

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学 号: 19820131152996

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

锂电材料的热导率研究: Callaway 模型和  
人工神经网络模型

Research on the Thermal Conductivity of Lithium Battery  
Materials: Callaway Model and Artificial Neural Network Model

任 飞

指导教师姓名: 郑 金 成 教 授

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2016 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于     年    月    日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年    月

## 摘要

随着移动式和便携式电子设备的广泛应用，锂离子电池在人类社会中扮演的角色越来越重要。从翱翔太空的航天飞机到潜入深海的潜水艇，锂离子电池的身影随处可见。然而，锂离子电池在给人类带来便利的同时，也具有一定的安全隐患。并且，随着锂离子电池的发展，其安全问题受到越来越多的关注，成为了一个制约锂离子电池发展的重要因素。经过分析，锂离子电池的安全问题主要表现为发热、燃烧、爆炸等现象，这些问题归根结底就是热问题。造成锂离子电池热问题的原因很多，其中一项比较重要的就是电池的电极材料的热学性质。广泛用于锂离子电池正极材料的  $\text{LiCoO}_2$  是一种典型的层状结构物质。因此，研究该种材料的热导率，对于锂离子电池安全性的研究，具有一定的促进作用。并且，由于  $\text{LiCoO}_2$  的热导率在锂离子电池的工作过程中是发生可逆变化的，而热导率也是影响材料热电品质因数（ZT）的重要因素。所以，对  $\text{LiCoO}_2$  导热系数的研究，还可以为寻找具有更高 ZT 值的材料提供思路。在分析影响  $\text{LiCoO}_2$  热导率因素的时候，我们使用了 Callaway 模型。但是，在使用该模型的时候，发现利用传统模型得到的热导率的值和实验值存在很大的差别。于是，我们提出了一种混合 Callaway 模型。在这个新的模型中，我们认为  $\text{LiCoO}_2$  的缺陷类型不是一层不变的，而是随着锂离子电池工作过程的进行而改变。利用这个新的模型，我们得到的结果可以很好地与实验结果吻合，从而推导出  $\text{LiCoO}_2$  热导率的变化规律。同时，我们还利用了人工神经网络（ANN）来分析  $\text{LiCoO}_2$  的热导率数据。ANN 是一种模拟生物神经网络进行信息处理的一种数学模型。通过训练，可以掌握数据之间的规律，从而发现输入和输出之间的关系。利用该工具，我们可以清楚地了解到  $\text{LiCoO}_2$  热导率的变化情况。并且，利用人工神经网络在分析数据时，我们可以方便地考虑影响  $\text{LiCoO}_2$  热导率的众多因素，使计算出来的结果和实验值更加接近。从而更好地掌握  $\text{LiCoO}_2$  热导率的变化规律。

**关键词：**  $\text{LiCoO}_2$  热导率； Callaway 模型； 人工神经网络模型

## Abstract

With the wide application of mobile and portable electronic devices, Li-ion Batteries are playing an increasingly important role in society. From the space shuttle in the outer space to the submarine in the ocean, Li-ion Batteries can be seen everywhere. Lithium ion batteries, however, bring convenience for mankind. At the same time, they also have some potential safety hazard. And with the development of Li-ion Batteries, their security problem attracts more and more attention, and it has become an important factor restricting the development of lithium ion batteries. According to some analysis, the problem of the Li-ion Batteries' safety mainly are characterized by fever, combustion, explosion and other phenomena. The problem of safety is really the thermal dissipation. There are many reasons for heat problem of Li-ion Batteries, and one of the most important is the thermal properties of electrode materials of the batteries.  $\text{LiCoO}_2$  is a kind of typical material of layered structure, widely used as lithium ion battery cathode material. Therefore, studying the thermal conductivity of this material is helpful for the research of safety of lithium ion batteries. As the thermal conductivity of  $\text{LiCoO}_2$  is reversibly changeable in the working process, and the thermal conductivity also has affect on thermoelectric figure of merit (ZT), the study of  $\text{LiCoO}_2$  thermal conductivity can be helpful for the search of materials with higher ZT. The Callaway model is used when we analysis the data of thermal conductivity. However, we found that the result of the traditional Callaway model and experimental value of the existence have a lot of difference. So, we proposed an improved Callaway model. And with this new model, we suppose the defect type of  $\text{LiCoO}_2$  is not constant, but changeable with the working process of lithium ion battery. We can get the good result that are able to fitted to the experiment results very well with the help of this new model. As a result, we find out the variable law of  $\text{LiCoO}_2$  using the new model. What's more, we use the artificial neural network (ANN) to analyze the thermal conductivity of  $\text{LiCoO}_2$ , which is a mathematical model based on the simulation of neural network of organisms. Through training, ANN can grasp the

