2016年7月 July 2016

文章编号: 1004-0609(2016)-07-1365-07

# 再时效处理对 2219-T6 铝合金 叉形环显微组织和力学性能的影响



黄元春<sup>1,2</sup>, 王也君<sup>1,2</sup>, 肖政兵<sup>1,2</sup>, 任贤魏<sup>1,2</sup>, 许天成<sup>1,2</sup>, 李 音<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室,长沙 410083;2. 中南大学 轻合金研究院,长沙 410083)

**摘 要:**通过扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和室温拉伸性能测试等分析方法,研究再时效处理对 2219-T6 铝 合金叉形环显微组织与力学性能的影响。结果表明:在170℃下再时效12h时,构件抗拉强度达到406 MPa,屈 服强度达到314 MPa,伸长率为8%,其力学性能和成形性的综合效果最佳。延长时效时间,与(170℃,12h)时 效态相比,第二相粒子出现明显的团聚现象,晶界无析出带(PFZ)宽度增加,合金中析出相长宽比减小,θ"相含量 下降,大部分转变成亚稳相θ,部分生成粗大的平衡相θ,其力学性能明显下降。

**关键词:** 2219 铝合金; 叉形环; 再时效; 显微组织; 力学性能 中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A

2219 铝合金是一种典型 Al-Cu 系高强合金,该合 金具有质量轻、强度高以及较好的耐蚀性和成形性, 广泛应用于航天航空、轨道交通、汽车制造及建材等 领域中。目前,我国已将该合金用于制造航天产品中 的重要零件——叉形环,该零件的特点是壁薄、直径 大,对强度、塑性及其成形性有着较高的要求<sup>[1]</sup>。

为了进一步提高 Al-Cu 合金的综合性能,研究人 员从合金元素、热变形行为、时效热处理等方面进行 了大量的研究。如随着 Cu 元素的含量的增加,Al 基 体晶粒逐渐由柱状晶向枝状晶转变,晶粒生长方向慢 慢向(110)向靠近<sup>[2]</sup>。在 Al-Cu 合金中, 添加微量 Mn 元素可改善晶粒组织结构、降低合金各向异性;添加 少量 Zn 可产生固溶强化和时效强化作用,并能显著 提高耐腐蚀性能<sup>[3]</sup>。Al-Cu 合金强变形过程中,由于材 料内部产生高密度位错,会发生析出相变形断裂以及 低温回溶现象<sup>[4]</sup>。时效处理是改善 Al-Cu 合金显微组 织和提高强度的重要手段,早期研究集中在时效温度 和时间对合金组织和性能的影响,一般在150~210℃ 之间进行时效,发现 170 ℃时效时,GP 区回溶,θ" 相向 θ'相转变,样品在较宽的时间范围内两相共存, 处于近峰时效态;当温度高于190℃,合金容易进入 过时效状态[5-6]。由于单纯的时效处理在提高强度的同 时往往牺牲了塑性,人们开始采用时效+冷变形+再时

目前关于 Al-Cu 系合金的再时效处理的报道比较 少,其显微组织、力学性能的映射关系还没有系统性 的研究。本文作者研究了再时效处理对 2219-T6 铝合 金叉形环显微组织及其力学性能的影响,并对其机理 进行了探讨,为探索制备高强 2219 铝合金叉形环提供 理论与实际指导。

## 1 实验

所用的材料来自国内某厂提供的 2219 大直径薄 壁整体叉形环,其化学成分如表 1 所列。工艺流程为 粗加工+时效(T6)+精加工+再时效。其中第一次时效温 度为 170 ℃,时效时间为 10 h,室温冷水淬火,淬火 转移时间不超过 10 s。再时效在 170 ℃下进行,时间 分别控制为 10 h、12 h 和 15 h。

