

多晶硅精炼提纯过程中铝硅合金的低温电解分离

Electrochemical Separation of Aluminum-silicon Alloy at Low Temperature During Si Solidification Refining Process

李佳艳^{1,2}, 李超超^{1,2}, 李亚琼^{1,2}, 谭毅^{1,2}

(1 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2 大连理工大学 辽宁省太阳能光伏系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

LI Jia-yan^{1,2}, LI Chao-chao^{1,2}, LI Ya-qiong^{1,2}, TAN Yi^{1,2}

(1 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, Liaoning, China; 2 Key Laboratory for Solar Energy Photovoltaic

System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

摘要: 选用 $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ 作为电解液, 铝硅合金作为阳极、不锈钢作为阴极, 恒电流电解条件下实现了多晶硅精炼提纯中硅铝合金的低温分离。结合扫描电子显微镜、X 射线衍射仪等检测手段, 研究电解温度、电流密度、电解时间等实验参数对电流效率、沉积铝形貌的影响。研究结果表明: 在电流密度为 $50\text{mA}/\text{cm}^2$, 电解温度 200°C , 电解时间 60min 的条件下, Si-50\%Al (质量分数, 下同) 阳极合金经阳极腐蚀后, 阴极电极效率达到最大值 93.7% , 富硅阳极泥中含有 90.4% 的多晶硅。

关键词: 精炼; 多晶硅; 低温熔盐; 铝; 分离

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.11.001

中图分类号: TF821 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)11-0001-05

Abstract: The electrochemical separation of aluminum-silicon alloy in the low temperature molten salt $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ at constant current deposition was studied. Aluminum-silicon alloy for the anode electrode and stainless steel for the cathode electrode were used. The effects of temperature, current density and time on the current efficiency and the morphology of deposited aluminum were analyzed by the scanning electron microscope and X-ray diffraction. The results show that, when the current density is $50\text{mA}/\text{cm}^2$, the maximum current efficiency can reach 93.7% at 200°C for 60min using Si-50\%Al (mass fraction) as anode electrode, and there is 90.4% silicon in the anode slime.

Key words: refining; silicon; low temperature molten salt; aluminum; separation

光伏产业的迅速发展激发了制造业对太阳能电池材料的巨大需求。多晶硅作为硅太阳能电池的主要材料, 其提纯成本和产品质量成为光伏产业稳步发展的重要因素^[1-3]。

冶金法是一种低成本、低能耗的多晶硅提纯方法。合金精炼法作为其中一种, 其过程为: 先向硅中加入铝^[4-8]、铜^[9-12]、锡^[13]、铁^[14]等金属中的一种或几种与硅形成硅合金熔体; 再通过控制降温速度, 利用杂质在初晶硅与合金熔体之间的分凝效应进行提纯。采用合金精炼法能够有效降低多晶硅中杂质含量, 但是如何分离硅、铝是目前此方法实际应用的难点问题。

目前, 对于硅铝合金相的分离方法主要有酸

洗^[4]、过滤^[15,16]、感应熔炼^[17]等方法。酸洗能有效去除初晶硅中金属杂质, 但需要消耗大量酸试剂与金属, 造成环境污染、增加能耗。过滤方法能在熔体凝固过程中分离初晶硅与合金熔体, 但操作温度高, 设备复杂; 采用具有温度梯度的感应熔炼方法能得到富集的多晶硅相, 但不利于柱状多晶硅的连续稳定生长。

针对目前研究最广泛的铝硅合金提纯体系, 本实验采用 $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ 低温熔盐体系, 利用电解法实现多晶硅与金属铝的分离、高纯铝的回收。结合电子扫描电镜、X 射线衍射仪等检测手段, 研究电解温度、电流密度、电解时间等参数对电流效率、沉积铝形貌的影响。从而得到低温熔盐电解方法的最优实验参数,

为合金精炼法提纯多晶硅的广泛应用起到推动作用,促进合金精炼法的产业化发展。

1 电化学分离铝硅合金的原理

根据铝精炼原理^[18]:在阳极合金的各种金属元素中,只有铝在阳极上溶解,而如铜、铁、硅等比铝不活泼的金属元素并不溶解,仍留在合金内。阳极上的电化学溶解反应如公式(1)所示。在电解液迁往阴极的各种阳离子中,铝的电极电位比较正,故 Al^{3+} 优先在阳极上获得电子,析出金属铝。析出反应如公式(2)所示。



