

# Al-Mg-Sc 和 Al-Mg-Er 合金的组织与性能

傅乐<sup>1</sup> 雷学锋<sup>1,2</sup> 尹志民<sup>1</sup> 黄继武<sup>1</sup>

(1 中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 采用铸造—轧制—稳定化退火技术制备了 Sc 含量为 0.10wt% 和 Er 含量为 0.25wt% 的两种 Al-Mg 合金薄板,研究了不同处理工艺下两种合金板材拉伸性能、剥落腐蚀性能和显微组织的变化规律。结果表明,两种合金冷轧板材稳定化退火过程中拉伸性能有相同的变化规律,即随着退火温度升高,板材强度下降而塑性升高,Sc 含量为 0.10wt% 的合金 350℃/1 h 退火仍然表现出很强的抗退火软化能力,而 Er 含量为 0.25% 的合金当退火温度高于 280℃ 后迅速软化;300℃/1 h 退火条件下,含 Sc 合金和含 Er 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 424 MPa、314 MPa、18.3% 和 350 MPa、177 MPa、29.1%;与此同时,随退火温度的升高,板材抗剥落腐蚀的能力也表现出相同规律性的变化,即 200℃/1 h 左右退火时剥落腐蚀最严重,随着退火温度升高,腐蚀抗力增加,两种合金板材经 280℃ 以上 1 h 稳定化退火后,合金板材可以获得较好的抗剥落腐蚀性能;其次,与 Sc 含量为 0.25wt% 的 5B70 合金相比,研制的 Sc 含量为 0.10wt% 合金综合性能接近 5B70 合金,而这种合金的 Sc 含量只有 5B70 合金的 40%,能显著降低合金的制造成本,预示着低 Sc 含量的合金在航天领域有良好的开发应用前景。

**关键词** Al-Mg, Sc, Er, Zr, 5B70, 5A06, 拉伸性能, 剥落腐蚀, 抗退火软化能力

## Microstructure and Properties of Al-Mg-Sc and Al-Mg-Er Alloys

Fu Le<sup>1</sup> Lei Xuefeng<sup>1,2</sup> Yin Zhimin<sup>1</sup> Huang Jiwu<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Two Al-Mg alloys plate with 0.10wt% Sc and 0.25wt% Er are prepared by casting-rolling-annealing technology. The variation of tensile properties, corrosion properties and microstructure of the two alloys at different treated condition was studied. The results show that the first, during annealing two alloys have same variation rule of microstructure and properties, i. e. with the increase of annealing temperature, the strength decrease but the ductility increase. At 350℃/1 h annealing the alloy with 0.10wt% Sc shows strong annealing softening-resistant ability, but the alloy with Er become soft when the annealing temperature is higher than 280℃; at 300℃/1 h annealing condition, the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy with 0.10wt% Sc and 0.25wt% Er are 424 MPa, 314 MPa, 18.3% and 350 MPa, 177 MPa, 29.1%, respectively. Meanwhile, the exfoliation corrosion resistance of the two alloys show the same variation rule, i. e. at 200℃/1 h annealing the exfoliation corrosion resistance of the two alloys is the least, then with increase of annealing temperature, the resistance increase. After 280℃ annealing for an hour, two alloys can get excellent exfoliation corrosion resistance. Compared with 5B70 alloy, tensile properties, corrosion properties and annealing softening-resistant ability of the alloy with 0.25wt% Sc is similar to 5B70 alloy, but its manufacture cost decreased, which shows good developing foresight on space vehicle.

**Key words** Al-Mg, Sc, Er, 5B70, 5A06, Tensile property, Exfoliation corrosion, Annealing softening-resistant ability

收稿日期:2012-07-25;修回日期:2012-11-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB619503)

作者简介:傅乐,1988 年出生,硕士研究生,主要从事高性能铝合金研究。E-mail:prettyboyfule@163.com

## 0 引言

Al-Mg 系合金有中等强度、优良的塑性、耐腐蚀性、可焊性和加工成型性,这类合金主要通过 Mg 的固溶强化和亚结构强化来提高强度,其中 Mg 含量最高的 5A06 合金(主成分为 Al-6Mg-0.4Mn)强度最高,被广泛用作航天结构材料。为了进一步提高这种合金的强度特别是屈服强度,研究工作者大都采用添加过渡族元素复合微合金化的方式来强化合金<sup>[1-6]</sup>,其中 5B70 合金(主成分为 Al-6Mg-0.4Mn-0.25Sc-0.12Zr)已经由东北轻合金有限责任公司研制成功并且应用于航天领域。为了进一步降低合金成本,本文在实验室条件下制备了 Sc 含量为 0.10wt% 和 Er 含量为 0.25wt% 的两种 Al-Mg 合金薄板,对比研究了稳定化退火工艺对两种合金板材拉伸性能、剥落腐蚀性