laws between the data, so as to build a model for the input and output. Using this tool, we can clearly understand the changes of the  $\text{LiCoO}_2$  thermal conductivity. And, when analyzing the data using artificial neural network, we can easily consider other factors that influence the thermal conductivity of  $\text{LiCoO}_2$ , and make the calculated results more close to the experimental values. Therefore, we are able to have better understanding on the variable rules of thermal conductivity for  $\text{LiCoO}_2$ .

**Keywords:** Thermal conductivity of  $\text{LiCoO}_2$ ; Callaway model; artificial neural network model

## 目录

第一章绪论 .....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 热传导理论.....	2
1.3 材料热导率的研究.....	3
1.4 锂离子电池的安全问题.....	5
1.5 本文的研究意义以及主要内容.....	8
参考文献 .....	9
第二章热导率的测量以及热容理论 .....	12
2.1 热导率的测量原理.....	12
2.2 热容以及比热容的基本概念.....	13
2.3 热容的经典定律和经典理论.....	14
2.4 热容的测量.....	16
2.4.1 热容的测量方法.....	16
2.4.2 DSC 测量比热容的原理 .....	17
2.4.3 测量结果.....	18
2.5 热扩散系数的测量.....	19
2.5.1 LFA 的测量原理 .....	19
2.5.2 热扩散系数的测量结果.....	21
2.6 热导率的结果以及分析.....	22
2.7 本章小结.....	25
参考文献 .....	25
第三章热导率模型 .....	26
3.1 与热导率有关的几个概念.....	26
3.2 气体分子动理论下的热导率.....	29
3.3 锂离子电池正极材料的 Callaway 模型 .....	30
3.4 混合 Callaway 模型.....	40
3.5 文章小结.....	43
参考文献 .....	43
第四章人工神经网络 .....	45
4.1 人工神经网络概述.....	45
4.2 人工神经网络的特点以及应用.....	48
4.3 人工神经网络在材料领域的应用.....	49
4.4 BP 神经网络和 RBF 神经网络处理数据.....	51
4.4.1 BP 神经网络.....	51
4.4.2 RBF 神经网络 .....	52
4.4.3 数据拟合.....	54
4.5 本章小结.....	65
参考文献 .....	65

