

含锰中间合金的制备及其在稀土储氢合金中的应用^①

郑波¹, 谢懋良², 任权兵¹, 赖华生², 冯兰¹, 刘雯雯², 皮雄¹, 李荣华¹, 林昊¹

(1.江西江钨运科技集团有限公司, 江西 南昌 330096; 2.赣州有色冶金研究所有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要: 采用真空感应熔炼法制备了含锰中间合金, 研究了锰源、Mn/Al 质量比、预热时间和精炼时间等因素对含锰中间合金组成的影响, 探讨了含锰中间合金替代传统“Mn+Al”投料对制备含锰 AB₅型稀土储氢合金的影响。结果表明, 采用锰片作锰源比锰粉作锰源具有更高的熔炼收率; 不同 Mn/Al 质量比下均能形成含锰中间合金; 随着预热时间增加, 熔炼收率先增加后减小, 适宜的预热条件为: 4 kW 功率下预热 10 min; 随着精炼时间增加, 熔炼收率略有降低, 适宜的精炼条件为: 15 kW 功率下精炼 1 min。与“Mn+Al”为原料相比, 采用 MnAlNi 合金和 MnAl 合金制备稀土储氢合金的平均熔炼收率分别提高了 0.37% 和 0.78%。使用含锰中间合金制备 AB₅型稀土储氢合金在优化收率的同时不影响储氢性能, 在实际工业生产中具有较好效果。

关键词: 真空感应熔炼; 稀土储氢合金; 中间合金; 锰; AB₅型储氢合金

中图分类号: TG139

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.030

文章编号: 0253-6099(2025)05-0170-06

Preparation of Manganese-Containing Master Alloy and Its Application in Rare-Earth-Based Hydrogen Storage Alloys

ZHENG Bo¹, XIE Maoliang², REN Quanbing¹, LAI Huasheng², FENG Lan¹,

LIU Wenwen², PI Xiong¹, LI Ronghua¹, LIN Hao¹

(1. Jiangxi Jiangwu Haoyun Technology Co., Ltd., Nanchang 330096, Jiangxi, China; 2. Ganzhou Nonferrous Metallurgy Research Institute Co., Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Manganese-containing master alloy was prepared by vacuum induction melting. Effects of factors, such as manganese source, Mn/Al mass ratio, preheating time, and refining time on the composition of the manganese-containing master alloy were studied, and the influence of manganese-containing master alloys replacing the traditional “Mn + Al” feed on the prepared manganese-containing AB₅-type rare-earth-based hydrogen storage alloy was also discussed. The experimental results show that compared to manganese powder, manganese flakes as manganese source can bring higher melting yield. Manganese-containing master alloys can be formed with different Mn/Al mass ratios. As the preheating time is prolonged, the melting yield firstly increases and then decreases, and the optimal condition for preheating is 10 minutes at a power of 4 kW. As the refining time increases, the melting yield decreases slightly, and the optimal condition for refining is 1 minute at a power of 15 kW. The average melting yields of rare-earth-based hydrogen storage alloy prepared with MnAlNi alloy and MnAl alloy are increased by 0.37% and 0.78% respectively than that with “Mn + Al” as raw material. The preparation of AB₅-type rare-earth-based hydrogen storage alloy with manganese-containing master alloy can optimize the yield, with the hydrogen storage performance not influenced. The application of this method in practical industrial production brings good effect.

Key words: vacuum induction melting; rare-earth-based hydrogen storage alloy; master alloy; manganese; AB₅-type hydrogen storage alloy

储氢合金的性能与其元素组成有很大关联^[1-3], AB₅型稀土储氢合金常用 Co^[4]、Mn^[5-6]、Al^[7-8] 等代替

Ni 获得更好的性能。其中, Co 元素可改善 AB₅型储氢合金循环寿命, 因此传统商用 AB₅型储氢合金含有质

① 收稿日期: 2025-04-20

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20203BBE53055); 南昌市科技重大项目(洪科字(2023)137号); 江西钨业控股集团有限公司科技计划项目(JXTC-25A-04)

作者简介: 郑波(1981—), 男, 重庆合川人, 助理工程师, 研究方向为储氢材料以及器件。E-mail: m13970040923@163.com

通信作者: 谢懋良(1998—), 男, 江西赣州人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为金属功能材料。E-mail: 1191528058@qq.com

