第 17 卷第 1 期 中国有色金属学报 2007 年 1 月
Vol.17 No.1 The Chinese Journal of Nonferrous Metals Jan. 2007
文章编号：1004-0609(2007)01-0166-06

# 均匀沉淀法制备片状结构 $\alpha$-Ni(OH)$_2$

张文魁，黄　娜，黄　辉，甘永平

(浙江工业大学 化工与材料学院，杭州 310014)

**摘　要**：采用均匀沉淀法制备 20%Al 取代的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$，研究表面活性剂、镍盐浓度、pH 值等因素对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 微结构和电化学性能的影响。结果表明：控制合适的合成条件，可以获得片厚约为 10~20 nm、具有片状微观结构的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 粉末；采用 CoO 作为添加剂时，优化条件下合成的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的放电容量接近 390 mA·h/g；与 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 相比，合成的片状 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 具有充电电压低、放电电压高及放电容量大的特点。循环伏安测试表明，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极具有更好的可逆性。

**关键词**：$\alpha$-Ni(OH)$_2$；片状结构；均匀沉淀法；电化学性能
**中图分类号**：TM 911　　**文献标识码**：A

# Preparation of flaky $\alpha$-Ni(OH)$_2$ by coprecipitation method

ZHANG Wen-kui, HUANG Na, HUANG Hui, GAN Yong-ping

(College of Chemical Engineering and Material Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** 20% Al-substituted $\alpha$-Ni(OH)$_2$ was synthesized by a co-precipitation method, and the effects of surfactants, $Ni^{2+}$ concentration and pH value on the microstructure and electrochemical properties of the as-prepared α-Ni(OH)$_2$ were investigated. The results show that a special flaky $\alpha$-Ni(OH)$_2$ with thickness of 10~20 nm can be obtained under the optimum conditions. The discharge capacity of the as-prepared $\alpha$-Ni(OH)$_2$ powder approximates to 390 mA·h/g using CoO as additive. Compared with $\beta$-Ni(OH)$_2$, the as-synthesized flaky $\alpha$-Ni(OH)$_2$ has the lower charge potential pleateau, higher diacharge potential pleateau and larger discharge capacity. The results of cyclic voltammogram measurements also show that the as-synthesized $\alpha$-Ni(OH)$_2$ has better electrochemical reversibility.

**Key words:** $\alpha$-Ni(OH)$_2$; flaky structure; coprecipitation method; electrochemical properties

Ni(OH)$_2$有 $\alpha$-Ni(OH)$_2$和 $\beta$-Ni(OH)$_2$两种形态，目前商用 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 的电化学容量已接近理论容量，提高潜力有限。$\alpha$-Ni(OH)$_2$/$\gamma$-NiOOH 在充放电过程中，$\alpha/\gamma$转变过程的电子转移数大于 1($\gamma$-NiOOH 中 Ni 的平均价态为 3.67，而 $\beta$-NiOOH 中 Ni 的平均价态为 2.90[1])，因此 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 作为镍电极活性物质，可获得更高的放电容量，但是一般条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 在强碱中不稳定，很容易在充放电过程中转变为 $\beta$-Ni(OH)$_2$。近年的研究发现[2−4]，在 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的晶格中引入三价或二价金属阳离子替代镍离子，可获得一种稳定的水滑石型双氢氧化合物(LDH)。作为掺杂的金属离子，其半径不能太大，在强碱中要能稳定存在，同时还要保证结构层内有足够的剩余电荷，因此替代镍离子使 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 相稳定的金属离子主要有 $Al^{3+}$[2−7]、$Zn^{2+}$[8−9]、$Fe^{3+}$[10−11]、$Mn^{2+}$[12]和 $Co^{2+}$[13]等。由于 $Al^{3+}$的半径适宜，在强碱中不会发生价态的变化，同时价格便宜，对环境污染小，自身的相对原子量小，有利于增大整体物质的质量比能量，因此是制备稳定 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的有效替代元素。