效工艺,现有报道 2519A-T87 铝合金经 35%冷变形后 采用(100 ℃,4 h)再时效处理,屈服强度和抗拉强度 基本不变,而伸长率提升了 20%左右<sup>[7]</sup>。再时效处理 在 7XXX 系铝合金中有广泛的应用,其优点在于能提 高铝合金的塑性和应力腐蚀抗力,而不降低合金的强 度,如 7075 铝合金经回归再时效处理后其强度、塑性 和应力腐蚀抗性均优于 T6 状态的<sup>[8]</sup>。

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB619504) 收稿日期:2016-01-13;修订日期:2016-05-03 通信作者:黄元春,教授,博士;电话:13507315123; E-mail: science@csu.edu.cn

<b>众 1</b> 2219 11日 亚时化子风况

 Table 1
 Chemical composition of 2219 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	V
0.19	0.3	6.32	0.28	0.026	0.062
Zr	Zn	Ti	Cr	В	Al
0.12	0.028	0.042	0.003	0.021	Bal.

采用 TecnaiG<sup>2</sup>20 型分析电镜观察时效态显微组 织,加速电压为 200 kV,透射样品直径为 3 mm,厚 度不超过 0.08 mm,在 MIT-II 型双喷电解仪上用 70%CH<sub>3</sub>OH+30%HNO<sub>3</sub>(体积分数)溶液双喷减薄,采 用液氮冷却,双喷温度控制在-25~-30 ℃,电解电压 控制在 20 V 左右。

拉伸实验在每个时效态下分别取 3 个样,按照 GB/T16865-2013 规定加工拉伸试样,如图 1 所示。 在 CSS-44100 型电子万能试验机上进行拉伸性能测 试,拉伸速率为 2 mm/min, 3 次实验结果取平均值作 为最终的实验结果。

## 2 结果与分析

#### 2.1 扫描电镜组织分析

2219-T6 铝合金叉形环经过不同再时效处理的第 二相粒子形貌分布以及析出相能谱如图 1 所示。从图 1 中观察可知,第二相粒子的粒径平均值为 5 µm,随 着时效时间的延长,其的形貌、数量及分布情况发生 了明显变化。与 T6 态相比,再时效 10 h 后的样品中 第二相粒子的数量明显增加;当再时效时间由 10 h 到 12 h 时,第二相粒子尺寸变化不明显,数量略有增多; 采用(170℃,15 h)再时效处理,第二相粒子尺寸发生 明显粗化,并且呈现出团聚的趋势(见图 1(d))。由于 析出相团聚,构件在塑性变形时易在析出相与合金基 体结合处发生变形不协调,导致微裂纹的产生,在应 力的作用下位错容易集中在微裂纹区,引起晶间断裂, 严重影响合金力学性能<sup>[9–10]</sup>。通过能谱测试分析,第 二相粒子主要组成元素为 Al 和 Cu,摩尔比约为 2:1,



Cu

8

Energy/keV

10

12

14

Mn<sup>Fe</sup>

6

4

2

0



推断其应该是一些较为粗大的 CuAl<sub>2</sub>相。

#### 2.2 透射电子显微分析

2.2.1 时效时间对晶界的影响

图 2 所示为 2219-T6 铝合金叉形环经不同再时效 处理的晶界状况图。晶界和晶界附近的基体内的沉淀 相析出,会导致晶界附近溶质原子浓度和空位浓度降 低,形成晶界无析出带(PFZ)。从图 2 中可见,经



图 2 3 种时效态试样的晶界状况

Fig. 2 Feature on grain boundary of samples aged at 170  $^{\circ}$ C for different aging time: (a) T6+(170  $^{\circ}$ C, 10 h); (b) T6+(170  $^{\circ}$ C, 12 h); (c) T6+(170  $^{\circ}$ C, 15 h)

(170℃,10h)处理后,无明显的晶界无析出带,在晶 界有呈链条状连续分布的析出相(见图 2(a));再时效 12h,有较明显的晶界无析出带,宽度约为40nm(见 图 2(b));到15h,PFZ宽度约140nm,晶界上有较粗 大且完全不连续分布的析出相(见图 2(c))。随着时效的 进行,PFZ宽度增加,合金晶界处的析出相明显粗化, 断续分布程度增加,基本呈孤立分布。一般情况下, 细小弥散的共格或半共格析出相和一定宽度的PFZ有 利于合金强度和腐蚀抗性的提高,但当PFZ宽度太大 后,就会降低力学性能。因为无沉淀析出带的屈服强 度较低,在应力的作用下位错容易集中在无沉淀带内, 引起晶间断裂,导致塑性的降低<sup>[10]</sup>。