量分数约 10% 的 Co。当前,锂电池的大量应用挤压了镍氢电池市场^[9],市场对镍氢电池用储氢合金的成本提出了更高要求。钴价格昂贵,高钴含量的 AB₅型稀土储氢合金成本高,难以适应市场需求变化^[10],因此开发具有良好性能的低钴储氢合金以降低合金成本,是 AB₅型稀土储氢合金研究的重要内容^[11-14]。提高 Mn 含量并减少 Co 含量是降低 AB₅型稀土储氢合金成本的常用策略,而且 Mn 的加入可降低储氢合金平台氢压、减小滞后、改善活化性能^[15-17]。含锰 AB₅型稀土储氢合金通常采用电解锰片作为原料,金属锰的熔点相对较高(1 244 °C),在制备储氢合金过程中易漂浮在熔点较低的稀土熔液表面,导致熔化时间长、金属收率低、稳定性差等,对于锰含量较高的 AB₅型稀土储氢合金这种影响尤为严重。

为解决上述问题,本文采用含锰中间合金作为 AB₅型稀土储氢合金的原料,研究了制备工艺参数对含锰中间合金的影响,探讨了含锰中间合金替代纯金属锰投料制备含锰 AB₅型稀土储氢合金的影响。在制备 MnAl/MnAlNi 中间合金时,一方面利用铝热还原锰片表面的氧化膜,减少合金氧含量,保证配方准确;另一方面含锰中间合金熔点低于单质锰熔点,可缩短熔炼时间,减少金属烧损。研究成果可为含锰中间合金的制备及其在 AB₅型稀土储氢合金的应用方面提供借鉴。

1 实验材料与方法

实验使用原材料包括金属镧、铈、镍、铝、钴、电解锰片、锰粉等,纯度均大于 99.5%。

采用 ZG-PT203 型电子天平称量总质量约 2 kg 的原材料,其中含锰中间合金以金属铝、金属锰、金属镍为原料;AB₅型稀土储氢合金以含锰中间合金或锰、铝以及镧、铈、钇、镍等作为原料。采用 ZG-10 型真空中频感应熔炼炉熔炼合金。加入原料后,启动真空系统,待真空达到 5 mPa 后,启动中频电源,在功率 4 kW 条件下预热一定时间(脱除原料表面吸附的气体);预热完毕后关闭真空系统,充入氩气至 -0.02 MPa,随后升高功率至 20 kW,原料全部熔化后保持功率 2 min,然后降低功率至 14 kW 精炼一定时间;精炼完毕后进行浇铸,冷却后取出合金样品和炉渣称重并取样检测。

使用 Horiba Ultima2 型 ICP 原子发射光谱仪检测合金样品的元素组成及含量;使用 X'pert Power 型 X 射线衍射仪表征合金的物相组成;使用 4SDWIN 型 PCT 测试仪检测合金气态储氢性能;使用 CT-3008W-5V3A 型电池测试系统检测合金的电化学性能,详细方法为:取 0.2 g 合金粉与 0.8 g 羰基镍粉混合,使用

MK-60J 型压片机在 20 MPa 压力下保持 3 min 得到负极片,使用泡沫镍包覆负极片,在 6 mol/L 氢氧化钾为电解液、烧结氢氧化镍为对电极、Hg/HgO 电极为参比电极的条件下测试合金的电化学性能。

2 结果与讨论

2.1 不同锰源制备 MnAl 中间合金

锰的蒸汽压高,熔炼时易挥发且易氧化。锰源形态可能对合金收率和成分有很大影响,因此分别使用电解锰片和锰粉作为锰源,在功率 4 kW 下预热 10 min,在功率 15 kW 下精炼 1 min,固定投料 Mn/Al 质量比为 4.78,考察不同形态的锰源对合金收率的影响,结果如表 1 所示。从表 1 可知,使用锰片制备 MnAl 中间合金的收率可达 93.88%,使用锰粉时收率只有 69.61%。这是由于锰粉颗粒小、表面积大,熔炼时更易氧化且更易挥发。

