

引用格式:冯佰刚, 张晓波. 累积叠轧和电沉积工艺制备 Al/Cu 复合材料及其组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(4): 104-104.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20211002

<http://www.rjggjy.net> rjggjy@vip.163.com

累积叠轧和电沉积工艺制备 Al/Cu 复合材料 及其组织和力学性能研究

冯佰刚^{1,2}, 张晓波^{1,2}

(1. 兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:采用累积叠轧(ARB)和电沉积工艺制备了 Al/Cu 复合板, 重点研究沉积铜层厚度以及 Al/Cu 复合板组织性能变化。结果表明:电沉积所得铜层厚度较为均匀且与铝板表面结合质量较好。随着累积叠轧道次的增加, 界面结合质量越来越好, 复合板中铜层逐渐颈缩或破碎, 最后变成尺寸较小且分布较均匀的铜颗粒。4 道次复合板抗拉强度最高, 达到 186.6 MPa, 是退火态 1060 铝板抗拉强度的 2.72 倍。

关键词:累积叠轧(ARB); 电沉积; Al/Cu 复合板; 组织; 力学性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20211002

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)04-0100-05

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Al/Cu Composites Prepared by Accumulative Roll Bonding and Electrodeposition Process

FENG Baigang^{1,2}, ZHANG Xiaobo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Al/Cu composite sheet was fabricated using accumulative roll bonding (ARB) and electrodeposition. The thickness of the deposited copper layer and the microstructure and mechanical properties of the composite sheet were investigated. The results show that the thickness of the copper layer obtained by electrodeposition is relatively uniform and the bonding quality with the surface of the aluminum sheet is better. With the increase of ARB cycles, the interface bonding quality is getting better and better, and the copper layer in the composite sheet gradually shrinks or breaks, and finally becomes smaller and more uniformly distributed copper particles. The composite after four ARB cycles reaches the highest ultimate tensile strength (UTS) of 186.6 MPa, which is 2.72 times of that of annealed 1060 aluminum sheet.

Key words: accumulative roll bonding (ARB); electrodeposition; Al/Cu composite sheet; microstructure; mechanical properties

随着现代工业技术的发展, 金属材料在航空航天、建筑、汽车、船舶、冶金等领域的应用越来越广泛, 因此对金属材料的性能提出了更高的要求^[1-2]。为了将不同材料的优异性能结合起来, 材料研究学者提出了一种新型层状金属复合材料, 就是将异种或者同种金属材料通过层状方式结合在一起, 其原理是在不同材料的结合面上发生了原子间的互相扩

散, 最后达到冶金结合的效果^[3-4]。传统的层状铝基复合材料制备技术主要分为爆炸复合法、热压扩散法、轧制复合法、沉积复合法^[5-6]。异种层状金属材料由于在累积叠轧(ARB)过程中流变性能的不同以及各自的协同变形能力也存在差异, 往往会导致复合板界面结合质量差, 得到的复合材料综合性能达不到所要求。电沉积技术是一种在复合过程中将材料原子或分子尺度薄膜经涂覆而形成层状复合材料的技术, 通过沉积技术可以得到界面结合质量优异的层状复合材料^[7-8]。基于电沉积技术所得界面结合质量优异的特点, 本实验将电沉积法和累积叠轧

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51601084)

作者简介: 冯佰刚(1995-), 男, 甘肃古浪人, 硕士研究生, 主要从事铝基复合材料制备及强化研究; E-mail: 1150349794@qq.com

复合法结合起来制备高性能的铝基复合材料。在铝板表面采用电沉积技术得到颗粒分布均匀且与铝板界面结合质量较好的铜层,减少了在累积叠轧过程中的界面结合数,有效解决了在累积叠轧过程中存在的结合界面多以及增强相分布不均匀问题,从而得到力学性能优异的复合材料。该研究可为制备高性能 Al/Cu 复合材料提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验所用材料是尺寸为 $1\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$ 的 1060 商业纯铝板。在实验初期先将铝板沿轧制方向按照实验设计所需尺寸裁剪为 $1\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,以便后续实验。另外,本实验在电沉积过程中,将 T2 紫铜板与正极相连接,以补充电解液中铜原子的损耗。铝板和 T2 紫铜板的化学成分见表 1。

