文章编号: 1004-0609(2014)09-2339-06

铝电解碳素阴极材料在高温和电解状态下的蠕变模型

王 维^{1,2}, 逯 峙^{1,2}, 谷万铎³

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院,洛阳 471023;
 2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心,洛阳 471023;
 3. 伊川电力集团总公司,伊川 471312)

摘 要:为了获取铝电解碳素阴极材料的蠕变数据和 Burgers 模型参数,在 965 ℃及电解状态下,对现行工业中 使用的 3 种铝电解碳素阴极材料(半石墨质、全石墨质和石墨化)进行单轴压缩蠕变实验,采用 Burgers 模型对阴 极材料黏弹性行为进行分析。利用 Origin8.5 软件对 Burgers 模型参数进行拟合,得到碳素阴极材料的黏弹性方程。
 结果表明: Burgers 模型能较好地反映碳素阴极材料在单轴压缩应力作用下的黏弹特性,阴极材料石墨化程度越高,Burgers 模型参数 E₁、E₂、η₂ 和 η₁ 值越大,材料的抗蠕变能力越强。在电解过程中,钠和电解质破坏阴极材料结构,Burgers 模型参数 E₁、E₂、η₂ 和 η₁ 值变小,材料的抗蠕变能力变差。所获结果可为掌握阴极材料在外力 作用下的蠕变规律、实现对电解槽生产运行过程中阴极变形的调控和电解槽寿命预测提供技术参考。
 关键词: 铝电解;碳素阴极材料;蠕变;Burgers 模型
 中图分类号: TF821

Creep model of carbon-based cathode materials for aluminum electrolysis under high temperature and electrolysis conditions

WANG Wei^{1, 2}, LU Zhi^{1, 2}, GU Wan-duo³

College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
 Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals Henan Province, Luoyang 471023, China;

3. Yichuan Power Group Corporation, Yichuan 471312, China)

Abstract: In order to obtain the creep data and Burgers model parameters for various industrial cathode products, uniaxial compression creep tests were carried out using a modified Rapoport equipment for carbon cathode materials under high temperature (965 °C) and electrolysis conditions. The testing samples were taken from three typical industrial cathode blocks: semi-graphitic, full graphitic and graphitized carbon products. The viscoelasticity of the cathode materials was analyzed separately with Burgers model. After fitting the model parameters with Origin8.5 software, the constitutive equation of carbon cathode viscoelasticity was obtained. The results indicate that Burgers model can well reflect the viscoelasticity of the carbon cathodes. And the higher the graphitization of cathode materials is, the larger the Burgers model parameters E_1 , E_2 , η_1 and η_2 are, and the stronger the resistance to the creep deformation is. As the cathode material structure is damaged by the metallic sodium and the electrolyte, the Burgers model parameters E_1 , E_2 , η_1 and η_2 become smaller, and the resistance to the creep deformation of the cathode material gets worse. The obtained data will be useful for understanding the creep rule and better quality control in cathode deformation and the cell service life prediction in the production.

Key words: aluminum electrolysis; carbon cathode; creep; Burgers model

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(112300410132)

收稿日期: 2014-01-03; 修订日期: 2014-03-26

通信作者: 王 维, 副教授, 博士; 电话: 0379-64231269; E-mail: wwlyzwkj_003@163.com

近几年来,尽管我国铝冶炼水平在铝锭综合交流 电耗、低温铝电解和异型阴极电解槽等方面已接近或 达到国际先进水平^[1],但电解槽平均寿命(一般为 2300 d 左右)与先进国家同类型电解槽(3500 d 左右)相比, 仍有较大差距。铝电解槽寿命较短、大修次数较多, 并由此产生更多的废旧内衬材料而危害生态环境^[2-3]。 因此,提高铝电解槽寿命,对于提高整个铝电解行业 节能减排水平、建设资源节约型铝工业具有十分重要 的作用。

大量研究表明,阴极炭块长期在外力和钠膨胀作 用下发生蠕变使其性能降低,直接影响铝电解槽的寿 命^[4-6]。铝电解阴极材料的蠕变状况是评价阴极变形 和破损的重要参数。一个多世纪以来,许多铝冶金工 作者致力于改善阴极材料性能来提高铝电解槽寿命。