表 1 不同锰源制备 MnAl 中间合金实验情况

Table 1 Experimental preparation of MnAl master alloys with different Mn sources

锰源种类	投入/g			产出/g		熔炼收率/%	合金 Mn/Al 质量比
	锰片	锰粉	铝块	合金	炉渣		
锰粉	0	1 801	377	1 516.0	674.6	69.61	4.28
锰片	1 801	0	377	2 044.6	112.0	93.88	4.88

不同锰源制备的 MnAl 中间合金 XRD 图见图 1。锰粉或锰片制备的 MnAl 中间合金均由 Al₂Mn₃ 相和 Mn 单质相构成,锰源仅影响收率,并不影响 MnAl 中间合金相结构。

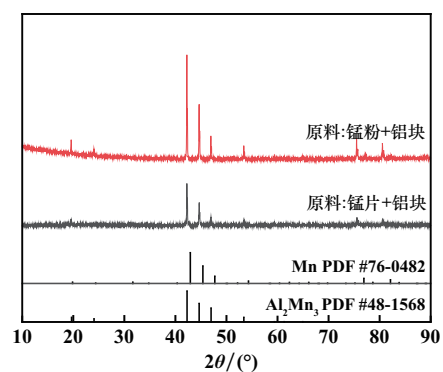


图 1 不同锰源制备的 MnAl 中间合金 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of MnAl master alloys prepared with different Mn sources

对比可知,选择锰片作为锰源制备含锰中间合金更好。

2.2 预热时间对制备 MnAl 中间合金熔炼收率的影响
金属锰在工业上是电解法制备的,为片状。锰片

与电解阴极板接触的一面光滑,另一面具有枝晶结构,表面粗糙,易吸附气体,因此,在真空感应熔炼炉中需要先小功率预热以脱除吸附气体(尤其是氧和水),减少熔炼渣产生,提高熔炼收率。在功率15 kW下精炼1 min,投料 Mn/Al 质量比 5.0 条件下,固定预热功率为 4 kW,预热时间对制备 MnAl 中间合金熔炼收率的影响见图 2。从图 2 可见,随着预热时间增加,熔炼收率先升高后降低。预热时间 10 min 时,熔炼收率达到峰值,为 96.13%;继续增加预热时间,熔炼收率反而下降。随着预热时间增加,实际 Mn/Al 质量比偏差先变小后趋于稳定,预热时间较短时,锰片吸附的气体未完全脱除,后续熔炼时形成锰氧化物,造成 Mn/Al 质量比偏差较大。因此,在功率 4 kW 条件下预热 10 min 为宜。

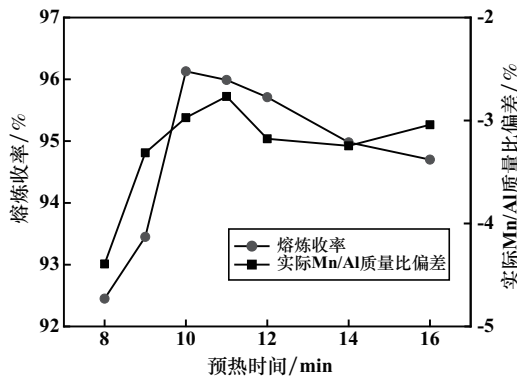


图 2 预热时间对制备 MnAl 中间合金熔炼收率的影响
Fig.2 Effect of preheating time on melting yield

2.3 精炼时间对制备 MnAl 中间合金熔炼收率的影响

真空感应熔炼过程中,待金属物料熔化后需进行精炼,使熔体与炉渣充分分离。在功率 4 kW 下预热 10 min,投料 Mn/Al 质量比 5.0 条件下,固定精炼功率为 15 kW,研究精炼时间对制备 MnAl 中间合金熔炼收率的影响,结果见表 2。可以看出,随着精炼时间增加,熔炼收率略有降低,但变化不明显。精炼功率 15 kW 条件下精炼 1 min 即可。

表 2 不同精炼时间制备 MnAl 中间合金的试验情况
Table2 Experimental preparation of MnAl master alloys with different refining time

精炼时间/ min	质量/g			熔炼 收率/%	Mn/Al 质量比
	投入金属	产出合金	产出炉渣		
1.0	2 016.0	1 938.0	77.6	96.13	4.85
1.5	2 016.0	1 931.2	80.5	95.79	4.82
2.0	2 016.0	1 929.4	81.7	95.70	4.86

