

相界面对双相钛合金层裂孔洞形核的影响^①杨 扬^{1,2,3,4}, 蒋 志¹, 胡海波², 汤铁钢², 张虎生³, 付亚楠⁵

(1. 中南大学 材料科学与工程学院 湖南 长沙 410083; 2. 中国科学院流体物理研究所 四川 绵阳 621900; 3. 中国科学院力学研究所 北京 100190; 4. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室 湖南 长沙 410083; 5. 中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要: 利用一级轻气炮对 TC4 双相钛合金进行加载, 获得初期的层裂状态, 在加载中采用多普勒激光干涉测速技术对样品自由面粒子速度进行测试。在软回收经过加载的样品之后, 借助于金相显微镜、X 射线断层扫描、纳米压痕等检测手段进行多维分析, 探讨了相界面对孔洞形核位置的影响。结果表明, 孔洞绝大部分都在 α 相内形核, 而不是如准静态损伤理论预测的形核于 α/β 相界面。这是由于相界面的反射与透射作用, 当冲击波从高阻抗 α 相传入到低阻抗 β 相时, 会在 α 相内产生拉伸脉冲, 当拉伸脉冲足够大时, 导致在 α 相内产生孔洞。

关键词: 层裂; 相界面; 孔洞形核; TC4 双相钛合金

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2018.03.035

文章编号: 0253-6099(2018)03-0143-05

Effects of Phase Interface on Void Nucleation of Spallation
in Dual Phase Titanium AlloyYANG Yang^{1,2,3,4}, JIANG Zi¹, HU Hai-bo², TANG Tie-gang², ZHANG Hu-sheng³, FU Ya-nan⁵

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Science, Mianyang 621900, Sichuan, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Key Laboratory of Nonferrous Metals Material Science and Engineering of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 5. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: TC4 dual phase titanium alloy was dynamically loaded by one-stage light gas gun, resulting in an initial spallation state. During the loading, the velocity of free surface particles was measured with photonic Doppler velocimetry (PDV). The effect of α/β phase interface on dynamic damage nucleation, growth, and coalescence in TC4 were investigated by multidimensional testing techniques, such as optical microscopy, X-ray computer tomography and nanoindentation. Results showed that a majority of voids were nucleated within α -phases, rather than at the α/β phase interface as prediction by the quasi-static damage theory. Because of the effects of reflection and transmission of shock wave at the phase interface, a tensile pulse would be formed within α -phase when the shock wave was transmitted from α -phase with high impedance to β -phase with low impedance. And when this tensile pulse was large enough, voids could be formed in α -phase.

Key words: spallation; phase interface; voids nucleation; TC4 dual phase titanium alloy

层裂现象是一种典型的材料动态破坏方式, 是在冲击荷载下, 材料内部由两相向传播的卸载稀疏波相互作用产生拉伸应力, 当拉伸应力足够大时会使得材料内部发生微损伤的形核、长大、贯通及最后导致灾变式断裂的过程^[1-2]。

目前, 关于相界面对层裂行为影响的研究较少。文献 [3-6] 前期也以高纯无氧铜为对象, 研究了不同的加载方式和样品形状以及晶界类型、晶粒取向、晶粒尺度等对高纯金属层裂行为的影响规律与机制。Minich 等^[7] 研究了单晶铜与 SiO_2 析出相组成的合金

① 收稿日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51274245, 51574290); NSAF 联合基金(U1330126); 非线性力学国家重点实验室开放基金

作者简介: 杨 扬(1963-), 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 主要研究方向为材料动态行为。

通讯作者: 蒋 志(1993-), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料动态行为。

的层裂行为,发现对比纯铜,较小并且较硬的 SiO_2 析出相降低了孔洞形核所需的应力。Fensin 等^[8-9]以单相纯铜、Cu-Pb、Cu-Ag 合金作为研究对象,发现在含有第二相的合金中,第二相的含量不同,其层裂强度以及损伤程度与纯铜的对比情况也会有所不同,Cu-Ag 合金中孔洞在 Ag 内形核,而 Cu-Nb 合金中孔洞形核于 Cu/Nb 界面的 Cu 侧,所以相界面会影响形核位置。Han 等^[10]研究了 Cu-Nb 纳米层状(名义厚度 135 nm)复合材料在平板撞击加载下的动态变形和失效,发现初始纳米孔洞倾向于在 Cu 相内形核。虽然上述研究以及实验现象表明相界面的存在会影响材料的层裂强度,但是其对于层裂初期孔洞形核位置以及演变的影响机制和规律还不是很清楚,目前国内外在相界面对于层裂行为影响上都还缺乏系统而深入的研究。

