

# Research on Hydrogen Storage Behavior of Mg Nanoparticles Synthesized by Acetylene Plasma

Yifu Xiong<sup>1</sup>, Lang Liu<sup>1</sup>, Jingwen Ba<sup>1</sup>, Wenyong Jing<sup>1</sup>, Xingguo Li<sup>2</sup>, Jun Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan

<sup>2</sup>Beijing National Laboratory for Molecular Sciences (BNLMS), The State Key Laboratory of Rare Earth Materials Chemistry and Applications, College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing  
Email: xiongyifu@yeah.net

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 26<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Acetylene gas was introduced in Mg metal plasma evaporation for Mg nanoparticles manufacture, and hydrogen storage behavior of Mg nanoparticles was systematically investigated. The results show that Mg nanoparticles' size decreased with the increase of acetylene concentration. Mg nanoparticles' size stopped decrease when acetylene concentration exceeded 21.7% molar concentration. Mg nanoparticles' size was about 40 nm and specific area was about 27.1 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup> when acetylene concentration was 21.7% molar concentration. Hydrogen absorption process could approaching saturation in 1 hour under 4 MPa hydrogen gas at 473 K. Hydrogen absorption activation energy was 61.6 kJ·mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>, and hydrogen desorption activation energy was 114 kJ·mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>. Hydrogen absorption reaction enthalpy  $\Delta H = -65.5$  kJ·mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>, and hydrogen absorption reaction entropy  $\Delta S = -122.7$  J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup> (H<sub>2</sub>). Hydrogen absorption capability wasn't attenuate after 30 times hydrogen absorption/desorption circulation in 4 MPa H<sub>2</sub> at 623 K.

## Keywords

Nanocrystallization, Magnesium, Hydrogen Storage Property, Mechanics

# 乙炔等离子体合成纳米Mg颗粒及贮氢性能研究

熊义富<sup>1</sup>, 刘浪<sup>1</sup>, 把静文<sup>1</sup>, 敬文勇<sup>1</sup>, 李星国<sup>2</sup>, 陈军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院材料研究所, 四川 绵阳

<sup>2</sup>北京分子科学国家实验室, 稀有材料化学与应用国家重点实验室, 北京大学化学与分子工程学院, 北京  
Email: xiongyifu@yeah.net

收稿日期: 2017年3月6日; 录用日期: 2017年3月26日; 发布日期: 2017年3月29日

文章引用: 熊义富, 刘浪, 把静文, 敬文勇, 李星国, 陈军. 乙炔等离子体合成纳米 Mg 颗粒及贮氢性能研究[J]. 材料科学, 2017, 7(2): 156-165. <http://dx.doi.org/10.12677/ms.2017.72020>

## 摘要

通过在等离子体蒸发金属Mg的过程中引入乙炔气体,制备了纳米Mg颗粒并进行了贮氢性能研究。结果表明,随着乙炔浓度的提高,制备出的纳米Mg颗粒的尺寸有减小的趋势,但乙炔浓度超过21.7%摩尔浓度时,制备出的纳米Mg颗粒的尺寸不再减小,当乙炔的摩尔浓度为21.7%时,纳米Mg颗粒尺寸为40 nm左右,其比表面积为 $27.1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。在473 K, 4 MPa氢气压力下1小时可吸氢接近饱和。其吸氢活化能为 $61.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ H}_2$ , 放氢活化能为 $114 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ H}_2$ , 其吸放氢反应焓为 $\Delta H = -65.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ H}_2$ , 反应熵为 $\Delta S = -122.7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} (\text{H}_2)$ , 且在623 K, 4 MPa  $\text{H}_2$ 及30次吸放氢循环下,其吸氢容量没有衰减。

## 关键词

纳米化, Mg, 贮氢性能, 机理

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

镁具有很高的储氢量(7.6 wt%)及循环性,资源丰富且价格低廉,对环境无污染,是一种很有潜力的储氢材料[1] [2] [3] [4] [5],但由于氢在 $\text{MgH}_2$ 中扩散较慢,在普通Mg的表面吸氢形成 $\text{MgH}_2$ 层后氢很难通过 $\text{MgH}_2$ 层继续与Mg反应,即使在673 K, 5 MPa氢气气氛下也不能很快吸氢,这些性能严重制约其在储氢领域中的广泛应用。

