文章编号：2097-5899(2025)06-0041-04　　**中图分类号**：U298　　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202407290001
引用格式：姚振坤，张辉. 锂电池测试标准与铁路运输工况差异分析及优化测试建议[J]. 铁路物流，2025，43(6)：41-44，51.
YAO Zhenkun，ZHANG Hui. Analysis of Differences between Lithium Battery Testing Standards and Railway Transportation Conditions and Optimization Suggestions[J]. Railway Logistics，2025，43(6)：41-44，51.

锂电池测试标准与铁路运输工况差异分析及优化测试建议

姚振坤[1]，张　辉[2]

(1. 中国国家铁路集团有限公司 货运部，北京　100844；2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081)

摘　要：锂电池测试标准是确保锂电池产品安全和运输安全的一项重要依据。现行锂电池测试标准主要为联合国关于危险货物运输的《试验和标准手册》第3部分第38.3节各项试验，属于国际通用测试标准，与我国铁路运输工况存在较大差异。为提出满足我国铁路运输工况的锂电池测试标准，辨识了锂电池的安全风险，梳理了锂电池现行的测试标准，对比分析了既有测试标准中温度、振动、冲击测试方法与铁路运输实际工况的差异性，提出了适应铁路运输工况的温度、振动、冲击测试方法优化建议，为我国开展锂电池铁路运输提供了技术支持，也可为制定锂电池铁路运输测试标准提供借鉴参考。

关键词：锂电池；测试标准；温度测试方法；振动测试方法；冲击测试方法

0　引言

随着新能源产业发展，我国已是锂电池主要的生产国之一，且近年来出货量保持高速增长的趋势，新能源汽车、锂电池、光伏产品已成为我国外贸出口“新三样”。2023年我国锂电池总产量超过940 GWh，动力锂电池675 GWh，占比超过70%。2023年我国动力锂电池占全球市场份额63.5%，宁德时代和比亚迪占据领先地位。2024年1—6月，我国锂离子电池累计出口约为73.7 GWh，其中动力锂电池占比为81%。与此同时，锂电池在生产、运输、使用过程中的安全问题也时有发生，虽然各生产企业都致力于不断提高产品的安全性，但未得到根本性的改善，锂电池的安全风险仍然不容忽视。

1　锂电池测试相关标准

1.1　锂电池的安全风险

锂电池属于第九类危险货物，其中含有的锂是元素周期表上排名第一的金属，也是最活泼的金属，在空气中极易与水、氧气等物质发生反应并引发燃烧。电池的电极由氧化物和炭黑等材料组成，是易燃材料。电解液主要成分为易燃液体，并且具有腐蚀性[1]。锂电池热失控会产生大量气体，存在着火灾、爆炸风险。锂电池燃烧、爆炸的主要原因是电池短路后发生热失控，产生短路的主要原因：一是电池产品设计缺陷、生产质量不良等内部原因；二是高温、跌落、碰撞、挤压、受潮等外部原因；三是过度充电、过度放电等使用原因[2]。

收稿日期：2024-07-29
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2022X010)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ157)

1.2　锂电池的测试标准

为了防控锂电池的安全风险，避免在运输环节发生安全问题，联合国危险货物运输专家分委员会(Transport of Dangerous Goods，TDG)发布的《试验和标准手册》第3部分第38.3节(以下简称“UN 38.3”)针对锂电池在运输过程中可能发生的情况设计了一系列安全性测试标准，是目前国际上通用的针对锂电池在运输过程中安全性的评估测试依据[3]。UN 38.3系列测试包括高度模拟、温度、振动、冲击等8个试验，其中与铁路运输工况相关的是温度试验、振动试验和冲击试验[3]。

2　锂电池测试标准与铁路运输工况差异性分析

UN38.3是目前国际上通用的锂电池运输安全测试依据，国内各运输行业也普遍采信该测试结果，但是其主要针对锂电池航空运输时的安全[4-5]。我国相关测试标准主要包括《锂原电池和蓄电池在运输中的安全要求》(GB 21966—2008)和《电动汽车用动力蓄电池安全要求》(GB 38031—2020)。考虑到我国铁路运输工况的特殊性，有必要对UN 38.3测试项目和我国相关标准进行研究，分析这些测试方法对铁路运输的适用性。

2.1　温度测试

2.1.1　UN 38.3温度测试要求

UN 38.3温度测试，是在极端、快速的温度变化条件下，对电池、电池组的密封完善性和内部的电连接状况进行的测试，测试温度最高为72±2 ℃。

2.1.2　我国标准中对温度测试要求

GB 21966第6.4.2条检验T-2：热冲击，采用温度循环的方法评价电池的整体密封性以及内部的电连接状况，检验温度最高为75 ℃。GB 38031对于电动汽车用动力锂电池的电池单体，要求进行25 ℃～－40 ℃～25 ℃～85 ℃～25 ℃温度循环试验，在最高温度85 ℃保持时间为110 min。

