

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.020

Weibull 拟合的钠硫电池加热模块温升分析

张建平^{1,2}, 韩 熠^{1,2}, 刘 宇³, 朱群志¹

(1.上海电力学院 能源与机械工程学院,200090 上海; 2.上海市电力材料防护与新材料重点实验室(上海电力学院),
200090 上海;3.中国科学院 上海硅酸盐研究所, 200050 上海)

摘 要: 为分析钠硫电池加热模块的温升过程,分别基于三维瞬态导热方程和 Weibull 函数建立了加热模块的理论模型和试验温升数据的拟合模型,数值模拟了钠硫电池加热模块温升过程与瞬态温度分布,探讨 Weibull 参数对升温曲线的影响规律.结果表明:Weibull 拟合模型能够精确描述加热模块的温升过程,可靠度较高;模块内部整体温升率随时间和距离模块中心的长度均呈非线性降低趋势;形状参数和尺度参数分别决定了分段温升和整体温升的效率,这为钠硫电池加热模块以及其他加热装置的优化设计提供参考.

关键词: 钠硫电池;加热模块;Weibull 拟合模型;温升过程

中图分类号: TM911, TU55+1.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)03-0111-05

Temperature rise analysis of heating module for sodium-sulfur battery based on Weibull fitting

ZHANG Jianping^{1,2}, HAN Yi^{1,2}, LIU Yu³, ZHU Qunzhi¹

(1. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, 200090 Shanghai, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Materials Protection and Advanced Materials in Electric Power, Shanghai University of Electric Power, 200090 Shanghai, China; 3. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 200050 Shanghai, China)

Abstract: In order to analyze the temperature rise of the heating module for sodium-sulfur battery, the theoretical model of the heating module and fitting model of the experimental temperature data were established on the basis of 3D transient heat conduction equation and Weibull function, respectively, and also the temperature rise process and the transient temperature distribution of heating module for sodium-sulfur battery were numerically simulated, and the effects of Weibull parameters on the temperature rise curve were further investigated. The results indicate that the Weibull fitting model could accurately describe the temperature rise process of heating module with high reliability, and the temperature rise rate inside the whole heating module presents nonlinearly decreasing trend with the increase of time, as well as the length from the module center. Furthermore, shape and scale parameter dominate the efficiency of the sectional temperature rise and the overall one respectively, and the technical reference is provided for the optimal design of heating module for sodium-sulfur battery and other heating devices.

Keywords: sodium-sulfur battery; heating module; Weibull fitting model; temperature rise process

新能源装置作为能源与环境问题的解决途径

收稿日期: 2013-12-20.

基金项目: 上海市优秀学科带头人计划(B类)基金(13XD1425200);
上海市教育委员会科研创新基金(14ZZ154); 上海市
科学技术委员会基金(13160501000, 11DZ2281700,
14DZ2261000).

作者简介: 张建平(1972—),男,教授,硕士生导师.

通信作者: 张建平, jpzhanglzu@163.com.

之一,近年来获得了长足发展,其中,储能电池是尤为重要的一环.在现有的储能电池技术中,钠硫电池因具有能量密度大,循环寿命长,转换效率高,以及制备成本低,场地限制小,维护较方便等优点,越来越获得人们的关注^[1-2].钠硫电池在电网削峰填谷、应急电源、提高可再生能源发电质量,以及电能汽车驱动等方面展现了广阔的发展前景^[3].

钠硫电池的最佳工作温度环境为 270 ~ 350 °C^[4], 本文结合实际产品的运行需求, 将工作温度设定为 350 °C. 钠硫电池加热模块内部温升率直接影响电池的启动效率与运行安全. 此外, 由于钠硫电池内部由多个陶瓷管电池单元组成, 该陶瓷材料对于温度变化非常敏感, 温度变化过大很可能会导致陶瓷管破裂, 从而使得电池单元失效. 因此, 有必要对其加热温升过程进行探究, 使得电池在启动过程中能快速稳定地将加热模块内部温度提升至工作温度.