Zalaski等[6] [7] [8] [9] [10]研究发现,在相同温度和不活化的条件下,晶粒尺寸大于 $1 \mu\text{m}$ 的Mg几乎不吸氢,当晶粒尺寸细化到50 nm时Mg的吸氢速率明显加快,吸氢容量也显著增加;晶粒越细,吸/放氢性能的改善效果越显著,当尺寸小于0.9 nm时, $\text{MgH}_2$ 就可以在473 K的温度下放氢,此法无疑是改善镁基合金放氢特性的一种较好途径。G.Friedlmeier等[11]利用熔融快淬法制备了纳米结构的贮氢合金 $\text{Mg}_{0.87}\text{Ni}_{0.13}$  ( $\leq 150 \text{ nm}$ ),其贮氢量高达6 wt%,同样,T.Spassov等[12] [13]和K.Tanaka等[14]也利用熔融快淬技术合成了纳米Mg-Ni-RE (RE = La, Ce and Y)贮氢材料(20~30 nm),且认为纳米贮氢材料具有优异的储氢性能,其原因为: 1) 氢原子在大量的纳米晶界上或晶界上扩散容易; 2) 纳米晶极高的比表面积,使氢原子容易渗透到贮氢材料内部; 3) 纳米贮氢材料(20~30 nm)避免了氢原子透过氢化物层进行长距离扩散,而氢原子在氢化物层中的扩散是控制动力学性能的最主要因素。

本文通过在等离子体蒸发Mg的过程中引入乙炔气体,制备了平均尺寸约为40 nm的Mg的超小纳米颗粒,研究了Mg纳米颗粒尺寸随乙炔浓度的变化关系,探讨了纳米Mg颗粒尺寸对Mg吸放氢热力学和动力学的影响。

## 2. 实验过程

### 2.1. 纳米Mg颗粒的制备

纳米Mg颗粒是通过乙炔气氛的等离子体电弧蒸发镁块制备而成,仪器的原理示意图如图1所示。仪器由电弧反应腔、水冷铜底座、钨电极、热交换系统、粒子收集器、真空泵、气体循环泵和直流电源系统组成。用X射线衍射仪进行试样的相结构分析;用透射电镜(TEM)观察试样的微观形貌。

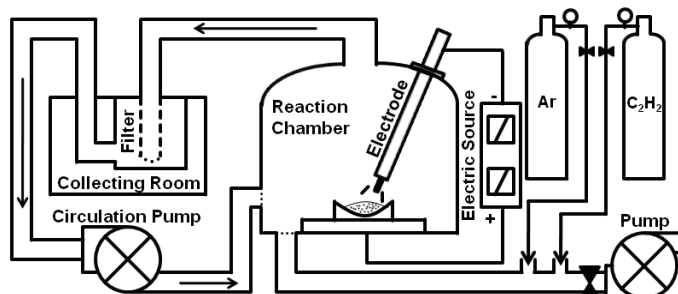


Figure 1. Schematic diagram of acetylene plasma arc apparatus  
图 1. 乙炔等离子体电弧设备原理示意图

## 2.2. 实验系统

图 2 给出了纳米 Mg 颗粒的贮氢性能测试系统。由氢气源、贮气罐、标准计量罐、反应器、真空泵、压力传感器、真空表、压力表、阀门及不锈钢管道等组成。用标准计量罐计量气体和标定管道及其它容器体积；用压力传感器指示吸/放氢过程的压力变化；数据采集系统对实验数据进行实时采集与记录。实验中准确称取纳米 Mg 颗粒约 3.0 g 装入反应器中，用 2XZ-4B 真空泵冷抽至 4 Pa 后，加热至 450℃ 继续抽空至 4 Pa，然后进行其贮氢性能测试。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 纳米 Mg 颗粒的微观表征

图 3 显示不同乙炔浓度下制备的纳米 Mg 颗粒的 XRD 谱图，从样品的 XRD 谱图上在  $\theta = 42.8^\circ$  没有出现 MgO 的衍射峰，推断样品被氧化的程度极小。乙炔浓度为 0% 时，合成的样品为纯纳米 Mg 颗粒。随着引入乙炔气体及乙炔浓度的升高，Mg 的 XRD 峰有所展宽，表明样品的晶粒尺寸有所减小。当乙炔浓度较高时，样品在  $\theta = 26.2^\circ$  出现了不尖锐的衍射峰，推测其为某种特殊结构的 C 的衍射峰，该衍射峰强度随乙炔浓度的升高而升高。

