金属锰粉悬浮氧化法制备锂电池用 Mn_3O_4 的研究①

苏有权[1]，张妮[1]，薛兴勇[1]，蓝丽红[1]，卢彦越[1]，阮籍[2]，闫冠杰[2]，韩要丛[1]
（1.广西民族大学 化学化工学院，广西多糖材料与改性重点实验室，广西 南宁 530006；2.南方锰业集团有限责任公司，广西 南宁 530000）

摘　要： 采用金属锰粉悬浮氧化法制备了锂离子电池用 Mn_3O_4，探究了氯化铵浓度、氨水浓度、固液比、反应温度、空气流量以及搅拌速率等实验条件对 Mn_3O_4 粒径和振实密度的影响。结果表明，在不加氨水、氯化铵浓度 6 g/L、固液比 0.3∶1、反应温度 70 ℃、空气流量 700 mL/min、搅拌速率 400 r/min 条件下，制备的产品为尖晶石型 Mn_3O_4，颗粒为类球形，D_{50} 粒径为 9.69 μm，振实密度为 2.82 g/cm^3，比表面积为 0.399 m^2/g，锰含量为 71.5%，S、Fe、Ca 等杂质元素含量均满足《锂电池用四氧化三锰》（YB/T 4736—2019）行业标准要求。

关键词： 悬浮氧化法；四氧化三锰；电解金属锰；锂离子电池；锰酸锂；尖晶石型
中图分类号： TF123.2；TD982　　**文献标志码：** A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.029
文章编号： 0253-6099（2026）03-0199-05

Preparation of Mn_3O_4 for Lithium Batteries by Suspension Oxidation of Manganese Metal Powder

SU Youquan[1], ZHANG Ni[1], XUE Xingyong[1], LAN Lihong[1], LU Yanyue[1], RUAN Ji[2], YAN Guanjie[2], HAN Yaocong[1]
(1.*Guangxi Key Laboratory of Polysaccharide Materials and Modification*, *School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Guangxi Minzu University*, *Nanning* 530006, *Guangxi*, *China*; 2.*Southern Manganese Industry Group Co.*, *Ltd.*, *Nanning* 530000, *Guangxi*, *China*)

Abstract: Mn_3O_4 for lithium-ion batteries was synthesized by suspension oxidation using metallic manganese powder. The effects of experimental conditions, including ammonium chloride concentration, ammonia concentration, solid-liquid ratio, reaction temperature, air flow rate and stirring speed, on the particle size and tap density of Mn_3O_4 were investigated. The results show that under the optimal conditions, including ammonium chloride concentration of 6 g/L, solid-liquid ratio of 0.3∶1, reaction temperature of 70 ℃, air flow rate of 700 mL/min, and stirring speed of 400 r/min, the as-prepared product is spinel-type Mn_3O_4 with quasi-spherical particles, which has a D_{50} particle size of 9.69 μm, tap density of 2.82 g/cm^3, specific surface area of 0.399 m^2/g, and manganese content of 71.5%. The contents of impurity elements such as S, Fe and Ca therein all meet the requirements in Manganese Tetroxide for Lithium Batteries (YB/T 4736—2019).

Key words: suspension oxidation; Mn_3O_4; electrolytic manganese metal; lithium-ion battery; lithium manganate; spinel

锂离子电池因其能源转换效率高、能量密度高和循环寿命长，已成为当今储能技术的核心载体，并持续推动着世界能源转型进程[1-3]。尖晶石型锰酸锂（$LiMn_2O_4$）具有工作电压较高、理论能量密度较高、成本低、资源丰富、对环境友好等优势，是一种极具应用前景的锂离子电池正极材料[4-6]。合成 $LiMn_2O_4$ 的常用锰源有 MnO_2、Mn_2O_3 和 Mn_3O_4 等锰氧化物[7-11]。其中，Mn_3O_4 已逐渐成为行业主流选择。Mn_3O_4 和 $LiMn_2O_4$ 具有相同的 Fd3m 立方尖晶石结构，用 Mn_3O_4 合成 $LiMn_2O_4$ 过程中不需要破坏原有的晶格骨架，晶

