

# Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金的摩擦磨损性能研究

陈春梅, 安 健, 李荣广, 王柏树

(吉林大学 汽车材料教育部重点实验室, 吉林 长春 130025)

**摘 要:** 研究了铸态 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金的室温、高温力学性能和干摩擦条件下摩擦磨损行为, 并与 AZ91 合金进行了对比。结果表明: 室温下 AZ91 合金的屈服强度要高于 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金, 但高温下 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金较 AZ91 合金表现出更好的热强性, 当温度超过 150 °C 时, AZ91 合金的屈服强度急剧下降, Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金则下降较少。Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金由轻微磨损向严重磨损的转变点明显滞后于 AZ91 合金, 相同载荷范围内 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金磨损表面的温升要低于 AZ91 合金, 其原因是 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金中的金属间化合物 Mg<sub>12</sub>YZn 较 AZ91 合金中的 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相具有更佳的热稳定性。

**关键词:** 摩擦磨损; Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金; AZ91 合金

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>2; TG115.5<sup>+</sup>8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)08-1422-04

以金属为主要组元的常用工程材料中, 镁合金具有密度小, 比刚度和比强度高, 以及优良的阻尼防震性能, 良好的机械加工性能等特点。因此, 越来越多的镁合金产品已用于汽车、通讯和航天工业中<sup>[1~3]</sup>, 使镁合金的研究备受瞩目。Inoue 等人报道了快冷的粉末冶金制成的 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金屈服强度达 480~610 MPa, 同时依具体的固结温度不同而表现出 5%~16% 的延伸率<sup>[4,5]</sup>。也有相关报道<sup>[6]</sup>表明, 只要合金成分在 Zn1~3, Y2~6(at%) 的范围内, 合金综合性能就很优越。虽然这方面的研究在不断地拓展<sup>[7,8]</sup>, 但是有关常规铸造方法制取的这种合金的摩擦磨损行为的报道非常少。虽然镁合金目前还不期望用于轴承或齿轮等承载很大的磨损场合, 但在某些应用中(如发动机部件等)要经受滑动摩擦, 在材料加工、装配过程中磨损也是必要的考虑因素, 因此本实验针对这种以优越的力学性能为主要特征的合金进行摩擦磨损性能的研究。

## 1 实 验

实验中所用的 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金的基本成分为: Mg-2.5Zn-6.8Y (质量分数, %), 其中 Y 是以 Mg-15.7Y (质量分数, %) 中间合金的形式加入的, 于 CO<sub>2</sub>+SF<sub>6</sub> 的保护气氛下在坩埚电阻炉中制得。制备工艺参数: 浇注温度为 775 °C, 保温 15 min 后浇注, 锭模预热至 200 °C。

摩擦磨损试验在 MG-2000 型高温高速磨损试验机上采用销-盘磨损形式进行。将浇注获得的圆柱状合

金锭加工成  $\Phi 6$  mm×12 mm 的销试样, 磨盘为  $\Phi 70$  mm×10 mm 的铬钢, 硬度为 HRC57。试样端面与磨盘的表面均磨到 1000<sup>#</sup> 金相砂纸, 并将试样抛光, 在摩擦磨损试验前均用乙醇清洗。试验分两组进行: 一组是滑动速度 0.785 m/s, 载荷 20~380 N; 另一组是载荷 80 N, 滑动速度 0.1~4.5 m/s, 所有试验的滑动距离为 376.8 m, 在相对湿度为 60% 的 25 °C 室温下进行。摩擦系数可以通过试验机上自动记录的摩擦力矩换算得出。用感量为 0.1 mg 的电子分析天平测量质量, 磨损率用磨损体积损失表示。用扫描电子显微镜观察材料的磨损表面。为了对比研究 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金, 以应用最广泛的 AZ91 合金为参照。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AZ91 与 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金的显微组织和性能

图 1 是 AZ91 与 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金的显微组织。从图中可以看出, AZ91 合金由  $\alpha$ -Mg 基体和沿晶界不规则分布的  $\beta$  相 (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) 组成, 如图 1a 所示; 而 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 合金的晶粒更加细小、致密、均匀, 它是由  $\alpha$ -Mg 基体和沿晶界处分布的 Mg<sub>12</sub>YZn 相组成, 如图 1b 所示。合金的力学性能如表 1 所示。可以看出, 在 150 °C 以上, Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 仍然保持较好的热稳定性。