2.2.2 时效时间对沉淀析出相的影响

2219-T6 铝合金叉形环经不同再时效处理的 TEM 像及其对应的衍射花样如图 3 所示。从图 3(a)、(c)和 (e)中可以看出,随着时效时间的延长,合金的析出相 衬度变深,部分析出相发生粗化,尺寸变得不均匀, 各析出相间的形貌差别很大。经(170 ℃,12 h)处理后, 合金中析出相较为均匀、细小且密集,其中衬度较低 的是 θ"相,长度约为 40~80 nm,厚 2~4 nm, θ"相在 衍射花样中表现为铝基体衍射斑周围的"芒线"结构; 衬度较高的为 θ'相, θ'相大约 80~120 nm, 6~10 nm 厚, θ'相在衍射花样为"十字花"形结构,如图 3(b)中箭头 所指为 θ'相的(110)面衍射斑点<sup>[11-12]</sup>。

2219 铝合金的典型析出过程为: α 过饱和固溶体 →GP  $\boxtimes$ → $\theta$ "相(CuAl<sub>3</sub>)→ $\theta$ '相(CuAl<sub>2</sub>)→ $\theta$  相(CuAl<sub>2</sub>)<sup>[13]</sup>。 在此过程中, GP 区、 $\theta$ "相与 Al 基体共格,  $\theta$ 相与 Al 基体半共格, 使基体发生晶格畸变, 阻碍位错运动, 对合金强度的提高有促进作用;  $\theta$ 相 Al 基体完全不共 格,没有一个匹配很好的界面,对合金性能产生不利 影响<sup>[11, 14]</sup>。经过(170 ℃, 10 h)再时效处理,在铝基体 衍射斑周围形成了"芒线"结构,而"十字花"形的典型 θ'相斑点较弱(见图 3(b)),可见此时合金中只形成了少 量的 θ'相, 析出相种类大多为 θ"相。采用(170 °C, 12 h)再时效处理,可以观察到清晰可见的"十字花"形结 构和"芒线"结构(见图 3(d)),说明合金中的 $\theta$ 相和 $\theta$ " 相都得到了充分的析出。经过(170 ℃, 15 h)再时效处 理,在铝基体衍射斑四周出现了"十字花"结构,而未 见明显的"芒线"结构(见图 3(f)),可见合金中的 θ"相数 量减少,转变成为相对稳定的 θ'相。

有研究学者用 CuAl<sub>2</sub>相的长宽和宽度的比值来表 征析出相的析出状态<sup>[15-16]</sup>。平衡相 θ 尺寸较大,在透 射照片中表现为宽度较大,长宽比很小,一般在 3 左 右;而亚稳相 θ 相在照片中表现为比较细长,长宽比 较大,一般在 10 以上,通过分析得出相长宽比,可以



图3 3种时效态试样的析出相和衍射图

**Fig. 3** Aging precipitate phase and diffraction patterns of 3 specimens at different states: (a), (b) T6+(170  $^{\circ}$ C, 10 h); (c), (d) T6+(170  $^{\circ}$ C, 12 h); (e), (f) T6+(170  $^{\circ}$ C, 15 h)