实验证明[2−7]，Al 代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 具有放电容量高、

**基金项目**：国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA302420)
**收稿日期**：2005-10-08；**修订日期**：2006-07-26
**通讯作者**：张文魁，博士，教授；电话: 0571-88320394; E-mail: echem@zjut.edu.cn

大电流放电性能好、内阻和电化学反应电阻小、以及过充时电极不发生膨胀的优点。因此开发高性能、低成本的 Al 代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 替代 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 作为镍系电池正极活性物质，具有良好的应用前景。

本文作者采用均匀沉淀法制备 Al 取代的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$，研究反应条件对产物的微观结构及电化学性能影响，探索 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的优化合成工艺条件。通过研究发现，在合适的制备条件下，可以得到表面呈特殊片状结构的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$，该结构的 Al 代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 具有良好的电化学活性和放电容量。

# 1　实验

### 1.1　Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的制备和表征

配制 0.3~1.5 mol/L 的 $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ 和 0.075~0.375 mol/L 的 $Al(NO_3)_3{\cdot}18H_2O$ 水或乙醇水溶液，尿素溶液的浓度为 4.5 mol/L。根据以前的研究结果[2−3]，本实验中 Al 掺杂量定为 20%，因此选择 $Ni^{2+}$ 与 $Al^{3+}$的摩尔比为 4:1，镍盐与尿素的摩尔浓度比为 1:6。

首先在三口烧瓶中加入溶液总体积 1%的 TX-100(OP 乳化剂)，然后将镍盐溶液和尿素溶液用滴液漏斗并流滴入三口烧瓶中，流速控制在 0.5 mL/min，同时快速强烈搅拌，反应温度用水浴锅控制在 80~90 ℃。在反应过程中用 0.5 mol/L 的 KOH 溶液调节反应溶液的 pH 值，反应结束后，将溶液进行超声波分散，离心分离出氢氧化镍样品，用蒸馏水和无水乙醇各洗涤 2~3 遍，然后在 100 ℃下烘干，得到粉末状样品。按照文献[14]的条件，实验中对比测试用的 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 采用沉淀法在实验室合成。

XRD 分析采用 D/MAX-3B 型 X 射线衍射仪，Cu $K_\alpha$ 单色器($\lambda$=0.154 18 nm)，连续扫描，扫描速度 8(º)/min，扫描范围 3º~ 70º，工作电压 40 kV。表面形貌分析在 Hitachis-4700Ⅱ型扫描电子显微镜上进行。

### 1.2　电极制备和电化学性能测试

将制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 与 5%的石墨粉或 CoO 粉末混合均匀，加入少量 PTFE(60%)和蒸馏水，混合均匀后，涂刮到 2 cm×2 cm×1.4 mm 的泡沫镍中，在 60 ℃下烘干后，刮掉表面的浮粉，然后辊压成 0.7 mm 厚的电极。制备好的电极进行电化学性能测试前，先在 6 mol/L 的 KOH 溶液中浸泡 20 h。

电化学性能测试采用三电极体系，研究电极为氢氧化镍电极，辅助电极为泡沫镍，Hg/HgO 为参比电极，电解液为 6.0 mol/L KOH。电化学性能的检测在 BS-9390 二次电池性能检测装置(广州擎天实业有限公司生产)上进行，循环伏安测试采用 CHI660B 电化学工作站(上海辰华仪器公司)。测试电极的充放电和循环特性时，充放电倍率均为 0.2$C$，充电时间为 6 h，放电截止电位为 0 V ( vs Hg/HgO)，各放电电极的容量均相对于样品质量。

# 2　结果与讨论

### 2.1　不同制备条件对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的电化学性能的影响

#### 2.1.1　表面活性剂和溶剂的影响

图 1 所示为水溶液中添加 1%(体积比)TX-100 对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 放电性能的影响。如图所示，添加少量 TX-100 后合成的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$，放电电压变化不大，但放电容量显著增加，表明溶液中添加表面活性剂可提高 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的电化学性能。