能和显微组织的影响,旨在为低 Sc 含量和低 Er 含量的 Al-Mg 合金在航天上的开发和应用提供实验依据。

## 1 实验

合金成分见表 1。原料采用纯铝、纯镁,微合金化用的 Mn、Sc、Er、Zr、Ti 和 Be 以 Al-8.5% Mn、Al-2.0% Sc、Al-10% Er、Al-4.48% Zr、Al-4.0% Ti 和 Al-2Be 中间合金形式加入。熔炼在石墨坩埚炉内进行,730~740℃ 铸造,扁锭尺寸为 50 mm×160 mm×350 mm。铸锭切头—去尾—铣面到 48 mm×150 mm×300 mm,均匀化后由 48 mm 热轧至 7 mm,热轧变形量为 85%,再由 7 mm 冷轧至 2 mm,冷轧变形量为 71%。板材稳定化热处理在马弗炉中进行,温度误差±2℃。稳定化退火温度为室温~350℃,退火时间为 1 h。

表 1 合金的化学成分

Tab. 1 Composition of experimental alloys

合金	Mg	Mn	Sc	Er	Zr	Ti	Be	Fe	Si	Al
1 <sup>#</sup>	6.10	0.40	0.10	-	0.12	0.03	0.0025	0.20	0.12	余量
2 <sup>#</sup>	6.10	0.40	-	0.25	0.12	0.03	0.0025	0.20	0.12	余量

拉伸性能测试在 MTS 电子万能材料试验机上进行,试验按 GB/T 228—2010 标准进行,每个状态取 3 个试样,拉伸速率为 2 mm/min。剥落腐蚀试验按 GB/T 22639—2008 标准进行,试样尺寸为 2 mm×25 mm×30 mm。金相试样经机械磨制抛光后用经 Kellel 水溶液腐蚀后观察。TEM 试样经机械减薄至 80 μm 后在 30vol% 硝酸+70vol% 甲醇的电解溶液中双喷减薄,温度为-20℃,在 TECNAIG20 电镜下观察显微组织,加速电压 200 kV。

## 2 试验结果

### 2.1 稳定化退火工艺对合金板材力学性能的影响

热轧、冷轧和冷轧后稳定化退火工艺对研究合金板材力学性能的影响见表 2。结果表明,两种合金冷轧板材稳定化退火过程中有相同的力学性能变化规律,即随着退火温度升高,板材强度下降而塑性升高,300℃/1 h 稳定化退火条件下,1<sup>#</sup>合金抗拉强度、屈服强度和伸长率仍然高达 424 MPa、314 MPa 和 18.3%,表现出很强的抗退火软化能力,有很好的开发应用前景。而 2<sup>#</sup>合金当退火温度高于 280℃ 后迅速软化,经 300℃/1 h 退火后抗拉、屈服强度分别下降到 350 MPa、177 MPa,而伸长率则达到 29.1%。

表 2 不同热处理状态两种合金板材的拉伸性能

Tab. 2 Tensile properties of experimental alloys at different treated conditions

处理状态	1 <sup>#</sup> 合金			2 <sup>#</sup> 合金		
	$R_m$ /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	$A$ /%	$R_m$ /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	$A$ /%
热轧	391	265	23	358	193	26.8
冷轧	515	436	7.6	499	404	8.8
130℃/1 h 退火	468	375	12.9	450	341	14.8
200℃/1 h 退火	451	337	14.2	433	312	17.1
250℃/1 h 退火	432	325	15.2	405	286	19.3
280℃/1 h 退火	426	316	16.4	405	283	19.5
300℃/1 h 退火	424	314	18.3	350	177	29.1
320℃/1 h 退火	414	308	20.6	335	172	29.8
350℃/1 h 退火	412	307	20.8	334	170	30.3

