

# Fe 基非晶合金增强 1060 铝基多层复合材料的组织与性能

王少华, 孙悦颖, 叶茜, 解念锁, 景然

(陕西理工大学材料科学与工程学院, 陕西汉中 723001)

**摘要:** 采用累积叠轧焊 + 中间退火法复合轧制 1060Al/Fe 基非晶多层铝合金复合板材。利用光学显微镜、扫描电镜、X-衍射分析仪以及拉伸试验机分析 Al 基复合材料的微观组织结构变化、断面形貌、物相组成以及力学性能。结果表明: Fe 基非晶复合材料的增强体在 300 °C 中间退火过程中发生部分晶化, 在累积变形轧制过程中发生破碎, 并随着变形道次的增加, 破碎程度随之增大; 复合板前 6 道次的累积轧制变形出现了明显的加工软化现象, 并且随着变形道次的增加, 其加工软化的效果愈明显; 随着累积轧制变形道次增加, Al 基复合材料的力学性能发生了明显的变化, 第 2 道次轧制变形后屈服强度与抗拉强度达到了最大值为 140 MPa 和 156 MPa, 伸长率为 5.53%, 达到最佳综合性能。

**关键词:** 铝基多层复合材料; 累积叠轧焊; 再结晶退火; 铁基非晶合金增强; 力学性能

中图分类号: TG166.5 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2020)04-0075-04

## Microstructure and properties of 1060 Al-based multi-layered composite reinforced with Fe-based amorphous alloy

Wang Shaohua, Sun Yueying, Ye Xi, Xie Niansuo, Jing Ran

(School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi 723001, China)

**Abstract:** 1060 Al/Fe-based amorphous alloy multi-layered composites were prepared by means of accumulative roll bonding and intermediate annealing. The microstructure, fracture morphologies, phases and mechanical properties of the Al-based composites were analyzed by using optical microscope, scanning electronic microscope, X-ray diffraction and tensile test. The results show that the Fe-based amorphous alloy undergoes partial crystallization during the intermediate annealing process at 300 °C, and breaks up during the cumulative deformation rolling process, and the degree of breaking up increases with increasing rolling deformation passes. The composite plates softens evidently in the first 6 passes of cumulative deformation rolling, the softening effect is more obvious with the increasing passes. With the increase of accumulated rolling deformation passes, the mechanical properties of Al-based composites have changed obviously. After the second rolling deformation, the yield strength and tensile strength of the composites reach the maximum values of 140 MPa and 156 MPa respectively, and the elongation is 5.53%, reaching the best comprehensive properties.

**Keywords:** Al-based multi-layered composite; accumulative roll bonding; recrystallization annealing; Fe-based amorphous alloy reinforcing; mechanical properties

近年来,由 Saito 和 Tsuji 于 1998 年发明的累积叠轧焊法(Accumulative roll bonding, ARB)已被广泛用来制备具有大块超细晶结构的金属多层结构复合材料<sup>[1]</sup>。ARB 工艺因其具备节能、低成本、工艺简单,具备强大的工业化前景等优点而受到广泛关注。尤其是在铝基复合材料制备过程中,ARB 方法已成为主流的制备方式之一。目前,许多研究者已通过 ARB 方法成功制备出了具有超细晶结构和多层结构的 Al/Mg<sup>[2-5]</sup>、

Al/Cu<sup>[6]</sup>、Al/Ti<sup>[7]</sup>、Al/Ni<sup>[8-9]</sup>、Al/Zn<sup>[10]</sup>、Al/Al<sup>[11-12]</sup> 基合金等层状复合材料。不同金属材料在经历大塑性变形(Severe plastic deformation, SPD)时,由于变形抗力的不同,导致较硬的金属材料在经过多道次变形后发生颈缩和断裂,使得断裂的碎片分布在较软的基体上,从而影响复合材料的力学性能。目前,对于较硬金属层在变形过程中发生破碎后对于复合材料本身力学性能的影响作用还处于争论之中,部分学者认为尽管较硬金属层发生断裂会导致复合材料强度增加<sup>[9-10,13]</sup>;而其他一些学者则认为变形过程中碎片的出现,导致复合材料整体强度降低<sup>[4]</sup>。

