

H65-IF-H65层状复合材料力学行为的尺寸效应

王坤 安俊博 费若渝

Sizes effect on the tensile behaviors of H65-IF-H65 laminated metal composites

WANG Kun, AN Junbo, FEI Ruoyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240304.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于应力强度因子评估 WC_p 形状对 WC_p/Fe 复合材料热疲劳裂纹扩展行为的影响

Effect of WC_p shape of WC_p/Fe composites on thermal fatigue crack propagation behavior based on stress intensity factor

复合材料学报. 2020, 37(2): 408–414 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190426.001>

CFRP复合材料加固钢筋混凝土柱偏心受压性能尺寸效应的试验

Experimental study on size effect of reinforced concrete columns strengthened with CFRP composite under eccentric loads

复合材料学报. 2019, 36(5): 1275–1283 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180709.001>

碳纤维增强树脂复合材料加固钢筋混凝土柱抗震性能的尺寸效应试验

Experiment on the size effect of seismic behavior for reinforced concrete columns strengthened by carbon fiber reinforced plastics

复合材料学报. 2020, 37(10): 2645–2655 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.001>

纳米 SiO_2 微球在PMMA凝胶聚合物电解质中的尺寸效应及其在全固态电致变色器件中的应用

Size effect of nano SiO_2 microspheres in PMMA gel polymer electrolyte and its application in all-solid-state electrochromic devices

复合材料学报. 2021, 38(5): 1446–1454 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200914.001>

砌浆层状复合材料珍珠层的应变率效应

Effect of strain rate on nacre with brick-and-mortar microstructure

复合材料学报. 2017, 34(12): 2756–2761 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170302.002>

钢纤维对水泥基复合材料抗起裂特性的影响

Influence of steel fibres on the resistance to crack initiation of cementitious composites

复合材料学报. 2017, 34(8): 1862–1869 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161124.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

H65-IF-H65 层状复合材料力学行为的尺寸效应



分享本文

王坤^{*1}, 安俊博², 费若渝¹

(1. 浙江工贸职业技术学院 光电制造学院, 温州 325026; 2. 瓯锃科技温州有限公司 研发中心, 温州 325026)

摘要: 采用轧制结合退火的方式制备了厚度为 0.12 mm、标距宽度为 1~9 mm 的 H65 黄铜/IF 钢/H65 黄铜 3 层层状复合金属材料 (H65-IF-H65), 并借助电子背散射衍射 (EBSD)、数字图像相关 (DIC) 技术、常规拉伸、原位拉伸和 SEM 等手段分析了试样宽度对复合材料力学行为的影响。研究表明: 层状复合材料中的 H65-IF 界面在退火过程中未发生元素扩散, 界面结合方式为机械结合。随着标距宽度由 9 mm 逐渐降低至 1 mm, 材料的抗拉强度、屈服强度基本保持不变, 但总延伸率、均匀延伸率和不均匀延伸率分别由 30.3%、23.4% 和 6.9% 下降至 20.3%、18.8% 和 1.5%, 加工硬化能力迅速减弱。与此同时, 材料的应变集中程度逐渐加剧, 拉伸断口上的韧窝带宽度变小且带内的韧窝数量和尺寸也明显减小, 呈现出显著的尺寸效应。H65-IF-H65 层状复合材料的尺寸效应主要源于剪切应力的交互作用随着标距宽度的降低而被抑制, 裂纹更易沿单道剪切带快速扩展而导致塑性下降。

关键词: 层状复合材料; 尺寸效应; 拉伸断口; 原位拉伸; 裂纹扩展

中图分类号: TG335.81; TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)11-6251-10

Sizes effect on the tensile behaviors of H65-IF-H65 laminated metal composites

WANG Kun^{*1}, AN Junbo², FEI Ruoyu¹

(1. College of Optoelectronic Manufacturing, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou 325026, China;

2. Research and Development Center, Okumtec Technology Wenzhou Co., Ltd., Wenzhou 325026, China)

Abstract: The H65 brass alloy-interstitial free steel-H65 brass alloy (H65-IF-H65) laminated metal composites (LMCs) of 0.12 mm thickness and 1-9 mm gauge widths were prepared by rolling combined with annealing. The electron back scatter diffraction (EBSD), digital image correlation (DIC) technology, conventional tensile testing, in-situ tensile testing and SEM were used to analysis the effect of specimen width on the mechanical behavior of the H65-IF-H65 LMC. The results show that the H65-IF interface is mechanical bonded without elements diffusion during the annealing process. As the gauge width gradually reduced from 9 mm to 1 mm, the tensile strength and yield strength remain basically unchanged, meanwhile the total, the uniform, and the non-uniform elongations decrease from 30.3%, 23.4% and 6.9% to 20.3%, 18.8% and 1.5%, respectively. The work hardening ability also decreases rapidly. Moreover, the strain of the H65-IF-H65 LMCs is gradually concentrated. On the tensile fracture, the width of the dimple band and the number and size of dimples within it also decrease significantly, which indicates a significant size effect. The main reason of sample sizes effect on the tensile behaviors of H65-IF-H65 LMCs is that the interaction of shear stress is inhibited with the decrease of the gauge width. The cracks are more likely to spread rapidly in the single shear band and result in a decreased ductility.

Keywords: laminated metal composites; size effect; tensile fracture; in-situ tension; crack propagation

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-02-19; 录用日期: 2024-02-26; 网络首发时间: 2024-03-07 07:58:33

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240304.004>

基金项目: 温州市重大科技创新攻关项目 (ZG2019024)

Wenzhou Key Scientific and Technological Innovation Research Project (ZG2019024)

通信作者: 王坤, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为特种金属材料设计与制备 E-mail: wangkunccc@zjtc.edu.cn

引用格式: 王坤, 安俊博, 费若渝. H65-IF-H65 层状复合材料力学行为的尺寸效应 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 6251-6260.

WANG Kun, AN Junbo, FEI Ruoyu. Sizes effect on the tensile behaviors of H65-IF-H65 laminated metal composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(11): 6251-6260(in Chinese).

层状金属复合材料 (Laminated metal composites, LMCs) 是由 2 层或多层不同金属通过一定复合技术而制备的一种新型复合材料^[1-2], 例如 Al/Mg 层状复合板材^[3]、纯 Mg/ZK60 镁合金层状金属复合材料^[4]、Al/Cu/Mg 复合材料^[5]、Al/Cu/Ti/Cu/Al 复合材料^[6]、Cu/Al/Cu 复合材料^[7] 等。层状复合材料在兼具各组元优异特性的基础上, 还可通过组元设计及工艺调控获得单一金属材料所不具备的优异综合性能^[8]。H65 黄铜/IF 钢/H65 黄铜 3 层层状复合金属材料 (以下简称: H65-IF-H65 层状复合材料) 不仅具有外层铜材质良好的导电、导热和耐蚀性能, 还可兼具芯部 IF 钢优异的强度、塑性及成形性能, 可以广泛应用于新能源、通讯、电力电气等诸多领域。然而, 随着电子元器件逐渐向微型化的方向发展, 学者们发现均质材料的力学性能随着工件尺寸的减小而表现出愈发显著的尺寸效应^[9-10]。例如, 铜箔的拉伸强度、塑性和加工硬化系数均随着试样厚度的降低而降低, 尺寸效应与晶粒尺寸和试样厚度的比值密切相关^[11]。当轧制的 IF 钢极薄带厚度小于临界值时, 位错密度的降低及位错在自由表面更容易逃逸均导致其强度下降^[12]。对于层状金属复合材料而言, 其力学性能可表现出严重依赖于组元层厚等相关的内在尺寸效应, 例如 Li 等^[13] 采用磁控溅射方法设计并制备了单层厚度从纳米到亚微米尺度的 Cu/Au 和 Cu/Cr 多层材料, 并发现亚微米级 Cu/Au 多层可以产生相对均匀的塑性变形而纳米级 Cu/Au 多层则产生了严重剪切带而失去了塑性变形稳定性, 相较之下, 纳米级 Cu/Cr 多层仅产生了轻微的剪切带, 通过调整和优化组元的层厚和层厚比可以获得良好的强度-韧性匹配^[14-15]。层状金属复合材料力学性能同样表现出与样品尺寸密切相关的外在尺寸效应, 例如 Guo 等^[16] 发现微柱直径从 2 000 nm 减小到 750 nm 时, CuZr (单层厚 100 nm)/Cu (单层厚 10 nm) 多层材料压缩流变应力从 3.01 GPa 减小到 2.25 GPa。鉴于 H65-IF-H65 层状复合材料在微型电子元器件方面的巨大应用潜力,

