

# 基于 Fluent 的单体锂离子电池热仿真分析

刘波 彭联福 赵志昊 彭嘉铭

湖南工程学院，湖南省湘潭市，411104；

**摘要：**随着电动汽车的快速发展，锂离子电池的热管理问题日益受到关注。本文基于 Fluent 软件对锂离子电池的热仿真进行了研究，重点分析了不同放电倍率下的电池温度分布及其对电池性能的影响。通过 Fluent 仿真模型，本文探讨了电池内的热行为，揭示了温度升高对电池容量、效率和寿命的显著影响。仿真结果表明，较高的放电倍率会导致电池内阻增大，电池温度迅速上升，从而加速电池的容量衰减并影响其效率。此外，本文还提出了优化热管理方案的建议，包括冷却系统优化、材料选择和热传导路径改进。研究表明，通过优化热管理措施，可以有效提升锂离子电池的性能和安全性。

**关键词：**锂离子电池；Fluent 仿真；温度分布；热管理优化

DOI:10.69979/3041-0673.25.02.042

## 引言

锂离子电池因其高能量密度、长循环寿命和较高的安全性，在电动汽车和便携式设备中得到了广泛应用。然而，电池在充放电过程中会产生大量热量，尤其在高倍率放电时，电池的内阻增大，导致温度升高。过高的温度不仅会影响电池的工作效率，还会缩短电池的使用寿命，甚至引发热失控等安全问题。因此，如何有效地管理电池温度，优化其热管理系统，成为提升电池性能和延长使用寿命的关键。Fluent 作为一种高效的计算流体力学 (CFD) 工具，广泛应用于电池热仿真研究。本文基于 Fluent 软件，系统分析了锂离子电池在不同工况下的热行为，并提出了相应的热管理优化策略。

## 1 基于 Fluent 的电池热仿真研究现状

Fluent 作为一种强大的计算流体力学 (CFD) 软件，广泛应用于电池热仿真研究中，能够有效模拟电池在不同工况下的热行为。近年来，许多研究采用 Fluent 进行锂离子电池的温度场仿真。闫凯和楚金甫等人通过 CFD 软件对 18650 单体电池进行 1C 放电工况下的热仿真分析，验证了仿真结果与实验数据的一致性，证明了 Fluent 在电池热仿真中的可靠性<sup>[1]</sup>。周庆辉和陈展等人则通过 Fluent 对不同电流下的锂离子电池进行温度场仿真，发现电池电流越大，电池温度和温差的变化越明显，这对电池的热管理提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。此外，李甜甜等人则通过 Fluent 建立了三维电池热模型，并进行了温度场仿真与实验验证，进一步增强了模型的真实性和应用价值<sup>[3]</sup>。基于 Fluent 的电池热仿真不仅能够精

确预测电池在不同放电条件下的温度分布，还能帮助优化电池设计与冷却系统，提升电池的安全性与性能。未来，随着计算能力的提高和仿真技术的发展，基于 Fluent 的电池热仿真将成为电池设计与热管理的重要工具。

## 2 锂离子电池的工作原理与热行为

### 2.1 锂离子电池的基本构造与工作原理

锂离子电池 (Li-ion 电池) 是一种可充电电池，其工作原理基于锂离子的可逆插入与脱出反应。锂离子电池主要由正极、负极、隔膜和电解液组成。当电池充电时，锂离子从正极脱出并重新插入负极，电子通过外电路返回负极。电解液作为锂离子传导介质，隔膜则防止电极直接接触，避免短路<sup>[4]</sup>。由于锂离子的迁移过程，电池会在放电时释放出能量，并伴随产生一定的热量。电池的工作温度通常应保持在 20°C 至 40°C 之间，温度过高或过低都会影响电池性能和安全性。

### 2.2 热源建模及影响因素

#### 2.2.1 放电电流对热源的影响

放电电流是锂离子电池热行为的主要因素之一。较大的放电电流会导致电池内部的电流密度增大，从而增加电池内阻（电池的欧姆损耗）和电化学反应的速率，产生更多的热量。特别是在高功率放电情况下，电池的温度会急剧上升，可能导致热失控现象的发生。因此，优化电池放电电流并控制其范围，是有效控制电池温度升高的关键措施之一。此外，在电池设计过程中，合理的电流控制策略，如充放电速率限制，也可以有效减少

