

电弧增材制造Mg-5Gd-2Y-0.4Zr合金直接时效处理下的力学性能研究

涂煜璇^{1, 2}, 郑冬冬², 王军凯¹, 李卓^{1, 2}

1. 北京航空航天大学宁波创新研究院 浙江宁波 315800

2. 北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室 北京 100191

摘要: 电弧增材制造 (WAAM) 技术制备的中低稀土含量镁合金有望通过直接时效处理即可获得优异的力学性能。采用电弧增材制造技术制备Mg-5Gd-2Y-0.4Zr合金, 并对其微观组织和直接时效处理的力学性能进行研究。结果表明: 沉积态合金具有晶粒尺寸细小 ($\leq 26\mu\text{m}$)、基体内合金元素含量高以及晶间第二相少的特征。经过 $200^\circ\text{C} \times 128\text{h}$ 直接时效热处理后, 合金的硬度从 $(63.3 \pm 2.2) \text{HV}_{0.3}$ 提升至 $(85.1 \pm 2.1) \text{HV}_{0.3}$, 达到固溶时效态硬度的95.6%; 合金的抗拉强度、屈服强度也分别由 $(217.3 \pm 2.8) \text{MPa}$ 、 $(91.0 \pm 7.7) \text{MPa}$ 提升至 $(240.3 \pm 1.6) \text{MPa}$ 、 $(130.9 \pm 2.5) \text{MPa}$ 。Mg-5Gd-2Y-0.4Zr合金力学性能的显著提升, 展现出直接时效处理的显著强化作用。

关键词: 电弧增材制造; 镁合金; 直接时效处理; 力学性能

Research on the mechanical properties of Mg-5Gd-2Y-0.4Zr alloy manufactured by arc additive under direct aging treatment

TU Yuxuan^{1, 2}, ZHENG Dongdong², WANG Junkai¹, LI Zhuo^{1, 2}

1. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, Zhejinag, China

2. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The magnesium alloy with medium and low rare earth content, fabricated by wire and arc additive manufacturing (WAAM), is expected to achieve excellent mechanical properties through direct aging treatment. The Mg-5Gd-2Y-0.4Zr alloy was fabricated by the WAAM, and its microstructure and mechanical properties under direct aging heat treatment were studied. The results indicate that the as-deposited alloy exhibits a fine grain size ($\leq 26\mu\text{m}$), a high content of alloying elements in the matrix, and few intergranular second phases. After direct aging treated at 200°C for 128h, the hardness of direct aging treated alloy increased from $(63.3 \pm 2.2)\text{HV}_{0.3}$ to $(85.1 \pm 2.1)\text{HV}_{0.3}$, reaching 95.6% of the hardness sf solution + aging treated alloy; while the tensile strength and yield strength increased from $(217.3 \pm 2.8)\text{MPa}$ and $(91.0 \pm 7.7)\text{MPa}$ to $(240.3 \pm 1.6)\text{MPa}$ and $(130.9 \pm 2.5)\text{MPa}$, respectively. In conclusion, this study demonstrates that direct aging treatment has a remarkably strengthening effect on the mechanical properties of Mg-5Gd-2Y-0.4Zr alloy.

Keywords: wire and arc additive manufacturing; magnesium alloy; direct aging treatment; mechanical property

基金项目: 国防基础科研计划 (No. JCKY2021601B203)。

1 序言

随着航空航天、汽车工业、核工业等高端制造业的快速发展,构件轻量化、大型化的需求日益增加。镁合金作为最轻的金属结构材料,有望部分替代铝合金或者钢,从而显著降低装备结构件的重量,并带来显著的经济效益。然而,大型复杂镁合金构件的制造工序多、制造周期长、原材料利用率低、制造成本高,这严重制约了其应用^[1]。电弧增材制造技术通过自下而上逐层堆积成型的方式可实现复杂构件的近净成形,且还具有成型效率高、材料利用率高等优点,有望为大型复杂镁合金构件提供高效、低成本的制造方法。