① **收稿日期：** 2025-11-21
基金项目： 广西科技重大专项（桂科 AA24263051）；来宾市科学研究与技术开发计划项目（来科攻 220808）；广西民族大学自治区级大学生创新训练计划项目（S202410608333）
作者简介： 苏有权（1999—），男，安徽宿州人，硕士研究生，主要研究方向为锰系新能源材料。E-mail：774671750@qq.com
通信作者： 闫冠杰（1984—），男，河南漯河人，高级工程师，主要研究方向为锰系新能源材料。E-mail：yanguanjie@southmn.com

体缺陷较少,可显著提升 $LiMn_2O_4$ 的放电容量、倍率性能及高温稳定性。

制备 Mn_3O_4 的主要方法有金属锰粉悬浮氧化法、锰盐法以及高温焙烧还原法等,其中金属锰粉悬浮氧化法因工艺简单、条件温和、产品纯度高且粒径分布易调控等优点备受关注。本文采用金属锰粉悬浮氧化法制备 Mn_3O_4,通过优化工艺条件系统调控产品的粒径、振实密度和表面形貌,以期开发一种高纯、高振实密度的 Mn_3O_4 制备工艺,满足高性能锂离子电池对锰源的严苛要求。

1 实验

1.1 实验原料及设备

主要实验原料包括电解金属锰粉(75~250 μm)和氯化铵(分析纯)。

主要实验设备包括电动搅拌器(S123-120W)、智能恒温水浴锅(HH-WO-3L)、pH 计(PHS-3S)、电子天平(YP402N)、玻璃转子流量计(LZB-3WB)、循环水式多用真空泵(SHB-DIII)、电热鼓风干燥箱(DHG-9146A)。

1.2 Mn_3O_4 的制备

于 1 000 mL 带有挡板的玻璃反应器中加入 600 mL去离子水,将反应器放入水浴锅中升温至一定温度,向反应器中加入一定质量的氯化铵,并加入一定体积的 3 mol/L 氨水,设定搅拌速率 300~500 r/min,然后称取一定质量的电解金属锰粉一次性加至反应器中,并不断向反应器中通入一定体积流量的空气作为氧化剂,继续保温搅拌,直至溶液 pH 值降至 6.5 左右。反应结束后陈化 2 h,经抽滤、洗涤后将滤饼放入 100 ℃烘箱干燥 8 h,研磨后过孔径为 0.075 mm 的筛网,得到 Mn_3O_4 产品。

1.3 实验原理

以氯化铵为添加剂,金属锰粉悬浮氧化法制备 Mn_3O_4 的化学反应式如下:

$$Mn + 2NH_4^+ + 2H_2O \xlongequal{} Mn^{2+} + 2NH_3 \cdot H_2O + H_2 \quad (1)$$

$$Mn^{2+} + 2NH_3 \cdot H_2O \xlongequal{} Mn(NH_3)_2^{2+} + 2H_2O \quad (2)$$

$$Mn^{2+} + 2NH_3 \cdot H_2O \xlongequal{} Mn(OH)_2 + 2NH_4^+ \quad (3)$$

$$6Mn(OH)_2 + O_2 \xlongequal{} 2Mn_3O_4 + 6H_2O \quad (4)$$

反应过程中,NH_4^+通过反应式(3)再生,并继续和 Mn 反应。NH_4^+仅起到催化作用,因此,只需加入少量 NH_4Cl 即可使反应持续进行。此外,NH_4Cl 构成的缓冲体系不仅能够将反应 pH 值稳定在适宜范围内,还能通过生成$[Mn(NH_3)_2]^{2+}$络合物中间体,促进新生成的 Mn^{2+}脱离锰微粒,从而使反应持续进行。