第五章总结与展望 .....	68
硕士期间发表的论文.....	70
致谢 .....	71

厦门大学博硕士论文摘要库

**Contents**

**Chapter 1 Introduction.....1**

1.1 Research background ..... 1

1.2 Theory of heat conduction ..... 2

1.3 Research of thermal conductivity for material ..... 3

1.4 Safety problem of Li-ion battery ..... 5

1.5 Contents and significance. .... 8

Reference ..... 9

**Chapter 2 Measurement of thermal conductivity and theory of heat capacity .....12**

2.1 Principle of measurement for thermal conductivity ..... 12

2.2 Basic concepts of heat capacity and specific heat capacity. .... 13

2.3 Classical laws and theories of heat capacity ..... 14

2.4 Measurement of heat capacity ..... 16

2.4.1 Measurement of method for heat capacity ..... 16

2.4.2 Principle of DSC for the measurement of specific heat capacity... 17

2.4.3 Experimental results ..... 18

2.5 Measurement of thermal diffusivity..... 19

2.5.1 Basic principle of LFA ..... 19

2.5.2 Experimental results of thermal diffusivity ..... 21

2.6 Results of thermal conductivity and analysis ..... 22

2.7 Summary of chapter ..... 25

Reference ..... 25

**Chapter 3 Model of thermal conductivity .....26**

3.1 Some concepts about thermal conductivity ..... 26

3.2 Theory of gas molecule movement for thermal conductivity ..... 29

3.3 Callaway model for anode material ..... 30

3.4 Hybrid Callaway ..... 40

3.5 Summary of chapter ..... 43

Reference ..... 43

**Chapter 4 Artificial neural network.....45**

4.1 Overview of ANN. .... 45

4.2 Characteristics and applications of ANN. .... 48

4.3 Application of ANN in the field of materials ..... 49

4.4 Processing data using BPANN and RBF ANN..... 51

4.4.1 BP ANN ..... 51

4.4.2 RBF ANN ..... 52

4.4.3 Fitting data ..... 54

<b>4. 5 Summary of chapter</b> .....	65
<b>Reference</b> .....	65
<b>Chapter 5 Summary and expectation</b> .....	68
<b>Publication.</b> .....	70
<b>Acknowledgements</b> .....	71

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

能源是人类赖以生存和发展的重要物资。纵观人类历史的发展，人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替，从最初的木材取火到煤炭的燃烧，一直到今天形形色色的能源，可以说，能源是一个社会、一个民族进步的基本动力。因此，能源问题是当今社会不得不重视的问题。能源问题涉及到很多方面，如新能源的开发和利用、提高能源的使用效率等。其中，有一个很重要的问题是不可忽略的，那就是能量的储存。为了储存能量，人类发明了电池，从最初的干电池到蓄电池，以及今天的太阳能电池、燃料电池、锂离子电池等，构成了庞大的电池家族。

众所周知，电池的最基本作用是转换和储存能量，也就是把其他形式的能量转换成电能储存在电池里面，从而可以方便地为其他设备提供电能。这样做不仅能够解决当前能源紧缺问题，还可以有效地解决环境污染问题。当今是一个信息化时代，移动设备在人们日常生活中扮演的地位越来越重要，如手机、笔记本电脑、可穿戴设备等，而维持这些设备运转需要的能量就是依靠电池提供的。可以说，没有电池的存在，这些设备根本无法运行。因此，电池在当今社会中处于一个核心地位。目前，制约手机行业发展的最大因素之一就是电池。除此之外，不同的电池还广泛用于其他领域。

在现时的电池家族中，锂离子电池是重要的一员。锂离子电池是一种二次电池，主要由正极材料、负极材料、电解质三部分组成，其工作过程可以分为充电过程和放电过程。相比于其他电池，这种电池具有很多优点，如使用寿命长、环保、能量密度高等。现在，上到宇宙中的航天飞机，下到深海里的潜水艇，随处可见锂离子电池的踪影。在日常生活中，锂离子电池也是随处可见。可以说，锂离子电池现在已经遍布了社会的各个角落，融入到了人们的生活。

但是，锂离子电池目前还存在很多问题，其中，安全问题紧紧地制约了其发展，特别是随着大功率电池的应用，其危险程度也越来越高。现在比较热门的电

动汽车，实际上就是一个移动的锂离子电池组，同时也是一个移动的炸弹，随时有爆炸的危险。所以，锂离子电池的安全问题引起了社会各界的重视。

经过研究发现，造成锂离子电池安全问题的因素很多，其中比较重要的是就是电池在工作的过程中产生大量的热，并且不能及时的散发出去。因此，为了解决锂离子电池的安全问题，可以从两方面出发，第一方面是减少热量的产生，第二方面是让产生的热量尽快地散发出去。第二方面就涉及到了材料的热传导问题，与材料的热导率问题有关。因此，通过研究电池电极材料的热导率，可以为解决电池的安全问题提供一定的指导意义。

