

# 王芳 Wang Fang

博士/Doctor, 教授级高工/Professor senior engineer

中汽中心动力电池领域首席专家/Chief Expert of Traction Battery in CATARC

中汽中心试验所新能源室主任/Director of NEV lab in CATARC

电池测试与应用技术联盟秘书长 Secretary general of "AessE&AT"

充电联盟副秘书长 Deputy secretary general of China EV charging infrastructure promotion Alliance

化学与物理电源行业协会动力电池分会技术委员会副主任委员/Vice Chairman of the Traction Battery Committee of CIAPS

汽车工程学会电动汽车标委会委员/Member of EV Standard Committee of SAE-China

863项目首席专家/Chief Expert of "863" Research Project

《新建纯电动乘用车企业管理规定》评审专家/Assessment Expert of 《Regulations for New Electric Passenger Vehicle Enterprises》



王芳博士一直致力于动力电池材料-电池-系统各层级的测试评价工作,自创建新能源汽车关键部件测试评价团队以来,实现每年完成业务额连续五年增幅超过100%,确立了本单位在国内动力电池测评领域的权威地位。主持/参与“储能用锂电池和燃料电池系统安全性设计及性能测试技术”等10余项国家重大科研项目,申请专利16项,发表论文50余篇,主持起草国际标准1项,国家标准7项,行业标准1项,天津市地方标准1项。牵头成立“先进车载能源储存系统评价与应用共性技术联盟”,聚焦电池集成技术,从应用出发,形成综合的行业测评体系;出版专著《电动汽车动力电池系统安全设计》和《电动汽车动力电池系统设计与制造技术》,获得行业高度认可。其个人荣获天津市先进科技工作者、天津市中青年科技创新领军人才、国家电网公司科技进步奖1项、江西省科技进步奖1项以及中国汽车工业科学技术奖技术发明奖1项、作为团队负责人获得中国机械工业联合会颁与的“十二五”机械工业优秀创新团队称号。

Dr. Wang Fang has been engaging in traction batteries testing and evaluating, which covers all the levels--battery material, cells, and systems. Her team of testing and evaluating for NEV key components has kept more than 100% in business growth each year, and that establishes the authority in the domestic traction battery testing industry. She charges or participates more than 10 national major research projects, applies 16 patents, publishes more than 50 papers publicly. She has drafted 1 international standard, 7 national standards, 1 industry standard, and 1 local standard. The AessE & AT(Cooperative Research Group of Advanced Energy Storage System Evaluation and Application Technology for Electric Vehicles) under her leadership focuses on battery integration technology, and forms a comprehensive industry evaluation system which is application-oriented. Two books of "Safety Analysis and Design of Battery Pack for Electric Vehicle" and "Designing and Manufacturing Technology of Battery Pack for Electric Vehicle" have gained her great industrial endorsement. And she won the Excellent Technology Workers of Tianjin, Tianjin Youth Science and Technology Innovation Leader, Science and Technology Progress of Jiangxi Province, Science and Technology Progress of State Grid Corporation, Technology Invention Award "China Automotive Industry Technology Award", and Mechanical industry excellent innovation team as the team leader.



# 动力电池标准与测评技术

Traction battery standards and Testing technology research

Wang Fang, CATARC

2017.11 Beijing



---

# 一、动力电池标准

## Traction battery standards

# 1.1 动力电池标准体系traction battery standards

## 电性能

GB/T 31486-2015 (单体模块)  
QC/T 741-2014(电容器)  
*GB/T 31467.1-2015 (系统/高功率)*  
*GB/T 31467.2-2015 (系统/高能量)*

## 寿命

*GB/T 31484-2015 (单体/模块/系统)*

## 安全性

GB/T 31485-2015 (单体模块)  
*GB/T 31467.3-2015 (系统)+修改单*  
GB XXXX (安全, 制定中)

## 互换性

QC/T 840-2010  
GB/T 34013-2017 动力蓄电池产品规格尺寸  
GB/T 34014-2017 编码规则

## 回收利用

GB/T 33598-2017 回收利用拆解规范  
GB/T 34014-2017 余能检测  
GB/T XXXX (系列标准, 制定中)

## 附件

QC/T 842—2010 (通讯协议)  
*QC/T 897-2011 (BMS)*  
QC/T 989-2014 (电池箱)  
QC/T 1023—2015 (系统)  
GB/T XXXX (BMS, 制定中)

## 1.2 动力电池标准法规政策引用情况the use of some standards

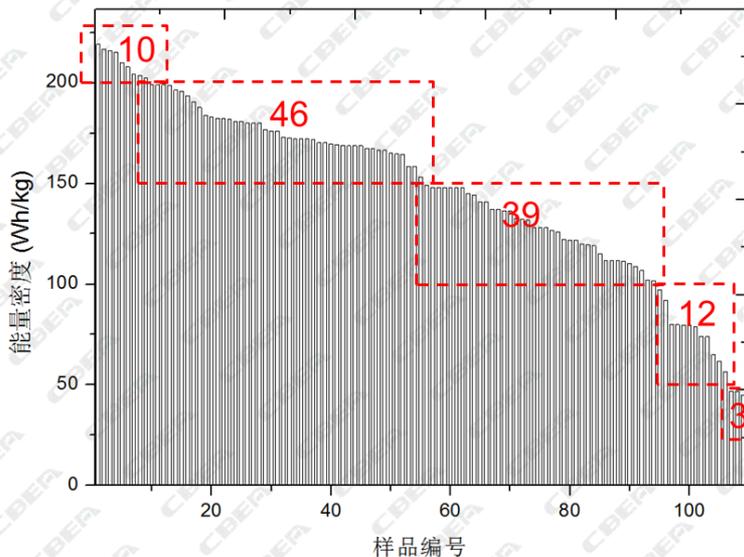
动力电池标准应用情况	GB/T 31484-2015 GB/T 31485-2015 GB/T 31486-2015	GB/T 31467.1-2015 GB/T 31467.2-2015	GB/T 31467.3-2015	QC/T 897-2011	《电动客车安全技术条件》	《动力电池、燃料电池相关技术指标测试方法（试行）》
新能源汽车生产企业及产品准入管理规定	√	—	√ (2017年7月1日)	—	√	—
节能与新能源汽车示范推广应用车型目录申报	√	—	√	—	—	√
汽车动力蓄电池行业规范条件（2015年版）	√	√	√	√	—	—
新建纯电动乘用车企业管理规定	√	√	√	√	—	—

# 1.3 动力电池单体模块电性能 performance of battery cell & module

## ➤ GB/T 31486-2015 电动汽车用动力蓄电池电性能要求及试验方法

序号	样品类型	检验项目	判定标准	检验方法	电池编号
1	单体	外观	符合要求	6.2.1	A1#~A10#
2		极性	符合要求	6.2.2	
3		外形尺寸和质量	符合技术条件	6.2.3	
4		室温放电容量	100%~110%, 5%	6.2.5	
5	模块	外观	符合要求	6.3.1	B1#~B10#
6		极性	符合要求	6.3.2	
7		外形尺寸及质量	符合技术条件	6.3.3	
8		室温放电容量	100%~110%, 7%	6.3.5	
9		室温倍率放电容量	90%或80%	6.3.6	B1#、B2#
10		室温倍率充电性能	80%	6.3.7	
11		低温放电容量	70%或80%	6.3.8	
12		高温放电容量	90%	6.3.9	
13	模块	荷电保持与容量恢复能力	85%、90% 85%/70%、95%	6.3.10	B3#~B6#
14		耐振动	符合要求	6.3.11	B7#、B8#
15		储存	90%	6.3.12	B9#、B10#

110款单体电池能量密度统计数据: 能量密度落在100~200Wh/kg范围内的样品占总数的85%



- 0~50 Wh/kg (3%)
  - 镍氢电池
- 50~100 Wh/kg (11%)
  - 镍氢=1、三元/钛酸锂=4、三元/C=7
- 100~150 Wh/kg (35%)
  - 三元=14 (方形=10、圆柱=1、软包=3)
  - 磷酸铁锂=25 (方形=12、圆柱=5、软包=18)
- 150~200 Wh/kg (42%)
  - 三元=46 (方形=12、圆柱=14、软包=20)
  - 176 Wh/kg 174 Wh/kg 176 Wh/kg
- 200+ Wh/kg (9%)
  - 三元=14 (方形=4、圆柱=5、软包=0)

# 1.3 动力电池单体模块测试评价-安全性能

GB/T31485-2015 电动汽车用动力蓄电池安全要求及试验方法

序号	检验项目	判定标准	检验周期	蓄电池编号
1	过放电	不起火、不爆炸、不漏液	2d	单体每项2只， 模块每项1组，
2	过充电	不起火、不爆炸	2d	
3	短路	不起火、不爆炸	2d	
4	跌落	不起火、不爆炸、不漏液	2d	
5	加热	不起火、不爆炸	2d	
6	挤压	不起火、不爆炸	2d	
7	针刺	不起火、不爆炸	2d	
8	海水浸泡	不起火、不爆炸	2d	
9	温度循环	不起火、不爆炸、不漏液	2d	
10	低气压	不起火、不爆炸、不漏液	2d	