文献[5]应用有限元方法, 针对电动汽车用 Li-ion 电池在实际使用过程的发热量与热场分布进行了分析; 文献[6]针对钠硫电池陶瓷管单元集群及整体电池加热模块温度分部进行了数值模拟. 文献[7]提出宽线金属膜加热方法, 建立电池加热模型, 并对低温环境下的锂离子电池单体进行了加热和放电试验; 文献[8]利用有限差分法, 考虑光电转换效率、布片效率等因素, 求解得到航天器上太阳能电池阵的周期温度分布规律; 文献[9]采用程序方法实现了直接甲醇燃料电池测试用温度控制系统, 试验得出了控制系统的平均升降温速度. 然而, 在温度曲线拟合方面, 开展的研究相对较少; 文献[10]在 D 型镍氢电池充放电热行为分析中采用自修正指数拟合曲线刺激; 文献[11]采用 SPSS 程序的非线性拟合方法, 基于单板层积材热压温升曲线特征与马尔萨斯模型特征的相似性, 建立了温度与时间的数学模型, 并求得温升速率系数; 文献[12]利用轴对称配置的有限差分法模拟了小型氢燃料电池系统的热流量, 指出需要增加电池的保温系统来减少主要由环境造成的热损失.

由此可见, 钠硫储能作为新能源储能领域的新技术, 其加热装置温升效能和温升率控制优化设计的问题亟待解决. 鉴于此, 本文基于钠硫电池加热模块试验温升数据, 建立了 Weibull 拟合模型, 应用有限元数值模拟了加热模块内部温度变化, 给出了 Weibull 参数对温升过程控制的影响规律.

1 基本模型

1.1 物理模型描述

通常情况下, 钠硫电池的加热装置采用安装于加热模块保温层内侧的电加热板, 加热板组成的腔体内安置电池单元, 空隙填充石英砂. 石英砂是一种坚硬、耐磨、化学性能稳定的硅酸盐矿物, 其热物理性能呈现各向异性, 所以钠硫电池内部加热过程可看作是一个复杂三维加热模块内的瞬态导热问题. 由于该模型实际尺寸较大, 基于试验测定的热物理参数经验值, 可将石英砂及电池单

元等效为一种各项同性材料. 即忽略材料品质、加工精度、电池单元结构的影响, 可将该问题简化为各项同性立方体单质的瞬态导热问题来解决.

1.2 模型初边值问题

由热力学第一定律, 结合导热微分方程, 将各加热板等效为定热流密度边界条件, 则三维瞬态导热模型为^[13]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T, \quad (1)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = q. \quad (3)$$

式中: 温度 T 为坐标 (x, y, z) 及时间 t 的函数; T_0 为系统初始温度; ρ, c, λ 分别为材料的密度、比热容及导热系数; q 为平板加热器产生的热流密度.

1.3 求解方法

结合三维瞬态导热模型, 利用加权余量法, 积分可得 n 个节点温度 $[T]$ 的矩阵方程为

$$[C] \frac{\partial [T]}{\partial t} + [K] [T] = [P]. \quad (4)$$

式中: $[C]$ 为热容矩阵; $[K]$ 为热传递矩阵; $[P]$ 为给定热流边界式(3)的温度载荷列阵.

在时间上采用 Crank-Nicolson 方法^[14], 式(4)可写为

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + (1 - \theta)[K] \right) [T]_{n+1} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \theta[K] \right) [T]_n + \theta [P]_n + (1 - \theta) [P]_{n+1}. \quad (5)$$

式中: θ 为计算参数, $0 < \theta < 1$; T_n, T_{n+1} 分别为 n 和 $n + 1$ 时间步的所有节点温度列阵. 式(5)中已经包含传导边界条件式(3), 相应的初始条件由式(2)给出. 于是, 每一时间步各离散点的温度场 T 便可求出.