2.1.3　铁路运输温度工况

杨丽松等[6]研究危险货物集装箱内部温度，最高温度可达85 ℃。田润良等[7-8]研究了不同地区军用物资集装箱内部温湿度条件，得出海口、福州等高温地区集装箱内部最高温度为75 ℃，格尔木高海拔地区集装箱内部最高温度为65 ℃。江志墨[9]通过仿真模拟研究铁路集装箱运输动力锂电池的温度场，得出外部最高温度56 ℃时集装箱内动力锂电池包装表面最高温度为40.2 ℃。

2023年8月5—17日在吐鲁番进行了集装箱高温测试试验，测试结果为集装箱内最高温度达到69.1 ℃。基于吐鲁番采集的集装箱温度结果，通过COMSOL仿真模拟软件进行集装箱建模及温度场仿真模拟，模拟仿真结果显示，集装箱箱体最高温度值达到75.05 ℃。

2.1.4　对比分析结果

UN38.3温度测试的温度最大值为74 ℃，虽已超过集装箱内测试的最高温度69.1 ℃，但未达到集装箱内部最高温度范围75 ℃～85 ℃，也低于GB 21966和GB 38031的试验温度要求。GB 38031包含针对单体锂电池的加热试验：将锂电池放入温度箱，以5 ℃/min的速率由环境温度升至130 ℃，在此温度下保持30 min后停止加热；该标准的温度循环试验也将电池升温至85 ℃保持时间110 min。这2项试验温度可满足铁路运输最高温度要求，但均针对单体电池，不包括锂电池组。因此，既有温度测试方法不完全适用于我国铁路运输工况。

2.2　振动测试

2.2.1　UN 38.3振动测试要求

UN 38.3中的振动测试，采用正弦波形模拟运输过程中的振动[10]，振动频率为7～200 Hz。

2.2.2　我国标准中对振动测试要求

GB 21966振动检验是模拟航空运输过程中的振动，振动波形是正弦波形，对数频率为7～200 Hz。GB 38031中的振动测试是针对电动汽车用动力锂电池的电池包或系统，包括随机振动和正弦定频振动，振动频率为5～200 Hz。

2.2.3　铁路运输振动工况

列车正常运行、进出站、过道岔/钢轨缝隙/桥梁以及车体颤动、车辆蛇形运动会发生振动，其中蛇形运动是一个近似的纯正弦过程，其余振动多为平稳随机振动，振动频率主要集中在5～150 Hz之间。振动同时发生在垂向、横向、纵向3个方向，在列车正常运行时垂向加速度明显大于横向、纵向加速度，以钢轨接缝引发的货物垂直随机振动最为强烈。

2.2.4　对比分析结果

UN 38.3振动测试频率为7～200 Hz，其下限高于GB 38031和铁路实际工况的5 Hz。另外，UN 38.3振动测试波形是正弦波形，无法涵盖铁路实际工况中存在的随机振动。因此，UN38.3振动测试的振动频率下限和振动波形不完全适用于铁路运输工况。

2.3　冲击测试

2.3.1　UN38.3冲击测试要求

UN38.3冲击测试是评估电池和电池组对累积冲击效应的耐受程度，在3个互相垂直锂电池或锂电池组安装方位的正极、负极方向依次经受3次冲击，冲击波形

是半正弦波形[10]。

2.3.2　我国标准中对冲击测试要求

GB 21966 冲击试验与 UN38.3 冲击试验相同，主要模拟运输过程中的野蛮装卸。GB 38031 中的冲击测试是针对电动汽车用动力锂电池的电池包或系统进行机械冲击试验，冲击波形为半正弦波形，加速度 7 g，脉冲时间 6 ms。

2.3.3　铁路运输冲击工况

铁路运输过程中，车辆紧急制动时，货物受到的最大冲击加速度为 3～4 g；车辆急刹车时，货物受到的最大冲击加速度为 1.5～1.6 g；车辆减速时，货物受到的最大冲击加速度为 0.2～1.0 g；车辆一般启动和制动时，货物受到的最大冲击加速度为 0.1～0.5 g；车辆正常运行时，货物受到的最大冲击加速度为 0.1～0.6 g。