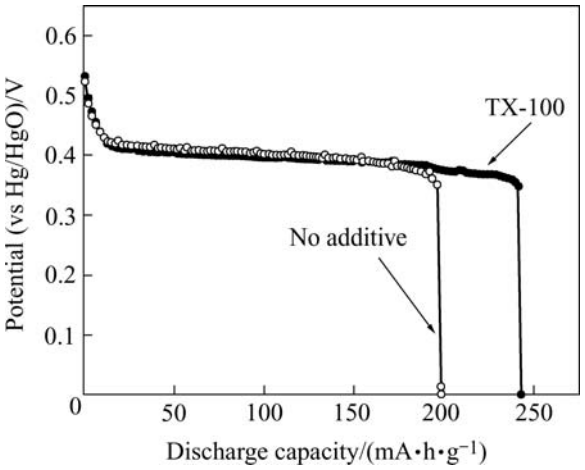


**图 1**　添加 1%的表面活性剂 TX-100 对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 放电曲线的影响

**Fig.1**　Effect of surfactant TX-100 on discharge curve of $\alpha$-Ni(OH)$_2$ electrode ($c$($Ni^{2+}$)=0.7 mol/L, pH≈8)

$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的合成通常是在水溶液中进行，其形貌和大小与制备条件有关。在沉淀过程中，溶液表面张力的改变对氢氧化镍的晶核形成和长大有明显的影响，从而改变氢氧化镍的微观形貌[14]。图 2 所示为在不同浓度乙醇溶液中合成的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的放电曲线。与水溶液中合成的样品相比，采用乙醇水溶液制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 放电容量明显增加，其中在 30%乙醇溶液中制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 放电容量最大，放电平台电压也最高，表明采用乙醇溶液合成 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的电化学性能较好。

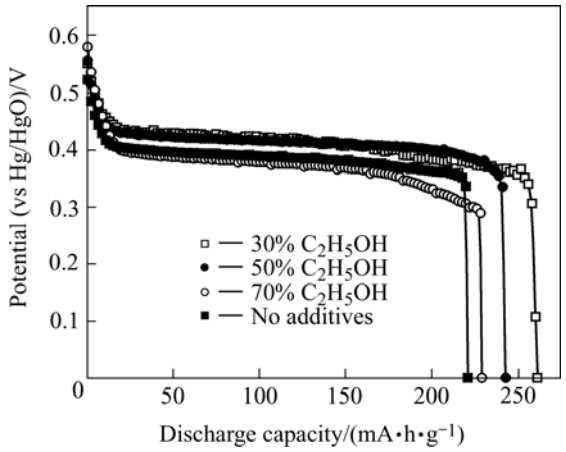


**图 2** 乙醇溶液浓度对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极放电曲线的影响

**Fig.2** Effect of ethanol concentration on discharge curves for $\alpha$-Ni(OH)$_2$ (1% TX-100, pH≈8)

2.1.2 镍盐浓度的影响

图 3 所示为镍盐浓度对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的放电容量和放电平台电压的影响，合成时采用 30%乙醇水溶液，其中含有 1%(体积比)TX-100 表面活性剂。合成过程中，溶液的 pH 值控制在 8~9 左右。如图所示，随着镍盐浓度的增加，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的放电容量逐渐增加，当浓度为 0.7 mol/L 时放电容量最高，在 261 mA·h/g 左右，随后随着镍盐浓度的进一步增加，放电容量则快速下降。镍盐浓度对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的放电平台电压也有明显的影响，放电电压随着镍盐浓度的增加先缓慢增加，约 0.7 mol/L 时放电电压达到极大值，随后逐渐下降；当镍盐浓度超过 1 mol/L 后，放电平台又随着镍盐浓度的增加而逐渐增加，放电平台出现在 0.30~0.45 V 之间。

