

磁场对 TIG 焊接快速成形 GH4169 合金的组织及性能的影响

王 林¹, 刘奋成¹, 陈 鹏¹, 王维新², 周宝升¹, 黄春平¹

(¹. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063;

². 三江航天红阳机电有限公司, 湖北 孝感 432000)

[摘 要] 为改善 TIG 焊接快速成形 GH4169 合金的组织及力学性能, 将电磁搅拌与 TIG 焊接快速成形结合, 进行了不同磁场电流下 GH4169 合金的 TIG 焊接快速成形, 分析了电磁场对沉积态 GH4169 合金组织、显微硬度及拉伸性能的影响。显微分析表明, 电磁搅拌 TIG 焊接快速成形 GH4169 合金具有沿基材外延连续生长的特点, 层与层之间过渡不明显, 组织致密, 无明显冶金缺陷; 在一定磁场电流范围内, 随磁场电流的增加, 沉积态 GH4169 合金组织中枝晶间的共晶 Laves 相体积分数呈减少趋势; 显微硬度测试表明, 合金中枝晶间脆性 Laves 相的减少使沉积态试样组织均匀性获得一定的提高, 试样的显微硬度从无磁场时的 HV 232 提高到磁场电流为 1.0 A 时的 HV 253; 室温下拉伸性能测试结果表明, 施加适当电磁搅拌后合金的抗拉强度从无磁场时的 550 MPa 提高到磁场电流为 0.5 A 时的 660 MPa, 当磁场电流增大到 9.0 A 时抗拉强度下降, 为 520 MPa。

[关键词] 焊接快速成形; 电磁搅拌; GH4169 镍基高温合金; 组织; 性能

[中图分类号] TG47

[文献标志码] A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4926.2016.02.010

[文章编号] 1001-4926(2016)02-0060-07

Effect of Electromagnetic Field on Microstructure and Mechanical Property of GH4169 Superalloy Fabricated by TIG Welding Rapid Forming

WANG Lin¹, LIU Fen-cheng¹, CHEN Peng¹,

WANG Wei-xin², ZHOU Bao-sheng¹, HUANG Chun-ping¹

(¹. National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

². Hubei Sanjiang Aerospace Hongyang Electromechanical Co., Ltd., Hubei Xiaogan 432000, China)

Abstract: To improve the microstructure and mechanical property of TIG welding rapid forming GH4169 superalloy samples, electromagnetic stirring was combined to WRF and samples were fabricated with different magnetic field strengths. The effect of magnetic field current on microstructure, hardness and tensile property was investigated experimentally. Microstructure observation shows that continuous epitaxial growth of columnar grains is the typical characteristic of WRFed GH4169 superalloy, and no obvious metallurgical defect is found. Within certain range of magnetic field strength, the amount of Laves phase decreases along with the increase of magnetic field current, which leading to the enhancement of microhardness through the improvement of homogeneity of

[收稿日期] 2016-04-11

[修回日期] 2016-05-09

[基金项目] 国家自然科学基金(51565041, 51201087); 江西省教育厅科学基金(GJJ150710)

[通讯作者] 刘奋成(1981—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 金属材料先进连接和快速成形技术研究。

microstructure' for example' the microhardness increased from HV 232 to HV 253 when magnetic field current changed from 0 A to 1.0 A. Tensile testing at room temperature shows a better ultimate tensile strength of 660 MPa for a higher magnetic field current of 0.5 A; however' it decreased to 520 MPa when a too much higher magnetic field current of 9.0 A is used.

Key words: welding rapid forming; magnetic stirring; GH4169 superalloy; microstructure; property

引 言

焊接快速成形技术(Welding Rapid Forming, WRF)是一种利用逐层熔敷原理,采用熔化极氩弧焊(MIG)、钨极惰性气体保护焊(TIG)以及等离子弧焊(PA)等传统焊接电源产生的电弧作为热源,通过填丝并在程序的控制下,根据三维数字模型由线—面—体逐渐成形,从而制造出所需要的金属零件的先进制造技术^[1]。目前基于 TIG 堆焊快速成形的研究比较广泛,相比于电子束快速成形、激光快速成形,采用 TIG 电弧作为快速成形的热源,具有沉积效率高、丝材利用率高、制造周期短、生产成本低等优势。与传统机械加工相比,WRF 的加工过程大大缩短,降低了企业的生产开发成本,可用于制造形状较为复杂零件的快速成形及修复。该工艺具有非常广阔的应用前景,可以产生巨大的经济效益。

电磁搅拌技术已成功运用于铸件凝固组织和焊缝组织改善中。研究表明,在金属铸造过程中,对合金熔体施加电磁搅拌可有效改善铸坯质量及凝固组织^[2-3]。根据磁流体动力学原理,当导电流体在磁场中运动时,在流体内部产生电流,感应电流与磁场相互作用产生电磁力,电磁力将驱动流体流动,即对熔体内液态金属产生电磁搅拌作用,加强合金熔体内液态金属的传热和对流,使合金熔体内的温度场和溶质更加均匀化。从材料学的角度分析,焊接过程实际上是金属材料的熔化和再凝固的过程,其凝固行为近快速非平衡凝固,所得到的凝固组织属于非平衡凝固组织。Schneider 等^[4]进行了电磁辅助铝合金激光焊接试验,结果表明,在电磁搅拌的作用下气孔易从铝合金焊缝表面的氧化膜中逸出,从而减少合金内部气孔缺陷的存在;在电磁辅助作用下成型表面稳定且焊缝熔深小,有