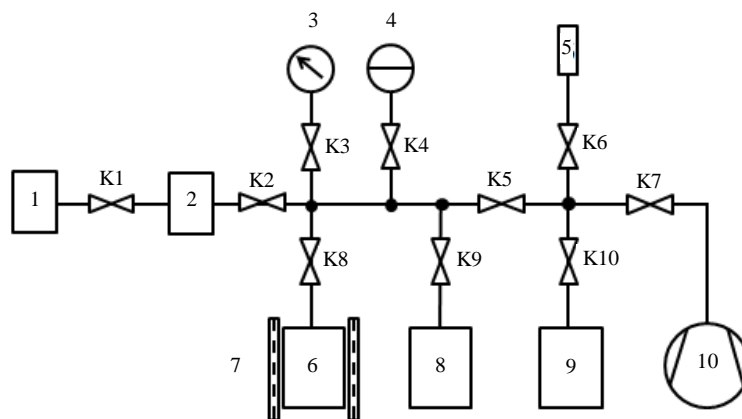
图 4 显示不同乙炔浓度下制备的纳米 Mg 颗粒的 TEM 照片。从 TEM 照片中可以清晰的看出，当等离子体中没有引入乙炔时，得到的纳米 Mg 颗粒的尺寸在 500 nm 左右；当等离子体中引入乙炔时，得到的纳米 Mg 颗粒尺寸明显减小，且随着乙炔浓度的增大，Mg 颗粒有进一步减小的趋势。图 4(f) 是对乙炔浓度为 21.7% 制备的 Mg 样品的 TEM 照片并进行统计得出的颗粒尺寸，约为 40 nm，同理，当乙炔浓度分别为 28%，21.7%，14.3%，5.3% 和 0% 制备的纳米 Mg 颗粒平均尺寸分别约为 40 nm，40 nm，100 nm，160 nm 和 500 nm。

### 3.2. 纳米 Mg 颗粒的 C 含量分布及 BET 分析

图 5、图 6 分别显示了不同乙炔浓度下制备的纳米 Mg 颗粒的尺寸、C 含量及 BET 分析结果。当乙炔浓度增大时，样品中的 C 含量随乙炔浓度呈线性升高趋势，而当乙炔浓度增大达到一定值时，纳米 Mg 颗粒的尺寸几乎不再减小，当乙炔浓度为 21.7% 时，样品中的 C 含量为 24.8%，平均颗粒尺寸约为 40 nm，其比表面积为  $27.1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。同样，样品的比表面积随乙炔浓度呈上升趋势，暗示其纳米 Mg 颗粒的尺寸逐渐降低。