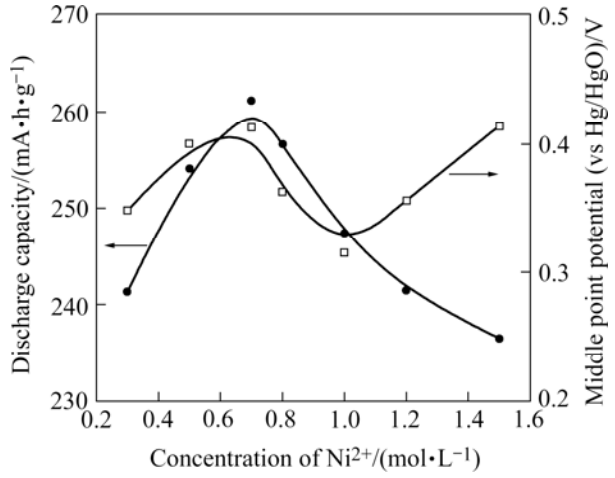


**图 3** 镍盐浓度对放电容量和放电平台电压的影响

**Fig.3** Effects of $Ni^{2+}$ concentration on discharge capacity and discharge potential

2.1.3 pH 值的影响

研究表明[15]，合成时不同 pH 值对合成的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的堆积密度、比容量、粒径大小和形貌有一定影响，从而对其放电容量也有一定影响。一般来说，随着制备时溶液 pH 值的升高，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 放电容量增加。pH 值较低时，制备的活性物质利用率低，容量也不高，同时由于电解液渗透困难，会引起局部电流密度过大，导致充电不均，加剧电极的变形和膨胀，降低电极的循环寿命。但 pH 超过一定值后，由于 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 颗粒平均粒径小、内孔体积小、堆积密度低、电极的比容量也不高，要使 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的堆积密度与活性都得到提高，必须选择一个合适的反应 pH 值。本研究发现，pH 值为 10 时，所得的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极的放电电压和放电容量远高于 pH 为 8 时制得的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$(图 4)。

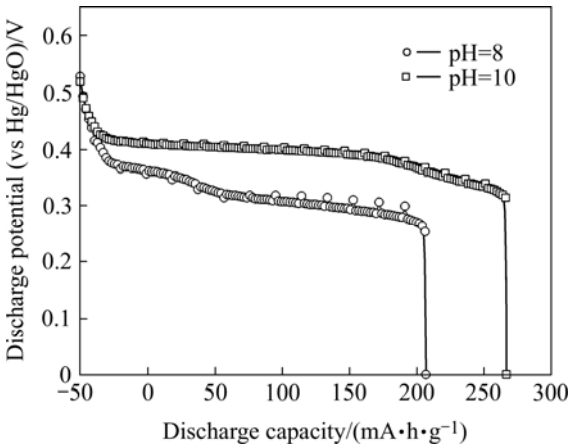


**图 4** 不同 pH 时制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极的放电曲线

**Fig.4** Discharge curves of $\alpha$-Ni(OH)$_2$ synthesized at different pH values ($c$($Ni^{2+}$)=0.7 mol/L, 30% ethanol solution)

## 2.2 优化条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的电化学性能

通过对 Al 代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 合成条件的优化，可以获得综合电化学性能较好的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品。本实验中，溶剂为 30%乙醇水溶液，镍盐浓度为 0.7 mol/L，尿素溶液的浓度为 4.2 mol/L，表面活性剂为溶液总体积的 1%。反应过程中将镍盐溶液和尿素溶液流速控制在 0.5 mL/min，同时快速强烈搅拌，反应温度控制在 80~90 ℃。在该条件下，可以得到电化学性能较好的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品。

图 5 所示为优化条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 和 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 样品电极的充放电曲线。前面的电化学性能测试过程中，电极的添加剂均为石墨粉，本实验还比较了电极中添加 5%CoO 时的充放电性能。从图中可以看出，采用石墨添加剂时，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极的最高放

电容量为 320 mA·h/g；但采用 CoO 为添加剂时，制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极的放电容量可达到 390 mA·h/g。同时 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的充电电压比 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 低 50 mV 左右，而平均放电电压比 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 高 100 mV 左右。