近年来,电弧增材制造镁合金的相关研究获得了可喜的进展,特别是电弧增材制造高稀土含量的镁合金在经过固溶时效处理后展现出高强构件的应用潜力。SHEN等^[2]基于CMT电弧增材制造技术制备了Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金,经固溶时效处理后材料的抗拉强度高达 (327 ± 8) MPa; CAO等^[3]利用电弧增材制造技术成功制备了Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.5Zr合金,经固溶时效处理后材料的抗拉强度高达 (337 ± 7) MPa; ZHAN等^[4]基于钨极气体保护焊制备了Mg-9Gd-3Y-0.5Zr合金,经固溶时效处理后材料的抗拉强度高达 (392 ± 15) MPa。然而,高稀土含量的镁合金材料不仅成本高,且大型/超大型镁合金构件通过固溶淬火处理的难度较大,热处理后构件变形大。若合金在较低温度下以非淬火的方式进行热处理后仍有优异的力学性能,则可为大型/超大型构件提供新的选材思路。

研究表明,基于快速凝固特性,电弧增材制造镁合金基体中往往具有较高的合金元素含量和较低的晶间相含量^[2]。中低稀土含量的镁合金有望在电弧增材制造的快速凝固条件下获得近乎无晶间相的饱和固溶体,并可通过直接时效处理获得媲美固溶时效处理的优异力学性能。因此,中低稀土含量镁合金的微观组织及直接时效处理的力学性能研究非常值得期待。

在已报道的电弧增材Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金的沉积态组织中,仍存在少量的晶间相^[2, 5]。为了在合金沉积态组织中获得近乎无晶间相的饱和固溶体,且又保留其时效硬化能力,可在Mg-6Gd-3Y-

0.5Zr合金的基础上稍许降低合金元素Gd、Y的含量。因此,本研究以中低稀土含量的Mg-5Gd-2Y-0.4Zr合金为研究对象,采用CMT电弧增材制造技术实现单道多层试验材料(GW52K)的制备,研究试验材料的微观组织及直接时效态下的力学性能,为设计可直接时效处理的镁稀土合金提供有价值的参考。

2 试验设备、材料与方法

本研究采用Mg-6Gd-3Y-0.4Zr铸板作为基材,以直径为1.2mm的Mg-5Gd-2Y-0.4Zr焊丝为原材料,采用福尼斯CMT电弧增材制造系统进行尺寸约120mm×70mm×10mm的单道多层试验材料的制备,焊丝及试验材料GW52K镁合金的化学成分见表1。成形时采用往复扫描成形策略,工艺参数为:电弧电压13.7V,焊接电流156A,送丝速度13m/min,焊枪移动速度0.6m/min,氩气流量15L/min,成形时焊枪往复运动且层间停留时间为30s。成形设备及试验材料宏观形貌如图1所示。

表1 Mg-5Gd-2Y-0.4Zr化学成分(质量分数) (%)

元素	Gd	Y	Zr	Mg
焊丝	4.80	1.75	0.38	余量
试验材料	5.05	2.01	0.40	余量



a) CMT电弧增材制造设备 b) 试验材料宏观形貌

图1 成形设备及试验材料宏观形貌

为了对比GW52K镁合金固溶时效和直接时效的硬化效果,分别将样品放入马弗炉进行固溶水淬+时效处理和直接时效处理。固溶处理的温度为480℃,固溶保温时间为1h;固溶时效和直接时效试样的时效温度均为200℃。

金相试样经机械研磨和抛光后,在体积分数为4%的硝酸酒精溶液中腐蚀。采用光学显微镜、扫描电子显微镜对其微观结构进行表征,采用能谱仪进行元素分布检测,采用X射线衍射仪进行物相分析。

