

# 加工过程中的热量会损坏电池吗？

研究人员借助数值仿真对高端电池系统制备过程中锂离子电池单元的堆叠展开了探索。

作者 **JENNIFER HAND**

**锂**离子 (Li-ion) 电池的工作温度会对其性能和耐久度产生巨大的影响, 具体表现为低温会导致性能下降, 高温会导致电池迅速降解。因此, 无论温度过高还是过低, 电池的整体可靠性都会受到影响, 进而可能造成安全隐患。

目前工业界针对电池在工作状态下可承受的温度变化范围, 已经制定了专门的标准。然而对于电池在制造过程中所经历的各种高温环境, 却并未受到过多的关注。在电池的制造过程中, 等离子体预处理、UV 固化、激光焊接、超声波接合、热堆积和热胶合等环节都可能带来隐患。锂离子电池中包含了数千个堆叠在一起的电池单元, 其组装流程涉及了各类热处理工艺, 部分工艺的操作温度极高, 能够在短时间内使电池壳体或其他元件暴露在高温中。

Gerd Liebig 是位于德国奥登堡大学的 NEXT ENERGY EWE 能源技术研究中心的研究人员, 他解释道: “众所周知, 焊接等工艺流程会使电池内部的温度大幅升高, 然而我们尚不清楚这种高温在电池内部的传播情况, 以及对电池单元造成的损害程度。”

奥登堡大学的 Pamina Bohn 博士和 NEXT ENERGY 的科研人员展开了密切的合作, 开始研究电池的制造过程是否会引发电化学降解反应, 从而影响电池的稳定性和容量, 造成不可逆的损害。若采用实验方法进行研究, 不仅要提供严密的安全预防措施, 同时还需要投入大量的时间和费用, 因此他们决定利用数学模型来进行验证。研究团队借助数值仿真对不同的电池工作场景进行了研究, 并在模型中添加了探针, 以获取任意点的检测数据。这样的研究效果是物理实验无法达到的。

## ⇒ 设计热应力实验

研究团队首先建立了物理实验, 对仿制棱柱形锂电池单元在短时间内受到热应力后可能达到的温度进行了测量。实验的目的是收集用于验证数学模型的数据, 并对电池单元制造过程中的各类影响因素进行研究。电池单元的组件包括双面涂层阳极材料、双面涂层阴极材料以及一层夹在中间的聚烯烃隔膜纸, 三层材料是卷起来的, 这种结构俗称“绕卷”(jelly roll)。研究人员使用有机溶剂作为电池电解质, 将绕卷浸于其中, 并在电池单元上放置了八个温度传感器: 三个在绕卷结构中间, 三个在电

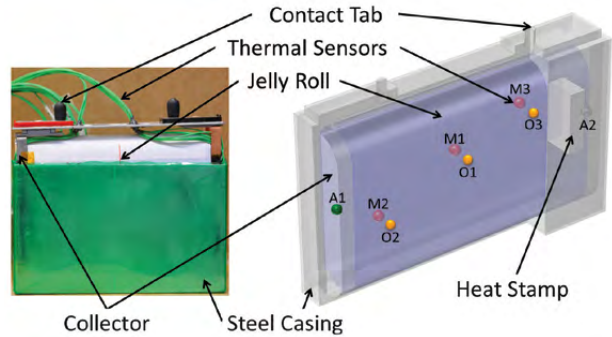


图 1. 左图: 仿制棱柱形锂离子电池单元。右图: 用于模拟电池单元的 CAD 几何模型。该电池单元配有八个温度传感器, 它们分别是: 置于绕卷结构表面的 O1、O2 和 O3; 在绕卷结构的中间的 M1、M2 和 M3; 连接到集流体的 A1 和 A2。研究人员在 COMSOL® 模型中的相同位置定义了探针。图注: Contact Tab – 接触极耳; Thermal Sensors – 热传感器; Jelly Roll – 绕卷; Collector – 集流体; Steel Casing – 钢质外壳; Heat Stamp – 热源

池单元绕组的表面, 另外两个分别放置在了阳极和阴极的铜、铝集流体上, 这些传感器又被称作避雷器(图 1)。

## ⇒ 模拟热行为

研究团队还以商业化的棱柱形锂电池单元为原型, 在 Autodesk® Inventor® 软件中创建了三维模型, 并将它导入 COMSOL Multiphysics® 软件中。他们针对不同的制造工艺, 模拟了电池单元表面不同区域由外部热源引起的传导传热, 同时还对其他区域的自然对流冷却进行了模拟。

各类材料的物理性质和热性能均已在实验中得到了确认, 随后研究人员在数学模型中将各类材料均质化为单个绕卷结构, 同时添加了一个棱柱形的钢质外壳。“由于电池单元组件具有各向异性, 模型需要兼顾热力学参数的方向性。” Liebig 向我们解释道。

在仿真中, 矩形热源的位置与物理实验中的热源完全对应。图 2 显示了在电池单元表面上添加热源 60 秒后的温度分布情况。研究人员在温度梯度较高的区域应用了自适应网格细化技术, 由此获得了更精细的离散效果, 确保了计算结果的高度准确。

