热剂压块, 点火电流控制在  $20 \text{ A}$  以内, 重力系数为  $800 \text{ g}$ 。

### 1.2 几何模型及边界条件

图 1 为 W/Cu FGM 的分析模型, 金属 W 表面承受稳态热流负荷, 而金属 Cu 被均匀冷却, 样品尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。

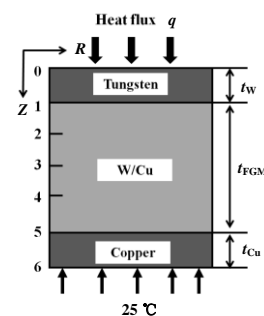


图 1 FGM 有限元分析模型示意图

Fig.1 Schematic illustration of W/Cu FGM for finite element analysis

收稿日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51201173, 51372255); 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项 (2013GB110005); 山东省自主创新专项 (2013CX90201)

作者简介: 宋月鹏, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 山东农业大学机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018, 电话: 0538-8246109, E-mail: uptonsong@163.com

图 1 中  $t_w$ ,  $t_{FGM}$  和  $t_{Cu}$  分别表示金属 W 层、梯度过渡层和金属 Cu 层的厚度。梯度层的成分分布采用幂函数表示:

$$f_{Cu} = \begin{cases} 0 & (z = 0) \\ (z/t_{PFM})^p & (1 \leq z \leq 4) \\ 1 & (z = 5) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f_{Cu}$  为金属 Cu 的体积分数,  $p$  为成分分布指数。

不同的  $p$  值代表不同的成分分布规律, 图 1 中绘出了几个不同  $p$  值的成分分布曲线。 $p < 1$  的梯度材料在靠近金属 Cu 的梯度层的成分变化平缓, 且整体材料的金属 Cu 含量较高; 相反,  $p > 1$  的梯度材料在靠近 W 的梯度层的成分过渡均匀, 整体材料含 W 量提高;  $p = 1$  为线性分布。

### 1.3 物性参数模型

由于钨、铜材料物性参数与温度有一定的关联性, 如室温 (20 °C) 下, 钨铜材料的线膨胀系数分别为:  $4.5 \times 10^{-6}$  及  $16.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 而在 500 °C 时, 其线膨胀系数分别为:  $4.68 \times 10^{-6}$  及  $18.48 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。因此, 在有限元分析过程中, 必须考虑温度对材料物性参数的影响, 对于钨和铜材料的物性参数, 主要取自文献[15,16]。

对于梯度过渡层的物性参数, 根据文献[10] Voigt 模型和 Reuss 模型均不能精确的描述复合材料的有效模量, 本研究弹性模量采用 Paul 预测式:

$$E_C = E_{Cu} \frac{E_{Cu} V_{Cu} + E_W (1 + V_W)}{E_W V_{Cu} + E_{Cu} (1 + V_W)} \quad (2)$$

式中,  $V_W$ 、 $V_{Cu}$  分别为 W、Cu 两相的体积分数;  $E_W$ 、 $E_{Cu}$ 、 $E_C$  分别为 W、Cu 及 W-Cu 复合材料的弹性模量。热膨胀系数和导热系数采用 Kerner 预测式:

$$\alpha_C = \alpha_W V_W + \alpha_{Cu} V_{Cu} + \frac{4G_{Cu}}{K_C} \cdot \frac{(K_C - K_W)(\alpha_{Cu} - \alpha_W)V_W}{4G_{Cu} + 3K_W} \quad (3)$$

$$\text{式中: } K_C = \frac{V_W K_W + V_{Cu} K_{Cu} \left[ \frac{3K_W + 4G_{Cu}}{3K_{Cu} + 4G_{Cu}} \right]}{V_W + V_{Cu} \left[ \frac{3K_W + 4G_{Cu}}{3K_{Cu} + 4G_{Cu}} \right]}$$