其势必会面临微拉伸和微冲压等工艺所带来的外在尺寸效应, 故本文旨在研究试样宽度对已优化层厚及层厚比的 H65-IF-H65 层状复合材料力学性能的影响及其机制, 为其在新能源、通讯、电力电气等领域的应用提供参考。

1 H65-IF-H65 层状复合材料制备与分析方法

1.1 试样制备

H65-IF-H65 层状复合材料为瓯锬科技温州有限公司采用 3 层商用 H65、IF、H65 金属薄板通过轧制结合退火复合而成, 其中 H65 和 IF 具体成分如表 1 所示。上层和下层 H65 箔材、中层 IF 板料经过表面清洗、粗轧复合至 2.0~3.0 mm 厚度。随后, 材料在 850℃ 罩式炉 (瓯锬科技温州有限公司) 中进行 620~650℃ 退火后被精轧至指定厚度。轧制后的材料再次退火并被平整至 0.12 mm, 具体制备流程如图 1 所示。

1.2 试样分析

采用线切割沿轧制方向在层状复合材料上切割出标距宽度分别为 1、2、3、4、5、9 mm、标距长度为 25 mm 的拉伸试样。拉伸样品夹持端宽度设计为 20 mm 以防止拉伸过程中夹具夹伤样品可能导致的试样夹持端断裂。同样沿轧制方向加工出原位拉伸试样, 试样标距宽度分别为 1 mm 和 9 mm, 标距宽度为 5 mm。采用配置非接触式视频引伸计 AVE 2 的 Instron3369 台式电子万能拉伸试验机进行常规拉伸测试, 拉伸速率为 1 mm/min。采用数字图像相关技术 (DIC) 对拉伸过程中的应变场进行分析。视频引伸计分辨率和准确度分别为 0.25 μm 和 ±2.5 μm, 为减少实验误差, 每组测试 5 个试样。

对横向方向 (Transverse direction, TD) 截面进行打磨和氩离子抛光, 随后采用配置电子背散射衍射 (EBSD, HKL/Channel 5 system) 的 FEI Nova Nano SEM 450 扫描电子显微镜对两侧 H65 层和中间 IF 层进行晶粒度统计、取向观测。利用配置有 EDS 装置和 3D roughness 软件的 phenom XL 扫描电子显微镜对 H65-IF-H65 层状复合材料成分分布、

表 1 H65 黄铜-IF 钢-H65 黄铜 (H65-IF-H65) 层状复合材料 (LMCs) 中 H65 黄铜和 IF 钢成分 (单位: wt%)
Table 1 Compositions of H65 brass and IF steel in the H65 brass-IF steel-H65 brass (H65-IF-H65) laminated metal composites (LMCs) (Unit: wt%)

Material	Element							
H65	Cu	Zn	P	Fe	Impurities			
	64.524	Bal.	≤0.01	0.016	<0.2			
IF	Fe	C	Mn	Cu	Ni	Cr	P	S
	Bal.	0.003	0.18	0.01	0.01	0.01	0.03	0.004

Note: Bal.—Banlance.

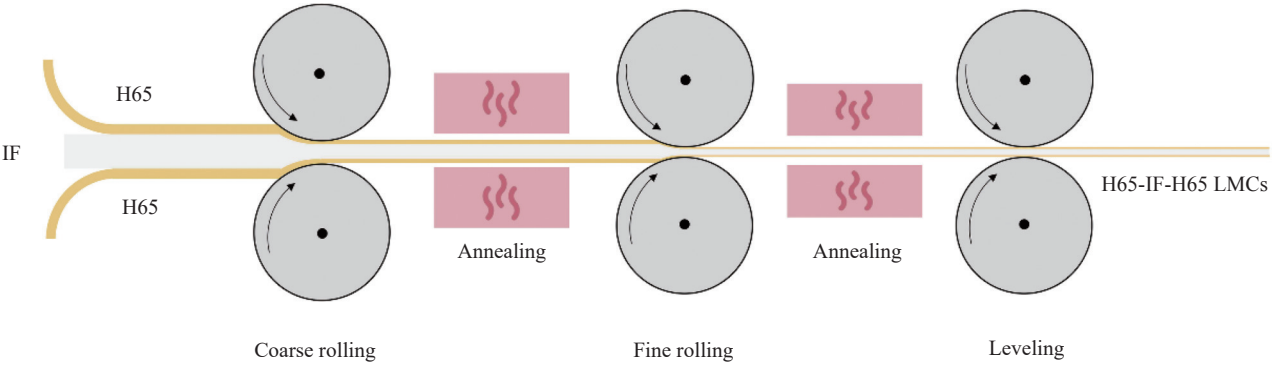


图 1 H65-IF-H65 层状复合材料的制备流程示意图

Fig. 1 Preparation process diagram of the H65-IF-H65 LMCs

断口形貌和拉伸过程中的表面粗糙度进行观测。利用 1 kN 载荷的原位拉伸台对原位拉伸样品进行拉伸，拉伸速率为 0.2 mm/min。在拉伸同时，使用 phenom XL 扫描电镜对样品表面形貌和裂纹萌生、扩展情况进行观测。

2 实验结果与讨论

2.1 H65-IF-H65 层状复合材料显微组织分析

图 2 为采用 SEM 对 H65-IF-H65 层状复合材料进行结构与元素分布分析。如图 2(a) 所示，层状复合材料厚度约为 120 μm，外部 H65 层和芯部 IF 层厚度较均匀，其中 IF 层平均厚度为 100 μm 左右，外侧的 H65 厚度各约为 10 μm，铜层厚度占层状复合材料总厚度的 16.7%。依据混合定律可知^[17]，复合材料的力学性能应由厚度更大的 IF 钢主导。H65-IF 界面清晰且相对平直，仅在局部位置出现相互侵入造成的界面弯曲，这有助于增加 H65-IF 界面结合强度。如图 2(b) 所示，元素面扫描分析显示，H65-IF 界面经过冷轧和二道次退火但依然未发生元素扩散也未形成金结合层，H65 层与 IF 层结合方式为机械结合。

从图 3 可知，在经过大比例冷轧和退火热处理后，层状复合材料 (Rolling direction-Normal direction, RD-ND) 面的芯部 IF 层为包含亚晶粒的铁素体等轴晶，H65 层则为内部包含一定退火孪晶的奥氏体等轴晶。如图 3(b) 和图 3(c) 所示，IF 层形成了{111}<100>织构，研究认为 IF 钢中的{111}<uvw>织构使钢板具有较大的抵抗钢板减薄能力而有利于冲压^[18]。H65 层形成了典型的{011}<211>黄铜织构，但 H65 和 IF 层织构强度均较弱。如图 4 所示，H65-IF-H65 层状复合材料内的 IF 和 H65 的平均晶粒尺寸分别为 20.9 μm 和 9.6 μm。