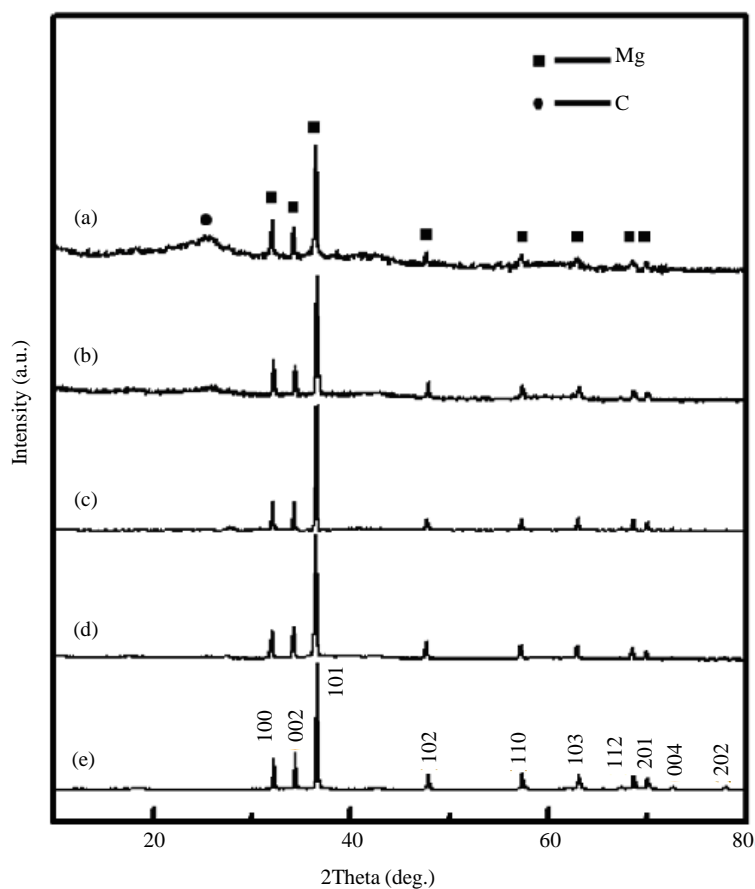
### 3.3. 纳米 Mg 颗粒的吸放氢动力学行为研究

图 7 显示了乙炔浓度分别为 28%，21.7%，14.3%，5.3% 和 0% 制备的样品在 473 K 及 4 MPa 氢气压



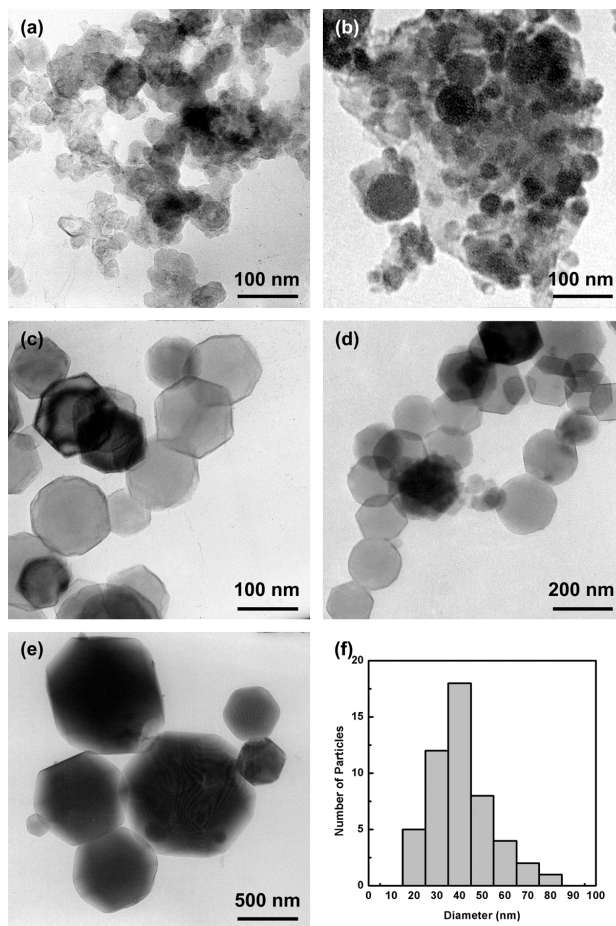
**Figure 2.** Schematic of hydrogen storage property test system. 1—Hydrogen; 2—Buffer; 3—Pressure sensor; 4—vacuum gauge; 5—sampling; 6—reactor; 7—electric cooker; 8—Standard Vessel; 9—uranium bed; 10—Vacuum pump; k1~k10—valve

**图 2.** 贮氢性能测试系统。1—氢气；2—缓冲器；3—压力传感器；4—真空规；5—取样；6—反应器；7—加热炉；8—标准罐；9—铀床；10—真空泵；k1~k10—阀门



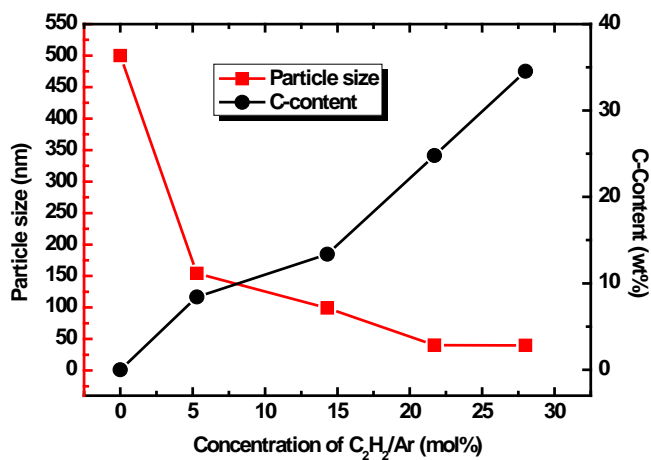
**Figure 3.** XRD patterns of Mg nanoparticles synthesized at different acetylene concentration. (a) 28%, (b) 21.7%, (c) 14.3%, (d) 5.3%, (e) 0%

**图 3.** 不同乙炔浓度下 Mg 纳米颗粒的 XRD 谱图。(a) 28%，(b) 21.7%，(c) 14.3%，(d) 5.3%，(e) 0%



**Figure 4.** TEM image of Mg nanoparticles synthesized at different acetylene concentration. (a) 28%, (b) 21.7%, (c) 14.3%, (d) 5.3%, (e) 0%, (f) 21.7%