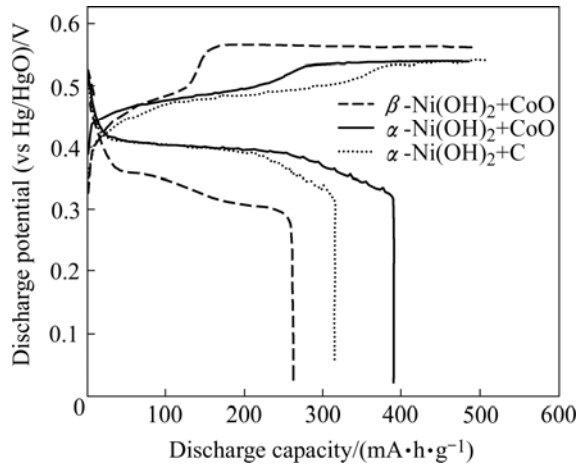


**图 5**　Al 取代的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 和实验室合成的 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 样品的充放电曲线

**Fig.5**　Charge/discharge curves for Al-substituted $\alpha$-Ni(OH)$_2$ and $\beta$-Ni(OH)$_2$ electrode

图 6 所示为 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 及 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 电极的循环曲线。从图 6 可以看出，循环初期，随着循环次数的增加，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 和 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 电极的放电容量均逐渐增加，约 10 次左右达到高放电容量；随着循环次数的进一步增加，电极的放电容量逐渐降低，其中，$\beta$-Ni(OH)$_2$ 电极的容量衰退速度明显比 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 要快。经过 100 次循环，$\beta$-Ni(OH)$_2$ 电极的容量衰退了 76.4%，而 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极衰退了 10.5%，表明 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的循环性能明显优于 $\beta$-Ni(OH)$_2$。

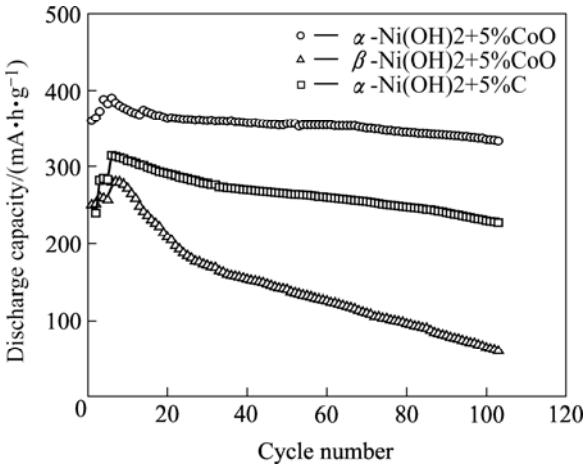


**图 6**　Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 和 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 样品电极的循环性能

**Fig.6**　Cycling curves for Al-substituted $\alpha$-Ni(OH)$_2$ and $\beta$-Ni(OH)$_2$ electrode (Charge/discharge current: 0.2*C*, charge time: 6 h, discharge cut-off potential: 0 V

本实验中合成的 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的理论容量约为 487.4 mA·h/g，其中 20%(摩尔分数)Ni 被 Al 取代，因此其中 Ni 含量明显低于 $\beta$-Ni(OH)$_2$。在充放电反应过程中，如果 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 的电子转移数假设为 1，则 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的电子转移数为 1.686 5。

图 7 所示为优化条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的循环伏安曲线。如图所示，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的 $\Delta\varphi_p$ 为 0.287 V，而 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 的 $\Delta\varphi_p$ 为 0.498 6 V，这表明 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的可逆性比 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 好，循环转变过程中 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的镍原子交换的电子要比 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 中的多，也表明 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 比 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 有更高的放电容量。同时，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的氧化和还原峰电流分别为 0.826 7 A 和 0.741 2 A，$\beta$-Ni(OH)$_2$ 的氧化和还原峰电流分别为 0.215 5 A 和 0.189 2 A，这表明 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 具有更高的电化学活性。

