

高应变率下 AZ31B 镁合金力学行为各向异性

吴园园, 谭成文, 杨勇彪, 王富耻, 才鸿年

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 利用分离式 Hopkinson 压杆和应变控制技术研究了 AZ31B 镁合金在压缩受力方向与轧制板面的法向成不同角度时的动态力学特性, 同时分析了不同应变率下的塑性变形机制。结果表明: 当加载应变率为 1200 s^{-1} 时, 不同取样方向的样品中孪晶数量均随塑性变形应变量的增大而增多; 当加载应变率增大到为 2800 s^{-1} 时, 取样方向为 0° 和 45° 、流变曲线形状较应变率为 1200 s^{-1} 时没有明显变化, 而取样方向为 90° 时曲线形状由应变率为 1200 s^{-1} 时的凹形变为凸形, 曲线形状变化的原因是由于应变率增大, 热软化效应使得孪晶数量减少, 应变硬化程度减弱。

关键词: AZ31B 镁合金; 各向异性; 塑性变形机制; 孪晶量

中图分类号: TG146.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0404-05

镁及其合金是目前作为结构材料使用的密度最小的金属材料, 具有高比强度、比刚度, 良好的电磁屏蔽性能、阻尼性能及环境友好等诸多优点^[1-5]。但是, 镁合金具有密排六方晶体结构, 室温滑移系少, 塑性变形能力低, 其板材具有强烈的织构倾向和性能各向异性。Jan Bohlen^[6]等从 3 个取样方向研究了稀土镁合金板的织构和各向异性; S. Kleiner^[7]等从 5 个取样方向研究了挤压态 AZ61 镁合金的性能各向异性。但是, 相关的研究仅涉及准静态载荷条件, 目前在高应变率条件下板材各向异性的研究还少见报道。

本实验研究了热轧态 AZ31B 镁合金不同取样方向的动态力学特性, 并对其微观变形机制进行了分析。研究结果将为镁合金在冲击环境下的工程应用提供一定的理论支持^[8]。

1 实验方法

实验中所用材料为热轧态 AZ31B 镁合金, 合金的化学成分见表 1。

表 1 AZ31B 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ31B alloy ($\omega/\%$)

Element	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
Composition	2.82	0.97	0.2854	0.0306	0.0019	0.0017	0.0005	Bal.

图 1 为热轧态 AZ31B 镁合金的原始组织形貌。压缩试样的尺寸为 $\phi 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, 如图 2a; 取样方向为

受力方向与轧制板面的法向近似成 0° 、 45° 和 90° , 如图 2b。

利用 Hopkinson 压杆进行高应变率冲击压缩试验。对于不同取样方向的试样, 通过钛环控制应变率, 应变率处于 10^3 s^{-1} 量级, 应变率控制方案如图 3 所示。钛环的内径为 $\phi 7.5 \text{ mm}$, 可以保证在变形过程中径向不约束试样。本实验通过调整钛环的高度, 以实现控制应变率分别为 0.3%, 2.6%, 4.6% 和 6.0%。最后利用光学显微镜对不同应变率的试样进行微观组织观察。

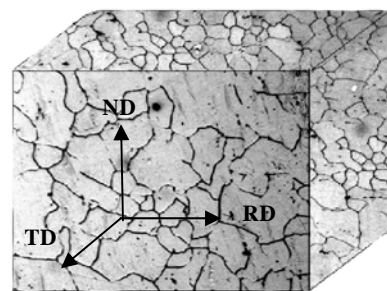


图 1 热轧态 AZ31B 镁合金的原始组织形貌

Fig.1 Initial microstructure of hot rolled AZ31B magnesium alloy

2 结果与讨论

2.1 镁合金的动态压缩力学特性

图 4a~4c 分别为不同取样方向的试样在应变率分

收稿日期: 2008-02-11

作者简介: 吴园园, 女, 1983 年生, 硕士生, 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081, 电话: 010-68916672, E-mail: wyy0117@gmail.com; 通讯作者: 谭成文, 电话: 010-68912712, E-mail: tanchengwen@bit.edu.cn

