

# 多向锻造对新能源汽车电池负极材料 $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$ 储氢合金组织与性能的影响

王广钢<sup>1</sup>, 葛动元<sup>2</sup>

(1. 商丘职业技术学院 交通学院, 河南 商丘 476000; 2. 广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545006)

**摘要:**  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金是一种具有较大发展前景的钒基储氢合金。以  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金为研究对象, 采用多向锻造方法对其试样进行了锻造, 并在显微组织、吸放氢性能以及充放电循环稳定性方面与锻前毛坯试样进行了对比分析。结果表明: 多向锻造细化了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的内部晶粒, 改善了合金的吸放氢性能以及充放电循环稳定性。多向锻造  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的平均晶粒尺寸为 13  $\mu m$ 、最大吸氢量为 2.854 wt.%、第 1 次充放电循环后即达到最大放电容量 337.1  $mAh \cdot g^{-1}$ 、充放电循环 1000 次后放电容量衰减率为 15.0%。相较于锻造前的毛坯试样, 经多向锻造处理后的  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金锻件, 平均晶粒尺寸减小 35  $\mu m$ , 最大吸氢量提高 1.836%, 最大放电容量增大 181.4  $mAh \cdot g^{-1}$ , 放电容量衰减率减小 56.6%。

**关键词:**  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金; 多向锻造; 显微组织; 吸放氢性能; 充放电循环稳定性

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.002

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0007-06

## Effect of multi-directional forging on microstructure and properties of $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$ hydrogen storage alloy for negative electrode material of new energy automotive batteries

Wang Guanggang<sup>1</sup>, Ge Dongyuan<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Shangqiu Polytechnic, Shangqiu 476000, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:**  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy is a vanadium-based hydrogen storage alloy with great development prospects. Taking  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy as the research object, the  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy sample was forged by multi-directional forging method, and a comparative analysis was conducted on the microstructure, hydrogen absorption and desorption properties, and charge-discharge cycle stability with those of the billet samples before forging. The results show that the multi-directional forging refines the grain inside the  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy and improves its hydrogen absorption and desorption properties and charge-discharge cycle stability. The average grain size of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy after multi-directional forging is 13  $\mu m$ , the maximum hydrogen absorption capacity is 2.854 wt.%, the maximum discharge capacity reaches 337.1  $mAh \cdot g^{-1}$  after the first charge-discharge cycle, and the discharge capacity decay rate is 15.0% after 1000 charge-discharge cycles. Compared with the billet sample before forging, the average grain of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy sample after multi-directional forging decreases by 35  $\mu m$ , and the maximum hydrogen absorption capacity increases by 1.836%, the maximum discharge capacity increases by 181.4  $mAh \cdot g^{-1}$ , and the discharge capacity decay rate decreases by 56.6%.

**Key words:**  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy; multi-directional forging; microstructure; hydrogen absorption and desorption properties; charge-discharge cycle stability

随着全球能源结构的转型和环保需求的上升,

氢能作为一种清洁、高效的能源载体, 受到越来越多的关注。储氢合金因其良好的氢吸附性能和较高的储氢密度, 成为氢能存储和运输技术中的关键材料之一。钒基储氢合金因其优异的吸放氢特性, 在氢动力汽车及其他新能源汽车电池中展现出广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。近年来, 关于钒基储氢合金的研究

收稿日期: 2024-12-04; 修订日期: 2025-03-17

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (24B470006)

作者简介: 王广钢 (1986-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: qk2498@163.com