电滥用

机械滥用

环境滥用



过放电

过充电

短路



跌落

挤压

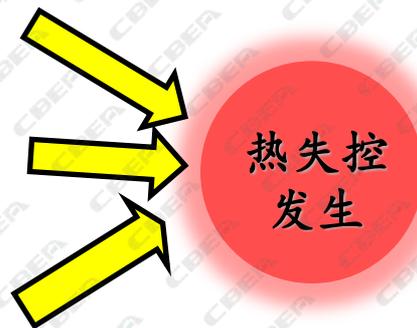
穿刺



加热  
湿热循环

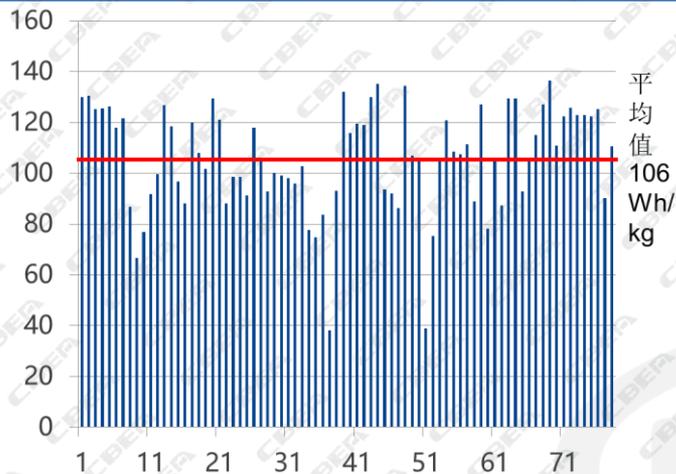
海水浸泡

高海拔



热失控  
发生

# 1.4动力电池系统性能performance of battery pack&system



系统能量密度的变化：2017年，获得市场化应用的系统能量密度较大提升，能量密度平均值增加 $>10\text{Wh/kg}$ ，成组率增加 $>5\%$ 。

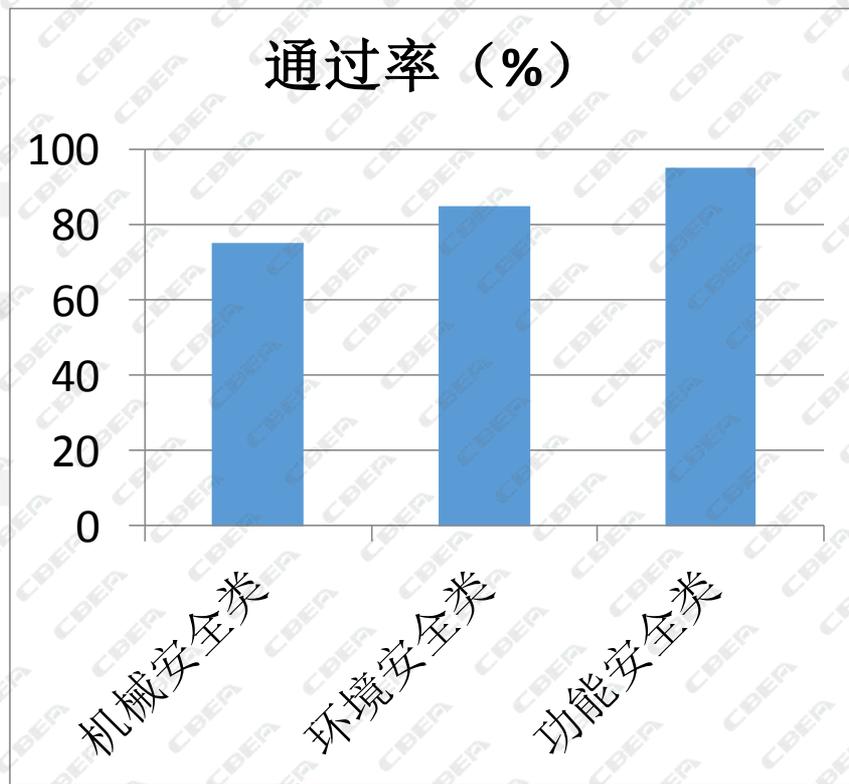


		2017年03月之前数据 (78个样本)		2017年03月之后数据 (50个样本)		
		数量	百分比	数量	百分比	
冷却方式	自然冷却	60	76.9%	46	92%	↑
	液冷	12	15.4%	2	4%	↓
	风冷	5	6.4%	2	4%	↓
	带加热板	1	1.3%	0	0%	↓
能量密度	< 90	15	19.2%	1	2%	↓
	90~120	38	48.7%	29	58%	↑
	> 120	25	32.1%	20	40%	↑

冷却方式自然冷却占比增加，能量密度90~120Wh/kg和120Wh/kg以上的占比增加

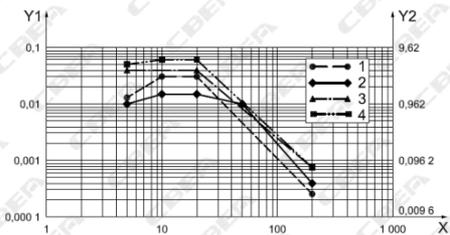
## ➤ GB/T 31467.3-2015 电动汽车用锂离子动力蓄电池系统测试规程 第3部分 安全性要求与测试方法

序号	测试项目	适用范围	试验方法	判定标准	
1	振动试验	蓄电池包或系统	7.1.1	无泄漏、外壳破裂、着火、爆炸	机械安全性
		蓄电池包或系统电子装置	7.1.2		
2	机械冲击	蓄电池包或系统	7.2		
3	跌落	蓄电池包或系统	7.3		
4	翻转	蓄电池包或系统	7.4		
5	模拟碰撞	蓄电池包或系统	7.5		
6	挤压	蓄电池包或系统	7.6		
7	温度冲击	蓄电池包或系统	7.7	无泄漏、外壳破裂、着火、爆炸	环境安全性
8	湿热循环	蓄电池包或系统	7.8		
9	海水浸泡	蓄电池包或系统	7.9	无着火、爆炸	
10	外部火烧	蓄电池包或系统	7.10	无爆炸	
11	盐雾	蓄电池包或系统	7.11	无泄漏、外壳破裂、着火、爆炸	
12	高海拔	蓄电池包或系统	7.12		
13	过温保护	蓄电池系统	7.13	管理系统起作用，无泄漏、外壳破裂、着火、爆炸	电安全性
14	短路保护	蓄电池系统	7.14		
15	过充电保护	蓄电池系统	7.15		
16	过放电保护	蓄电池系统	7.16		



# 1.4动力电池系统安全safety of battery pack&system

振动时间：x、y、z  
三个方向各21h。  
振动谱：随机振动



挤压程度：挤压力达到200kN或挤压变形量达到挤压方向的整体尺寸的30%时停止挤压。



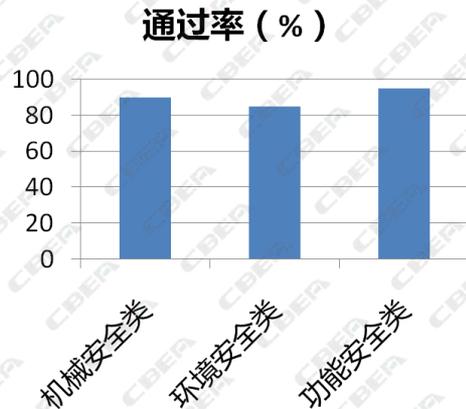
振动时间：z方向各  
3h。  
振动谱：正弦振动

表2 频率和加速度

频率 Hz	加速度 (m/s <sup>2</sup> )
7-18	10
18-30	10逐步降至2
30-50	2

挤压程度：挤压力达到100kN或挤压变形量达到挤压方向的整体尺寸的30%时停止挤压。

100个样本统计，  
结果如下：



# 1.5 电动客车安全技术条件 special requirements for bus



## 工信部装[2016]377号

《工业和信息化部关于进一步做好新能源汽车推广应用安全监管工作的通知》  
自2017年1月1日起，电动客车安全国家标准出台前，所有新生产的新能源客车暂按《电动客车安全技术条件》的要求执行。

### 电动客车安全技术条件

#### 1 范围

本文件规定了电动客车的的技术要求和试验方法。  
本文件适用于车长大于等于6m的电动客车，包括纯电动客车/城市客车、混合动力客车/城市客车（含插电式和增程式）、燃料电池客车/氢燃料电池客车。

#### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2406—2008 塑料 燃烧性能测定 水平法和垂直法
- GB 4209—2008 外壳防护等级 (IP代码)
- GB 9410—2006 汽车内饰材料的燃烧特性
- GB 4624—2012 建筑材料及制品燃烧性能分级
- GB/T 10294—2008 隔热材料稳态热阻及有热性的测定 防护加热法
- GB 13094—2004 客车结构安全要求
- GB 17578—2013 客车上部结构强度要求及试验方法
- GB/T 18384.3—2015 电动汽车 安全要求 第3部分：人员触电防护
- GB/T 19596 电动汽车术语
- GB 20071—2008 汽车侧面碰撞的乘员保护
- GB/T 21486—2013 电动汽车能量安全要求
- QC/T 29106—2014 汽车电系统技术条件
- ISO 6487 碰撞试验测量技术：检测仪器 (Road vehicle-Measurement techniques in Impact tests-Instrumentation)

#### 3 术语和定义

GB 13094、GB/T 18384.3—2015、GB/T 19596确立的及下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1

热失控 thermal runaway  
单体蓄电池内或相应引起不可控升温的现象。

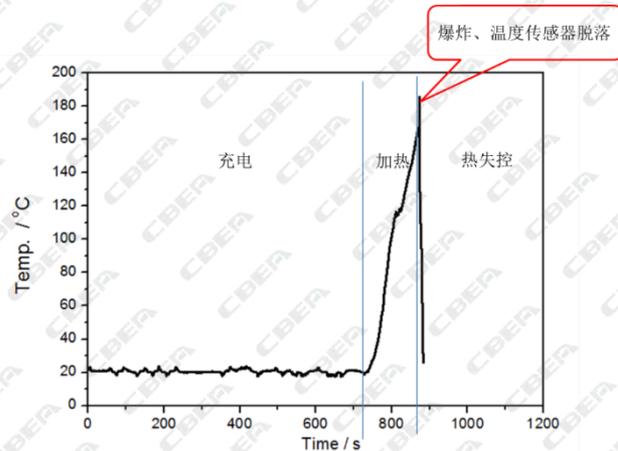
##### 3.2

热失控扩展 thermal runaway propagation  
蓄电池包或系统内部的单体蓄电池或单体蓄电池单元热失控，并触发该蓄电池系统中相邻或其他部件蓄电池热失控的现象。

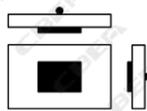
序号	测试项目	试验样品
1	蓄电池单元热失控测试	电池管理系统管理的最小蓄电池单元 1套
2	可充电储能系统热失控扩展测试	整车或完整的车载可充电储能系统或包括蓄电池及电气连接的车载可充电储能系统子系统 1套
3	可充电储能系统外观检查	整车或完整的车载可充电储能系统或包括蓄电池及电气连接的车载可充电储能系统子系统 1套
4	IP等级试验（选做）	——安装在客舱地板以下且距地面500 mm以下的B级电压电气设备和与B级电压部件相连的连接器（充电口除外）； ——安装在车顶且无防护装置的B级电压电气设备（受电装置除外）。