本文采用 TC4(Ti-6Al-4V, α 相 + β 相)典型双相钛合金作为研究对象,探究相界面对层裂初期孔洞形核以及长大的影响规律,深入研究相界面对层裂行为的影响。

1 实验

1.1 实验材料

为探究相界面对层裂形核的影响,选用 TC4(Ti-6Al-4V)双相钛合金作为实验材料,采用不同热处理制度来获得两种不同相组分以及晶粒尺寸的样品。通过 IPP(image pro plus)软件计算得出两个样品的相组分以及平均晶粒尺寸如表 1 所示。

表 1 样品热处理制度与相组成

样品编号	热处理制度	α 相含量 (面积百分比) / %	平均晶粒尺寸 / μm
1 号	937 °C 固溶 2 h, 水淬 700 °C 保温 2 h, 空冷	43.3	10.8
2 号	947 °C 固溶 2 h, 水淬 700 °C 保温 2 h, 空冷	31.6	7.3

图 1 为经过金相制样以及腐蚀剂腐蚀过后的样品金相图,可见两组样品都由白色的 α 相和灰黑色的 β 相组成。

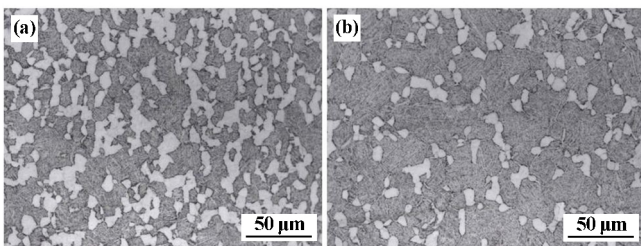


图 1 样品金相图

(a) 1 号样品; (b) 2 号样品

1.2 实验方法

1.2.1 一级轻气炮实验

本次实验样品为 TC4 双相钛合金,由于要得到初期层裂状态,所以采用较低应变速率的加载方式,即一级轻气炮加载,驱动气体为氦气。实验在中科院力学研究所完成。样品尺寸 $\Phi 24 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,飞片尺寸 $\Phi 55 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。为了实现应力波的对称碰撞,飞片厚度设计为样品厚度的一半。为了得到两种热处理状态的样品同时受到相同冲击应力时的初期层裂状态,采用一击二的形式,即一个飞片同时击打两个样品。图 2 为轻气炮装置图与靶板示意图。

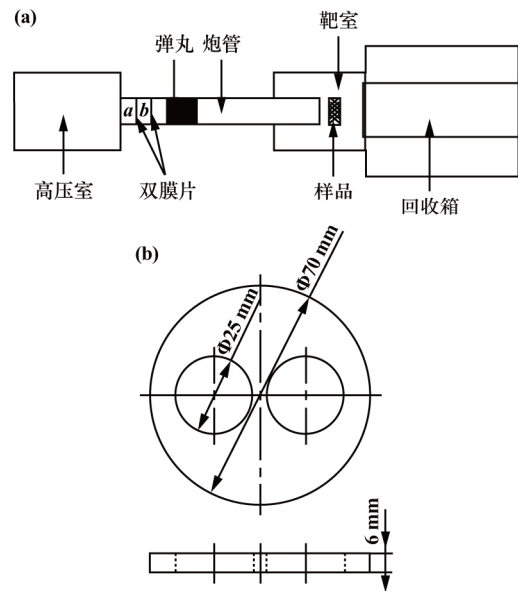


图 2 实验装置图与靶板图

(a) 轻气炮装置; (b) 靶板示意

1.2.2 金相、纳米压痕、XRCT 实验

为了研究层裂损伤在冲击过后样品中的分布以及形核位置,对软回收后的样品进行金相分析。由于冲击波的对称碰撞,将冲击加载后的试样沿冲击方向进行对称线切割。先用水磨砂纸磨到 2 000,再进行机械抛光,最后进行金相腐蚀,侵蚀剂为: $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 2 \text{ mL} : 5 \text{ mL} : 10 \text{ mL}$,侵蚀时间为 10 s 左右。