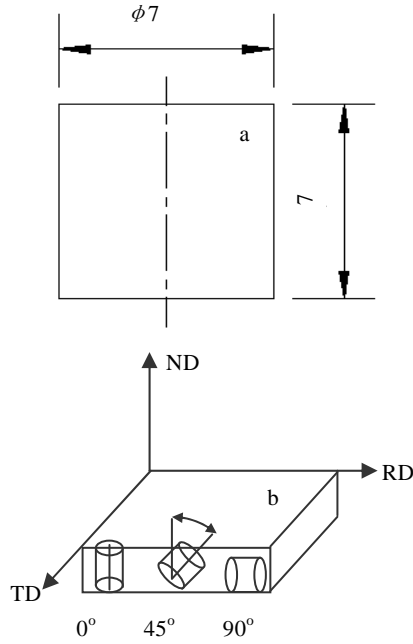


图2 压缩试样的形状尺寸及取样方向

Fig.2 Specimen for compression and sample sketch: (a) sample size and (b) sampling direction

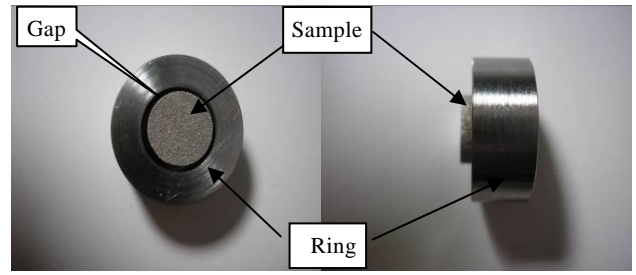


图3 试样应变变量控制装置

Fig.3 Control installment of strain amount

别为 10^{-3} , 1200 , 2800 s^{-1} 时的压缩真应力-应变曲线。由图 4 可知热轧态 AZ31B 镁合金在应变率为 10^{-3} s^{-1} 和 1200 s^{-1} 时, 相同取样方向的曲线形状接近, 即压缩受力方向与轧制板面的法向近似成 0° 时流变曲线呈现凸形, 成 45° 时应力随应变近似呈线性增加, 成 90° 时流变曲线呈现凹形; 压缩屈服强度在压缩受力方向与轧制板面的法向成 45° 时最小, 成 0° 时最大, 成 90° 时的屈服强度在上述两者之间。取样方向为 90° 时, 在应变率为 2800 s^{-1} 时与应变率为 10^{-3} 和 1200 s^{-1} 时的

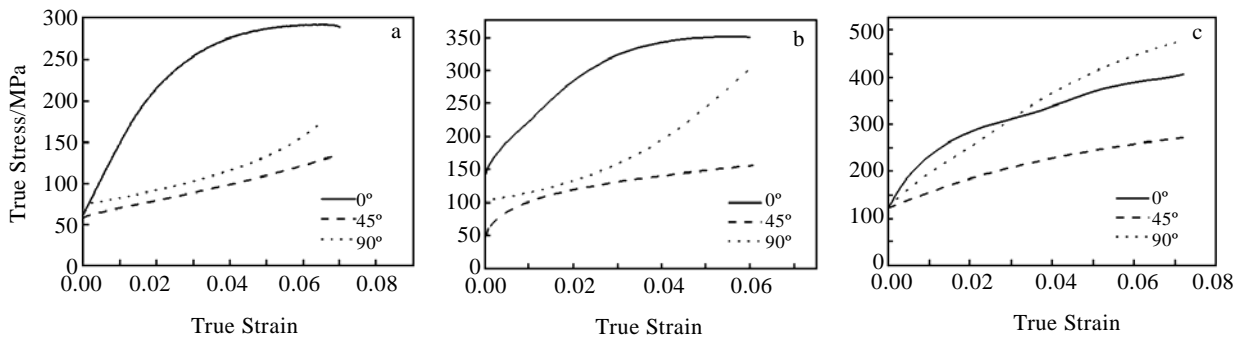


图4 3种应变率不同取样方向的试样压缩真应力-应变曲线

Fig.4 The compressive σ - ϵ curves of samples with different sampling direction at three strain rates: (a) 10^{-3} s^{-1} , (b) 1200 s^{-1} , and (c) 2800 s^{-1}