2.2 不同标距宽度 H65-IF-H65 层状复合材料力学性能

从图 5(a) 所示的不同标距宽度 H65-IF-H65 层

状复合材料工程应力-应变曲线可以看出，当标距

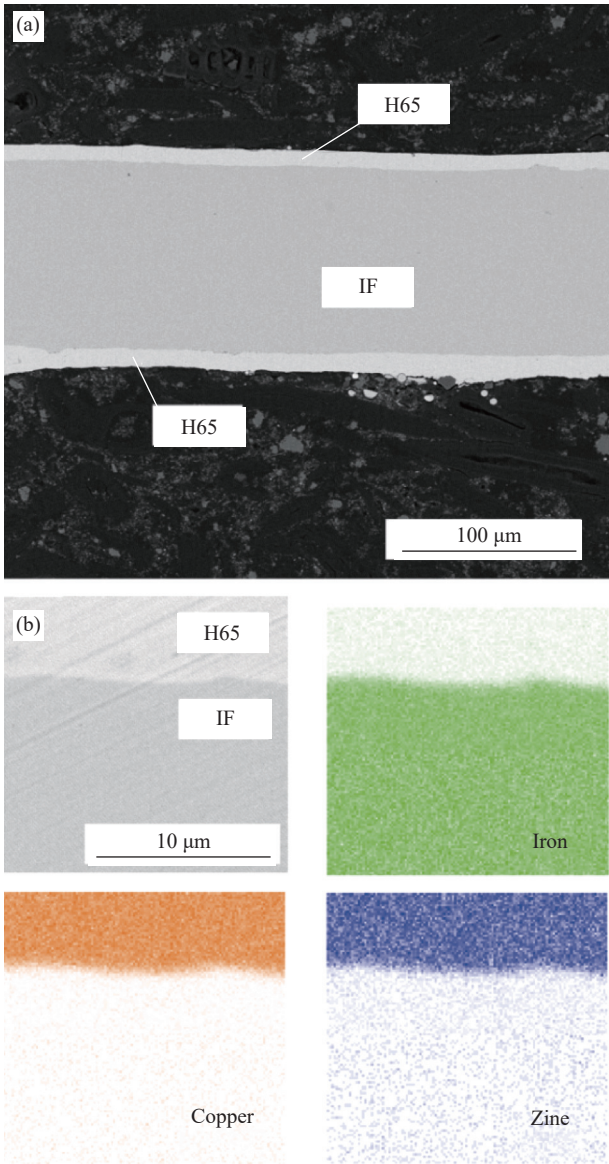


图 2 H65-IF-H65 层状复合材料横截面 SEM 图像 (a) 及元素分布 (b)

Fig. 2 SEM image (a) and elements distribution analysis (b) of the cross section of the H65-IF-H65 LMCs

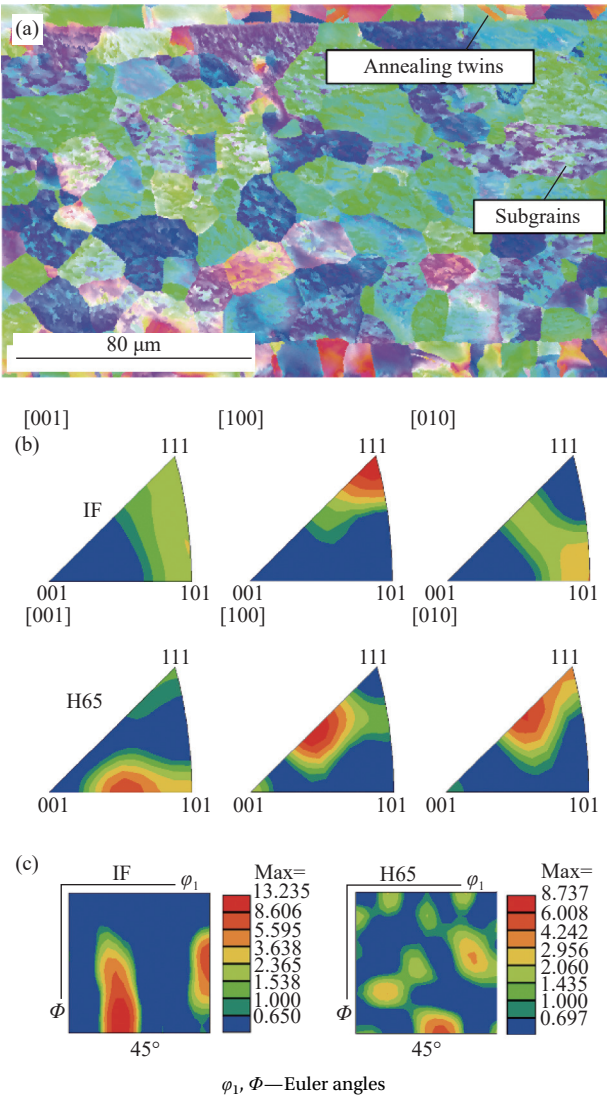


图3 H65-IF-H65 层状复合材料横截面显微结构 EBSD 分析 (a) 及 IF 层和 H65 层的反极图 (b) 及欧拉角 $\phi_2=45^\circ$ 的反极图 (ODF) 截面图 (c)

Fig. 3 EBSD analysis (a) of cross section microstructure of the H65-IF-H65 LMCs, and the inverse pole figures (ODF) (b) and Euler angles $\phi_2=45^\circ$ orientation distribution function sections (c) of IF layer and H65 layer

宽度为 9 mm 时, 材料的总延伸率、屈服强度和抗拉强度分别为 37.5%、218.9 MPa 和 302.0 MPa, 随着试样宽度不断下降, 材料的总延伸率呈现单调下降趋势, 当试样宽度为 1 mm 时, 复合材料的总延伸率、屈服强度和抗拉强度分别为 20.2%、209.8 MPa 和 287.5 MPa。H65 在拉伸过程中表现出连续屈服行为^[19], 而 IF 中的碳、氮等固溶原子含量极低, 生成碳化物或氮化物也可大幅降低固溶原子与位错间的交互作用, 故 IF 同样表现出连续屈服特征^[20]。因外, 不同标距宽度 H65-IF-H65 层状复合材料在拉伸过程中均无屈服平台, 即表

现为连续屈服行为的特征。与此同时, 标距宽度为 9 mm 的复合材料应力-应变曲线在断裂过程中出现了轻微波动 (如箭头所示), 而随着标距宽度的降低, 该阶段的应力-应变曲线的波动逐渐消失。图 5(b) 为标距宽度 1 mm、3 mm 和 9 mm 试样的真应力-真应变曲线和加工硬化率-真应变曲线。H65-IF-H65 层状复合材料的加工硬化率曲线可以大致分为快速下降、缓慢下降和快速下降 3 个阶段。不同标距宽度的试样加工硬化率曲线的第一阶段基本重合。而随着标距宽度的下降, 第二阶段长度有所缩短且下降速率明显增加。依据材料塑性失稳判据可知: 当材料结束均匀变形而进入非均匀变形时, 材料加工硬化能力无法抵抗塑性失稳而产生颈缩行为, 颈缩点即真应力-应变曲线与加工硬化率曲线的交点^[21]。标距宽度为 9 mm、3 mm 和 1 mm 试样的颈缩点所对应的真应变分别为 26.8%、22.4% 和 16.5%。很显然, H65-IF-H65 层状复合材料抵抗塑性失稳的能力随着试样标距宽度的减小而降低。