表 1 1060 纯铝板和 T2 紫铜板的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of 1060 pure aluminum sheet and T2 copper sheet (wt%)

1060 铝板	Al	Ti	Mn	Mg	V	Zn	Cu	Si	Fe
	99.6	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.25	0.35
T2 紫铜板	Cu	Fe	S	Pb	Sb	As	Bi	-	-
	99.90	0.005	0.005	0.005	0.002	0.002	0.001	-	-

1.2 实验方法

1.2.1 铝板表面电沉积

铝板表面电沉积铜层时,需要对原始铝板表面进行处理。首先,用丙酮将待沉积铝板表面清洗,清洗后用不锈钢刷将待沉积铝板打磨去除表面的氧化膜,随后用砂纸对原始铝板表面进行打磨。本实验采用酸性硫酸盐电解液进行电沉积,电解液组成为 H_2O 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2SO_4 ,每升电解液中含有 20 mL 的 H_2SO_4 和 240 g 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。电沉积过程中 T2 紫铜板连接直流电源正极,待沉积母材接负极,在电流为 2 A/dm^2 、电压为 $1 \sim 5\text{ V}$ 的室温条件下电沉积 60 min。

1.2.2 复合板累积叠轧

表面沉积铜原子后的累积叠轧工艺流程示意图如图 1 所示。将表面电沉积铜层的铝板和厚度为 1 mm 的未电沉积铝板进行交替间隔组合堆叠,堆叠顺序依次为铝板-沉积铜铝板-铝板-沉积铜铝板-铝板-沉积铜铝板-铝板,堆叠 7 层形成组合板材,然后进行捆扎固定。将组合板在电阻炉中以 $400\text{ }^\circ\text{C}$

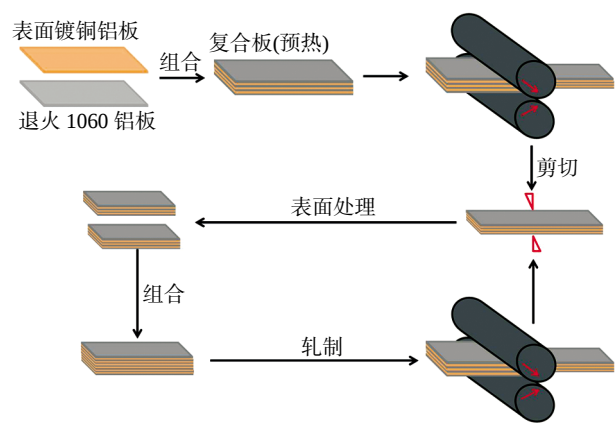


图 1 表面沉积铜原子复合板的制备流程示意图
Fig.1 Schematic diagram of surface deposited copper composite sheet prepared by ARB

保温预热 $10 \sim 15\text{ min}$ 后,在轧制速度为 10 r/min ,压下量为 60%且无润滑条件下进行初次轧制得到 0 道次试样。将 0 道次试样在垂直轧制方向上沿中线切割为二等分,形成板材,分别对两块板材进行表面去污处理,然后将去污处理后的两块板材叠合捆扎固定,在压下量为 60%、轧制速度 10 r/min 条件下进行轧制,得到 1 道次试样。重复循环图 1 中的工艺流程,直至得到 4 道次试样,即表面电沉积铜层的累积叠轧复合板。

1.3 组织观察与性能测试

采用 Axio Scope A1 型光学金相显微镜对复合板材样品宏观组织 RD-ND 截面进行观察。利用场发射扫描电子显微镜对复合板微观组织和断口形貌进行观察。同时利用配套的能谱仪对表面沉积铜原子复合板界面结合处元素分布进行了分析。采用电子万能拉伸试验机对复合板进行了室温力学性能测试,拉伸速度设定为 1 mm/min ,拉伸过程中使用引伸计对试样伸长率进行精确测量。