# 1.5 电动客车安全技术条件 special requirements for bus

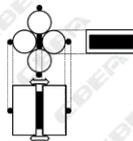
测试对象：电池管理系统管理的最小蓄电池单元



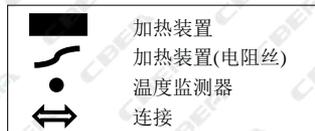
硬壳及软包电池



圆柱形电池-I



圆柱形电池-II



# 1.5 电动客车安全技术条件 special requirements for bus

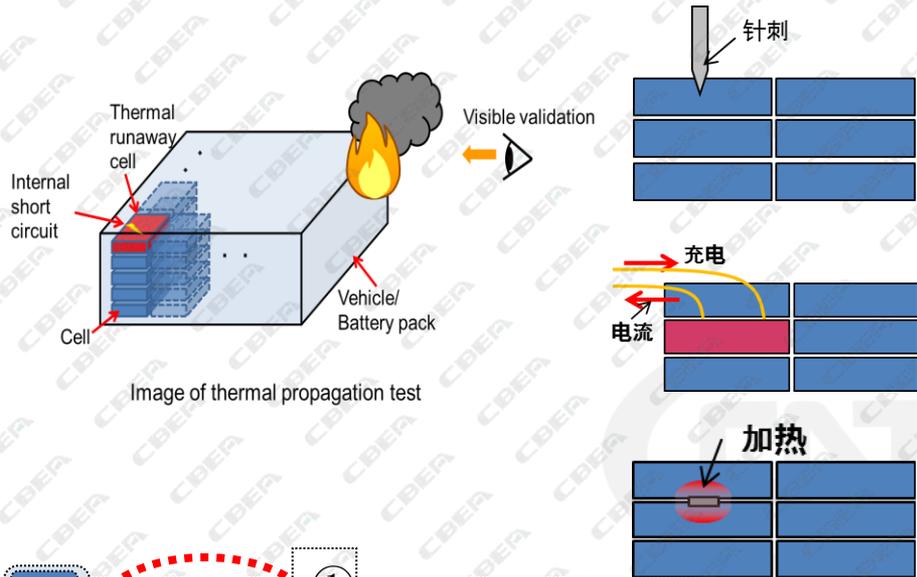
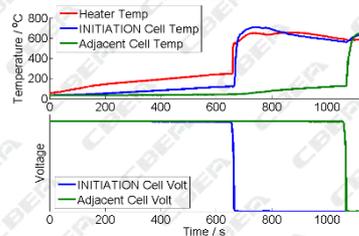
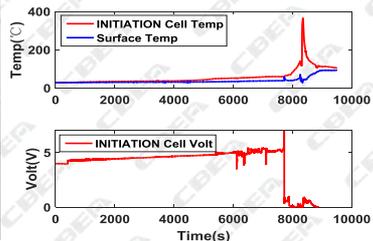
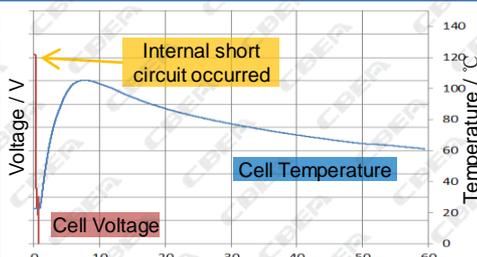
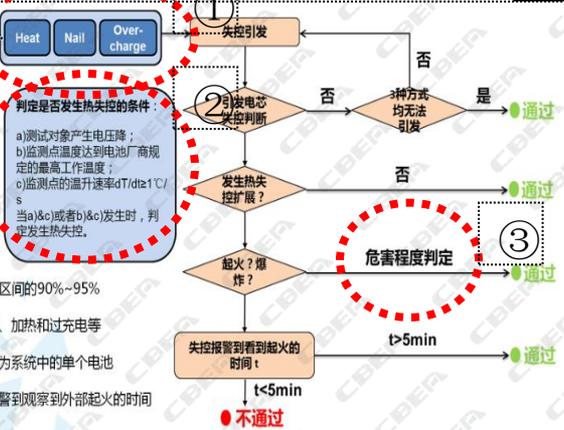


Image of thermal propagation test



热因素  
机械因素  
电因素



- ✓ SOC为正常工作区间的90%~95%
- ✓ 触发方法: 针刺、加热和过充电等
- ✓ 热失控触发对象为系统中的单个电池
- ✓ 记录从热失控报警到观察到外部起火的时间

## 二、动力电池测评技术研究

### Testing&Evaluation technology research

## Evaluation system of traction battery

### 出厂一致性

- 质量
- OCV
- 充放电容量

### 工作电压窗口

- 最大工作电压
- 最小工作电压

### 荷电保持

- 荷电保持百分比
- 容量恢复百分比

### 温度倍率特性

- 不同温度（低温、常温、高温）和电流倍率（1C、3C）下的放电容量

### 能量密度

- 不同温度（低温、常温、高温）和电流倍率（1C、3C）下放电能量

### 产热特性

- 不同温度和电流倍率下产热功率
- 热边界条件表征
- 热失控和热扩散

### 安全水平

危险等级	定义	危害等级/后果
0	无故障	对顾客无影响，无安全性危害。
1	轻微故障/警告	其他故障/警告，电池系统/设备可正常操作/使用，需要驾驶员/操作人员注意/干预。
2	故障	对司机造成警告，电池系统/设备不可正常/安全操作，需要驾驶员/操作人员干预。
3	严重、危险/失火<10%	电池系统故障/警告，造成驾驶员/乘客伤害的10%。
4	严重、危险/失火>10%	电池系统故障/警告，造成驾驶员/乘客伤害的10%。
5	致命	电池系统/设备故障/警告，造成驾驶员/乘客伤害，即造成人员伤亡。
6	死亡	电池系统/设备故障/警告造成人员伤亡，死亡人数大于1。
7	灾难	电池系统/设备故障/警告造成人员伤亡，死亡人数大于1。

### 老化特性

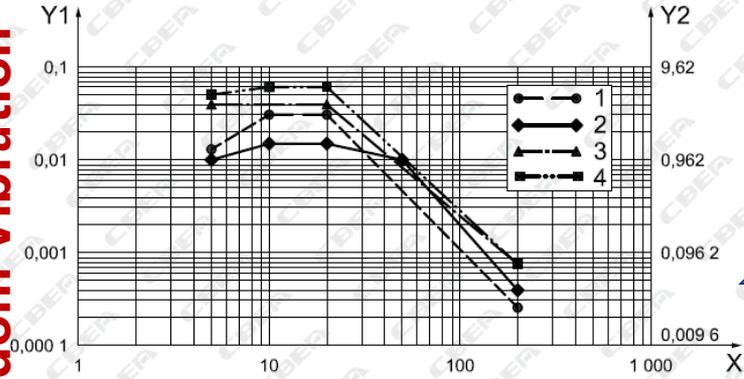
- 循环寿命
- 日历寿命
- 搁置寿命

---

# Battery Pack Vibration Profile research

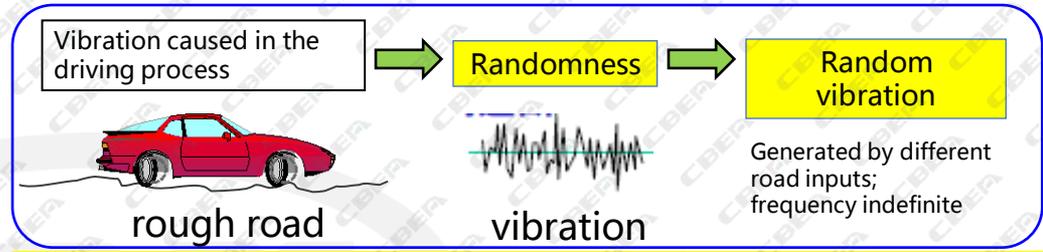
A large, faint, light-blue watermark of the CNTARC logo is centered in the background of the slide.

Random Vibration  
Sine sweep vibration



- **ISO 12405.3-2014** Electrically propelled road vehicles —Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 3: Safety performance requirements
- **GB/T31467.3-2015** Lithium-ion traction battery pack and system for Electric vehicles— Part 3: Safety requirement and test method
- **SAE J2380** Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries
  
- **GB/T31467.3(Revision)-2017**
- **ECE R100** Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train
- **EVS-GTR draft**

Too hard  
Too easy



➤ By collecting the vibration signal of the vehicle driving process, the vibration condition of the battery pack is analyzed

1. Standard implementation process, part of the enterprise feedback and test results reflect the current vibration standards are too harsh, and the actual use of the battery pack is different, need to be based on real vehicle vibration to be revised;
2. Provide technical support and data support for EVS-GTR battery vibration project;

Uniform road conditions

Uniform vibration test point

The same data analysis and accelerated aging method

The number and type of test vehicles are representative



Bench vibration test conditions



Installation of vibration sensors near battery pack mounting points

3-D Vibration data acquisition in different rough roads

Data analysis and normalized

Study reasonable vibration test conditions

validation on vibration bench

# 部分车辆信息 Vehicles information

Passenger cars-EV, HEV, PHEV; Minicars included

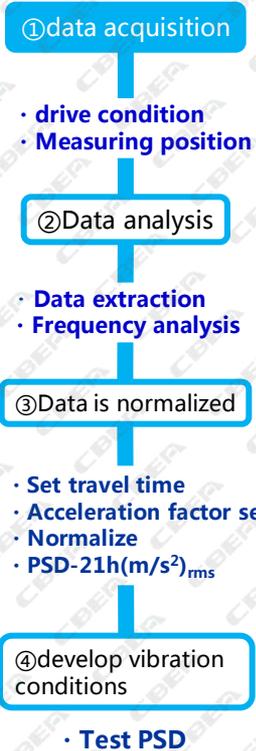


Commercial vehicles –Cargo vans, busses;



# Procedure 1-data acquisition in various rough roads

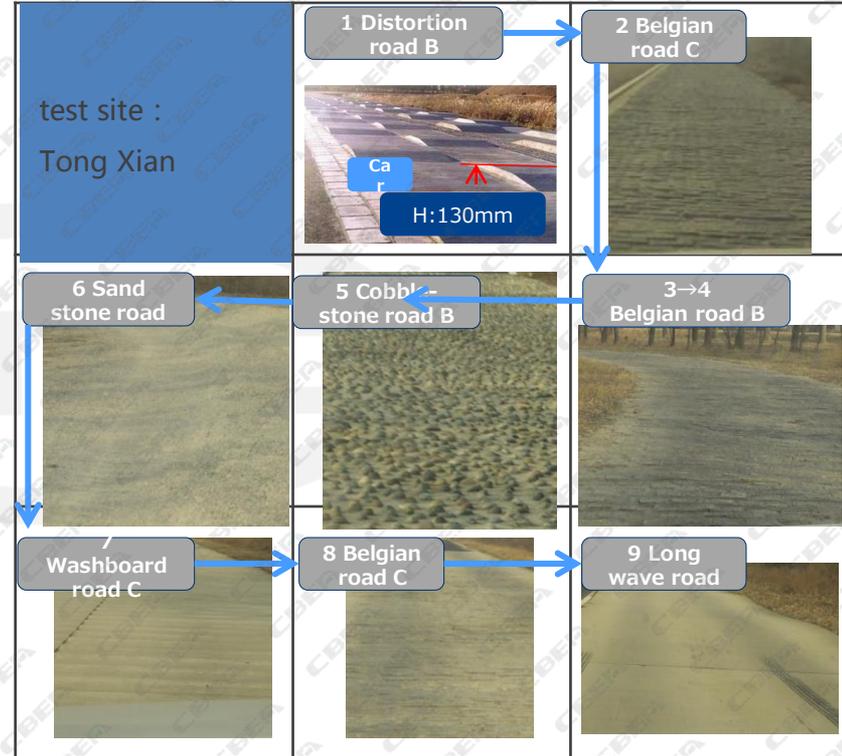
step



## Test Condition

Seq.	Rough roads	length (m)	Vehicle speed (km/h)	Test times
1	Twisting road B	85	10	3
2	Belgian road C	300	40	
3	Belgian road B	1189	50	
4	Belgian road B	1189	50	
5	Cobble-stone road B	335	50	
6	Gravel road	2113	40	
7	Washboard Road C	300	50	
8	Belgian road C	300	50	
9	Long wave road	90	50	

## Type of road



Data collection at the test site

N.O.	Position	Vehicle Direction	Sensor direction	Channels	Photos
2601	Right rear	X	X	AI-0	
		Y	Z	AI-1	
		Z	Y	AI-2	
2602	Left rear	X	X	AI-3	
		Y	Z	AI-4	
		Z	Y	AI-5	
2603	Right forward	X	X	AI-6	
		Y	Y	AI-7	
		Z	Z	AI-8	
2604	Left forward	X	X	AI-9	
		Y	Y	AI-10	
		Z	Z	AI-11	



- Sensor layout principle: focus on the installation of fixed parts fixed position
- The number of sensors is determined by the number of fixed points unless specifically requested by the enterprise