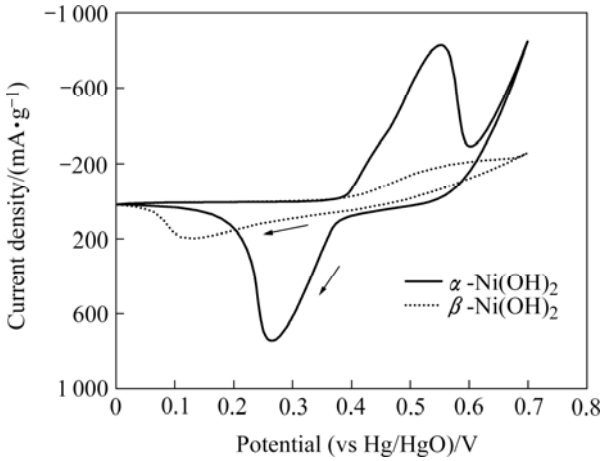


**图 7**　优化条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品的循环伏安曲线(扫描速度为 0.1 mV/s)

**Fig.7**　Cyclic voltamagram of $\alpha$-Ni(OH)$_2$ sample synthesized under optimum conditions (scan rate: 0.1 mV/s)

### 2.3　XRD 和 SEM 分析

图 8 所示为优化条件下制备的 Al 代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品的 XRD 衍射图，表明本研究合成的样品具有典型的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 结构，其(003)晶面的晶间距为 0.789 38 nm，与文献[14]的数据一致。XRD 谱上未发现 Al 的衍射峰，同时结合文献[15]中的研究结果，说明 Al 以固溶态存在于 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的晶格中。图中曲线 2 所示为 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 在 6 mol/L KOH 溶液中老化 7 d 后的 XRD 谱，与曲线 1 的特征峰基本一致，表明本实验制备的 Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 在强碱介质中能稳定存在。

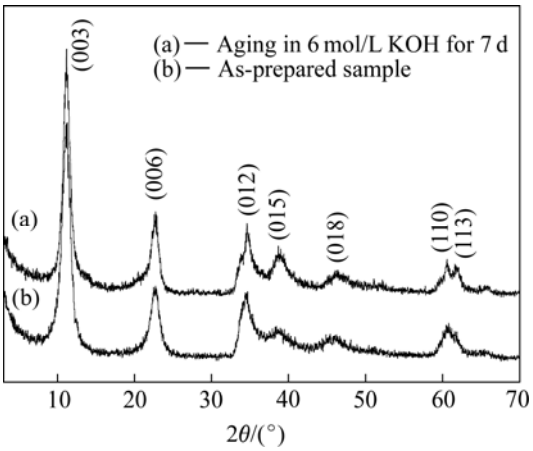


**图 8** 优化条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品的 XRD 图谱

**Fig.8** XRD patterns for $\alpha$-Ni(OH)$_2$ sample synthesized under optimum conditions

图 9 所示为优化条件下合成的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品的 SEM 照片。如图所示，放大倍率较小时，$\alpha$-Ni(OH)$_2$ 呈不规则的类球形，颗粒有团聚的现象。高放大倍数下，样品表面微观结构呈特殊的片状，片与片之间相互交联，形成具有类蜂窝的结构，片厚度约为 10~20 nm，微观结构比较特殊。文献[2−16]报道，一般的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 具有类球形或无定形结构，与本实验得到的片状结构微观形态差别甚大，初步分析可能是由于本实验合成 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 时采用乙醇水溶液代替纯水溶液，同时在其中加入表面活性剂，改变了溶液的表面张力和溶质的溶解度，从而对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的结晶过程产生影响，使 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的结晶过程产生明显的择优取向生长所致。

由于制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品表面具有特殊的微观片状结构，这类结构与常规的球形或类球形结构相比，质量相同时具有大得多的比表面积，因此其电化学反应活性和高倍率放电性能明显得到改善，这与循环伏安的研究结果一致。由于 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 具有较大的比表面积，颗粒之间的导电性差，采用 CoO 作为导电剂时，在电极化成过程中会形成高效的导电网络，添加效果要好于石墨导电剂，因此不同添加剂对放电容量会造成显著的影响。