逐渐增多,许多学者对其显微组织与氢吸附机理进行了深入分析。郑辉等<sup>[3]</sup>研究了基于模糊 PID 控制的铸造  $V_3TiNi_{0.56}Cr_{0.35}$  储氢合金的性能,发现与常规 PID 控制相比,熔炼和浇注过程采用模糊 PID 控制时合金的平均晶粒尺寸减小  $3.5\ \mu m$ ,吸氢量从  $1.356\ wt.\%$  增大至  $1.495\ wt.\%$ ,充放电循环 8 次后的放电容量增大了  $83\ mAh \cdot g^{-1}$ 。李荣等<sup>[4]</sup>探讨和分析了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}Cr_x$  ( $x = 0.0 \sim 0.3$ ) 储氢合金的微结构及电化学性能,结果发现,添加 Cr 可使合金循环性能得到明显改善,  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}Cr_{0.3}$  储氢合金经过 10 次充放电循环后,容量保持率为 99%,且随 Cr 含量增加,合金中氢的扩散系数逐渐增大。刘守平等<sup>[5]</sup>研究了  $V_3TiNi_{0.56}M_x$  ( $M = Al, Cr, x = 0, 0.1, 0.3$ ) 储氢合金的耐腐蚀性能,发现在  $V_3TiNi_{0.56}$  合金中添加 Al 和 Cr 元素可提高钒基固溶体贮氢合金的耐碱液腐蚀能力。李荣等<sup>[6]</sup>研究了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的电化学性能,结果表明,铸态  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  ( $M = Al, Cr, x = 0.01, 0.3$ ) 储氢合金的最大放电容量为  $350\ mAh \cdot g^{-1}$ 。余祖孝等<sup>[7]</sup>分析了热处理对  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金电化学性能的影响,发现 1173 和 1573 K 热处理后,合金中第二相 TiNi 的衍射强度下降,合金组织分布更为均匀,晶粒变大,热处理后合金充放电循环稳定性及高倍率放电性能得到改善。目前,虽然人们对钒基储氢合金的研究已经有了一定的基础,但仍需进一步改善其显微组织和综合性能。多向锻造作为一种先进的塑性变形工艺,被广泛应用于各类合金的加工中。多向锻造不仅能够有效细化合金的晶粒结构,还能改善其综合性能。Yousefi D 等<sup>[8]</sup>分析了多道次多向锻造对富硅共析 ZA 合金摩擦性能的影响,发现经 5 道次多向锻造的 ZA22-4Si 合金具有最佳的耐磨性能,当外加载荷为 10 和 30 N 时,其磨损率分别比铸态 ZA22 合金低 80% 和 75%。张志雄等<sup>[9]</sup>进行了马氏体组织 Ti-6Al-4V 钛合金多向等温锻造组织演变及力学性能强化的研究,发现多向等温锻造后合金的室温拉伸屈服强度为 906 MPa,抗拉强度为 954 MPa,伸长率为 16.7%。郭强等<sup>[10]</sup>探讨和分析了多向锻造工艺对 AZ80 镁合金显微组织和力学性能的影响,发现经 7 道次锻压,材料硬度、屈服强度和抗拉强度达到最大,分别为 87.3 HB、258.78 MPa 和 345.04 MPa。王帆等<sup>[11]</sup>分析了室温下多向锻造及时效处理对 7075 铝合金力学性能和摩擦磨损性能的影响,发现经多向锻造及时效处理后 7075 铝合金的耐磨性提高了 47.4%。车鑫等<sup>[12]</sup>分析了 T6 热处理对

多向锻态 VWZ113K 稀土镁合金微观组织及力学性能的影响,发现热处理后多向锻态 VWZ113K 稀土镁合金的屈服强度、抗拉强度及伸长率分别可达 302 MPa、398 MPa 及 11.5%。目前,针对钒基储氢合金在多向锻造过程中组织结构变化及其性能影响的研究相对较少,尚未形成广泛的学术共识。本研究旨在系统探讨  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金多向锻造后的微观组织变化情况以及多向锻造如何影响  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的吸放氢性能和充放电循环稳定性。通过试验和分析,本文期望揭示多向锻造在改善储氢合金性能方面的独特优势,以便为相关材料的开发与应用提供理论依据和数据支持。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

选用真空中频感应熔炼后均匀化处理的  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金铸锭,均匀化处理工艺为  $820\ ^\circ C \times 14\ h$ 。采用线切割方法切取多向锻造用  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金坯料,坯料为正方体,尺寸为  $100\ mm \times 100\ mm \times 100\ mm$ ,其化学成分如表 1 所示。 $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的多向锻造在 1000 t 油压机上进行,多向锻造后均未进行热处理,具体的工艺流程如图 1 所示,工艺参数如表 2 所示。

