

引用格式: 樊阳波,邱志平,许聪,等.锂离子电池用纳米硅负极材料技术规格标准研究[J].标准科学,2026(1):80–86.
FAN Yangbo, QIU Zhiping, XU Cong, et al. Research on Technical Specifications for Silicon Nanosized Materials for the Negative Electrode of Lithium-ion Batteries [J]. Standard Science, 2026 (1) : 80–86.

锂离子电池用纳米硅负极材料技术规格标准研究

樊阳波^{1*} 邱志平² 许 聪¹ 王益群¹ 李子坤³

(1.深圳市标准技术研究院; 2.深圳市贝特瑞新能源技术研究院有限公司; 3.贝特瑞新材料集团股份有限公司)

摘要:【目的】对国际标准IEC TS 62565-5-3:2025进行研究和解读,推动该标准的实施应用,从而促进纳米硅负极材料的规模化生产和商业化推广。【方法】对该标准进行详细的梳理和解读,系统地列出标准中规定的纳米硅负极材料在物理、化学、电化学和结构等方面的关键控制特性指标及其对应的测试标准,以矩阵形式对各关键控制特性的现有测试方法的标准成熟度水平进行梳理、汇总和分析。【结果】阐述了该标准构建的用于锂离子电池负极的纳米硅材料的关键控制特性体系及测试方法,并列出了纳米硅负极材料的31项关键控制特性指标及其测试标准,为材料的生产和质量控制提供了清晰、全面的技术依据。通过矩阵分析,清晰地呈现了当前各关键控制特性测试方法的标准成熟度水平现状。【结论】IEC TS 62565-5-3:2025将为纳米硅负极材料的规范化发展奠定了重要基础。此外,基于该标准,本文为进一步拓展和完善纳米硅负极材料的标准化工作提出了后续建议,以持续推动该领域的科技进步和产业发展。

关键词: 锂离子电池;负极材料;纳米硅;标准化

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2026.01.011

Research on Technical Specifications for Silicon Nanosized Materials for the Negative Electrode of Lithium-ion Batteries

FAN Yangbo^{1*} QIU Zhiping² XU Cong¹ WANG Yiqun¹ LI Zikun³

(1. Shenzhen Institute of Standard and Technology; 2. Shenzhen BTR New Energy Technology Institute Co., Ltd.;
3.BTR New Material Group Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] This paper focuses on the study and interpretation of IEC TS 62565-5-3:2025, with the objective of facilitating its practical implementation and promoting the large-scale production and commercial adoption of silicon nanosized anode materials. [Methods] A systematic analysis and detailed interpretation of the standard are conducted. The study explicitly lists 31 key control characteristics—encompassing physical, chemical, electrochemical, and structural aspects—along with their corresponding test methods. Furthermore, a maturity matrix is employed to assess

基金项目: 本文受“十四五”国家重点研发计划项目“规模纳米材料重要技术规格标准研制”(课题编号:2022YFF0609802)资助。

作者简介: 樊阳波,通信作者,博士,高级工程师,研究方向为新材料领域标准化。

邱志平,硕士,工程师,研究方向为新材料科技成果转化和标准化。

许聪,硕士,研究助理,研究方向为新材料领域标准化。

王益群,博士,正高级工程师,研究方向为国际标准化。

李子坤,博士,正高级工程师,研究方向为新能源与新材料。

and summarize the standardization readiness of existing test methods for each key characteristic. [Results] IEC TS 62565-5-3:2025 represents the first comprehensive framework establishing key control characteristics and measurement methods for silicon nanosized anode materials in lithium-ion batteries. This paper clearly identifies and organizes all 31 indicators and associated test standards, providing an essential technical foundation for material production and quality control. The maturity matrix offers a clear visual representation of the current standardization status of test methods for each characteristic. [Conclusion] This paper demonstrates that IEC TS 62565-5-3:2025 lays a crucial foundation for the standardized development of silicon nanosized anode materials. Based on the analysis, this paper provides constructive recommendations for future standardization efforts aimed at further advancing and refining the framework for these materials, thereby supporting continued technological progress and industrial development in the field.