式中,  $\alpha_W$ 、 $\alpha_{Cu}$ 、 $\alpha_C$  分别为 W、Cu 及 W-Cu 复合材料两相的热膨胀系数;  $K$  为 W-Cu 复合材料的体积弹性模量,  $K_W$ 、 $K_{Cu}$  分别为 W、Cu 两相的体积弹性模量;  $G_W$ 、 $G_{Cu}$  分别为 W、Cu 两相的剪切模量。

$$\lambda_C = \frac{V_W \lambda_W + V_{Cu} \lambda_{Cu}}{V_W + V_{Cu}} \times \frac{3\lambda_W}{2\lambda_W + \lambda_{Cu}} \quad (4)$$

式中,  $\lambda_W$ 、 $\lambda_{Cu}$ 、 $\lambda_C$  分别为 W、Cu 及 W-Cu 复合材料的导热率,  $V_W$ 、 $V_{Cu}$  分别为 W、Cu 两相的体积分数。

### 1.4 有限元分析模型建立及加载

在用 ANSYS12.0 进行热应力分析时, 考虑到模型

涉及热-应力-结构相互耦合, 因此单元类型选择 Couple Field, Vector Quad 13 (Plane13), 单元为四自由度模拟 ( $U_x$ 、 $U_y$ 、TEP 及  $A_z$ ), 单元塑变为 Plane Stree 类型, 各部位 (顶端钨板、钨铜梯度材料及铜) 采用 Glue 方法粘合, 采用 Refine Meshing 方法对模型进行网格划分, 选择大塑性变形非线性计算算法 (Large displacement transient), 整个模型的初始温度设定为 25 °C。

顶层钨板、钨铜梯度材料过渡层和金属铜的厚度分别为 1、4 及 1 mm。对于中间钨铜梯度材料层, 沿 Z 轴方向, 按照公式 (1) 计算出不同部位钨铜相对含量, 而后根据公式 (2~4) 分别计算出该部位材料的物性参数, 并在模型中赋值。

顶端钨板表面承受 5~30 MW/m<sup>2</sup> 的稳态热流负荷, 底部为水冷却孔的上回转母线, 该处金属铜被均匀冷却, 温度设定为 25 °C。

## 2 结果与分析

### 2.1 成分分布指数 $p$ 对热应力的影响

成分分布指数  $p$  对热应力的影响结果如图 2 所示, 当钨铜梯度材料的成分分布系数为  $p = 1.3$ , 顶端钨板表面承受 30 MW/m<sup>2</sup> 的稳态热流负荷时, 最大等效应力为 180 MPa, 与无梯度材料的模型 ( $p = 0$ ) 相比 (最大等效应力为 858 MPa), 其最大等效应力降低约 79%。由此可以看出, 合理的设计梯度材料成分分布, 可以大幅度降低钨铜合金的工作应力, 这已经被众多研究结果所证实。在成分分布系数  $p = 1.3$  的模型与无梯度材料的模型 ( $p = 0$ ) 相比, 该模型的工作温度有所升高, 将从 571 °C 升高到 745 °C, 这主要是由于钨铜梯度材料的导热率有所降低所致。

进一步研究顶端不同热流密度载荷下, 钨铜梯度材

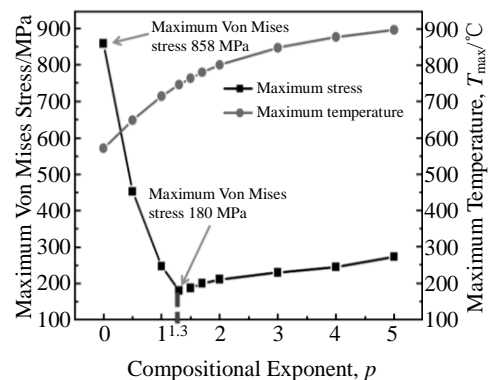


图 2 30 MW/m<sup>2</sup> 热流密度下成分分布系数 ( $p$ ) 对最大等效应力及温度的影响关系

Fig.2 Effect of compositional exponent ( $p$ ) on maximum Von Mises stress and temperature under heat flux 30 MW/m<sup>2</sup>