表 1  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金坯料的化学成分  
(%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy billet (%, mass fraction)

化学元素	Ti	Ni	Al	其他杂质元素	V
设计含量	$20.3 \pm 0.3$	$13.9 \pm 0.3$	$1.1 \pm 0.3$	$\leq 0.20$	余量
实测含量	20.389	13.886	1.195	0.112	余量

### 1.2 试验方法

为了更好地研究多向锻造对新能源汽车电池负极材料  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金组织与性能的影响,以  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金锻前坯料作为对比试样。

(1) 显微组织分析:采用线切割方法在  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金锻前坯料(锻前  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金)及多向锻造锻件(锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金)的中部位置切取尺寸为  $\Phi 15\ mm \times 10\ mm$  的金相试样,在完成试样的磨制、精细抛光和金相腐蚀(80 mL 硝酸和 40 mL 氢氟酸混合溶液)步骤之后,利用 BX53M 型号的金相显微镜对合金试样的微观结构进行观察与分析。

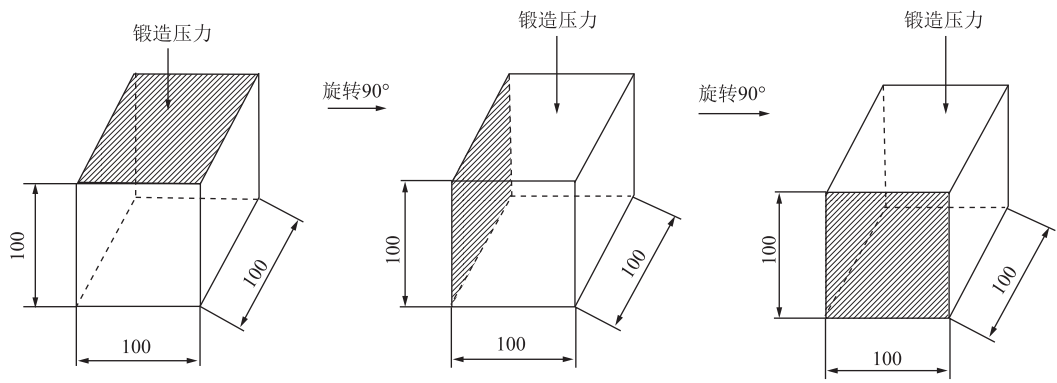


图 1  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金多向锻造工艺流程

Fig. 1 Multi-directional forging process flow of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy

表 2  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金多向锻造工艺参数

Table 2 Process parameters for multi-directional forging of $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$ hydrogen storage alloy						
锻造方式	始锻温度/℃	终锻温度/℃	锻造压力/kN	锻造变形量/%	模具预热温度/℃	锻造道次/次
3 组对称面依次锻造	1100	980	4700	20	400	1

(2) 吸放氢性能测试：在锻前和锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金中部切取吸放氢性能测试块，破碎成 60~90  $\mu m$  粉末并称取 2 g，使用 H-Sorb 2600 型全自动储氢材料 PCT (Pressure Cooker Test) 测试仪，在室温条件下进行合金试样的吸放氢性能测试。测试前，合金试样进行 3 次活化，具体的活化流程为：①室温抽真空至 3 Pa；②升温至 300  $^{\circ}C$  后并排空；③高温抽真空至 100 Pa；④降温至室温后通入 1000 mL 氢气；⑤静置 10 min 后排出氢气。将步骤 1~步骤 5 循环 3 次。