2.4 不同 Mn/Al 质量比制备 MnAl 中间合金研究 不同 AB₅型储氢合金产品具有不同的 Mn/Al 质量

比,因此设计了不同 Mn/Al 质量比的 MnAl 中间合金,并在功率 4 kW 下预热 10 min,在功率 15 kW 下精炼 1 min,对产出的合金进行成分分析和 XRD 检测,结果见图 3~4。

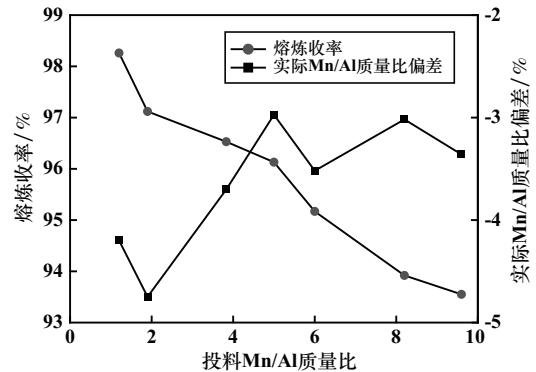


图 3 投料 Mn/Al 质量比对熔炼收率的影响
Fig.3 Effect of Mn/Al mass ratio on melting yield

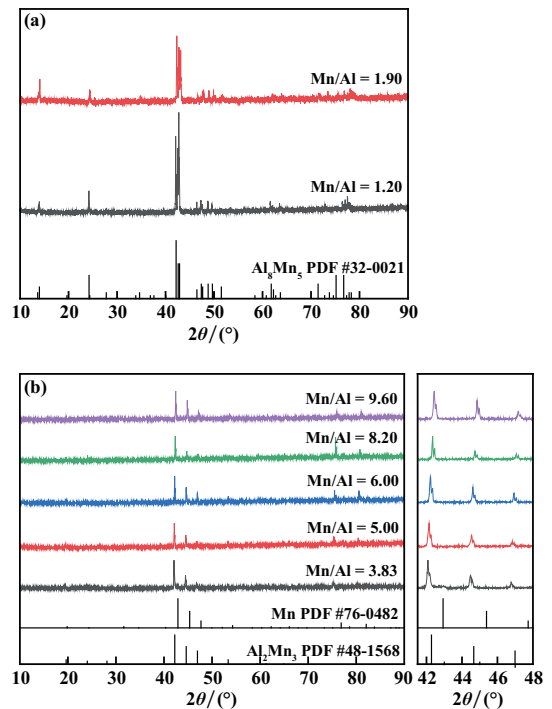


图 4 不同 Mn/Al 质量比 MnAl 中间合金 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of MnAl master alloys with different Mn/Al mass ratios

从图 3 看出,配料 Mn/Al 质量比为 1.20 时,熔炼收率达到 98.26%;随着配料 Mn/Al 质量比增加,熔炼收率逐渐降低,配料 Mn/Al 质量比为 9.60 时,熔炼收率降低至 93.55%。MnAl 中间合金实际 Mn/Al 质量比略低于配料 Mn/Al 质量比,这与锰片表面存在的氧化层在熔炼过程中造渣有关。

由图 4 可见,配料 Mn/Al 质量比为 1.20 和 1.90 时,MnAl 中间合金样品的主相为 Mn₈Al₅。随着 Mn/Al

质量比增大, MnAl 中间合金的主相为 Al_2Mn_3 和单质 Mn, 衍射峰位置随着 Mn/Al 质量比增大向高角度偏移。这是因为 Mn 的原子半径(130 pm)小于 Al 的原子半径(143 pm), Mn 含量增多导致晶格间距变小, 衍射峰向高角度方向移动。

2.5 不同掺 Ni 量制备 MnAlNi 中间合金研究

Ni 是 AB_5 型储氢合金中的主要元素, 因此选择镍作为中间合金元素之一, 在功率 4 kW 下预热 10 min, 在功率 15 kW 下精炼 1 min, 制备不同 Ni 含量的 MnAlNi 中间合金, Ni 含量对 MnAlNi 中间合金熔炼收率的影响见图 5, 图 6 为所制备的 MnAlNi 中间合金的 XRD 图谱。