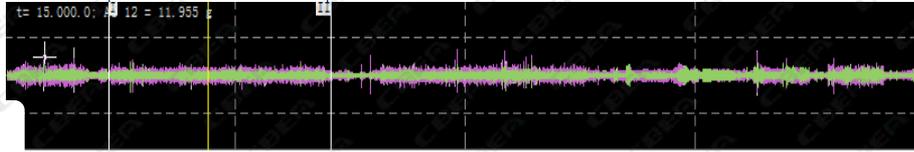
# Procedure 2-data extraction and analysis

step

Effective pavement

① data acquisition

- drive condition
- Measuring position



② Data analysis

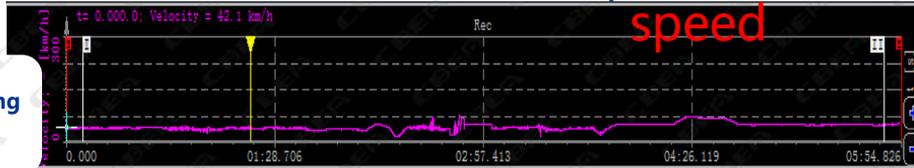
- Data extraction
- Frequency analysis



Vehicle speed

③ Data is normalized

- Set travel time
- Acceleration factor setting
- Normalize
- PSD-21h(m/s<sup>2</sup>)<sub>rms</sub>



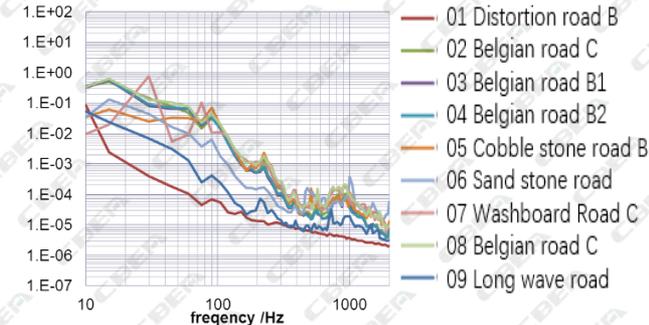
④ develop vibration conditions

- Test PSD

● Analytical conditions

- Frequency resolution 1Hz
- Window function Hanning
- Average processing Arithmetic mean
- Frequency Range 5-200Hz

- ① Only the data on the rough roads were extracted.
- ② For data from several sensors in each rough road, the one which has maximum RMS are selected. And all the data of each rough road were collected to be the data of one loop.
- ③ For the data of each loop, the average value of them are selected.



# Procedure 3-data normalized

step

① data acquisition

- drive condition
- Measuring position

② Data analysis

- Data extraction
- Frequency analysis

③ Data is normalized

- Set travel time
- Acceleration factor setting
- Normalize
- PSD-21h(m/s<sup>2</sup>)<sub>rms</sub>

④ develop vibration conditions

- Test PSD

One loop (passenger car)				
		①	②	③=①/②/1000
Seq	Rough roads	length h ( m	Vehicle speed (km/h)	Driving time (h)
1	Twisted road B	85	10	0.008500
2	Belgian road C	800	40	0.020000
3	Belgian road B	1189	40	0.029725
4	Belgian road B	1189	40	0.029725
5	Cobble-stone road B	335	50	0.006700
6	Gravel road	2113	40	0.052825
7	Washboard Road C	300	50	0.006000
8	Belgian road C	800	40	0.020000
9	Long wave road	90	50	0.001800

Take Tong Xian test ground car product stereotypes reliability driving test specification (2000)

Extended to required distance	
①*X	③*X
life distance	life time
60690	6.069
571200	14.28
848946	21.22365
848946	21.22365
239190	4.7838
1508682	37.71705
214200	4.284
571200	14.28
64260	1.2852

X value is different for different vehicles:

- Passenger car X=714;
- Minicar X=476
- Cargo Van X=1274
- Bus X=882

300,000 km for whole Vehicle

# Procedure 3-data normalized

step

① data acquisition

- drive condition
- Measuring position

② Data analysis

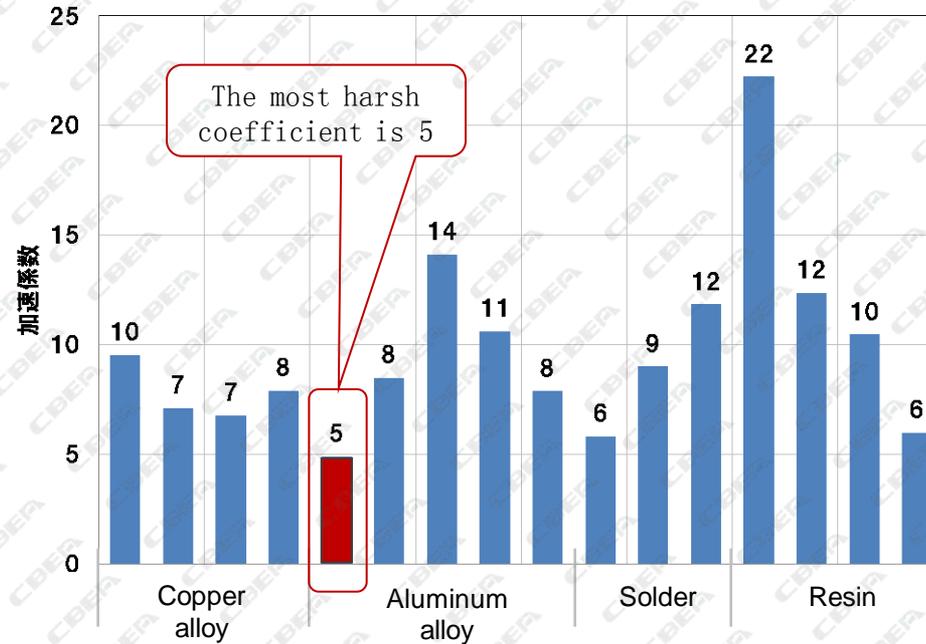
- Data extraction
- Frequency analysis

③ Data is normalized

- Set travel time
- Acceleration factor setting
- Normalize
- PSD-21h(m/s<sup>2</sup>)<sub>rms</sub>

④ develop vibration conditions

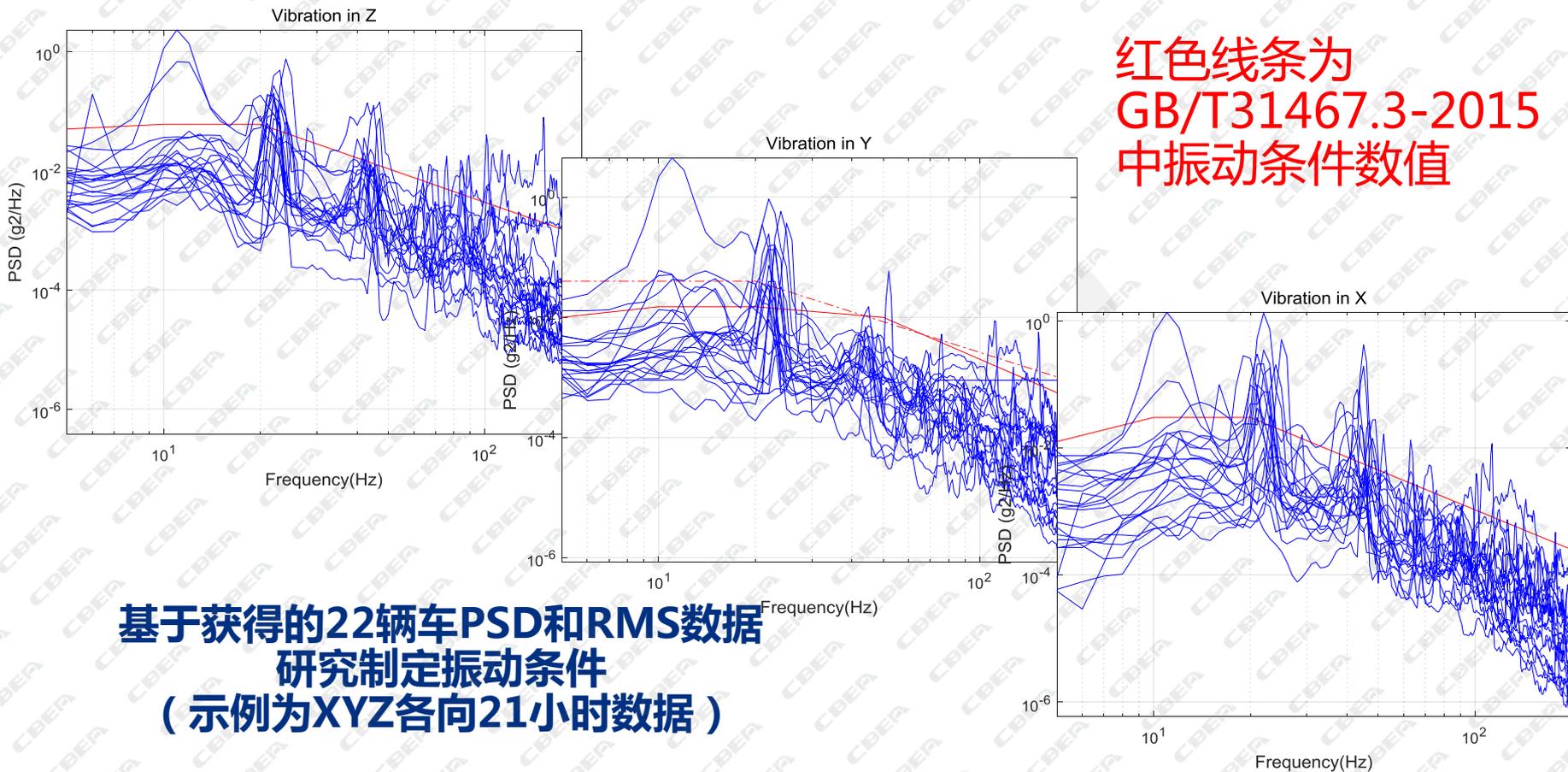
- Test PSD



- Refer to ISO DIS 19453-3
- Key component composition materials, using the lowest value (the most stringent)

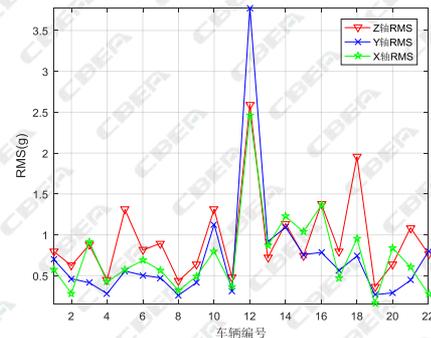
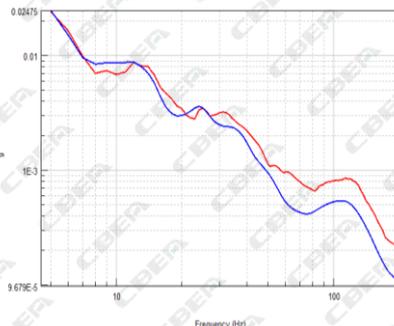
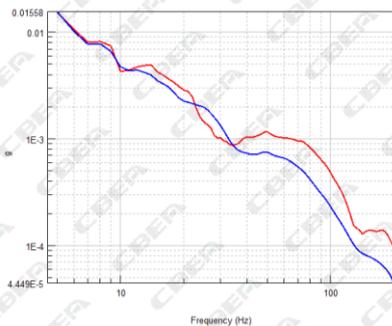


# Procedure 4- develop vibration conditions



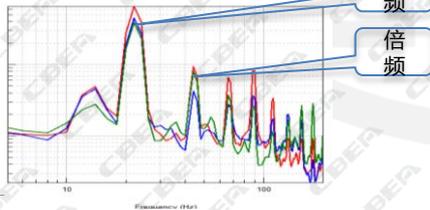
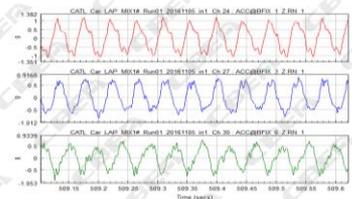
# Procedure 4- develop vibration conditions