2 结果与讨论

2.1 复合板组织分析

1060 铝板表面经过 60 min 电沉积后的宏观图及铜层厚度统计如图 2 所示。图 2(a)为 1060 铝板经过电沉积 60 min 后沿 RD-ND 面的光学显微图像。可看到,1060 铝板与电沉积所得铜层界面结合良好。另外,对铜层厚度进行了统计,统计结果如图 2(b)所示。从图中可看出,经过电沉积所得铜层厚度为 $42.9 \sim 59.1\text{ }\mu\text{m}$,铜层最厚处与最薄处相差较小,且在统计图中最厚和最薄铜层所占比例较小。

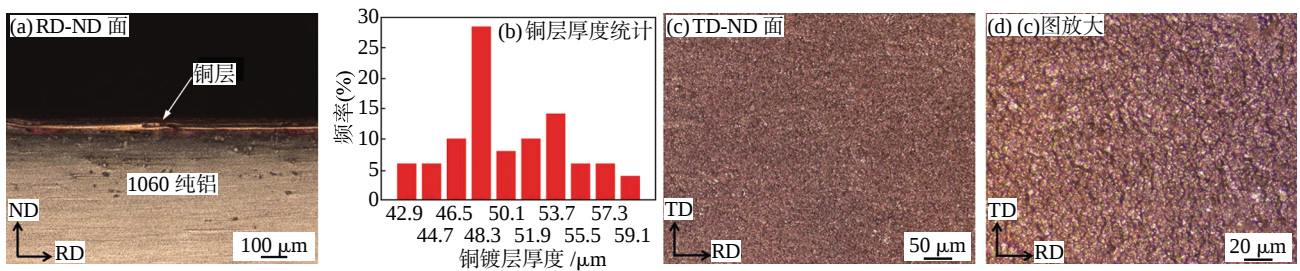


图2 1060 铝板表面电沉积 60 min 光学显微图像及铜厚度统计

Fig.2 Optical microscopy images of 1060 Al sheet of surface electrodeposition for 60 min and statistics of copper thickness

所统计铜层的平均厚度为 $50.24 \mu\text{m}$, 与铜层最厚处和最薄处相差不超过 $10 \mu\text{m}$ 。整体看来, 电沉积所得铜层厚度虽然存在微小的差异, 但整体厚度还是比较均匀。图 2(c)、(d) 均为铜层 RD-TD 面的光学显微图像。由图可见 1060 铝板表面全部被铜层覆盖, 镀铜颗粒比较均匀, 铜层表面没有发现明显缺陷。

电沉积 60 min 铝板累积叠轧后的不同道次复合板在高倍下的 SEM-EDS 图像如图 3 所示。在 0 道次试样中, 由于应变较小, 铜层大部分只处于颈缩阶段没有发生断裂, 呈现为长条状, 小部分发生断裂, 呈现为颗粒状。2 道次试样中, 大部分铜层呈现为短条状, 且处于颈缩阶段, 这种状态经过下一道次的累积叠轧后将破碎为铜颗粒。4 道次试样在高倍

SEM 图中未观察到明显的颈缩现象, 铜层基本破碎为尺寸较小的铜颗粒(图 3(c))。在累积叠轧过程中, 铜层发生了塑性拉伸、颈缩、断裂和弥散分布; 在这一过程中铜层大部分先破碎为长条状, 然后随着累积叠轧道次的增加, 铜层逐渐破碎为短条状, 最后破碎为尺寸较小且分布均匀的铜颗粒。对于共变形的层状结构复合材料, 由于各成分金属之间流变性能存在一定的差异, 因此就会导致塑性不稳定。异种金属组成的层状结构复合材料在塑性变形过程中, 随着应力的增加, 硬层金属往往出现颈缩并最终断裂^[9]。在本研究中, 1060 铝为软金属, 铜为硬金属, 软金属铝沿着轧制方向的拉伸倾向比硬金属铜的更大, 因此在累积叠轧过程中铜层被逐渐破碎, 最后破