2.3.4　对比分析结果

UN38.3 冲击测试的目的是评估锂电池和锂电池组对累积冲击效应的耐受程度，不能完全反映铁路运输中列车的运动状态发生急剧变化(突然起动、紧急制动等)、摘挂调车、解编或编组等工况，而且相比 GB 38031 缺少机械冲击测试。所以 UN38.3 冲击测试不能完全适用于铁路运输工况。

3　优化锂电池测试标准的建议

如果通过铁路运输锂电池，建议在 UN38.3 的基础上，结合铁路运输实际工况，优化温度、振动、冲击相关测试内容，以确保锂电池铁路运输安全。

3.1　温度测试优化建议

考虑铁路运输工况的特殊性，建议对单体电池或电池组进行高温存放测试：将单体电池或电池组放入温度箱内，以一定的温升速率升至 85 ℃，并在此温度下保持一段时间，温度箱自然冷却至室温后观察 1 h，单体电池或电池组不发生渗漏、排气、解体、破裂和起火现象。此外，锂电池铁路运输过程中也可采用具有一定阻燃隔热或恒温功能的载运工具，避免运输过程中载运工具内部温度过高。

3.2　振动测试优化建议

3.2.1　振动测试优化依据

铁路运输过程的振动工况既包含随机振动，也包含正弦振动，发生共振的频率在 5 Hz 左右。《包装 运输包装件基本试验 第 23 部分：垂直随机振动试验方法》(GB/T 4857.23—2021)、《包装 运输包装件基本试验 第 10 部分：正弦变频振动试验方法》(GB/T 4857.10—2005)、《包装 运输包装件基本试验 第 7 部分：正弦定频振动试验方法》(GB/T 4857.7—2005)分别适用于评定运输包装件或单元货物在垂直振动、正弦变频振动或共振情况下、正弦定频振动情况下的强度及包装对内装物的保护能力，基本涵盖铁路运输过程中的振动、冲击工况。

建议借鉴《包装 运输包装件基本试验》(GB/T 4857 系列)中垂直随机振动、正弦变频振动、正弦定频振动相关试验方法，对锂电池组或单体电池补充进行垂直随机振动测试、正弦变频振动测试和正弦定频振动测试，模拟铁路运输过程中的振动工况。

3.2.2　垂直随机振动

参照 GB/T 4857.23 中试验样品放置、固定要求和加载程序，进行测试前准备。试验持续时间和功率谱密度曲线可选择 GB/T 4857.23 附录 D.2 或已掌握的铁路谱，附录 D.2 京沪铁路功率谱密度(PSD)数据表如表 1 所示。频率范围为 3～200 Hz，加速度均方根值应不超过规定值的 15%，功率谱密度偏差应不超过全部试验频率范围 ±3 dB。

表 1　京沪铁路功率谱密度(PSD)数据表

Tab.1　PSD data sheet for Beijing–Shanghai Railway

频率/Hz	功率谱密度/（g^2/Hz）
1	0.000 003
2	0.000 3
5	0.000 2
8	0.000 1
10	0.000 3
12	0.000 065
15	0.000 06
20	0.000 02
25	0.000 06
30	0.000 03
45	0.000 12
60	0.000 04
90	0.000 025
200	0.000 001

注：加速度均方根为 0.08 g rms。

3.2.3　正弦变频振动

参照 GB/T 4857.10 中试验方法，放置、固定试验样品，如需加载负载，按《包装 运输包装件基本试验 第 3 部分：静载荷堆码试验方法》(GB/T 4857.3—2008)加载程序添加负载，选择 GB/T 4857.10 中试验方法 A 或方法 B。振动持续时间由产品标准根据运输环

境条件的具体情况规定。若未规定时，推荐：①扫频试验：3 Hz～100 Hz～3 Hz，重复2次。②共振试验：在共振频率上停留15 min。

3.2.4　正弦定频振动

参照GB/T 4857.7中试验方法，放置、固定试验样品，如需加载负载，按GB/T 4857.3加载程序添加负载，选择GB/T 4857.10中试验方法A或方法B。初始振动频率为2 Hz，逐渐提高频率，直至试验样品与振动台即将分离为止。

3.2.5　判定方法

试验对象未发生渗漏、排气、解体、破裂和起火现象，则判定为试验通过。

3.3　冲击测试优化建议

铁路集装箱运输时，集装箱底角件与车辆锁闭装置锁紧，箱体与箱内货物随车辆运动。当车辆紧急制动或调车冲击连挂时，箱体及箱内货物将受到较大的冲击力，若箱内货物装载加固不牢，可能导致箱内货物发生滑动、位移，导致包装破损、货物损坏[11-12]。因此，锂电池铁路运输应根据铁路运输工况制定箱内货物装载加固方案，锂电池包装件应能承受一定程度的冲击力。

