

脉冲处理对 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金铸轧板组织及性能的影响

田锡天¹ 沈善忠² 徐纪波² 旷鑫文² 陆轶奇² 苏鑫^{1,3} 高炜³ 赵加钰³

(1.西北工业大学机电学院; 2.浙江华朔科技股份有限公司; 3.沈阳大学机械工程学院)

摘要 研究了常规铸轧过程中施加 20、50 和 150 Hz 频率, 电流强度为 400 A 的脉冲电流对 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金铸轧板的组织及力学性能的影响。结果表明, 经 20 Hz 的脉冲电流处理后, Al-Zn-Mg-Cu 合金铸轧板偏析情况大为改善, 微观组织显著细化; 150 Hz 脉冲电流对铸轧板的组织影响不大; 铝合金中 τ 相广泛分布, 呈网状或岛状; 同时, 经 20 Hz 脉冲电流处理的铸轧板抗拉强度可达 320 MPa, 是常规铸轧板强度的 1.3 倍; 样品具有脆性断裂特征, 脉冲处理后韧性有所提高。

关键词 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金; 铸轧; 脉冲电流; 组织及性能

中图分类号 TG146.21; TG249.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Electric Pulse Currents on Microstructure and Mechanical Performance of Al-6Zn-3Mg-2Cu Rolled Strip

Tian Xitian¹, Shen Shanzhong², Xu Jibo², Kuang Xinwen², Lu Yiqi², Su Xin^{1,3}, Gao Wei³, Zhao Jiayu³

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwest Polytechnical University; 2.Zhejiang Huashuo Technology Co., Ltd.; 3.College of Mechanical Engineering, Shenyang University)

Abstract: The influence of electric pulse (EP) current with frequency of 20, 50 and 150 Hz as well as the current density of 400 A on the microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu rolled plate was investigated during solidification process. The results indicate that the macro-segregation degree is greatly improved and the microstructure is obviously refined with 20 Hz EP field. Instead, the structure entirely made up of dendrites has hardly any change at 150 Hz. τ phases in form of network or island are widely distributed in aluminum alloy. Meanwhile, the tensile strength of cast rolling strips modified by 20 Hz EP current can reach 320 MPa, which is 1.3 times of that of conventional ones. The strips are characterized by brittle fracture, and the ductility is increased after modified by EP current.

Key Words: Al-Zn-Mg-Cu Alloy, Roll Casting, Electric Pulse Current, Microstructure and Performance

7xxx 系铝合金具有密度小、强度高、韧性好、耐腐蚀性好等特点, 在航空航天及民用汽车轻量化领域得到广泛应用^[1,2]。然而, 根据沉淀强化原则, 较高的合金强度则需要提高合金元素的含量, 这导致传统铸造-热连轧板枝晶组织粗大且不可避免产生偏析缺陷。传统铸轧过程, 熔体直接与铸轧双辊直接接触而带来的高冷却速率虽然能够获得较细小的枝晶组织, 但板坯极易产生严重的中心偏析甚至组织分层等缺陷, 极大影响合金的生产和大规模应用。

近十年来, 电磁技术在我国得到迅速发展^[3]。DONG J 等^[4]、ZUO Y 等^[5]对比研究了低频电磁铸造(LFEVC)与传统直冷铸造 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 的凝固组

织, 认为降低电磁频率或增加电磁强度以控制熔体电磁过冷, 促使晶体球状从而细化凝固组织。LIAO X L 等^[6,7]深入研究了中频脉冲电流对纯 Al 和 Al-Cu 系合金凝固组织的细化作用, 并在此基础上提出“脉冲磁致振荡凝固细晶技术”。李元东等^[8]在研究镁合金的电脉冲轧制中, 发现脉冲电流热效应可以明显降低轧件再结晶温度, 从而有效减少中间退火次数, 提高生产率; 龚海军^[9]建立了连铸过程中适用于纯液/固相合金的电磁凝固耦合的数学模型, 并在 Ti-Al 和 Al-Cu-Si 共晶合金的试验中得到验证。众多研究表明, 电磁热搅拌可有效促进凝固过程中溶质的扩散并有利于提高熔体温度和溶质迁移率, 进而均匀化组织, 提高合金的力学性能。

收稿日期:2020-09-25; **修改稿收到日期:**2020-11-06

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(20170520310); 广东省科技计划资助项目(2014B090903012)

第一作者简介:田锡天, 男, 1965 年出生, 教授, 西安(710129), E-mail: 2843298243@qq.com

通信作者:苏鑫, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 沈阳(110044), E-mail: su_x@syu.edu.cn

引用格式:田锡天, 沈善忠, 徐纪波, 等. 脉冲处理对 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金铸轧板组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 340-344.