如图 6(a) 所示, 由工程应力-应变曲线得出标距宽度为 9 mm 试样的总延伸率、均匀延伸率和非均匀延伸率分别为 37.5%、29.3% 和 8.2%。标距宽度为 3 mm 时, 上述值分别为 30.3%、23.4% 和 6.9%。当标距宽度降至 1 mm 时, 上述值分别降至 20.3%、18.8% 和 1.5%。H65-IF-H65 层状复合材料总延伸率和均匀延伸率随着标距宽度的减小而均有所降低, 在 1~9 mm 范围内并未出现性能的突然衰减, 而非均匀延伸率则在试样厚度 < 3 mm 时的下降速率略有增加。但相较而言, 均匀延伸率下降幅度远大于非均匀延伸率的下降幅度。总体而言, H65-IF-H65 层状复合材料的均匀塑性变形能力更易受到试样宽度的影响。

试样尺寸降低同样也会影响材料的强度。材料外表面的晶粒不受晶界约束, 可被视为单晶并在拉伸过程中对位错的阻碍作用更小, 当表面晶粒所占比例随着试样尺寸减小而增大时, 材料的流变应力和强度则随之降低^[9, 10, 22]。H65-IF 界面经过大比例轧制和二道次退火, 虽未形成冶金结合层但其结合性能依然优异。H65 层晶粒尺寸 (9.6 μm) 与 H65 层厚 (10 μm) 相当, 故 H65 晶粒及外侧的 IF 晶粒可以视为复合材料的表层晶粒, 其余 IF 钢可以视为复合材料的内部晶粒。依据表面层模型进行估算^[23-24]: 当标距宽度从 9 mm 降至 1 mm 时, 试样表面晶粒所占比例仅由 41.9% 增加至 43.6%。

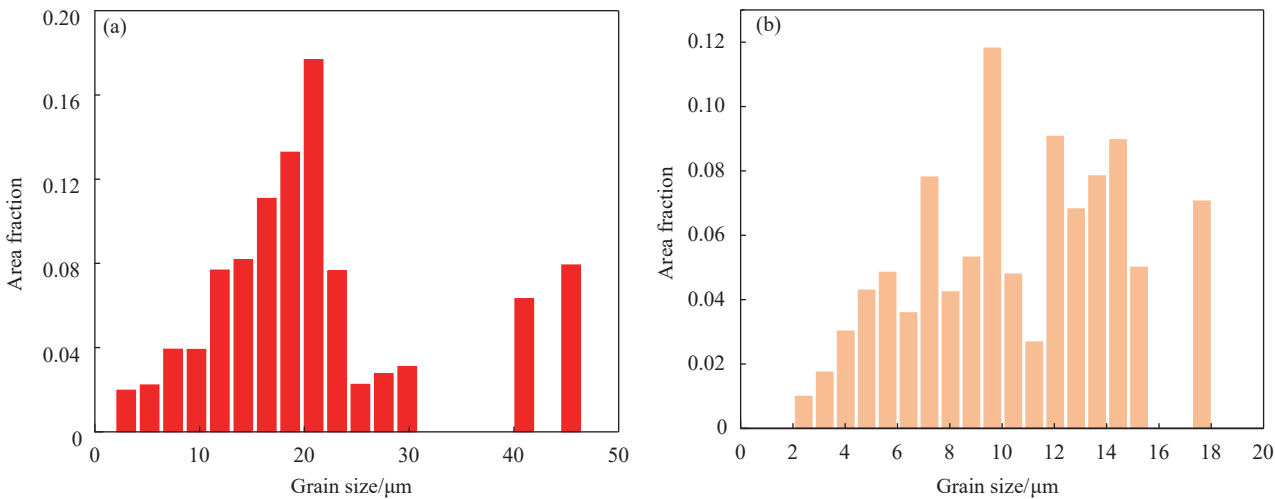


图 4 H65-IF-H65 层状复合材料中的 IF 层 (a) 和 H65 层 (b) 的晶粒尺寸分布
Fig. 4 Grain size distributions of IF layer (a) and H65 layer (b) in the H65-IF-H65 LMCs

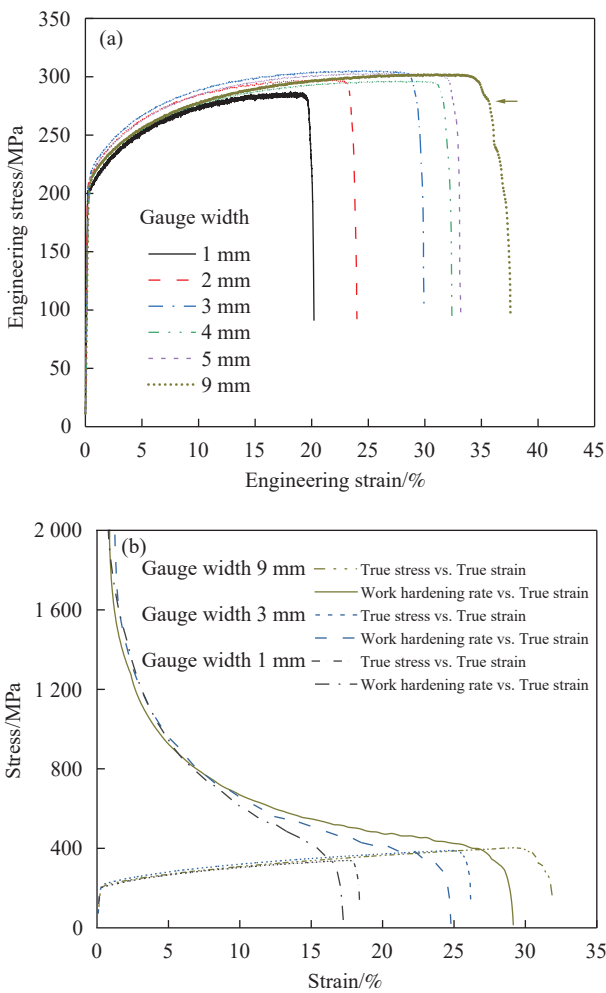


图 5 (a) 不同标距宽度 H65-IF-H65 层状复合材料工程应力-应变曲线;
(b) 标距宽度 1 mm、3 mm 和 9 mm 试样的真应力、应变硬化率-真应变曲线

Fig. 5 (a) Engineering stress-strain curves of H65-IF-H65 LMCs with different gauge widths; (b) True stress and strain hardening rate vs. true strain curves of samples with gauge widths of 1 mm, 3 mm and 9 mm

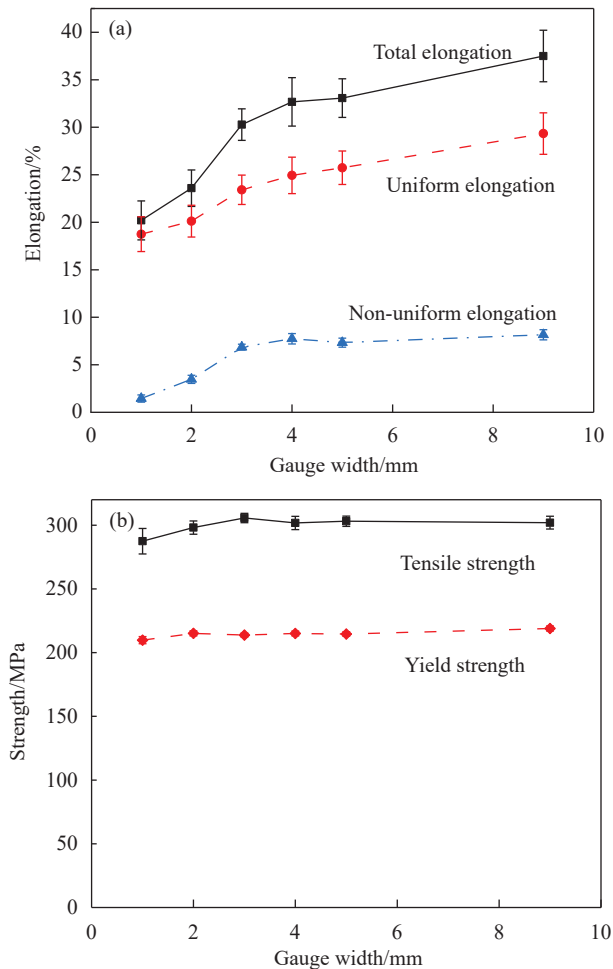


图 6 H65-IF-H65 层状复合材料各类延伸率 (a) 及强度 (b) 随标距宽度的变化关系

Fig. 6 Variation of different elongations (a) and strengths (b) of H65-IF-H65 LMCs with the change of the gauge widths