效地改善了焊接质量。余本海等^[5]在电磁辅助激光熔覆 WC-Co 基硬质合金试验过程中发现,在电磁搅拌的作用下熔覆层材料内部的晶粒尺寸减小且分布变得均匀、气孔等夹杂减少。余圣甫等^[6-7]的研究也表明,外加旋转磁场可以使得液态发生旋转,加强熔池内以及熔池与周围环境间的热交换,熔池中温度趋于均匀使得固液界面前沿的温度梯度降低,成分过冷增加,最终将会达到抑制柱状晶形成的效果。另外,磁场的存在可以折断结晶线前沿的柱状晶胞,并作为异质形核质点起到细化晶粒的作用。因此,电磁搅拌技术对 WRFed GH4169 的焊缝组织具有改进作用^[8]。

本研究采用 TIG 焊接方法实现 GH4169 合金的快速成形,并尝试在快速成形过程中对合金熔池施加电磁搅拌,研究电磁搅拌对 WRFed GH4169 合金组织及力学性能的影响,探索电磁搅拌 TIG 焊接快速成形 GH4169 合金的组织优化和提高力学性能的方法及工艺参数。

1 试验材料与试验方法

试验选用直径为 $\phi 0.8$ mm 的 HGH4169 焊丝,化学成分如表 1 所示。基材选用不锈钢板材,牌号为 1Cr18Ni9Ti,其规格尺寸为 380 mm × 80 mm × 6 mm。GH4169 合金的 WRF 在 TIG 焊接系统上进行,该系统由 TETRIX421 焊接电源、送丝系统、TIG 焊枪、供气系统、数控工作平台等组成。GH4169 合金试样的 WRF 工艺参数为:焊接电流 $I_w = 170$ A,焊接速度 $v_w = 180$ mm/min,送丝速度 $v_f = 1.8$ m/min,成形块体试样时采用的道间搭接率 $\eta = 50\%$,单层增高 $\Delta = 1$ mm,整个焊接过程在纯氩气保护下进行,流量为 15 L/min。试验所用的电磁搅拌装置为自行设计完成,主要有脉冲磁场发生装置和磁头等部分组成,可通过调整磁场电流的大小获得不同

的磁场强度。本实验中采用磁场搅拌装置的工作电流即磁场电流作为磁场强度的衡量,选用的脉冲电流 I_p 分别为 0、0.5、1.0、5.0、9.0 A。

采用线切割机沿垂直于和平行于焊接方向将试样切割成用于组织观察及拉伸性能测试试样。组织观察用试样经镶嵌、打磨、抛光及腐蚀而制成金相试样,腐蚀剂为 100 mL C_2H_5OH + 20 mL HCl + 5 g $FeCl_3$ 的混合液。采用 MR500 型金相显微镜进行金相观

察,利用 401MVD 数显显微硬度计进行显微硬度测量,载荷 $f = 200\text{ g}$, 载荷保持时间 $t = 10\text{ s}$ 。采用 INSTRON 3382 型电子万能试验机进行拉伸力学性能测试,拉伸试样尺寸为圆棒状哑铃型试样,平行段直径 $D_1 = 4\text{ mm}$ 、标距 $L = 20\text{ mm}$ 、夹持段直径 $D_2 = 6\text{ mm}$ 、长度 10 mm , 拉伸测试时应变速率采用 2 mm/min 。采用 TESCAN VEGAII-LMH 型扫描电子显微镜 (SEM) 对拉伸试样的微观断口形貌进行分析。

表 1 HGH4169 焊丝化学成分表 (质量分数 /%)

Element	C	Mn	P	S	Si	Zr	Cr	B	Ti
Content	0.046 4	0.041 4	0.001	0.004 2	0.131	0.027 3	17.88	0.002 9	1.04
Element	Cu	Al	Fe	Mo	Co	V	Nb	W	Ni
Content	0.021 4	0.377	18.47	3.06	0.616	0.043 9	5.32	0.889	Bal.

2 试验结果及分析

2.1 电磁搅拌 WRFed GH4169 合金的宏观形貌

图 1 所示为不同磁场电流下 WRFed GH4169 合金试样的宏观形貌。由图可知在 WRF 过程中加入磁场,当磁场电流为 0、0.5、1.0 A 时熔滴过渡平稳,无飞溅产生,成形试样宏观形貌良好;但随着磁场电流的进一步增大,当磁场电流超过某一范围

时,成形过程变得不稳定,在洛伦兹力的作用下,弧柱中的等离子束流发生偏转,成形过程中发生明显的飞溅,焊缝成形不美观。根据文献 [6] 对焊接过程的分析,在适当的磁场电流下,电磁场所产生的洛伦兹力可促进熔滴的快速过渡;但随着磁场电流的进一步增大,在磁场的作用下 TIG 电弧的气动压力分布发生变化,洛伦兹力促使弧柱中的等离子束流的形态发生变化,熔滴过渡形式由短路过渡变为

