

泡沫铝表面 Ni-W 共沉积及性能研究

杜中德^a, 刘欢^{b,c}, 沈浩田^{b,c}, 何世伟^{b,c}, 华中胜^{b,c}

(安徽工业大学 a.材料科学与工程学院 b.冶金工程学院 c.冶金减排与
资源综合利用教育部重点实验室, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: **目的** 进一步提高泡沫铝材料的强度及耐蚀特性, 同时明确金属涂覆泡沫铝材料的综合耗能指标。**方法** 对泡沫铝表面预镀镍层后, 在硫酸盐体系下, 利用脉冲电镀进行镍钨合金共沉积。通过准静态压缩测试及扫描电镜分析, 得到泡沫铝、预镀镍泡沫铝及镍钨共沉积泡沫铝材料的特征曲线及变形模式, 综合分析材料的增强机理及综合耗能指标。采用电化学测试对比分析材料耐蚀特性。**结果** 泡沫铝表面共沉积镍钨合金层后, 其峰值应力比镀镍泡沫铝平均提高了 10%, 较基体泡沫铝平均提高了约 45%。强度提高来源于变形过程中包覆金属的支撑及铝基体-镍镀层界面处的拉伸撕裂。镍钨合金共沉积使泡沫铝的能量吸收增加 38%, 吸能效率有所提升, 且其自腐蚀电位较镀镍泡沫铝及基体泡沫铝明显正移, 腐蚀倾向及腐蚀速率降低。**结论** 泡沫铝表面镍钨合金共沉积使其强度、耐蚀性较镀镍泡沫铝进一步提高。由于特征曲线及变形模式的改变, 镍钨共沉积泡沫铝的耗能特性提升明显。

关键词: 泡沫铝; 共沉积; 强度; 耐蚀性; 能量吸收

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0233-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.026

Ni-W Co-deposition and Property of Closed Cell Aluminum Foam

DU Zhong-de^a, LIU Huan^{b,c}, SHEN Hao-tian^{b,c}, HE Shi-wei^{b,c}, HUA Zhong-sheng^{b,c}

(a.School of Materials Science & Engineering, b.School of Metallurgical Engineering, c.Key laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resource Recycling (Ministry of Education), Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the strength and corrosion resistance of aluminum foam and clarify the comprehensive energy consumption indicators of aluminum foam with metal coating. Closed aluminum foam was treated by pulse nickel-tungsten co-deposition process in sulfate system after nickel plating. The quasi-static compression and SEM were utilized to obtain the characteristic curve and deformation mode of aluminum foam, Ni coated aluminum foam and aluminum foam with Ni-W coating. Furthermore, the enhancement mechanism and energy consumption indicators of materials were analyzed

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-09-11

Received: 2019-12-12; Revised: 2020-09-11

基金项目: 安徽省科技厅高校研究重点项目 (KJ2017A048); 国家自然科学基金资助项目 (51904005); 安徽省大学生创新创业培训项目 (201610360117)

Fund: Supported by Major Program of University Research Foundation of Anhui (KJ2017A048), National Natural Science Foundation of China (51904005) and Anhui Province Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship (201610360117)

作者简介: 杜中德 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多孔材料表面强化。

Biography: DU Zhong-de (1984—), Male, Master, Research focus: surface strengthening of porous materials.

通讯作者: 刘欢 (1987—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为多孔材料表面处理。邮箱: liuhneu@126.com

Corresponding author: LIU Huan (1987—), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: surface treatment of cellular metal. E-mail: liuhneu@126.com

引文格式: 杜中德, 刘欢, 沈浩田, 等. 泡沫铝表面 Ni-W 共沉积及性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 233-238.

DU Zhong-de, LIU Huan, SHEN Hao-tian, et al. Ni-W co-deposition and property of closed cell aluminum foam[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 233-238.

comprehensively. Corrosion resistance of materials was investigated comparatively via electrochemical test. After nickel-tungsten co-deposition process, the peak stress of aluminum foam was 10% higher than that of aluminum foam with Ni coating and about 45% higher than the substrate aluminum foam. This was due to the support of the coating as well as the tearing effect between Al-Ni interface in the deformation process. The energy absorption of aluminum foam increased by 38% after nickel-tungsten co-deposition and the energy absorption efficiency of aluminum foam also increased. Meanwhile, the self-corrosion potential was obviously positively shifted compared with nickel-plated aluminum foam and substrate aluminum foam, and the corrosion tendency and corrosion rate reduced. Co-deposition of nickel-tungsten alloy on the surface of aluminum foam further improves its strength and corrosion resistance compared with nickel-plated foamed aluminum. Due to the change of the characteristic curve and deformation mode, the energy consumption characteristics of Ni-W co-deposition aluminum foam are improved significantly.