**图 4.** 不同乙炔浓度下 Mg 纳米颗粒的 TEM 及尺寸分布。(a) 28%, (b) 21.7%, (c) 14.3%, (d) 5.3%, (e) 0%, (f) 21.7%



**Figure 5.** Carbon content and particle size of Mg nanoparticles synthesized at different acetylene

**图 5.** 不同乙炔浓度下制备的 Mg 纳米颗粒的尺寸和样品中 C 的含量

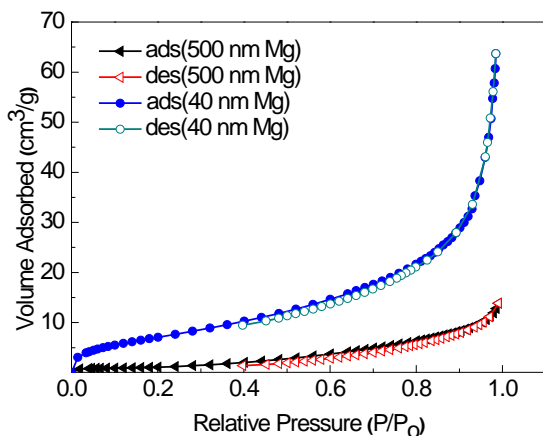


Figure 6. BET curve of Mg nanoparticles

图 6. Mg 纳米颗粒的 BET 曲线

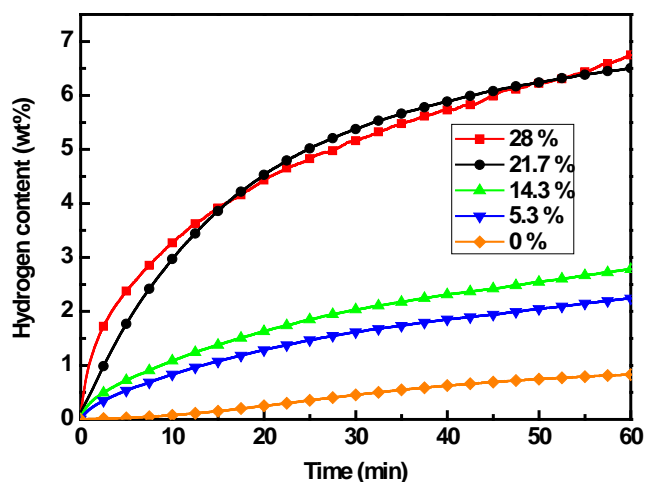
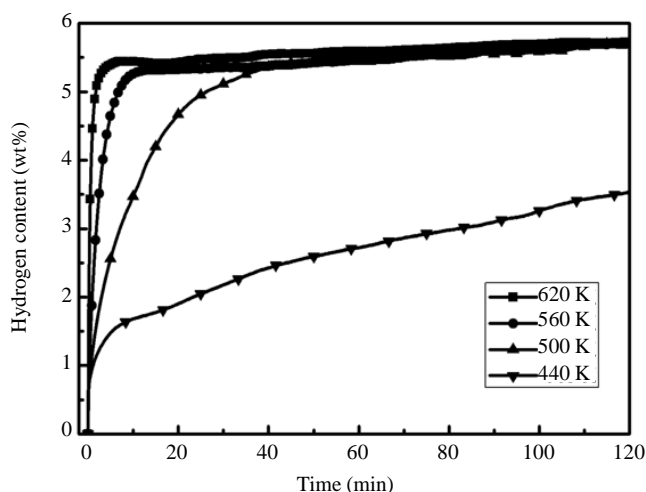


Figure 7. Hydrogen absorption curve of Mg nanoparticles synthesized at different acetylene concentration in 4 MPa hydrogen gas at 473 K

图 7. 不同乙炔浓度下制备的 Mg 纳米颗粒在 200°C 下的吸氢动力学曲线

力下的吸氢曲线。结果显示，乙炔浓度分别为 28%，21.7% 制备的样品吸氢速度很快，10 分钟内吸氢量可达 3 wt%，1 小时内吸氢量可达 6.5 wt%。乙炔浓度分别为 14.3%，5.3% 制备的样品吸氢较慢，1 小时吸氢量分别为 2.7 wt% 和 2.2 wt%。而乙炔浓度为 0% 制备的样品几乎不吸氢，1 小时吸氢量不足 1 wt%。由于纳米 Mg 颗粒的大小与乙炔浓度有近似反比的关系，故实验证明了在纳米尺度上，Mg 的吸氢速度随颗粒尺寸减小而增大。此外，由于普通的 Mg 在 673 K，5 MPa 氢气气氛下也不能很快的吸氢，而通过乙炔等离子体得到的 Mg 纳米颗粒可以在 473 K 及 4 MPa 氢气气氛吸氢，显然 Mg 的纳米化可以极大的提高其吸氢性质。