流变曲线形状差别比较大, 由应变率为 1200 s^{-1} 时的凹形变为凸形, 其余两个方向的曲线形状则没有明显变化。

图 5a~5c 分别为相同取样方向在不同应变率下试样的压缩真应力-应变曲线。如图 5a 所示, 当受力方向与轧制板面的法向成 0° 时, 3 个应变率条件下流变曲线均呈现凸形, 应变硬化效应由大变小; 如图 5b 所示, 当受力方向与轧制板面的法向成 45° 时, 应力随应变呈线性变化, 应变率强化效应明显; 如图 5c 所示为受力方向与轧制板面的法向成 90° 时, 当应变率为 10^{-3} s^{-1} 和 1200 s^{-1} 时流变曲线呈现凹形, 其应变硬化效应由小

到大, 当应变率为 2800 s^{-1} 时流变曲线变为凸形, 应变硬化效应变弱, 整体应变率强化效应最明显。

通过以上分析可知 AZ31B 镁合金板材具有明显的动态力学行为各向异性。

2.2 微观组织分析

图 6~图 8 分别为加载应变率为 1200 s^{-1} 时, 轧态 AZ31B 镁合金在受力方向与轧制板面的法向成 0° 、 45° 和 90° , 应变分别为 0.3%, 2.6%, 4.6% 和 6.0% 时的金相照片; 图 9 为加载应变率为 2800 s^{-1} 时, 受力方向与轧制板面的法向成 90° 时, 应变分别为 0.3%, 2.6%, 4.6% 和 6.0% 时的金相照片。

由图 6a 可知，加载应变率为 1200 s⁻¹ 时，在屈服点附近（应变量为 0.3%），没有观察到孪晶；应变

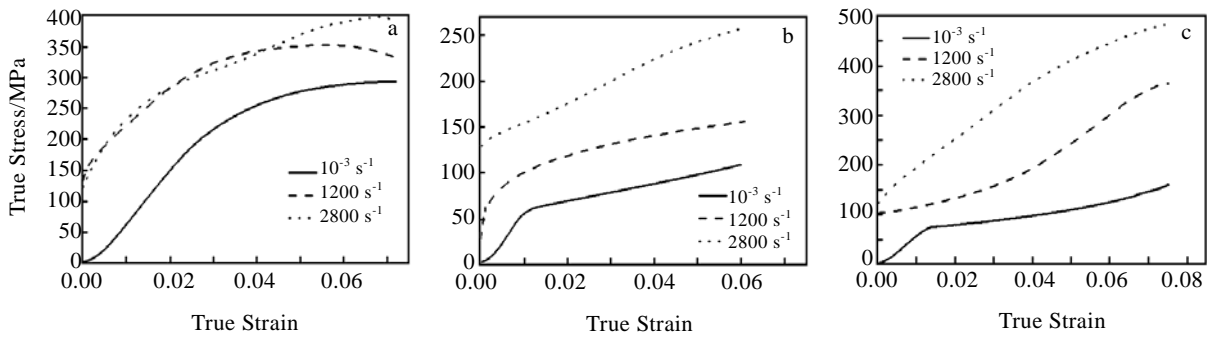


图 5 不同应变率下，压缩受力方向与轧制板面法向夹角分别为 0°, 45°, 90° 时试样的真应力-应变曲线

Fig.5 Compressive σ - ϵ curves of samples with different strain rates when the angle between compressive direction and the normal direction of the rolled sheet is 0°(a), 45°(b), and 90°(c)