KEY WORDS: aluminum foam; co-deposition; strength; corrosion resistance; energy absorption

泡沫铝是一种轻质功能材料,具有优异的吸能、吸声、电磁屏蔽等特性,在交通运输、材料建筑、航天航空、军事装备等领域有着十分广泛的应用^[1-3]。然而,泡沫铝自身强度较低,且表面形成的氧化膜致密性差,耐蚀性不佳。因此,提高泡沫铝材料的强度及耐蚀性,对拓展其应用范围尤为重要。

在泡沫铝力学性能改善方面,学者已做了大量研究工作,主要通过改善基体材料、掺杂增强相、采用复合结构等^[4-6]方式来实现,但耐蚀性能都没有得到较大突破。为同时实现多孔材料强度及耐腐蚀特性的提升,表面处理是一种最有效手段,包括表面陶瓷化^[7-9]、有机膜包覆^[10-11]、表面金属电沉积^[12-16]等。

Goodall 和 Abdulla 等人^[7]采用等离子体电解氧化(PEO)涂层处理技术,应用于不同结构、密度的开孔泡沫铝,以提高其机械性能。结果显示,泡沫铝表面生成一定厚度的 α - Al_2O_3 及 γ - Al_2O_3 ,其屈服强度得到提高。徐义库等人^[8]通过微弧氧化方式,在泡沫铝表面形成陶瓷膜。结果显示,基体与陶瓷膜结合良好,自腐蚀电位明显正移,耐蚀性提高。但此方法以牺牲基体材料为前提,且使材料更具缺陷敏感性,因此更适用于密度较高的泡沫材料。

泡沫铝表面电沉积可有效改善上述问题。目前,沉积金属主要是铜、镍、锌等^[12-16]。研究发现,压缩过程中,由于较高强度金属层包覆,泡沫材料屈服强度及承载能力明显提升。若沉积金属韧性较好,则在压缩过程中不会产生应力大幅度波动,平台区应力较平缓^[14]。数据显示,镀镍后,泡沫金属的自腐蚀及点蚀电位均可提高^[16]。

然而,目前研究的沉积金属较单一,且研究主要关注泡沫材料屈服强度的变化,泡沫铝表面电沉积后,其综合耗能特性未进行系统地研究。因此,本文通过对闭孔泡沫铝表面进行 Ni-W 共沉积,进一步提高其强度及耐蚀特性,并通过对变形模式及特征参数的研究,明确其增强机理及综合耗能特性。

1 实验

1.1 试样准备

1.1.1 制备方法

泡沫铝试样由熔体发泡法制备,制备原料为 99.6% 的高纯铝锭,增粘剂选取金属钙,发泡剂使用 TiH_2 ,具体发泡过程参照文献^[17]。制备完成后,利用线切割将试样切成 35 mm×35 mm×35 mm 立方体。实验用泡沫铝试件密度为 0.22 g/cm³。

1.1.2 表面预处理

利用碱性除油液(Na_2CO_3 30 g/L, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 30 g/L, NaOH 5 g/L, OP-10 0.5 g/L)对试样进行清洗,温度 60 ℃。而后放入无水乙醇中超声震荡 4 min,彻底去除油污。将除油后的泡沫铝放入 40% 的硝酸溶液中酸洗 1 min,去除基体表面氧化铝薄膜。

1.2 镀层制备

1.2.1 电镀镍层

为更好地实现 Ni-W 在试样表面共沉积,首先对泡沫铝表面进行电沉积镍层。预镀液采用工程镍镀浴(Watts bath),包含 300 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、45 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、45 g/L H_3BO_3 。以泡沫铝作阴极,不锈钢为阳极,在温度 65 ℃下进行直流电沉积,电流密度为 10 A/dm²。因泡沫铝独特的孔状结构,深镀能力较差,因此在电镀时添加深孔走位剂(8 mL/L)。