根据以上原理,可以采用电解法分离铝硅合金。选用低温熔盐电解体系($\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ ^[19,20]、有机溶剂^[21,22]、离子液体^[23-25]等电解液),铝硅合金作为阳极进行恒电流沉积。电解后,硅以阳极泥形式存在,铝以阴极产物沉积;阳极、阴极产物分别通过酸洗、清洗等提纯手段进行处理,最终得到高纯硅与高纯铝,其流程如图1所示。

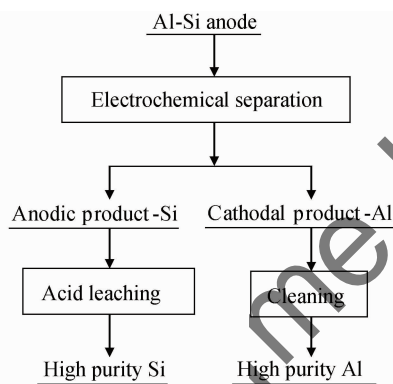


图1 电化学分离铝硅流程

Fig.1 Flowchart of electrochemical separation of aluminum-silicon alloy

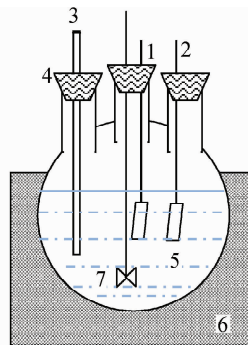
2 实验

2.1 原料

试剂 NaCl , KCl (天津市科密欧化学试剂有限公司,分析纯)使用前于 400°C 下干燥 5h。称取一定质量的无水 AlCl_3 (天津市科密欧化学试剂有限公司,分析纯)与 NaCl , KCl 配制成摩尔比为 66 : 17 : 17 的 $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ 电解液。将电解液移入三口烧瓶中加热至溶解,并用石墨为电极在 $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 电流密度下预电解 12h 直至溶液变为澄清淡黄色液体。

选用铝硅合金作为阳极电极,不锈钢为阴极。对铝硅合金、不锈钢电极表面使用砂纸打磨至光滑,然后抛光处理,再用酒精、蒸馏水等经超声清洗干净,吹干后称重;对石墨电极使用砂纸打磨至表面光滑,再用酒精、蒸馏水等经超声清洗干净,吹干。

实验装置图如图2所示。



1-Anode electrode; 2-Cathode electrode; 3-Thermometer; 4-Plug; 5-Electrolyte; 6-Electric heating jacket; 7-Stirrer

图2 电解实验装置图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus

2.2 实验方法

用 APS3005S 型稳流稳压电源做电解电源,1,2 分别接电源正负极,将配制好的 $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ 熔盐作为电解液,插入不锈钢阴极、铝硅合金阳极、温度计等进行电解实验。为了研究实验条件对电流效率以及电沉积质量的影响,分别对电解温度:180,200,220,240,260 $^\circ\text{C}$;电流密度:30,40,50,60 mA/cm^2 ;电解时间:30,60,90,120min;阳极合金成分:Si-70%Al(质量分数,下同),Si-50%Al, Si-30%Al;电极极距:1.5cm 的实验参数进行讨论。沉积结束后立即取出富硅的阳极泥以及附着铝的阴极,进行蒸馏水、酒精清洗,干燥。对阳极泥进行荧光分析,检测其中硅含量;对清洁干燥后的阴极进行称重计算电流效率,并利用扫描电镜、X射线衍射仪进行沉积物形貌及物相的分析。其中,阴极产物电流效率的计算根据法拉第定律,如公式(3)所示:

$$\eta = \frac{3 \times F \times n}{Q} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为电流效率; F 为法拉第常数; n 为沉积铝的物质的量,单位为 mol; Q 为通电量,单位为 C。