料的成分分布系数  $p=1.3$  与  $p=0$  时, 钨铜合金工作温度与应力的变化关系, 如图 3 所示。

图 3 中显示, 与无梯度材料的模型 ( $p=0$ ) 相比, 具有钨铜梯度材料过渡层的模型最大等效应力值均有大幅度降低, 而工作温度有所升高。设  $\sigma_{p=0}$  为成分分布系数  $p=0$  时的最大等效工作应力, 而  $\sigma_{p=1.3}$  为成分分布系数  $p=1.3$  时的最大等效工作应力,  $\xi$  为两者间的相对比值, 即应力缓和系数:

$$\xi = \frac{\sigma_{p=0} - \sigma_{p=1.3}}{\sigma_{p=0}} \times 100\% \quad (5)$$

$\xi$  值反应了钨铜梯度材料对钨铜合金工作应力缓和的效果。图 4 为相同热流密度条件下  $\xi$  值的变化。图中显示, 在不同的热流密度下, 钨铜梯度材料成分系数  $p=1.3$  时的最大等效工作应力缓和系数在 80% 左右, 该模拟结果

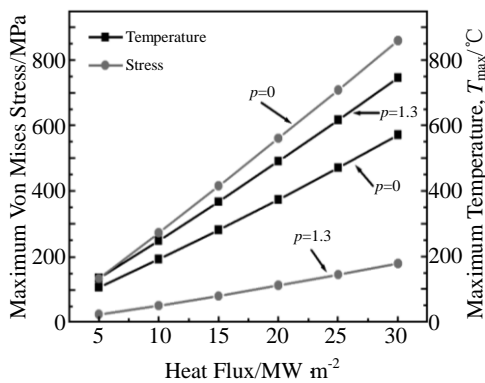


图 3 不同热流密度下成分分布系数  $p=1.3$  与  $p=0$  时最大等效应力与温度的变化

Fig.3 Change of maximum Von Mises stress and temperature with compositional exponent ( $p$ )

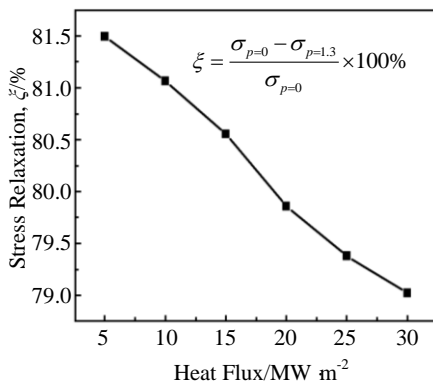


图 4 与  $p=0$  成分分布系数相比,  $p=1.3$  的钨铜合金最大等效应力缓和系数 ( $\xi$ )

Fig.4 Curves of stress relaxation ( $\xi$ ) when compositional exponent ( $p$ )=1.3 compared to  $p=0$

说明通过合理的成分设计, 可以使钨铜合金工作应力降低 80% 左右。

### 2.2 W/Cu FGM 结构对工作应力、温度的影响

研究表明, W/Cu FGM 的结构 (梯度层厚度  $t_{FGM}$  及层数  $n$ ) 对工作应力及温度的影响也至关重要。基于上述模型, 在成分分布系数  $p=1.3$  (因此时的工作应力最小) 时, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 对 W/Cu FGM 的结构进行计算机辅助逆向设计。当顶层钨板厚度为 1 mm 时, 工作应力、温度随梯度层厚度  $t_{FGM}$  及层数  $n$  的变化关系如图 5, 图 6 所示。

图 5 显示, 当梯度层厚度  $t_{FGM}$  及层数  $n$  较小时, 最大等效应力较大, 工作应力随钨铜梯度层的厚度增大而减小, 当达到一定数值时, 如厚度达到 3 mm, 其变化极为平缓。因此, 考虑到梯度材料制备工艺及成本, 厚度在 3~5 mm 为最佳。图 6 显示, 层数达到 4 层时, 工作应力随 W/Cu 梯度层数的增大而减小, 当达到一定数