1.2.2 Ni-W 共沉积

预镀镍后的泡沫铝,经酒精超声震荡洗涤 2 min,除去残留在泡沫铝表面的电解液后,开始电镀钨镍。实验采用硫酸盐体系,主要包括: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (18 g/L)、 $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (53 g/L)、 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (168 g/L)、 NH_4Cl (31 g/L)、 NaBr (18 g/L)、深孔走位剂(8 mL/L)。使用脉冲电镀,占空比 90%,沉积温度 65 ℃,电流密度 10 A/dm²。

1.3 性能检测

1.3.1 镀层表面形貌

采用扫描电子显微镜 (JSM-6490LV) 观察 Ni-W 镀层的表面及截面形貌, 使用其附带的能谱仪 (EDS) 测定镀层中各组分含量。

1.3.2 力学性能测试

采用 SHT4106 型微机控制电液伺服万能试验机, 对泡沫铝、镀镍泡沫铝及镍钨共沉积泡沫铝样品进行准静态压缩测试, 得到工程应力-应变曲线。压缩速度 2 mm/min, 压缩应变 70%。为尽可能保证孔径和孔洞结构基本一致, 准静态压缩实验样品来自同一母体, 尺寸相同且无明显缺陷。

1.3.3 耐蚀性测试

使用 PARSTAT2273 电化学工作站, 以铂片为对电极, 三类泡沫铝样品为工作电极, 饱和硫酸亚汞电极为参比电极, 测定常温下镀层在 3%NaCl 溶液中的

极化曲线, 扫描速率为 1 mV/s。

2 结果和讨论

2.1 镀层形貌

泡沫铝表面 Ni-W 镀层及相应截面形貌如图 1a、b 所示。由表面 SEM 图可见, Ni-W 呈典型菜花形态, 表面平整, 胞状结构连续、致密。由于闭孔泡沫铝表面是凹凸不平的多孔结构, 因此在电沉积过程中, 深孔处扩散区的厚度比较厚, 反应电流密度小, 金属沉积速率低, 沉积层较薄。在镀 Ni-W 泡沫铝样品中, 镀 Ni 层厚度约 45~140 μm , Ni-W 层厚度约 10~30 μm 。图 1b 是典型的泡孔截面形貌, 1—3 分别对应基体材料、镍镀层及镍钨层, 各区域相应 EDS 能谱分析如图 1c—e 所示。在泡孔截面图中, 各层间有较明显分界, 镍钨层中 Ni 与 W 元素的质量分数分别为 74.64% 和 25.36%。基体左侧层状区域的出现是由于孔壁背面有薄镍层沉积。