复合材料的平均屈服强度和平均抗拉强度在标距宽度为 1 mm 时的下降幅度极小, 表明标距宽度

对 H65-IF-H65 层状复合材料的强度影响较小。

2.3 H65-IF-H65 层状复合材料应变分布与表面粗糙度

采用数字图像相关技术 (DIC) 对标距宽度为 1 mm 和 9 mm 的试样在单轴拉伸过程中的应变场分布进行分析。如图 7(a)~图 7(c) 所示, 标距宽度为 1 mm 试样拉伸至工程应变约为 10% 时, 标距段内的形变主要集中在中下部位置, 其应变量约为 12.5%, 应变相对集中区域约占标距长度的 50%, 剩余部分的应变量约为 7.5% 左右; 当试样拉伸至靠近颈缩点时, 应变相对集中区域依然位于中下部位置且占比降低至标距长度的约 40%; 当即将发生断裂时, 复合材料出现一条与垂直拉伸方向约为 30° 的应变集中带 (图 7(c) 中箭头), 应变带周围存在塑性梯度, 越靠近中心塑性越大, 应变带内应变约为 35%。如图 7(d)~图 7(f) 所示, 标距宽度为 9 mm 试样拉伸至工程应变约为 10% 时, 材料标距段内的形变分布极其均匀; 当试样拉伸至靠近颈缩点时, 标距段内应变依然相对均匀, 仅在内部有数个分散的应变集中区域, 区域内应变约为 30%~35%; 当即将发生断裂时, 材料内出现两条相互交错的应变集中带 (图 7(f) 中箭头), 其中下方的主应变集中带与垂直拉伸方向约为 41°, 与最大剪切应力方向 (45°) 相近。

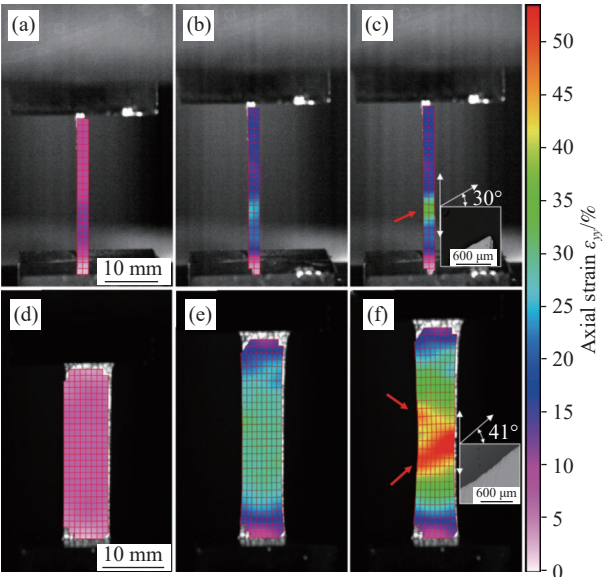


图 7 ((a)~(c)) 标距宽度为 1 mm 的 H65-IF-H65 层状复合材料试样拉伸至工程应变约为 10%、18.8%(颈缩点) 和 20%(即将断裂) 的应变分布图; ((d)~(f)) 标距宽度为 9 mm 试样拉伸至工程应变约为 10%、29.3%(颈缩点) 和 37.3%(即将断裂) 的应变分布图

Fig. 7 Strain distributions of the H65-IF-H65 LMCs specimens with gauge width of 1 mm at the strains of 10%, 18.8% (necking point) and 20% (about to break) ((a)-(c)), and 9 mm at the strains of 10%, 29.3% (necking point) and 37.3% (about to break) ((d)-(f)), respectively

采用 3D roughness 软件对标距宽度为 1 mm 和 9 mm 的 H65-IF-H65 层状复合材料拉伸至工程应变 18.8%(颈缩点) 和 29.3%(颈缩点) 时的表面形貌进行三维重构。如图 8 所示, 原本精整过的

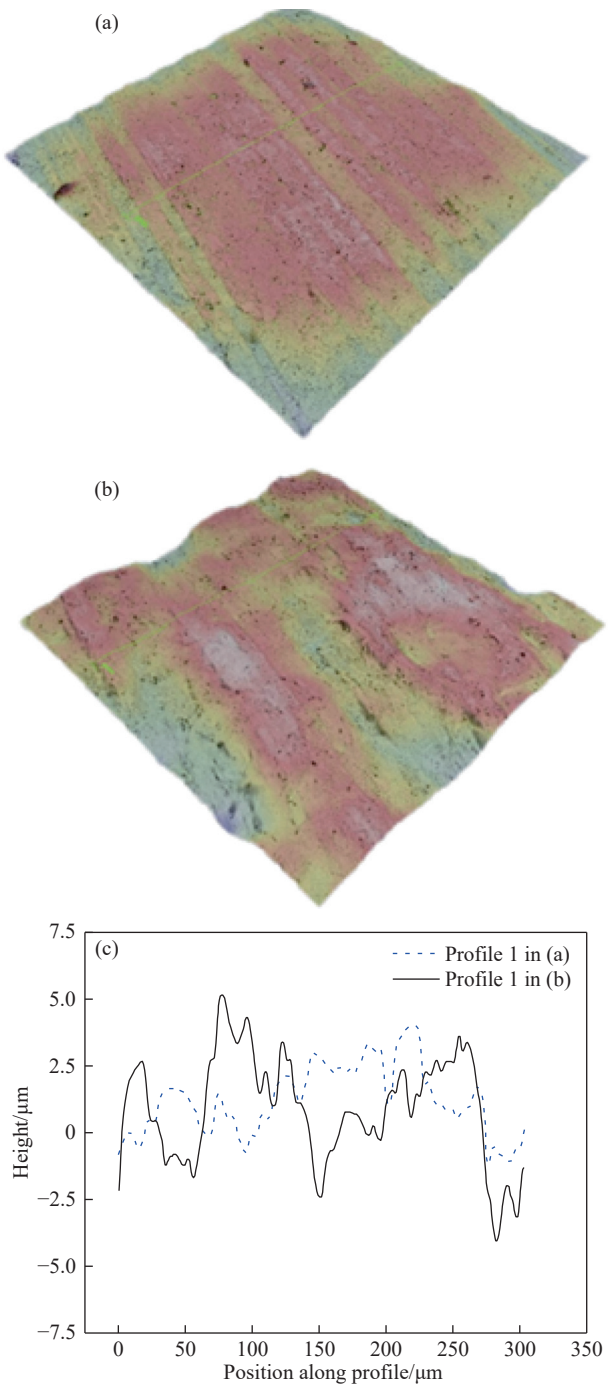


图 8 标距宽度为 1 mm (a) 和 9 mm (b) 的 H65-IF-H65 层状复合材料拉伸至工程应变 18.8%(颈缩点) 和 29.3%(颈缩点) 时的表面形貌及相应的粗糙度曲线 (c)