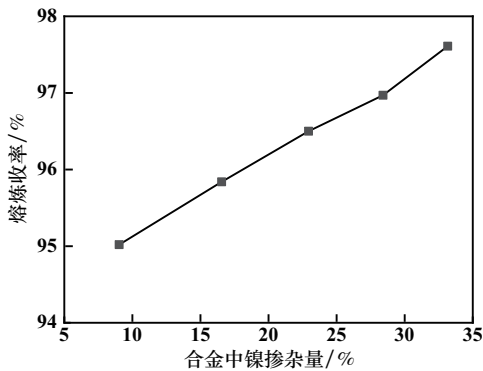


图 5 Ni 含量对 MnAlNi 中间合金熔炼收率的影响
Fig. 5 Effect of Ni content on melting yield of MnAlNi master alloys

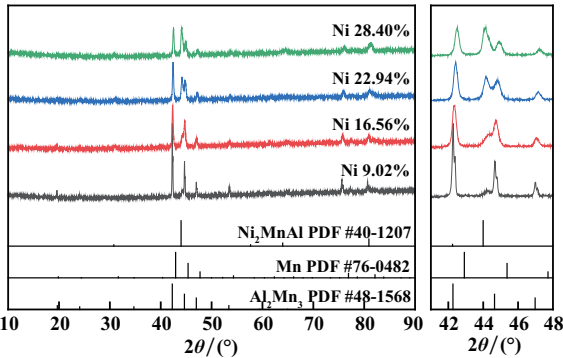


图 6 不同 Ni 含量 MnAlNi 合金 XRD 图谱
Fig. 6 XRD patterns of MnAlNi master alloys with different Ni content

熔炼收率随掺镍量增加而单调增加。主要原因是 Ni 在熔炼中几乎不损失, Ni 添加越多, 收率自然越高。随着 Ni 含量增加, Al_2Mn_3 相和 Mn 相的衍射峰强度降低, 而 Ni_2AlMn 相的衍射峰强度增强, 这归因于 Al_2Mn_3 相和 Mn 相逐渐转化为 Ni_2AlMn 相。归属于 Al_2Mn_3 相和 Mn 相的衍射峰位置向高角度偏移, 这是因为 Ni 原子半径(124 pm)小于 Mn 和 Al 原子半径

(130 pm 和 143 pm), 部分 Ni 以掺杂的形式进入 Al_2Mn_3 相和 Mn 相的晶格中, 晶体膨胀导致的。含锰中间合金掺入 Ni 后, 合金硬度增加且脆性降低, 合金难破碎, 在后续制备储氢合金时较难控制 MnAlNi 中间合金的添加量, 因此含锰中间合金应该尽量少掺或不掺金属镍。

2.6 采用含锰中间合金制备含锰 AB_5 型稀土储氢合金

分别采用“Mn+Al”、MnAlNi 合金和 MnAl 合金作为原料, 按照 $RE_{1.0}Ni_{4.7}Mn_{0.62}Al_{0.26}$ 配方制备含锰 AB_5 型稀土储氢合金, 实验结果见图 7。对 3 组收率数据进行 t 检验[图 7(b)和(c)], 3 组数据之间的 $p < 0.05$, 具有显著差异, 表明三者收率的变化并非实验偶然因素, 而是实验条件改变导致的。以“Mn+Al”为原料时, 平均收率 97.83%; 以 MnAlNi 合金为原料时, 平均收率 98.20%; 以 MnAl 合金为原料时, 平均收率 98.61%, 分别比“Mn+Al”为原料提高 0.37% 和 0.78%, 具有一定的经济价值。

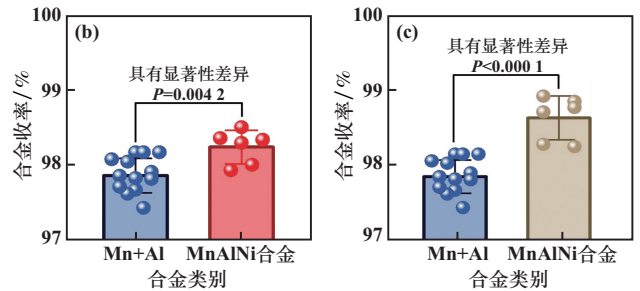
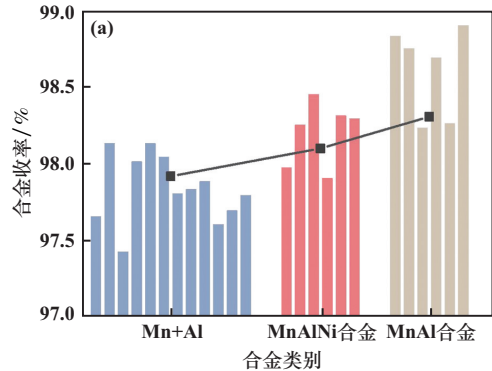