近年来,碳素阴极材料蠕变引起了人们的广泛关注。 ZOLOCHEVSKY 等^[7]对无烟煤阴极进行了铝电解单 轴压缩蠕变实验,并建立了一维简单模型。XUE 等^[8] 向阴极材料中加入 TiB₂进行单轴压缩实验,结果发 现,加入 TiB₂可以提高阴极材料的抗蠕变性能。铝电 解碳素 阴极材料以沥青为粘结剂,具有热 流变性质。然而,目前尚未将 Burgers 模型应用于铝 电解碳素阴极材料在钠膨胀和外力作用下的蠕变规律 的模拟和分析。

本文作者在实验室中利用改进的 Rapoport 测试 仪,对现行工业中使用的 3 种铝电解碳素阴极材料(半 石墨质、全石墨质和石墨化),在高温和电解条件下和 有外力作用时的蠕变规律进行研究,利用 Burgers 模 型,通过分析和推导,建立铝电解碳素阴极材料短期蠕 变过程的本构方程,获取其黏弹性参数,以通过短期蠕 变规律来预测其长期蠕变性能。研究得到的数据能为 阴极质量控制和电解槽设计改进提供参考。

1 实验

1.1 实验原料

实验中所用熔盐为工业中使用的冰晶石(NaF 与

| 表 1 | 1 阴极试样的 3 3 4 3 4 4 4 4 4 4 | 密度、气 | 孔率和热处 | し理温 | 度 |
|-----|---|------|-------------|-----|---|
| ~ 1 | | | 10-1-46 202 | | |

 Table 1
 Density, porosity and heat treatment temperature of cathode samples

| Sample | Dindon | Aggregata | Apparent | Apparent | Heat treatment |
|--------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|------------|----------------|
| No. | Bilider | Aggregate | density/(g·cm ⁻³) | porosity/% | temperature/°C |
| S | 20% pitch | 52% anthracite+28% graphite | 1.57 | 14.04 | 1200 |
| F | 20% pitch | 80% graphite | 1.64 | 18.12 | 1350 |
| G | 20% pitch | 80% graphite | 1.58 | 22.27 | 2850 |

AlF₃的摩尔比为 2.0), Al₂O₃、CaF₂ 和 NaF 均为化学 纯, 所有化学试剂在电解实验前在 400 ℃下烘烤 4 h。

表1所列为工业用3种阴极试样(半石墨质S、全石墨质F和石墨化G)的气孔率和密度。所有阴极试样均制成圆柱形(d25mm×40mm),以供电解使用。

1.2 蠕变实验装置

通过对经典 Rapoport 测试仪进行改进,自行集成 了铝电解阴极材料蠕变在线测试系统,其装置示意图 如图 1 所示。石墨坩埚放在电阻炉内,并固定在阳极 杆上,测试阴极试样放在刚玉片上,石墨坩埚作阳极, 刚玉片起到在阳极和阴极之间绝缘作用。电解时,直 流电从电源正极经过阳极导杆、坩埚侧部、电解质、



图1 铝电解阴极蠕变实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for cathode creep measurement during aluminum electrolysis: 1—Load; 2— LVD transducer; 3—Loading frame; 4—Measuring extension pin; 5—Gas outlet; 6—Loading extension rod; 7—Graphite crucible; 8—Cryolitic melt; 9—Testing cathode sample; 10— Alsint support; 11—Resistance furnace; 12—Anode rod; 13— Gas inlet 阴极试样和阴极导杆流回负极。该系统主要由恒载荷 加压装置、加热装置、温度控制装置、数据采集和记 录装置组成,精密激光位移传感器(量程为 10 mm,分 辩率为 1 μm)置于炉子电解池上部,阴极试样的蠕变 信号通过位移传感器 1 min 记录 1 次记录在计算机上。

铝电解池置于 965 ℃管式炉中,在进行非铝电解 蠕变实验时,先将试样与上下压头放置在同一轴线上, 应力水平为 5 MPa;进行铝电解蠕变实验时,阴极试 样浸入电解质深度为 40 mm,并通氩气保护。NaF 与 AlF₃的摩尔比为 2.5,阴极电流密度为 0.5 A/cm²。