Keywords: lithium-ion batteries; negative electrode materials; silicon nanosized materials; standardization

0 引言

全球新能源汽车产业的高速发展对电池能量密度提出更高要求, 硅基负极材料凭借其理论比容量($4200 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$)^[1-3]超过传统石墨负极材料10倍的显著优势, 已成为新一代高性能锂电池的核心解决方案。然而, 硅在锂化时严重的体积效应是硅基材料商业化的最大限制^[4-6]。已有大量工作致力于解决这一问题, 其关键突破在于纳米硅负极材料独特的纳米结构。该结构在锂化过程中能有效缓解硅基材料的体积膨胀问题, 通过均匀分散应力显著提升电池循环稳定性和使用寿命, 同时其优异的导电性与导热性不仅增强了电池输出功率及充放电效率, 更通过降低工作温升大幅提高了电池使用安全性^[7-9]。

2025年4月16日, IEC/TC 113 Nanotechnology for electrotechnical products and systems(电工产品与系统的纳米技术委员会)发布IEC TS 62565-5-3:2025 Nanomanufacturing - Product specification - Part 5-3: Nanoenabled energy storage - Blank detail specification: silicon nanosized materials for the negative electrode of lithium-ion batteries(纳米制造-产品规范—第5-3部分: 纳米储能—空白详细规范: 锂离子电池负极用纳米硅材料)。该标准构建了锂离子电池负极用纳米硅材料的关键控制特性(简称KCC)体系^[10], 并明确了相应的测试方法, 填补了该领域的国际标准空白。

该标准列出了显著影响纳米硅负极材料性能的物理、化学、电化学、结构关键控制特性指标及其测试标准, 为开发、生产、销售纳米硅负极材料及相关硅基负极材料提供重要参考, 也为后续制定纳米硅负极材料及相关硅基负极材料表征和测量国际标准提供指引。本文对该标准进行研究解读, 以期促进纳米硅负极材料的规模化生产和应用。

1 纳米硅关键控制特性及其测试标准

电极材料的性能是影响电池性能的关键。例如, 纳米硅负极材料的真密度、松装密度、振实密度、压实密度等物理性质, 直接影响材料的加工性能和电池的能量密度。粉末电导率直接影响电子在材料中的传输效率, 从而影响电池的充放电性能。粒度分布、颗粒形貌等特性决定了材料的比表面积和反应活性, 对电池的化学反应速率有重要影响。同时, 硅含量、碳含量等化学成分的控制是保证纳米硅负极材料纯度和电化学性能稳定的关键因素; 水分、硫含量、金属杂质、磁性杂质等杂质的控制, 则对防止电池内部短路、自放电等问题至关重要。此外, 原子氧化态等化学性质的研究有助于深入研究纳米硅负极材料的反应机理, 并为其性能优化提供理论支持。放电比容量、倍率性能、库仑效率、循环性能等电化学性能指标, 直接反映了纳米硅负极材料在锂离子电池中

的实际应用效果,是决定电动汽车续航里程、电池寿命的关键因素。因此,深入研究这些关键控制特性,对提升纳米硅负极材料的性能,推动锂离子电池技术的进步进而满足电动汽车等领域对高性能电池的需求,具有十分重要的理论和实践意义。

1.1 物理关键控制特性

本标准列出了纳米硅材料的松装密度、振实密度、压实密度、真密度、粉末电导率、粒径分布、颗粒形貌、燃点等物理关键控制特性(见表1),并列出对应的测试方法,各项测试方法均有相应的ISO和IEC国际标准规范操作。通过细化各物理关键控制特性的规格、测试方法及标准,为其检

测与控制提供技术指引,确保产品物理性能的一致性与可追溯性,助力相关方在物理特性管控上达成统一,规范生产与检测流程,提升产品质量与可靠性。

1.2 化学关键控制特性

本标准列出了硅含量、碳含量、氧含量、水分含量、硫含量、金属杂质含量、磁性杂质含量、无定形度、化学态、pH值等化学关键控制特性(见表2)。每个特性均规定了单位、测试方法及测试标准,确保检测的科学性与规范性。通过统一测试方法和测试标准,保障了数据的准确性、可比性,为产品质量管控提供了量化依据。例如,硅、碳含量采用标注公差的方式,氧、硫、水分、金属及磁