1.4 温升曲线 Weibull 拟合模型

外部加热器温升曲线的拟合有助于对加热规律的准确描述和控制. 由于 Weibull 函数具有使用范围广、数据拟合能力强等特点^[15], 三参数 Weibull 改进形式为

$$T(t) = T_0 + T(t_0) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^m \right] \right\}, \quad (6)$$

$$t > t_0, m, \eta > 0.$$

式中: m 为形状参数, 其值的大小决定密度曲线的几何形状; η 为尺度参数, 它决定着曲线 $T(t)$ 的陡度, η 越大, 加热时间越长, 温升率越低, 但数据也越分散, 说明加热机理越复杂; t_0 为位置参数, 表明加热模块在该时刻前未进行加热, 不影响加热曲线的形状, 只使加热曲线发生平移.

利用 Weibull 函数拟合加热器温升过程, 可通过形状参数和尺度参数对于曲线几何形状的影响来有效掌握钠硫电池加热模块内部的整体温升规律, 对设计和维护提供参考。

2 加热模块温升试验

加热试验采用与实际产品相同的模型, 其大小为 1 000 mm×800 mm×800 mm, 如图 1 所示。加热装置为 6 块电加热板, 腔体内部填充石英砂。选用的石英砂粒径为 0.45~0.90 mm, 其等效导热系数为 1.728 W/(m·k), 密度为 2 650 kg/m³, 比热容为 256.19 J/(kg·K)。加热板内侧面(尺寸为 800 mm×800 mm 的面)对角线上设两个测点, 均偏离该侧面中心点的距离为对角线长度的 1/4, 具有一定的代表性, 这是因为所测温度能反映加热模块试验箱温度随时间和位置的变化规律。通过控制模块控制加热器功率与温升极限, 即腔体外侧升至 350℃后, 进入恒温过程。经过 350 000 s, 试验加热模块温度达到设计值, 其具体温升过程曲线如图 2 所示, 测点 1 的试验数据如表 1 所示。

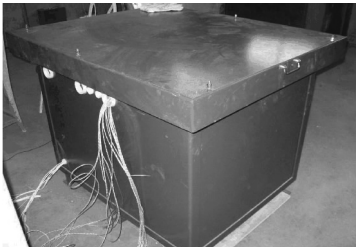


图 1 加热模块温升试验箱体

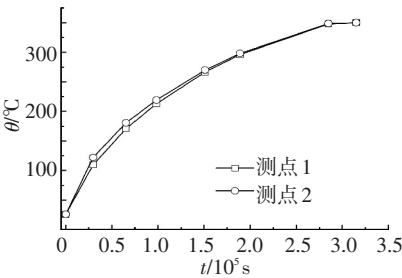


图 2 加热模块试验测试温升曲线

表 1 试验测试温度(θ)及其拟合值(θ)对比

t/s	θ/℃	θ/℃	误差/%
0	25.9	25.9	0.0
29 700	109.5	104.7	4.4
65 400	170.7	173.7	1.8
98 400	212.9	221.2	3.9
151 200	266.6	274.5	3.0
189 000	296.0	300.8	1.6
284 700	347.7	340.6	2.0
315 000	350.0	348.0	0.5

3 试验数据的 Weibull 拟合

结合表 1 中试验数据, 利用右逼近方法^[16], 采

用自行编制的程序完成线性回归分析与迭代计算, 由此确定式(6)中的参数, 则加热器温升拟合公式为

$$T(t) = 375.9 - 350.0 \exp \left[- \left(\frac{t}{121\,346.203} \right)^{0.973} \right]. \tag{7}$$

由式(7)计算的拟合温度及其误差同样如表 1 所示, 平均误差仅为 2.4%, 拟合决定系数 $R_1^2 = 0.998$ 很接近于 1, 这说明拟合精度很高。此外, 图 3 更直观地给出了 Weibull 拟合温升曲线与试验点的对比情况, 吻合较好。