2 结果与讨论

2.1 模型的选取

碳素阴极材料在加载瞬间产生一个瞬时弹性应变 ε₀,此后碳素阴极材料的变形渐渐增大。铝电解碳素 阴极材料在其服役期内,根据蠕变速率大小其蠕变变 形可分为3个阶段:初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变。 对于有黏性和弹性的碳素阴极材料来说,前两个阶段 的蠕变可用 Burgers 模型来模拟,如图2所示。



图 2 Burgers 蠕变模型

Fig. 2 Burgers creep model

该模型由一个 Maxwell 模型(硬弹簧 k₂和阻尼器 D_{p2}串联)和 Kelvin 模型(弹簧 k₁和阻尼器 D_{p1}并联)串 联而成^[9], Maxwell 模型中硬弹簧 k₂和阻尼器 D_{p2}分 别模拟碳素阴极材料的普通弹性变形和石墨原子间及 每一石墨原子层间的相对滑移引起的黏性流动, Kelvin 模型模拟延迟的弹性变形。Burgers 模型本构方 程为

$$\varepsilon = \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp(-\frac{E_2}{\eta_2} t) \right] \right\} \sigma \tag{1}$$

式中: σ 为应力; t 为应力作用时间; ε 为 Burgers 模型中的变形(应变); E_1 为 Kelvin 模型中延时弹性变形 系数; η_1 为 Kelvin 模型中的粘性系数; E_2 为 Maxwell 模型中瞬时弹性变形系数; η_2 为 Maxwell 模型中黏性 系数。 2.2 3 种阴极材料在高温下的 Burgers 模型拟合结果 根据式(1)可导出能反映铝电解碳素阴极材料在

单轴压缩条件下具有黏弹性特点的关系式:

$$y = A + B[1 - \exp(-Ct)] + Dt$$
 (2)

式中: *y* 为阴极材料的变形与时间的函数, *A*、*B*、*C* 和 *D* 为待定常系数, 且 *A*= σ/E_1 , *B*= σ/E_2 , *C*= E_1/η_2 , *D*= σ/η_1 。根据 3 种阴极材料在单轴压 缩条件下的蠕变曲线,利用 origin8.5 软件中非线性曲 线拟合功能可拟合出与蠕变曲线形状相似的图形, 同 时得出参数 *A*、*B*、*C*、*D* 的值和相关度^[10]。图 3~5 所 示分别为石墨化阴极试样 G、全石墨质阴极试样 F 和 半石墨质阴极试样 S 在 965 ℃、低应力水平 5 MPa 作 用下的蠕变及拟合曲线。根据参数 *A*、*B*、*C* 和 *D* 计 算出的 E_1 、 E_2 、 η_1 和 η_2 如表 2 所列。

从图 3~5 可以看出, Burgers 模型能够准确描述铝 电解碳素阴极材料的黏弹性蠕变特性,相关度在 0.93 以上。第一阶段为瞬态蠕变阶段,也就是蠕变开始 10~15 min 内,蠕变曲线呈现瞬间蠕变特征:起初蠕 变速率较大,但很快减小,具有瞬时弹性变形的特征。 接着进入蠕变第二阶段,即稳态蠕变阶段(蠕变曲线相 对平坦),该阶段蠕变速率较小,应变随着时间的延长 而增大,具有黏性流动变形的特征。

从表 2 中可以看出, Burgers 模型的参数 E_1 、 E_2 和 η_2 反映了 3 种阴极材料瞬态蠕变阶段的特征。3 种 阴极材料的 E_1 、 E_2 和 η_2 值随着石墨含量的增加而增 大。 E_1 与瞬态蠕变阶段的起点值关系较大, E_1 越大, 阴极材料瞬态蠕变起点值越小,该材料抗变形能力越



图 3 石墨化阴极 G 在 965 ℃、5 MPa 压力下的蠕变及拟合曲线

Fig. 3 Creep strain and fitting curves with testing time for cathode sample G at 965 $^{\circ}$ C and 5 MPa

| 表 2 | 3种阴极材料高温时的 Burg | ers 模型拟合参数 |
|-----|-----------------|------------|
|-----|-----------------|------------|