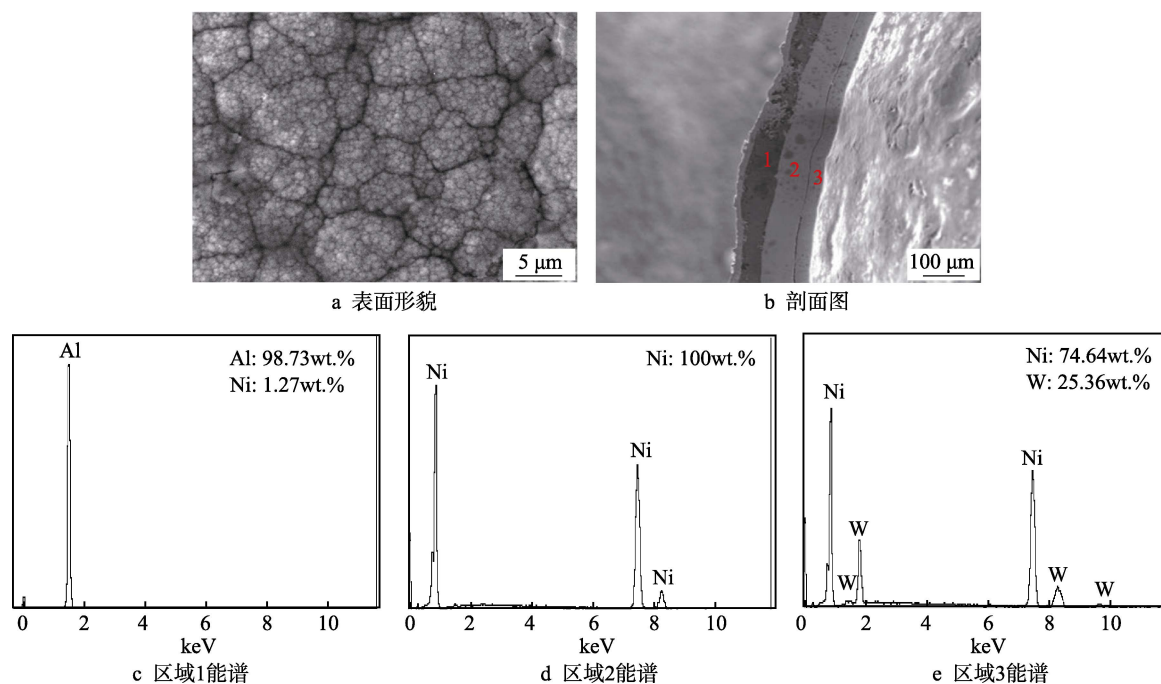


图 1 Ni-W 镀层形貌及相应 EDS 能谱

Fig.1 Morphology of Ni-W coating and the EDS spectra: a) surface morphology; b) cross section; c) EDS spectra of region 1; d) EDS spectra of region 2; e) EDS spectra of region 3

2.2 压缩性能

2.2.1 特征曲线及表征

图 2 是三类材料 (基体泡沫铝、镀镍泡沫铝、镀镍钨泡沫铝) 的压缩工程应力-应变曲线。由图可知, 泡沫铝遵循相同规律, 以镀 Ni-W 泡沫铝为例, 应力-应变曲线可分为三个阶段:

- 1) 弹性阶段。该阶段应力逐步上升至峰值 σ_p , 对应材料发生弹性变形。
- 2) 塑性平台阶段。该阶段对应材料塑性变形,

以泡孔纵向挤压、剪切拉伸为主要变形模式, 泡孔逐层坍塌, 应力在较长应变范围内维持相对稳定, 是能量吸收的主要来源。由图看出, 此阶段镀镍及镍钨后平台强度较基体有明显提升。

3) 致密化阶段。平台区结束, 曲线进入致密化阶段, 该阶段的起始应变称为致密化应变 ε_D 。此阶段应力急剧上升, 代表材料有效吸能结束。

本文以致密化应变及能量吸收评价材料的耗能特性。致密化应变的确定方式, 参照 Li 等^[18]提出的基于能量吸收率的方法来获得。

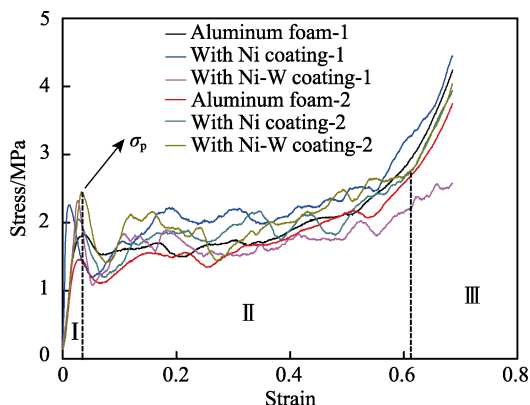


图2 样品应力-应变曲线
Fig.2 Strain-stress curves of samples

一定应变下吸能效率为:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon} \sigma(\bar{\varepsilon}) d\bar{\varepsilon}}{\sigma(\varepsilon)} \quad (1)$$

其中, ε_y 是屈服应变。原始应力-应变曲线及其对应吸能效率曲线绘于图3。

最大吸能效率对应应变为 ε_1 , 则:

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_1} = 0 \quad (2)$$

等峰值应力处对应应变为 ε_2 , 则致密化应变如式(3)所示, 具体确定方法见图3。

$$\varepsilon_D = \max\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\} \quad (3)$$