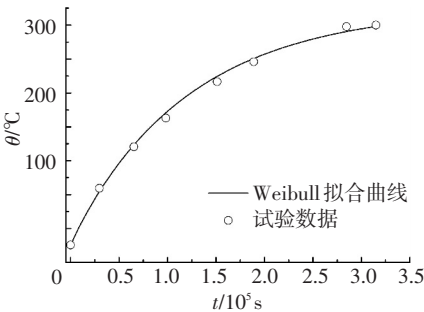


图 3 钠硫电池加热装置温升试验数据及其拟合曲线

4 加热模块有限元仿真

4.1 实体建模与网格剖分

根据物理模型可建立各项同性立方体的实体模型, 并采取四面体等分网格进行网格剖分, 结果如图 4 所示。

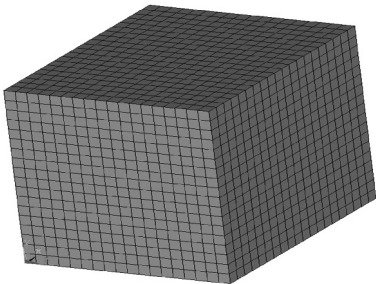


图 4 加热模块内部实体建模与网格剖分

4.2 有限元加载与求解

结合 ANSYS, 将石英砂的导热系数、比热容、密度输入实体模型, 六面均加载式(7)所述的温度载荷, 时间步长采取程序自动控制, 从而完成加热模块内部温度的瞬态求解。

5 数值结果与讨论

5.1 可靠性验证

为验证有限元方法的可靠性, 以加热器内壁测点 1 的温升 Weibull 拟合式(7)和试验数据点分别作为温度载荷, 计算所得温度 θ^* 和 $\bar{\theta}^*$ 如表 2 所示, 平均相对误差仅为 3.0%, 与表 1 对比后发现, $\bar{\theta}^*$ 与表 1 中的试验数据 θ 吻合较好, 这说

明了有限元仿真方法的可靠性. 此外, 由于 Weibull 拟合曲线更光滑, 更接近实际工况, 因此在后续分析中采用拟合公式结果更精确.

表 2 有限元仿真结果对比

t/s	$\bar{\theta}^*/^{\circ}\text{C}$	$\theta^*/^{\circ}\text{C}$	误差/%
0	25.9	25.9	0.0
29 700	109.5	113.3	3.5
65 400	170.7	180.0	5.4
98 400	212.9	225.9	6.1
151 200	266.6	277.6	4.1
189 000	296.0	303.1	2.4
284 700	347.7	341.6	1.8
315 000	350.0	348.7	0.4

5.2 加热模块内部温度分布与温升过程

图 5 给出了 25 202、55 444、141 130、201 620 s 时刻钠硫电池内部温度分布, 而由侧面(尺寸为 800 mm×800 mm 的面)中心位置 A 点向加热模块几何中心 O 点连线方向上的温度分布情况如图 6 所示. 随着时间的增长, 加热模块内部温度逐步上升, 温度分布曲线逐渐趋于平缓, 整体温差逐渐缩小.

图 7 展示了加热模块内部温度最大值与最小值随时间变化的关系, 两条曲线之间的差值代表温度在石英砂中传递过程, 其大小与石英砂导热系数、比热容等参数有关. 不难看出, 这一差值随着时间呈减小的趋势.