试验时间  
 数据选择：顶置电池包，搓板路  
 车型划分与数据综合  
 光顺方法  
 判断方法



车型的差异

顶置电池包差异



搓板路振动信号

搓板路频谱分析

正弦加速强化模型 (美军标 MIL-STD-810F)

$$\left(\frac{g_0}{g_1}\right) = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{1/m}$$

式中：m—加速系数，取5；

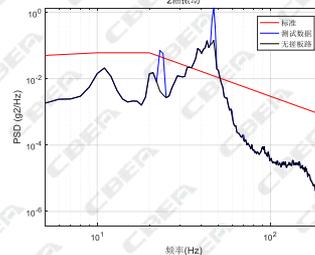
$g_0$ —原始振动幅值；

$g_1$ —加速后振动幅值；

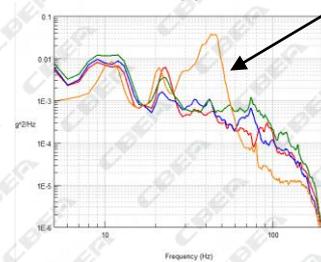
$T_0$ —路谱测试时间；

$T_1$ —加速后振动时间；

强化考虑



异常数据剔除



## 21小时测试条件

乘用车和物流车			
频率	X	Y	Z
5	0.005	0.002	0.012
10	/	0.004	/
15	/	/	0.012
20	/	0.004	/
30	0.005	/	/
65	/	/	0.0009
100	/	/	0.0009
200	0.00002	0.00012	0.00006
RMS	0.45g	0.40g	0.58g
时间	21	21	21
定频幅值	1g	1g	1.5g
定频频率	24Hz	24Hz	24Hz
定频时间	1h	1h	1h

其它商用车			
频率	X	Y	Z
5	0.0005	0.001	0.002
10	0.015	0.022	0.035
15	0.015	0.022	0.035
40	/	/	0.00045
60	/	0.001	/
100	/	0.001	0.00045
200	0.00001	0.00001	0.00001
RMS	0.47g	0.52g	0.65g
时间	21	21	21
定频幅值	2g	1.5g	1.5g
定频频率	20Hz	20Hz	20Hz
定频时间	2h	2h	2h

## 12小时测试条件

乘用车和物流车			
频率	X	Y	Z
5	0.006	0.002	0.015
10	/	0.005	/
15	/	/	0.015
20	/	0.005	/
30	0.006	/	/
65	/	/	0.001
100	/	/	0.001
200	0.00003	0.00015	0.0001
RMS	0.5g	0.45g	0.64g
时间	12h	12	12
定频幅值	1g	1g	1.5g
定频频率	24Hz	24Hz	24Hz
定频时间	1h	1h	1h

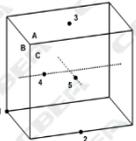
其它商用车			
频率	X	Y	Z
5	0.0008	0.002	0.002
10	0.018	0.025	0.045
15	0.018	0.025	0.045
40	/	/	0.0005
60	/	0.00015	/
100	/	0.0015	0.0005
200	0.00001	0.00001	0.00001
RMS	0.51g	0.57g	0.73g
时间	12	12	12
定频	2g	1.5g	1.5g
定频频率	20Hz	20Hz	20Hz
定频时间	2h	2h	2h

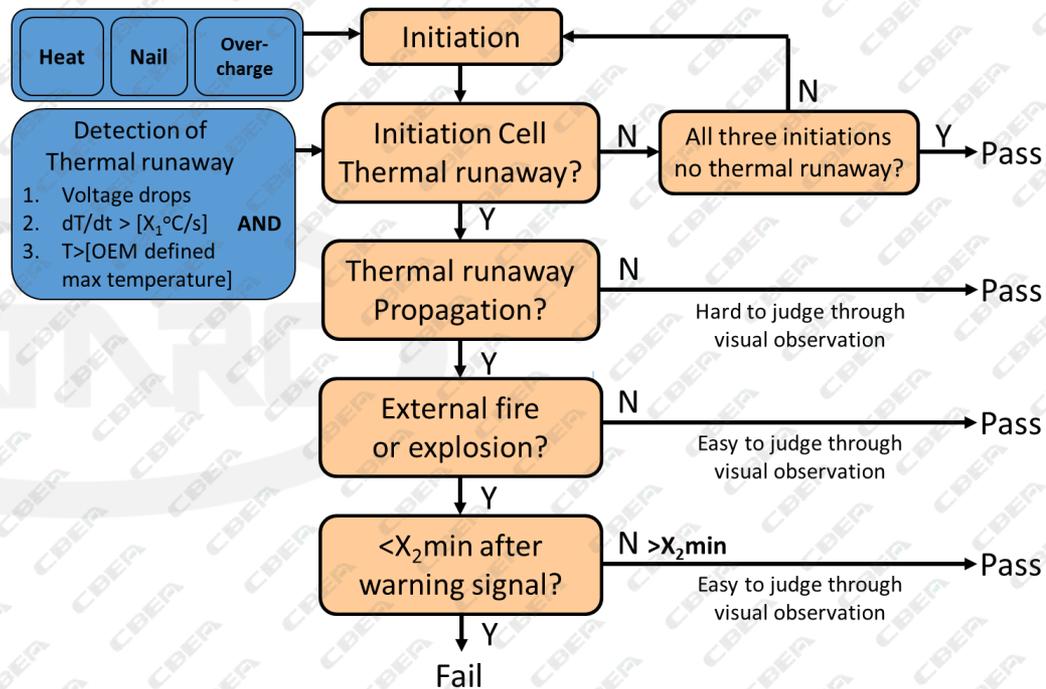
将测试对象安装在测试台上。振动测试在三个方向进行，按照Z随机→Z向定频→Y随机→Y向定频→X随机→X向定频的顺序进行台架试验。

---

A large, faint, light-gray watermark logo in the background, featuring the words 'Thermal Propagation Research' in a serif font, enclosed within a horizontal oval shape.

# Thermal propagation research

标准	项目	内容
SAE J2464	热稳定性 Thermal Stability Test (Cell Level)	类似ARC中进行热失控测试，通过反复测试，逐步缩小步长，找到电池测试中的自产热温度点和最高温度。同时需要对过充、寿命中期、寿命终止状态的电池进行测试。
	热扩散 Passive Propagation Resistance Test (Module or Pack Level)	整体加热至55℃或规定的最高工作温度，然后对单体进行加热5min内至400℃或热失控发生。对不同位置的单体目标均进行测试。 
UL2580	热扩散 Internal Fire Exposure Test	同SAE J2464，应不起火、不爆炸。
电动客车安全技术条件	热失控	单体电池过充至120%SOC，立即加热至300℃或电池发生热失控，电池应不起火、不爆炸。
	热扩散	≥90%SOC，电池系统（或子系统），加热/针刺/过充触发单体热失控，要求应不起火、不爆炸。 



## 1. Research on test method

1.1 additional energy introduced by different method

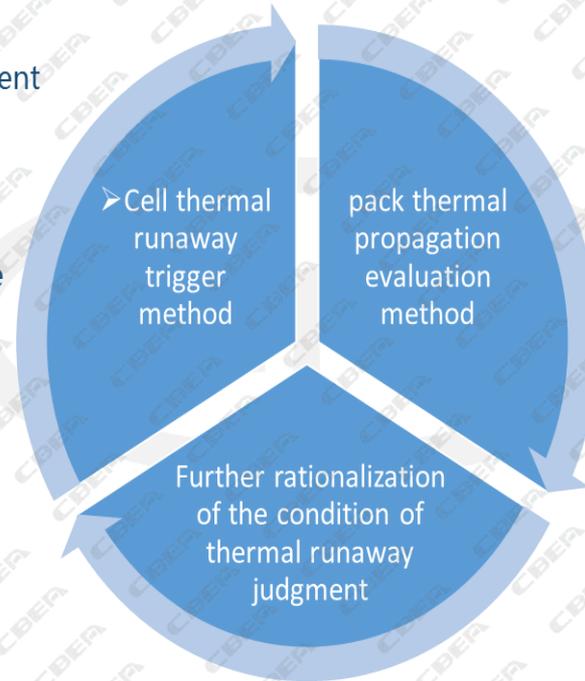
1.2 test parameters verifying in different trigger methods

1.3 comparison of test results with different trigger methods

## 2. Repeatability of test results

2.1 Repeatability of test results for the same method

2.2 Verification test between different laboratories



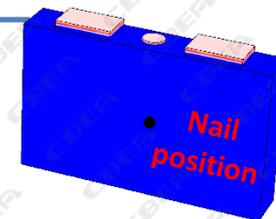
The differences of three methods to battery systems

- ✓ Nail
- ✓ Over charge
- ✓ heat

1. Voltage drop
2. Highest Temperature
3. Temperature rise rate

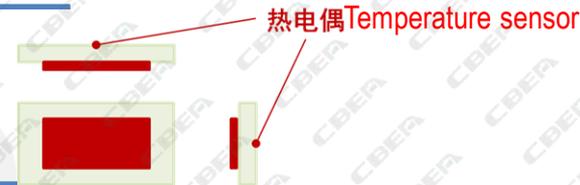
## Nail

Material: High temperature resistant, stainless steel  
Diameter: 5mm  
Angle: 60°  
Surface requirements: Smooth, no rust, oxide and oil  
Nail speed: 25mm/s



## Over charge

The trigger method is over charge, the current will be three different rate:1C/2C/3C, over charge the battery until it goes into runaway



## Heating

prismatic and pouch cells:  
Place the heating devices on the largest plane, and occupy  $\frac{1}{2}$  ~ $\frac{4}{5}$  surface area  
cylindrical cells:  
Heating wire winding the cells, and place the thermal sensors at the negative



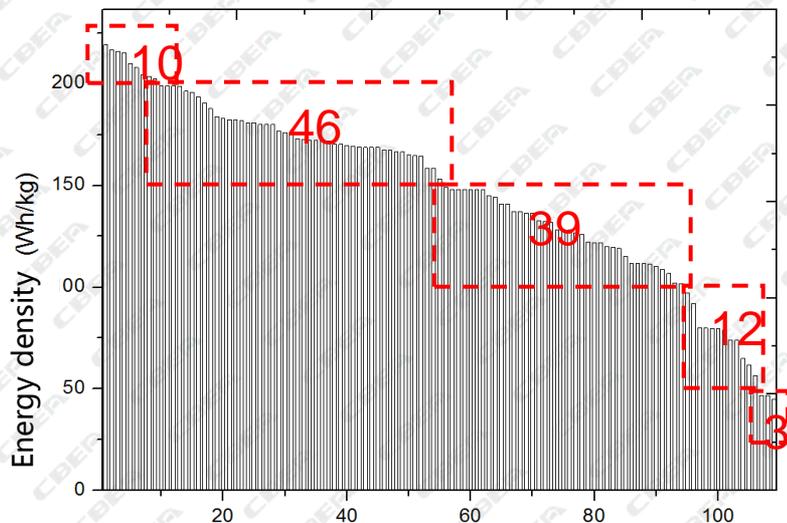
Trigger method	Nail	Over charge	Heat
Parameters	voltage	voltage	voltage
	——	current	power
	——	test time	test time
	——	energy introduced	energy introduced
	temperature	temperature	temperature
	Weight before and after test	Weight before and after test	Weight before and after test
	video	video	video
	photos	photos	photos
Requirement	data sampling rate of 100Hz	data sampling rate of 100Hz	data sampling rate of 100Hz