本研究采用 1060 工业纯铝为基体,以铁基非晶合金箔带强化相在一定温度下进行多道次轧制,分析在轧制过程中铝基复合材料的结构与力学性能的变化规律,并分析铁基非晶合金在铝基体中的强化机制。

收稿日期: 2019-09-26

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-881); 陕西省教育厅专项科研计划(19JK0183); 2017 年陕西省创新学院大学生创新创业训练子项目; 陕西省高校科协青年人才托举计划(20160126)

作者简介: 王少华(1990—),男,硕士研究生,主要从事铝基复合材料强化与制备研究, E-mail: wongshaohua@yeah.net。通讯作者: 景然,副教授,博士, E-mail: qwe\_jr@163.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2020.04.015

## 1 试验材料与方法

采用厚度为 2 mm 的 1060 工业纯铝板材和 Fe 基非晶合金箔带为试验原材料。样品尺寸为 30 mm × 100 mm。轧制前对铝板和 Fe 基非晶合金箔带表面分别进行表面处理,确保接触结合面无污染。每道次轧制之前将铁基非晶合金箔带夹至两层基体材料中间,在 300 °C 保温 60 min 后,进行多道次轧制,且每道次变形均在 300 °C 保温 30 min。分别采用 Ultima IV 型 X 射线衍射仪(XRD)、尼康 EPIPHOT300U 型倒置光学显微镜(OM)、JSM-6390LV 扫描电镜(SEM)和 CMT5105 电子万能试验机对样品进行物相、微观组织形貌、断口形貌以及力学性能的检测与分析。拉伸应变速率为 0.375 mm/min,拉伸试样形状和尺寸如图 1 所示。

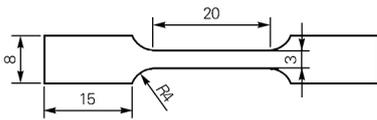


图 1 拉伸试样形状与尺寸示意图

Fig. 1 Schematic of the shape and size of tensile specimens

## 2 试验结果与分析

图 2(a) 为 ARB 方法制备多层铝基复合材料所用的 1060 铝合金板材的 X 射线衍射图谱,与图 2(d) Al

的标准 XRD 衍射图谱相比较,发现未经轧制变形的 1060 铝合金板材在(220)和(311)衍射面上存在变形织构,并且(222)衍射面消失。图 2(b) 为 Fe 基非晶合金经过 300 °C 退火以后出现明显的晶化衍射峰以及部分漫散峰,表明在 300 °C 进行轧制变形时,作为增强相的 Fe 基非晶合金出现部分晶化现象。在 300 °C 保温 60 min 并经过不同道次轧制后,与图 2(b) 相比,样品中的相结构发生了明显的变化,(111)和(200)晶面衍射峰的强度明显增加,而(220)和(311)晶面衍射峰强度大幅度降低,并且出现了(222)晶面的衍射峰(如图 2(c) 所示),与 Al 的标准衍射图谱一致。这表明在轧制过程中,由于变形前和变形道次之间进行了 300 °C 的中间退火处理,消除了原始样品中存在的织构和内应力。此外,在图 2(c) 中未发现 Fe 基非晶的衍射峰,这是由于其含量相对较少,未能检测相应的衍射峰。

经过不同道次轧制变形后的 Fe 基非晶增强铝基复合材料的显微组织照片如图 3 所示。由图 3 中可以看出,随着轧制道次的增加,样品的变形程度增大,较软的 1060 铝合金和较硬的 Fe 基非晶合金薄片由于变形程度不一致,非晶薄片发生断裂,碎片镶嵌在较软的 1060 铝合金基体中。当变形量达到 92.8% (第 7 道次) 时,Fe 基非晶合金明显碎化并均匀分布在 1060 铝