1.4 表征方法

采用 D8 ADVANCE X 射线衍射仪测定 Mn_3O_4 晶体结构;采用 SUPRA 55 Sapphire 扫描电子显微镜观察 Mn_3O_4 微观形貌;采用 LA-300 激光粒径仪测试 Mn_3O_4 粒径;采用 BT-312 粉体振实密度测试仪测定 Mn_3O_4 振实密度;采用 Vertex 70 傅里叶红外光谱仪和 inVia Reflex 激光共聚焦显微拉曼光谱仪表征 Mn_3O_4 所含官能团;采用 NOVA 4000 比表面积测试仪分析 Mn_3O_4 比表面积;采用 GB/T 1506—2016 电位滴定法测定 Mn_3O_4 中的 Mn 含量;采用 CS-3000 红外碳硫仪测定 Mn_3O_4 中的 S 含量。

2 实验结果及讨论

2.1 制备实验条件优化

2.1.1 氯化铵浓度

在氨水浓度 0.050 mol/L、固液比 0.15∶1、反应温度 60 ℃、空气流量 300 mL/min、搅拌速率 400 r/min 条件下,不同氯化铵浓度制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度见表 1。由表 1 可知,随着氯化铵浓度增加,Mn_3O_4 产品粒径不断增大。当氯化氨浓度较低时,少量 NH_4^+与 Mn^{2+}结合生成$[Mn(NH_3)_2]^{2+}$,此时反应以生成 $Mn(OH)_2$ 为主,$Mn(OH)_2$ 进一步被氧化成 Mn_3O_4,使得体系中 Mn_3O_4 过饱和度维持在较高水平。根据 LaMer 模型[12],此时 Mn_3O_4 晶体析出更倾向于成核,导致颗粒尺寸较小;当氯化氨浓度较高时,Mn^{2+}优先与 NH_4^+络合形成$[Mn(NH_3)_2]^{2+}$,导致溶液中 Mn_3O_4 过饱和度较低,此时新产生的 Mn_3O_4 更倾向于颗粒生长。综合考虑,适宜的氯化铵浓度为 6 g/L。

表 1 不同氯化铵浓度制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度

Table 1 Particle size and tap density of Mn_3O_4 prepared with different ammonium chloride concentrations

氯化铵浓度/(g·L^{-1})	D_x[1]/μm					振实密度/(g·cm^{-3})
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{99.99}$	D_m	
3	4.64	6.94	10.82	22.56	7.42	2.41
6	6.26	9.57	14.73	29.72	10.16	2.67
9	7.14	10.58	15.80	33.83	11.15	2.44
12	7.05	10.63	16.41	38.75	11.34	2.39

1) D_x(x=10、50、90、99.99)为累计体积粒度分数达 x%对应的粒径;D_{50}为体积中位径;D_m 为体积平均粒径。

2.1.2 氨水浓度

氯化铵浓度 6 g/L,其他条件不变,不同氨水浓度制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度见表 2。由表 2 可

知,不加氨水时,产品 D_{50}粒径为 9.77 μm,振实密度为 2.62 g/cm^3;氨水浓度由 0.010 mol/L 增至 0.100 mol/L 时,产品粒径没有明显变化规律,而 Mn_3O_4 产品振实密度由 2.64 g/cm^3 减小至 2.16 g/cm^3。为节约成本,后续实验不再加入氨水。

表 2　不同氨水浓度制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度

Table 2　Particle size and tap density of Mn_3O_4 prepared with different ammonia concentrations

氨水浓度/(mol·L^{-1})	D_x/μm					振实密度/(g·cm^{-3})
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{99.99}$	D_m	
0	6.82	9.77	14.05	25.90	10.17	2.62
0.010	7.18	10.73	16.30	33.97	11.36	2.64
0.025	5.39	7.49	10.81	19.73	7.84	2.52
0.050	5.60	8.16	12.16	22.67	8.58	2.42
0.075	7.53	10.63	15.13	29.62	11.09	2.39
0.100	4.81	6.75	10.03	19.73	7.19	2.16

2.1.3　固液比

不加氨水,其他条件不变,不同固液比制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度见表 3。由表 3 可知,随着固液比增加,Mn_3O_4 产品粒径整体呈减小趋势。这是由于固液比较高时,锰粉质量浓度较高,单位体积内 Mn^{2+} 数量增多,使得 Mn_3O_4 成核速率呈指数级增长[12],颗粒生长受到限制。固液比从 0.1∶1增至 0.3∶1时,Mn_3O_4 产品振实密度整体呈增加趋势;固液比继续增加至 0.35∶1时,振实密度降至 2.56 g/cm^3。适宜的固液比为 0.3∶1。