(3) 充放电循环稳定性：在锻前和锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金中部切取吸放氢性能测试块，破碎成 60~90  $\mu m$  粉末并称取 5 g，再与 5 g 金属镍粉、120 g 聚四氟乙烯乳液混合均匀后，涂覆在尺寸为 12 mm $\times$ 6 mm $\times$ 0.5 mm 的泡沫镍上，经过 90  $^{\circ}C$  $\times$ 45 min 烘干，得到充放电循环稳定性测试用的工作电极，选择甘汞电极为参比电极、石墨电极为辅助电极，5 mol $\cdot$ L $^{-1}$  氢氧化钾溶液作为电解液，使用 PARSTAT 4000A 型电化学工作站进行合金样品的室温充放电循环稳定性性能评估。在充入电量为 90 mA、释放电量为 45 mA、电压降至-0.4 V 时停止，进行连续 1000 次充放电过程。合金样品的充放电循环稳定性通过放电容量衰减率来衡量。该衰退率定义为初始最大放电容量与经历 1000 次循环后的放电容量之间的差值与初始最大放电容量的百分比。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织

锻前和锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的显微组织如图 2 所示。从图 2a 可知，锻前  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的晶粒较为粗大，经统计平均晶粒尺寸约为 48  $\mu m$ ；从图 2b 可知，锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的晶粒较锻前细小，晶粒呈细小等轴晶分布，平均晶粒尺寸约为 13  $\mu m$ ，比锻前的平均晶粒尺寸减小了 35  $\mu m$ 。由此可知，多向锻造显著细化了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的内部晶粒，并促使其内部晶粒以细小等轴晶形态均匀分布。 $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金是一种固溶体合金，是由钒基固溶体主相和沿钒基固溶体主相晶界分布的 TiNi 基第二相组成<sup>[3-4]</sup>。在吸放氢过程中，钒基固溶体主相为吸氢相，沿晶界以网状结构分布的 TiNi 基第二相为氢原子提供进出通道并作为导电集流体和电催化相<sup>[5-7]</sup>。

### 2.2 吸放氢性能

图 3 为锻前和锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金在吸氢与放氢过程中的 PCT 曲线。观察该曲线可以发现，与锻前合金相比，多向锻造  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的最大吸氢量明显增大、放氢平台压力明显减小。其中，多向锻造  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的最大吸氢量为 2.854 wt.%，较锻前增大了 1.836 wt.%；多向锻造  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的放氢平台压力约为



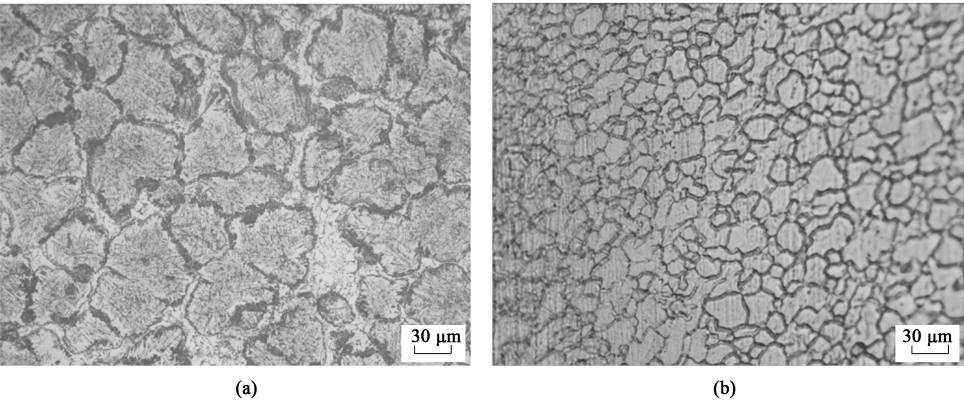


图 2  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的显微组织  
(a) 锻前 (b) 多向锻造后  
Fig. 2 Microstructures of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy  
(a) Before forging (b) After multi-directional forging

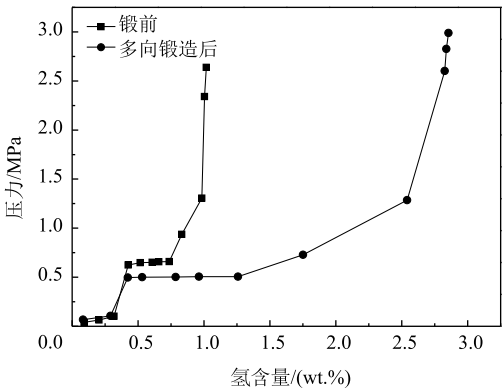


图 3  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金吸放氢 PCT 曲线  
Fig. 3 Hydrogen absorption and desorption PCT curves of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy

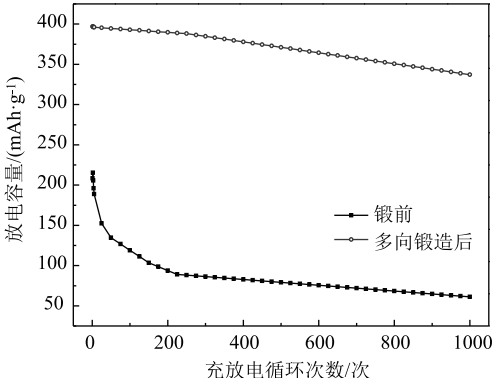


图 4  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金充放电曲线  
Fig. 4 Charge and discharge curves of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  hydrogen storage alloy

0.5 MPa, 较锻前坯料下降了 0.15 MPa。由此可以看出, 多向锻造  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金具有较为优异的吸放氢性能, 且多向锻造显著改善了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的吸放氢性能。

2.3 充放电循环稳定性

锻前和锻后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的充放电曲线如图 4 所示, 充放电性能指标如表 3 所示。从图 4 和表 3 可以看出: 锻前  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金在充放电循环第 2 次后达到最大放电容量 ( $215.4\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 充放电循环 1000 次后放电容量仅为  $61.1\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ,

放电容量衰减率高达 71.6%; 而多向锻造后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金在充放电循环第 1 次后便达到最大放电容量 ( $396.8\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 充放电循环 1000 次后放电容量为  $337.1\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ , 放电容量衰减率为 15.0%。与锻前相比, 多向锻造后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的最大放电容量增大了  $181.4\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 、充放电循环 1000 次后的放电容量衰减率减小 56.6%。观察分析表明, 多向锻造有效提升了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金在充放电过程中的循环稳定性。

表 3  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金充放电性能指标

Table 3 Charge and discharge performance indicators of $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$ hydrogen storage alloy					
合金试样	初始放电容量/ ( $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ )	最大放电容量/ ( $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ )	达到最大放电容量的 充放电循环次数/次	充放电循环 1000 次后的 放电容量/( $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ )	放电容量衰减 率/%
锻前	208.3	215.4	2	61.1	71.6
多向锻造后	396.8	396.8	1	337.1	15.0

## 2.4 讨论与分析

$V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的晶粒大小对吸放氢性能产生显著影响。在本试验中,锻前合金为真空中频感应熔炼后均匀化处理的  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金,晶粒粗大,比表面积小,导致氢气分子与  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金接触面积较少,阻碍了氢气的吸附和脱附,且粗大的晶粒还导致合金内部的晶界数量减少,最大吸氢量偏小,影响合金的吸放氢性能;此外,晶粒越粗大,氢气分子在合金内部的扩散路径越长,扩散阻力越大,导致吸放氢速率降低、放氢平台压力升高,合金的吸放氢性能较差<sup>[5-7]</sup>。采用多向锻造方法对  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金进行锻造时,对合金试样的3组对称面依次锻造,使得合金的晶粒在多个方向上发生剧烈的塑性变形,从而实现晶粒显著细化<sup>[9-10]</sup>。与锻前相比,多向锻造后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的晶粒得到明显细化,表面积明显增大,使得氢气分子与  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金表面的接触面积大大增多,有利于氢气的吸附和脱附过程,细小晶粒还会导致合金内部晶界数量增多,合金吸氢量增大,显著提高合金吸放氢性能;此外,晶粒细小时,氢气分子在合金内部的扩散路径越短,扩散阻力减小,使得吸放氢速率提高、放氢平台压力下降,  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金展现出更加优异的吸放氢性能<sup>[5-7,13]</sup>。