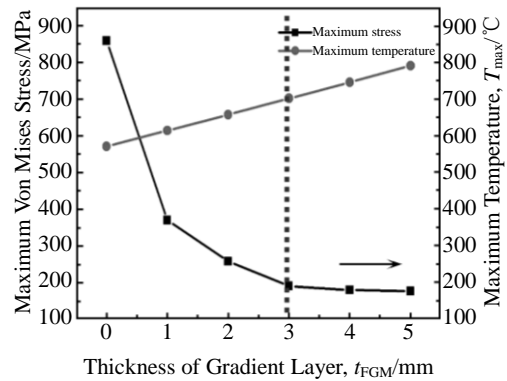


图 5 最大等效热应力和温度随梯度层厚度  $t_{FGM}$  的变化关系  
Fig.5 Curves of maximum Von Mises stress and temperature with thickness of gradient layer  $t_{FGM}$

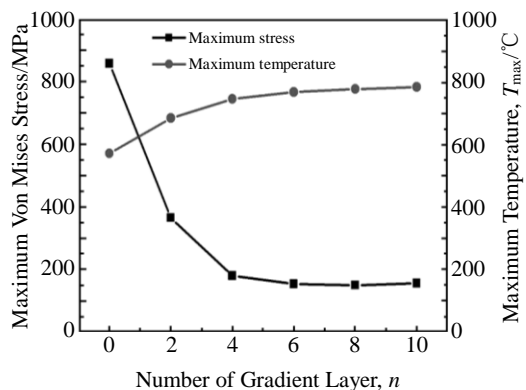


图 6 最大等效热应力和温度随梯度层层数  $n$  的变化关系  
Fig.6 Curves of maximum Von Mises stress and temperature with number of gradient layer  $n$

值时, 如厚度达到 3 mm, 其变化极为平缓, 层数为 4 层为最佳。进一步研究不同钨板厚度  $t_w$  (1~5 mm) 下工作应力、温度随梯度层厚度  $t_{FGM}$  及层数  $n$  的变化关系, 也可以获得上述的结论。

### 2.3 钨板厚度对工作应力、温度的影响

图 7 为模型总高度不变为 6 mm,  $t_{Cu}$  为 1 mm, W/CuFGM 层数为 4 层时, 顶部钨板厚度与工作应力温度的关系曲线。

由图 7 可以看出, 顶部钨板厚度  $t_w$  越大, 工作应力越小, 但是工作温度却急剧升高, 当顶部钨板厚度  $t_w$  在 1~3 mm 时, 应力变化较为平缓, 在 350 MPa 左右, 而工作温度在 600~900 °C 之间, 选择钨板厚度为 1~3 mm 应力缓和最好。

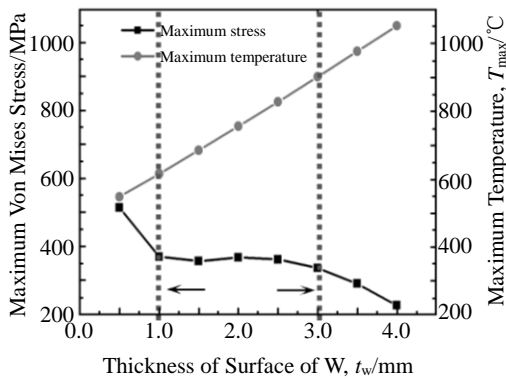


图 7 最大等效热应力和温度随钨板厚度  $t_w$  的变化关系

Fig.7 Curves of maximum Von Mises stress and temperature with thickness of W ( $t_w$ )

## 3 结 论

1) Cu FGM 的成分分布系数为  $p=1.3$ , 顶端钨板表面承受 30 MW/m<sup>2</sup> 的稳态热流负荷时, 最大等效应力为 180 MPa, 与无梯度材料的模型 ( $p=0$ ) 相比 (最大等效应力为 858 MPa), 其最大等效应力降低约 79%, 热应力缓和最明显; 并且当  $p=1.3$ , 模型表面施加不同的载荷 (5~30 MW/m<sup>2</sup>) 时, 应力缓和系数都在 80% 左右。