## 3 结论

1) 采用均匀沉淀法制备 Al 代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 时，表面活性剂、溶剂、镍盐浓度、pH 值等因素对 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的电化学性能具有明显的影响，控制好各影响因素，可获得性能良好的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$。

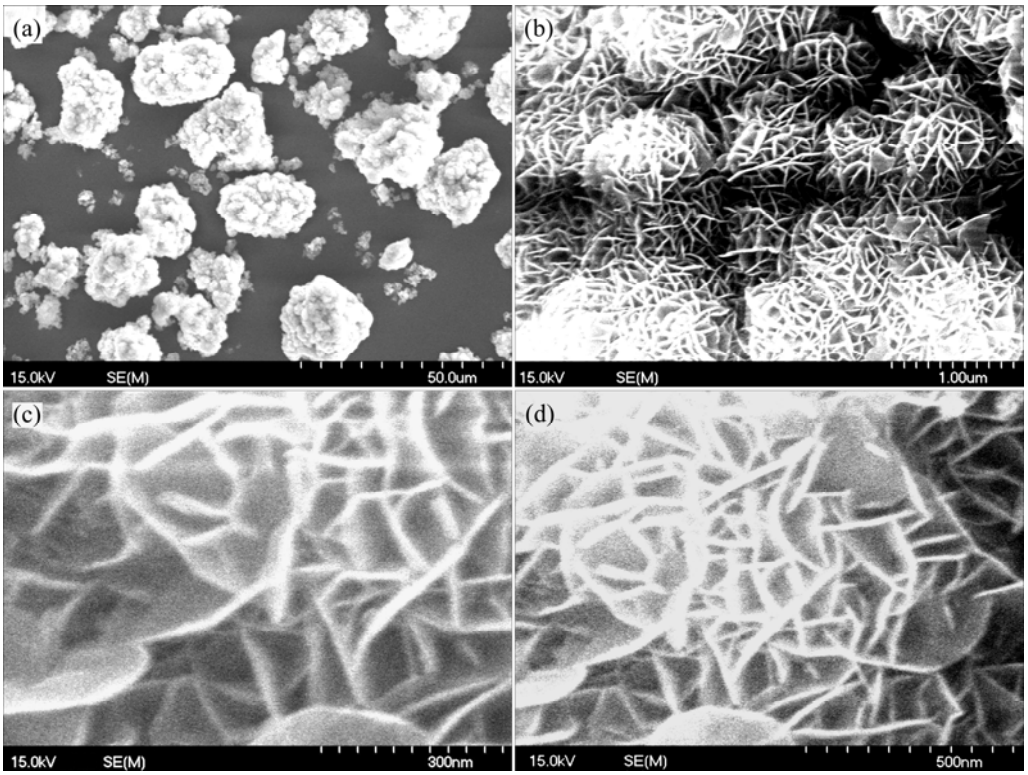


**图 9** 优化条件下制备的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 样品的 SEM 像

**Fig.9** SEM images for $\alpha$-Ni(OH)$_2$ sample synthesized under optimum conditions

2) 在合适的合成条件下，可以获得具有特殊表面片状结构的 $\alpha$-Ni(OH)$_2$，片厚约为 10~20 nm，采用 CoO 作为电极添加剂，其放电容量接近 390 mA·h/g，充放电循环性能优良，经过 100 次循环后，容量保持率仍达到 90%左右。与 $\beta$-Ni(OH)$_2$ 相比，充电电压低 50 mV 左右，平均放电电压高 100 mV，具有良好的电化学性能。

3) 循环伏安研究表明，本研究合成的特殊片状结构 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 电极具有很高的电化学活性，同时电化学可逆性良好。

## REFERENCES


[1] Singh D. Characteristics and effects of $\gamma$-NiOOH on cell performance and a method to quantify it in nickel electrode[J]. J Electrochem Soc, 1998, 145(1): 116−119.