3 结果与讨论

3.1 电流密度对电流效率的影响

温度 180°C 、阳极成分 Si-50%Al、电解时间 60min

的条件下,在 30~60mA/cm² 范围内改变电流密度进行电解实验。不同电流密度对应的电流效率列于表 1。随着电流密度的增加,阴极电流效率增加。当电流密度小于 50mA/cm² 时,电流效率高于 80%;电流密度为 50mA/cm² 时,电流效率最大达到 90.2%;当电流密度增加至 60mA/cm² 时,电流效率开始急剧下降。这主要是由于电流密度较大时,阴极会沉积生成枝晶状的铝,而枝晶状的铝容易脱落,因此造成电流密度的降低,如表 1 所示。

表 1 AlCl₃-NaCl-KCl 熔盐体系中电流密度与电流效率的关系
Table 1 Relationship between current density and current efficiency in AlCl₃-NaCl-KCl melt

Current density/(mA · cm ⁻²)	Current efficiency/%
30	83.7
40	85.4
50	90.2
60	77.4

制备得到的金属铝沉积层形貌如图 3 所示。电流密度与沉积铝的形貌关系见表 2。当电流密度为 30~50mA/cm² 时,沉积铝为球状,尺寸为 10~40μm;当电流密度达到 60mA/cm² 时,沉积铝为球状和针状混合型。随着电流密度的增加,球状沉积铝颗粒的尺寸逐渐减小,表层致密度增加;当电流密度较大时,出现针状沉积铝。这主要是由于低电流密度下铝沉积速度慢,利于铝的结核与生长,所以低电流密度下铝晶粒的

表 2 电流密度与铝沉积层性能关系
Table 2 Relationship between current density and aluminum morphology

Current density/(mA · cm ⁻²)	Evaluation of Al deposition
<40	Al grain size is large and the coarse deposit has cracks.
40-50	Al grain size is smaller and the surface of the deposit is flat.
>50	Al grain size is small and the coarse deposit has cracks.

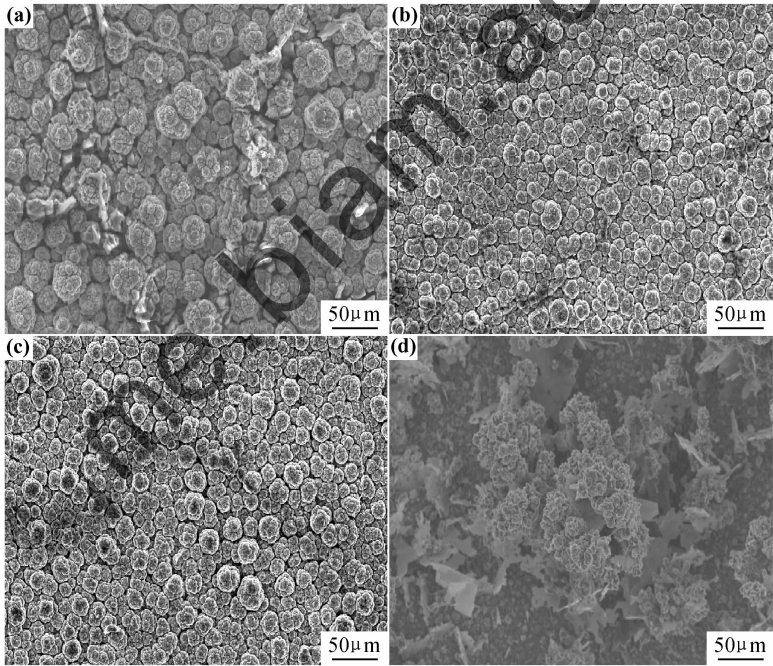


图 3 不同电流密度下铝沉积层的 SEM 图
(a) $i=30\text{mA}/\text{cm}^2$; (b) $i=40\text{mA}/\text{cm}^2$; (c) $i=50\text{mA}/\text{cm}^2$; (d) $i=60\text{mA}/\text{cm}^2$
Fig. 3 SEM images of aluminum electrodeposited at different current densities
(a) $i=30\text{mA}/\text{cm}^2$; (b) $i=40\text{mA}/\text{cm}^2$; (c) $i=50\text{mA}/\text{cm}^2$; (d) $i=60\text{mA}/\text{cm}^2$

