稀土元素对连续铸挤 Al-Mg-Si 合金组织 性能的影响

尹斌^{1,2},曹富荣¹,王顺成³,石路¹,许光明⁴,温景林¹

(1.东北大学 材料科学与工程学院,沈阳 110819; 2.凯翼汽车有限公司,安徽 芜湖 241000;
 3.广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院)金属加工与成型技术研究所,广州 510650;
 4.东北大学 轧制与连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110819)

摘要:目的 制备 6201(Al-Mg-Si)加稀土的 6 种铝合金线材,以获得合金细化的组织,高的强度和导电率。 方法 借助光学显微镜、透射电镜、X 射线分析、扫描电镜和微机控制的拉伸机等手段,研究稀土元素 La, Ce, Y, Sc, Er 对连续铸挤 6201 铝合金微观组织、力学性能和导电性能的影响规律。结果 组织观察发现,Sc 对 晶粒细化效果最明显,横断面晶粒尺寸小于 50 μm, Ce 次之,晶粒尺寸为 100 μm,添加 La, Er 的合金晶粒 尺寸为 100~150 μm,而添加 Y 的合金晶粒尺寸大于 200 μm;对 6201 合金晶粒细化由强到弱的顺序为:Sc, Ce, La, Er, Y。TEM 研究发现,含 Ce 合金中存在含 Si 和 Ce 的第二相颗粒和位错。XRD 研究发现,含 Ce 的合金中,α-Al, Fe₃Si, Al₁₂Mg₁₇, SiO₂, AlCe₃, Ce₅Si₃相存在。SEM 断口观察发现,含 Ce 合金的断裂机理为 韧性断裂。力学性能研究发现,含 Sc 的试样抗拉强度最高,为 245 MPa,含 Ce 试样次之,为 238 MPa,且 含稀土元素 La, Er, Y 的抗拉强度均低于 216 MPa, 6201 合金抗拉强度为 192 MPa,说明稀土元素对合金具 有强化作用;导电性能研究发现,添加稀土的 6201 合金的导电率介于 43.5IACS%~48.5IACS%之间,含稀 土的试样导电率低;稀土元素对导电率影响由高到低的顺序为 Y, La, Ce, Er, Sc,其中 Sc 降低导电率的程度 最大。**结论** 稀土元素对 6201 合金具有强化作用但对合金的导电率有不利影响。

关键词:铝合金;连续铸挤;微观组织;力学性能;导电率

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.024

中图分类号: TG376.2; TG146.2⁺¹ 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2017)06-0130-07

Effect of Rare Earths on Microstructure and Properties of Al-Mg-Si Alloy Processed by Continuous Casting-Extrusion

YIN Bin^{1,2}, CAO Fu-rong¹, WANG Shun-cheng³, SHI Lu¹, XU Guang-ming⁴, WEN Jing-lin¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
 2.Cowin Automobile Co., Ltd., Wuhu 241000, China;
 3.Institute of Materials Processing and Forming Technology, Guangdong
 General Research Institute of Industrial Technology, Guangzhou 510650, China;
 4.State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

ABSTRACT: The paper aims to fabricate six kinds of (Al-Mg-Si)6201 aluminum alloy wires with the addition of rare earths to obtain fine microstructure, high strength and high electrical conductivity. The influence rules of La, Ce, Y, Sc, and Er on microstructures and properties of these alloys were investigated with light microscope, transmission electron microscopy, X-ray diffract meter, scanning electron microscopy, and micro-computer controlled tensile tester. Sc had the best grain-refinement results and its grain size in cross-section was less than 50 µm; Ce ranked the second and its grain size was 100 µm. The grain sizes of the alloys with addition of La and Er were in the range of 100-150 µm. However, the grain size for Y-added alloy was more than

通讯作者:曹富荣(1964-),男,博士,副教授,主要研究方向为有色金属塑性成形与超塑性和组织性能。

收稿日期: 2017-08-27

基金项目:国家自然科学基金(51334006)