$V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的晶粒大小对充放电循环稳定性也产生显著影响。在本试验中,锻前合金晶粒粗大、内部应力集中,在充放电循环过程中易产生裂纹和脱落现象,导致充放电循环稳定性下降<sup>[6,14]</sup>。与锻前合金相比,多向锻造后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的晶粒显著细化,有利于降低应力集中,避免合金在充放电循环过程中过早出现裂纹和脱落现象,显著提高了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的充放电循环稳定性<sup>[5-7,14]</sup>。由此可以看出,多向锻造使  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金晶粒显著细化,获得均匀分布的等轴晶粒,显著提升了合金的吸放氢性能和充放电循环稳定性。

在后续研究中,将进一步研究多向锻造工艺参数对  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金显微组织和性能的影响,为  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金性能改善以及市场化推广积累试验资料和技术经验。

## 3 结论

(1) 多向锻造后  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的平

均晶粒尺寸由锻前的  $48\ \mu\text{m}$  减小至  $13\ \mu\text{m}$ 。多向锻造显著细化了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的显微组织。

(2) 多向锻造  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的最大吸氢量由锻前的  $1.018\ \text{wt.}\%$  增大至  $2.854\ \text{wt.}\%$ ,最大放电容量从  $155.7\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$  增大至  $337.1\ \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ,充放电循环1000次后的放电容量衰减率从  $71.6\%$  减小至  $15.0\%$ 。多向锻造显著改善了  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  储氢合金的吸放氢性能和充放电循环稳定性。

## 参考文献:

- [1] 徐睿,程涛,杨雪,等. 钒基储氢合金的特点和应用前景[J]. 石油炼制与化工, 2024, 55 (7): 163-169.  
Xu R, Cheng T, Yang X, et al. Characteristics and application prospects of vanadium based hydrogen storage alloys [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2024, 55 (7): 163-169.
- [2] 任权兵,钟鸣,郑波,等. 稀土元素改性钒基固溶体储氢合金研究进展[J]. 应用化学, 2023, 40 (12): 1601-1612.  
Ren Q B, Zhong M, Zheng B, et al. Research progress on rare earth element modified vanadium based solid solution hydrogen storage alloys [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2023, 40 (12): 1601-1612.
- [3] 郑辉,白军. 基于模糊PID控制的铸造  $V_3TiNi_{0.56}Cr_{0.35}$  合金的性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (9): 79-81.  
Zheng H, Bai J. Research on the properties of casting  $V_3TiNi_{0.56}Cr_{0.35}$  alloy based on fuzzy PID control [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (9): 79-81.
- [4] 李荣,周上祺,刘守平,等.  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}Cr_x$  ( $x=0\sim0.3$ ) 贮氢合金的微结构及电化学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (4): 706-711.  
Li R, Zhou S Q, Liu S P, et al. Microstructure and electrochemical properties of  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}Cr_x$  ( $x=0\sim0.3$ ) hydrogen storage alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (4): 706-711.
- [5] 刘守平,田卫国,刘志红,等. 贮氢合金  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}M_x$  耐腐蚀性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38 (1): 15-18.  
Liu S P, Tian W G, Liu Z H, et al. Study on corrosion resistance of hydrogen storage alloy  $V_3TiNi_{0.56}M_x$  [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38 (1): 15-18.
- [6] 李荣,周上祺,梁国明,等. 贮氢合金  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  的电化学性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17 (2): 222-227.  
Li R, Zhou S Q, Liang G M, et al. Electrochemical properties of hydrogen storage alloy  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17 (2): 222-227.
- [7] 余祖孝,李荣,周上祺,等. 热处理对贮氢合金  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  电化学性能的影响[J]. 无机材料学报, 2009, 24 (1): 157-160.  
Yu Z X, Li R, Zhou S Q, et al. The effect of heat treatment on