Type	thermal sensors position	Claps	Illustration
Prismatic	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. valve (1#)</li> <li>2. positive (2#)</li> <li>3. negative (3#)</li> <li>4. Both sides of nail position (4#、5#)</li> </ol> <p>As for over charge and heat, the central of the big plane</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>5. Positive side (6#)</li> <li>6. Negative side (7#)</li> <li>7. Middle of bottom (8#)</li> </ol>	YES	
Pouch	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. positive (1#)</li> <li>2. negative (2#)</li> <li>3. nail position; (3#、4#、5#、6#)</li> </ol> <p>As for over charge and heat, the positions are middle of front and back, and the point farthest from the center (3#、4#、5#、6#)</p>	YES	
Cylindrical	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. positive (1#)</li> <li>2. negative (2#)</li> <li>3. nail position (3#)</li> </ol> <p>As for overcharge, the middle of side (3#)</p>	NO	

# Introduction of test

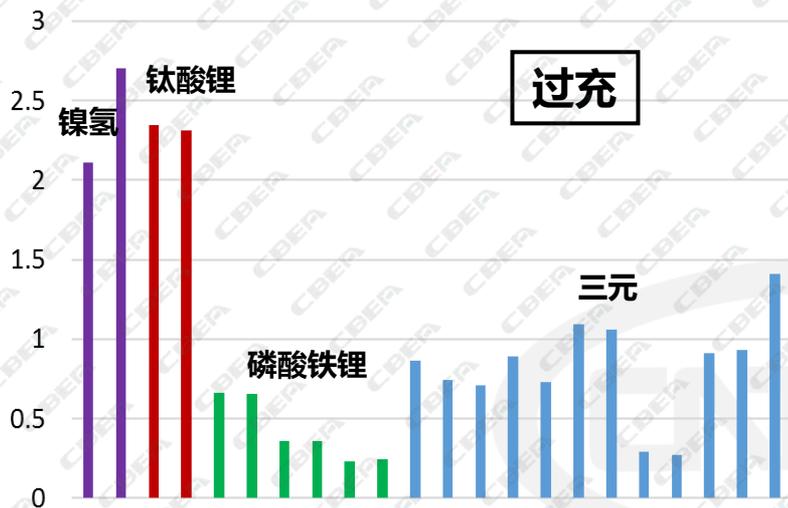
Statistics energy density of batteries:

➤ 85% samples' energy densities are 100~200Wh/kg



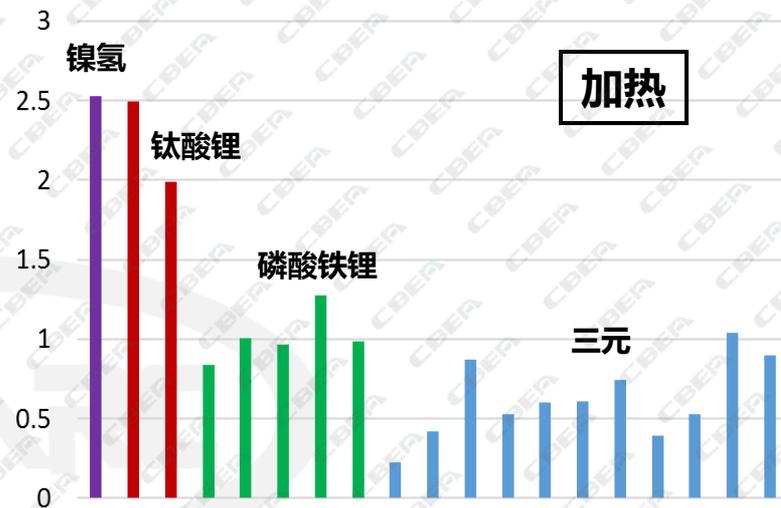
- 0~50 Wh/kg (3%)
- 50~100 Wh/kg (11%)
- 100~150 Wh/kg (35%)
- 150~200 Wh/kg (42%)
- 200+ Wh/kg (9%)

测试样品				测试项目		
能量密度	材料体系	样品形式	编号	加热	过充	针刺
					2C	
>200	三元	方形	1	√	√	√
		软包	2	√	√	√
150~200	三元	软包	3	√	√	√
		圆柱	4	√	√	√
100~150	三元	方形	5	√	√	√
		圆柱	6	√	√	√
	磷酸铁锂	方形	8	√	√	√
		圆柱	9	√	√	√
50~100	三元	方形	11	√	√	√
	钛酸锂	软包	12	√ 冒烟	√	√
<50	镍氢	圆柱	13	√ 冒烟	√	√



引入能量比统计结果：

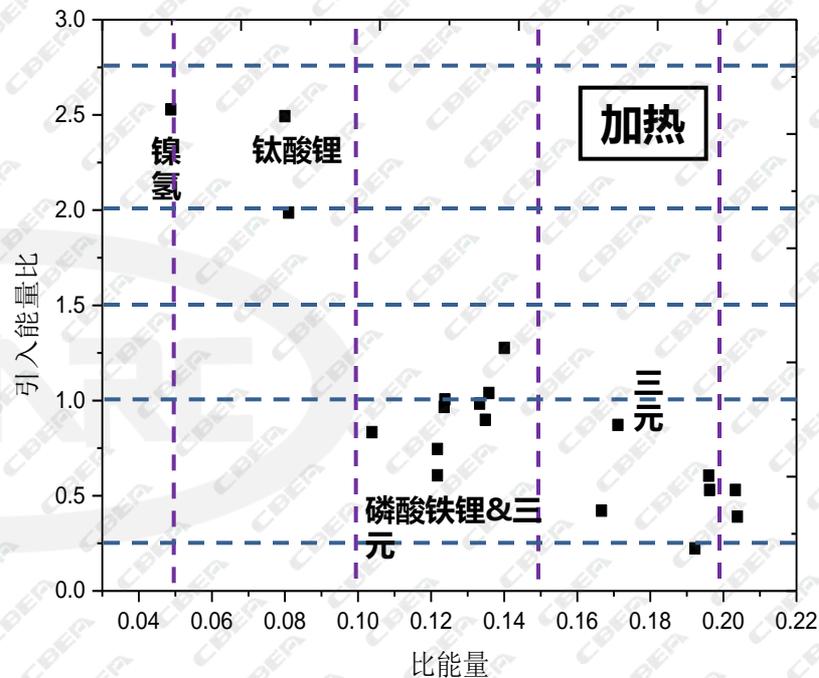
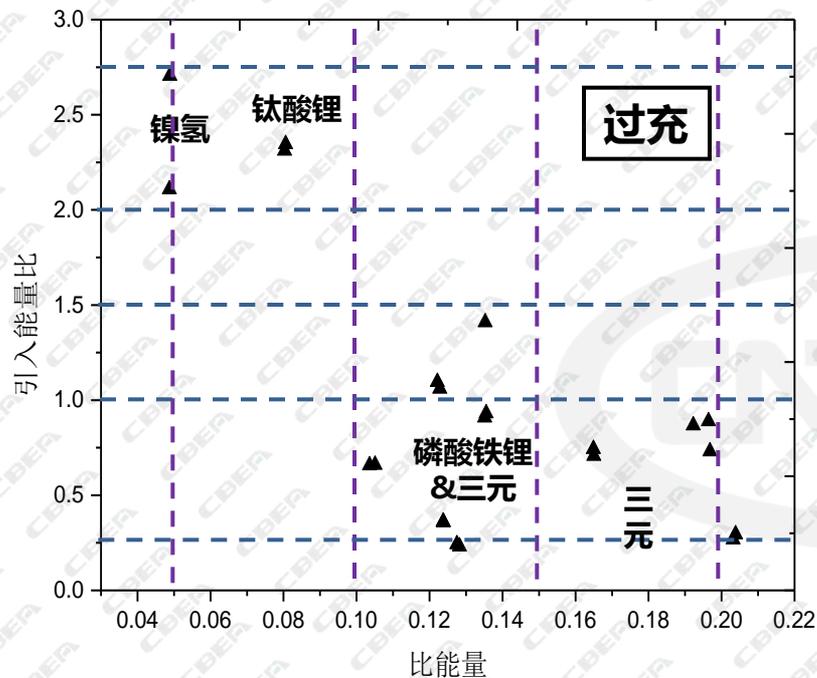
- 镍氢 (1款) : 2.11~2.70
- 钛酸锂 (1款) : 2.35~2.31
- 磷酸铁锂 (3款) : 0.23~0.66
- 三元 (6款) : 0.26~1.41



引入能量比统计结果：

- 镍氢 (1款) : 2.53
- 钛酸锂 (1款) : 1.99~2.49
- 磷酸铁锂 (3款) : 0.83~1.28
- 三元 (6款) : 0.22~1.04

- 相同方法对相同体系电池引入的能量基本一致；
- 加热对磷酸铁锂引入能量大于过充，过充对三元引入能量大于加热；

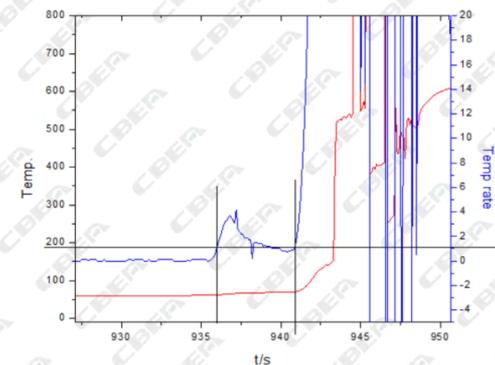
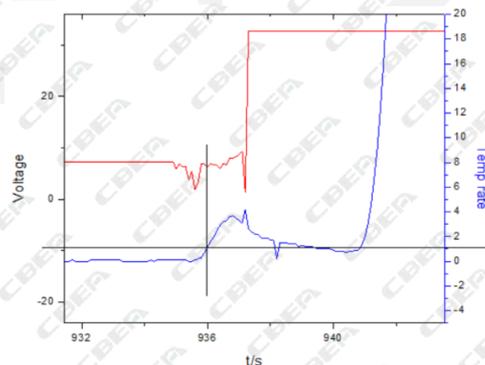
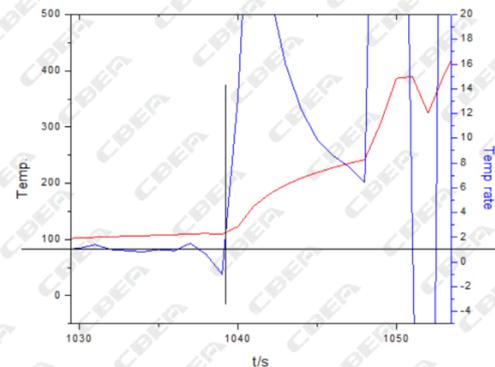
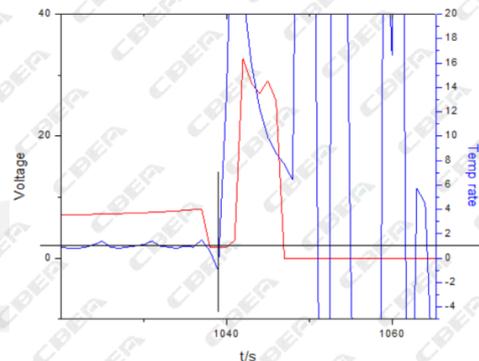