尺寸较大;较大电流密度下铝沉积较快,铝晶粒来不及长大,因此尺寸较小;当电流密度超过一定值后,会形成针状晶粒。

3.2 温度对电流效率的影响

电流密度 50mA/cm²、电解时间 60min、阳极成分 Si-50%Al 的条件下,在 180~260℃ 范围内改变反应

温度进行电解实验。电流效率随电解温度的变化如表 3 所示。由表 3 可知,随着温度的升高,电流效率增加。当电解温度为 200℃ 时,电流效率最高为 93.7%。但当温度高于 200℃ 时,电流效率逐渐降低。当温度为 260℃ 时,电流效率最低,为 78.7%。这是因为随着温度的升高,电解质的流动性增强,导电性提高,有利

于铝的沉积。但是温度过高时,会造成铝与阴极基体之间的黏结性变差,甚至导致沉积层与基体分离,从而降低电流效率。

表 3 温度与电流效率的关系

Table 3 Relationship between temperature and current efficiency

Temperature/℃	Current efficiency/%
180	90.2
200	93.7
220	90.5
240	84.6
260	78.7

3.3 沉积时间对电流效率的影响

电流密度 50mA/cm²、温度 200℃、阳极成分 Si-50%Al 的条件下,在 30~120min 区间选择不同的电解时间进行电解实验,电解时间与电流效率之间的关系,如表 4 所示。由表 4 可知,随着电解时间增加,铝沉积物的质量增加。当电解时间为 60min 时,电流效率最大为 93.7%。电解时间进一步增大,电流效率变化并不明显,而当电解时间为 120min 时,由于阴极上沉积铝产生脱落现象,导致电流效率降低。

表 4 沉积时间与电流效率的关系

Table 4 Relationship between time and current efficiency

Time/min	Current efficiency/%
30	77.3
60	93.7
90	92.6
120	85.7

3.4 阳极成分对电流效率的影响

温度 200℃、电流密度 50mA/cm²、电解时间 60min 的条件下,讨论不同阳极成分: Si-30%Al, Si-50%Al, Si-70%Al 对电流效率的影响,结果如表 5 所示。由表可知,随着铝硅合金中硅含量的增加,电流效率逐渐减小。这主要是随着电解程度的加深,阳极初晶硅颗粒的脱落,颗粒上会附着铝,造成铝在阳极上的流失。并且,阳极硅含量的增多,也造成了阳极电阻的增大,使槽电压升高,能耗增加。

表 5 Si-Al 合金成分与电流效率的关系

Table 5 Relationship between Si-Al alloy composition and current efficiency

Composition	Current efficiency/%
Si-30Al	76.8
Si-50Al	93.7
Si-70Al	94.0

3.5 阴、阳极产物的表征

在电解液 AlCl₃-NaCl-KCl 中,温度 200℃、电流密度 50mA/cm²、电解时间 60min、阳极成分 Si-50%Al 条件下进行电解实验。由于电化学腐蚀时间较短,实验结束后阳极产物由两部分组成:一部分为阳极铝硅合金,另一部分为富硅的阳极泥。

阳极合金 SEM 如图 4 所示,表层金属铝被电解腐蚀,剩下硅及少量铝,硅呈现板状形貌。而对电解液中的阳极泥进行收集、荧光检测,得到硅含量为 90.4%的富硅相。对分离后的硅进行酸洗后可作为太阳能电池材料。