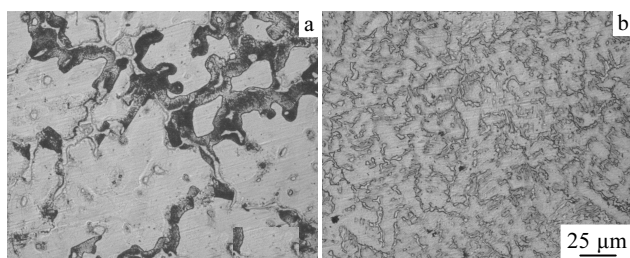
### 2.2 载荷对合金摩擦学行为的影响

图 2 是 Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> 与 AZ91 合金在滑动速度 0.785 m/s 下的摩擦系数和磨损率随载荷的变化。可以看出,

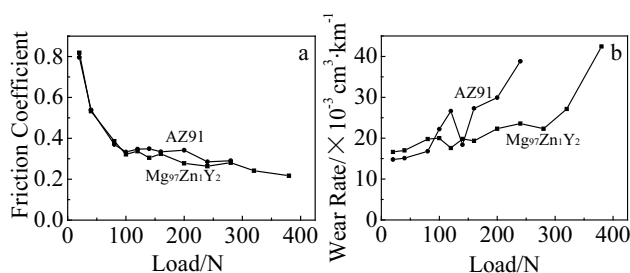
收到初稿日期: 2008-07-28; 收到修改稿日期: 2009-05-10

基金项目: 国家十五科技攻关项目 (2001BA311A07-3)

作者简介: 陈春梅, 女, 1981 年生, 硕士, 吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130025, 电话: 0431-85095852, E-mail: chcm\_8181@sina.com; 通讯作者: 安 健, 教授, 博导, 电话: 0431-85095874, E-mail: anjian@jlu.edu.cn

图 1 AZ91 与  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金的显微组织Fig.1 Microstructures of AZ91 (a) and  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  (b) alloys表 1 AZ91 与  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金的力学性能Table 1 Mechanical properties of AZ91 and  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  alloys

Material	Temperature/ °C	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %
AZ91	20	237.3	158.3	4.1
AZ91	150	162.4	123.8	15.1
AZ91	250	74.6	66.4	16.1
$\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$	20	165.4	132.2	5.0
$\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$	150	149.3	106.7	5.7
$\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$	250	133.5	92.8	8.7

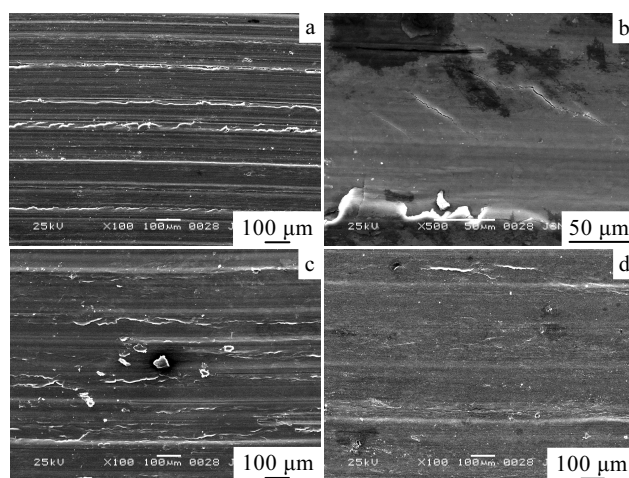
图 2  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  与 AZ91 合金的摩擦系数和磨损率  
随载荷的变化Fig.2 The variation of friction coefficient (a) and wear rate (b)  
with load for  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  and AZ91 alloys

$\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  和 AZ91 合金的摩擦系数随试验载荷的增加有明显的减小趋势, 而且  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金的摩擦系数在整个试验过程中都略低于 AZ91 合金 (图 2a)。在相同磨损条件下,  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金发生严重磨损点明显滞后于 AZ91 合金 (图 2b)。两种合金的磨损率基本上随载荷的增大而增加, 而且整条曲线大致分为两个部分, 即存在明显的上升折点。在 100 N 时, AZ91 的磨损率开始超过  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金, 发生严重磨损;  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金在 280 N 以上磨损率急剧上升, 说明材料的磨损机制随载荷的增加发生了由轻微磨损到严重磨损的转变; 而从 AZ91 合金的曲线可以看出, 在低于 120 N 时磨损率随着载荷的升高而增加, 在 140 N 时又出现了回落, 在载荷高于 140 N 时, 磨损率随载荷的增大而直线上升, 并在 160 N 时, 合金就开始有