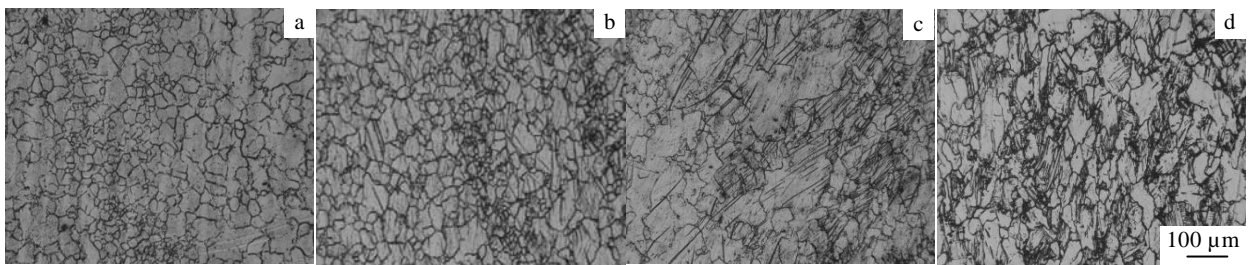


图 6 受力方向与轧制板面法向成 0° 时不同应变量下试样的组织形貌

Fig.6 Microstructure of samples with different strain amount when the angle between compressive direction and the normal direction of the rolled sheet is 0°: (a) $\epsilon=0.3\%$, (b) $\epsilon=2.6\%$, (c) $\epsilon=4.6\%$, and (d) $\epsilon=6.0\%$

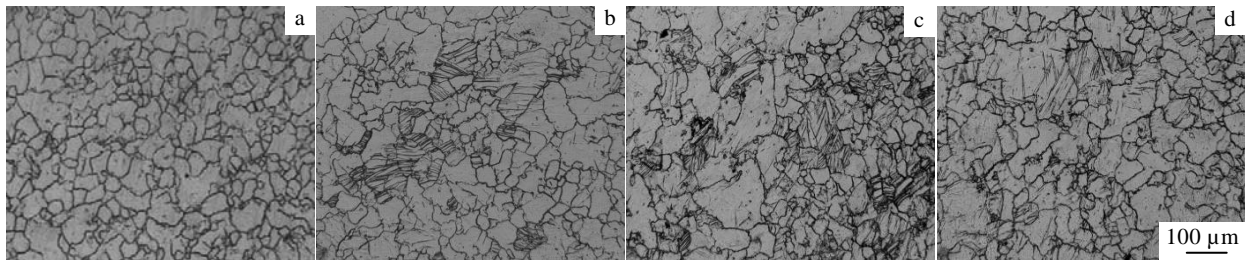


图 7 受力方向与轧制板面法向成 45° 时不同应变量下试样的组织形貌

Fig.7 Microstructure of samples with different strain amount when the angle between compressive direction and the normal direction of the rolled sheet is 45°: (a) $\epsilon=0.3\%$, (b) $\epsilon=2.6\%$, (c) $\epsilon=4.6\%$, and (d) $\epsilon=6.0\%$

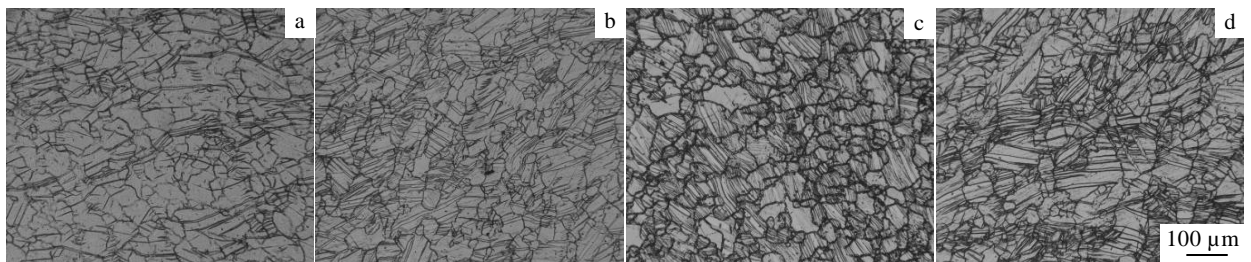


图 8 受力方向与轧制板面法向成 90° 时不同应变量下试样的组织形貌

Fig.8 Microstructure of samples with different strain amount when the angle between compressive direction and the normal direction of

the rolled sheet is 90°: (a) $\varepsilon=0.3\%$, (b) $\varepsilon=2.6\%$, (c) $\varepsilon=4.6\%$, and (d) $\varepsilon=6.0\%$