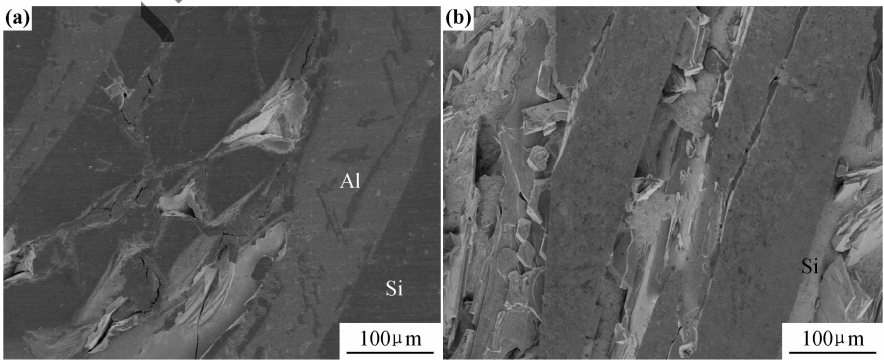


图 4 电解前后阳极铝硅合金 SEM 图

(a)电解前;(b)电解后

Fig. 4 SEM images of Si-Al alloy for anode electrode

(a)before electrochemical process;(b)after electrochemical process

在不锈钢阴极表面沉积一层银白色、具有金属光泽的镀层,金属镀层与基体结合紧密。沉积物表

面较为平整,无裂痕产生。图 5 为实验前电极基板和实验后沉积铝的 XRD 图。如图 5 所示,基板为

FeCr_{0.29}Ni_{0.16}Co_{0.06} 和 Cr 的峰;电解实验后,不锈钢电极上已经被一层沉积物质覆盖,由 XRD 结果可以看出沉积物主要成分为金属铝。荧光分析得到阴极产物中铝含量:92.7%,氧含量:7.3%,其中氧为铝在空气中氧化所致。电沉积收集的金属铝经重熔后可重复进行合金精炼提纯多晶硅,或经偏析提纯处理后应用于铝合金制造行业。

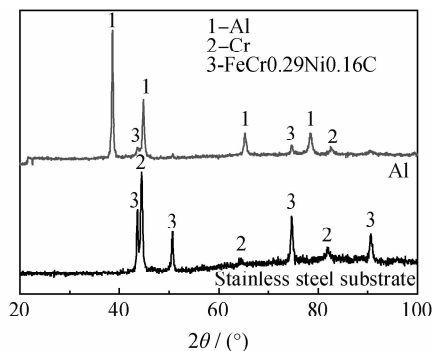


图5 电极基板及阴极铝 XRD 图

Fig. 5 XRD patterns of cathode electrode and electrodeposit

4 结论

(1)采用电解法在 $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ 低温熔盐体系 中能实现铝硅合金中多晶硅的分离、高纯铝的回收。

(2)金属铝回收的最优实验条件为:电解温度 200°C , 电流密度 $50\text{mA}/\text{cm}^2$, 电解时间 60min , 阳极铝硅合金成分 $\text{Si-50}\%\text{Al}$ 。电流效率为 93.7% , 阴极产物中铝含量: 92.7% , 氧含量: 7.30% ;富硅阳极泥中含有 90.4% 的硅。

(3)电化学分离得到的多晶硅可应用于太阳能电池的制备行业;电沉积得到的金属铝可重复应用于铝硅合金精炼提纯多晶硅或铝合金制备。

参考文献

- [1] CANIZO C D, COSO G D, LUQUE A, et al. Ultrapurification of silicon for photovoltaic applications [J]. *Advances in Science and Technology*, 2010, 74: 99–106.
- [2] 谭毅, 郭校亮, 石爽, 等. 冶金法制备太阳能级多晶硅研究现状及发展趋势[J]. *材料工程*, 2013, (3): 90–96.
- TAN Yi, GUO Xiao-liang, SHI Shuang, et al. Research status and development of metallurgical method for solar grade silicon (SOG-Si) [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013, (3): 90–96.
- [3] 谭毅, 孙世海, 董伟, 等. 多晶硅定向凝固过程中固-液界面特性研究 [J]. *材料工程*, 2012, (8): 33–38.
- TAN Yi, SUN Shi-hai, DONG Wei, et al. Research of solid-liq-