由于 TC4 双相钛合金中 α 与 β 相的力学性能有着明显的区别,根据层裂形成的基本原理,材料的不同阻抗会影响冲击波的传播,从而影响层裂损伤的形核以及发展^[1]。材料的阻抗近似可用初始密度 ρ_0 和声速 C_0 ($C_0 \approx \sqrt{E/\rho_0}$, E 为杨氏模量,这里用弹性模量来代替计算)的乘积表示。纳米压痕测试在瑞士 CSM 公司生产的 UNHT 纳米压痕试验机上进行,本次实验每个相各测试了 3 个点,得到了纳米硬度和弹性模量的平均值。

利用 X 射线断层扫描 (XRCT) 对软回收试样进行表征, 以研究损伤的三维空间分布。本实验采用上海光源 BL13W1 光束线站, 为保证试样被完全穿透, 选择样品尺寸 $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ mm}$, 所用光子能量为 27 keV。利用 PITRE 软件对 CT 照片进行重构, 最终获得试样中尺寸为 $370 \mu\text{m} \times 370 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 区域的微孔洞三维空间分布图, 并对其定量分析。

2 结果与讨论

2.1 自由面速度曲线

通过 PDV 测速系统, 获得的一级轻气炮加载后的试样自由面速度-时间曲线如图 3 所示。

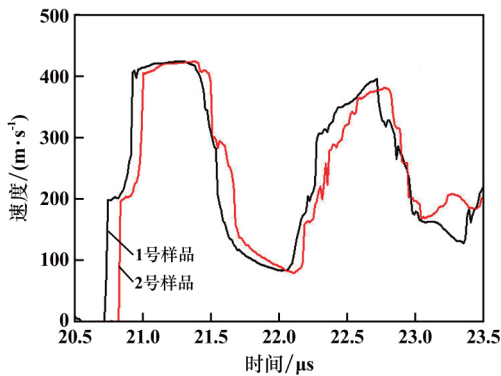


图 3 自由面速度曲线

速度-时间曲线提供了关于冲击波在样品中传播过程的信息, 可以用来推导材料在经历塑性损伤演变时与孔洞形核及长大有关的应力和动力学^[9]。

一级轻气炮加载时靶板中冲击压力^[1]可由公式 (1) 得到:

$$\sigma_s = \rho_0 (c_b + s_u) u \quad (1)$$

式中 σ_s 为冲击压力, GPa; ρ_0 为 TC4 的密度, 这里取 4.4 g/cm^3 ; s 为 Gruneisen 状态方程参数, 由于没有 TC4 钛合金相应数据, 用纯钛数据近似代替, 取 1.066^[11]; c_b 为 TC4 的体声速, 取 4.79 km/s ; u 为波后粒子速度, 为简化计算, 假定惰性材料等熵膨胀规律可以用冲击绝热线近似, 从而 u 的大小取自自由面速度第一次达到峰值时速度的一半, 取 0.21 km/s 。计算得到两种试样的冲击压力约为 4.63 GPa。

运用式 (2)^[11] 可以得到层裂强度估算值:

$$\sigma_f = \rho_0 c_0 \Delta u \quad (2)$$

式中 σ_f 为层裂强度; Δu 定义为自由面速度曲线的峰值与谷值之间的差值 ($u_{\text{max}} - u_{\text{min}}$), 常被作为预估层裂强度的依据。计算结果列于表 2 中。