图 8 分别给出了氢气压力为 4 MPa、温度为 440 K、500 K、560 K 和 620 K 时，纳米 Mg 颗粒的吸氢量与时间的关系。可以看到，样品在 620 K 时吸氢量超过 5 wt% 仅需要不到 1 分钟。在 560 K 时，10 分钟内也可吸氢超过 5 wt%，接近吸氢完全饱和。样品在 500 K 时仍保持了较快的吸氢速度，30 min 吸氢可以接近饱和状态。在相对较低的 440 K 温度下，样品仍能缓慢的吸氢，两小时吸氢量达 3.5 wt%。



**Figure 8.** Time dependence of hydrogen absorption content in 4 MPa hydrogen gas at different temperature

**图 8.** 不同温度下乙炔摩尔浓度为 21.7% 制备的 Mg 纳米颗粒在 4 MPa 下的吸氢曲线

图 9 给出了 530 K、560 K、590 K、620 K 和 650 K 的温度下，乙炔摩尔浓度为 21.7% 制备的 Mg 纳米颗粒的氢化物在 ~100 Pa  $H_2$  下的放氢曲线。通常  $MgH_2$  在 573 K 以下不放氢，但通过氢化的超小 Mg 纳米颗粒制备的  $MgH_2$  却可以在 530 K 缓慢放氢，当温度升高到 560 K 时放氢速率加快，2 小时放氢量超过 4 wt%，当温度升高到 650 K 时，10 分钟放氢量可超过 5 wt%。通过 Arrhenius 公式 ( $\ln k = -E_0/RT + \ln A$ ) 计算得到该  $MgH_2$  纳米颗粒的放氢活化能为  $114 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} H_2$ 。

### 3.4. 纳米 Mg 颗粒吸放氢热力学性能研究

图 10 分别给出了 573 K、598 K、623 K 测量了 40 nm 左右纳米 Mg 颗粒的吸放氢 PCT 曲线。结果显示，纳米 Mg 颗粒的吸放氢曲线均只存在一个平台，该平台对应着 Mg 相  $MgH_2$  相的转变过程，也说明反应过程中样品中的 C 不参与 Mg 吸放氢的反应过程。由于样品中含有一定量的 C，因此最大吸氢量没有达到 Mg 的理论吸氢量 (7.6 wt%)。如果排除 C 的影响，则样品的吸氢量已经接近于理论上 Mg 的饱和吸氢量，这也同样说明样品中几乎没有  $MgO$  的存在，说明 Mg 纳米颗粒表面的无定形结构的 C，可以减少 Mg 的氧化。

图 11 为该样品的吸放氢过程的  $\ln P$  对  $1/T$  的函数曲线，利用 van't Hoff 公式  $\ln(P) = \Delta H/T + \Delta S$  分别获得材料吸/氢过程的 van't Hoff 方程，分别式(1)和式(2)，计算得到该样品的吸放氢反应焓  $\Delta H = -65.5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} (H_2)$ ，反应熵  $\Delta S = -122.7 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1} (H_2)$ 。

吸氢过程：

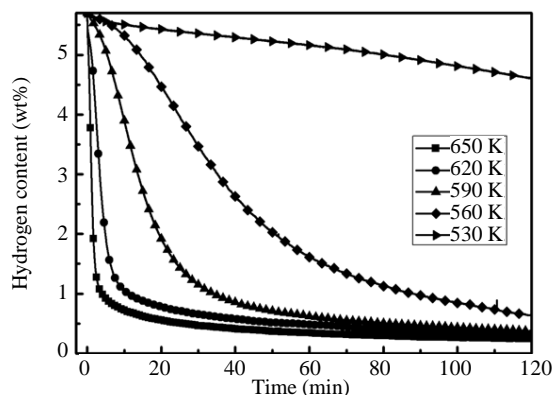
$$\ln(P/\text{bar}) = -7457/T + 14.62 \quad (1)$$