图 7 不同原料制备的含锰 AB_5 型稀土储氢合金的收率
Fig. 7 Yield of AB_5 -type rare-earth-based hydrogen storage alloys prepared with different raw materials

对“Mn+Al”和 MnAl 合金制备的含锰 AB_5 型稀土储氢合金的元素含量、气态储氢性能、电化学性能进行分析检测, 结果如图 8~9 所示。结果表明, “Mn+Al”和 MnAl 合金制备的储氢合金在元素含量上没有显著差异($P > 0.05$)。图 9 表明不同原料制备的储氢合金在性能上差异较小, 吸氢量在 1.270% 附近小幅波动, 放电容量在 323.0 mAh/g 附近小幅波动。采用 MnAl

合金替代“Mn+Al”投料在提高合金收率的同时不影响储氢合金的性能,使用含锰中间合金制备含锰 AB₅ 型稀土储氢合金具有一定效果。

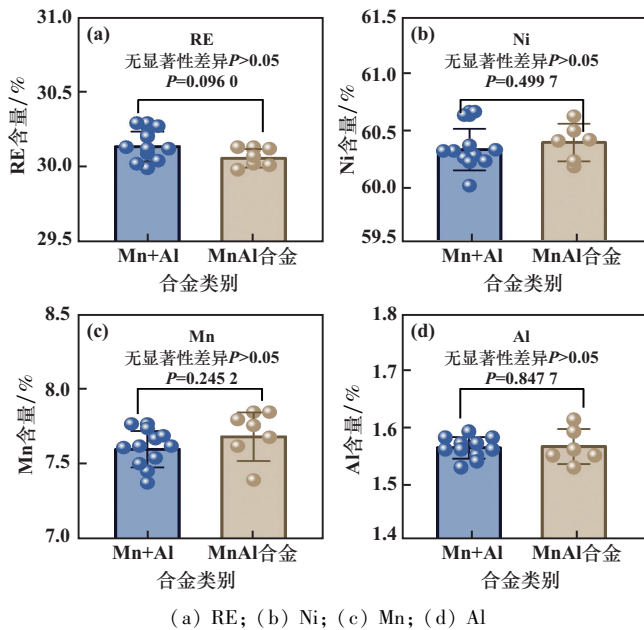


图8 不同原料制备的锰 AB₅ 型稀土储氢合金的元素含量

Fig. 8 Element contents of AB₅-type rare-earth-based hydrogen storage alloys prepared with different raw materials

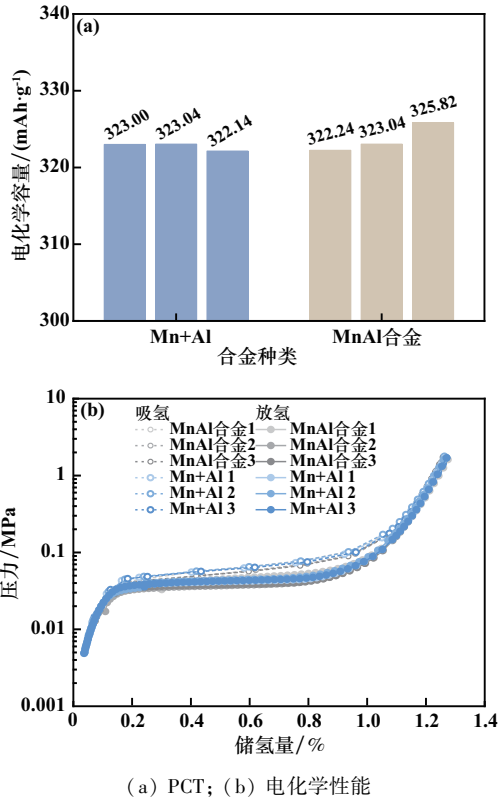


图9 不同原料制备的含锰 AB₅ 型稀土储氢合金的性能

Fig. 9 Properties of AB₅-type rare-earth-based hydrogen storage alloys prepared with different raw materials