判断析出相的状态及其强化作用效果。用 ImageJ 软件 计算 2219 铝合金叉形环不同时效态下 TEM 像的析出 相尺寸和析出相体积分数,结果如表 2 所列。计算结 果表明:随着再时效时间的延长,构件中析出相体积 分数不断增大,长宽比持续下降,粗化现象明显。再 时效时间由 10 h 增加到 12 h,合金的析出相体积分数 增大了近 1 倍,说明采用(170 ℃, 10 h)时效处理时, 铝合金时效不充分,远没有达到峰值时效时间。再时 效时间由 12 h 增加到 15 h,析出相体积分数由 7.98% 上升到 8.12%,但对比图 3(c)和(e),析出相数量反而 有所减少,其原因是大量 θ"相转变成 θ'相,由于 θ'相 的尺寸比 θ"相粗大,生成 θ'相会使得合金中细小弥散 的 θ"相的数量大幅度减少;此时析出相长宽比从 11.1 下降到 9.7,说明合金析出相发生粗化,亚稳相 θ'相开

#### 表2 合金析出相尺寸与体积分数统计

 Table 2
 Statistical results of precipitates size and volume fraction

-				
Aging condition		Aspect ratio	Volume fraction/%	
	T6+(170 ℃, 10 h)	12.6	4.69	
	T6+(170 ℃, 12 h)	11.1	7.98	
	T6+(170 ℃, 15 h)	9.7	8.12	

始向稳定相 θ 相转化。综上, 2219-T6 铝合金叉形环 经过(170 ℃, 12 h)再时效处理时,合金中存在大量的 θ"相和部分 θ'相,随着时效的进行,细小弥散的 θ"相 转变为 θ'相,失去由 θ"相带来的强化效果;小部分 θ' 相在时效过程中发生粗化,转变成为与基体非共格的 θ 相。对于单独析出相种类来说 θ'相的强化效果要优 于 θ"相的,但大量弥散分布的 θ"相和部分细小孤立分 布的 θ'相更加有利于改善合金的力学性能<sup>[17]</sup>,使合金 的强度最接近峰时效态。

#### 2.3 力学性能

图 4 所示为 2219-T6 铝合金叉形环经不同再时效

处理的应力-应变曲线和抗拉强度、屈服强度以及伸 长率的变化趋势。每个时效态下分别做3个平行样, 用红色、蓝色和黑色曲线表示,如图 4(a)、(b)和(c)所 示。分析图 4 可以得出: 随着时效时间从 10 h 延长到 15 h, 构件的伸长率从 9%降为 5.5%, 与此同时伸长 率在 12~15 h 的降低速率大于 10~12 h, 呈现出加速下 降的趋势; 该构件抗拉强度由原来的 340 MPa 先升高 406 MPa 然后微降到 403 MPa, 屈服强度同样由 225 MPa 先升高到 314 MPa 然后微降到 312 MPa, 抗拉强 度值和屈服强度值在再时效 12 h 时均达到峰值。再时 效处理 10 h 时,从图 3(a)可以观察到,合金中只含有 少量的 $\theta$ "强化相, 析出不充分, 时效强化效果不明显, 导致构件的强度值较低,但是,分析图 1(b)得出该时 效态下第二相粒子的弥散分布,使得构件具有较为优 良的伸长率。再时效处理 12 h 时,从图 3(c)结合分析 得出,合金中存在大量的弥散分布 θ"相和部分细小孤 立分布 $\theta$ 相,这两种细小的析出相有助于改善基体的 性能,构件的强度值出现明显的提高,时效强化效果 明显;在该时效态下,晶界无析出带宽度约为40nm, 第二相粒子分布数量较多且较为均匀,如图 1(c)所示,



图 4 试样在 170 ℃下时效的应力--应变曲线与力学性能--时间曲线

**Fig. 4** Mechanical properties and stress-strain curves of samples treated at 170 °C for different aging time(Each aging state sample was tested three times and the curves were labeled as red, blue and black, respectively): (a) T6+(170 °C, 10 h); (b) T6+(170 °C, 12 h); (c) T6+(170 °C, 15 h); (d) Effect of aging time on mechanical properties