2) 梯度层的厚度对热应力影响较大, 当梯度层厚度大于 3 mm 时, 对缓和热应力效果最好, 制备 W/Cu FGM 时, 梯度层厚度最好大于 3 mm。

3) 梯度层的层数以及钨板的厚度都会对热应力产生很大影响, 梯度层数大于 4, 钨板的厚度 1~3 mm 时, 工作应力最小, 热应力缓和最佳。

## 参考文献 References

- [1] Hao Jiakun(郝嘉琨). *Fusion Reactor Materials*(聚变堆材料)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 47
- [2] Guo Shuangquan(郭双全), Feng Yunbiao(冯云彪), Yan Qingzhi(燕青芝) *et al. Welding Technology*(焊接技术)[J], 2010, 39(9): 3
- [3] Raffray A R, Nygren R, Whyte D G *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2010, 85(1): 93
- [4] Pintsuk G, Brünings S E, Döring J E *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2003, 66-68: 237
- [5] Chong Fali(种法力), Chen Junling(陈俊凌), Li Jianguang(李建刚). *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金)[J], 2005, 33(4): 38
- [6] Tao Guangyong(陶光勇), Zheng Ziqiao(郑子樵), Liu Sunhe(刘孙和). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2004, 16(4): 694
- [7] Ling Yunhan(凌云汉), Bai Xinde(白新德), Li Jiangtao(李江涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(12): 976
- [8] Davis J W, Slattery K T, Driemeyer D E *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1996, 233-237(1): 604
- [9] Chong F L, Chen J I, Li J G. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2007, 363-365: 1201
- [10] Feng Yunbiao(冯云彪), Guo Shuangquan(郭双全), Ge Changchun(葛昌纯) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2010, 24(8): 84
- [11] Liu Binbin(刘彬彬), Jianxin(谢建新). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2005, 29(5): 757
- [12] Xiao Peng(肖鹏), Wang Ni(王妮), Yang Xiaohong(杨晓红). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(12): 2139
- [13] Zhou Zhangjiang, Tan Jun, Qu Dandan *et al. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*[J], 2011, 18(4): 467
- [14] Sun Xiangming(孙祥鸣), Song Yuepeng(宋月鹏), Gao Dongsheng(高东升) *et al. Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2013, 30(4): 136
- [15] Barabash V. *Summary of Material Properties for Structural Analysis of the ITER Internal Components*[Z]. <https://user.iter.org/>, 2009: 20
- [16] Chapa J, Reimanis I. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2002, 303: 131

## Simulation of Thermal Stress and Optimization Design of Structure for the Tungsten/Copper Functional Gradient Material

Song Yuepeng<sup>1,2</sup>, Sun Xiangming<sup>1,2</sup>, Li Jiangtao<sup>3</sup>, Li Qian<sup>1,2</sup>, Chen Yixiang<sup>3</sup>, Guo Shibin<sup>3</sup>, Gao Dongsheng<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

(2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

(3. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Thermal stress and optimum structure design of tungsten/copper functional gradient materials (W/Cu FGM) were analyzed via ANSYS12.0 code. The results show that the maximum thermal stresses firstly decrease to a bottom value and then slightly increase with the increasing of compositional exponent ( $p$ ) of W/Cu FGM. The equivalent Von Mises thermal stress for the W/Cu FGM ( $p=1.3$ ) is 180 MPa, decreased by 79% compared with non-FGM under heat flux of 30 MW/m<sup>2</sup>. According to the simulation results, the optimal parameters of the W/Cu FGM are listed as following: above 3 mm for the thickness, 4~6 layer for the W/Cu FGM and 1 mm to 3 mm of the thickness for the tungsten layer.

**Key words:** FEM; W/Cu gradient materials; compositional exponent ( $p$ ); thermal stress

---

Corresponding author: Gao Dongsheng, Professor, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, P. R. China, Tel: 0086-538-8249659, E-mail: dsgao219@163.com