表 3　不同固液比制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度

Table 3　Particle size and tap density of Mn_3O_4 prepared with different solid-liquid ratios

固液比	D_x/μm					振实密度/(g·cm^{-3})
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{99.99}$	D_m	
0.1∶1	7.12	10.68	16.26	33.97	11.31	2.45
0.15∶1	6.82	9.77	14.05	25.90	10.17	2.62
0.2∶1	4.62	7.17	11.56	25.89	7.77	2.57
0.25∶1	4.50	6.64	10.33	22.57	7.16	2.63
0.3∶1	5.03	7.03	10.54	19.77	7.49	2.70
0.35∶1	3.23	5.11	7.69	15.08	5.35	2.56

2.1.4　反应温度

固液比 0.3∶1,其他条件不变,不同反应温度制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度见表 4。由表 4 可知,当反应温度由 40 ℃升至 70 ℃时,Mn_3O_4 产品粒径和振实密度整体呈增大趋势;反应温度继续升至 80 ℃时,Mn_3O_4 产品的振实密度略微下降。适宜的反应温度为 70 ℃。

表 4　不同反应温度下制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度

Table 4　Particle size and tap density of Mn_3O_4 prepared at different reaction temperatures

反应温度/℃	D_x/μm					振实密度/(g·cm^{-3})
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{99.99}$	D_m	
40	4.06	6.14	9.53	19.74	6.53	2.63
50	4.34	6.27	9.48	19.68	6.65	2.59
60	5.03	7.03	10.54	19.77	7.49	2.70
70	5.26	7.65	11.49	22.64	8.10	2.78
80	5.24	7.49	11.11	22.50	7.89	2.70

2.1.5　空气流量

反应温度 70 ℃,其他条件不变,不同空气流量制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度见表 5。由表 5 可知,当空气流量由 100 mL/min 增大至 700 mL/min 时,Mn_3O_4 产品粒径和振实密度整体呈增大趋势,产品 D_{50}粒径由 5.93 μm 增至 9.69 μm,振实密度由 2.72 g/cm^3 增至 2.82 g/cm^3。空气流量较大时,O_2 在水中的溶解度较高,高浓度的溶解氧加速了 Ostwald 熟化[13],即小颗粒被大颗粒吞噬,最终导致 Mn_3O_4 产物粒径的增大。当空气流量由 700 mL/min 增大至 900 mL/min 时,Mn_3O_4 产品粒径略有降低,振实密度不变。空气流量选用 700 mL/min。

表 5　不同空气流量制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度

Table 5　Particle size and tap density of Mn_3O_4 prepared with different air flow rates

空气流量/(mL·min^{-1})	D_x/μm					振实密度/(g·cm^{-3})
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{99.99}$	D_m	
100	4.04	5.93	8.84	17.26	6.25	2.72
300	5.26	7.65	11.49	22.64	8.10	2.78
500	5.88	8.70	13.10	25.95	9.19	2.76
700	6.37	9.69	14.57	29.66	10.15	2.82
900	5.88	8.84	13.46	29.55	9.36	2.82

2.1.6　搅拌速率

空气流量 700 mL/min,其他条件不变,不同搅拌速率制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度见表 6。由表 6 可知,当搅拌速率从 300 r/min 增大至 500 r/min 时,产品 D_{50}粒径由 9.91 μm 减小至 5.15 μm,这是因为液

表 6　不同搅拌速率制备的 Mn_3O_4 产品粒径及振实密度

Table 6　Particle size and tap density of Mn_3O_4 prepared with different stirring speed

搅拌速率/(r·min^{-1})	D_x/μm					振实密度/(g·cm^{-3})
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	$D_{99.99}$	D_m	
300	6.48	9.91	15.04	33.81	10.48	2.78
400	6.37	9.69	14.57	29.66	10.15	2.82
500	3.32	5.15	7.67	15.08	5.38	2.64