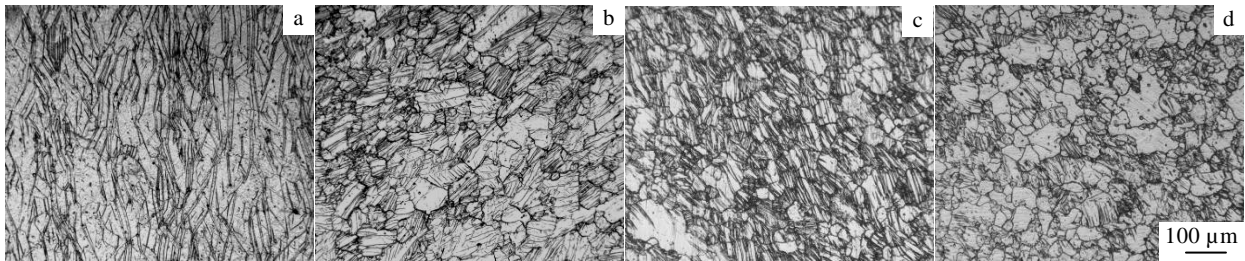


图9 受力方向与轧制板面法向成 90° 时不同应变率下试样的组织形貌

Fig.9 Microstructure of samples with different strain amount when the angle between compressive direction and the normal direction of the rolled sheet is 90°: (a) $\varepsilon=0.3\%$, (b) $\varepsilon=2.6\%$, (c) $\varepsilon=4.6\%$, and (d) $\varepsilon=6.0\%$

量从 2.6% 增大到 6.0% 过程中, 孪晶数量逐渐增多, 如图 6b~6d 所示。

由图 7a 可知, 加载应变率为 1200 s^{-1} 时, 在屈服点附近 (应变量为 0.3%), 同样也没有发现孪晶; 随着应变率增大到 2.6%, 如图 7b 所示, 只有少量的孪晶出现, 且集中分布在个别晶粒中; 当应变率从 2.6% 增大到 6.0% 时, 孪晶数量有较缓慢的增多, 如图 7c 和 7d 所示。

由图 8a 可知, 加载应变率为 1200 s^{-1} 时, 在屈服点附近 (应变量为 0.3%), 即有孪晶出现, 并且随着应变率增加孪晶量也有较快增加。

由图 9a 可知, 加载应变率为 2800 s^{-1} 时, 在屈服点附近 (应变量为 0.3%), 即有孪晶出现, 并且比加载应变率为 1200 s^{-1} 时相同应变率条件下的孪晶数量多; 当应变率增加到 2.6% 时, 孪晶量明显增加, 如图 9b 所示; 当应变率增大到 4.6% 时, 孪晶量增加相对缓慢, 如图 9c 所示; 当应变率进一步增大到 6.0% 时, 孪晶量反而减少, 如图 9d 所示。

结合图 4, 图 5 的动态力学曲线和图 6~图 9 中不同取样方向试样在不同应变率下的组织形貌分析可知: (1) 常温准静态下压缩受力方向与轧制板面的法向成 0° 时, 基面处于硬取向, 不利于形成拉伸孪晶。当应变率升为 1200 s^{-1} 时, 在屈服点附近没有发生孪生变形, 说明在此条件下变形以滑移为主。由于基面滑移处于硬取向而柱面滑移无法产生沿 c 轴方向的压缩塑性变形, 所以应该是锥面滑移, 对应于图 4b 中的压缩受力方向与轧制板面的法向成 0° 时屈服强度最高。随着应变率的增大, 孪晶数量逐渐增多, 但孪晶的绝对数量不是很多, 此时变形还是以滑移为主, 应变硬化程度由大变小, 流变曲线呈现凸形, 且不同应变率下曲线形状相近。(2) 常温准静态下压缩受力方向与轧制板面的法向成 45° 时, 大多数的晶粒取