用维氏硬度计测定材料硬度,在300gf

(2.94N) 载荷保下持15s后读取硬度值。采用万能试验机对沉积态和直接时效试样在室温下进行拉伸速率为0.2mm/min的准静态拉伸试验。

3 结果与分析

3.1 沉积态微观组织

图2a、b所示分别为GW52K镁合金的沉积态纵向试样和横向试样光镜照片，均展示出细小的等轴晶粒，平均晶粒尺寸按照截距法分别测得为24.4 μm 和26.5 μm 。从图2c高倍光镜照片中可见，GW52K镁合金的微观组织主要由 α -Mg基体、随机分布的微米/亚微米颗粒及晶内胡须状结构组成，晶间相含量极少且显著低于高稀土含量的电弧增材制造Mg-6Gd-3Y-0.5Zr、Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.5Zr等合金^[2, 3, 5]。

图3a~c所示为GW52K镁合金沉积态试样扫描电镜背散射照片。从图3c中可分辨出试样中亚微米/微米相分为类球形和方形两种形状。GW52K镁合金沉积态试样各相EDS结果见表2。由表2可知，图3b中A点及图3c中E点所示的类球形相为Zr颗粒；图3c中D点及F点所示的方块形相及多颗粒团聚物为富Gd、Y相，YANG等^[6]认为这种富稀土的方块形相为(Gd, Y) H_2 。在材料的晶界上难以观察到晶间相，但根据B、C点的成分对比可判断，背散射电子像中晶界附近呈现白亮态的区域为富稀土区域。这是因为电弧增材制造的冷却速率很快，在凝固末期偏聚在晶间的稀土元素直接固溶于晶间的基体中而形成该区域，所以晶间相也较少。富稀土区域的位置和晶界的位置并不能严格对应上，这可能是因增材制造循环热影响过程而导致的晶界迁移造成的。