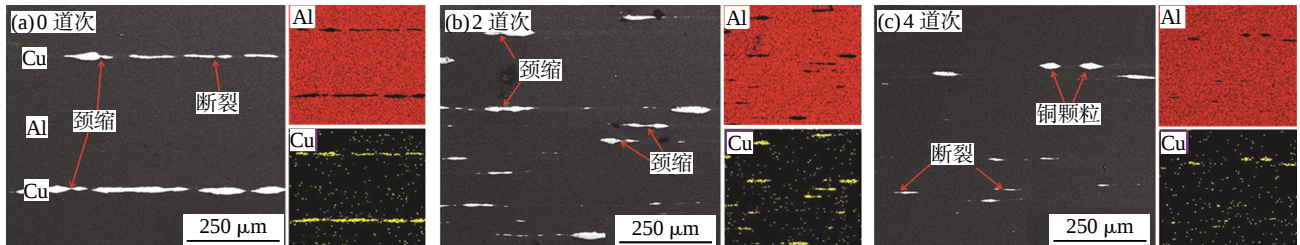


图3 不同道次复合板的 SEM-EDS 图

Fig.3 SEM-EDS maps of composite sheets of different cycles

碎为颗粒状且分布更加均匀。

2.2 室温拉伸力学性能分析

电沉积 60 min 铝板累积叠轧后的不同道次复合板拉伸工程应力-应变曲线如图 4 所示。由图可见, 复合板抗拉强度随着累积叠轧道次的增加而升高。4 道次复合板抗拉强度最高, 达到 186.6 MPa , 是退火态 1060 铝板抗拉强度的 2.72 倍。大塑性变形过程中, 复合材料的强度变化受两种主要的强化机制控制: 首先是位错应变硬化, 其次是晶界强化或晶粒细化^[10]。在具有较高加工硬化速率的 ARB 工艺中, 前几个道次材料强度增加源于加工硬化^[11]。随着循环次数的增加, 材料较高的强度是通过晶粒组织实现的, 超细晶粒组织逐渐演变为主要强化机理。同

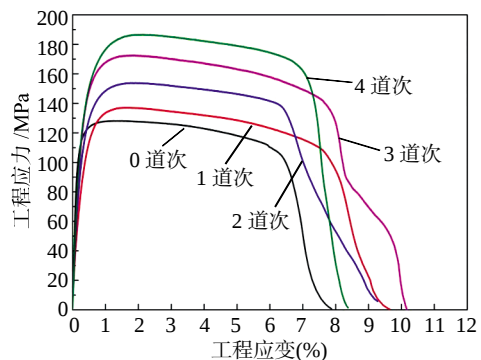


图4 复合板拉伸的工程应力-应变曲线

Fig.4 Engineering stress-strain curves of composite sheets

时, 随着 ARB 工艺的进行, 加工硬化效果也会减弱, 这与超细晶粒数量的增加和晶界取向严重失调

有关^[10]。复合材料的强化结果不仅来自上述机制,而且还受到 Cu 在复合材料中的强化作用的促进。经过初始轧制后,所得的 0 道次复合板中铜层发生颈缩断裂,呈现为长条状,对基体的强化作用较小。另外,长条状铜层的存在,导致在其周围会产生应力集中,裂纹的萌生扩展更加容易发生,故其强度较低^[12]。随着累积叠轧道次的增加,长条状的铜层逐渐断裂为短条状,再由短条状断裂破碎为颗粒状,最后在 4 道次试样中呈现为尺寸较小且分布均匀的铜颗粒,对复合板的强化作用不断的增大。此外,随着累积叠轧道次的增加,应变积累越大,位错强化作用也越明显,晶粒细化程度也在不断地增加,在多种强化机制作用下,复合板的抗拉强度不断升高。电沉积 60 min 后,经过累积叠轧所得的 4 道次试样具有最佳强度-塑形(186.63 MPa-8.4%)匹配。

2.3 复合板拉伸断口形貌分析

图 5 为电沉积 60 min 铝板累积叠轧后的不同道次复合板在高倍和低倍 SEM 下的拉伸断口形貌。其中,图 5(a)~(c)是在低倍 SEM 下的断口形貌,图 5(d)~(f)是在高倍 SEM 下的断口形貌。由于初次轧制应变积累有限,导致 0 道次试样 Al/Cu 界面的结合强度有限,在拉伸载荷作用下界面结合强度难以抵抗塑性变形,因此在试样的断口形貌中可以观察到 Al/Cu 界面之间发生小面积的层间剥离。0 道次试样断口处的韧窝数最少,说明其伸长率最小,2 道次和 4 道次试样韧窝尺寸大小及数量都比较接近,因此二者伸长率相差不大较为接近。由图 5 可以看出,Al/Cu 复合板的断裂模式具有剪切韧窝的韧性断裂,这种断裂模型在几种大塑性变形下的材料研究中就已经被观察到^[13-15]。研究发现,这