## 2.2 稳定化退火工艺对合金板材剥落腐蚀性能的影响

稳定化退火对合金板材剥落腐蚀性能影响见表3和图1。可以看出,两种合金板材经稳定化退火后剥落腐蚀具有相同的变化规律,即冷轧态和低于250℃退火处理的合金板材抗剥落腐蚀性能差,出现分层,经200℃/1h退火处理后两种合金均产生ED级别的剥落腐蚀。经200℃以上退火处理后抗剥落腐蚀性能显著增强,两种合金均只出现点蚀。经280℃以上1h稳定化



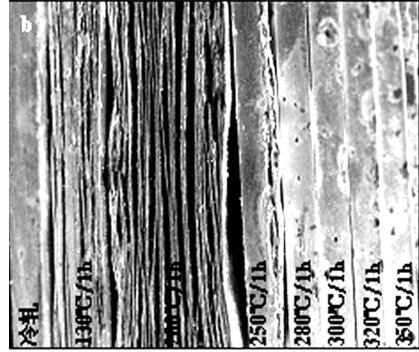
(a) 1#合金

落腐蚀性能。

表3 不同稳定化退火温度下剥落腐蚀级别评定

Tab.3 Exfoliation corrosion of experimental alloys at different annealing conditions

合金	稳定化工艺/℃·h <sup>-1</sup>							
	冷轧	130℃	200℃	250℃	280℃	300℃	320℃	350℃
1#	EA	EA	ED	PC	PA	PA	N	N
2#	PA	EB	ED	PC	PA	PA	N	N



(b) 2#合金

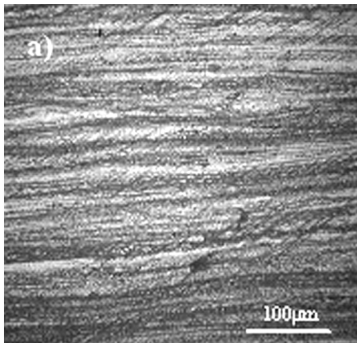
图1 不同稳定化退火条件下试验合金的剥落腐蚀

Fig.1 Corrosion morphologies of exfoliation corrosion for the two alloys

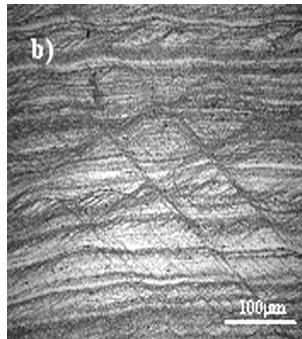
## 2.3 稳定化退火工艺对合金板材金相显微组织的影响

在金相显微镜下观察,稳定化退火对合金冷轧板材金相显微组织的影响见图2。结果表明,两种合金冷轧板材均为沿轧制方向的纤维状组织,300℃以下退火,1#合金金相组织中可以观察到轧制变形过程中

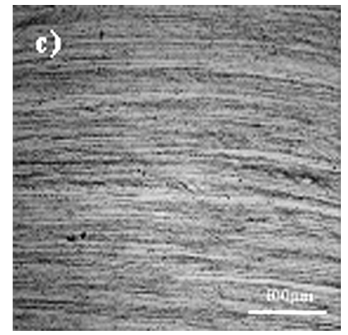
遗留下来的交叉滑移带,而2#合金经300℃/1h退火后基体发生回复和部分再结晶,交叉滑移带逐渐消失。当退火温度达350℃时,1#合金交叉滑移带基本上消失但仍然呈现出纤维状组织,而2#合金则已发生再结晶,而且再结晶晶粒细小。