- the electrochemical properties of hydrogen storage alloy  $V_3TiNi_{0.56}Al_{0.2}$  [J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24 (1): 157-160.
- [8] Yousefi D, Taghiabadi R, Shaeri M H. Effect of multi-pass multi directional forging on the friction properties of rich silicon eutectoid ZA alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (7): 2024-2038.
- [9] 张志雄, 章俊涛, 韩建超, 等. 马氏体组织 Ti-6Al-4V 钛合金多向等温锻造组织演变及力学性能强化研究 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (22): 2739-2748.
- Zhang Z X, Zhang J T, Han J C, et al. Study on the microstructure evolution and mechanical property strengthening of Ti-6Al-4V titanium alloy during multi-directional isothermal forging with martensitic structure [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (22): 2739-2748.
- [10] 郭强, 严红革, 陈振华, 等. 多向锻造工艺对 AZ80 镁合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2006, 42 (7): 739-744.
- Guo Q, Yan H G, Chen Z H, et al. The influence of multi-directional forging process on the microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42 (7): 739-744.
- [11] 王帆, 赵小莲. 室温下多向锻造及时效处理对 7075 铝合金力学性能和摩擦磨损性能的影响 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (12): 1-8.
- Wang F, Zhao X L. Effects of multi-directional forging and aging treatment on mechanical properties and friction and wear properties for 7075 aluminum alloy at room temperature [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (12): 1-8.
- [12] 车鑫, 段兴旺, 江东, 等. T6 热处理对多向锻态 VWZ113K 稀土镁合金微观组织及力学性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (5): 198-207.
- Che X, Duan X W, Jiang D, et al. The effect of T6 heat treatment on the microstructure and mechanical properties of multi directional forging VWZ113K rare earth magnesium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (5): 198-207.
- [13] 裴沛, 宋西平, 赵铭, 等. V 含量对低钒 Ti-V-Cr 储氢合金储氢性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37 (8): 1419-1423.
- Pei P, Song X P, Zhao M, et al. The effect of V content on hydrogen storage performance of low vanadium Ti-V-Cr hydrogen storage alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37 (8): 1419-1423.
- [14] 苗鹤, 刘永锋, 高明霞, 等. Co 替代 Ni 对钛钒基储氢电极合金循环稳定性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (5): 630-633.
- Miao H, Liu Y F, Gao M X, et al. The effect of Co replacing Ni on the cyclic stability of titanium vanadium based hydrogen storage electrode alloys [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (5): 630-633.

# 锻压技术

## DUANYA JISHU

### FORGING & STAMPING TECHNOLOGY

我们藉行业 **翘楚之势**  
为您搭建广阔的信息桥梁

**欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告**

1958年创刊。中国机械工业联合会主管，中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会主办。

全国锻压行业会刊，全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览（北京大学）、中国科学引文数据库（CSCD）、中国科技期刊引证报告（核心版，CJCR）、中国科技核心期刊（中国科技论文统计源期刊）、RCCSE中国核心学术期刊、中国学术期刊文摘数据库（核心版，CSAD-C）、中国学术期刊文摘数据库（英文版）、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊（光盘版）、中国知网、万方数字化期刊群、美国剑桥科学文摘（CSA）、美国化学文摘（CA）、日本科学技术振兴机构数据库（JST）、俄罗斯文摘杂志（AJ）。

**金属塑性工程行业专业技术（月刊）期刊 国内外公开发行**

地址：北京市海淀区学清路18号 《锻压技术》编辑部 100083  
电话：010-62920652 82415085  
E-mail: fst@263.net（稿件咨询） fst\_linyutong@163.com（广告咨询）

**发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>**

**主要栏目**

综 述	技 术 交 流
锻 造	节 能 技 术
模 具	摩 擦 与 润 滑
轧 制	计 算 机 应 用
标 准 化	装 备 与 成 套 技 术
管 材 成 形	加 热 与 热 处 理
板 料 成 形	材 料 成 形 性 能
特 种 成 形	理 论 与 实 验 研 究
试 验 技 术	挤 压 与 拉 拔

**全国各地邮局均可订阅，逾期未订上者可与编辑部联系邮购**

- ◆ 国内邮发代号：2-322
- ◆ 国外邮发代号：BM5549
- ◆ 国内定价：25元/册，300元/年
- ◆ 国内刊号：CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号：ISSN 1000-3940
- ◆ 广告许可证：京海工商广登字20170021号 杂志网站 微信公众号