- uid interface property during directional solidification process for multicrystalline silicon [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, (8): 33–38.
- [4] OBINATA I, KOMATSU N. Method of refining silicon by alloying [R]. *Science Reports of the Research Institutes, Tohoku University Ser A, Physics, Chemistry and Metallurgy*, 1957. A–9.
- [5] YOSHIKAWA T, MORITA K. Removal of phosphorus by the solidification refining with Si-Al melts [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2003, 4(6): 531–537.
- [6] DAWLESS R K. Boron removal in silicon purification patent [P]. *USA Patent*: 4312848, 1982.
- [7] YOSHIKAWA T, MORITA K. Refining of silicon during its solidification from a Si-Al melt [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(3): 776–779.
- [8] YOSHIKAWA T, MORITA K. Thermodynamics on the solidification refining of silicon with Si-Al melts [C]//San Francisco: TMS Annual Meeting, 2005.
- [9] JUNEJA J M, MUKHERJEE T K. A study of the purification of metallurgical grade silicon [J]. *Hydrometallurgy*, 1986, 16(1): 69–75.
- [10] TEJEDOR P, OLSON J M. Silicon purification by the van Arkel-De boer technique using a Cu_3Si :Si composite alloy source [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, 89(2–3): 220–226.
- [11] MITRASINOVIC A, UTIGARD T. Refining silicon for solar cell application by copper alloying [J]. *Silicon*, 2009, 1(4): 239–248.
- [12] DAWLESS R K. Silicon purification method using copper or copper-aluminum solvent metal patent [P]. *USA Patent*: 4822585, 1989.
- [13] ZHAO L X, WANG Z, GUO Z C, et al. Low-temperature purification process of metallurgical silicon [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(5): 1185–1192.
- [14] ESFAHANI S. Solvent refining of metallurgical grade silicon using iron [D]. Toronto: University of Toronto, 2010.
- [15] GUMASTE J L, MOHANTY B C, GALGALI R K, et al. Solvent refining of metallurgical grade silicon [J]. *Solar Energy Materials*, 1987, 16(4): 289–96.
- [16] GU Xin, YU Xue-gong, YANG De-ren, et al. Low-cost solar grade silicon purification process with Al-Si system using a powder metallurgy technique [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 77(1): 33–39.
- [17] YOSHIKAWA T, MORITA K. Continuous solidification of Si from Si-Al melt under the induction heating [J]. *ISIJ International*, 2008, 47(4): 582–584.
- [18] 邱竹贤. 冶金学 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001.
- [19] 李景升, 杨占红, 王小花, 等. $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ 熔融盐中铝的电沉积 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2008, 39(4): 672–676.
- LI Jing-sheng, YANG Zhan-hong, WANG Xiao-hua, et al. Electrodeposition of aluminum from $\text{AlCl}_3\text{-NaCl-KCl}$ molten salt [J]. *Journal Central South University: Science and Technology*, 2008, 39(4): 672–676.