表1 物理关键控制特性的格式

序号	关键控制特性	规格	单位	测试方法	测试标准
1	松装密度	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	振荡漏斗法	ISO 3923-1:2018
2	振实密度	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	振实密度仪	ISO 3953:2011
3	压实密度	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	粉末压实法	IEC TS 62607-4-2:2016
4	真密度	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	气体置换法	ISO 12154:2014
5	粉末电导率	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	四探针法	IEC TS 62607-6-1:2020
6	粒径分布	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	激光衍射法	ISO 13320:2020
7	颗粒形貌	图像	/	扫描电子显微镜	ISO 19749:2021
8	燃点	标称[] ± 公差[]	g/cm ³	差示扫描量热法	ISO 11357-5:2013

表2 化学关键控制特性的格式

序号	关键控制特性	规格	单位	测试方法	测试标准
1	硅含量	标称[] ± 公差[]	%	X射线荧光光谱法	ISO 9516-1:2003
2	碳含量	标称[] ± 公差[]	%	高频燃烧红外吸收光谱法	ISO 15350:2000
3	氧含量	小于[]	%	惰性气体熔融红外检测法	ISO 17053:2005
4	水分含量	小于[]	%	卡尔费休库仑法	IEC TS 62607-4-8:2020
5	硫含量	小于[]	mg/kg	电感耦合等离子体发射光谱法	ISO 22036:2024
6	金属杂质含量	小于[]	mg/kg	电感耦合等离子体原子发射光谱法	ISO 15202-3:2004
7	磁性杂质含量	小于[]	mg/kg	电感耦合等离子体发射光谱法	IEC TS 62607-4-7:2018
8	无定形度	标称[] ± 公差[]	%	拉曼光谱法	无可用标准
9	化学态	标称[] ± 公差[]	%	X射线光电子能谱法	无可用标准
10	pH值	标称[] ± 公差[]		电位滴定法	ISO 9366-1:2017

性杂质含量设定上限值,无定形度、化学态等特性虽无通用标准,但规定了检测方法(如拉曼光谱法、X射线光电子能谱法),确保特性描述的完整性。

1.3 电化学关键控制特性

本标准列出了放电比容量、倍率性能、库仑效率、循环性能、阻抗、电化学膨胀率等电化学关键控制特性(见表3)。各特性规格以公差标注(如放电比容量、倍率性能等)或上限值(如电化学膨胀率)呈现,测试方法采用扣式电池法(适用于电性能测试)、电化学阻抗谱(测电池阻抗)、膨胀法(测膨胀率),确保检测的一致性与针对性。尽管多数特性无可参考的ISO或IEC标准,但本标准给出了参考流程,在无成熟国际标准的情况下,仍可为电化学特性评估奠定基础,提升产品研发与生产的可操作性。

1.4 结构关键控制特性

本标准列出了孔径分布、孔隙率、比表面积、

晶格间距、晶体结构、元素分布图、横截面图像等关键控制特性(见表4)。其中,孔径分布(nm)、孔隙率(%)、比表面积(m^2/g)3项量化参数采用“标称值±公差”形式明确技术指标,检测方法对应气体吸附法、压汞法和BET法,遵循ISO 15901、ISO 9277等现行国际标准;而晶格间距、晶体结构、元素分布图及横截面图4项图像化特性以可视化图像为判定依据,通过TEM、XRD、EDS、SEM等显微技术检测,遵循ISO/TS 10797、EN 13925等现行标准。通过量化参数精确控制与图像特性可视化验证的双轨机制,构建了基于ISO、EN等权威标准的技术溯源体系,为产品结构一致性与供应链协同提供了标准化保障。

2 纳米硅测试方法标准化矩阵

本标准给出了纳米硅负极材料关键控制特性的表征技术与测试方法。图1以矩阵形式汇总了目

表3 电化学关键控制特性的格式

序号	关键控制特性	规格	单位	测试方法	测试标准
1	放电比容量	标称[] ± 公差[]	mA·h/g	扣式电池法	无可用标准
2	倍率性能	标称[] ± 公差[]	%	扣式电池法	无可用标准
3	库仑效率	标称[] ± 公差[]	%	扣式电池法	无可用标准
4	循环性能	标称[] ± 公差[]	%	扣式电池法	无可用标准
5	阻抗	标称[] ± 公差[]	Ω	电化学阻抗谱(EIS)	无可用标准
6	电化学膨胀率	小于[]	-	膨胀法	无可用标准