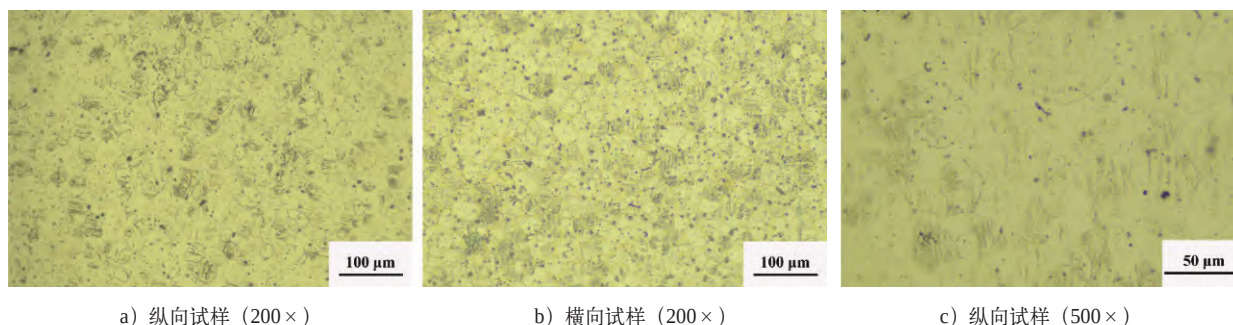


图2 GW52K镁合金沉积态稳态区试样光镜照片

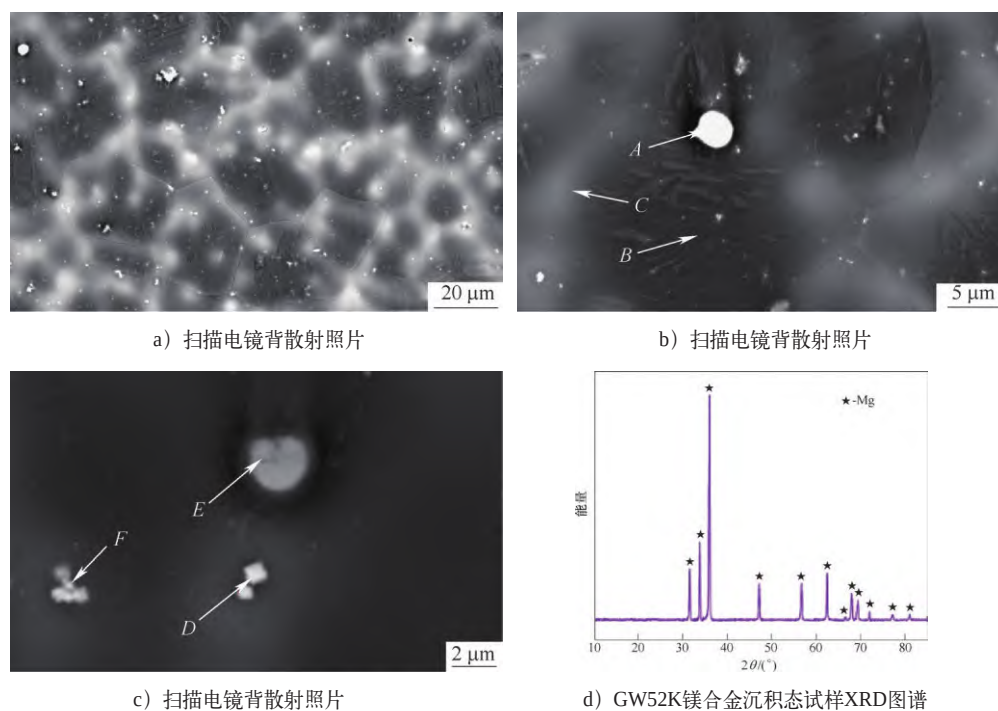


图3 GW52K镁合金沉积态试样扫描电镜背散射照片及XRD图谱

表2 GW52K镁合金沉积态试样各相EDS结果

(质量分数) (%)

元素	Mg	Gd	Y	Zr
测试点位	A	2.39	—	97.61
	B	95.10	3.80	1.10
	C	83.79	12.97	3.24
	D	47.65	27.99	22.97
	E	2.66	—	97.34
	F	47.99	26.78	24.20

此外, 胡须状结构在背散射照片中未表现出与基体有较大衬度差异, 该结构是由于非平衡凝固过程中的溶质偏聚造成的, 且并无特定结构, 因此在XRD图谱上没有产生额外峰^[7, 8]。如图3d所示的GW52K镁合金沉积态XRD图谱上, 仅能观察到Mg的特征峰, 从侧面也印证材料晶间较少的特征, 这为材料无需固溶处理而可以直接时效处理提供了依据。

3.2 热处理及力学性能

为衡量材料的直接时效效果, 先对GW52K镁合金进行 $480^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 固溶水淬处理, 然后将沉积态试样和固溶态试样同时进行时效处理作对比。图4所示为GW52K镁合金固溶态试样的扫描电镜背散射照片。由图4可知, 试样中的高熔点Zr颗粒和方块状(Gd, Y) H_2 相仍存在, 晶间相完全消失。此外, 晶间的富稀土区域已经不明显, 说明高温下溶质元素已经过充分的扩散。然而, 晶内的胡须状结构并未消失, 说明该结构有一定的高温稳定性。

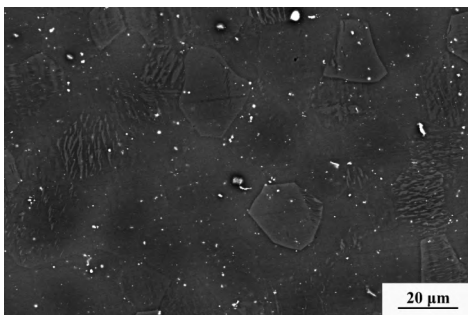


图4 GW52K镁合金固溶态扫描电镜背散射照片

对沉积态和固溶态试样同时进行 200°C 的时效处理后, 其时效硬化曲线如图5所示。由图5可知, 沉积态直接时效峰值时间为128h, 硬度从 $(63.3 \pm 2.2) \text{HV}_{0.3}$ 提升至 $(85.1 \pm 2.1) \text{HV}_{0.3}$, 提升值为 $21.8 \text{HV}_{0.3}$ 。固溶态试样时效峰值时间为201h, 硬度从 $(61.3 \pm 1.0) \text{HV}_{0.3}$ 提升至 $(89.0 \pm 1.7) \text{HV}_{0.3}$, 提升值为 $27.7 \text{HV}_{0.3}$ 。尽管GW52K镁合金沉积态试