## ⇒ 寻找损坏的迹象

多物理场模型的结果与仿制电池单元的实验结果基本接近。对模型进行验证之后, 团队成员便针对不同的制造工艺开始模拟温度在电池单元内的传播情况。

图 3 的结果显示了施加 1100 °C (常用的焊接温度) 的温度荷载 4 秒后, 极耳表面的温度分布情况。热量扩散到电池单元中, 致使温度升至 100 °C 以上。即使移除外部热源, 电池单元内部温度仍将继续上升, 在外界加热结束后的 4 秒内, 绕卷结构内的温度达到了 138 °C。

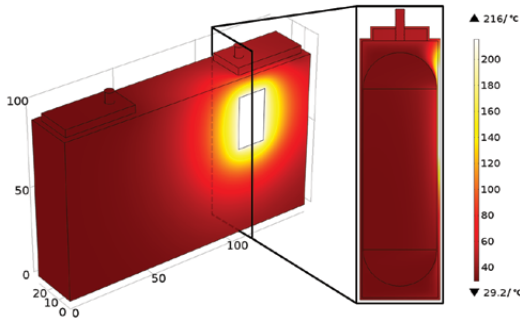


图 2. 数值结果显示了将 50 W 的热量施加在电池单元壳体表面 60 秒后的温度分布。

Bohn 指出：“这么高的温度会引起电池发生不可逆转的损坏，例如造成电解质的分解，这是因为电解质对高温极其敏感，同时电解质的分解还会改变固体-电解质界面处的特性。这些影响不仅会致使局部的材料损坏，还会导致电池总容量下降，以及电池内阻的升高。”

### ⇒ 输送能量又不损坏电池

团队的下一项研究是证实可以利用高功率密度的激光束实现高速焊接，同时还能限制传输到电池单元中的热量。激光焊接

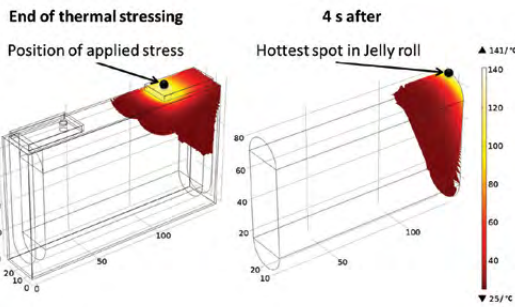


图 3. 仿真结果显示了在 1100 °C 下进行极耳焊接后的温度传播情况。其中左图为施加热应力 4 秒后的温度分布，右图为移除热源 4 秒后的温度分布。



Gerd Liebig 和 Lidiya Komisyyska, NEXT ENERGY 研究中心。

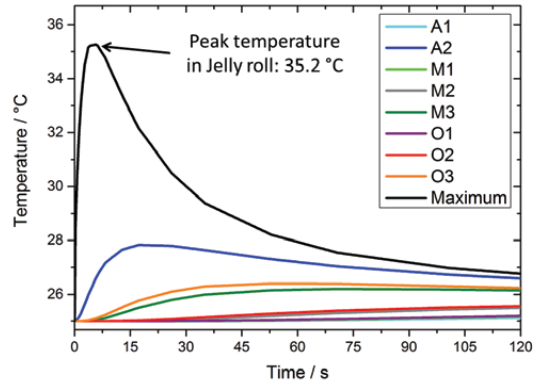


图 4. 仿真结果显示了施加 1100 °C 的热应力 0.2 秒后的探针温度曲线。

技术的效率极高，并且得益于光束的高功率密度，该技术可以被应用于多种类型的金属。

为了对激光焊接进行模拟，研究人员在极耳表面施加了 0.2 秒的 1100 °C 的温度载荷（图 4），并由此确定了沿电池单元壳体传播的热量不会导致温度升高超过 36°C。该温度处于适中水平，因此并不会给电池组件带来损害。将绕卷的温度分布模拟结果与对 26650 锂离子电池单元进行数秒激光焊接后得到的热成像图进行对比，可以发现，二者完美匹配。

### ⇒ 未来的研究基石

Liebig 评论道：“COMSOL Multiphysics 是一款值得信赖的仿真工具。它不仅拥有直观的操作界面，还提供了很多实用的工具，从材料选择到边界条件，都能满足我们的需求。COMSOL 软件的灵活性，以及内置的各种物理场接口和几何工具，为我们的研究节省了大量的时间。”

研究团队的其他成员也对此深有同感，他们总结道：“电池的应用领域极为广泛，型号和种类也非常多，因此要找到一个材料、尺寸或形状完美的电池是不可能的。然而，我们的模型为未来的电池研究提供了广阔的空间。借助数值仿真，我们可以方便地修改电池的几何结构、应用领域和制造材料，同时也让我们对未来的锂电池研发工作充满信心。” ❖

### 参考文献

1. G. Liebig, P. Bohn, *Temperature Propagation and Effects by Short-Term Thermal Stressing of Lithium-Ion Cells*, *Battery Safety Conf.* 2015.
2. P. Bohn, S. A. Garnica Barragan, L. Komsiyyska, G. Wittstock, *Performance and the characteristics of thermally stressed anodes in lithium ion cells*, *Journal of The Electrochemical Society*, 162 (2) (2015).
3. P. Bohn, G. Liebig, L. Komsiyyska, G. Wittstock, *Temperature propagation in prismatic lithium-ion-cells after short term thermal stress*, *Journal of Power Sources*, Volume 313, 1 May 2016.
4. M.J. Brand, P.A. Schmidt, M.F. Zaeh, A. Jossen, *Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances*, *J. Energy Storage* 1 (2015).