热量的积聚。

### 2.3 电池热行为分析

锂离子电池在充放电过程中，电池内部会因为电流的流动和电化学反应产生热量。这些热量会在电池内部积聚，导致温度升高，若温度过高，可能引发热失控、内短路等安全事故。电池的热行为主要受到以下因素的影响：

(1) 放电速率：较大的放电电流会导致更多的电流通过电池，进而产生更多的热量，因此，高放电速率通常会导致电池温度的显著升高。

(2) 电池设计与材料：电池的内部结构和材料选择对热行为有重要影响。例如，较好的导热材料可以有效降低电池内部温度的升高。

(3) 环境因素：环境温度对电池的温度控制也有显著影响。高温环境下，电池的散热效果差，容易引发温度过高问题，而低温环境下，电池的电化学反应效率会降低，影响电池的性能。

## 3 Fluent 仿真模型构建

在锂离子电池的热仿真分析中，建立合理的仿真模型至关重要。Fluent 作为一种强大的计算流体力学(CFD)工具，能够有效模拟电池内部的热行为和冷却液流动，帮助研究者更好地理解电池在不同工况下的温度分布和热管理效果。为确保仿真结果的准确性和可靠性，必须精确地构建电池的物理模型，合理设定边界条件与假设，并选择合适的仿真参数进行验证。

### 3.1 物理模型

物理模型的构建是仿真分析的基础。在锂离子电池的热仿真中，模型主要包括电池的几何描述、简化处理以及冷却液流动的模拟。为了提高计算效率，通常会简化电池的几何形状，去除与热行为无关的细节。

#### 3.1.1 电池模型的几何描述与简化

在电池建模过程中，由于原电池模型较为复杂，细节部分如凸台、倒角等对于电池放电过程中的热源影响较小，因此可以进行简化。例如，使用 CATIA 软件对电池进行建模并通过 SpaceClaim 进一步简化。假设电池的长、宽、厚度分别为 154.5mm、85mm、10.5mm，极耳尺寸为 11.5mm×25mm，两极耳间距为 6.5mm。这些简化后的几何结构能在不影响温度分布预测精度的情况下，减少计算量。通常，我们假设电池为一个规则的长方体

形状，这样的简化可以提高仿真效率并确保计算的准确性。

#### 3.1.2 电池内部流体域

电池的热管理问题与冷却液的流动密切相关。冷却液通过与电池表面的热交换，带走电池内部产生的热量。因此，在仿真中需要对冷却液流动进行建模。假设电池外部的流体域为一个封闭的空间，且冷却液的流动是层流状态。流体的速度、温度以及与电池表面的热交换系数需要被准确设置，以模拟冷却效果。冷却液的热传导方程可以表示为：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

其中， $\rho$  是流体的密度， $c_p$  是比热容， $v$  是流体速度， $k$  是流体的热导率， $T$  是温度， $Q$  是热源项。

### 3.2 边界条件与假设

#### 3.2.1 边界条件设置

在 Fluent 仿真中，电池表面与环境的热交换通常采用对流边界条件进行模拟。电池的外表面设定为“wall-cell”，极耳部分的表面设定为“tap-n”和“tap-p”，这些设置有助于描述电池的热交换过程。对流热传递的边界条件可以表示为：

$$q=h(T_s - T)$$

其中， $q$  为单位面积的热流， $h$  为对流换热系数， $T_s$  为电池表面温度， $T_\infty$  为环境温度。该公式描述了电池表面与环境之间的热交换过程，热流量与温差成正比。