样中晶间相很少, 但这仍会致使直接时效样品在峰值时效下析出相的数密度低于固溶时效试样, 导致直接时效试样的峰值硬度和硬度增量低于固溶时效试样。然而, 直接时效试样的峰值时效时间仅为128h, 远少于固溶处理后试样的时效时间; 且硬度提升34.4%, 达到固溶态试样的95.6%, 具有明显的时效硬化效果。

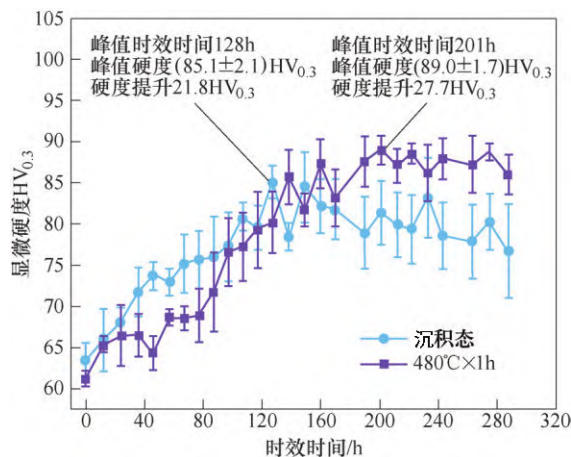
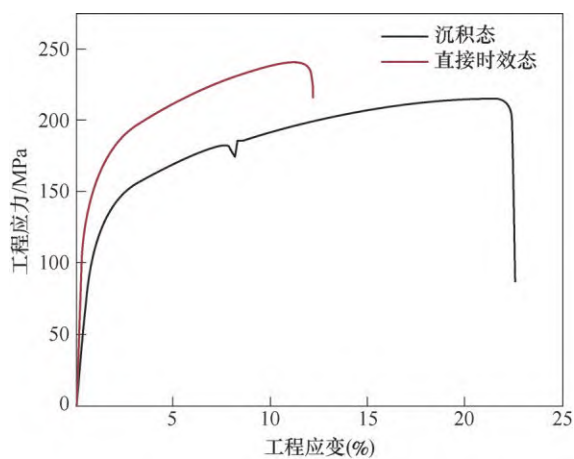


图5 GW52K镁合金不同状态试样的时效硬化曲线

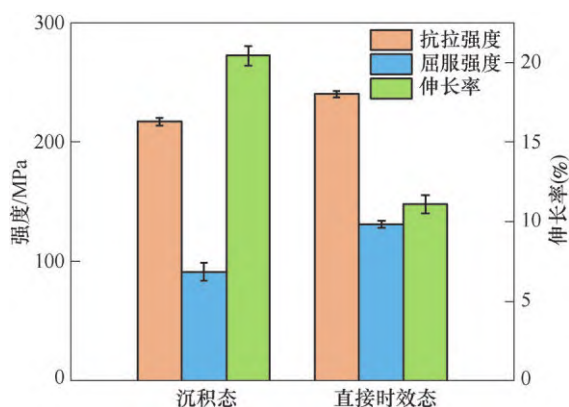
然而, 在同样的 200°C 下时效128h内, 固溶态试样的硬度最大提升值为 $18.92 \text{HV}_{0.3}$, 小于直接时效试样, 凸显出直接时效试样的高硬化效率。这主要有两个原因: 第一, 电弧增材制造过程中多次快速加热及冷却的热循环过程会诱发高热应力, 导致大量的位错形成^[9], 而固溶处理时则会消除大量位错; 这些高能量的位错可以作为析出相的形核位点并促进析出行为^[4, 10]。第二, GW52K镁合金沉积态试样在晶界附近有显著的富稀土区域(见图3a、表2), 而在固溶处理时, 稀土元素通过扩散使整个晶粒内成分趋于均匀化(见图4); 而沉积态试样富稀土区域的高浓度稀土原子, 能够更加快速地聚集形成析出相。因此, 沉积态试样直接时效能有更短的峰值时效时间, 且在相同的时效时间内有更好的强化效果。