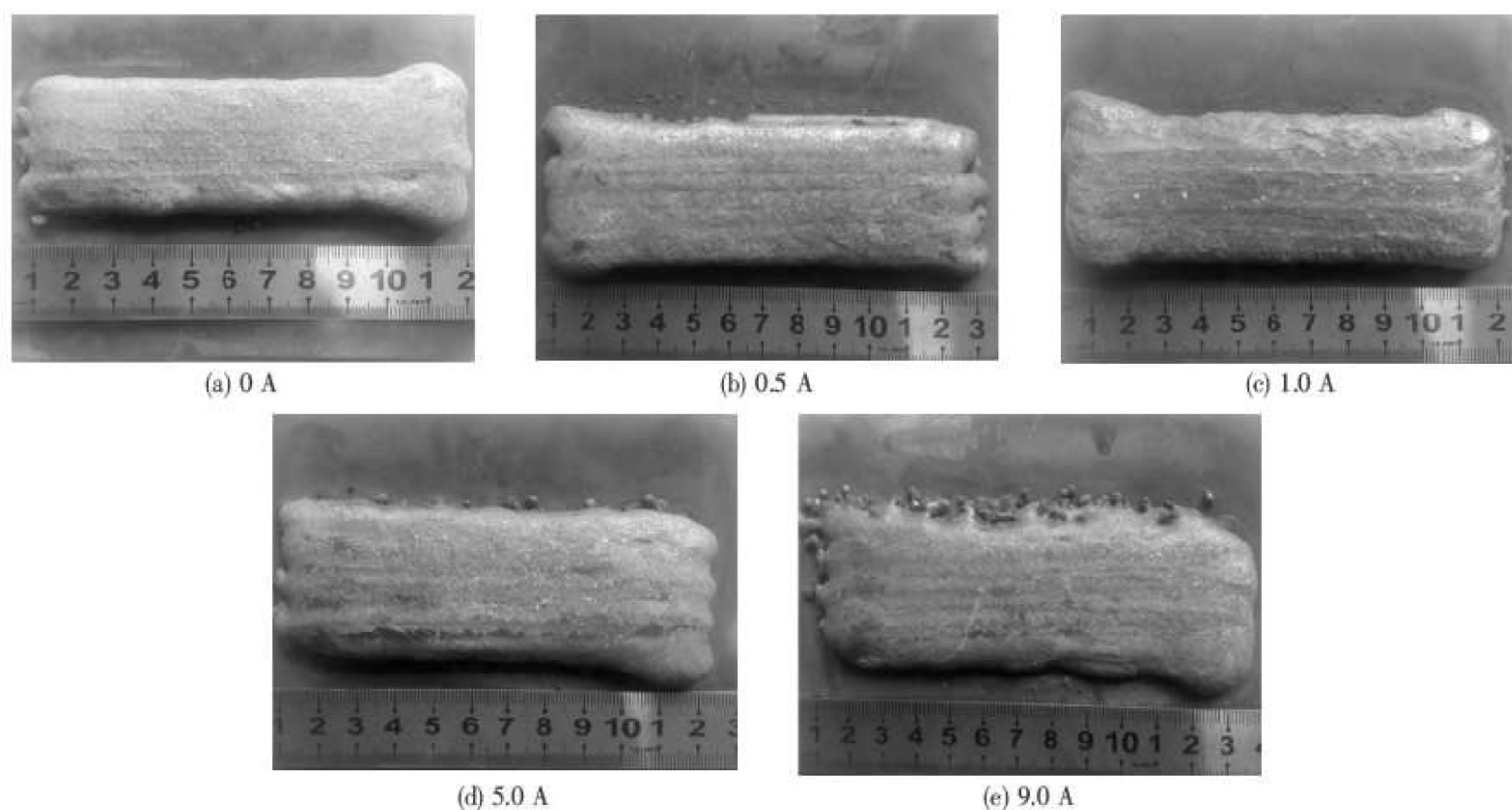


图 1 不同磁场电流下 WRFed GH4169 合金试样宏观形貌

喷射过渡, 进而产生飞溅。

图2为 WRFed GH4169 合金沉积态试样的横截面局部照片。由图可知, 试样横截面组织与激光立体成形 GH4169 合金组织类似^[4], 为外延连续生长的柱状晶, 且层带结构清晰可见, 组织致密无明显缺陷。在电磁辅助的作用下, 层带结构变得模糊, 粗大柱状晶得到细化, 在磁场电流为 1.0 A 时, 柱状晶体积分数最小, 晶粒细化效果最明显, 但伴随辅助磁场电流的提高, 柱状晶体积分数增大, 细化效果则变得不显著, 且呈现粗化的现象, 层带结构变得显著。根据晶粒竞争生长模型^[4], 当竞争生长持续到一定高度时, 大部分晶粒优先生长方向与

应力主轴方向平行或者接近, 即散热最快的方向。从图2可见, WRFed GH4169 合金沉积态试样具有明显的自下而上连续生长特征, 这说明成形过程中的散热方向主要是自上而下, 即热量主要是通过基材散失。而关于磁场增大后晶粒组织由柱状晶转变为等轴晶, 而后又重新出现大量柱状晶, 这主要是因为随脉冲电流的增加磁场电流先由小到大增加, 电磁搅拌作用减小了熔池固液界面前沿合金元素富集, 避免了成分过冷的发生, 柱状晶连续生长趋势收到阻碍。但是磁场电流的进一步提高会在液态金属中产生电磁引发的阻尼现象^[42], 即电磁搅拌会对金属的对流起到抑制作用, 随之而来的是熔