 Table 2
 Fitting parameters of Burgers model for three typical industrial cathode blocks at high temperature

| Sample No. | $E_1/(10^9 \text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ | $E_2/(10^9 \text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ | $\eta_1/(10^9 \mathrm{N}\cdot\mathrm{min}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$ | $\eta_2/(10^9 \mathrm{N}\cdot\mathrm{min}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$ | Relevancy |
|------------|--|--|--|--|-----------|
| S | 0.620 | 0.398 | 33.781 | 1.133 | 0.976 |
| F | 2.315 | 0.440 | 37.882 | 1.210 | 0.968 |
| G | 3.472 | 0.521 | 42.707 | 1.464 | 0.932 |



图 4 全石墨质阴极 F 在 965 ℃、5 MPa 下的蠕变及拟合曲 线

Fig. 4 Creep strain and fitting curves with testing time for cathode sample F at 965 $^\circ$ C and 5 MPa



图 5 半石墨质阴极 S 在 965 ℃、5 MPa 下的蠕变及拟合曲 线

Fig. 5 Creep strain and fitting curves with testing time for cathode sample S at 965 $\,^\circ\!\mathrm{C}\,$ and 5 MPa

强,该变形卸载后能够全部恢复。E₂越大,阴极材料 在瞬态蠕变阶段蠕变变形范围越小,η₂越大,阴极材 料在瞬态蠕变阶段蠕变曲线越平坦。η1反映了3种阴 极材料稳态蠕变阶段产生的黏性流动不可恢复的特 征。η1越大,阴极材料在稳态蠕变阶段曲线斜率越小, 该材料抗变形能力越强^[11]。 碳或石墨原料的蠕变行为是化学和微观机械过程 的结果,如运动缺陷、晶界滑移和晶界扩散,物质渗 透到微孔中,迁移再结晶过程导致碳素阴极材料基面 在范德华力作用下的解离和滑移较容易。半石墨质阴 极试样骨料中无烟煤较多,在填充粒子中原子基面上 由于范德华力有更多的解理和滑移,仅需要较低的能 量来激活变形,相对于石墨来说,材料基面在范德华 力作用下容易解离和滑移,因此,抗蠕变能力较弱。 另一方面,在高温下,位错可借助于外界提供的热激 活能和空位扩散来克服某些短程障碍,使变形不断产 生。高温下的热激活过程主要是刃位错的攀移。当塞 积群中的某一位错被激活而发生攀移时,位错源便可 能再次开动而放出一个位错,从而形成动态回复 过程^[12]。

2.3 3种阴极材料在电解状态下的 Burgers 模型拟合

图 6~8 所示分别为 3 种阴极材料在 965 ℃、NaF 与 AlF₃的摩尔比为 2.5、低应力水平为 5 MPa 下电解时的蠕变及拟合曲线。根据参数 *A*、*B*、*C* 和 *D* 计算出的 *E*₁、*E*₂、η₁和 η₂如表 3 所列。

从图 6~8 和表 3 可以看出,用 Burgers 模型拟合



图 6 石墨化阴极 G 在 965 ℃、NaF 与 AlF₃ 的摩尔比 2.5、 5 MPa 压力下铝电解时的蠕变及拟合曲线

Fig. 6 Creep strain and fitting curves with testing time for cathode sample G during aluminum electrolysis at 965 $^{\circ}$ C, mole ratio of NaF to AlF₃ of 2.5 and 5 MPa

表3 3种阴极材料电解时的 Burgers 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Burgers model for three typical industrial cathode blocks during aluminum electrolysis

| Sample No. | $E_1/(10^9 \text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ | $E_2/(10^9 \text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ | $\eta_1/(10^9 \mathrm{N} \cdot \mathrm{min} \cdot \mathrm{mm}^{-1})$ | $\eta_2/(10^9 \mathrm{N}\cdot\mathrm{min}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$ | Relevancy |
|------------|--|--|--|--|-----------|
| S | 0.253 | 0.218 | 25.641 | 0.772 | 0.945 |
| F | 0.878 | 0.341 | 32.118 | 0.987 | 0.982 |
| G | 2.1186 | 0.449 | 35.546 | 1.174 | 0.965 |