材料内部不同的组织结构会影响微损伤形核以及长大贯通的行为, 两组样品经过不同工艺热处理, 具有不同的相组成, 在同一加载条件下, 1 号样品的 α 相组

表 2 自由面速度曲线参数

样品编号	σ_s/GPa	$\Delta u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	σ_f/GPa
1 号	4.63	338.68	3.998
2 号	4.63	342.65	4.045

分较 2 号样品的多。通过微观组织分析得出, 孔洞基本在 α 相内形核, 而 1 号样品较多的 α 相微孔洞提供了更多的形核场所, 所以较 2 号样品层裂强度低, 更容易产生层裂损伤。

2.2 层裂损伤二维分析

样品经过侵蚀后, 得到两组样品中位于黑色实线方框区域内的微观组织如图 4 所示。图中, 白色相为 α 相, 灰色相为 β 相, 黑色球状、杆状物均为孔洞, 黑色箭头表示冲击方向。从图 4 可以看出, 孔洞形核于 α 相, 且形核阶段孔洞成近球状; 随后受到冲击应力的作用, 孔洞大致沿着与冲击方向成 45° 的方向发生扩展, 即形成长条状孔洞; 最后孔洞与孔洞之间发生贯通, 形成裂纹。准静态加载下, 由于两相的物理、力学性能的差异而容易导致在两相的界面上产生应力/应变等差异, 容易产生应力集中, 因而相界面是一种“弱连接”, 往往是准静态载荷下孔洞择优形核、长大的位置; 但在动态加载中, 孔洞没有如准静态损伤断裂理论所预测的那样形核于界面, 而是形核于 α 相内。

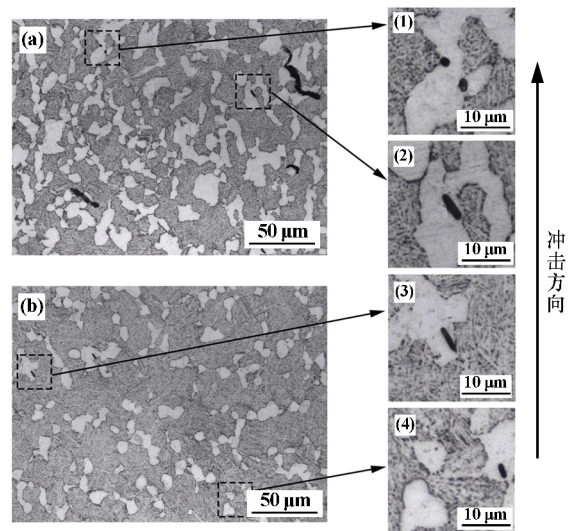


图 4 试样经过金相腐蚀后的显微组织
(a) 1 号样品; (b) 2 号样品

2.3 层裂孔洞三维分析

对两种样品进行三维重构, 结果如图 5 所示。在 XRCT 三维重构图中, 由于 TC4 的两相密度差较小, 在上海光源能量范围之内无法分辨出这两相, 所以只能重构出孔洞。图中, 不同颜色表示不同位置的孔洞。表 3 为 XRCT 相关数据统计。

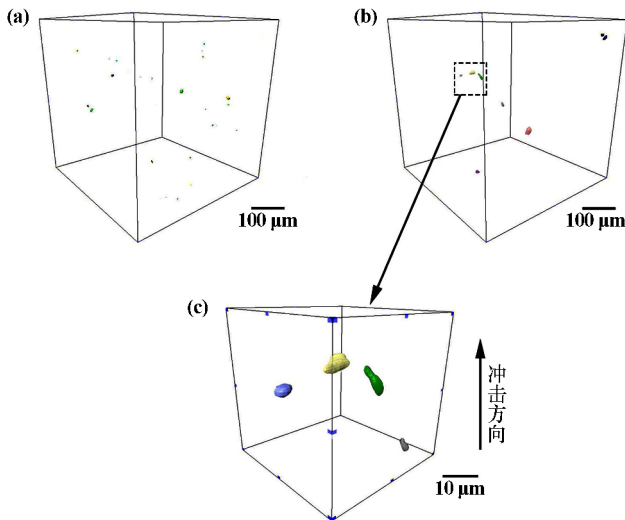


图5 样品三维重构图

(a) 1号样品; (b) 2号样品; (c) 局部放大图

表3 孔洞数据统计

样品编号	视野中统计孔洞数量	最大孔洞体积/ μm^3	平均孔洞体积/ μm^3	平均孔洞等效直径/ μm
1号	26	799.40	152.15	4.36
2号	8	1236.96	270.22	6.42