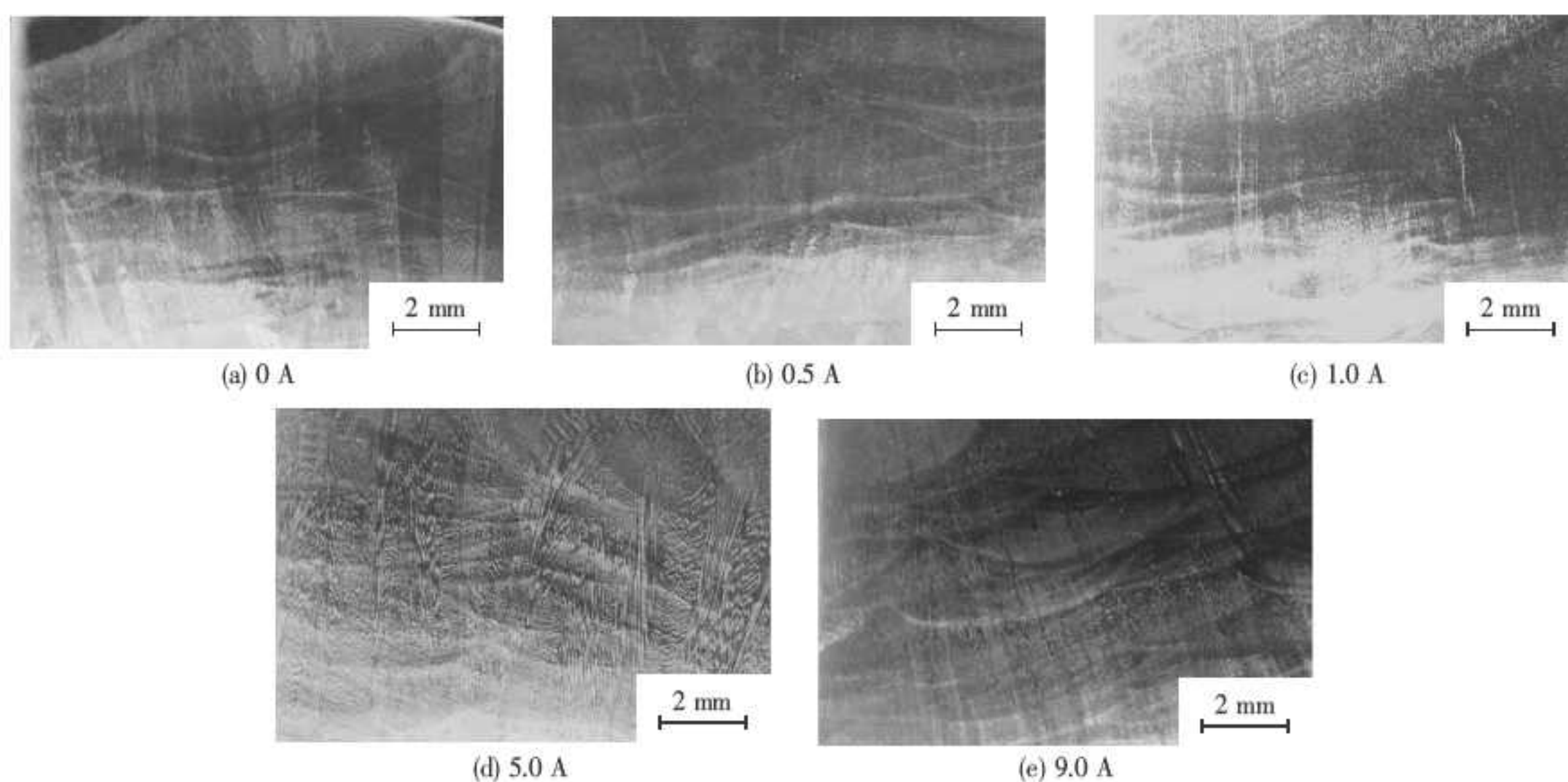


图2 不同磁场电流下电磁辅助 WRFed GH4169 合金沉积态横截面形貌(中心部位)

池金属凝固方式的改变, 即柱状晶生长趋势增加。

2.2 电磁搅拌 WRFed GH4169 合金的枝晶亚结构

不同磁场电流下 WRFed GH4169 合金试样显微组织如图3所示。由图可知, 当磁场电流为 0 A 时, 即在没有电磁搅拌的情况下, 沉积态 GH4169 合金试样的组织中含有大量连续的条状共晶 Laves 相(图3a); 随着磁场电流的逐渐增大, 试样的显微组织发生改变, 枝晶间的共晶 Laves 相变成不连续的蠕虫状(图3b、图3c); 随着磁场电流的进一步增大到 5.0、9.0 A 时, 发现共晶 Laves 相再次由不连续