对GW52K镁合金沉积态试样和直接时效试样($200^{\circ}\text{C} \times 128\text{h}$)进行拉伸试验, 工程应力-应变曲线及拉伸性能结果如图6所示。由图6可知, 沉积态试样抗拉强度、屈服强度及伸长率分别为 $(217.3 \pm 2.8) \text{MPa}$ 、 $(91.0 \pm 7.7) \text{MPa}$ 和 $(20.5 \pm 0.6) \%$; 直接时效后, 抗拉强度和屈服强度提升至 $(240.3 \pm 1.6) \text{MPa}$ 和 $(130.9 \pm 2.5) \text{MPa}$,

且仍能保持 $(11.1 \pm 0.6)\%$ 的高伸长率, 展现出良好的强塑性匹配。



a) 工程应力-应变曲线



b) 沉积态及直接时效态拉伸性能

图6 GW52K镁合金工程应力-应变曲线及拉伸性能结果

4 结束语

1) 采用CMT电弧增材制造技术成功制备了中低稀土含量的GW52K合金, 沉积态合金展现出细小的晶粒尺寸、基体内高稀土固溶度及几乎无晶间相的组织特征。

2) GW52K镁合金直接时效后硬度由 $(63.3 \pm 2.2) \text{HV}_{0.3}$ 提升至 $(85.1 \pm 2.1) \text{HV}_{0.3}$, 抗拉强度由 $(217.3 \pm 2.8) \text{MPa}$ 提升至 $(240.3 \pm 1.6) \text{MPa}$, 屈服强度由 $(91.0 \pm 7.7) \text{MPa}$ 提升至 $(130.9 \pm 2.5) \text{MPa}$, 展现出较好的直接时效硬化效果。

参考文献:

[1] 刘宏杰, 刘文才, 孙家伟, 等. 镁合金电弧增材制造研究现状及展望[J]. 材料工程, 2024, 52 (2): 16-30.

[2] SHEN C, TU Y, CHENG X, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 986: 174063.

[3] CAO Q, ZENG C, CAI X, et al. High-strength Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.5Zr alloy fabricated by wire-arc directed energy deposition: Phase transformation behavior and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2023, 76: 103789.

[4] ZHAN J, WU G, TONG X, et al. Exceptional mechanical properties of wire arc additive manufactured Mg-9Gd-3Y-0.5Zr alloy induced by promoted precipitation behavior[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024.

[5] CAO Q, ZENG C, QI B, et al. Excellent isotropic mechanical properties of directed energy deposited Mg-Gd-Y-Zr alloys via establishing homogeneous equiaxed grains embedded with dispersed nano-precipitation[J]. Additive Manufacturing, 2023, 67: 103498.

[6] YANG Y, PENG L, FU P, et al. Identification of NdH_2 particles in solution-treated Mg-2.5%Nd (wt.%) alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 485 (1-2): 245-248.

[7] 容伟. 高强度Mg-Gd-Zn系镁合金的研发及强化机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

[8] ZHANG Y, WU Y, PENG L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultra-high strength casting Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 703-711.

[9] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35 (10): 2690-2698.

[10] SHI K, LI S B, YU Z, et al. Microstructure and mechanical performance of Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloys prepared via pre-annealing, hot extrusion and ageing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 931: 167464.

MW 20240425