3 结论

1) 在含锰中间合金的锰源选择方面,锰片作为锰源比锰粉具有更高的熔炼收率。在含锰中间合金制备条件方面,熔炼收率随预热时间增加,先增加后减小,在功率 4 kW 下预热 10 min 效果较好;熔炼收率随着精炼时间增加略有降低,在功率 15 kW 下精炼 1 min 为佳。不同 Mn/Al 质量比条件下均能形成合金,根据不同产品的 Mn/Al 质量比制备中间合金的方案可行。

2) 在制备含锰 AB₅ 型稀土储氢合金方面,以 MnAlNi 合金为原料收率为 98.20%,以 MnAl 合金为原料收率为 98.61%,分别比“Mn+Al”为原料的收率提高 0.37% 和 0.78%。

3) 采用含锰中间合金制备储氢合金对其性能几乎无影响,不同原料制备的 AB₅ 型稀土储氢合金的放电容量均在 323.0 mAh/g 附近小幅波动,吸氢量均在 1.270% 附近小幅波动,使用含锰中间合金制备 AB₅ 型稀土储氢合金可在优化合金收率的同时不影响合金性能。

参考文献 (References):

- [1] JOUBERT J M, PAUL-BONCOUR V, CUEVAS F, et al. LaNi₅ related AB₅ compounds: Structure, properties and applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 862: 158163
- [2] 刘雯雯, 赖华生, 王玉香, 等. La/Y 比对 A₂B₇ 型 La-Y-Ni 储氢合金性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 149-153.
LIU Wenwen, LAI Huasheng, WANG Yuxiang, et al. Effect of La/Y ratio on properties of A₂B₇-type La-Y-Ni hydrogen storage alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 149-153.
- [3] 王飞, 李丽君, 梅琼珍, 等. 汽车电池用 La-Mg-Ni 基储氢合金的元素替代及电化学性能[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4): 90-94.
WANG Fei, LI Lijun, MEI Qiongzhen, et al. Element substitution and electrochemical performance of La-Mg-Ni based hydrogen storage alloys for automotive batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4): 90-94.
- [4] ZHU Z D, ZHU S, LU H Q, et al. Stability of LaNi_{5-x}Co_x alloys cycled in hydrogen: Part I evolution in gaseous hydrogen storage performance [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(29): 15159-15172.
- [5] CHEN X Y, XU J, ZHANG W R, et al. Effect of Mn on the long-term cycling performance of AB₅-type hydrogen storage alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(42): 21973-21983.
- [6] ZHOU W H, ZHU D, TANG Z Y, et al. Improvement in low-temperature and instantaneous high-rate output performance of Al-free AB₅-type hydrogen storage alloy for negative electrode in Ni/MH battery: Effect of thermodynamic and kinetic regulation via partial Mn substituting[J]. Journal of Power Sources, 2017, 343: 11-21.
- [7] ZHOU W H, MA Z W, WU C L, et al. The mechanism of suppressing capacity degradation of high-Al AB₅-type hydrogen storage alloys