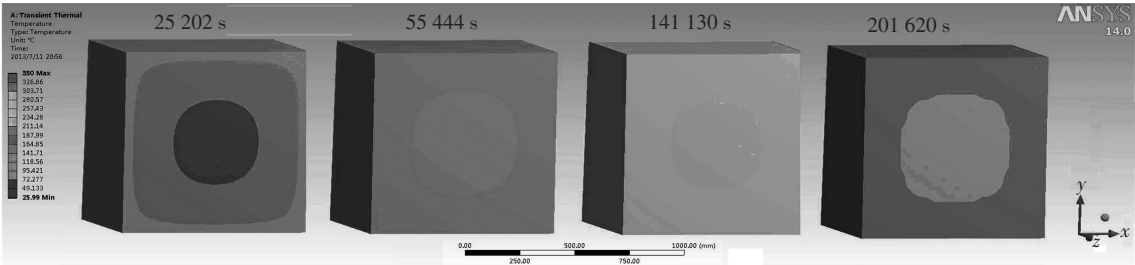


图 5 加热模块内部不同时刻的温度场

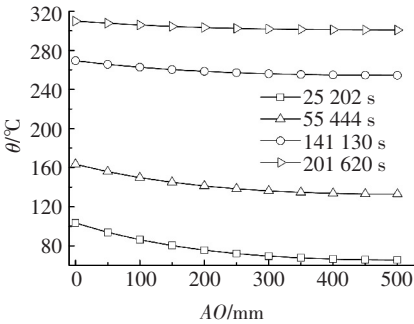


图 6 不同时刻加热模块内部沿 AO 连线方向的温度分布

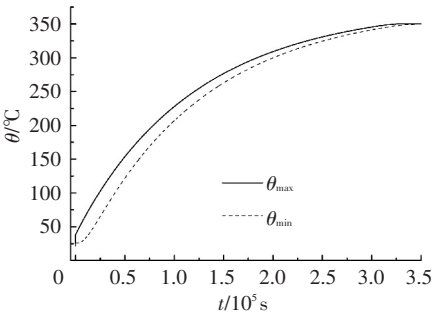


图 7 加热模块内部温度最大值与最小值随时间变化

记 B 点和 C 点分别位于 AO 连线距 A 点 100 mm 处和 300 mm 处的位置, 图 8 描述了 B、C、O 点 3 处不同位置温升率随时间的变化; 图 9 给出了与图 7 对应时间段上沿 AO 连线方向温升率的变化情况. 不难得知, 加热装置内部温升率随时间基本呈一致的非线性降低趋势; 越靠近加热模块几何中心位置, 温升率越大, 这是由于模块内部

温度受到其他加热面热流的影响沿 AO 连线方向逐渐增强导致温差变化率逐步增大的原因所致.

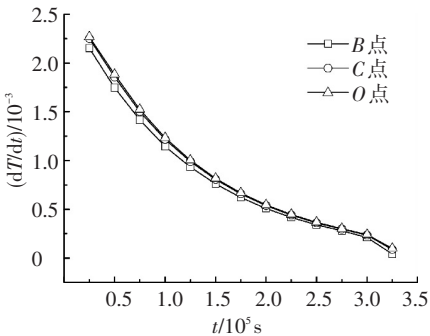


图 8 加热模块内不同位置的温升率随时间变化

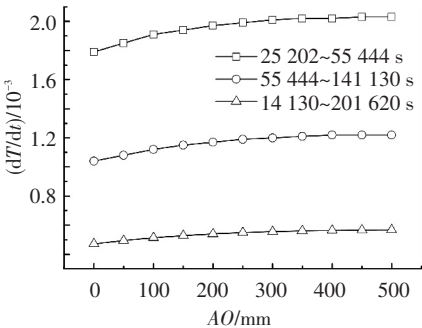


图 9 加热模块内不同时段沿 AO 连线方向的温升率变化

5.3 Weibull 拟合模型参数对温升曲线的影响

根据 Weibull 拟合模型, 形状参数 m 和尺度参数 η 决定着温升曲线 $T(t)$ 的形状, 由此可精确控制工程实际所需的温升曲线.

图 10 显示了 η 不变, m 分别为 0.973、0.673、0.373 时温升曲线的变化情况. 可以看出, 在约 1.2×10^5 s 时刻之前, m 越小, 加热曲线形状越陡, 温升率越大, 达到相同温升所需时间越短, 而在此时刻之后温升率变化趋势相反.

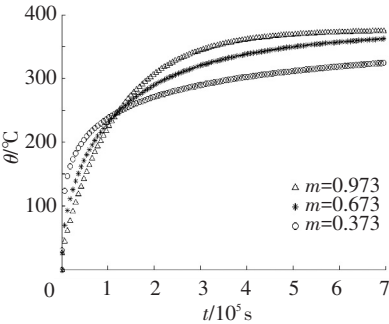


图 10 不同形状参数 m 的温升曲线

如图 11 所示, m 不变, η 分别为 171 346.2、12 346.2、71 346.2 时的曲线变化. 由图 11 可看出, η 对于整个温升过程的温升率产生明显影响, η 越小, 曲线形状越陡, 温升率越大, 达到最高温升所需时间越短.