分析表3数据可知,1号样品的孔洞数量以及密度比2号样品多,而最大孔洞体积与平均孔洞体积比2号样品小。这就进一步验证了自由面速度曲线与金相的分析结果:1号样品由于 α 相含量较高,孔洞形核位置较多,导致孔洞数量更多,也使得层裂强度较低;而2号样品的孔洞生长速率较高,孔洞尺寸较大。

2.4 相界面对孔洞形核的影响

对 α 与 β 两相进行纳米压痕实验,分别取3个测试点,得到两相的平均压深-载荷加载和卸载曲线如图6所示。

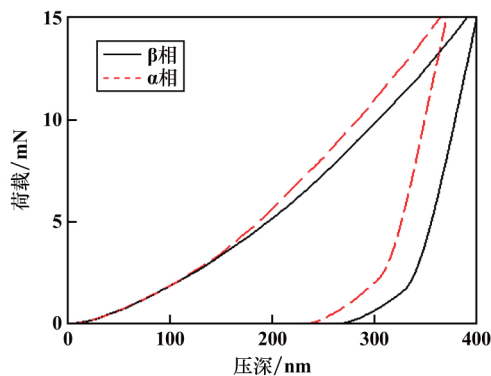


图6 两相平均压深-载荷加载和卸载曲线

阻抗值计算公式^[1]可表达为:

$$Z = \rho_0 \times C_0 \quad (3)$$

声速 C_0 由前文提到的公式计算得到;由SEM中所测

的能谱分析得到两相的比例,再根据两相所含不同元素的成分可估算得到两相的密度。通过实验室自带软件计算出的相关参数与数据如表4所示。

表4 纳米压痕实验数据

相别	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	纳米硬度/ GPa	弹性模量/ GPa	声速/ $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	估算阻抗值/ $[\text{g} \cdot (\mu\text{s} \cdot \text{mm}^2)^{-1}]$
α	4.43	5.527	135.42	5.51	0.02457
β	4.39	4.295	113.67	5.09	0.02235

分析表4数据可得, α 相的纳米硬度、弹性模量、声速、估算的阻抗值都比 β 相大。准静态加载下的损伤与失效,研究多认为由于两相界面或者相/基体界面,容易产生应力集中,为材料中的薄弱位置,导致成为损伤孔洞形核的优先位置;而在动态加载下,材料的层裂形核是由冲击波在材料内部相遇产生的拉伸应力引起的,所以不同相具有的不同波阻抗会影响冲击波的传播,从而影响孔洞形核的位置。由相关文献^[1,11]可知,在动态加载下,当冲击波在两种阻抗不同的介质间传播时,当冲击波从高阻抗材料向低阻抗材料传播时,会在高阻抗材料中形成拉伸脉冲,从而引起层裂损伤。而在本文中,实验材料为TC4双相钛合金,通过前面的实验计算得到 α 相阻抗大于 β 相,所以在冲击荷载下,冲击波从 α 相传到 β 相时,会在 α 相内形核。

3 结 语

利用一级轻气炮动态加载实验研究了相界面对TC4双相钛合金层裂行为的影响。通过加载过程中的自由面速度曲线、二维金相、纳米压痕、三维XRCT等分析手段对初期层裂样品进行了表征,分析了在双相材料中层裂孔洞形核、长大的规律以及影响机制,得到以下主要结论:

1) 由于两相的物理、力学性能的差异而容易导致在两相的界面上产生应力/应变等差异,容易产生应力集中,因而相界面是一种“弱连接”,往往是准静态载荷下孔洞择优形核、长大的位置;但在动态加载中,通过二维金相分析,孔洞没有如准静态损伤断裂理论所预测的那样形核于界面,而是形核于 α 相内。