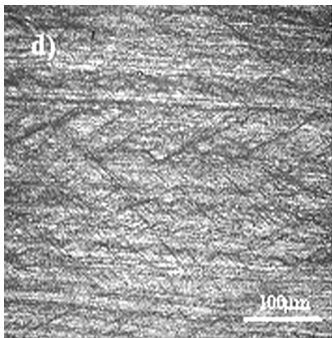
(a) 1#合金: 冷轧



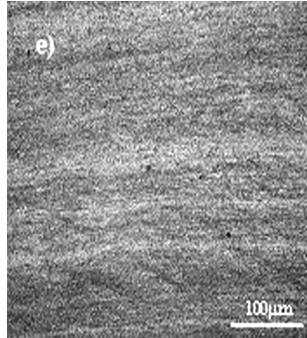
(b) 1#合金: 300℃/1h退火



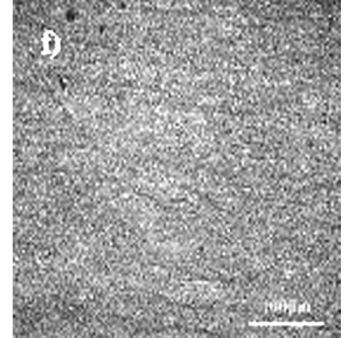
(c) 1#合金: 350℃/1h退火



(d) 2#合金: 冷轧



(e) 2#合金: 300℃/1h退火



(f) 2#合金: 350℃/1h退火

图2 不同稳定化退火温度下合金冷轧板材显微组织

Fig.2 Optical micrographs of the two alloys

## 2.4 稳定化退火工艺对合金板材电子显微组织的影响

在电子显微镜下观察,稳定化退火工艺对合金板材显微组织结构影响见图3。结果表明,板材冷轧后合金内部形成大量位错缠结,胞壁由高密度缠结的位错组成[图3(a)和3(d)];冷轧板材经200℃/1 h 稳定化退火处理,位错通过交滑移、攀移发生部分回复,

局部可观察到亚晶组织[图3(b)和3(e)];稳定化退火温度继续升高,300℃/1 h 退火处理条件下,1#合金亚晶组织和与基体共格的  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  粒子逐渐显示出来[图3(c)],而2#合金则发生了完全的再结晶,晶内显示出纳米级粒状相[图3(c)],结合文献[7]可知这种纳米级别粒状相为  $\text{Al}_3(\text{Er}, \text{Zr})$ 。