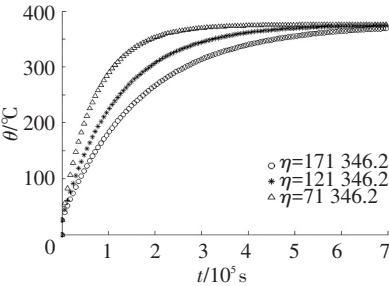


图 11 不同尺度参数 η 的温升曲线

在加热模块实际使用中, 当需要整体加热过程前后速率不同时, 可通过 m 的变化来实现; 而加热器内部结构不能承受过大温升率时, 可通过增大 η 来减小温升率, 并达到同样的温升.

6 结 论

- 1) Weibull 拟合模型与试验数据点间最大误差为 4.4%, 决定系数 R_1^2 为 0.998, 表明该拟合模型具有较高的可信度;
- 2) 钠硫电池加热模块内部任一点温升率随时间呈非线性下降趋势, 且距离中心位置越远, 同一时刻的温升率越低;
- 3) 通过调节 Weibull 模型中形状参数与尺度参数, 可实现温升曲线的精确和分段控制, 便于根据具体温升要求来改变加热模块的参数设置.
- 4) 研究结果可应用于钠硫电池配套加热模块温升的研究开发与生产设计, 并在保温结构设计以及其他热分析领域具有广泛的适用性与参考价值.

参考文献

[1] 邱广玮, 刘平, 曾乐才, 等. 钠硫电池发展现状[J]. 材料导报, 2011, 25(11): 34-37, 65.

[2] LEADBETTER J, SWAN L G. Selection of battery technology to support grid-integrated renewable electricity [J]. Journal of Power Sources, 2012, 216:376-386.

[3] 孙丙香, 姜久春, 时玮, 等. 钠硫电池储能应用现状研究[J]. 现代电力, 2010, 27(6): 62-65.

[4] ELLIS B L, NAZAR L F. Sodium and sodium-ion energy storage batteries [J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 2012, 16(4): 168-177.

[5] AWARKE A, JAEGER M, OEZDEMIR O, et al. Thermal analysis of a Li-ion battery module under realistic EV operating conditions [J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(6): 617-630.

[6] MINA J K, LEEB C H. Numerical study on the thermal management system of a molten sodium-sulfur battery module [J]. Journal of Power Sources, 2012, 210: 101-109.

[7] 张承宁, 雷治国, 董玉刚. 电动汽车锂离子电池低温加热方法研究 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(9): 921-925.

[8] 秦文波, 程惠尔, 李鹏. 航天器刚性基板太阳电池阵在轨热分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 827-831.

[9] 李苗苗, 刘冲, 梁军生, 等. 直接甲醇燃料电池测试用温度控制系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 943-951.

[10] FANG K Z, MU D B, CHEN S, et al. Thermal behavior of nickel-metal hydride battery during charging at a wide range of ambient temperatures [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 105(1): 383-388.

[11] 余养伦, 于文吉, 江泽慧, 等. 单板层积材热压温升曲线数值模拟的研究 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28(1): 130-133.

[12] BESSER R S. Thermal integration of a cylindrically symmetric methanol fuel processor for portable fuel cell power [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(1): 276-283.

[13] HOLMAN J P. Heat Transfer [M]. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2001.

[14] 张建平, 颜志江, 戴咏夏. 磁场环境中几何非线性导电薄板的热弹性耦合振动 [J]. 机械强度, 2011, 33(2): 159-164.

[15] ZHANG JianPing, ZHOU TingJun, WU Helen, et al. Constant-Step-Stress accelerated life test of white OLED under Weibull distribution case [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(3): 715-720.

[16] 周英彪, 段权鹏, 范杜平. 利用威布尔分布模型对球磨机可靠性分析 [J]. 热能动力工程, 2009: 24(1): 95-99.

(编辑 张 红)