的蠕虫状变为连续的长条状(图3d、图3e)。Laves 相形貌和数量的变化, 反映了熔池凝固过程中合金元素在固液界面前沿偏聚程度改变, 根据文献^[43-44]分析认为, 当磁场电流超过某一范围时, 由于熔池内的液体金属具有机械惯性, 过大的电磁搅拌力将导致液体金属搅拌运动的阻力增大, 甚至不会产生节奏明显的搅拌运动, 因此电磁搅拌的效果很差, 导致固液界面前沿合金元素偏聚程度的增加, Laves 相形貌发生变化。

2.3 TIG 电弧快速成形 GH4169 合金的显微硬度

图4为不同磁场电流下 WRFed GH4169 合金

显微硬度测试结果。从图中可以发现,开始施加电磁搅拌后沉积态 GH4169 合金的显微硬度平均值有所提高。当磁场电流为 0 A 即未施加电磁搅拌时,试样的显微硬度平均值为 232 HV;当磁场电流分别为 0.5、1.0 A 时,对应试样的显微硬度平均值分别增加到 HV 240 和 HV 253,可知在一定的磁场电流下随着磁场电流的增加沉积态的 GH4169 合金的硬度值呈上升趋势。但当磁场电流为 5.0、9.0 A 时,对应的显微硬度平均值分别为 HV 237、HV 224,显

微硬度呈现出明显下降趋势,甚至低于未施加磁场时的硬度值。分析认为,电磁搅拌促使熔池内的液体金属发生对流,抑制了共晶 Laves 相的生长,合金元素在枝晶干中过饱和度增加,固溶强化效果增加,同时促进了合金枝晶结构的细化,从而提高了沉积态 GH4169 合金的硬度;但是,过大的磁场电流的搅拌效果减弱,液态金属的流动减弱,枝晶间的共晶 Laves 相重新大量析出,合金元素微观偏析加重,因而沉积态 GH4169 合金的硬度下降。