作者简介:尹斌(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为有色金属塑性成形与超塑性和组织性能。

200 μ m. Thus, the sequences of rare earth grain refinement for 6201 alloy from strong to weakness were as follows: Sc, Ce, La, Er, and Y. TEM examination revealed that second phase particles contained Si and Ce and dislocations existed in the Ce-containing alloy. XRD examination revealed that α -Al, Fe₃Si, Al₁₂Mg₁₇, SiO₂, AlCe₃, and Ce₅Si₃ phases existed in the Ce-containing alloy. SEM fractograph observation revealed that ductile fracture was the fracture mechanism of Ce-containing alloy. Mechanical property tests shown that Sc-containing specimen exhibited the highest ultimate tensile strength (UTS) of 245 MPa. Ce-containing specimen exhibited UTS of 238 MPa. The UTS of La, Er, and Y-containing specimens were all lower than 216 MPa. The UTS of 6201 aluminum alloy was 192 MPa. These findings indicated that rare earths have strengthening effects. Electrical conductivity measurements shown that the electrical conductivities were in the range of 43.5 IACS%~48.5 IACS%, indicating low electrical conductivity. The sequences of rare earth influence on electrical conductivity from high to low were as follows: Y, La, Ce, Er, and Sc, among which Sc reduced the electrical conductivity to the greatest extent. Rare earths have strengthening effects on 6201 alloy but have an adverse influence on the electrical conductivities.

KEY WORDS: aluminum alloy; continuous casting-extrusion; microstructure; mechanical property; electrical conductivity

铝及铝合金材料由于其一系列优异特性,广泛应 用于航空航天、交通运输、建筑装饰、包装容器、机 械电器、电子通讯、石油化工、能源动力等行业,成 为国民经济发展的重要基础材料。Al-Mg-Si 合金属于 6000系可热处理强化铝合金,如 6201 和 6101,广泛 用于电力传输领域。6000 系合金电工导线采用连铸 连轧方法生产已经多年。近年来,研究者开发了一些 新的方法,如铸造+挤压^[1]、铸造+轧制^[2]、连续铸挤^[3] 和剧烈塑性变形(Multi-ECAP-Conform)^[4]方法。连续 铸挤技术是一项高效节能的短流程技术,是连续挤压 技术的进一步发展[5-8]。只要在铸挤机的入口浇进液 态金属,在有效摩擦力的作用下,在机器出口就可以 得到线材。另一方面,合金化特别是添加稀土等元素 改善 6 系铝合金的力学性能和导电性能取得了一些 进展,如添加 La^[2], Sr^[9], Cu^[10], Y, Ce^[11]等。我国 稀土资源丰富,为研究稀土合金化奠定了物质条件, 但是尚未见到系统研究稀土元素对 6 系合金组织、力 学性能和导电率影响的报道,因此,文中以常用的6 系 6201 铝合金为研究对象,采用连续铸挤方法制备 线材, 探究稀土元素 La, Ce, Y, Sc, Er 对合金组织与 性能的影响规律,为开发高性能铝合金提供参考。

1 材料与方法

在电磁搅拌的电阻炉中熔炼 Al-Mg-Si 合金并添 加稀土元素。待熔体熔炼好之后导入中间包中。连续 铸挤过程见图 1。中间包 1 中的熔化金属在 720 ℃流 进旋转的轮槽 6 中。由于铸挤轮 2 内部的水循环冷却 作用,金属凝固并在轮槽和金属之间的摩擦力作用下 向前运动。凝固金属到达档料块 7 时,转 90°向挤压 模 4 方向运动被挤出,得到 Ø8 mm 的线材。

实验的 6 种合金的成分及编号见表 1,其中, 1[#]—6[#]杂质的质量分数均小于 2%,余量均为 Al。应 当指出, Sc 为过渡族元素,La,Ce,Y,Er 为稀土 元素。为了叙述方便,文中统称其为稀土元素。



图 1 连续铸挤示意图 Fig.1 Schematic of continuous casting-extrusion

表 1 实验合金的化学成分(质量分数) Tab.1 Chemical composition of experimental alloys %

样品 编号	样品名称	Mg	Si	La	Ce	Y	Sc	
1#	Al-Mg-Si	0.694	0.682	_	-	_	_	-
$2^{\#}$	Al-Mg-Si-La	0.705	0.741	0.164	-	-	_	-
3#	Al-Mg-Si-Ce	0.695	0.681	-	0.165	-	-	-
4#	Al-Mg-Si-Y	0.618	0.641	-	-	0.15	-	-
5#	Al-Mg-Si-Sc	0.645	0.731	-	-	-	0.157	-
6	Al-Mg-Si-Er	0.721	0.755	-	-	-	_	0.197