## 1.2 热传导理论

热量传递是一种在自然界中很常见的现象。由热力学第二定律可以知道，热量总是自发地从高温部分传到低温部分，并且这种传递是不可逆的。根据热量传递的特点，可以将热量的传递分为热传导、热对流和热辐射三种最基本的方式。

热传导作为热量传递方式之一，主要是由物质内部分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动而产生的。在热传导的过程中，不涉及到净的、宏观的物质流。针对不同的材料，热传导的机理是不同的。其中，对气体物质而言，热传导主要是由分子不规则的热运动引起的。在固体材料体系中，金属和非金属的机理也是不相同的，前者主要是通过自由电子的迁移传递热量，后者是通过相邻分子在碰撞时传递振动能，从而实现了热量的传递。而针对液体物质，存在两种不同的观点，一种认为类似于气体，另一种类似于非金属固体。因此，物质的热传导机理是非常复杂的。

热传导的机理虽然相当复杂，但是其宏观规律可用傅里叶定律来描述，描述形式如下：

$$dQ \propto dS \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1.1)$$

或者变换为：

$$dQ = -\lambda dS \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1.2)$$

在方程 (1.1) 和方程 (2.2) 中

$\frac{\partial t}{\partial n}$  : 表示温度梯度, 该量是一个向量, 方向指向温度增加的方向, 单位

为  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ;

$Q$  : 导热速率, 单位是  $\text{W}$ ;

$S$  : 等温面的面积, 单位是  $\text{m}^2$ ;

$\lambda$  : 比例系数, 称为导热系数。

在方程 (1.2) 中, 负号表示热流方向总是和温度梯度方向相反。

由傅里叶定律可以知道, 在热传导时, 传热速率与温度梯度以及传热面积成正比。并且这个比例系数  $\lambda$  是表示材料导热性能的一个参数, 该值越大, 表明材料导热越快, 是分子微观运动的一种宏观表现。

这个比例系数  $\lambda$  就是导热系数, 又被称为热导率。根据傅里叶定律, 我们可以更加明确地解释它的含义: 当温度垂直向下梯度为  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  时, 单位时间内通过单位水平截面所传递的能量。热导率的单位是  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  (瓦特每米每开), 因此如果在物体内部垂直于导热方向取两个相距 1 米, 面积为 1 平方米的平行平面, 如果在 1 秒内从一个平面传导到另一个平面的热量为 1 焦耳, 我们就可以说这种材料的热导率为  $1\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。

材料的热导率不是固定不变的, 会受到自身结构以及外界条件(温度、压力)的影响, 并且和物质的状态有关。在一般情况下, 固体材料的热导率大于液体材料的热导率, 液体物质的热导率大于气体物质的热导率。根据热导率数值大小的不同, 可以把材料分为保温材料(平均温度不低于  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  时热导率不大于  $0.12\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )和超级保温材料(热导率小于  $3 \times 10^{-4}\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )。到目前为止, 人类发现热导率最大的物质是单层石墨烯, 在常温下可以高达  $(5.30 \pm 0.48) \times 10^3\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。因此受到热学领域的广泛关注。

### 1.3 材料热导率的研究

作为物质的一种基本物理属性, 热导率的获取一直是很重要的。通常情况下, 物质的热导率可以通过理论和实验两种方法来获得。理论方法主要是从物质微观结构出发, 在量子力学和统计力学的基础上, 通过研究物质的导热机理, 建