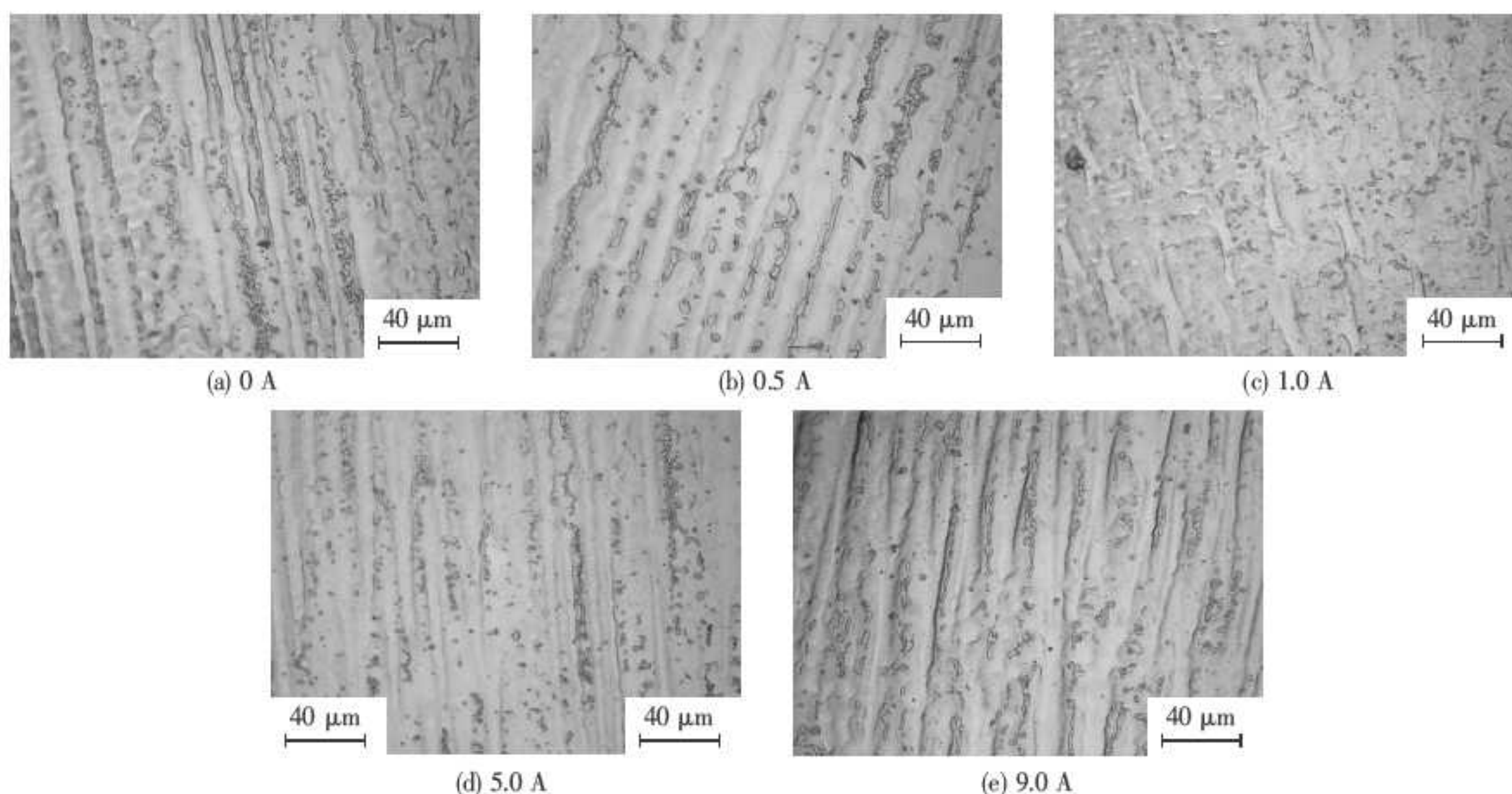


图 3 不同磁场电流下电磁辅助 WRFed GH4169 合金沉积显微组织

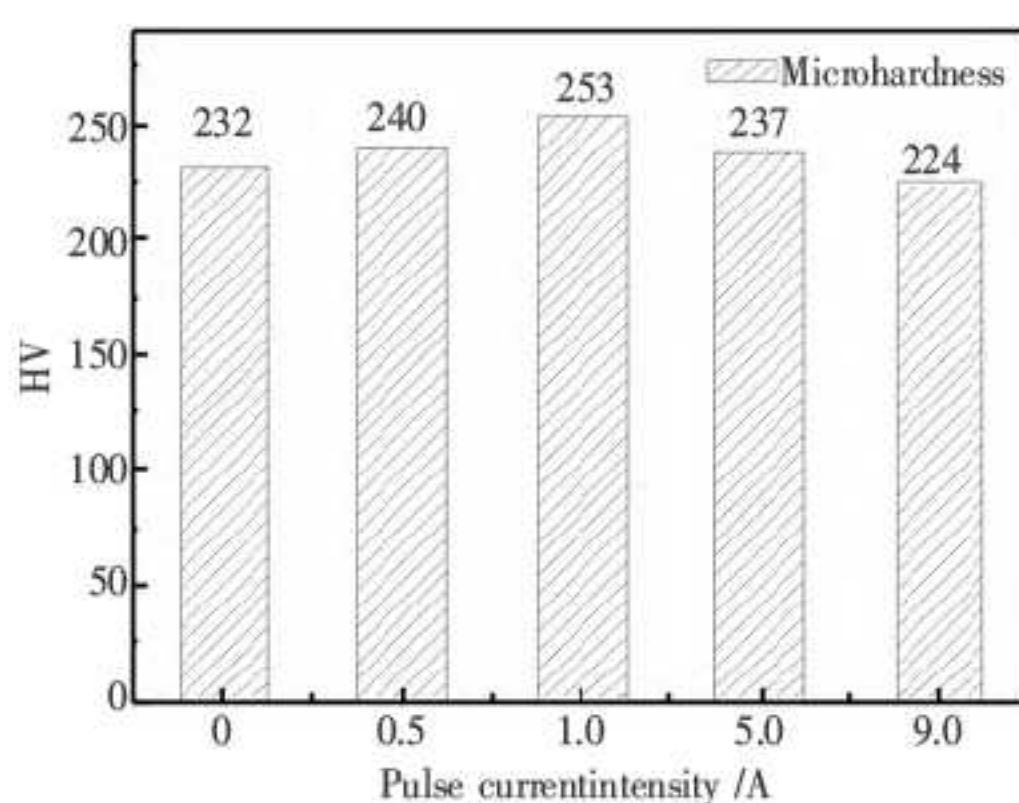


图 4 不同磁场电流下电磁搅拌 WRFed GH4169 合金显微硬度

2.4 电磁搅拌 WRFed GH4169 合金的拉伸性能

图 5 为从不同磁场电流下电磁搅拌 WRFed GH4169 合金试样在室温下进行拉伸试验得到的应

力-应变曲线。由图可知,在一定的磁场电流下,随着磁场电流的增大,试样的抗拉强度呈增大趋势,断裂前的总应变量也呈增大趋势。当磁场电流为 0.5 A 时,接头的抗拉强度达到了 660 MPa,应变量达到了 25%;当磁场电流为 1.0 A 时,接头的抗拉强度达到了 644 MPa,应变量达到了 30%。相比于磁场电流为 0 A 时试样的抗拉强度 550 MPa 和应变量 25%,均具有一定的提升;但随着磁场电流的进一步增大,试样的抗拉强度及应变量均呈现明显的下降趋势。分析认为,试样的拉伸强度及塑性呈现如此变化与其组织形态有关,在一定的磁场电流下,电磁力对熔池内液体金属的搅拌作用明显, Laves 在枝晶间共晶组织中的数量减少,因而其抗拉强度和延伸率获得了一定的提升;但是当磁场电