将线材截取 20~30 mm 金相试样,并在砂纸上依次仔细打磨,然后用粒度为 1.0 µm 的研磨膏进行抛光, 直至成镜面。接着进行电解抛光。抛光液为体积分数 70%高氯酸与无水乙醇按 1:9 配制;电压为 20 V,时 间为 30 s,温度小于 40 °C。抛光后,用体积分数 50% 的 HNO₃ 清洗,酒精擦干,接着进行阳极覆膜。覆膜 液为浓硫酸、磷酸和水,按 38:43:19 配制,电压为 30 V,时间为 2 min,温度小于 40 °C,使用 Olympus DSX500 金相显微镜进行观察。用线切割将金相试样 切出 0.5 mm 左右的薄片,用 1000[#], 2000[#]的金相砂纸 减薄到 90 µm 左右,用冲孔设备冲出 Φ3 mm 的电镜初 样,继续用 3000[#]的砂纸减薄到 50 µm 后,用体积分 数为 30%的硝酸+70%的乙醇,在温度为–30 °C的电解 液中双喷减薄,电压为 12 V,在 Tecnai G20 透射电镜 (TEM)上进行观察。将金相试样重新打磨,并进行机 械抛光,在 X'Pert Pro X 射线衍射仪(XRD)上进行实 验,对于实验数据,使用 X'Pert HighScore Plus 软件进 行物相分析。拉断试样在 SSX-550 扫描电镜(SEM)上 观察断口形貌。

根据标准 GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试 验方法,并结合实际,取 100 mm 长度试样,将试样 中部的 60 mm 长度,用车床加工成 ϕ 6 mm 左右的力 学性能试样,画好标距,测量试样加工段长度和直径 后,在拉伸机上进行拉伸试验,拉伸速度为 3 mm/min。 拉伸试样见图 2。



Fig.2 Tensile specimen

将连续铸挤生产的线材,取表面粗糙度好的平直 试样,测量试样直径,利用 QJ84 电阻测试仪进行电阻 测量。为确保数据准确性好,多次改变电桥长度,且 同一个长度测量多组数据。测量过程中同时记录环境 温度,以使后面计算中尽量排除温度对电阻的影响。 测量后取每一个电桥长度中最大电阻值计算电阻率, 并将此电阻率转化为 20 ℃时的电阻率。以铜退火状态





d 4#合金





e 5*合金 图 3 连续铸挤线材光学显微照片 Fig.3 Microstructures of alloys after Castex

20 ℃时的导电率为100%,以其20 ℃时的电阻率17.24 nΩ·m 为标准,计算铝及其合金的等效导电率。

2 结果与分析

2.1 稀土元素对合金微观组织的影响

连续铸挤制备的线材 1[#]—6[#]合金横截面的金相组 织见图 3。可以看出,由于大变形等影响,横截面晶粒 基本呈等轴状,组织较均匀。1[#],2[#],6[#]试样晶粒尺寸约 100~150 μm,3[#]试样晶粒尺寸约 100 μm,4[#]样晶粒尺寸 200 μm 以上,5[#]试样晶粒尺寸小于 50 μm。可以看出, Sc 对晶粒细化效果最明显,横截面晶粒尺寸小于 50 μm,Ce 次之,横截面晶粒尺寸 100 μm,添加 La,Er 的合金,横截面晶粒尺寸大于 200 μm,面添加 Y 的 合金,横截面晶粒尺寸大于 200 μm,细化效果不明显; 对 6201合金晶粒细化由强到弱的顺序为:Sc,Ce,La,Er, Y。从试样宏观表面质量来看,连续铸挤的试样表面 质量好,尺寸精度高。与铸造相比,连续铸挤技术生 产的合金,缺陷较少,性能较好,主要是由于动态挤 压变形破碎了铸态晶粒,使晶粒细化。