能量吸收以单位体积吸收能量 E_V 来表征, 对应

试样压缩应力-应变曲线所包围的面积为:

$$E_V = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

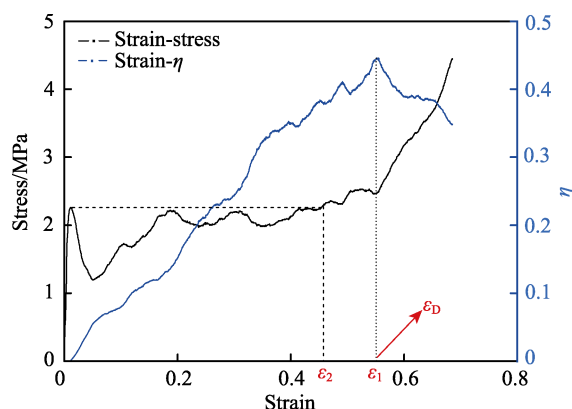


图3 应力-应变曲线及其对应吸能效率
Fig.3 Strain-stress and energy absorption efficiency curves

2.2.2 承载及吸能分析

测试样品所对应峰值应力、致密化应变及能量吸收如图4所示。峰值应力反映了泡沫铝结构的强度特性, 是十分重要的力学参数。从图4a可以看出, 镍及镍钨镀层存在明显提高泡沫铝的峰值应力。镍钨合金镀层泡沫铝比镀镍泡沫铝峰值应力平均提高了10%, 较未处理泡沫铝峰值应力平均提高了约45%。图5是压缩后样品的表面形貌。可以看出, 未镀泡沫铝上表面泡孔完全变形, 由于强度的提高, 镀镍尤其是镀镍钨后, 材料表面泡孔完整性明显优于未镀样品。

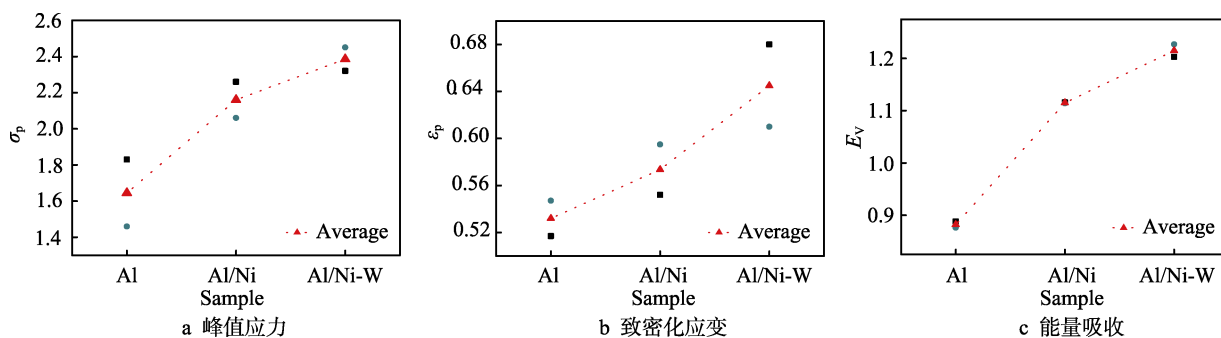


图4 样品参数表征图

Fig.4 Parameter characterization of samples: a) peak stress; b) densification strain; c) energy absorption

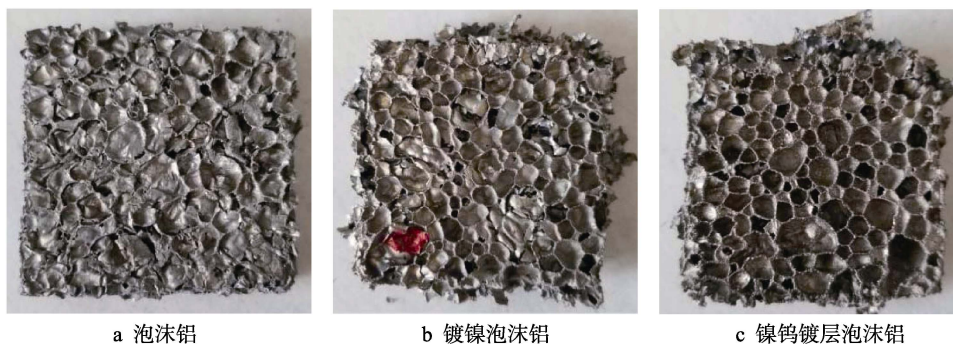


图5 压缩样品变形图

Fig.5 Deformation of samples after compression: a) aluminum foam; b) aluminum foam with Ni coating; c) aluminum foam with Ni-W coating