- at 60 °C [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(3):1801-1810.
- [8] 汤争耀,周万海,朱丁,等. Al含量对 AB₅型储氢合金电极低温和高倍率性能的影响[J]. 无机化学学报, 2017, 33(10):1881-1888. TANG Zhengyao, ZHOU Wanhai, ZHU Ding, et al. Effects of Al content on low-temperature and high-rate performance of MmNi_{4.0-x}-Co_{0.7}Mn_{0.3}Al_x alloys [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2017, 33(10):1881-1888.
- [9] 曹慧,柳召刚,徐津,等. 热处理对 La_{0.53}Ce_{0.47}Ni_{3.4}Co_{0.6}Mn_{0.3}Cu_{0.1}合金相结构和储氢性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(6):58-61. CAO Hui, LIU Zhaogang, XU Jin, et al. Effect of heat treatment on structure and hydrogen storage property of La_{0.53}Ce_{0.47}Ni_{3.4}Co_{0.6}Mn_{0.3}Cu_{0.1} alloy [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(6):58-61.
- [10] 罗磊. 超长寿命低钴 AB₅型储氢合金的制备及性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016. LUO Lei. Preparation and properties research of super long-life and low-Co AB₅-type hydrogen storage alloys [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [11] KHALDI C, MATHLOUTHI H, LAMLOUMI J, et al. Electrochemical study of cobalt-free AB₅-type hydrogen storage alloys[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(3):307-311.
- [12] CASINN J C S, SILVA F M, GUO Z P, et al. Effects of substituting Cu for Sn on the microstructure and hydrogen absorption properties of Co-free AB₅ alloys[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(38):17022-17028.
- [13] HAN X Q, WU W Y, BIAN X, et al. A performance study of AB₅ hydrogen storage alloys with Co being replaced by BeCu[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(18):7445-7452.
- [14] KAZAKOV A N, BLINOV D V, BODIKOV V Y et al. Hydrogen storage and electrochemical properties of annealed low-Co AB₅ type intermetallic compounds[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(25):13622-13631.
- [15] 周昱. AB₅型含 Mn 储氢合金的研究综述[J]. 包钢科技, 2014, 40(2):33-36. ZHOU Yu. Overview of researches on AB₅ hydrogen storage alloy containing Mn[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2014, 40(2):33-36.
- [16] 郑波,刘雯雯,任权兵,等. 不同 Mn 含量对 A₂B₇型 La-Y-Ni 储氢合金性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(8):82-88. ZHENG Bo, LIU Wenwen, REN Quanbing, et al. Effect of different Mn contents on properties of A₂B₇-type La-Y-Ni hydrogen storage alloy [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(8):82-88.
- [17] KONG L, CHEN B, YOUNG K, et al. Effects of Al- and Mn-contents in the negative MH alloy on the self-discharge and long-term storage properties of Ni/MH battery[J]. Journal of Power Sources, 2012, 213:128-139.
- 引用本文:郑波,谢懋良,任权兵,等. 含锰中间合金的制备及其在稀土储氢合金中的应用[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):170-175. ZHENG Bo, XIE Maoliang, REN Quanbing, et al. Preparation of manganese-containing master alloy and its application in rare-earth-based hydrogen storage alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):170-175.

(上接第 169 页)

- [12] JIA Y, NACEUR H, SAADLAOUI Y, et al. A comprehensive comparison of modeling strategies and simulation techniques applied in powder-based metallic additive manufacturing processes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110:1-29.
- [13] ZHANG Q, XIE J W, GAO Z Y, et al. A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes[J]. Materials & Design, 2019, 166:107618.
- [14] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2):775-784.
- [15] WANG C, LI K, HU X, et al. Numerical study on laser shock peening of TC4 titanium alloy based on the plate and blade model[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 142:107163.
- [16] WANG C, WANG L, WANG C L, et al. Dislocation density-based study of grain refinement induced by laser shock peening [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121:105827.
- [17] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 210(1/2):102-113.
- [18] AMARCHINTA H K, GRANDHI R V, LANGER K, et al. Material model validation for laser shock peening process simulation [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, 17(1):015010.
- [19] MYLAVARAPU P, BHAT C, PERLA M K R, et al. Identification of critical material thickness for eliminating back reflected shockwaves in laser shock peening: A numerical study[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142:107217.
- [20] ZHENG Z P, JIN X, BAI Y C, et al. Microstructure and anisotropic mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy under different scanning strategies[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831:142236.
- [21] 王学德,聂祥樊,臧顺来,等. 激光冲击强化“残余应力洞”的形成机制[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11):300-304. WANG Xuède, NIE Xiangfan, ZANG Shunlai, et al. Formation mechanism of “residual stress hole” strengthened by laser shock[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11):300-304.
- 引用本文:邓洋洋,杨扬. 激光粉末床熔融制备 Ti6Al4V 合金初始残余应力对激光冲击强化诱发残余应力场影响研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):164-169. DENG Yangyang, YANG Yang. Influence of initial residual stress of Ti6Al4V alloy prepared by laser powder bed fusion on laser shock peening-induced residual stress field [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):164-169.