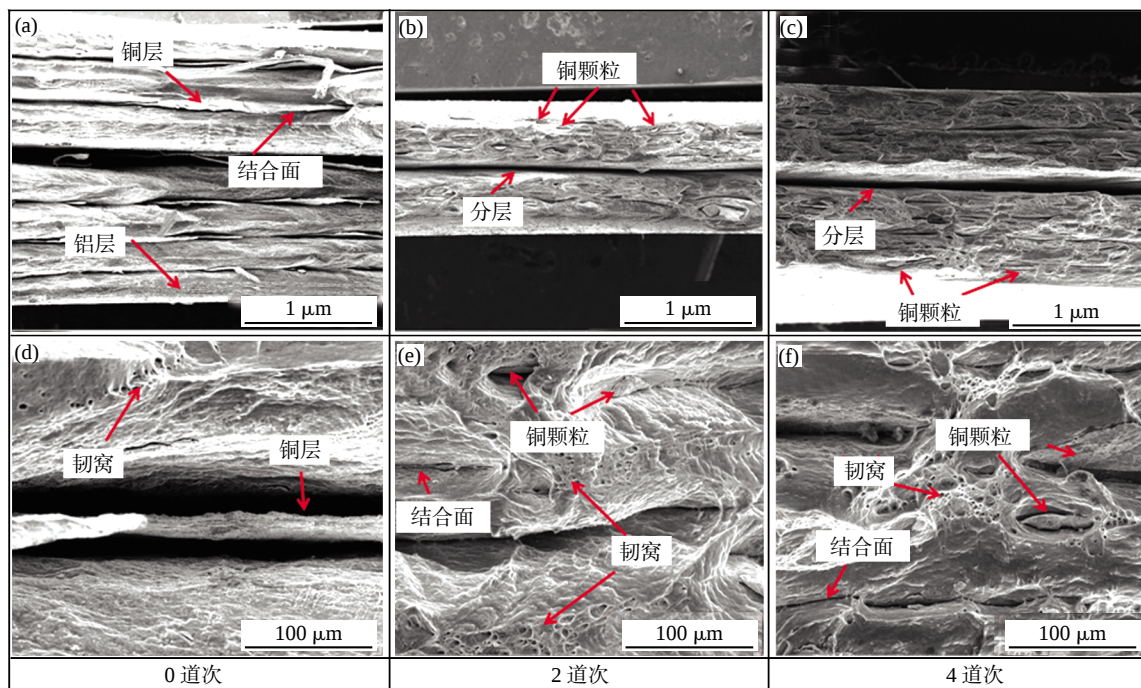


图 5 复合板的拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphologies of composite sheets

种断裂可能是由裂纹前微孔的形成和合并以及非常有限的位错活动造成的^[15]。

3 结论

(1) 结合累积叠轧法和电沉积工艺成功制备了性能优异的 Al/Cu 复合材料。电沉积 60 min 后经过累积叠轧所得的 4 道次试样具有最佳强度-塑形(186.63 MPa-8.4%)匹配。

(2) 随着累积叠轧道次的增加,界面结合质量

越来越好,复合板中铜层逐渐颈缩或破碎,最后变成尺寸较小且分布较均匀的铜颗粒。复合板断裂机制为典型的韧性断裂,且随累积叠轧道次增加,韧窝的数量也增加,所以复合板塑性整体呈现上升趋势。

参考文献:

- [1] 彭大暑,刘浪飞,朱旭霞. 金属层状复合材料的研究状况与展望[J]. 材料导报,2000(4):23-24.
- [2] 田广民,李选明,赵永庆,等. 层状金属复合材料加工技术研究现状[J]. 中国材料进展,2013,32(11):696-701.