挤出现象, 并随着载荷的增加, 挤出越严重, 在 240 N 时磨损表面发生熔化, 边缘挤出有 2 mm 左右。

图 3 是  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金在不同载荷下磨损表面的扫描电镜照片。在低载荷下, 合金的磨面主要由犁沟组成, 而且还很细小, 局部也出现一些大的犁沟, 如图 3a 所示。犁沟边缘产生横向裂纹, 剥落后形成片状磨屑。此外, 磨屑中还有少量黑色粉末, XRD 分析表明为  $\text{MgO}$ 。在载荷达到 80 N 时还伴有少量的由亚表面产生的与滑动方向呈  $45^\circ$  的横向裂纹 (图 3b)。随着载荷增加, 磨损加剧, 出现少部分的挤出, 流动, 有热软化现象。随着载荷的继续升高, 合金的磨损率增大, 有块状金属剥落, 磨面出现大面积的表层剥落。在载荷超过 280 N 后, 磨损形貌相对比较平整 (图 3c)。载荷达到 380 N 时边缘可以观察到熔化迹象 (图 3d)。在低载荷下, 主要是氧化磨损和磨粒磨损; 随着载荷的升高, 磨损机制转为剥层磨损, 以至达到高载荷下发生熔化磨损, 磨损率随载荷的增加而急剧上升。此时, 由于熔化金属的润滑效应, 摩擦系数处于最低状态。

图 4 是 AZ91 合金在不同载荷下的磨损表面扫描电镜照片。在低载荷下, 合金的磨面主要由犁沟组成, 而且清晰可见零星点缀的粉状磨屑, 这是典型的氧化磨损特征 (图 4a)。从载荷 80 N 的照片可以看出, 它要好于  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金, 这也证明了磨损率图中低载荷下 AZ91 合金要耐磨 (图 4b)。随着载荷的增加, 合金开始发生了严重磨损, 出现了剥落现象, 磨损机制转变为剥层磨损 (图 4c)。在 240 N 的载荷下合金熔化现象较为严重, 在试样边缘清晰可见熔化后的重凝现象 (图 4d)。

图 3  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  合金在不同载荷下的磨损表面扫描电镜照片Fig.3 SEM images of worn surfaces of  $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$  alloy at  
different loads: (a) 20 N, (b) 80 N, (c) 280 N,  
and (d) 380 N

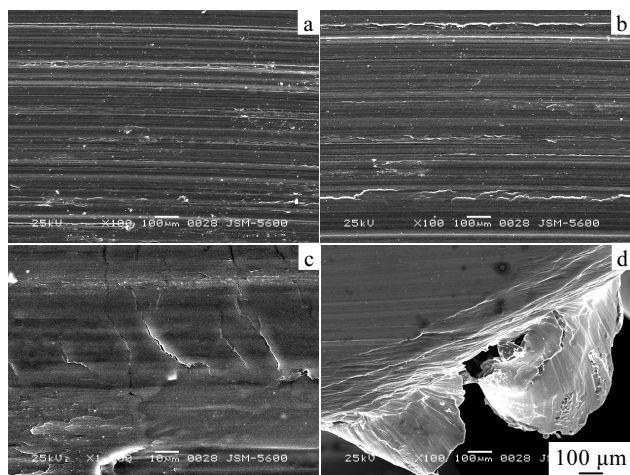


图 4 AZ91 合金在不同载荷下的磨损表面扫描电镜照片  
Fig.4 SEM images of worn surfaces of AZ91 alloy at different loads: (a) 20 N, (b) 80 N, (c) 100 N, and (d) 240 N