图 7 全石墨质阴极 F 在 965 ℃、NaF 与 AlF₃ 的摩尔比 2.5、5 MPa 压力下铝电解时蠕变及拟合曲线图

Fig. 7 Creep strain and fitting curves with testing time for cathode sample F during aluminum electrolysis at 965 $^{\circ}$ C, mole ratio of NaF to AlF₃ of 2.5 and 5 MPa



图 8 半石墨质阴极 S 在 965 ℃、NaF 与 AlF₃的摩尔比为 2.5、5 MPa 压力下铝电解时蠕变及拟合曲线图

Fig. 8 Creep strain and fitting curves with testing time for cathode sample S during aluminum electrolysis and at 965 $^{\circ}$ C, mole ratio of NaF to AlF₃ of 2.5 and 5 MPa

铝电解 3 种阴极材料在电解状态、低应力水平下的蠕变曲线时,相关系数在 0.94 以上,因此,该模型适合描述阴极材料在电解条件下的黏弹性蠕变特性。对于不同阴极材料,石墨含量越高,在电解条件下, *E*₁、

 E_2 、 η_2 和 η_1 越大,材料抗蠕变能力越强。

2.4 3种阴极材料在高温和电解状态下的蠕变规律比较

电解对阴极材料蠕变的影响体现在 Burgers 模型 中各参数的变化。对于同一种阴极材料,电解状态下 Burgers 模型的 4 个参数值均有所减小, 半石墨质阴极 材料减小得最多。半石墨质阴极材料的 E1 由高温条件 下 0.620 减小至电解状态下的 0.253, 瞬态蠕变起点值 由 11.72 µm 增大到 25.42 µm; E2 由高温条件下 0.398 减小至电解状态下的 0.218, 瞬态蠕变阶段蠕变变化 量由 11 μm 增大到 19 μm; η1 由高温条件下 33.781 减 小为电解状态下 25.641, 而稳态蠕变阶段曲线斜率由 1.48×10⁻⁴ 增大到 1.95×10⁻⁴, 其他两种阴极材料也 有同样的变化规律。在电解状态下,瞬态蠕变起点值、 瞬态蠕变范围和稳态蠕变斜率均增大, 阴极材料抗蠕 变能力变差。这与钠和电解质渗透入碳层形成插层化 合物和阴极材料的热处理温度有关[13-14]。钠和电解质 渗透入碳层形成插层化合物后破坏了碳素阴极材料的 结构,使阴极材料抵抗蠕变能力下降, E1 值减小使得 蠕变第一阶段起点值增大, E2和 η2值的减小使得第一 阶段蠕变曲线更陡一些,时间更长。石墨化阴极材料 G的热处理温度最高(约为2850℃),其次是全石墨质 阴极材料 F(约为 1350 ℃)和半石墨质阴极材料 S(约为 1200 ℃)。热处理温度越低,费米能级越低,石墨原 料 F1层结构越多,结果使更多的钠进入石墨层间形成 层间化合物, 阴极材料抗蠕变能力下降^[15]。

3 结论

 对现行工业中使用的 3 种碳素阴极材料在高 温和电解状态下进行了单轴压缩蠕变实验,采用 Burgers 模型较好地描述了碳素阴极材料的黏弹性蠕 变特性,并对其黏弹性进行了分析。

2) 阴极材料的石墨化程度越高, Burgers 模型参数中 E_1 、 E_2 、 η_1 和 η_2 的值越大,相应地,蠕变第一阶段起点值、稳态蠕变曲线弯曲范围和蠕变第二阶段的

斜率越小, 蠕变第一阶段曲线越平坦, 材料的抗蠕变 能力越强。

3) 在电解过程中由于钠和电解质渗透到阴极材 料内部形成了层间化合物,破坏了阴极材料的结构, Burgers 模型参数 E_1 、 E_2 、 η_2 和 η_1 的值变小,材料的 抗蠕变能力变差。阴极材料热处理温度越高,形成的 层间化合物越少,对 Burgers 模型参数影响越小。