立相应的热导率物理模型，最后经过复杂的数学分析和计算可以获得导热系数。

到目前为止，在计算热导率方面，比较常用的方法有第一性原理、分子动力学。Kong<sup>[2]</sup>等人利用第一性原理计算出了理想情况下单层和双层石墨烯的晶格热导率在常温下为  $2200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ，这个结果与实验值比较吻合。Jivtesh Garg<sup>[3]</sup>利用第一性原理，计算了硅锆合金的热导率，并且探究了无序、非简谐效应对热导率的影响，这项工作对合成性能优越的硅锆合金有一定的指导意义。Broido<sup>[4]</sup>团队通过计算，计算出了半导体硅和锆的热导率，得到的结果和实验值相比，差别很小，这一结果对设计新的材料具有一定的帮助。除了第一性原理之外，Sebastian<sup>[5]</sup>利用分子动力学，计算出了硅纳米线的热导率，通过与晶体硅的热导率进行比较，发现前者比后者小了两个数量级。Jianwei Che<sup>[6]</sup>在 Green-Kubo 公式的基础上，利用分子动力学，得到了金刚石以及相关材料的热导率，这样的结果对研究纳米尺寸的器件具有一定的指导意义。

在实验方面，测量热导率的方法也有很多，根据温度与时间的变化关系，可以分为两大类，一是稳态法，二是非稳态法<sup>[6]</sup>。利用稳态法测量热导率时，可以准确、直接地获得热导率数值，并且适用的温度区域较宽。但是利用这种方法测量所需的时间比较长，对测量环境的要求比较高，常用于测量热导率比较低的材料。何燕<sup>[7]</sup>等人根据实验样品的特点，利用稳态法测量了轮胎橡胶复合材料的导热系数，通过对实验数据进行分析，获得了比较准确的结果；段占立<sup>[8]</sup>通过改进稳态法导热系数测量仪，测量了方型和圆型橡胶样品的导热系数，该测量结果与利用其它方法测量得到的结果比较吻合。非稳态测量法多用于测量高热导率的材料，或者测量高温下材料的热导率。利用该方法测量时，所需的时间比较短、精确性高、对环境的要求也比较低。非稳态测量法包括热线法<sup>[9]</sup>、热带法<sup>[10]</sup>，以及用广泛应用的闪光法，与其他非稳态测量方法相比较，闪光法具有测定范围广、测量温度高以及速度快等优点。王东<sup>[11]</sup>等人利用激光闪射法测量了氮化硅结合碳化硅材料的热导率，并对该结果进行了相应的分析；Shaikh<sup>[12]</sup>利用耐驰公司的热学测量仪器 LFA 447，测量了三种纳米颗粒材料（carbon nanotubes、exfoliated graphite and heattreated nanofibers）的热导率，这些测量结果在热量管理领域具有重大的应用潜能。除了上述方法之外，还有 Hot Disk Techniques<sup>[13]</sup>、 $3\omega$ 法<sup>[14]</sup>、time-domain thermoreflectance<sup>[15]</sup>。除了上述一

些常用的测量方法之外，针对一些特殊的材料，需要一些特殊的方法，比如在测量二维材料石墨烯的导热系数时，利用了拉曼光谱<sup>[16]</sup>。

在热导率的研究方法中，理论和实验都有自己的优势以及相应的缺点。利用理论的方法，可以很快的得到材料的导热系数，并且可以根据需要，设置不同的参数，得到相应的结果，从而对材料进行更加全面的研究。但是，由于理论计算是在一种比较理想化的基础上进行的，与真实的情况不能完全一致，所以计算出来的值与真实值的符合程度需要进一步确认。利用实验的方法，针对某一种样品，可以得到准确度比较高的热导率值。但是，如果实验对象比较多，那么不仅会耗时较长，还会大大的提高实验成本。因此，在研究热导率的时候，需要理论与实验的结合，通过理论来指导实验，通过实验来验证理论。只有这样，才可以得到比较可靠的热导率值。