放氢过程：

$$\ln(P/\text{bar}) = -8301/T + 14.89 \quad (2)$$

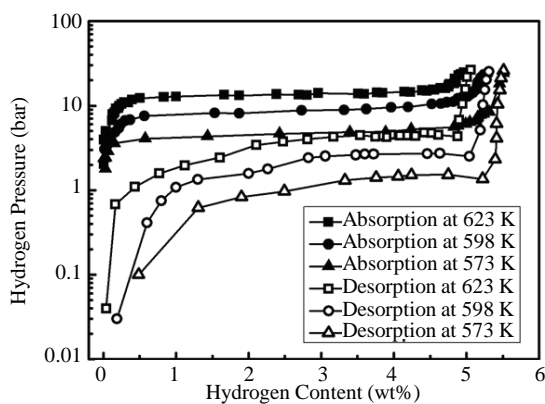
### 3.5. 纳米 Mg 颗粒循环吸放氢性能

图 12 显示了乙炔等离子体法制备的纳米 Mg 颗粒的循环吸放氢动力学曲线。测试过程为：将样品在真空下加热升温至 623 K，在该温度下 4 MPa 下吸氢 30 min，然后在 0.1 MPa 下放氢 30 min，重复循环



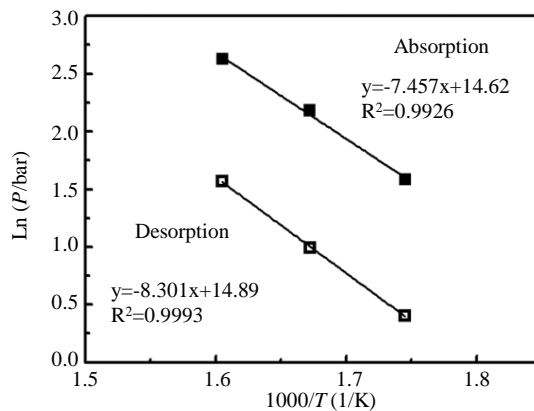
**Figure 9.** Hydrogen desorption curve of Mg nanoparticles synthesized by 21.7% acetylene concentration in 100 Pa hydrogen gas at different temperature

**图 9.** 不同温度下乙炔摩尔浓度为 21.7% 制备的 Mg 纳米颗粒的氢化物在 ~100 Pa H<sub>2</sub> 下的放氢曲线



**Figure 10.** Hydrogen absorption and desorption PCT curve of 40 nm Mg nanoparticles at different temperature

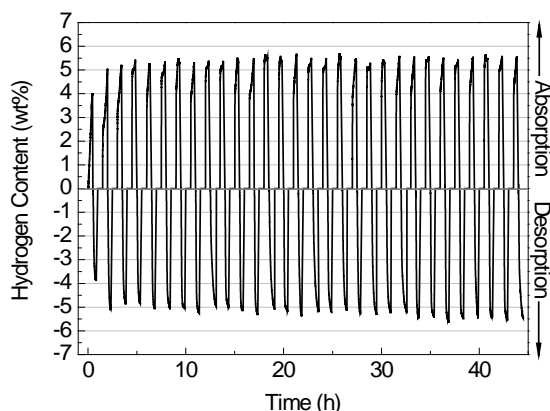
**图 10.** 乙炔摩尔浓度为 21.7% 制备的 Mg 纳米颗粒的吸放氢 PCT 曲线



**Figure 11.** The relationship between  $\ln P$  and  $1/T$  of hydrogen absorption and desorption process

**图 11.** 乙炔摩尔浓度为 21.7% 制备的 Mg 纳米颗粒的温度与  $1/T$  关系





**Figure 12.** Hydrogen absorption and desorption circulation kinetics curve at 623 K of 40 nm Mg nanoparticles  
**图 12.** 623 K 下 40 nm Mg 纳米颗粒循环动力学曲线

至 30 次。可以看出, 样品在第二个循环过程吸放氢量即可接近 Mg 的理论贮氢密度(样品中含有 C, 理论吸氢量为  $(1 - 24.78\%) \times 7.6\% = 5.7\%$ ), 而 30 个循环过程以后, 样品的吸放氢量没有衰减, 显示了该纳米颗粒具有很好的吸放氢循环性质。

#### 4. 结论

通过上述实验, 得出以下结论:

1) 通过在等离子体蒸发金属 Mg 的过程中引入乙炔气体, 可制备出具有不同颗粒大小的 Mg 纳米颗粒。随着乙炔浓度的提高, 制备出的 Mg 纳米颗粒的尺寸有减小的趋势, 但乙炔浓度超过 21.7% 摩尔浓度时, 制备出的 Mg 纳米颗粒的尺寸不再减小。