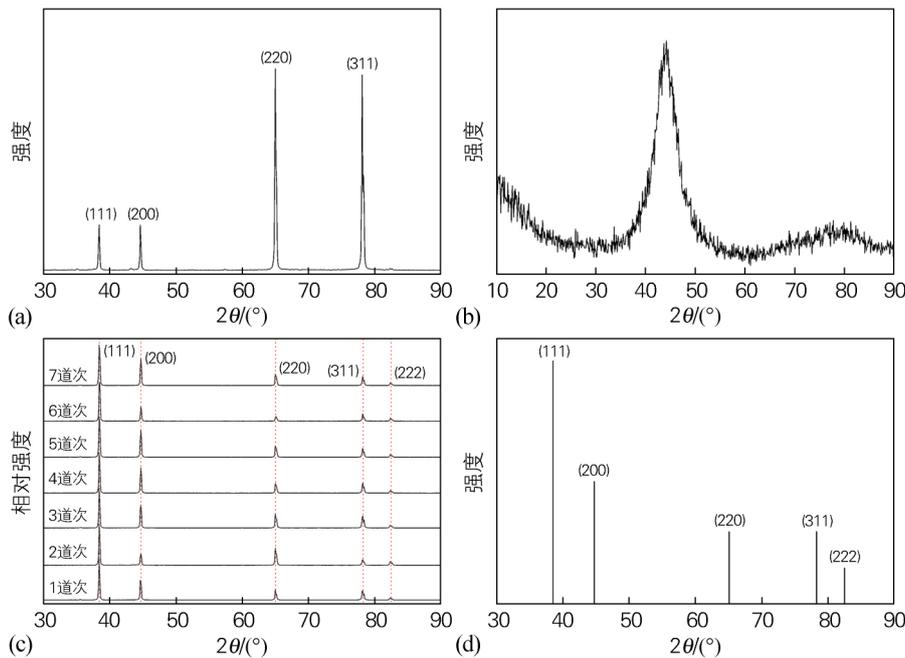


图 2 试验材料的 X 射线衍射图谱

(a) 原样(1060 铝合金); (b) 300 °C 退火非晶铁基合金; (c) 不同 ARB 道次变形后的复合材料; (d) Al 的标准谱

Fig. 2 XRD patterns of the tested materials

(a) original (1060 Al alloy); (b) iron-based amorphous alloy annealed at 300 °C;

(c) composite after deformation in different ARB passes; (d) patterns of Al

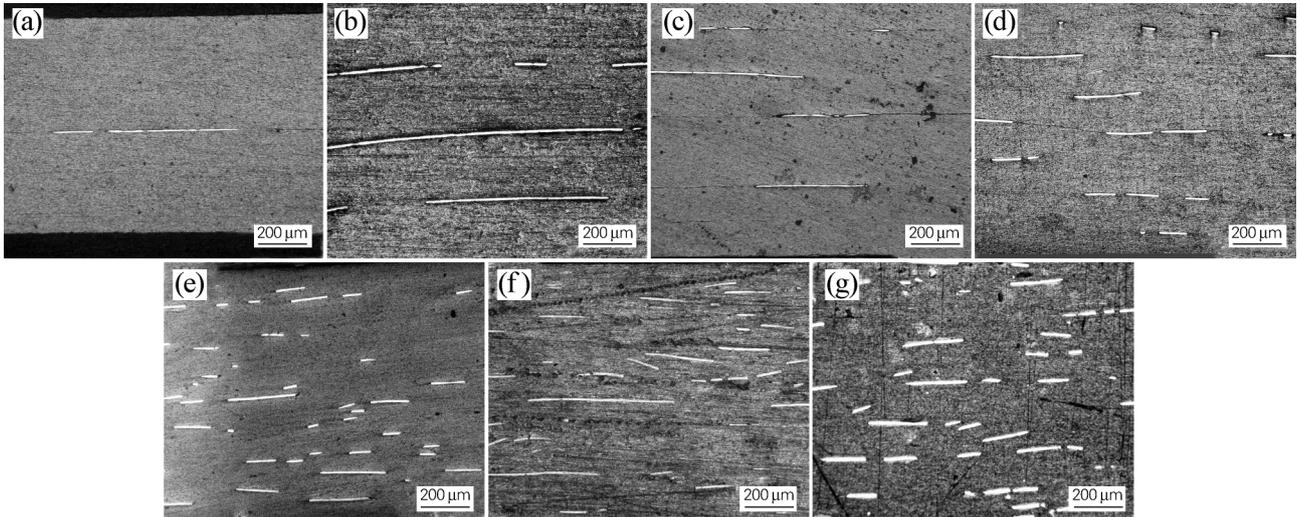


图 3 不同轧制道次下的 Fe 基非晶合金增强层状铝基复合材料的光学显微照片

(a) 1 道次; (b) 2 道次; (c) 3 道次; (d) 4 道次; (e) 5 道次; (f) 6 道次; (g) 7 道次

Fig. 3 Optical microstructure of the laminated Al-based composites reinforced with Fe-based amorphous alloy under different rolling passes