表4 结构关键控制特性的格式

序号	关键控制特性	规格	单位	测试方法	测试标准
1	孔径分布	标称[] ± 公差[]	nm	气体吸附法(GA)	ISO 15901-2:2022
2	孔隙率	标称[] ± 公差[]	%	压汞法	ISO 15901-1:2016
3	比表面积	标称[] ± 公差[]	m^2/g	BET法	ISO 9277:2022
4	晶格间距	图像	-	透射电子显微镜	ISO/TS 10797:2012
5	晶体结构	图像	-	X射线衍射	EN 13925-2:2003
6	元素分布图	图像	-	能量色散X射线光谱仪	ISO 15632:2021
7	横截面图像	图像	-	扫描电子显微镜	ISO 20720:2018

前各关键控制特性测试方法的标准成熟度水平(SML)。按照IEC/TS 62565-1: 2023, 标准成熟度水平(SML)可划分为4种类型:

(1) SML1: 目前还没有标准化的测试方法,但是技术团体已经就指定KCC的必要性达成了共识。此外,也没有良好实践指南(GPG)。这是业界共识度最低的情况,交付过程中的相关方需自行确定应对方式。例如,通过向规范中添加商定的标准作业程序(SOP),SOP应在附录中列出。

(2) SML2: 目前还没有标准化的测试方法,但是技术团体已就明确关键控制特性KCC的必要性达成了共识。但有利益相关方制定的良好实践指南(GPG)可作为测量的依据,GPG应作为附录中的条款附于文件中。

(3) SML3: 有相关标准化的测试方法,该方法原本用于其他材料或其他应用,可针对纳米材料的使用情形进行调整,但可能尚未经过验证。在此种情况下,该方法应于附录中说明应如何采用该标准。

(4) SML4: 有可用的标准化的测试方法,并且完全适用于本材料或本应用中。

3 纳米硅标准化工作建议

结合IEC TS 62565-5-3:2025对各关键控制特性标准成熟水平的矩阵,提出以下标准化工作建议。

(1) 部分标准缺失,亟待完善。作为电极材料使用的纳米硅负极材料,电化学特性直接影响其应用。例如,放电比容量对电池组的最大能量存储能力具有重要影响,倍率性能是影响其作为电动汽车能量载体的重要特性,库仑效率是影响电池循环性能的关键因素,循环性能决定了其在长期充放电过程中的稳定性,电池阻抗是衡量电流在电池内部传输受阻程度的关键参数;此外,作为负极的纳米硅材料在嵌锂和脱锂过程中的体积变化是巨大的,电化学膨胀率也是衡量纳米硅负极材料性能的关键参数之一。然而,目前相关测试标准

均为缺失状态,亟待制定相关标准,完善纳米硅标准技术体系。

(2) 部分标准需做针对性调整,建议必要时制定相关技术规范。松装密度、压实密度、粉末电导率、粒径分布、燃点、硅含量、pH值、孔径分布等特性可参考相关测试方法标准进行测试,但在预处理、实验器具规格、仪器参数等方面需针对纳米硅负极材料进行调整。例如,松装密度参考的ISO 3923-1:2018是针对金属粉末的松装密度测试方法,需对振荡漏斗的振动频率、振幅、时间、方向等进行调整,还需对圆柱形量杯的尺寸和容量,以及支架的位置进行调整。因此,建议进一步结合试验验证和相关技术的发展,适时制定相关针对性测试技术规范。

(3) 探索制定详细规范。空白详细规范(Blank detail specification)属于产品标准的一种类型,它是用来指导编写详细规范的一种格式;在空白详细规范中填入具体产品的特定要求时,即成为详细规范。空白详细规范通常适用于电子元器件领域,IEC/TC 113将其定义为描述特定纳米产品所需的一组关键控制特性的结构化通用规范,不需要指定特定的值和/或属性。其中,空白详细规范中定义的模板列出了纳米材料或产品的关键控制特性,但未赋予其特定值。空白详细规范通过规范材料或产品的关键特性的控制指标、测试方法及参考标准,为工业用户编制双边采购合同时所用的详细规格提供系统框架参考,而详细规范(Detail specification)是一种完整规定某一种产品或一个系列产品的标准,可发挥更大的作用。建议针对成熟产品探索制定详细规范,进一步明确技术指标、指导市场。

4 展望

研究机构EVTank、伊维经济研究院和中国电池产业研究院共同发布的《中国锂离子电池负极材料行业发展白皮书(2025年)》数据显示,2024年全球负极材料出货量达到220.6万吨,中国作