[2] Kamath P V, Dixit M, Indira M. Stabilized $\alpha$-Ni(OH)$_2$ as electrode material for alkaline secondary cells[J]. J Electrochem. Soc, 1994, 141(11): 2956−2959.

[3] Indira L, Dixit M, Kamath P V. Electrosynthesis of layered double hydroxides of nickel with trivalent cations[J]. J Power Sources, 1994, 52: 93.

[4] Kumar V G, Unichandraiah N M, Kamath P V. On the performance of stabilized $\alpha$-nickel hydroxide as a nickel-positive electrode in alkaline storage batteries[J]. J Power Sources, 1995, 56: 111.

[5] Sugimoto A, Ishida S, Hanawa K. Preparation and characterization of Ni/Al-layered double hydroxide[J]. J Electrochem Soc, 1999, 146(4): 1251−1255.

[6] Zhao Y L, Wang J M, Chen H, Pan T, Zhang J Q, Cao C N. Different additives-substituted $\alpha$-nickel hydroxide prepared by urea decomposition[J]. Electrochimica Acta, 2004, 50: 91−98.

[7] Liu B, Wang X Y, Yuan H T, Zhang Y S, Song D Y, Zhou Z X. Physical and electrochemical characteristics of aluminum (Ⅰ): Substituted nickel hydroxide [J]. J Appl Electrochem, 1999, 29(7): 855−860.

[8] Ezhov B B, Malandin O G. Structure modification and change of electrochemical activity of nickel hydroxides [J]. J Electrochem Soc, 1991, 138(4): 885−889.

[9] Dixit M, Kamath P V, Gopalakrishnan J. Zinc-substituted $\alpha$-nickel hydroxide as an electrode material for alkaline secondary cells[J]. J Electrochem Soc, 1999, 146(1): 79−82.

[10] Demourgues-Guerlou L, Delmas C. Structure and properties of precipitated nickel-iron hydroxides[J]. J Power Sources, 1993, 45: 281−289.

[11] Demourgues-Guerlou L, Delmas C. Effect of iron on the electrochemical properties of the nickel hydroxide electrode[J]. J Electrochem Soc, 1994, 141(3): 713−717.

[12] Demourgues-Guerlou L, Delmas C. Electrochemical behavior of the manganese-substituted nickel hydroxides[J]. J Electrochem Soc, 1996, 143(2): 561−566.

[13] Audemer A, Delahaye A, Farhi R, Sac-Epee N, Tarascon M. Electrochemical and raman studies of beta-type nickel hydroxides $Ni_{1-x}Co_x(OH)_2$ electrode materials[J]. J Electrochem Soc, 1997, 144(8): 2614−2620.

[14] 姜长印，万春荣，张泉荣，章金基. 高密度高活性球形氢氧化镍的制备与性能控制[J]. 电源技术，1997, 21(6): 243−247.
JIANG Chang-yin, WAN Chun-rong, ZHANG Quan-rong, ZHANG Jing-ji. Preparation of the high-density, high-activity, and spherical nickel hydroxide and its performance control[J]. Chinese Journal of Power Sources, 1997, 21(6): 243−247.

[15] 肖慧明，王建明，陈　惠，潘　滔，张鉴清. Al 取代 $\alpha$-Ni(OH)$_2$ 的有机溶剂法合成及其电化学性能[J]. 功能材料，2003, 34(5): 553−555.
XIAO Hui-ming, WANG Jian-ming, CHEN Hui, PAN Tiao, ZHANG Jian-qing. Structure and electrochemical performancec of Al and Zn co-substituted α-Ni(OH)$_2$[J]. Functional Materials, 2003, 34(5): 553−555.

[16] 陈昌国，文　莉，余丹梅. 制备工艺条件对 Ni(OH)$_2$ 粒度和电化学性能的影响[J]. 电源技术，2004, 28(9): 558−561.
CHEN Chang-guo, WEN Li, YU Dan-mei. Effect of preparing conditions on granularity and electrochemical performance of Ni(OH)$_2$[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004, 28(9): 558−561.


(编辑　龙怀中)