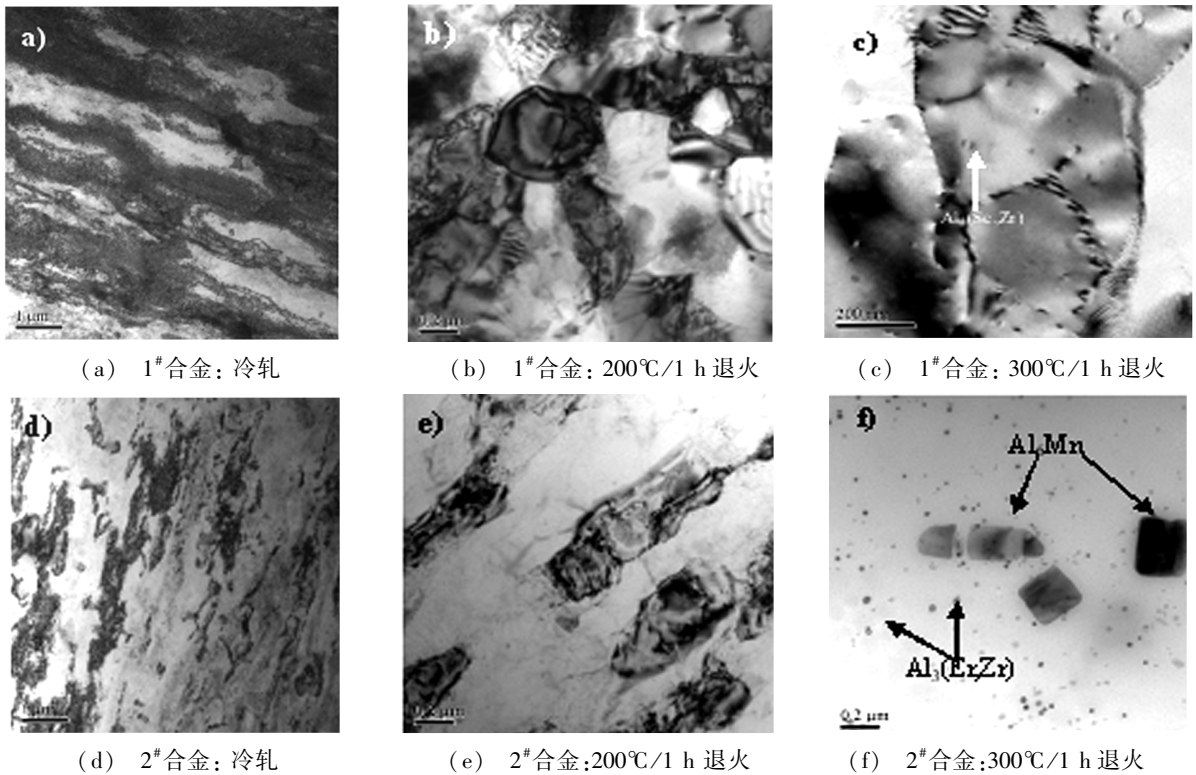


图3 两种合金的电子显微组织

Fig. 3 TEM micrographs of the two alloys

## 3 分析与讨论

### 3.1 稳定化退火对合金板材拉伸性能的影响

图3表明,两种合金冷轧板材均为沿轧向的纤维状加工组织,轧制变形过程中产生大量位错,合金获得加工硬化,因而冷轧板材强度大、塑性差。稳定化退火处理中,随退火温度的升高,合金会依次发生回复、再结晶。回复过程中,空位和位错通过热激活改变它们的组态分布和数量,再结晶时则由新的等轴晶粒代替旧的被拉长的晶粒,晶粒内位错密度降低,回复和再结晶可降低基体内内应力和内应变,强度降低的同时可改善合金的塑性。稳定化退火过程中由于次生的  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 、 $\text{Al}_3(\text{Er}, \text{Zr})$  粒子均能钉扎位错,使位错滑移应力增大同时阻止亚晶界迁移与合并。根据相关文献,添加0.10wt% ~ 0.25wt%的Sc可将Al-5Mg的再结晶温度由200℃提高至400℃<sup>[8]</sup>,而添加0.4wt%的Er的Al-Mg合金可将再结晶温度提高25℃<sup>[9]</sup>。图2(c)和图3(c)显微组织观察表明,1#合金经300℃/1 h 退火后只是发生回复和部分再结晶,亚晶晶粒边界仍缠结大量位错,合金表现出很强的抗

退火软化能力。而2#合金,经300℃/1 h 退火后已发生完全再结晶,再结晶使合金失去亚结构强化而软化,因此退火温度高于250℃后这种合金的屈服强度及抗拉强度迅速下降(表2)。

### 3.2 稳定化退火工艺对合金板材剥落腐蚀性能的影响

剥落腐蚀是一种特殊晶间腐蚀,严重时甚至会使得表层晶粒与基体剥离<sup>[9]</sup>。Al-Mg合金的剥落腐蚀性能主要与 $\beta$ 相( $\text{Mg}_5\text{Al}_8$ )的析出与分布密切相关, $\beta$ 相电位(-1.24 V)比合金基体电位(-0.89 ~ -0.85 V)要低而优先腐蚀。研究表明,Al-Mg合金冷轧状态下合金基体内有大量的位错存在,轧制应力没有消除,晶粒结构呈纤维状,合金容易腐蚀。200℃以上退火, $\beta$ 相将优先在晶界析出并形成极薄的沿晶 $\beta$ 相网膜,由于晶界上 $\beta$ 相的存在,腐蚀将优先沿晶界深入进行,此时剥落腐蚀最严重;高于200℃退火, $\beta$ 相在晶粒内和晶界同时沉淀,沿晶 $\beta$ 相网膜逐渐消除,合金剥落腐蚀敏感性降低。随退火温度进一步提高, $\beta$ 相析出更加均匀,至310 ~ 330℃以上超过固溶度曲线时,晶内 $\beta$ 相开始溶解,合金剥落腐蚀性能明显改

善<sup>[10-12]</sup>。在1<sup>#</sup>合金和2<sup>#</sup>合金中的主要成分Mg与相应的Al-Mg合金相近,β相(Mg<sub>5</sub>Al<sub>8</sub>)的析出与溶解依然存在,因此稳定化退火对合金板材剥落腐蚀性能的影响规律仍然与Al-Mg合金相同。只是由于次生的Al<sub>3</sub>(Sc,Zr)和Al<sub>3</sub>(Er,Zr)粒子的存在,这些粒子通过强烈钉轧位错,阻碍晶界运动使合金的显微组织仍为扁平状纤维组织,腐蚀会沿着与金属表面平行的纤维组织进行,此时剥落腐蚀最严重。而当退火温度提高到280℃以上,Mg原子不断沿亚晶界向晶界传输使β相变成粗大晶粒分布在晶界上<sup>[12-13]</sup>,在更高温度下β相又会回溶到基体固溶体中,另外由于回复和部分再结晶基体位错密度也大大下降,合金的腐蚀速率明显下降,这就是图1和表3所示的情况。