### 2.3 滑动速度对合金摩擦学行为的影响

图 5 是  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金和 AZ91 镁合金在 80 N 的载荷下的摩擦系数及磨损率随滑动速度的变化。两种合金的摩擦系数在较低速度范围内均是逐渐下降。而后随着速度的增加,  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金的摩擦系数略有上扬, 在速度高于 4.0 m/s 时又开始有下降的趋势; 而 AZ91 镁合金在 2.0 m/s 时, 摩擦系数迅速上升(图 5a)。两种合金在较低速度范围内磨损率明显下降, 随着滑动速度的增加, AZ91 镁合金开始熔化, 磨损率也直线上升; 而  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金则缓慢升高, 在 1.5 和 2 m/s 的速度下磨损率远远低于 AZ91 镁合金, 在高达 4.5 m/s 的速度下合金还没有发生熔化(图 5b)。

### 2.4 磨损表面温度计算

两接触物体相对滑动时, 需要克服摩擦力, 几乎所有的摩擦过程在表面或近表面都产生热, 摩擦表面的温升将影响磨损机制和磨损率<sup>[9]</sup>。当法向压力为  $F$ , 相对滑动速率为  $v$ , 摩擦系数为  $\mu$  时, 单位名义接触面积在单位时间内所产生的热为:

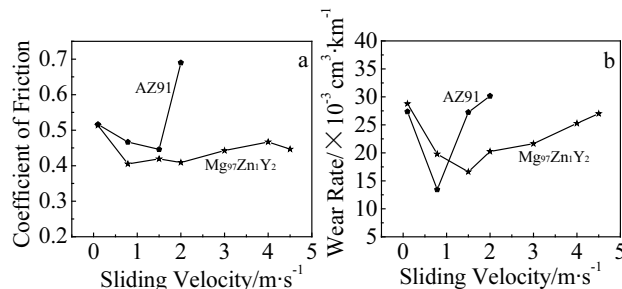


图 5  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金和 AZ91 镁合金的摩擦系数及磨损率随滑动速度的变化

Fig.5 The variation of friction coefficient (a) and wear rate (b) with speeds for  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  and AZ91 alloys

$$q = \frac{\mu F v}{A_n} \quad (1)$$

根据试样材质和形状的不同, 磨损表面产生的热量按照不同的分配系数流向两接触物体。研究试样表面温度  $T_b$  是很有意义的。计算公式<sup>[10]</sup>如下所示:

$$T_b = T_0 + \frac{\alpha \mu F v l_b}{A_n k_m} \quad (2)$$

式中:  $T_0$ —试样的原始温度 (室温);  $\alpha$ —热量分配系数, 当销和盘达到稳定的温度分布时  $\alpha=0.5$ ;  $l_b$ —试样的等效长度;  $A_n$ —试样的名义接触面积;  $k_m$ —试样热导率。

本实验在计算过程中所用的数据如表 2 所示。

在摩擦过程中, 磨损表面的温度会升高, 影响表面层的组织和性能。温度对组织和性能的影响可以分为 3 个阶段: 1) 室温到共晶温度或析出相溶解温度; 2) 共晶温度或析出相溶解温度到熔化温度; 3) 熔化温度以上。图 6 示出了磨损表面在载荷作用下的温升情况。图中同时给出了试验材料的相变温度。对于镁合金而言, 在室温至共晶温度或析出相溶解温度区间合金的热强性决定合金的磨损性能。AZ91 合金在该温度区间对应的载荷范围为 20~160 N,  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金对应的载荷范围 20~240 N。AZ91 合金的主要强化相是  $Mg_{17}Al_{12}$  相, 熔点低, 温度升高时易粗化和软化, 在从室温加热到 200 °C 时,  $Mg_{17}Al_{12}$  相的硬度要减小 50%~60%<sup>[11]</sup>, 从而失去强化作用。因此, AZ91 合金在载荷超过 80 N 后磨损率急剧升高; 而  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金中的 Y、Zn 在  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金中形成金属间化合物  $Mg_{12}YZn$ ,  $Mg_{12}YZn$  具有长周期结构, 并且分布在晶界处, 而且材料的热稳定性好 (见表 1), 磨损率上升较为平缓。在析出相溶解温度至熔化温度区间, 即使不能达到平衡升温条件, AZ91 合金中由于  $Mg_{17}Al_{12}$  相熔点低, 因此, 全部熔化, 强化作用丧失。而  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金中形成金属间化合物  $Mg_{12}YZn$  具有较高熔点, 在温升过程中逐步熔化, 强化作用尚能发挥, 因此, 在 280 N 的载荷下, 磨损率没有急剧升高。在熔化温度以上, AZ91 合金在该温度区间对应的载荷范围为 200~240 N,  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金对应的载荷为 320~380 N。两种合金磨损表面均产生熔化, 因此, 磨损率急剧增加。