Key control characteristic (KCC)		Measurement methods												
		Coin cell method	EIS	Not available	Not available	Expansion method	Not available	Raman spectroscopy	Not available	XPS	Not available	ISO 5516-1:2003	ISO 15350:2000	ISO 17053:2008
Electro-chemical KCC	Specific discharge capacity	1								KFC	IEC TS 62607-4-8:2020	ISO 22036:2024	ISO 15202-3:2004	
	Rate capability	1								ICP-OES				
	Coulombic efficiency	1								ICP-AES				
	Cycle performance	1								ICP-OES	IEC TS 62607-4-7:2018			
	Impedance	1								Potentiometry	ISO 19396-1:2017			
	Electrochemical expansion ratio	1								Oscillating funnel	ISO 3923-1:2018			
Chemical KCC	Amorphous degree		2							Powder compaction method	IEC TS 62607-4-2:2016			
	Chemical state of an atom			2						Four-point probe	IEC TS 62607-6-1:2020			
	Silicon content				3					LD	ISO 13320:2020			
	Carbon content					4				Tapping apparatus	ISO 3963:2011			
	Oxygen content						4			GD	ISO 12154:2014			
	Water content							4		SEM	ISO 19749:2021			
	Sulfur content									DSC	ISO 11357-5:2013			
	Metallic impurities									GA	ISO 15901-2:2022			
	Magnetic impurities									MP	ISO 15901-1-2016			
Physical KCC	pH value									BET	ISO 9277:2022			
	Apparent density									TEM	ISO/TS 10797:2012			
	Compacted density									XRD	EN 13925-2:2003			
	Powder conductivity									EDS	ISO 15632:2021			
	Particle size distribution									SEM	ISO 20720:2018			
	Tap density													

图1 纳米硅测试方法标准化矩阵

为该领域最大的生产国, 全球占比进一步提升至95.9%。其中, 以硅基负极为代表的新型负极材料全球市场占有超60%, 且随着电池新技术的规模化应用, 硅基负极材料的需求将持续提升。据中商产业研究院预测, 2025年全球硅基负极材料

行业市场规模将达到300亿元。IEC TS 62565-5-3:2025为纳米硅负极材料的供应双方提供了详细规格系统框架参考, 将促进供需双方在技术层面达成共识, 增强产业链的稳定性和可靠性, 助力硅基负极材料行业高质量发展。

参考文献

- [1] RUFFO R,HONG S S, CHAN C K, et al. Impedance analysis of silicon nanowire lithium ion battery anodes[J]. The Journal of Physical Chemistry C,2009,113(26): 11390–11398.
- [2] LI X H,WU M Q,FENG T T, et al.Graphene enhanced silicon/carbon composite as anode for high performance lithium-ion batteries[J]. RSC Advances,2007,7(76):48286–48293.
- [3] WANG Y X, GOU J, ZHANG H Z, et al. Ni-P-SBR composite-electroless-plating enables Si anode with high conductivity and elasticity for high performance Li-ion batteries application[J]. Journal of Energy Chemistry,2023, 32(76):59–66.
- [4] MU G, WU B R, MA C W, et al. Dynamics analysis of Si electrode particle size effect employing accurate Si model[J] Electrochimica Acta,2021, 63(377):138110.
- [5] SCHMIDT H, JERLIU B, HUGER E, et al. Volume expansion of amorphous silicon electrodes during potentiostatic lithiation of Li-ion batteries[J]. Electrochemistry Communications,2020,22(115): 106738.
- [6] WU H,CUI Y. Designing nanostructured Si anodes for high energy lithium ion batteries[J].NANO TODAY,2012,7(5):414–429.
- [7] RYU I,CHOI J W, CUI Y, et al. Size-dependent fracture of Si nanowire battery anodes[J]. J. Mech. Phys. Solids,2011,59(9):1717–1730.
- [8] LIN D C,LU Z D, HSU P C, et al. A high tap density secondary silicon particle anode fabricated by scalable mechanical pressing for lithiumion batteries[J]. Energy Environ. Sci,2015,8,2371–2376.
- [9] DAI F,YI R, YANG H,et al. Minimized Volume Expansion in Hierarchical Porous Silicon upon Lithiation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2019,11(14),13257–13263.
- [10] IEC. Nanomanufacturing – Product specification – Part 5–3: Nanoenabled energy storage – Blank detail specification: silicon nanosized materials for the negative electrode of lithium-ion batteries:IEC TS 62565–5–3:2025[S],2025.