- [3] 孟宪静. 层状金属复合材料制备技术现状及发展方向[J]. 一重技术, 2009(6): 7-9.
- [4] 徐涛. 金属层状复合材料的发展与应用[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(6): 7-10.
- [5] 张婷, 许浩, 李仲杰, 等. 层状金属复合材料的发展历程及现状[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 67-75.
- [6] 刘迎彬, 尹楚藩, 安文同, 等. 钛/铝多层复合板爆炸焊接研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 128-131.
- [7] 曾招芬. Al/Cu 多层复合材料的微观组织与力学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [8] Tench D, White J. Enhanced tensile strength for electrodeposited nickel-copper multilayer composites [J]. Metallurgical transactions A, 1984, 15(11): 2039-2040.
- [9] 王耀奇, 侯红亮, 李志强. 纯铝累积叠轧焊高温力学性能与显微组织研究[J]. 塑性工程学报, 2006(5): 45-47.
- [10] Eizadjou M, Talachi A K, Manesh H D, et al. Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding(ARB) process [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68 (9): 2003-2009.
- [11] Gubicza J, Chinh N Q, Csanadi T, et al. Microstructure and strength of severely deformed fcc metals [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 462(1/2): 86-90.
- [12] Wang W, Singh R N. Influence of the microstructure on the mechanical properties of Ni/Sn multilayered composites [J]. Materials Science & Engineering A, 1999, 271(1/2): 306-314.
- [13] Hasnaoui A, Swygenhoven H V, Derlet P M. Dimples on nanocrystalline fracture surfaces as evidence for shear plane formation[J]. Science, 2003, 300(5625): 1550-1552.
- [14] Shaarabaf M, Toroghinejad M R. Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process [J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 473(1/2): 28-33.
- [15] Xing Z P, Kang S B, Kim H W. Structure and properties of AA3003 alloy produced by accumulative roll bonding process [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(4): 717-722. 

(上接第 95 页)

- [16] Abbaszadeh S, Pakseresht A, Omidvar H, et al. Investigation of the High-Temperature Oxidation Behavior of the Al_{0.5}CoCrFeNi High Entropy Alloy [J]. Surfaces and Interfaces, 2020, 21: 100-724.
- [17] Maeda T, Ukai S, Hayashi S, et al. Effects of zirconium and oxygen on the oxidation of FeCrAl-ODS alloys under air and steam conditions up to 1500 °C [J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 516: 317-326.
- [18] Abe T, Chen Y, Saengdeejing A, et al. Computational phase diagrams for the Nd-based magnets based on the combined ab initio/CALPHAD approach [J]. Scripta Materialia, 2018, 154: 305-310.
- [19] Zhu Z Y, Cai Y F, Gong Y J, et al. Isothermal oxidation behavior and mechanism of a nickel-based superalloy at 1000 °C [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2017, 24: 776-783.
- [20] 吴晨剑, 白伟民, 高宁, 等. Ti-Al-Cr 体系高温 BCC 相扩散及原子移动性[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2021, 26(3): 189-200. 

(上接第 99 页)

- [3] 靳巧玲, 李国禄, 王海斗, 等. 纳米压痕技术在材料力学测试中的应用[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 127-136.
- [4] 汪利斌, 秦黎, 闻寄勤, 等. 纳米压痕法测定 NiTi 形状记忆合金表面氧化膜纳米硬度和弹性模量[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 182-187.
- [5] Xiao G, Ma Y, Ji X, et al. Effective acquisition of elastoplastic and creep parameters of lead-free solder alloy from high-temperature micro-indentation eliminating the size effect [J]. Mechanics of Materials, 2021(7): 103985.
- [6] Xu G T, Hao M F, Qiao Y K, et al. Characterization of elastic-plastic properties of surface-modified layers introduced by carburizing[J]. Mechanics of Materials, 2020, 144: 103364.
- [7] 张泰华. 微/纳米力学测试技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [9] Sneddon I N. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile [J]. International Journal of Engineering Science, 1965, 3(1): 47-57.
- [10] King R B. Elastic analysis of some punch problems for a layered medium [J]. International Journal of Solids and Structures, 1987, 23(12): 1657-1664. 