#### 3.2.2 假设

为了简化计算，常常对电池热仿真做出一定的假设。首先，假设电池处于稳态工作状态，即电池的热源和温度分布在整个仿真过程中不发生变化。这一假设能够有效减少时间依赖性计算，简化仿真过程。其次，假设电池内部的放电过程均匀，放电电流在电池各部分是相同的，电池的热源分布可以用一个平均值来表示。放电过程的热源可以通过以下公式计算：

$$Q = I^2 R$$

其中， $I$  为电流强度， $R$  为电池内阻。该公式描述了电池放电过程中由于内阻产生的热量。

### 3.3 仿真参数与模型验证

为了确保 Fluent 仿真模型的准确性，仿真参数的选择和模型验证是关键步骤。通过选择合适的仿真参数，并与实验数据进行对比，可以验证仿真模型的可靠性。

### 3.3.1 选择的仿真参数

在 Fluent 仿真中, 选择合适的电池类型和放电速率至关重要。例如, 选择 16.8Ah 的软包钴酸锂电池, 放电速率可以根据实际应用场景进行设定。假设放电电流为 1C, 即电池在 1 小时内放电完毕, 这时放电电流为:

$$I = \frac{C}{T} = \frac{16.8}{1} = 16.8A$$

此外, 电池的内阻、热导率等参数也需要在仿真中精确设置, 以保证仿真结果的准确性。

### 3.3.2 与实验数据对比进行模型验证

为了验证仿真模型的有效性, 通常需要将仿真结果与实验数据进行对比。例如, 通过温度传感器测量电池表面的温度数据, 并与 Fluent 仿真得到的温度场进行比较。如果仿真结果与实验数据一致, 则说明模型具有较高的准确性。模型验证通常采用最小二乘法进行误差分析, 确保仿真模型能够可靠地反映电池的热行为。

## 4 热仿真分析与结果

在锂离子电池的热仿真分析中, 热量的产生、传导和散发对电池的性能、效率及寿命起着决定性作用。基于 ANSYSFluent 仿真软件, 我们深入探讨了不同工况下电池的热行为, 包括温度分布、放电倍率和环境温度对温升的影响, 及其对电池性能的影响。此外, 我们还根据仿真结果提出了优化热管理方案, 以提高电池的安全性和寿命。

### 4.1 仿真结果分析

在进行单体电池的热仿真时, 首先需要对电池的温度分布进行全面分析。通过 Fluent 软件模拟电池在不同放电倍率下的温度场, 我们可以得到电池内部各部分的温度分布云图(图 1)。

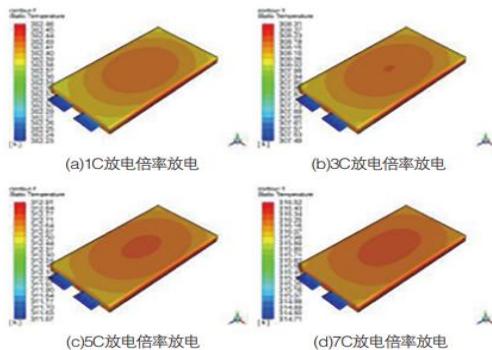


图 1 不同放电倍率下单体电芯壁面温度云图

在 1C、3C、5C 和 7C 不同放电倍率下的仿真结果表明, 电池内部的温度分布存在显著差异, 尤其在电池中

间区域和极耳区域之间。随着放电倍率的增加, 电池的温度升高显著, 最高温度和最低温度之间的差异逐渐增大。具体数据如下: 在 1C 放电倍率下, 电池的最高温度为 302.46K, 最低温度为 302.23K, 温差为 0.23K; 而在 7C 放电倍率下, 电池的最高温度达到 316.52K, 最低温度为 314.71K, 温差增至 1.81K(图 2)。

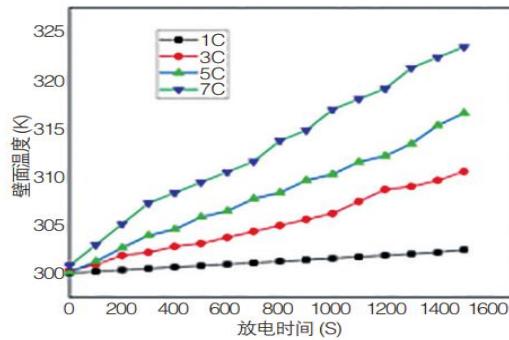


图 2 单体电芯温度特性曲线

在不同的放电倍率下, 电池的温度升高程度明显不同。随着放电电流的增大, 电池的内阻增大, 电池内部的生热量也随之增加, 这直接导致了电池温度的上升。例如, 在 3C 放电倍率下, 电池的电压和温度上升较为平缓, 而在 7C 放电倍率下, 电池的温升速度加快, 温度也显著升高。此外, 环境温度对电池的热行为也具有重要影响。高环境温度会使电池散热能力下降, 导致温度进一步升高。