- 能量密度在一定范围内的样品，无论材料体系如何，在加热和过充热失控过程中，引入电池的能量在相同范围内，例如：
  - 当 $50\text{Wh/kg} < \text{能量密度} < 100\text{Wh/kg}$ ，引入能量百分比在200%~275%之间
  - 当 $100\text{Wh/kg} < \text{能量密度} < 150\text{Wh/kg}$ ，引入能量百分比在25%~150%之间

# Thermal runaway analysis-overcharge

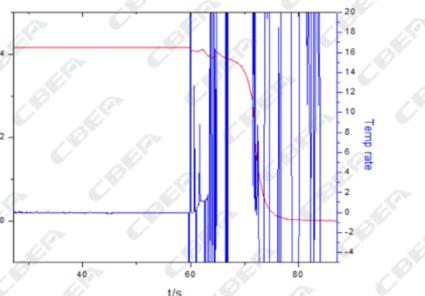
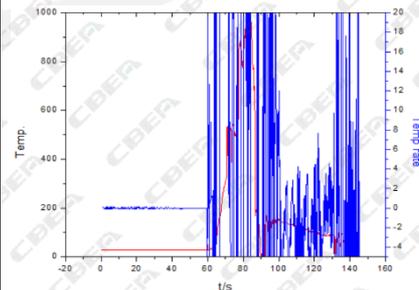
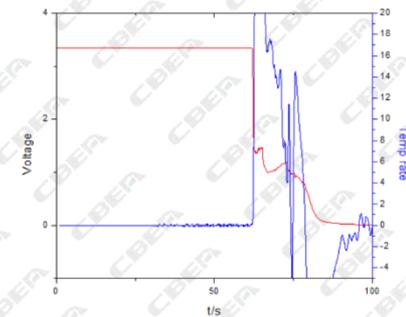
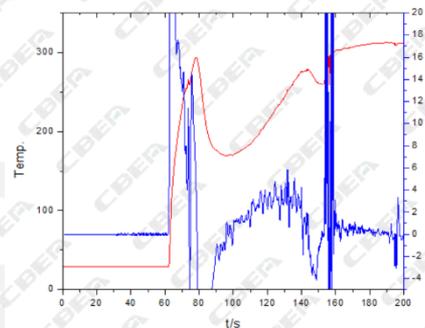
➤过充时电池的温度、电压、温升速率比较分散，差异性较大

实验项目	温度突变点	温升速率	电压
过充1	113	2	0
过充2	125	4	2.5
过充1	90	2.5	2.5
过充1	79	2	0
过充2	75	1.5	1.5
过充1	80	1.8	32 ( MAX )
过充2	85	1.9	32 ( MAX )
过充1	75	1.9	1
过充1	105	2	30
过充2	90	1.7	30 ( MAX )
过充1	95	4.1	0
过充2	100	2	MAX



➤ 电池针刺时特征参数表现基本一致（部分类型电池无法触发热失控）

样品	项目	温升1°C/s	温升2°C/s	温升4°C/s
磷酸铁锂-25	针刺1	28	30	48
磷酸铁锂-25	针刺2	29	30	35
三元-26.5	针刺1	25	30	32
三元-26.5	针刺2	28	29	30
磷酸铁锂-22	针刺1	28	31	34
磷酸铁锂-22	针刺2	28	28	31
钛酸锂-30	针刺1	温度无变化		
三元-44	针刺1	25	26	27
三元-44	针刺2	25	25	25
镍氢-6	针刺1	28	29	35
镍氢-6	针刺2	29	30	50
磷酸铁锂-1.6	针刺1	30	32	49
磷酸铁锂-1.6	针刺2	温度跳变过大		
三元-2.0	针刺1	28	29	31
三元-2.0	针刺2	30	30	33
三元-33	针刺1	25	28	34
三元-33	针刺2	30	30	37
锰酸锂-35	针刺1	27	29	35
锰酸锂-35	针刺2	28	30	33
三元-2.5	针刺1	25	25	30
三元-2.5	针刺2	25	25	25
三元-26	针刺1	29	29	30
三元-26	针刺2	29	29	30



# Thermal runaway analysis-heat

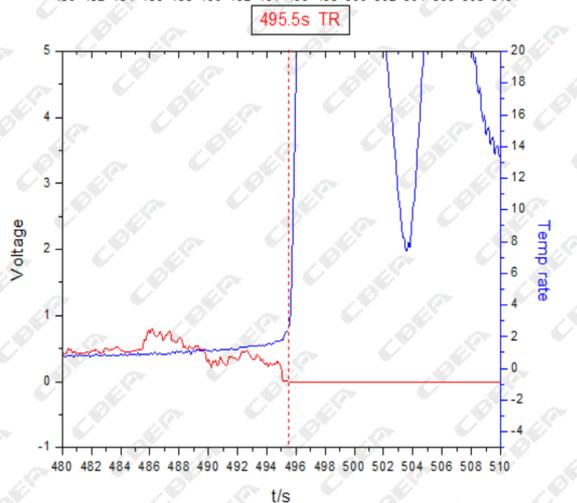
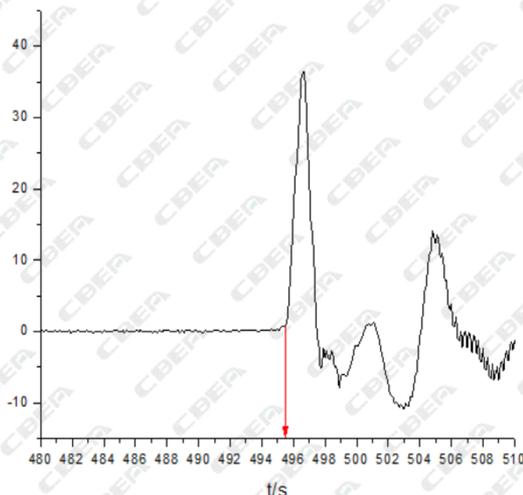
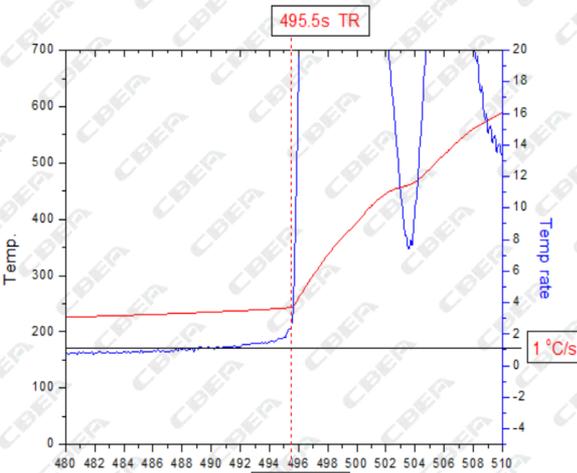


➤ 电池加热时基本能够触发所有电池热失控（部分低能量密度电池达到300℃依然没有热失控的特征出现）

电池类型	起始电压/V	热失控时间/s	温度/ °C	温升速率/ °C/s	电压/V	电压降/%
磷酸铁锂-25Ah	3.4	1019	111	0.5	0.1	97.06
磷酸铁锂-22Ah	3.35	1778	299.4	1.3	0	100.00
钛酸锂-30Ah	2.63	未失控				
三元-44Ah	4.17	501	87.4	1.1	2.7	35.25
镍氢-6Ah	1.37	未失控				
磷酸铁锂-1.6Ah-1	3.38	937	218	1	0	100.00
磷酸铁锂-1.6Ah-2	3.38	1224	224.1	0.9	0	100.00
三元-2.0Ah-1	4.17	495.5	242.2	1.8	0	100.00
三元-2.0Ah-2	4.17	719	202.1	1.3	0	100.00
三元--33Ah-1	4.14	1321.6	181.8	13.2 0.1(1321.5s)	1.36	67.15
三元--33Ah-2	4.14	1246	91.5	1.5	1.7	58.94
锰酸锂-35Ah-1	4.15	1243	83.4	6.4 1.4(1242s)	0.5	87.95
锰酸锂-35Ah-2	4.15	1473.5	109.6	1.8	0	100.00
三元--2.5Ah-1	4.1	816.7	155.3	0.8	0	100.00
三元-2.5Ah-2	4.1	790.5	192.2	3.2 1.6(790s)	0	100.00
三元--25Ah-1	4.12	1421.7	161.2	1	0	100.00
三元--25Ah-2	4.12	1249	161	1	0	100.00

# Thermal runaway analysis-heat

## 三元NCM/C

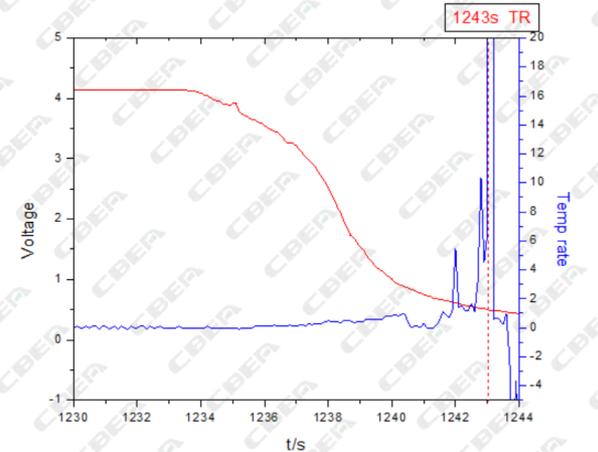
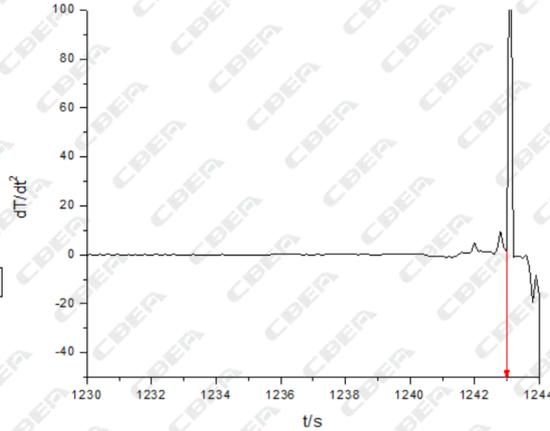
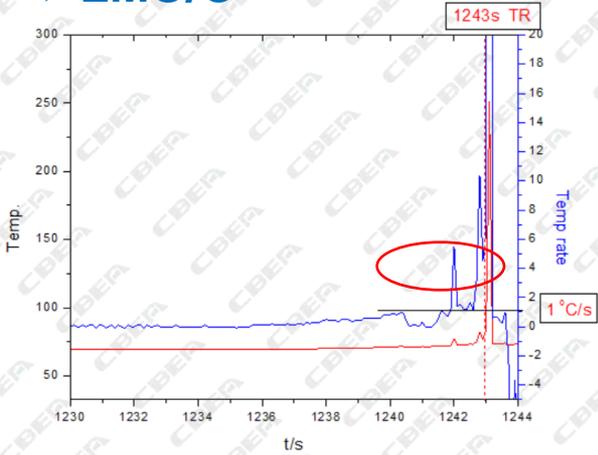