表 2 材料性能

Table 2 Properties of materials

Material	Thermal conductivity/W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Fraction of the heat
Steel	41	0.5
AZ91	72	0.5
$Mg_{97}Zn_1Y_2$	66	0.5

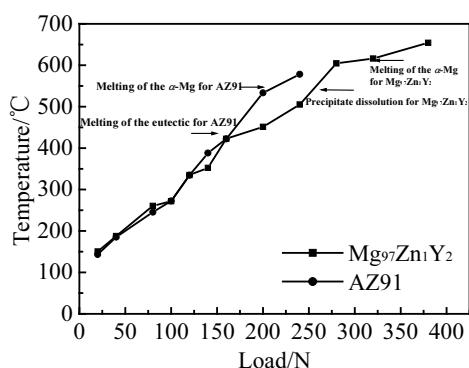


图 6 磨损表面温度随载荷变化曲线

Fig.6 Variation of the bulk temperature of worn surface with the load

### 3 结 论

1)  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金的严重磨损转折点明显滞后于 AZ91 合金。在给定的试验条件下,  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金的摩擦系数稳定地低于 AZ91 合金。

2) 在干摩擦条件下, 两种镁合金的磨损机制均发

生了从轻微磨损(主要是氧化磨损和磨粒磨损)到严重磨损(主要是剥层磨损和熔化磨损)的转变。

3) 在相同载荷的范围内, AZ91 合金的表面温升要大于  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金, 可以看出  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  合金的热强性要高于 AZ91 合金。

### 参考文献 References

- [1] Luo A A. *Mater Sci Forum*[J], 2003, 419~422: 57
- [2] Idris M H Br. *Foundryman*[J], 1997, 90(4): 140
- [3] Idris M H. *AFS Trans*[J], 1996, 104: 237
- [4] Inoue A *et al.* *Mater Trans JIM*[J], 2002, 43(3): 580
- [5] Inoue A *et al.* *J Mater Res*[J], 2001, 16: 1894
- [6] Itoi T, Seimiya T. *Scripta Materialia*[J], 2004, 51: 107
- [7] Matsuda M, Ii S. *Mater Sci and Eng*[J], 2004, A 386: 447
- [8] Abe E, Kawamura Y, Hayashi K *et al.* *Acta Mater*[J], 2002, 50: 3845
- [9] Ashby M F, Abulawij J, Kong H S. *Tribology Transactions*[J], 1991, 34(4): 577.
- [10] Lim S C, Ashby M F. *Acta Metal*[J], 1987, 35: 1
- [11] Polmear I J. *Mater Trans JIM*[J], 1996, 37(1): 12

## Investigation of Friction and Wear Behavior of $Mg_{97}Zn_1Y_2$ Alloy

Chen Chunmei, An Jian, Li Rongguang, Wang Baishu

(Key Laboratory of Automobile Materials, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** The mechanical properties at room and elevated temperature as well as the friction wear behavior under dry sliding condition for as-cast  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy were investigated, and compared with that of AZ91 alloy. The results show that the yield strength of AZ91 alloy is higher than that of  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy at room temperature, but  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy exhibits better thermal stability at the evaluated temperature; as the temperature is above 150 °C, the yield strength of AZ91 alloy decreases sharply, but that of  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy decreases a little. The transition point from mild wear to severe wear for  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy obviously lags that of AZ91 alloy. In the same load range, the bulk temperature rise of wear surface of the  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy is also lower than that of AZ91 alloy. The reason is that the intermetallic compound  $Mg_{12}YZn$  in  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy possesses better thermal stability than  $Mg_{17}Al_{12}$  phase in AZ91 alloy.

**Key words:** friction and wear behavior;  $Mg_{97}Zn_1Y_2$  alloy; AZ91 alloy

Biography: Chen Chunmei, Master, Department of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, P. R. China, Tel: 0086-431-85095852, E-mail: chcm\_8181@sina.com; Corresponding Author: An Jian, Ph. D., Professor, Tel: 0086-431-85095874, E-mail: anjian@jlu.edu.cn