(a) 1 pass; (b) 2 pass; (c) 3 pass; (d) 4 pass; (e) 5 pass; (f) 6 pass; (g) 7 pass

合金基体中(如图 3(g)所示)。此外,随着变形量的增大,Fe 基非晶合金薄片与 1060 铝合金板的结合越好,结合面愈加模糊。

图 4 和表 1 分别为 Al/Fe 基非晶复合材料经过不同道次变形后的拉伸曲线和力学性能,应变速率为  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。由图 4 和表 1 可以看出,相对于 1060Al 合金,Fe 基非晶合金薄片的添加起到一定强化效果。经过 1 道次到 6 道次轧制变形,合金出现明显的加工软化现象。这是由于在单轴拉伸过程中,材料发生了动态回复,位错密度和位错运动的阻力均降低<sup>[2]</sup>。材料局部变形不均匀,发生颈缩,导致加工硬化指数为负值,强度随着塑性的增加而降低。Yu 等<sup>[14]</sup>认为存在亚微米晶粒的铝合金在单轴拉伸过程中过早发生颈缩时会导致应变软化,出现加工硬化指数为负数的现象。在第 7 道次变形以后,复合材料的伸长率明显增加,达

到 8.40%。材料的加工硬化程度较弱,出现明显的均匀变形平台。而在第 2 次轧制变形后,合金的屈服强度、抗拉强度以及伸长率分别为 140 MPa、158 MPa 和 5.53%,强化效果最好,综合性能最佳。

表 1 不同轧制变形道次复合材料样品的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the composite specimens under different rolling passes

轧制道次	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%
0	104	103	11.60
1	130	128	4.30
2	158	140	5.53
3	148	146	6.10
4	142	140	3.99
5	106	102	6.20
6	104	100	4.70
7	105	100	8.40

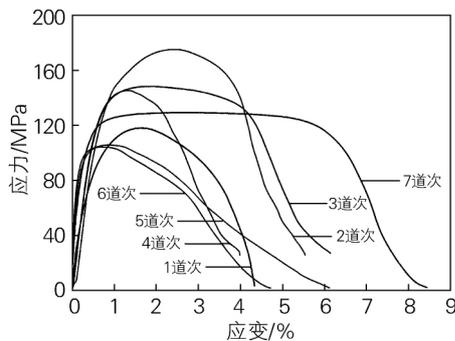


图 4 复合材料样品经过不同道次变形后的应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve of the composite specimens under different rolling passes

图 5 为 Al 基复合材料经过 1 道次、4 道次以及 7 道次累积轧制变形后的断口形貌图。从图 5(a)可以看出经过 1 道次轧制变形后的 Al 基复合材料的中间结合面结合效果较差,在单轴拉伸变形过程中结合面分离。经过 4 道次累积轧制变形后,结合面的结合程度明显加强(与图 3 结果一致),此外 Fe 基非晶薄片破碎,分布在断口中,并且出现明显的韧性断口形貌,如图 5(b)中箭头指向处和图 5(c)。

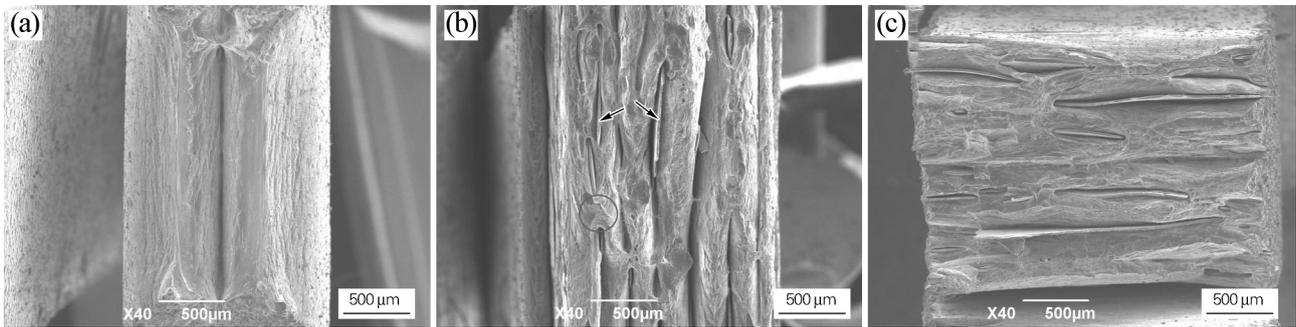


图5 复合材料样品经过不同道次轧制变形后的断口形貌

(a) 1道次; (b) 4道次; (c) 7道次

Fig.5 Fracture morphologies of the composite specimens under different rolling passes