这些粒子对晶界起到钉扎作用,材料的塑性变形能力 下降,伸长率略有降低,但是综合力学性能较为优异。 再时效处理 15 h 时,从图 3(e)结合分析得出,合金中 的析出相主要为 θ'相和与基体不共格的 θ 相,粗大的 θ 相对合金的力学性能产生负面影响,而 θ'相的强化 效果却优于 θ"相,两种因素对构件的强度共同产生影 响,使得构件的强度值出现略微的下降; PFZ 宽度为 140 nm,在应力的作用下位错容易集中在过宽的 PFZ 带内,引起晶间断裂,第二相粒子出现明显粗化、团 聚现象,易在与基体结合处发生变形不协调,形成微 裂纹,上述两点显著降低了构件的伸长率,使其呈现 出加速下降的趋势,导致塑性降低出现了过时效现象。 综上所述,在 170 ℃下再时效 12 h,构件的抗拉强度 和屈服强度分别为 406 MPa 和 314 MPa,伸长率达到 8%,综合性能最优,如表 3 所列。

#### 表3 合金在不同时效态下的力学性能

 Table 3
 Mechanical properties of samples with different aging time

Aging condition	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	$\sigma_{0.2}/\mathrm{MPa}$	$\delta_5$
T6+(170 ℃, 10 h)	$340\pm10$	$225\!\pm\!15$	9%±1%
T6+(170 °C, 12 h)	$406\pm3$	$314\pm10$	8%±1%
T6+(170 ℃, 15 h)	$403\!\pm\!5$	$312 \pm 15$	5.5%±1%

# 3 结论

再时效时间对合金微观组织有显著的影响,时间由 10h增加到 12h,合金中析出相体积分数增大,存在大量弥散分布的θ"相和细小孤立分布的θ'相,晶界无析出带宽度增加,使合金的抗晶间腐蚀性能得以改善。

当再时效时间延长至 15 h,第二相粒子出现明显的团聚现象,晶界无析出带宽度大幅增加,合金中析出相长宽比减小,θ"相含量下降,大部分转变成亚稳相 θ,部分生成粗大的平衡相 θ,此时合金时效强化效果不佳。

3) 2219-T6 铝合金叉形环的力学性能与再时效时 间有明显的映射关系,随着时效过程进行,伸长率逐 步下降,抗拉强度和屈服强度表现出先增大再减小的 趋势。经过(170℃,12h)再时效处理,构件抗拉强度 达到 406 MPa,屈服强度为 314 MPa,伸长率为 8%, 其力学性能及成形性的综合效果最佳。

#### REFERENCES

- [1] AN L H, CAI Y, LIU W, YUAN S J, ZHU S Q, MENG F C. Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2): s370-s375.
- [2] CHEN T J, LI X W, GUO H Y, HAO Y. Microstructure and crystal growth direction of Al-Cu alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1399–1409.
- [3] 程 彬,郑子樵,范春平,钟继发,韩 烨,孙景峰. 时效制 度对新型 Al-Cu-Li 合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属 学报, 2014, 24(4): 926-933.
  CHENG Bin, ZHENG Zi-qiao, FAN Chun-ping, ZHONG Ji-fa, HAN Ye, SUN Jing-feng. Effect of aging treatments on

HAN Ye, SUN Jing-reng. Effect of aging treatments on microstructures and properties of new Al-Cu-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 926–933.

[4] 胡 楠, 许晓嫦, 张孜昭, 屈 啸. 强变形诱导析出相回溶对 Al-Cu 合金力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10):1922-1931.

HU Nan, XU Xiao-chang, ZHANG Zi-zhao, QU Xiao. Effect of re-dissolution of severely deformed precipitated phase on mechanical properties of Al-Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 1922–1931.