流过大时, 电磁搅拌效果变差, GH4169 合金的组织反而变得更加粗大, 进而导致其力学性能下降。

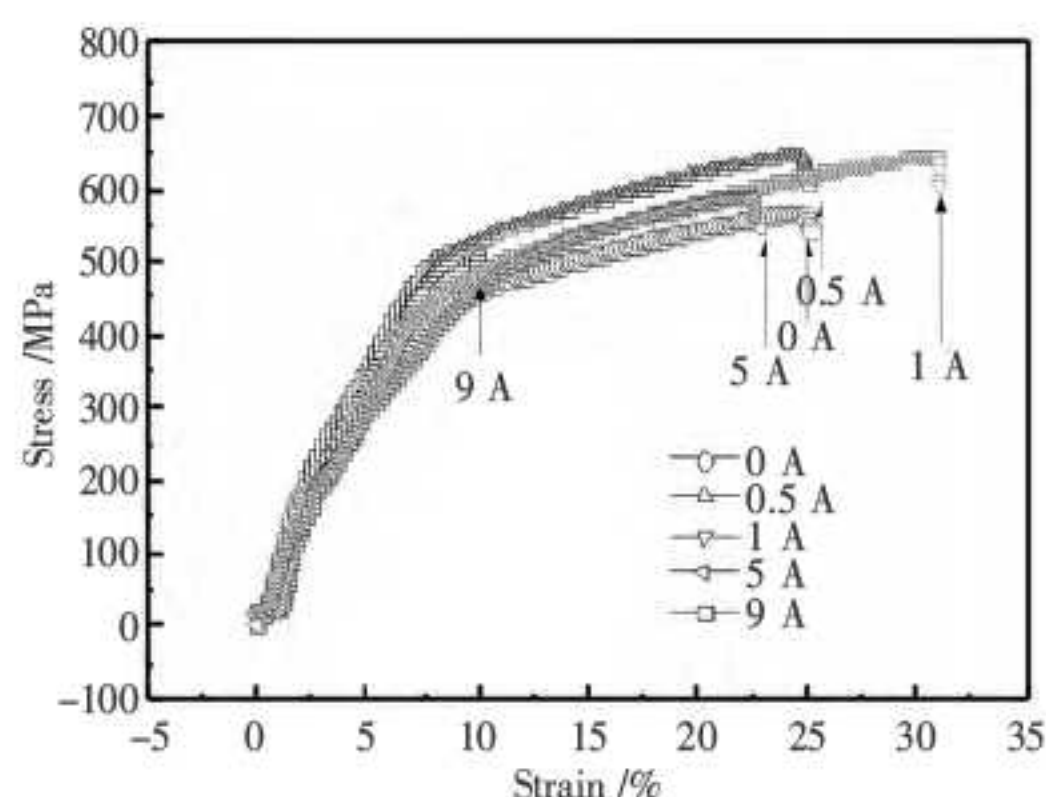


图5 不同磁场电流下电磁搅拌 WRFed GH4169 合金沉积态室温应力-应变曲线

图6为不同磁场电流下电磁搅拌 WRFed GH4169 合金室温拉伸测试断裂试样的断口形貌。分析发现, 所有沉积态试样的断口均具有明显的韧窝特征, 为韧性断裂, 拉伸断口属于滑移剪切型断口。由图6a~图6c可见, 磁场电流逐渐增大, 试样的微观断口形貌也随之呈现出一定的变化, 即韧窝的深度也由浅逐渐变深, 这与各试样塑性的增加对应; 但随着磁场电流的进一步增大, 韧窝又呈现出相反的变化特征, 即韧窝深度出现变浅趋势, 这与各试样塑性的降低相对应(图6d、图6e)。