综合对多孔材料电化学沉积的研究发现, 多孔材料的屈服强度一方面取决于沉积金属类型^[12], 高强、低韧金属沉积往往体现出更优异力学性能; 另一方面取决于沉积层厚度^[19-20] (对应最终材料密度), 沉积层厚度越高, 密度越大, 强度提升越明显。研究数据^[20]显示, 表面镀铜闭孔泡沫铝屈服强度随材料密度增加, 呈线性上升趋势。实验中 Ni 及 Ni-W 镀层沉积, 使材料平均密度增至 0.3、0.39 g/cm³, 这代表孔棱及孔壁处包覆一定金属层。因此, 泡沫强度的提高主要源于高强金属镍、钨对泡沫铝表层泡孔的包裹, 在纵向压缩变形过程中, 镍、钨层对泡沫基体起到额外支撑作用。进一步对压缩后泡沫铝基体及镍镀层界面处进行扫描电镜分析, 如图 6 所示。区域 A 是镍层在压缩变形过程中形成的断口, 呈层状分布。区域 B 代表基体与镍层结合界面断口。B 区断口韧窝小且分布均匀, 材料呈韧性断裂。EDS 能谱显示, 此处铝、镍元素共存。因此推断基体与镀层间由于机械镶嵌

(前处理导致泡沫铝表面凹凸不平) 及界面处的化学键合作用, 二者之间有良好的结合力。压缩过程中, 基体-镀层变形不同步, 导致二者界面处拉伸撕裂, 这也对材料强度提升起到积极作用。

由图 4b 可知, 除峰值应力外, 材料压缩的致密化应变有明显上升趋势, 镀镍钨后更为明显, 平均提升 21%, 这代表平台区被明显拉长。对泡沫铝材料而言, 其致密化应变与基体材质相关, 相对于韧性较好的纯铝基泡沫铝, 脆性基体材料往往存在较长的平台区^[19]。由于脆性镀层镍及镍钨的存在, 使泡沫铝材料致密化应变同样表现出上涨趋势。平台区是缓冲吸能材料有效吸收能量的区域, 其长短及平台应力大小直接决定材料吸能特性的强弱。由能量吸收指标 E_v 可得, 镀镍钨泡沫铝材料能量吸收值 E_v 较镀镍平均提高 9%, 较未镀样品平均提高 38%。吸能特性的提高, 一方面归因于表面电沉积后材料屈服强度及平台应力的提升, 另一方面归因于材料平台区拉长, 吸能区间增大。

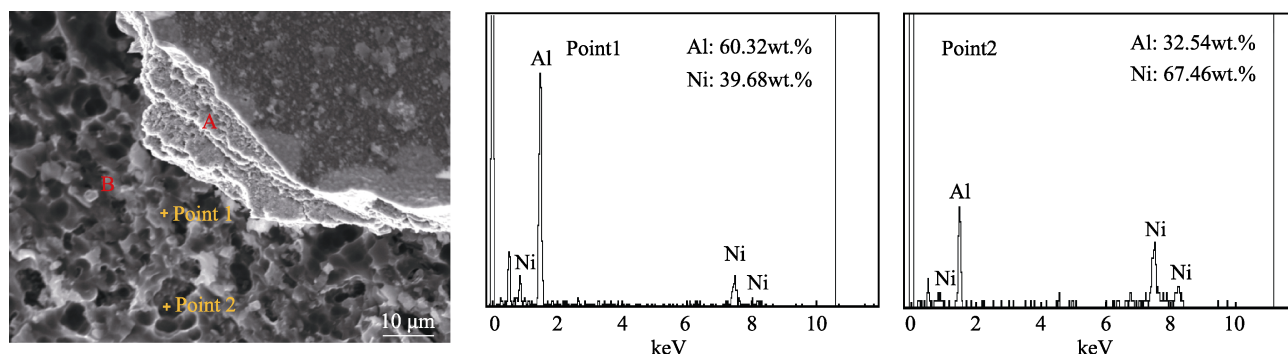


图 6 界面断口形貌及相应 EDS 能谱
Fig.6 Fracture morphology of the interface and EDS spectra

除能量吸收值外, 吸能效率也是一重要耗能指标, 其反映了材料与理想吸能材料的接近程度, 吸能效率越高, 材料耗能特性越优。图 7 是三类材料在不同应变下平均吸能效率的对比图。由图可得, 在 0.5 应变范围内, 吸能效率随应变逐步上升。压缩初期, 电镀前后材料吸能效率并无变化, 当材料应变达到 0.35 及以上时, 镀层对吸能效率的提升作用开始