- LI Hong-en, SHA Ai-xue. Effects of hot process parameters on flow stress and microstructures of TC18 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, (1): 85—88.
- [10] NAKAI M, ETO T. New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 285(1—2): 62—68.
- [11] 廖舒伦, 张立文, 岳重祥, 等. GCr15 热变形行为与流变应力模型的研究[J]. 材料工程, 2008, (4): 8—10, 14.
- LIAO Shu-lun, ZHANG Li-wen, YUE Chong-xiang, et al. Research on thermal deformation behavior and model of flow stress of GCr15 steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2008, (4): 8—10, 14.
- [12] IWAMURA S, MIURA Y. Loss in coherency and coarsening behavior of Al_3Sc precipitates[J]. Acta Materialia, 2004, 52(7): 591—600.
- [13] 李雄, 张鸿冰, 阮雪榆, 等. 40Cr 钢流变应力的分析及模拟[J]. 材料工程, 2004, (11): 41—44, 49.
- LI Xiong, ZHANG Hong-bing, RUAN Xue-yu, et al. Analysis and modeling of flow stress of 40Cr steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2004, (11): 41—44, 49.
- [14] 何振波, 李慧中, 梁霄鹏, 等. Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金的热变形行为及加工图[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1220—1228.
- HE Zhen-bo, LI Hui-zhong, LIANG Xiao-peng, et al. Hot deformation behavior and processing map of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1220—1228.
- [15] 李俊鹏, 沈健, 闫晓东, 等. 温度对 7075 铝合金热变形显微组织演化的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(11): 1951—1957.
- LI Jun-peng, SHEN Jian, YAN Xiao-dong, et al. Effect of temperature on microstructure evolution of 7075 alloy during hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(11): 1951—1957.
- [16] 臧金鑫, 郑林斌, 张坤, 等. 新型超高强 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金热
- 压缩变形的流变应力行为[J]. 航空材料学报, 2011, 31(11): 35—39.
- ZANG Jin-xin, ZHENG Lin-bin, ZHANG Kun, et al. Flow stress behavior of a new high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy during hot compression deformation[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(11): 35—39.
- [17] 赵美兰, 孙文儒, 杨树林, 等. GH761 变形高温合金的热变形行为[J]. 金属学报, 2009, 45(11): 79—83.
- ZHAO Mei-lan, SUN Wen-ru, YANG Shu-lin, et al. Hot deformation behavior GH761 wrought Ni base superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(11): 79—83.
- [18] 王春旭, 刘宪民, 田志凌, 等. 超高强度 23Co14Ni12Cr3MoE 钢的热变形行为研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(6): 19—23.
- WANG Chun-xu, LIU Xian-min, TIAN Zhi-ling, et al. Hot deformation behavior of 23Co14Ni12Cr3MoE ultra-high strength steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6): 19—23.
- [19] 吴文祥, 韩逸, 钟皓, 等. 2026 铝合金热压缩变形流变应力行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1403—1408.
- WU Wen-xiang, HAN Yi, ZHONG Hao, et al. Flow stress behavior of 2026 aluminum alloy under hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1403—1408.
- [20] 蹇海根, 姜锋, 郑秀媛, 等. 高强高韧 B93 铝合金的热变形行为[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(8): 2291—2296.
- JIAN Hai-gen, JIANG Feng, ZHENG Xiu-yuan, et al. Hot deformation behavior of high strength and toughness B93 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(8): 2291—2296.
- 基金项目: 国家重点基础研究计划(“973”计划)项目(2012CB619503)
- 收稿日期: 2012-04-20; 修订日期: 2013-05-08
- 作者简介: 李波(1982—), 男, 博士研究生, 从事高性能铝合金研究, 联系地址: 中南大学材料科学与工程学院(410083), E-mail: liboiec@sohu.com
- *****
- (上接第 5 页)
- [20] JAFARIAN M, MAHJANI M G, GOBAL F, et al. Electrodeposition of aluminum from molten AlCl_3 -NaCl-KCl mixture[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2006, 36: 1169—1173.
- [21] ZHAO Y G, VANDERNOOT T J. Review: electrodeposition of aluminum from nonaqueous organic electrolytic systems and room temperature molten salts[J]. Electrochimica Acta, 1997, 42(1): 3—13.
- [22] CAPUANO G A, DUCASSE R, DAVENPORT W G. Electrodeposition of aluminium-copper alloys from alkyl benzene electrolytes[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1979, 9(1): 7—13.
- [23] JIANG T, CHOLLIER M J, BRYM B. Electrodeposition of aluminum from ionic liquids: Part I. Electrodeposition and surface morphology of aluminum from aluminum chloride ($[\text{Emim}]\text{Cl}$) ionic liquids[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(1): 1—9.
- [24] JIANG T, CHOLLIER M J, BRYM B. Electrodeposition of aluminium from ionic liquids: Part II. Studies on the electrodeposition of aluminium from aluminium chloride (AlCl_3)-Trimethylphenylammonium Chloride (TMPAC) ionic liquids[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(1): 10—18.
- [25] PRADHAN D, MANTHA D, REDDY R G. The effect of electrodesurface modification and cathode overpotential on deposit characteristics in aluminum electrorefining using EMIC- AlCl_3 ionic liquid electrolyte[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(26): 6661—6667.
- 基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51104028); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110041120031)
- 收稿日期: 2012-04-16; 修订日期: 2013-03-27
- 作者简介: 李佳艳(1980—), 女, 博士, 讲师, 从事多晶硅冶金法提纯的研究工作, 联系地址: 大连理工大学材料科学与工程学院(116024), E-mail: lijiaayan@dlut.edu.cn
- 通讯作者: 谭毅(1960—), 男, 教授, 从事多晶硅冶金法提纯的研究工作, 联系地址: 大连理工大学材料科学与工程学院(116024), E-mail: tanyi@dlut.edu.cn