体高速流动对周围低速区域可产生显著的剪切应力，这种力抑制了 Mn_3O_4 在晶核表面的附着，同时减弱了细小晶粒之间的聚集，从而抑制了二次颗粒的形成。随着搅拌速率增加，Mn_3O_4 产品振实密度呈现先增大后减小的趋势。搅拌速率选用 400 r/min。

2.2 优化实验条件制备的 Mn_3O_4 理化性能表征

由条件实验结果可知，金属锰粉悬浮氧化法制备锂离子电池用 Mn_3O_4 优化实验条件为：不加氨水、氯化铵浓度 6 g/L、固液比 0.3∶1、反应温度 70 ℃、搅拌速率 400 r/min、空气流量 700 mL/min，在此条件下，制备的 Mn_3O_4 产品颗粒为类球形，D_{50} 粒径为 9.69 μm，振实密度高达 2.82 g/cm^3。采用 BET、ICP、XRD、FT-IR、Raman 和 SEM 等测试方法进一步对优化条件下制备的 Mn_3O_4 产品进行表征，并与行业标准《锂电池用四氧化三锰》(YB/T 4736—2019)进行对比。

2.2.1 粒径、振实密度及比表面积分析

Mn_3O_4 产品粒径、振实密度及比表面积见表 7。由表 7 可知，产品 D_{50} 粒径为 9.69 μm，振实密度 TD 为 2.82 g/cm^3，比表面积 BET 为 0.399 m^2/g。制备的 Mn_3O_4 产品 D_{50}、TD 和 BET 均满足行业标准规定的要求。

表 7 Mn_3O_4 产品粒径、振实密度及比表面积

Table 7 Particle size, tap density and specific surface area of Mn_3O_4 product

项目	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm	TD/(g·cm^{-3})	BET/(m^2·g^{-1})
YB/T 4736—2019	—	$2 \leqslant D_m \leqslant 25$	—	≥2.0	≤2.0
Mn_3O_4 产品	6.39	9.69	14.89	2.82	0.399

粒径分布跨度(Span)是衡量颗粒尺寸分布宽度的关键指标，其计算方法如下：

$$\text{Span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \tag{5}$$

式中 D_{10}、D_{50}、D_{90} 分别为累计分布 10%、50%、90%对应的粒径，μm。

经计算可得 Mn_3O_4 产品 Span 为 0.88，表明颗粒的粒径分布较窄，颗粒均一性较好。Mn_3O_4 产品粒径分布见图 1。

2.2.2 化学成分分析

表 8 为 Mn_3O_4 产品主要化学成分。由表 8 可知，制备的 Mn_3O_4 产品锰含量为 71.5%，硫含量低至 0.019 80%，均满足行业标准要求。此外，Mn_3O_4 产品中 Fe、Ca、Cu、Mg、K 和 Na 等杂质元素含量均符合行业标准，满足锰系锂电池对正极材料及前驱体的纯度需求。

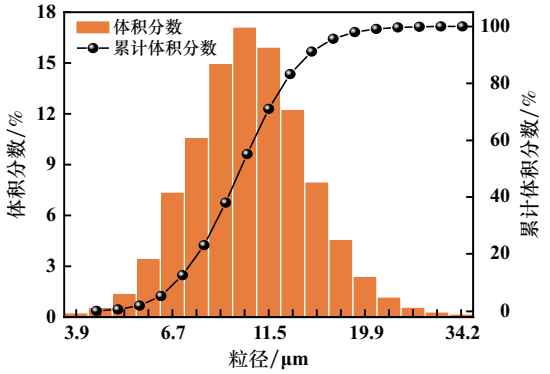


图 1 Mn_3O_4 产品粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of Mn_3O_4 product

表 8 Mn_3O_4 产品主要化学成分(质量分数)

Table 8 Chemical composition of Mn_3O_4 product %

项目	Mn	S	Fe	Ca	Cu	Mg	K	Na
YB/T 4736—2019	≥70	≤0.05	≤0.005	≤0.03	≤0.005	≤0.03	≤0.05	≤0.05
Mn_3O_4 产品	71.5	0.019 80	0.002 50	0.002 92	0.001 82	0.028 70	0.045 20	0.027 70