Fig. 8 Surface morphologies of the H65-IF-H65 LMCs specimens with gauge widths of 1 mm (a) and 9 mm (b) at the strains of 18.8% (necking point) and 29.3% (necking point) and their surface roughness curves (c)

H65-IF-H65 层状复合材料在拉伸后表面出现不同程度的高低起伏。研究认为,材料在拉伸过程中形成的表面粗糙度源于材料相邻晶粒之间不协调的塑性形变,并与材料的晶粒尺寸、应变量和织构密切相关^[25-26]。经测量,标距宽度为 1 mm 的层状复合材料拉伸至颈缩点时表面粗糙度为 R_z 2.66 μm 和 R_a 1.45 μm ,而标距宽度为 9 mm 的层状复合材料拉伸至颈缩点时表面粗糙度为 R_z 5.53 μm 和 R_a 1.84 μm 。表面粗糙度对材料力学性能有较大影响,例如减小材料不均匀延伸率并增加塑性失稳的风险^[27]。然而,标距宽度为 9 mm 的层状复合材料拉伸时依然表现出较强的抗塑性失稳能力。

标距宽度(更确切的为宽度与厚度比值)的降低也会影响试样拉伸过程中的应力分布状态,并

改变其断裂模式^[28-29]。如图 9 所示,当标距宽度为 1 mm 的复合材料试样在拉伸时,首先形成与拉伸方向近垂直的向内颈缩,见图 9(b) 箭头。随着应变持续增加,在相互交错的剪切应力作用下,裂纹于剪切带边缘产生并向内进行数十微米的短距离扩展,扩展方向同样与拉伸方向近垂直。随着应变进一步增加,该裂纹沿着主剪切带扩展并完全贯穿整个剪切带直至断裂。在该裂纹扩展过程中,复合材料边缘未产生其他裂纹,复合材料表面次剪切带的起伏并不十分明显,见图 9(c) 虚线。标距宽度为 9 mm 的复合材料试样在拉伸时,裂纹首先于试样内部沿剪切带萌生。如图 9(f) 和图 9(i) 所示,该裂纹前端还存在着细小裂纹,两者在应力作用下迅速相连。如图 9(g) 和图 9(k) 所示,随着应变持续增加,复合材料表面出现较明

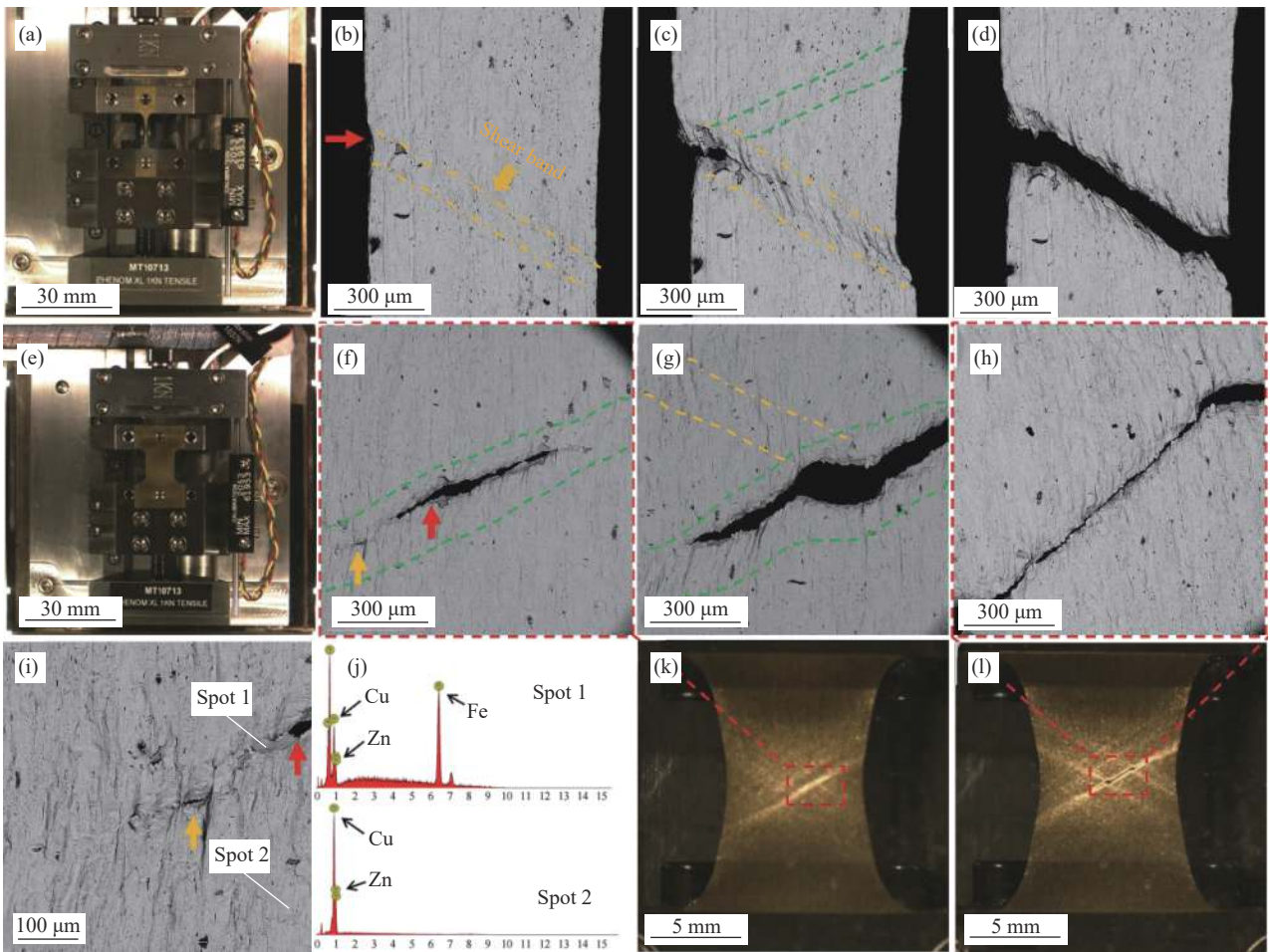


图 9 标距宽度为 1 mm ((a)~(d)) 和 9 mm ((e)~(h)) 的 H65-IF-H65 层状复合材料试样在裂纹扩展过程中的侧面 SEM 图像 (图 9(i) 和图 9(j) 为图 9(f) 中裂纹前端放大图与 EDS 分析; 图 9(k) 和图 9(l) 为图 9(f) 和图 9(h) 在电镜下拍摄的宏观照片)

Fig. 9 Side SEM images during the crack growth of the H65-IF-H65 LMCs samples with gauge widths of 1 mm ((a)~(d)) and 9 mm ((e)~(h)) (Fig. 9(i) and Fig. 9(j) are the enlarged image and EDS analysis of the crack front in Fig. 9(f); Fig. 9(k) and Fig. 9(l) are the macroscopic photographs of Fig. 9(f) and Fig. 9(h) under electron microscope)

显且与主剪切带相互交错的次剪切带，材料剪切力交互作用显著增强并诱使裂纹产生与拉伸方向近垂直的短距离台阶偏转。从图 9(l) 可以看出，标距宽度为 9 mm 的复合材料试样平面存在数对交错的剪切带结构，结构中的交错点均有可能为裂纹短距离台阶偏转点，而复合材料最终形成了台阶状裂纹扩展，见图 9(h) 和图 9(l)。此外，从图 9(i) 可以看出，由于 IF/H65 良好的界面结合性能，表面的 H65 层 (spot 2) 在复合材料断裂后依然较完整，仅在靠近断口处出现少量剥离并漏出 H65-IF 结合层 (spot 1)。剪切带是剪切变形高度集中的局部化区域^[30]，复合材料的应力-应变曲线出现的波动 (图 5(a))，可能由裂纹在剪切力的交互作用下沿台阶扩展所致。