(a) 1 pass; (b) 4 pass; (c) 7 pass

### 3 结论

1) 随着累积轧制道次增加, Al基复合材料的力学性能发生了明显的变化, 第2道次轧制变形后合金的屈服强度与抗拉强度达到了158 MPa和140 MPa, 相对于1060铝合金分别增加了35.9%和52.9%, 综合性能最佳。

2) 前6道次的累积轧制变形基体出现了明显的加工软化现象, 并且随着变形道次的增加, Al基复合材料加工软化的效果愈明显。

3) Fe基非晶合金增强体在300 °C中间退火过程中发生部分晶化, 在累积变形轧制过程中发生破碎, 并随着变形道次的增加, 破碎程度随之增大。

#### 参考文献:

- [1] Saito Y, Tsuji N, Utsunomiya T, et al. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process [J]. *Scripta Materials*, 1998, 39(9): 1221-1227.
- [2] Mazilkin A A, Straumal B B, Rabkin E, et al. Softening of nanostructured Al-Zn and Al-Mg alloys after severe plastic deformation [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 3933-3939.
- [3] 刘华赛, 张滨, 张广平, 等. 累积叠轧焊制备 Al/AZ31 多层复合材料及其强度 [J]. *稀有金属*, 2009, 33(2): 285-289.  
Liu Huasai, Zhang Bin, Zhang Guangping, et al. Al/AZ31 multilayered composite prepared by accumulative rolling bonding technique and its strength [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2009, 33(2): 285-289.
- [4] Wu K, Chang H, Maawad E, et al. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB) [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527: 3073-3078.
- [5] 常海, 郑明毅. 金属间化合物对累积叠轧 Mg/Al 多层复合板材断裂过程的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(9): 2242-2245.  
Chang Hai, Zheng Mingyi. Effect of intermetallic compounds on the fracture behavior of a Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(9): 2242-2245.
- [6] Lee Kwang Seok, Lee Su Eun, Kwon Yong-Nam. Interface characterization of Al/Cu 2-ply composites under various loading conditions [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(S1): 36-41.
- [7] 董晓萌, 任学平, 王耀奇, 等. 叠轧 Ti/Al 复合板结构与力学性能研究 [J]. *稀有金属*, 2017, 41(11): 1208-1213.  
Dong Xiaomeng, Ren Xueping, Wang Yaoqi, et al. Structure and mechanical properties of Ti/Al multilayered composite [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2017, 41(11): 1208-1213.
- [8] Ji C, He Y, Wang C T, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of an Al/Ni composite processed via accumulative roll-bonding [J]. *Materials and Design*, 2017, 116: 591-598.
- [9] Mozaffari A, Manesh H, Danesh, Janghorban K. Evaluation of mechanical properties and structure of multilayered Al/Ni composites produced by accumulative roll bonding (ARB) process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 489: 103-109.
- [10] Dehsorkhi Reza Nasiri, Qods Fathallah, Tajally Mohammad. Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn composite during accumulative roll bonding (ARB) process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 530: 63-72.
- [11] Lee S H, Saito Y, Sakai T, et al. Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 325: 228-235.
- [12] 滕广标, 丁辛宇, 陈勇, 等. 累积叠轧焊法制备铝基复合材料及其强化机制研究 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(2): 97-100.  
Teng Guangbiao, Ding Xingyu, Chen Yong, et al. Research on strengthening mechanism and aluminum matrix composites fabricated by accumulative roll bonding [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(2): 97-100.
- [13] Ghalandari L, Moshksar M M. High strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 506: 172-178.
- [14] Yu C Y, Sun P L, Kao P W, et al. Mechanical properties of submicron-grained aluminum [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52: 359-363.