2) 通过分析自由面速度曲线、金相以及三维XRCT得出,1号样品层裂强度高于2号样品,且1号样品孔洞数量较多,孔洞尺寸较小。这是由于1号样品的形核相 α 相较多,形核位置密度较高、孔洞数量更多,导致层裂强度较低。

3) 通过纳米压痕实验得到 α 相的阻抗大于 β 相。材料的层裂形核是由冲击波在材料内部相遇产生的拉伸应力引起的,所以不同相具有的不同波阻抗会

影响冲击波的传播,且当冲击波从高阻抗材料向低阻抗材料传播时,会在高阻抗材料中形成拉伸脉冲,从而引起层裂损伤,所以层裂孔洞在 α 相内形核。

参考文献:

- [1] Antoun T H, Curran D R, Razorenov S V, et al. Spall fracture[M]. New York: Springer, 2003.
- [2] Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [3] Yang Y, Peng Z Q, Chen X Z, et al. Spall behaviors of high purity copper under sweeping detonation[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 651: 636 - 645.
- [4] Yang Y, Jiang Z, Chen J X, et al. The characteristics of void distribution in spalled high purity copper cylinder under sweeping detonation[J]. Philosophical Magazine, 2017(11): 1 - 14.
- [5] Yang Y, Peng Z, Guo Z, et al. Multidimensional study on spall behavior of high-purity copper under sliding detonation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(9): 4070 - 4077.
- [6] Yang Y, Chen J X, Peng Z Q, et al. X-ray quantitative analysis on

spallation response in high purity copper under sweeping detonation[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 667: 54 - 60.

- [7] Minich R W, Cazamias J, Kumar M, et al. Effect of microstructural length scales on spall behavior of copper[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35: 2663 - 2673.
- [8] Fensin S J, Escobedo J P, Gray G T, et al. Dynamic damage nucleation and evolution in multiphase materials[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(20): 10.1063/1.4879237.
- [9] Fensin S J, Walker E K, Cerreta E K, et al. Dynamic failure in two-phase materials[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(23): 10.1063/1.4938109.
- [10] Han W Z, Cerreta E K, Mara N A, et al. Deformation and failure of shocked bulk Cu-Nb nanolaminates[J]. Acta Materialia, 2014, 63: 150 - 161.
- [11] Curran D R, Seaman L, Shockley D A. Dynamic failure of solids[J]. Physics Reports-review Section of Physics Letters, 1987, 147: 253 - 388.

引用本文: 杨 扬, 蒋 志, 胡海波, 等. 相界面对双相钛合金层裂孔洞形核的影响[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 143 - 147.

(上接第 142 页)

- [3] Yong-jun Hu, Hai-yan Zhang, Feng Li, et al. Investigation into electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of silicone rubber filled with Ag-coated cenosphere particles[J]. Polymer Testing, 2010, 29: 609 - 612.
- [4] Tian X, Liu X D, Feng H W, et al. Effects of the mass ratio of carbonyl nickel powders to $Mm_{0.3}Ml_{0.7}Ni_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$ alloy powders on the electrochemical properties of metal hydride electrodes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 484: 882 - 885.
- [5] Cao X G, Zhang H Y. Investigation into conductivity of silver-coated cenosphere composites prepared by a modified electroless process[J]. Appl Surf Sci, 2013, 264: 756 - 760.
- [6] Song Z, Xie J, Zhou I, et al. Toughened polymer composites with

flake carbonyl iron powders and their electromagnetic/absorption properties[J]. J Alloys Comp, 2013, 551: 677 - 681.

- [7] Liu L, Duan Y, Liu S, et al. Microwave absorption properties of one thin sheet employing carbonyl-iron powder and chlorinated polyethylene[J]. J Magn Magn Mater 2010, 322: 1736 - 1740.
- [8] Jazirehpour M, Seyyed Ebrahimi S A. Synthesis of magnetite nanostructures with complex morphologies and effect of these morphologies on magnetic and electromagnetic properties[J]. Ceramics International, 2016, 42: 16512 - 16520.

引用本文: 肖伟民, 雷永平, 夏志东. 镀银羰基镍粉的制备及其性能研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 140 - 142.