REFERENCES

- [1] 李 劼,方 钊, 吕晓军, 田忠良, 赖延清, 胥 建. 过热度和电流密度对半石墨质阴极低温电解膨胀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2222-2229.
 LI Jie, FANG Zhao, LÜ Xiao-jun, TIAN Zhong-liang, LAI Yan-qing, XU Jian. Effects of superheat and current density on electrolysis expansion performance of semi-graphitic cathode at low temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,
- 2009, 19(12): 2222-2229.
 [2] 刘业翔,李 劼. 现代铝电解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 383-387.
 LIU Ye-xiang, LI Jie. Modern aluminum electrolysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 383-387.
- [3] WANG Yao-wu, FENG Nai-xiang, YOU Jing, PENG Jian-ping, SU Shi-jie, DUAN Xue-liang, WU Jian-guo, MA Shao-xian, MA Cheng-gui. Study on expansion of TiB₂/C compound cathode and sodium penetration during electrolysis[C]//SØRLIE M. Proceedings of Light Metals 2007. Orlando: TMS, 2007: 1067–1070.
- [4] ZOLOCHEVSKY A, HOP J G, SERVANT G, FOOSNS T, ØYE H A. Rapoport-Samoilenko test for cathode carbon materials. I: Experimental results and constitutive modeling[J]. Carbon, 2003, 41(3): 497–505.
- [5] ZOLOCHEVSKY A, HOP J G, SERVANT G, FOOSNS T, ØYE H A. Creep and sodium expansion in a semigraphitic cathode carbon[C]//CREPEAU P N. Proceedings of Light Metals 2003. San Diego: TMS, 2003: 595–602.
- [6] XUE Ji-lai, WU Lian-cheng, WANG Wei, NIU Qing-ren, LIU Qing-sheng, HOU Xin, ZHU Jun, HE Hua. Characterization of sodium expansion in industrial graphitic and graphitized cathodes[C]//JOHNSON J A. Proceedings of Light Metals 2010. Warrendale: TMS, 2010: 849–853.
- [7] ZOLOCHEVSKY A, HOP J G, FOOSNS T, ØYE H A.

Rapoport–Samoilenko test for cathode carbon materials—II. Swelling with external pressure and effect of creep[J]. Carbon, 2005, 43(6): 1222–1230.

- [8] XUE Ji-lai, LIU Qing-sheng, LI Bai-song. Creep deformation in TiB₂/C composite cathode materials for aluminum electrolysis[C]//DEYOUNG D H. Proceedings of Light Metals 2008. Orleans: TMS, 2008: 1023–1027.
- [9] 熊良宵,杨林德,张 尧. 岩石的非定常 Burgers 模型[J]. 中 南大学学报:自然科学版, 2010, 41(2): 679-684. XIONG Liang-xiao, YANG Lin-de, ZHANG Yao. Non-stationary Burgers model for rock[J]. Journal of Central South University of Technology: Science and Technology, 2010, 41(2): 679-684.
- [10] 徐朝阳,李大纲,陈婷婷.聚丙烯打包带蠕变特性研究[J].包 装工程,2009,30(9):85-87.

XU Zhao-yang, LI Da-gang, CHEN Ting-ting. Study of creep characteristics of polypropylene packaging belt[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 85–87.

- [11] 李晓军, 江丽华. 沥青砂浆粘弹特性试验与模型参数分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(3): 82-86.
 LI Xiao-jun, JIANG Li-hua. Test and model parameter analysis of asphaltic sand with viscoelasticity[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(3): 82-86.
- [12] PICARDA D, FAFARD M, SOUCY G, BILODEAU J F. Room temperature long-term creep relaxation behaviours of carbon cathode materials[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 496(1/2): 366–375.
- [13] LI Jie, WU Yu-yun, LAI Yan-qing, LIU Wei, WANG Zhi-gang, LIU Jie, LIU Ye-xiang. Simulation of thermal and sodium expansion stress in aluminum reduction cells[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(2): 198–203.
- XUE Ji-lai, LIU Qing-sheng, OU Wen-Li. Sodium expansion in carbon /TiB₂ cathodes during aluminum electrolysis[C]//SØRLIE
 M. Proceedings of Light Metals 2007. Orlando: TMS, 2007: 1061–1066.
- [15] ZOLOCHEVSKY A, HOP J G, FOOSNS T, ØYE H A. Surface exchange of sodium, anisotropy of diffusion and diffusional creep in carbon cathode materials[C]//KVANDE H. Proceedings of Light Metals 2005. San Francisco: TMS, 2005: 745–750.

(编辑 陈卫萍)