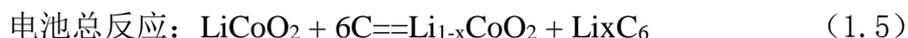
#### 1.4 锂离子电池的安全问题

在当今社会中，存在着形式多样的能源，如太阳能、风能、核能、电能以及来自于物质燃烧的热能等，其中，在人们日常生活中使用的最多、最常见的是电能。同时，在这个以电能为主要能源形式的社会中，电池在促进社会经济可持续发展方面起着举足轻重的作用。在电池这个大家族中，锂离子电池由于输出电压高、重量比能量高、体积比能量高、循环使用寿命长、没有记忆效应等特点，是最具有发展和应用前景的电池。

锂离子电池与一般的电池不同，主要由正极材料（锂化合物）、负极材料（碳材料）以及电解质（有机溶液）三部分组成。可以把其工作过程分为充电和放电两个过程。

当电池处于充电状态时，在外界电压的作用下，正极上的电子通过外部电路跑到负极上，同时正极材料中的锂离子通过电解质，到达电池负极，与跑到负极的电子结合在一起。简而言之，就是锂离子从正极脱嵌，进入负极，使负极处于富锂状态。以典型的液态锂离子为例，负极材料为石墨，正极材料为  $\text{LiCoO}_2$ ，充电过程可以用如下化学反应方程式表示：





电池的放电过程与上述过程相反，并且可以分为恒流放电和恒阻放电两种形式。恒流放电是指在外电路上加一个随电压变化而变化的可变电阻，而恒阻放电是在电池的正负极加一个电阻让电子通过。因此，如果要使放电过程正常进行，就必须让负极上的电子跑到正极。由于电子和  $\text{Li}^+$  是同时移动的，方向一样但是道路不通，所以放电时电子从负极经过外界电路跑到正极，而锂离子则通过电解质，回到正极，之后和电子结合。在放电过程中，发生的化学反应方程式分别是方程 (1.3)、(1.4)、(1.5) 的逆反应。

到目前为止，锂离子电池的身影在社会中随处可见，特别是在便携电器领域，电池更是必不可少的元件。可以说，判断一个便携设备的好坏，电池性能是一个重要的指标。现在社会中最常见的通信工具——手机——目前制约其发展的就是手机电池技术，因此，电池的重要性不言而喻。除此之外，上到宇宙中飞行的航天飞机<sup>[17]</sup>，下到深海里潜行的潜艇，锂离子电池都是随处可见的。

从1992年日本索尼公司发明了锂离子电池至今，锂离子电池已经产生了二十多年。在这段时间内，锂离子电池得到了长足的发展，其性能也不断得到完善和提高。但是也存在一些因素制约着锂离子电池的发展<sup>[18-20]</sup>，其中一个比较重要的因素就是安全问题<sup>[21-23]</sup>。如2006年苹果、联想笔记本电脑因电池安全性问题被召回，2008年本田混合电动车发生起火事件，2011年上海825路纯电动公交车因电池过热起火自燃。这些事件中，锂离子电池的安全问题危及到了人们的生命、财产安全，对人们的日常生活产生了巨大的影响。因此解决锂离子电池的安全问题迫在眉睫。造成锂离子电池安全问题的原因主要可以分为两大类，一是由于突发情况或电池的使用不恰当造成的，如电池过充、挤压或者被其他尖锐物体刺穿等；二是锂离子电池自身的结构特征所导致的<sup>[24][25]</sup>。

锂离子电池自身的结构是威胁电池安全性能的根本因素<sup>[26]</sup>，主要有以下几方面：(1) 由于电池的能量密度比较高，因此很容易出现热失控导致不安全行为的发生；(2) 在充电或者放电的过程中，会产生热量，如果这些热量积聚起来，就可能会导致局部高温、甚至爆炸；(3) 锂离子电池的电解液为有机溶剂，很容易被氧化，在出现泄漏的情况下，容易引起电池着火甚至是爆炸；(4) 电池内部出现的短路现象带来安全隐患。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.