热失控时间/s	温度/ °C	温升速率/ °C/s	电压降/%
495.5	242.2	1.8	100%

电压/V	时间/s	温度/ °C	温升速率/ °C/s
0%	297.3	182.3	0.3
25%	297.3	182.3	0.3
50%	345.2	197.2	0.3
75%	346.7	197.7	0.4
100%	495.5	242.2	1.8
温度/ °C	时间/s	电压/V	温升速率/ °C/s
60	21.6	4.165	2.1
100	44	4.165	1.3
150	159.4	4.162	0.2
200	363.1	0.495	0.4
温升速率/ °C/s	时间/s	温度/ °C	电压/V
0.5	438.9	228.4	0.297
1	488.0	232.8	0.660
2	495.6	242.8	0.008
3	495.8	244.7	-0.003
4	495.8	247.2	-0.002
5	496.0	251.4	-0.003

# Thermal runaway analysis-heat

## LMO/C

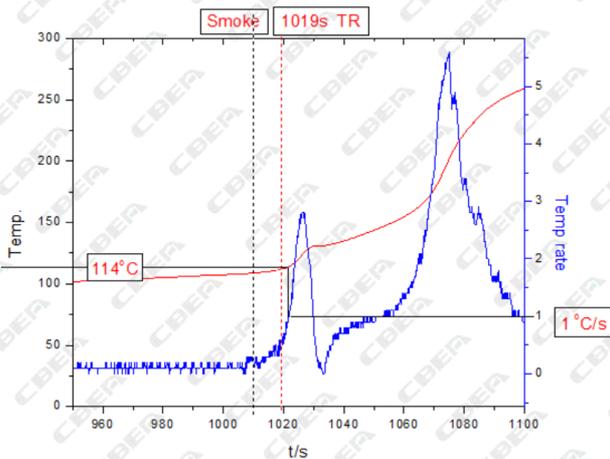
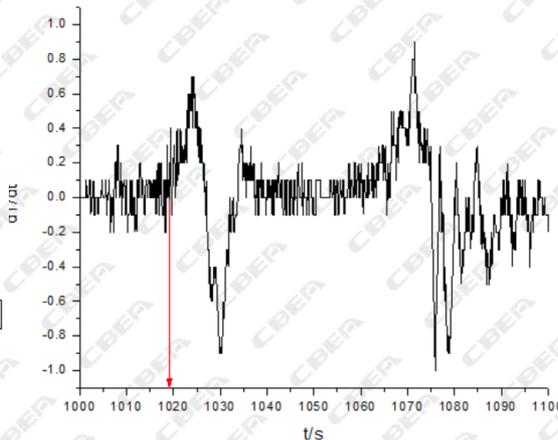
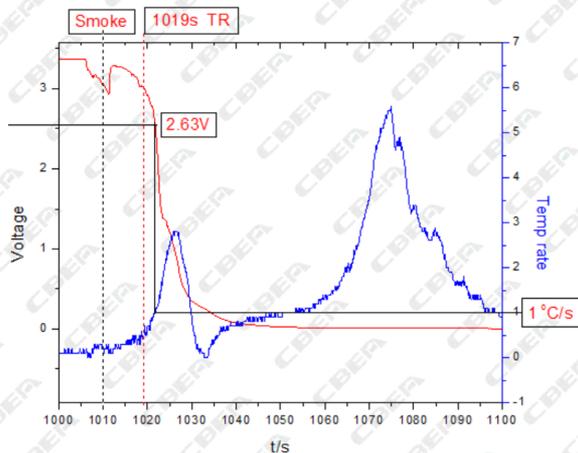


热失控时间/s	温度/ $^{\circ}\text{C}$	温升速率/ $^{\circ}\text{C/s}$	电压降/%
1243	83.4	6.4	58.94%

电压/V	时间/s	温度/ $^{\circ}\text{C}$	温升速率/ $^{\circ}\text{C/s}$
0%	1234.4	69.3	0
25%	1237.1	69.6	0.2
50%	1238.4	70	0.3
75%	1239.9	71.1	0.8
100%	1251	786.7	297.1
温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/s	电压/V	温升速率/ $^{\circ}\text{C/s}$
60	823.1	4.15	0.1
100	1247	0.5	6.4
150	1247.5	0.22	70.8
200	1247.6	0.21	119.7
温升速率/ $^{\circ}\text{C/s}$	时间/s	温度/ $^{\circ}\text{C}$	电压/V
0.5	1238	70	2.51
1	1240.4	71.6	0.88
2	/	/	/
3	/	/	/
4	/	/	/
5.5	1242	77	0.61

# Thermal runaway analysis-heat

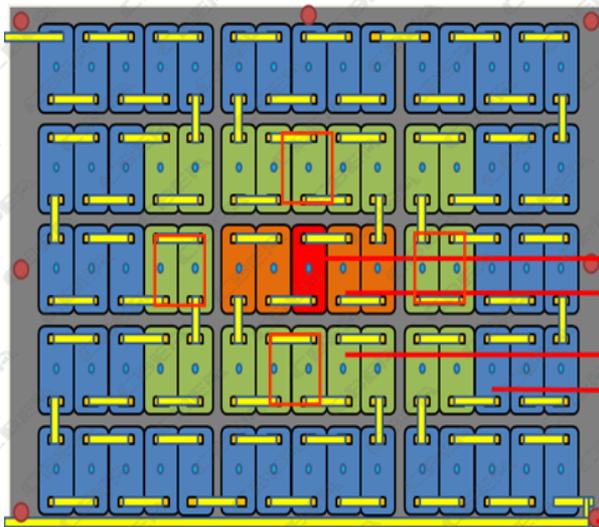
## 磷酸铁锂LFP/C



热失控时间/s	温度/ °C	温升速率/ °C/s	电压降/%
<b>1019</b>	111	0.5	97.06

电压/V	时间/s	温度/ °C	温升速率/ °C/s
0%	1006	108.2	0.1
25%	1020.5	112.8	0.6
50%	1022.5	115	1.2
75%	1026.3	124.1	2.8
100%	1061.9	157.6	1.5
温度/ °C	时间/s	电压/V	温升速率/ °C/s
60	499.9	3.403	0.2
100	933.5	3.378	0.2
150	1056.1	0.017	1.1
200	1074.6	0.011	5.5
温升速率/ °C/s	时间/s	温度/ °C	电压/V
0.5	1016.6	110.8	3.172
1	1021.5	113.8	2.63
2	1064.6	162.3	0.008
3	1068.5	171.8	0.009
4	1070.6	179.5	0.01
5	1072.7	189.6	0.011





The focuses of thermal propagation are

- the state of the trigger target cell
- the thermal propagation way.

Trigger target	Trigger method	Nail	Over charge	Heat
	Parameters		voltage	voltage
		---	current	power
		---	test time	test time
		---	energy introduced	energy introduced
		temperature	temperature	temperature
requirement		video	video	video
		data sampling rate of 100Hz	data sampling rate of 10Hz	data sampling rate of 10Hz
Other cells	1) cell voltages and temperature in the same module 2) 2 series cells' voltages, temperature, and the module voltage in the adjacent modules 3) other modules' voltage 4) at least 4 temperatures which is farthest from the trigger target			



开始冒烟

0 min



剧烈冒烟

10 min



剧烈冒烟

15 min



开始冒烟

0 min



持续冒烟

10 min



剧烈冒烟

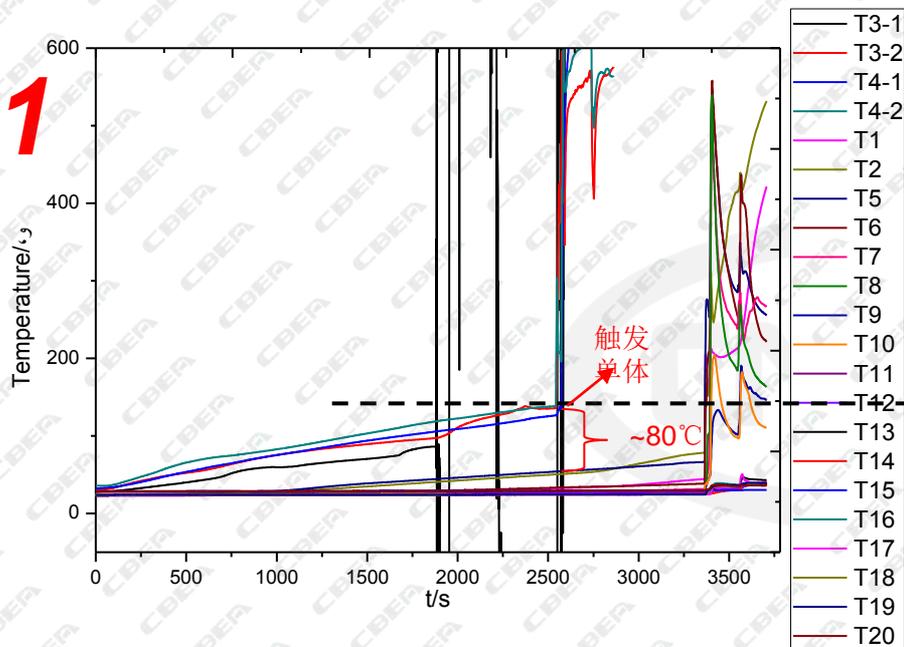
15 min



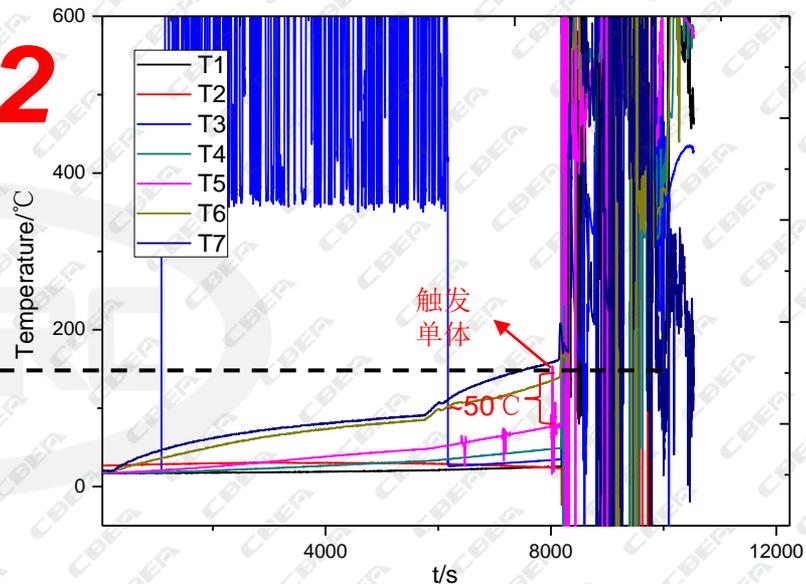
开始起火

36.5 min

1

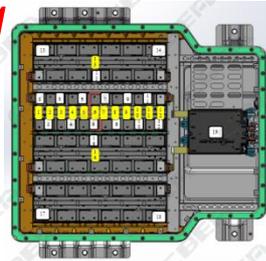


2

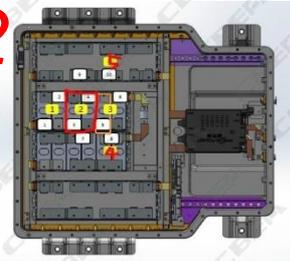


- 触发单体的热失控温度几乎相同；
- 对于加热时间更短样品1，其中电池间的温度梯度更大；
- 加热时间越短，对其他电池的影响越小。

1



2



---

*To Be Continued.....*

wangfang2011@catarc.ac.cn