为了进一步探究稀土元素对合金组织的影响,选 定未添加稀土的 1[#]试样和添加稀土 Ce 的 3[#]试样,进 行透射电镜观察,研究稀土 Ce 对合金的影响。连续铸 挤 1[#]试样 TEM 组织见图 4。可以看出,1[#]试样的 TEM 组织中第二相较少,主要有棒状的 Al-Si-Fe-Cu 相、 Al-Mg-Fe 相存在。没有观察到明显的块状相和 Mg₂Si 相。这是因为连续铸挤线材从挤压模中出来以后(温 度约 500 ℃),直接进入水槽(20 ℃)中冷却,该冷



c 3#合金



f 6#合金

却使合金激冷淬火,抑制了 Mg₂Si 相的析出。图 4a 可以看出有亚晶出现,图 4d 中有位错缠结现象。可以 断定,第二相、亚晶和位错对合金强化做出贡献。

连续铸挤 3[#]加 Ce 试样 TEM 组织见图 5。由图 5a—c 可以看出, 3[#]试样 TEM 组织中含有较多 Si 和 Ce 的相存在,相尺寸大小不一,呈不均匀分布,且



a 棒状的Al-Si-Fe-Cu相





个别相周围有位错缠结。从图 5d 可以看出,试样位 错有的呈杂乱缠绕的丝状存在,有的呈直线状存在。

连续铸挤 3[#]试样 XRD 图谱见图 6。可以看出,在 成分为 Al-0.695Mg-0.681Si-0.165Ce 的连续铸挤 3[#]试样 中,Si 元素主要形成了 SiO₂ 相和 Fe₃Si 相,Mg 素主要 形成 Al₁₂Mg₁₇相。Ce 元素的加入主要形成了 AlCe₃和





d 位错缠结

图 4 连续铸挤 1[#]试样 TEM 组织 Fig.4 TEM structures of 1[#] alloy castex wire



4 6 8 10 12 14 能量/keV b能谱分析a中的A相



a 船形含Si和Ce的第二相与位错



 $\overline{0}$

图 5 连续铸挤 3[#]试样 TEM 组织 Fig.5 TEM structures of 3[#] alloy castex wire





Ce_sSi₃相,另外还有杂质 Fe 和 O 等元素的存在。为了 解断裂机理,需要借助扫描电镜观察试样断口的形貌。 连续铸挤试样拉伸断口扫描电镜照片见图 7。

从图 7a 和 7b 可明显看出,1[#]试样断口处有缺陷 存在(如箭头所示),断裂方式为等轴状沿晶脆性断 裂和韧窝型穿晶断裂共同组成。由图 7c 和 7d 可以看 出,3[#]试样断裂方式为韧窝型穿晶断裂。图 7a—7b 与 c—d 相比,添加 Ce 的试样明显比不添加的试样韧 窝深,反映出加 Ce 的合金塑性好于不加 Ce 的合金 塑性。两种试样韧窝均为等轴韧窝,且加入稀土后韧 窝截面尺寸变小,说明韧窝形核位置增多。总的看来, 1[#]和 3[#]合金的断裂方式为韧性断裂。

拉伸试样断口纵截面金相照片见图 8。从图 8a 可以看出,未添加稀土的试样断口为沿晶断裂,其中 箭头所指为晶界处被撕裂。从图 8b 来看,没有沿晶 断裂现象发生,断口附近有空洞聚集。这是由于未添 加稀土试样,由于第二相粒子较少,相应的基体和第 二相粒子之间的弱界面也较少,拉伸变形时,位错在 基体内滑移时遇到弱界面的机会较少,位错有一部分 从晶内滑移至晶界处塞积,进而造成沿晶界开裂,而 添加稀土的试样第二相较多,试样主要沿第二相粒子 与基体弱界面处开裂。由此判断,稀土元素 Ce 的加 入形成细小弥散第二相,钉扎位错,改善合金塑性。







图 8 拉伸后断口横截面金相 Fig.8 Metallographic phase of fractured specimens after tensile test