2) 制备的 40 nm 左右的 Mg 纳米颗粒在 473 K, 4 MPa 氢气压力下 1 小时可吸氢接近饱和。其吸/放氢活化能分别为  $61.6 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} (\text{H}_2)$  和  $114 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} (\text{H}_2)$ , 其吸/放氢性能较块体 Mg 得到了较大的改善。

3) Mg 纳米颗粒具有稳定的循环性能, 在 623 K, 4 MPa  $\text{H}_2$  条件下 30 次循环容量没有衰减。

#### 致 谢

在项目实施过程中, 北京大学化学与分子工程学院的李星国教授、陈军博士参与了纳米 Mg 基合金的制备; 郎丁木、王勤国等进行大量的样品微观结构表征; 敬文勇、何明民、常元庆、宋智蓉、魏英等进行了大量的氢化与去氢化实验, 在此一并感谢!

#### 参考文献 (References)

- [1] Zaluski, L., Zaluska, A. and Strom-Olsen, J.O. (1995) Hydrogen Absorption in Nanocrystalline  $\text{Mg}_2\text{Ni}$  Form by Mechanical Alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, **217**, 245-249. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01348-9](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01348-9)
- [2] Oeimo, S. and Fujii, H. (1996) Hydriding Properties of the  $\text{Mg}_2\text{Ni-H}$  System Synthesized by Reactive Mechanical Grinding. *Journal of Alloys and Compounds*, **232**, L16-L19. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)02079-9](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)02079-9)
- [3] Berlouis, L.E.A., Cabrera, E., Hall-Barientos, E., et al. (2000) A Thermal Analysis Investigation of the Hydriding Properties of Nanocrystalline Mg-Ni Based Alloys Prepared by High Energy Ball Milling. *Journal of Alloys and Compounds*, **305**, 82-89. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00711-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00711-8)
- [4] Zaluski, L., Zaluska, A. and Strom-Olsen, J.O. (1997) Nanocrystalline Metal Hydrides. *Journal of Alloys and Compounds*, **253-254**, 70-79. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(96\)02985-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(96)02985-4)
- [5] Oeimo, S., Fujii, H. and Yoshino, T. (1995) Reactive Mechanical Grinding of ZrNi under Various Partial Pressures of Hydrogen. *Journal of Alloys and Compounds*, **217**, 287-294. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01354-3](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01354-3)

- [6] Zaluski, L., Zaluska, A. and Ström-Olsen, J.O. (1997) Nanocrystalline Metal Hydrides. *Journal of Alloys Compounds*, **253-254**, 70-79. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(96\)02985-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(96)02985-4)
- [7] 熊义富, 敬文勇, 张义涛. 纳米 Mg-Ni 合金吸放氢过程的热力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(1): 138-140.
- [8] Liang, G., Huot, J., Boily, S., *et al.* (1999) Hydrogen Storage Properties of Nanocrystalline Mg<sub>1.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>Ni Made by Mechanical Alloying. *Journal of Alloys Compounds*, **282**, 286-290. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00853-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00853-6)
- [9] Liang, G., Boily, S., Huot, J., *et al.* (1998) Hydrogen Absorption Properties of a Mechanically Milled Mg-50wt.% La-Ni<sub>5</sub> Composite. *Journal of Alloys Compounds*, **268**, 302-307. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00607-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00607-5)
- [10] Yamamoto, K., Orimo, S., Fujii, H., *et al.* (1999) Hydriding Properties of the Heat-Treated MgNi Alloys with Nonstructural Designed Multiphase. *Journal of Alloys Compounds*, **293-295**, 546-551. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00409-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00409-0)
- [11] Friedlmeier, G., Arakawa, M., Hirai, T., *et al.* (1999) Preparation and Structural, Thermal and Hydriding Characteristics of Melt-Spun Mg-Ni Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **292**, 107-117. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00285-6)
- [12] Spassov, T. and Köster, U. (1998) Thermal Stability and Hydriding Properties of Nanocrystalline Melt-Spun Mg<sub>63</sub>Ni<sub>30</sub>Y<sub>7</sub> alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **279**, 279-286. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00680-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00680-X)
- [13] Spassov, T. and Köster, U. (1999) Hydrogenation of Amorphous and Nanocrystalline Mg-Based Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **287**, 243-250. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00035-3)
- [14] Tanaka, K., Kanda, Y., Furuhashi, M., *et al.* (1999) Improvement of Hydrogen Storage Properties of Melt-Spun Mg-Ni-RE Alloys by Nanocrystallization. *Journal of Alloys and Compounds*, **293-295**, 521-525. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00477-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00477-6)

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)