Zhao 等^[11]发现，当试样标距厚度 T 与标距宽度 W 比值非常小时，超细晶铜箔会出现两对共轭的局部剪切带，当该比值增加时，两对共轭的局部剪切带逐渐合并成单道粗大的剪切带。很显然，随着标距宽度由 9 mm 逐渐降低至 1 mm，H65-IF-

H65 层状复合材料内数对交错的剪切带结构也因剪切力交互作用被抑制而演变成单道剪切带 (图 9(c))，裂纹沿单道剪切带发生无台阶偏转的快速扩展，进而导致了延伸率迅速下降。

2.4 H65-IF-H65 层状复合材料断口分析

图 10(a)、图 10(d) 分别为标距宽度 1 mm 和 9 mm 试样断口正面电镜照片。可以看出，层状复合材料的 H65 层在断口附近区域已经发生了剥离和脱落。标距宽度 1 mm 和 9 mm 试样断口两侧均为不规则起伏的类山脊形隆起花样 (图 10(c) 和图 10(f) 中箭头所示)，山脊两侧为相互交错的滑移线。类山脊形隆起导致滑移产生碎化，滑移碎化是多晶体材料中晶粒滑移受阻产生形变应力场并激发多重滑移而引起，滑移碎化程度愈厉害则应变硬化程度越高^[31]。很显然，随着标距宽度的减少，复合材料的应变量和硬化程度有所降低。标距宽度 1 mm 和 9 mm 试样断口中心为 IF 钢韧窝带，韧窝带内存在尺寸和深度不一的韧窝。韧窝是材料在微区范围内塑性变形产生的显微空洞^[32]。

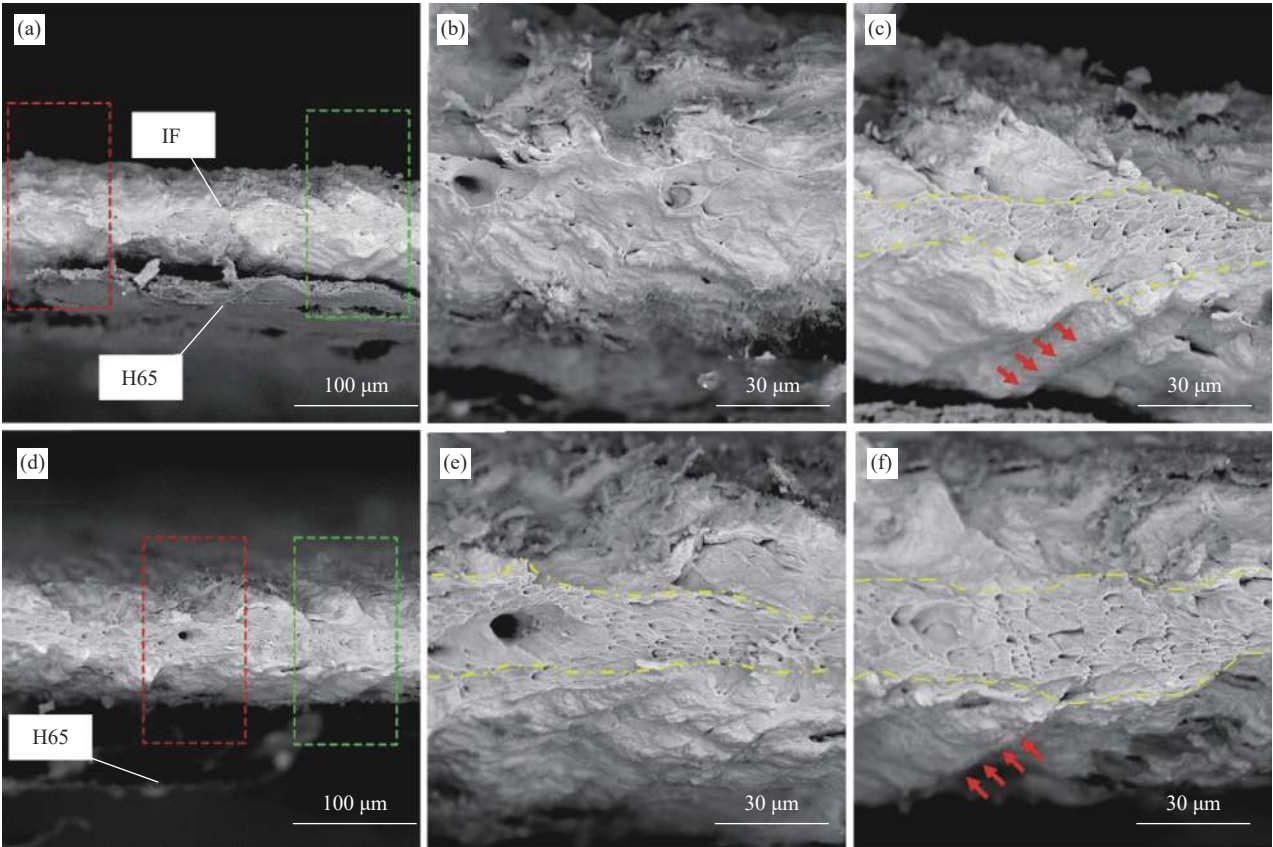


图 10 标距宽度 1 mm (a) 和 9 mm (d) 的 H65-IF-H65 层状复合材料试样断口正面 SEM 图像：((b), (c)) 图 10(a) 中左侧和右侧框位置放大图；((e), (f)) 图 10(d) 中左侧和右侧框位置放大图

Fig. 10 SEM images of the front side of the H65-IF-H65 LMCs specimen with gauge width of 1 mm (a) and 9 mm (d): ((b), (c)) Enlarged images of the left and right frames in Fig. 10(a); ((e), (f)) Enlarged images of the left and right frames in Fig. 10(d)

图 10(e)、图 10(f) 中的韧窝沿着剪切方向被明显拉长, 说明标距宽度为 9 mm 试样断裂过程为: 首先在剪切力作用下以滑移方式产生颈缩, 随着应变进一步增加、颈缩加剧, 在材料主剪切带内出现空洞, 空洞随着应变增加而长大并沿剪切力方向拉伸, 最终空洞相互发生连接而导致断裂。如图 7 所示, 标距宽度为 1 mm 试样在拉伸过程中剪切带与垂直拉伸方向角度更低, 故图 10(b)、图 10(c) 中的韧窝沿着剪切方向的拉伸变形相对较小。与此同时, 标距宽度为 1 mm 试样的韧窝带面积也显著减小, 并在局部区域形成了较尖锐的劈尖形断口。随着标距宽度的减小, 韧窝带内的韧窝尺寸和数量也逐渐减小, 意味着复合材料塑性的下降。

3 结论

(1) H65 黄铜/IF 钢/H65 黄铜 3 层层状复合金属材料 (H65-IF-H65) 经过轧制及退火热处理后, IF 和 H65 均发生了再结晶, H65-IF 界面未发生元素扩散, H65 层与 IF 层结合方式为机械结合。

(2) 随着试样宽度由 9 mm 逐渐降低至 1 mm, 复合材料的抗拉强度与屈服强度基本不变, 但均匀延伸率、非均匀延伸率和加工硬化率均有所减小, 表现出明显的尺寸效应。

(3) 当试样标距宽度为 9 mm 时, H65-IF-H65 层状复合材料的剪切应力交互作用更强, 裂纹于试样内部沿剪切带萌生并在数对交错的剪切带结构影响下形成台阶状扩展; 当试样标距宽度为 1 mm 时, 剪切应力交互作用被抑制, 数对交错的剪切带结构合并为单道剪切带, 裂纹于剪切带一侧萌生并沿单道剪切带进行无台阶偏转的快速扩展, 进而导致延伸率迅速下降。

参考文献:

[1] 张志娟, 张兵, 赵田丽, 等. 轧制三金属复合材料研究进展 [J]. 精密成形工程, 2021(13): 23-34.
ZHANG Zhijuan, ZHANG Bing, ZHAO Tianli, et al. Research progress of tri-metal composites prepared by rolling process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021(13): 23-34(in Chinese).