《包装 运输包装件基本试验 第11部分：水平冲击试验方法》(GB/T 4857.11—2005)可以用于评定受到水平冲击时，运输包装件和单元货物的耐冲击强度，以及包装对内装货物的保护能力。建议借鉴GB/T 4857.11相关要求，补充进行冲击测试。

参照GB/T 4857.11中试验方法，放置、固定试验样品，设置冲击面与挡板冲击面之间夹角，分别以1 m/s，1.5 m/s，2 m/s冲击速度进行面冲击、棱冲击和角冲击，冲击速度误差控制在±5%以内。试验对象未发生渗漏、排气、解体、破裂和起火现象，则判定为试验通过。

4　结束语

锂电池是工业产品，又是高能量密度载体，其产品质量与安全性直接相关，发生安全问题后造成的损失和影响非常大，所以开展锂电池产品的测试至关重要，不仅是检验锂电池自身产品质量的有效方法，也为运输提供安全技术保障。UN38.3测试方法主要是针对航空运输，未能涵盖我国铁路运输中的复杂工况。如果要通过铁路运输锂电池，温度、振动、冲击相关测试方法应结合铁路实际工况进行优化，通过优化测试确定锂电池是否适应铁路运输，以确保锂电池铁路运输安全。

参考文献：

[1] 李晟东，吕红霞. 锂电池铁路运输风险研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2017，15(1)：89-94，106.
LI Shengdong，LYU Hongxia. Risk Research of Lithium Battery Transportation by Railway[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2017，15(1)：89-94，106.

[2] 王思佳. 关于开展锂电池铁路运输的研究与思考[J]. 郑铁科技，2019 (1)：7-8，14.

[3] 联合国危险货物运输专家分委员会. 联合国关于危险货物运输的建议书 试验和标准手册[S]. 日内瓦：联合国，2019：418-430.

[4] 徐思文雨，何鹏林，王晓冬，等. UN38.3对于锂电池铁路运输的适用性研究[J]. 中国标准化，2021(15)：5.
XU Siwenyu，HE Penglin，WANG Xiaodong，et al. Applicability Research on UN 38.3 for Railway Transport of Lithium Battery[J]. China Standardization，2021(15)：5.

[5] 程东浩，刘振东，荀立强. 动力锂离子电池运输安全性探讨[J]. 电池，2020，50(2)：172-176.
CHENG Donghao，LIU Zhendong，XUN Liqiang. Discuss on Safety of Power Li-ion Battery Transport[J]. Battery Bimonthly，2020，50(2)：172-176.

[6] 杨丽松，张占华，吴育俭. 危险货物集装箱内部最高温度及进箱条件的确定[J]. 集装箱化，2000，11(7)：21-25

[7] 田润良，赵世宜，周继强. 高温高湿地区集装箱内部温湿度环境条件研究[J]. 装备环境工程，2005，2(4)：28-31.
TIAN Runliang，ZHAO Shiyi，ZHOU Jiqiang. Research on Environmental Conditions of Temperature and Humidity inside the Container in High Temperature and High Humidity Areas[J]. Equipment Environmental Engineering，2005，2(4)：28-31.

[8] 田润良，赵世宜. 格尔木地区集装箱内部温度-湿度条件研究[J]. 环境技术，2004，22(5)：3-6.
TIAN Runliang，ZHAO Shiyi. The Research of Temperature and Humidity Conditions Inside Container in Golmud Areas[J]. Environmental Technology，2004，22(5)：3-6.

[9] 江志墨. 铁路运输动力锂电池的温度场仿真研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[10] 孙晓娜，孙朝蓉，韩思远，等. 电动汽车用锂离子动力蓄电池UN38.3认证检测研究[J]. 汽车科技，2023(3)：28-31.
SUN Xiaona，SUN Chaorong，HAN Siyuan，et al. Research of UN 38.3 Certification Testing for Electric Vehicle Traction Battery[J]. Automobile Science & Technology，2023(3)：28-31.

[11] 殷　涛. 铁路罐式集装箱运输冲击试验方法研究[J]. 铁道货运，2019，37(4)：49-53.
YIN Tao. A Study on the Methodology of Impact Tests for Railway Tank Container Transportation[J]. Railway Freight Transport，2019，37(4)：49-53.

[12] 杨　磊，李春丽. 铁路集装箱运输货损原因分析及对策探讨[J]. 铁道货运，2019，37(5)：40-43.
YANG Lei，LI Chunli. A Study on the Reasons and Prevention Measures of Cargo Damage by Railway Container Transportation[J]. Railway Freight Transport，2019，37(5)：40-43.

（责任编辑：吴文娟）

（下转第51页）