显现, 但提升有限, 约 5%。而镍钨镀层泡沫铝与镀镍泡沫铝吸能效率基本一致。

2.3 耐腐蚀性能

图 8 为电化学测试得到的电沉积前后泡沫铝的极化曲线。通过 Tafel 曲线外推法计算所得的电沉积前后自腐蚀电位 E_{corr} 和自腐蚀电流密度 J_{corr} 如表 1 所

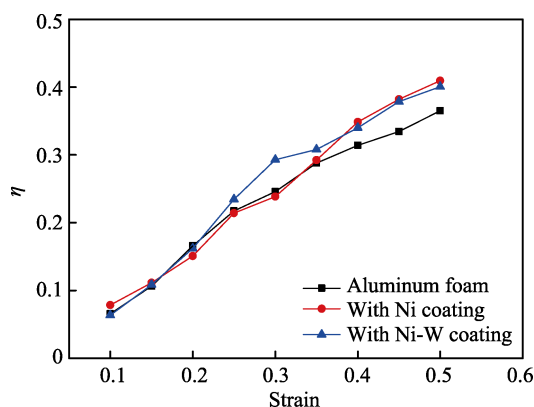


图 7 吸能效率对比图
Fig.7 Comparison of energy absorption efficiency

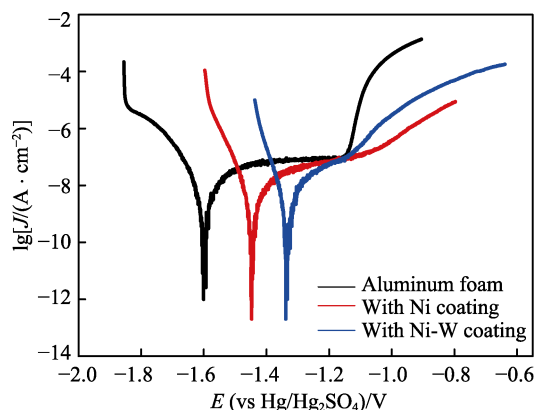


图 8 电沉积前后泡沫铝的极化曲线
Fig.8 Polarization curves of aluminum foams before and after deposition

表 1 电沉积前后泡沫铝的 E_{corr} 和 J_{corr} Tab.1 E_{corr} and J_{corr} of aluminum foams before and after deposition

Sample	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Al	-1.61	4.39×10^{-4}
Al/Ni	-1.45	1.95×10^{-4}
Al/Ni-W	-1.33	1.60×10^{-4}

示。可以看出, 镍钨镀层泡沫铝材料自腐蚀电位比镀镍泡沫铝正移了 120 mV, 较泡沫铝基体正移了 280 mV。泡沫铝表面镍钨沉积后, 其耐腐蚀性提高, 发生腐蚀的倾向降低, 且镀镍钨后, 闭孔泡沫铝的腐蚀电流密度减小, 代表闭孔泡沫铝的腐蚀速度降低。

3 结论

1) 泡沫铝表面共沉积 Ni-W 层后, 其峰值应力比镀 Ni 泡沫铝平均提高了 10%, 较未处理泡沫铝峰值应力平均提高了约 45%。强度提高来源于变形过程中包覆金属的支撑及基体-镀层界面处的拉伸撕裂。

2) 镍钨共沉积使泡沫铝的能量吸收 E_v 增加到 38%。吸能特性的提升, 源于材料强度和平台承载力的提升以及材料致密化应变的增大。

3) 镍钨共沉积使泡沫铝的吸能效率小幅提升约 5%, 与镀镍层泡沫铝吸能效率基本持平。

4) 镍钨镀层泡沫铝自腐蚀电位比镀镍泡沫铝正移了 120 mV, 较泡沫铝基体正移了 280 mV。泡沫铝表面镍钨沉积后, 其腐蚀的倾向及腐蚀速度明显降低。

参考文献:

- [1] REN C X, HU Z F, YAO C, et al. Experimental study on the quasi-static compression behavior of multilayer aluminum foam sandwich structure[J]. Journal of alloys and compounds, 2019, 810: 151860.
- [2] SU L, LIU H, YAO G, et al. Experimental study on the closed-cell aluminum foam shock absorption layer of a high-speed railway tunnel[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2019, 119: 331-345.
- [3] CHEN G, ZHANG P, LIU J, et al. Experimental and numerical analyses on the dynamic response of aluminum foam core sandwich panels subjected to localized air blast loading[J]. Marine structures, 2019, 65: 343-361.
- [4] PINTO S C, MARQUES P A A P, VESENJAK M, et al. Characterization and physical properties of aluminium foam-polydimethylsiloxane nanocomposite hybrid structures[J]. Composite structures, 2019, 230: 111521.
- [5] MA Y, YANG X, HE C, et al. Fabrication of in-situ grown carbon nanotubes reinforced aluminum alloy matrix composite foams based on powder metallurgy method[J]. Materials letters, 2018, 233: 351-354.
- [6] SU M, WANG H, HAO H. Axial and radial compressive properties of alumina-aluminum matrix syntactic foam filled

- thin-walled tubes[J]. Composite structures, 2019, 226: 111197.
- [7] ABDULLA T, YEROKHIN A, GOODALL R. Enhancement in specific strength of open cell aluminium foams through plasma electrolytic oxidation treatment[J]. Scripta materialia, 2014, 75: 38-41.
- [8] ABDULLA T, YEROKHIN A, GOODALL R. Effect of plasma electrolytic oxidation coating on the specific strength of open-cell aluminium foams[J]. Materials & design, 2011, 32: 3742-3749.
- [9] 徐义库, 杨蕾, 宋绪丁, 等. 闭孔泡沫铝微弧氧化及其性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(5): 1655-1658.
XU Yi-ku, YANG Lei, SONG Xu-ding, et al. Characterization of close cell aluminum foams reinforced by micro-arc oxidation[J]. Materials reports, 2018, 32(5): 1655-1658.
- [10] ROSSI S, CALOVI M, FEDEL M. Corrosion protection of aluminum foams by cataphoretic deposition of organic coatings[J]. Progress in organic coatings, 2017, 109: 144-151.
- [11] ANTENUCCI A, GUARINO S, TAGLIAFERRI V. Electrodeposition of graphene on aluminium open cell metal foams[J]. Materials & design, 2015, 71: 78-84.
- [12] DEVIVIER C, TAGLIAFERRI V, TROVALUSCI F. Mechanical characterization of open cell aluminium foams reinforced by nickel electro-deposition[J]. Materials & design, 2015, 86: 272-278.
- [13] ZHEN D, LI Y, HUANG X, et al. Enhancement of open cell aluminum foams through thermal evaporating Zn film[J]. Materials letters, 2016, 172: 120-124.
- [14] ANTENUCCI S, GUARINO V, TAGLIAFERRI N. Improvement of the mechanical and thermal characteristics of open cell aluminum foams by the electrodeposition of Cu[J]. Materials & design, 2014, 59: 124-129.
- [15] JUNG A, BEEX L A A, DIEBELS S, et al. Open-cell aluminium foams with graded coatings as passively controllable energy absorbers[J]. Materials & design, 2015, 87: 36-41.
- [16] 刘欢, 姚广春, 曹卓坤, 等. 泡沫铝表面镀镍及其性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2572-2577.
LIU Huan, YAO Guang-chun, CAO Zhuo-kun, et al. Properties of aluminum foams with electrodeposited Ni coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2572-2577.
- [17] LIU H, CAO Z K, LUO H J, et al. Performance of closed cell aluminum foams subjected to impact loading[J]. Materials science and engineering: A, 2013, 570: 27-31.
- [18] LI Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids[J]. Journal of cellular plastics, 2006, 42: 371-392.
- [19] YI S, RIGOBERTO B, WEI W, et al. Modeling and simulation of the quasi-static compressive behavior of Al/Cu hybrid open-cell foams[J]. International journal of solids and structures, 2015, 54: 135-146.
- [20] XU Y, YANG L, SONG X, et al. Mechanical characterization of close cell aluminum foams reinforced by high voltages electro-deposition[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2019, 34(3): 541-548.
- [21] 田杰, 胡时胜. 基体性能对泡沫铝力学行为的影响[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 168-176.
TIAN Jie, HU Shi-sheng. Effect of matrix properties on the mechanical behaviors of aluminum foams[J]. Engineering mechanics, 2006, 23(8): 168-176.