2.2.3 物相分析

图 2 为 Mn_3O_4 产品 XRD 图谱。由图 2 可知，样品衍射峰强度较高且峰形尖锐，在 2θ 为 18.0°、28.9°、31.0°、32.3° 和 36.1° 等处的特征峰分别对应 Mn_3O_4 (PDF#24-0734)的(101)、(112)、(200)、(103)和(211)晶面，且图谱中其他特征峰位置均与标准卡片中的特征峰相对应，表明合成的产品为典型尖晶石结构 Mn_3O_4。

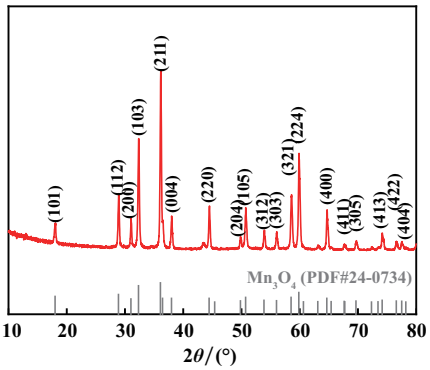


图 2 Mn_3O_4 产品 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of Mn_3O_4 product

图 3 为 Mn_3O_4 产品红外光谱图。由图 3 可知，在 400~700 cm^{-1} 区间出现特征吸收带，458 cm^{-1} 处对应于八面体位置上 Mn^{3+} 的振动，501 cm^{-1} 处为 Mn^{2+}—O 四面体伸缩振动吸收峰，611 cm^{-1} 处为 Mn^{3+}—O 八面体反对称伸缩振动吸收峰[14]。

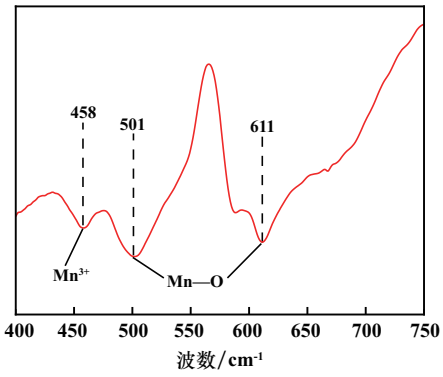


图 3　Mn_3O_4 产品红外光谱图

Fig. 3　FT-IR spectra of Mn_3O_4 product

图 4 为 Mn_3O_4 产品拉曼谱图。由图 4 可知,在 638 cm^{-1}处出现一个最强峰,这是四面体位(Mn^{2+}—O)伸缩振动的结果;348 cm^{-1}处出现的峰对应 O—Mn—O 弯曲振动。

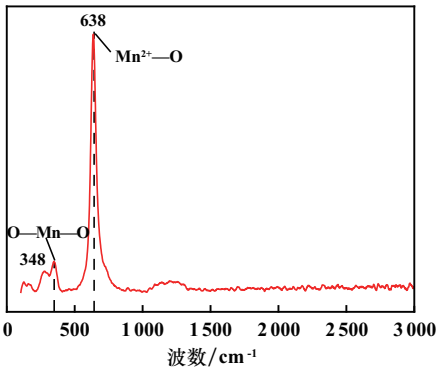


图 4　Mn_3O_4 产品拉曼谱图

Fig. 4　Raman spectra of Mn_3O_4 products

2.2.4　SEM 分析

图 5 为 Mn_3O_4 产品 SEM 图。由图 5 可知,Mn_3O_4 产品整体呈类球形,颗粒大小较为均一,表面光滑紧实,致密度较高。

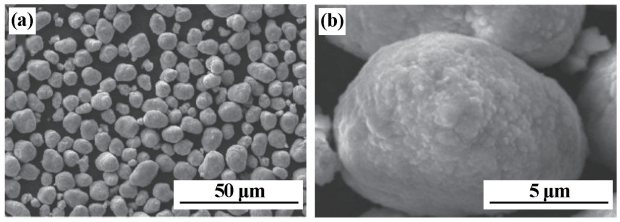


图 5　Mn_3O_4 产品 SEM 图

Fig. 5　SEM images of Mn_3O_4

3　结论

1) 采用金属锰粉悬浮氧化法制备锂离子电池用 Mn_3O_4,在氯化铵浓度 6 g/L、不加氨水、固液比 0.3∶1、反应温度 70 ℃、空气流量 700 mL/min、搅拌速率 400 r/min 的优化条件下,制备的 Mn_3O_4 产品颗粒为类球形,D_{50}粒径为 9.69 μm,振实密度达到 2.82 g/cm^3。