### 3.3 合金的应用前景

传统5A06合金板材在航天上的使用状态是热轧状态和冷轧后300℃以上退火状态,用户要求这种合金除较高的强度和优良的耐蚀性外,还要有焊接过程中较高的抗退火软化的能力,抗退火软化能力提高,焊件最终获得的性能就会提高。表4是5A06、5B70、1<sup>#</sup>合金、2<sup>#</sup>合金热轧态和冷轧后300℃/1h稳定化退火态性能对比。可以看出,与传统的5A06合金相比,微量Sc、Zr、Er均能提高Al-Mg合金热轧态和冷轧后300℃/1h稳定化退火态的力学性能,其中微量Sc和Zr的效果最显著。还可以看出,低Sc含量的1<sup>#</sup>合金的性能接近5B70合金,这种合金的Sc含量只有5B70合金的40%,由于Sc相对比较贵,降低Sc含量能显著降低合金的制造成本,这就预示着低Sc含量的合金在航天领域将有良好的开发应用前景。

表4 四种合金的拉伸性能

Tab.4 Tensile properties of the four alloys at different annealing temperatures

合金	$R_m$ /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	$A$ /%
1 <sup>#</sup> :热轧	391	265	23.0
300℃/1h	424	314	18.3
2 <sup>#</sup> :热轧	358	193	26.8
300℃/1h	350	177	29.1
5B70 <sup>1)</sup> :热轧	443	312	23.6
300℃/1h	437	340	16.3
5A06:热轧	330	175	22.6
300℃/1h	364	168	23.9

注1):5B70合金的成分为Al-6.1Mg-0.4Mn-0.25Sc-0.12Zr-0.03Ti-0.0025Be。

## 4 结论

(1)Al-Mg-Sc和Al-Mg-Er合金热轧态抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为391 MPa、265 MPa、

23%和358 MPa、193 MPa和26.8%,冷轧后300℃/1h稳定化退火两种合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为424 MPa、314 MPa、18.3%和350 MPa、177 MPa、29.1%。

(2)Al-Mg-Sc和Al-Mg-Er合金冷轧板材退火过程中剥落腐蚀性能有相同的变化规律,经300℃/1h稳定化退火后可以获得优良的耐腐蚀性能。

(3)低Sc含量的Al-Mg-Sc合金综合性能接近5B70合金,其成本比5B70低,有良好的开发应用前景。

## 参考文献

- [1] 尹志民,潘清林. 钕和含钕合金[M]. 长沙:中南大学出版社,2007:364-365
- [2] Filatov Y U A. New Al-Mg-Sc alloys [J]. Materials Science and Engineering,2002,A280:97
- [3] Filatov Y U A. Deformable Al-Mg-Sc alloys and possible regions of their application [J]. J Advanced Mater, 1995,2(5):386-388
- [4] Xu Guofu, Nie Zuoren, Jin Tounan. Development on research of advanced rare-earth aluminum alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2003,20(2):509
- [5] Xing Zebing. Research on microstructure and properties of Al-4.5Mg-0.7Mn-0.1Zr alloy containing Er [D]. Beijing: PHD Thesis of Beijing University of Technology, 2008
- [6] Iwamura S. Coherency between Al<sub>3</sub>Sc precipitate and the matrix in Al alloys containing Sc [J]. Materials Science Forum, 2002:396-402;1151-1156
- [7] Wen S P, Xing Z B. The effect of erbium on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2009,516:42-49
- [8] Zhong Yonghong, Yin Zhimin. Recrystallization of Al-Mg-Sc-Zr Alloys [J]. Rare Metal Materials And Engineering, 2002,31(3):167-170
- [9] Carroll M C, Gouma P I. Effects of additions on the grain boundary precipitation and corrosion of Al-5083 [J]. Scripta mater., 2000,42:335-340
- [10] 彭勇宜,尹志民. Sc与Zr对Al-Mg-Mn合金力学性能和剥落腐蚀性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2006,24(2):218-219
- [11] Nie B. Influence of stabilizing annealing on tensile property and exfoliation corrosion resistance of Al-Mg-Sc alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2003,29(3):58-61
- [12] Xu G. Corrosion behavior of an Al-6Mg-Sc-Zr alloy [J]. Rare Metals, 2005,24(3):246-251
- [13] 郑玉珍,郑鹏. LF6合金退火制度对抗蚀性能的影响 [J]. 材料工程, 1994(8):7-9

(编辑 吴坚)