2.2 稀土元素对合金力学和导电性能的影响

连续铸挤后的铝合金线材在室温下测量得到的 导电率和抗拉强度结果见图 9。连续铸挤成形的 6 个 合金导电率都比较低,低于 49.5IACS%。未添加稀土 元素的 1[#]样导电率最高,为 49.5IACS%。添加 Sc 的 5[#]样导电率最低,为 43.5IACS%,说明此时稀土元素 对试样的导电率有不利影响。添加稀土的 6201 合金 的导电率介于 43.5IACS%~48.5IACS%之间。稀土元 素对导电率影响由高到低的顺序是 Y,La,Ce,Er,Sc。 对于力学性能,添加 Sc 的 5[#]合金强度最高,抗拉强 度最高为 245 MPa,含 Ce 的 3[#]合金强度最高,抗拉强 度最高为 245 MPa,含 Ce 的 3[#]合金强度太之,为 238 MPa,含稀土元素 La, Er,Y 的抗拉强度均低于 216 MPa,1[#]不添加稀土的合金强度最低,抗拉强度为 192 MPa,说明稀土元素对合金有强化作用,且 Sc 的强 化作用最大。结合图 3 发现,晶粒越细小,抗拉强度 越大,符合经典 Hall-Petch关系^[12]。



图 9 连续铸挤试样导电率和抗拉强度 Fig.9 Electrical conductivity and tensile strength of continuous casting-extrusion specimen

对于添加稀土后的 6201 合金,稀土元素的加入相 当于增加了合金元素的总量,试样强度提高,导电率降 低有其内在的组织原因。根据诺德海姆定律[13-14],电 阻与杂质元素含量成正比。添加稀土元素增加了合金 的电阻。根据马修森定律[13],导电率与电阻成反比。 添加稀土元素降低了合金的导电率。连续铸挤后的试 样在高温情况下通过水淬,属于在线固溶的工序,这 些合金元素大部分固溶在合金中,造成晶格畸变,阻 碍了试样中电子的运动,强度升高,电阻增加,导电 率降低。同时, 析出的合金元素也由于稀土作用形成 细小的第二相,阻碍了试样中电子的运动,强度升高, 电阻增加,导电率降低。而且 5[#]含 Sc 试样由于可能 的 Al₃Sc 第二相的存在^[15-16],成为铸挤异质形核的 核心,有效抑制晶粒粗化,因而晶粒最细,晶界对电 子的阻碍作用最大,强度最高,电阻最大,导电率最 低。从显微组织也能发现相同的规律。例如对比 1[#] 样和 3[#]含 Ce 样的连续铸挤的 TEM 组织(见图 4-5), 特别是 XRD 分析 (见图 6) 发现,稀土 Ce 的加入, 形成了大量细小第二相,阻碍位错运动,使得试样强

度提高,导电率降低。

3 结论

通过对 6 个合金连续铸挤线材的组织和性能研 究,可以得出如下结论。

1) 实验研究了稀土元素对 6201 合金线材组织的 影响。发现 Sc 对晶粒细化效果最明显, 横截面晶粒 尺寸小于 50 µm, Ce 次之, 横截面晶粒尺寸 100 µm, 添加 La, Er 的合金, 横截面晶粒尺寸 100~150 µm, 而添加 Y 的合金, 横截面晶粒尺寸大于 200 µm, 细 化效果不明显; 对 6201 合金晶粒细化由强到弱的顺 序为 Sc, Ce, La, Er, Y。TEM 研究发现含 Ce 合金中存 在含 Si 和 Ce 的第二相和位错。XRD 研究发现含 Ce 的合金中 α -Al, Fe₃Si, Al₁₂Mg₁₇, SiO₂, AlCe₃, Ce₅Si₃ 相 存在。SEM 断口观察发现含 Ce 合金的断裂机理为韧 性断裂。

2) 实验研究了力学性能。发现含 Sc 的试样抗拉 强度最高,为 245 MPa,含 Ce 试样次之,为 238 MPa, 且含稀土元素 La, Er,Y 的抗拉强度均低于 216 MPa, 6201 合金抗拉强度 192 MPa,说明稀土元素对合金具 有强化作用。

3) 实验研究了稀土元素 La, Ce, Y, Sc, Er 对于 6201 铝合金线材的导电性能的影响。发现添加稀土的 6201 合金的导电率介于 43.5IACS%~48.5IACS%之间; 稀土元素对导电率影响由高到低的顺序是 Y, La, Ce, Er, Sc, 其中 Sc 降低导电率的程度最大。含稀土的试 样导电率低,稀土元素对试样的导电率有不利影响。

参考文献:

- KARABAY S. Influence of AlB2 Compound on Elimination of Incoherent Precipitation in Artificial Aging of Wires Drawn from Redraw Rod Extruded from Billets Cast of Alloy AA-6101 by Vertical Direct Chill Casting [J]. Materials and Design, 2008, 29: 1364—1375.
- [2] YUAN Wu-hua, LIANG Zhen-yu, ZHANG Chuan-yang, et al. Effects of La Addition on the Mechanical Properties and Thermal-resistant Properties of Al–Mg–Si–Zr alloys Based on AA 6201[J]. Materials and Design, 2012, 34: 788–792.
- [3] 周天国,石路,曹富荣,等. 热处理对 SCR 成形 6201
 铝合金性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(1):
 24-27.
 ZHOU Tian-guo, SHI Lu, CAO Fu-rong, et al. Effects of

Aging Treatment on the Properties of 6201 Alloy Wires Formed by SCR Technology[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(1): 24–27.

[4] RAAB G I, FAKHRETDINOVA E I, VALIEV R Z. The Study of the Strained State of the Long-Length Aluminum Billet Obtained by a New Method-Multi-ECAP-Conform [J]. Materials Science Forum, 2016, 870: 603—607.

- [5] CAO Fu-rong, WEN Jing-lin, DING Hua, et al. Extrusion Force Analysis of Aluminum Pipe Fabricated by CASTEX Using an Expanding Combination Die[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(11): 3621–3631.
- [6] CAO Fu-rong, WEN Jing-lin, DING Hua, et al. Force Analysis and Experimental Study of Aluminum and Al-5wt%Ti-1wt%B Alloy Continuous Extrusion Forming Process with an Expansion Chamber[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 201—207.
- [7] 曹富荣,温景林.金属连续铸挤技术研究进展与发展 趋势[J].中国材料进展, 2013, 32(5): 193—200.
 CAO Fu-rong, WEN Jing-lin. Progress and Developing Trend of Metallic Continuous Casting-Extrusion[J]. Materials China, 2013, 32(5): 193—200.
- [8] CAO Fu-rong, ZHU Xiao-tong, WANG Shun-cheng, et al. Quasi-superplasticity of a Al-Mg-Y Alloy Processed by Continuous Casting-Extrusion[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 690: 433–445.
- [9] MULAZIMOGLU M H, ZALUSKA A, PARAY F, et al. The Effect of Strontium on the Mg2Si Precipitation Process in 6201 Aluminum Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28: 1289—1295.
- [10] 张俊杰,张晓燕,张忠全,等.铜对稀土铝合金电工圆 杆性能的影响[J].有色金属工程,2016,6(2):23—26. ZHANG Jun-jie, ZHANG Xiao-yan, ZHANG Zhongquan, et al. Effect of Copper Content on Property of Rare Earth Aluminum Alloy Electrical Round Rod[J]. Non-

ferrous Metals Engineering, 2016, 6(2): 23-26.

- [11] 林廷艺,张晓燕,黄鑫,等.稀土钇和铈混合添加对 Al-B 电工圆杆组织和性能的影响[J]. 有色金属工程, 2016,6(3):5—7.
 LIN Ting-yi, ZHANG Xiao-yan, HUANG Xin, et al. Effect of Combined Addition of Yttrium and Cerium on Microstructure and Property of Al-B Electrical Round
- Rod[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(3): 5—7.
 BALASUBRAMANIAN N, LANGDON T G. The Strength-Grain Size Relationship in Ultrafine-Grained Metals[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47: 5827—5838.
- [13] KARABAY S, GUYEN E S, ERTURK A T. Enhancement on Al-Mg-Si Alloys against Failure due to Lightning Arc Occurred in Energy Transmission Lines[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 31: 153—160.
- [14] SALANDRO W A, JONES J J, MCNEAL T A, et al. Formability of Al 5xxx Sheet Metals Using Pulsed Current for Various Heat Treatments[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions ASME, 2010, 132: 635–645.
- [15] DUAN Yu-lu, XU Guo-fu, TANG Lei, et al. Excellent High Strain Rate Superplasticity of Al-Mg-Sc-Zr Alloy Sheet Produced by an Improved Asymmetrical Rolling Process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 715: 311—321.
- [16] PEREIRA P H R, WANG Ying-chun, HUANG Yi, et al. Influence of Grain Size on the Flow Properties of an Al-Mg-Sc Alloy over Seven Orders of Magnitude of Strain Rate[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 685: 367–376.