2) 优化条件制备的 Mn_3O_4 为尖晶石结构,比表面积为 0.399 m^2/g,Mn 含量达到 71.5%,S、Fe、Ca、Cu、Mg、K 和 Na 等杂质元素含量均满足《锂电池用四氧化三锰》(YB/T 4736—2019)行业标准要求。

参考文献(References):

[1] 丁伦涛,赵鹏,周春仙,等. $LiMn_{0.6}Fe_{0.4}PO_4/C$ 正极材料的制备与电化学性能研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):24-30.
DING Luntao, ZHAO Peng, ZHOU Chunxian, et al. Synthesis and electrochemical performance of $LiMn_{0.6}Fe_{0.4}PO_4/C$ cathode materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):24-30.

[2] LAURO S N, BURROW J N, MULLINS C B. Restructuring the lithium-ion battery: A perspective on electrode architectures[J]. eScience, 2023,3(4):100152.

[3] ZHOU Y, FENG S H, ZHU P F, et al. Self-sacrificial-reaction guided formation of hierarchical electronic/ionic conductive shell enabling high-performance nano-silicon anode[J]. Chemical Engineering Journal, 2021,415:128998.

[4] 梁力勃,卢德娟,梁晶晶,等. $NiFe_2O_4$@$LiMn_2O_4$ 正极材料的制备及其电化学性能研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):127-130.
LIANG Libo, LU Dejuan, LIANG Jingjing, et al. $NiFe_2O_4$@$LiMn_2O_4$ preparation of cathode materials and study of their electrochemical properties[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(2):127-130.

[5] ZHANG S, DENG W T, MOMEN R, et al. Element substitution of a spinel $LiMn_2O_4$ cathode[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021,9(38):21532-21550.

[6] SALLARD S, BILLAUD J, SHEPTYAKOV D, et al. Cr-doped Li-rich nickel cobalt manganese oxide as a positive electrode material in Li-ion batteries to enhance cycling stability[J]. ACS Applied Energy Materials, 2020,3(9):8646-8657.

[7] 谢雪珍,陈慧,叶有明,等. 修饰四氧化三锰对尖晶石锰酸锂电化学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):31-35.
XIE Xuezhen, CHEN Hui, YE Youming, et al. Effect of modified trimanganese tetroxide on electrochemical performance of spinel lithium manganate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):31-35.

[8] HAN R, PAN Y S, DU C, et al. Eu doping β-MnO_2 as cathode materials for high specific capacity aqueous zinc ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024,80:110250.

[9] LUO S H, MENG X, CAI K X, et al. Carbon dot modified Mn_2O_3 porous spheres as cathode materials for high performance zinc ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2024,603:234485.

[10] HAN X Y, CUI Y P, LIU H W. Ce-doped Mn_3O_4 as high-performance anode material for lithium ion batteries[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020,814:152348.

(下转第 209 页)

Cl in low-weight biological samples by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry and the evaluation of uncertainty with analytical results[J]. Chinese Jorunal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025,15(5):731-740.

[6] 张婷,丁锐,王静,等. 原子吸收分光光度法测定注射用重组人凝血因子Ⅷ中钙含量及不确定度评价[J]. 药物分析杂志, 2025(1):110-115.
ZHANG Ting, DING Rui, WANG Jing, et al. Determination of calcium content and uncertainty evaluation in recombinant human coagulation factor Ⅷ for injection by atomic absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2025(1):110-115.