向都有利于基面滑移而不利于形成拉伸孪晶。当应变率升为 1200 s^{-1} 时, 在屈服点附近同样也没有发生孪生变形, 说明动态加载下变形机制以滑移为主, 基面滑移系容易被激活, 由图 4b 可知其屈服强度最小。随着应变率的继续增大, 孪晶的数量逐渐增多, 但增多很缓慢。同时由于温升效应的产生可能使得滑移所起的作用比孪生大, 此时变形机制以滑移为主, 应力随应变呈近线性变化。(3) 常温准静态下压缩受力方向与轧制板面的法向成 90° 时, 由于在 AZ31 镁合金的轧制过程中产生 $\{0001\}$ 平行于轧面的基面织构, 此取样方向的试样受到压缩载荷时, 在变形开始阶段基面处于硬取向, 难以发生滑移, 孪生可以被激发, 此时晶粒内部的 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生是主要的形变机制^[9]。在加载应变率为 1200 s^{-1} 时, 随着应变率的增大孪晶数量逐渐增多, 此时变形机制以孪生为主, 且孪生与滑移之间复杂的相互作用, 使得应变硬化程度增大, 表现为流变曲线呈现凹形; 当加载应变率增大到为 2800 s^{-1} 时, 随着应变率的增加孪晶数量先增多后减少, 由于孪晶改变了晶体取向使不利于滑移的晶体取向变得有利, 同时由于变形量大产生的温升效应也使得原来不容易启动的柱面和锥面滑移系变得容易启动, 此时塑性变形机制由以孪生为主变为以滑移为主, 应变硬化程度减弱, 表现为流变曲线呈现凸形。

3 结 论

在冲击载荷作用下, 热轧态 AZ31B 镁合金力学行为具有明显的各向异性。在加载应变率为 1200 s^{-1} 时, 压缩受力方向与轧制板面的法向近似成 0° 时, 随着应变率的增大, 孪晶数量逐渐增多, 但孪晶的绝对数量不多, 变形以滑移为主, 应变硬化程度由大变小, 流变曲线呈现凸形; 压缩受力方向与轧制板面的法向近似成 45° 时, 随着应变率的增大, 孪晶数量逐渐增多

但增多很缓慢,变形仍是以滑移为主,应力随应变呈近线性变化;压缩受力方向与轧制板面的法向近似成 90° 时,随着应变量的增大,孪晶的数量逐渐增多,此时变形机制以孪生为主,且孪生与滑移之间复杂的相互作用,使得应变硬化程度增大,表现为流变曲线呈现凹形,此种取样方向时当加载应变率增大到为 2800 s^{-1} 时,随着应变量的增大孪晶数量反而减少,应变硬化程度减弱,流变曲线由应变率为 1200 s^{-1} 时的凹形变为凸形。

参考文献 References

- [1] Mordike B L, Ebert T. *Materials Science and Technology: A*[J], 2001, 302 (1): 37
- [2] Aghion E, Bronfin B. *Materials Science Forum*[J], 2000, 19: 350
- [3] Robert Vanfleteren. *Advanced Materials and Processes*[J], 1996, 5: 33
- [4] Furuya H, Kogiso N, Matunaga S *et al. Material Science Forum*[J], 2000, 341: 350
- [5] Friedrich H, Schumann S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 117(3): 276
- [6] Jan Bohlen, Numberg M R, Senn J W *et al. Acta Materialia*[J], 2007, 55: 2101
- [7] Kleiner S, Uggowitzer P J. *Materials Science and Engineering: A* [J], 2004, 379(1~2): 258
- [8] Cai Hongnian(才鸿年), Tan Chengwen(谭成文), Wang Fuchi(王富耻). *Engineering Science*(中国工程科学)[J], 2006, 8(2): 30
- [9] Hu Yisong(胡轶嵩), Yang Ping(杨平), Zhao Zude(赵祖德) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(1): 105

Research on the Anisotropy of Hot Rolled AZ31B Alloy at High Strain Rates

Wu Yuanyuan, Tan Chengwen, Yang Yongbiao, Wang Fuchi, Cai Hongnian
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Dynamic compressive performances of hot rolled AZ31B which have different angles between the compressive direction and the normal direction of the rolled sheet were tested using SHPB and strain control techniques. The mechanism of the plastic deformation at different strain amount was studied. Results indicate that when the strain rate is 1200 s^{-1} , the twin number of samples in different orientation increases with plastic strain increasing; when the strain rate increases to 2800 s^{-1} , the σ - ε curves have no obvious changes as the angle is 0° and 45° , compared with that at 1200 s^{-1} ; however the σ - ε curves vary from concave to convex when the angle is 90° , because thermal softening has occurred with increasing plastic strain, which results in the number of twin decreasing, and smaller strain hardening.

Key words: AZ31B alloy; anisotropy; mechanism of plastic deformation; number of twin

Biography: Wu Yuanyuan, Candidate for Master, Department of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68916672, E-mail: wyy0117@gmail.com