### 4.2 温度对电池性能的影响

#### 4.2.1 温度对电池容量的影响

电池的温度对其容量具有显著影响。高温会加速电池内部的化学反应, 虽然短期内电池容量可能略有提升, 但长期高温会导致电池容量的不可逆损失。根据仿真结果, 当电池温度升高时, 电池的放电电压和容量会逐渐下降, 尤其是在高倍率放电下, 电池的容量衰减更为明显。在 7C 放电倍率下, 电池的电压曲线较 1C 放电时更加陡峭, 放电终止时间也显著缩短, 这表明电池在高温条件下的工作效率较低, 容量损失较为严重。

#### 4.2.2 温度对电池效率及寿命的影响

温度不仅影响电池的容量, 还对电池的效率和使用寿命产生深远影响。随着温度升高, 电池内部的化学反应速率加快, 电池内阻增加, 导致电池效率降低。高温还可能导致电池内部材料的老化, 降低其循环寿命。仿真结果表明, 在高放电倍率和高环境温度下, 电池的温度升高较快, 长期运行可能导致电池过早失效。若电池

温度持续超过设计温度范围，可能导致电池出现热失控等安全隐患。因此，控制电池的工作温度是延长电池寿命和提高其效率的关键。

#### 4.3 热管理方案优化建议

为了有效管理电池的热量并提高其性能，我们提出了以下几项热管理优化方案：

(1) **冷却系统优化**：对于高倍率放电的电池，传统的空气冷却方式往往无法满足需求，建议采用液冷系统或相变材料冷却系统。液冷系统能够在较短时间内带走电池产生的热量，保持电池的温度在合理范围内，避免过热导致的性能下降和安全问题。

(2) **材料选择优化**：选择具有较高导热性的材料，如铝合金或铜，来制作电池的外壳和极耳，可以有效提升电池的散热效率。此外，采用高热导率的电解液和正负极材料，也能进一步降低电池内部的温差，减小温升。

(3) **热传导路径优化**：在电池的设计过程中，合理优化热传导路径，将电池内部热量快速传递到外部散热系统，减少温度聚集，提升电池的散热能力。此外，增加电池与冷却液接触的表面积，有助于更有效地散热。

### 5 讨论

通过本文的研究，基于 Fluent 的锂离子电池热仿

真分析揭示了不同放电倍率下电池内部温度分布的变化趋势，并探讨了温度对电池性能、效率及寿命的影响。仿真结果表明，较高的放电倍率和环境温度会导致电池内阻增大，电池温度升高，从而影响电池的容量和使用寿命。为了解决这些问题，本文提出了冷却系统优化、材料选择和热传导路径优化等热管理改进措施。随着计算技术的进一步发展，基于 Fluent 的热仿真将成为电池设计和优化的重要工具，助力提升锂离子电池的性能与安全性。

### 参考文献

- [1] 闫凯, 楚金甫, 陈西山, 古伟鹏, 常乐. 纯电动汽车用动力电池系统温度场特性的数值研究[J]. 时代汽车, 2018 (02) : 35-37.
- [2] 周庆辉, 陈展, 刘少楠. 基于 Fluent 的锂离子动力电池的热分析[J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33 (03): 33-37+65.
- [3] 李甜甜. 电动汽车锂离子电池热特性分析及散热优化[D]. 南昌大学, 2016.
- [4] 田华, 王伟光, 舒歌群, 严南华. 基于多尺度、电化学-热耦合模型的锂离子电池生热特性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49 (7) : 734-741.