[7] 张林涛,罗兰,苏海涛,等. 火焰原子吸收光谱法测定铅合金中锌含量的不确定度评定[J]. 云南化工, 2025,52(10):75-78.
ZHANG Lintao, LUO Lan, SU Haitao, et al. Uncertainty evaluation of zinc content in lead alloys determined by flame atomic absorption spectrometry[J]. Yunnan Chemical Technology, 2025,52(10):75-78.

[8] 侯亚茹,陆继龙,范玉超,等. 原子吸收光谱法测定岩石中铜、铅和锌的不确定度评定及方法改进[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(7):2101-2106.
HOU Yaru, LU Jilong, FAN Yuchao, FAN Yuchao, et al. Uncertainty evaluation and method improvement of determination of copper, lead, and zinc in rocks by atomic absorption spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022,42(7):2101-2106.

[9] 罗海霞. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定钴铬钨系合金粉末中钨含量的不确定度评定[J]. 冶金分析, 2023,43(11):90-96.
LUO Haixia. Uncertainty evaluation during determination of tungsten content in cobalt-chromium-tungsten alloy powder by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. Metallurgical Analysis, 2023,43(11):90-96.

[10] 姜欣,任莉慧,蒋卓亚. 火焰原子吸收分光光度法测定土壤样品中铜、锌、铅、镍、铬的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2023, 32(3):94-98.
JIANG Xin, REN Lihui, JIANG Zhuoya. Uncertainty evaluation of determination of copper, zinc, lead, nickel and chromium in soil samples by flame atomic absorption spectrophotometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2023,32(3):94-98.

[11] 张生辉,王振涛,李永胜,等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022,42(5):138-168.
ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022,42(5):138-168.

[12] GB/T 20899.1—2019　金矿石化学分析方法　第 1 部分:金量的测定[S].
GB/T 20899.1—2019　Methods for chemical analysis of gold ore: Part 1: Determination of gold content[S].

[13] GB/T 6682—2008　分析实验室用水规格和试验方法[S].
GB/T 6682—2008　Water for analytical laboratory use: Specification and test methods[S].

[14] JJG 196—2006　常用玻璃量器[S].
JJG 196—2006　Working glass container[S].

[15] DZ/T 0130—2006　地质矿产实验室测试质量管理规范[S].
DZ/T 0130—2006　The specification of testing quality management for geological laboratories[S].

引用本文:许彬,刘春艳,杨炳红,等. 原子吸收光谱法测定金矿石中金含量的测量不确定度评定[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):204-209.
XU Bin, LIU Chunyan, YANG Binghong, et al. Evaluation of measurement uncertainty in determining gold content in gold ore by atomic absorption spectrometry[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):204-209.

(上接第 203 页)

[11] JIANG Y, YUE J L, GUO Q B, et al. Highly porous Mn_3O_4 micro/nanocuboids within situ coated carbon as advanced anode material for lithium-ion batteries[J]. Small, 2018,14(19):1704296.

[12] WHITEHEAD C B, ÖZKAR S, FINKE R G. LaMer's 1950 model for particle formation of instantaneous nucleation and diffusion-controlled growth: A historical look at the model's origins, assumptions, equations, and underlying sulfur sol formation kinetics data[J]. Chemistry of Materials, 2019,31(18):7116-7132.

[13] OHTA H, SUITO H. Effects of dissolved oxygen and size distribution on particle coarsening of deoxidation product[J]. ISIJ International, 2006,46(1):42-49.

[14] 杨永斌,张晓萱,廖烺,等. 沉淀-焙烧法制备高振实密度四氧化三锰的研究[J]. 过程工程学报, 2024,24(10):1186-1195.
YANG Yongbin, ZHANG Xiaoxuan, LIAO Lang, et al. Research on the preparation of high tap density trimanganese tetraoxide by precipitation-roasting method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024,24(10):1186-1195.

引用本文:苏有权,张妮,薛兴勇,等. 金属锰粉悬浮氧化法制备锂电池用 Mn_3O_4 的研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):199-203.
SU Youquan, ZHANG Ni, XUE Xingyong, et al. Preparation of Mn_3O_4 for lithium batteries by suspension oxidation of manganese metal powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):199-203.