- [5] JANG J H, NAM D G, PARK Y H, PARK I M. Effect of solution treatment and artificial aging on microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 631–635.
- [6] SU D Y, JIN H J, WU S J. Microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy VPTIG welds during cyclic thermal treatment[J]. Rare Metals, 2015: 10.1007/S12598-015-0642-y.
- [7] 孙大翔,顾 刚,叶凌英,张新明. 冷变形与再时效处理对 2519A-T87 铝合金板材力学性能和微观组织的影响[J]. 中南 大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4145-4151.
  SUN Da-xiang, GU Gang, YE Ling-ying, ZHANG Xin-ming.
  Effect of cold deformation and reaging on microstructures and mechanical properties of 2519A-T87 alloy plate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(12): 4145-4151.
- [8] SU R M, QU Y D, LI R D, YOU J H. Influence of RRA treatment on the microstructure and stress corrosion cracking behavior of the spray-formed 7075 alloy[J]. Materials Science, 2015, 51(3):372–380.
- [9] 马 征. 冷变形及时效对 2219 铝合金组织性能的影响规律[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

MA Zheng. Influence of cold deformation and aging on microstructure and properties of aluminum alloy 2219[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

- [10] 毛 健, 李利华, 张晓敏, 卢锦德, 涂铭旌. 时效时间对新型 高强铸造 Al-Cu-Mn 合金性能和微观组织的影响[J]. 四川大 学学报(工程科学版), 2011, 43(4): 227-231.
  MAO Jian, LI Li-hua, ZHANG Xiao-ming, LU Jin-de, TU Ming-jing. Influence of aging time on mechanical properties and microstructures of Al-Cu-Mn casting aluminum alloy[J]. Journal of Sichuan university (Engineering Science Edition), 2011, 43(4): 227-231.
- [11] 顾 刚, 叶凌英, 张新明, 蒋海春, 孙大翔, 张 盼. 断续时 效对 2519A 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属 学报, 2013, 23(8): 2098-2103.

GU Gang, YE Ling-ying, ZHANG Xin-ming, JIANG Hai-chun, SUN Da-xiang, ZHANG Pan. Effects of interrupted ageing on microstructure and mechanical properties of 2519A aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2098–2103.

- [12] FONDA R W, BINGERT J F. Microstructural evolution in the heat-affected zone of a friction stir weld[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(5): 1487–1499.
- [13] MASSALSKI T. The Al-Cu (aluminum-copper) system[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 1980, 1(1): 27–31.
- [14] RAGHAVAN V. Al-Cu-Si (aluminum-copper-silicon)[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2010, 31(1): 39–40.
- [15] GAO Zhi-guo, ZHANG Xin-ming, MIN-GAN C. Influence of strain rate on the precipitate microstructure in impacted aluminum alloy[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(9): 983–986.
- [16] GAO Zhi-guo, ZHANG Xin-ming, MIN-GAN C. Investigation on θ' precipitate thickening in 2519A-T87 aluminum alloy plate impacted[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2009, 476(12): 1–3.
- [17] WYSS R K, SANDERS R E. Microstructure-property relationship in a 2xxx aluminum alloy with Mg addition[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(10): 2523–2530.

# Effect of reaging on microstructures and mechanical properties of 2219-T6 alloy fork-like ring

HUANG Yuan-chun<sup>1,2</sup>, WANG Ye-jun<sup>1,2</sup>, XIAO Zheng-bing<sup>1,2</sup>, REN Xian-wei<sup>1,2</sup>, XU Tian-cheng<sup>1,2</sup>, LI Yin<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The effects of reaging on the microstructures and mechanical properties of 2219-T6 alloy fork-like ring were investigated by tensile test, scanning electron microcopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that after reaging at 170 °C for 12 h, the tensile strength, yield strength and elongation of the fork-like ring are 406 MPa, 314 MPa, 8%, respectively. Increasing the aging time, the mechanical properties of the alloy has fallen greatly because of denser precipitates and wide precipitate free zones (PFZ). Compared to aging treatment (170 °C, 12 h), the aspect ratio of precipitates decreases and large number of  $\theta''$  precipitates transform into  $\theta'$  precipitates, some of that become thick  $\theta$  precipitate.

Key words: 2219 aluminum alloy; fork-like ring; reaging; microstructures; mechanical property

Foundation item: Project(2012CB619504) supported by the National Basic Research Program of China Received date: 2016-01-13; Accepted date: 2016-05-03

Corresponding author: HUANG Yuan-chun; Tel: +86-13507315123; E-mail: science@csu.edu.cn

(编辑 王 超)