3 结 论

1) 以 TIG 焊接电弧为热源的焊接快速成形

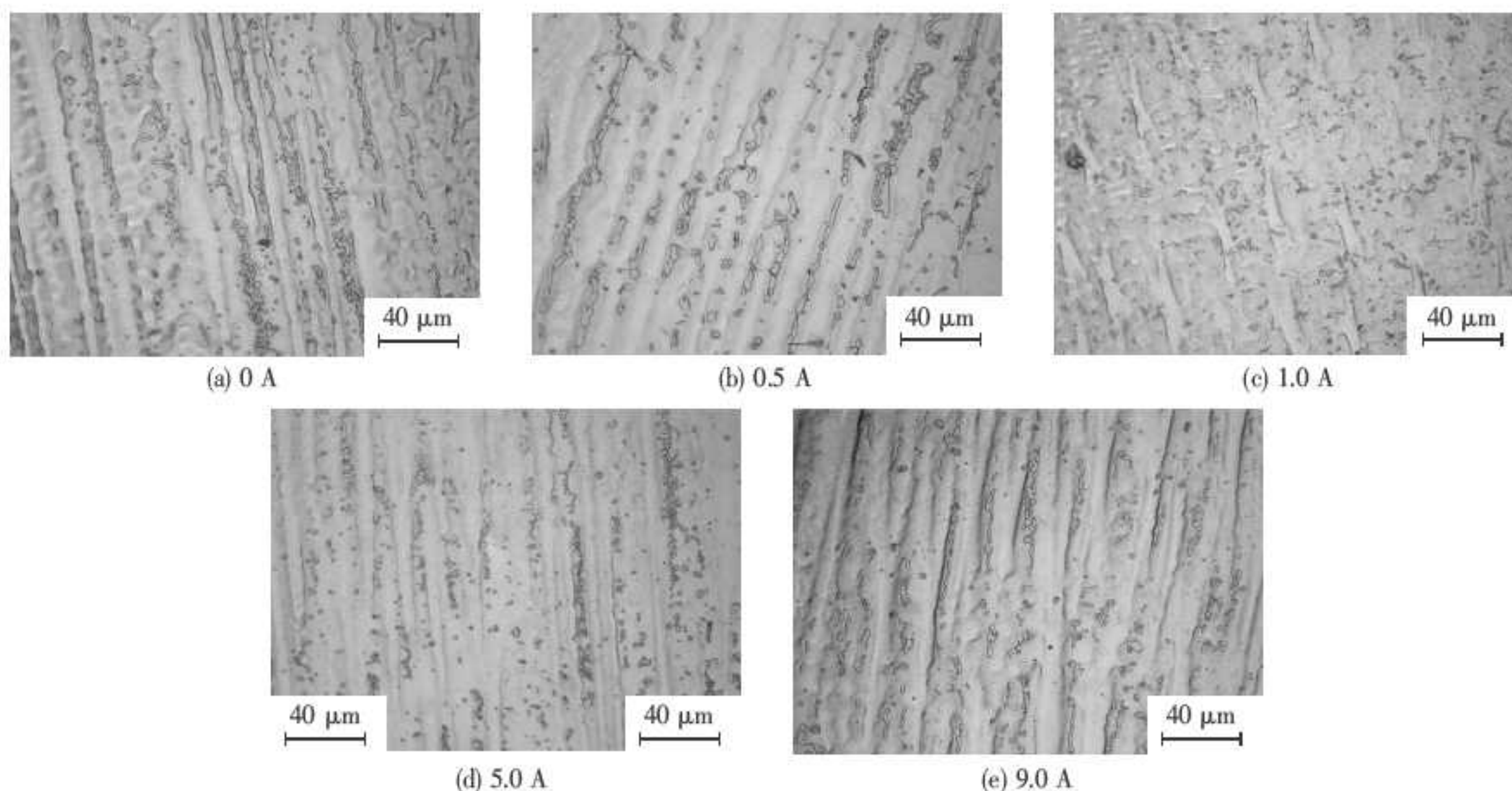


图6 不同磁场电流下电磁搅拌 WRFed GH4169 合金沉积态试样室温拉伸断口

GH4169 合金成形过程中施加电磁搅拌, 可以在一定程度上改善晶粒组织, 实现柱状晶到等轴晶的转变。所成形的试样的组织仍具有沿基材外延连续生长的柱状晶特征, 组织致密, 无明显冶金缺陷。

2) 在合适的磁场电流下, 磁场的加入可使熔池内的液体金属发生强烈的对流作用, 促使材料内部脆性相 Laves 相的含量减少, 改善合金元素的微观

偏析; 实验测得当磁场电流为 1.0 A 时材料显微硬度达到最高值 HV 253, 当磁场电流为 0.5 A 时材料强度最高, 达到 660 MPa。

3) 通过对不同磁场电流下电磁搅拌 WRFed GH4169 合金组织、显微硬度及力学性能的比较, 发现当磁场电流为 1.0 A 时, 所成形试样的成形性及综合性能较好, 为本试验条件下的最佳磁场电流。

【参考文献】

- [1] 田彩兰, 陈济轮, 董鹏, 等. 国外电弧增材技术的研究现状及展望 [J]. 航天制造技术, 2015(2): 57-60.

- [2] 周本海,李国忠,袁婷,等. 电磁搅拌电流对 30MnVS 连铸坯显微组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金,2009,29(2):161-165.
- [3] Metan V, Eigenfeld K, Rübiger D, et al. Grain size control in Al-Si alloys by grain refinement and electromagnetic stirring [J]. Journal of Alloys and Compounds,2009,487(1-2):163-172.
- [4] Schneider A, Avilov V, Gumenyuk A, et al. Laser beam welding of aluminum alloys under the influence of an electromagnetic field [J]. Physics Procedia,2013,41(30):4-11.
- [5] 余本海,胡雪惠,吴玉娥,等. 电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基合金涂层的组织结构和硬度的影响及机理研究 [J]. 中国激光,2010,37(10):2672-2677.
- [6] 余圣甫,张友寿,雷毅,等. 非磁性合金激光焊旋转磁场搅拌机理 [J]. 焊接学报,2006,27(3):109-112.
- [7] 余圣甫,张友寿,谢志强,等. 旋转磁场对激光焊缝金属显微组织的影响 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2005,33(12):24-26.
- [8] 汤光平,陈金明,刘俊. 电磁搅拌技术在焊接中的应用 [J]. 焊接技术,2006,35(5):3-6.
- [9] 罗健,贾昌申,王雅生,等. 外加纵向磁场 GTAW 焊缝成形机理 [J]. 焊接学报,2001,22(3):17-20.
- [10] 余小斌. 电磁搅拌激光立体成形 GH4169 合金的组织 and 力学性能研究 [J]. 南昌:南昌航空大学,2015:21-22.
- [11] 张航,许庆彦,孙长波,等. 单晶高温合金螺旋选晶过程的数值模拟与实验研究 [J]. 金属学报,2013,49(12):1508-1520.
- [12] 刘政军,苏明,苏允海. 外加磁场对不锈钢焊接接头组织和性能的影响 [J]. 沈阳工业大学学报,2009,31(6):667-670.
- [13] 余小斌,刘奋成,林鑫,等. 电磁搅拌激光立体成形 GH4169 合金的组织 and 硬度分析 [J]. 应用激光,2014,34(6):513-517.
- [14] 常云龙,车小平,李敬雅,等. 外加磁场对 MIG 焊熔滴过渡形式和焊缝组织性能的影响 [J]. 焊接,2008(10):25-28.