[2] MA X, HUANG C, MOERING J, et al. Mechanical properties of copper/bronze laminates: Role of interfaces[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 43-52.

[3] 梅瑞斌, 史现利, 包立, 等. 多道次热轧轧制 Al/Mg 层状复合板材结合面特性 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3485-3497.

MEI Ruibin, SHI Xianli, BAO Li, et al. Interface characteristics study of Al/Mg laminated composite sheets by multi-passes RHR[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3485-3497(in Chinese).

[4] 常海, 徐超, 胡小石. 累积轧纯 Mg/ZK60 镁合金层状金属复合材料的组织与性能 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(1): 178-185.
CHANG Hai, XU Chao, XU Xiaoshi. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg/ZK60 laminated composite fabricated by accumulated roll-bonding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(1): 178-185(in Chinese).

[5] RAHMATABADI D, TAYYEBI M, HASHEMI R. Microstructure and mechanical properties of Al/Cu/Mg laminated composite sheets produced by the ARB process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25: 564-572.

[6] ZHANG X B, YU Y B, LIU B, et al. Mechanical properties and tensile fracture mechanism investigation of Al/Cu/Ti/Cu/Al laminated composites fabricated by rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 805: 338-345.

[7] 郝平菊, 王振华, 刘元铭. 退火温度对铜/铝/铜复合板结合性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018(47): 159-162.
HAO Pingju, WANG Zhenhua, LIU Yuanming. Effect of annealing temperature on bonding properties of Cu/Al/Cu clad sheet[J]. Hot Working Technology, 2018(47): 159-162(in Chinese).

[8] WANG P J, HUANG H T, LIU J J, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V/AA6061/AZ31 laminated metal composites (LMCs) fabricated by hot roll bonding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 861: 157943.

[9] ENGEL U, ECKSTEIN R. Microforming-from basic research to its realization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126: 35-44.

[10] 赵祥帅, 刘粤, KONG Charlie, 等. 异步轧制与退火铜箔的厚度尺寸效应研究 [J]. 塑性工程学报, 2021(28): 126-133.
ZHAO Xiangshuai, LIU Yue, KONG Charlie, et al. Research on thickness size effect of asymmetric rolled and annealed copper foils[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021(28): 126-133(in Chinese).

[11] ZHAO Y, GUO Y, WEI Q, et al. Influence of specimen dimensions on the tensile behavior of ultrafine-grained Cu[J]. Scripta Materialia, 2008, 59: 627-630.

[12] 赵阳, 李文锦, 孙艳姣, 等. IF 钢在轧制极薄带过程中的力学性能尺寸效应研究 [J]. 四川冶金, 2022(44): 6-10.
ZHAO Yang, LI Wenjin, SUN Yanjiao, et al. Research on size effect of mechanical properties of IF steel during the

- process of preparing foil by cold rolling[J]. *Sichuan Metallurgy*, 2022(44): 6-10(in Chinese).
- [13] LI Y P, ZHU X F, TAN J, et al. Comparative investigation of strength and plastic instability in Cu/Au and Cu/Cr multilayers by indentation[J]. *Journal of Materials Research*, 2009, 24: 728-735.
- [14] CHEN W, HE W, LUO N, et al. Effect of layer thickness on the enhanced strength and ductility of laminated Ti/Al composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 859: 144230.
- [15] XIA Y, WU H, MIAO K, et al. Effects of the layer thickness ratio on the enhanced ductility of laminated aluminum[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 111: 256-267.
- [16] GUO W, JÄGLE E, YAO J, et al. Intrinsic and extrinsic size effects in the deformation of amorphous CuZr/nano-crystalline Cu nanolaminates[J]. *Acta Materialia*, 2014, 80: 94-106.
- [17] WANG K, WEI A P, SHI Z M, et al. The preparation and performance of grain size gradient TWIP steel fabricated by laser heat treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 743: 294-300.
- [18] 赵志毅, 张晓君, 薛润东, 等. 不同热连轧工艺 Ti-IF 钢板中析出相及织构的研究 [J]. *材料热处理技术*, 2009(38): 25-28.
ZHAO Zhiyi, ZHANG Xiaojun, XUE Rundong, et al. Research on precipitates and texture in Ti-IF steel sheets produced by different hot-rolling process[J]. *Material & Heat Treatment*, 2009(38): 25-28(in Chinese).
- [19] 杜柳青. 铜合金薄板的微塑性成形尺寸效应研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
DU Liuqing. Research on size effect of microplastic forming of copper alloy sheet[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022(in Chinese).
- [20] 李文锦. IF 钢板薄带微观结构及力学性能尺寸效应研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
LI Wenjing. Study on size effect on the microstructure and mechanical properties of IF steel ultra thin strip[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022(in Chinese).
- [21] DINI G, NAJAFIZADEH A, UEJI R, et al. Tensile deformation behavior of high manganese austenitic steel: The role of grain size[J]. *Materials & Design*, 2010, 31: 3395-3402.
- [22] MOLOTNIKOV A, LAPOVOK R, GU C F, et al. Size effects in micro cup drawing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 550: 312-319.
- [23] WANG Y, DONG P L, XU Z Y, et al. A constitutive model for thin sheet metal in micro-forming considering first order size effects[J]. *Materials & Design*, 2010, 31: 1010-1014.
- [24] GEIGER M, VOLLERTSEN F, KALS R. Fundamentals on the manufacturing of sheet metal microparts[J]. *CIRP Annals*, 1996, 45: 277-282.
- [25] ZHAO Z, RADOVITZKY R, CUITIÑO A. A study of surface roughening in fcc metals using direct numerical simulation[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 5791-5804.
- [26] SOLHJO S, HALBERTSMA P J, VELDHUIS M, et al. Effects of loading conditions on free surface roughening of AISI 420 martensitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 116311.
- [27] AL-QURESHI H A, KLEIN A N, FREDEL M C. Grain size and surface roughness effect on the instability strains in sheet metal stretching[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170: 204-210.
- [28] ZHENG P F, CHEN R, LIU H T, et al. On the standards and practices for miniaturized tensile test—A review[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 161: 112006.
- [29] ZHAO Y H, GUO Y Z, WEI Q, et al. Influence of specimen dimensions and strain measurement methods on tensile stress-strain curves[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 525: 68-77.
- [30] DODD B, BAI Y. *Adiabatic shear localization*[M]. London: Elsevier, 2012: 1-20.
- [31] 崔约贤, 王长利. *金属断口分析* [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 34-45.
CUI Yuexian, WANG Changli. *Analysis of metal fracture*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998: 34-45(in Chinese).
- [32] 梁伟, 杨晓翔. 黄铜薄板单向拉伸第Ⅱ类尺寸效应 [J]. *塑性工程学报*, 2013(20): 100-107.
LIANG Wei, YANG Xiaoxiang. Second class size effects on brass sheet in tensile test[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013(20): 100-107(in Chinese).