TIAN X T, SHEN S Z, XU J B, et al. Effects of electric pulse currents on microstructure and mechanical performance of Al-6Zn-3Mg-2Cu rolled strip[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 340-344.

然而,电磁搅拌效应对 7xxx 系铝合金快速凝固组织和性能影响的研究报道较少。本课题对经不同脉宽的脉冲电流处理的 Al-Zn-Mg-Cu 合金铸轧板坯(5 mm)完全退火后的微观组织和力学性能等进行研究,以期脉冲电流处理 Al-Zn-Mg-Cu 合金的凝固行为研究提供参考。

1 试验过程

1.1 材料制备

试验用 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金的化学成分见表 1。制备过程是先将纯度约为 99.85% 的铝锭放置在 RJ2-21-8 电阻炉中熔化,在 800 ℃时将纯铜块放入炉中,熔化后,关闭电气系统,冷却至 750 ℃;然后将铝箔覆盖的镁剂压入熔池,同时将锌块加入炉内;完全熔化后,在 700 ℃保温 2 h;扒渣除气后,降至 680 ℃浇注。

表 1 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Al-Zn-Mg-Cu alloy %					
wt%					
Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Al
6.0	3.2	2.0	0.5	0.3	余量

采用方波脉冲,频率分别为 20、50 和 150 Hz,脉冲宽度分别为 5、2 和 0.7 ms,电流强度为 300 A。将脉冲阳极深入流槽内,同时阴极端放置在轧辊另一侧,手动控制与轧板表面接触。调整铸轧辊缝为 5 mm,然后气喷枪预热氟硅酸钠保温喷嘴至 400 ℃,开通脉冲电源,设置轧辊辊速为 0.9 m/min。浇注,经轧辊冷却成形并经 20、50、150 Hz 脉冲连续处理制备板坯,见图 1。

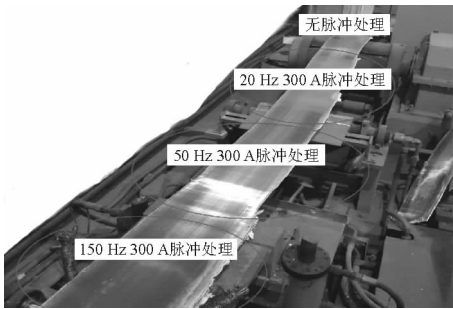


图 1 不同脉冲频率处理的铝合金铸轧板坯

Fig.1 The Al-6Zn-3Mg-2Cu strip prepared by TRC process with various EP frequencies

1.2 试样分析

在板坯不同脉冲处理区域取样,经过研磨、抛光、蚀刻,在体积分数为 1% 的 HF 水溶液中腐蚀约 25 s,然后用酒精冲洗。试样尺寸为 10 mm×10 mm,将腐蚀后的试样置于干燥箱中干燥。利用 MgO 水溶液进行抛光,采用 Leica DMI5000m 光学显微镜观察其微观形貌。在 12.5% 的 HClO₄+87.5% 的 CH₃OH(甲醇)电

解液中施加 5 V 电压持续约 5 s,进行室温电解抛光,在 SSX-550 扫描电镜上进行组织观察和成分分析。

对常规铸轧和脉冲电流处理铸轧的 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金板坯进行力学性能测试。不同条件下制备的铸轧板带切成 4 片,加工成标准拉伸试样(见图 2)。经过完全退火(400 ℃×1 h 退火后,随炉冷却至 200 ℃)取出空冷至室温(冷却速度低于 30 ℃/h)。采用 AG-X100KN 型拉伸试验机进行室温拉伸试验,应变速率为 6×10⁻⁴ s⁻¹。

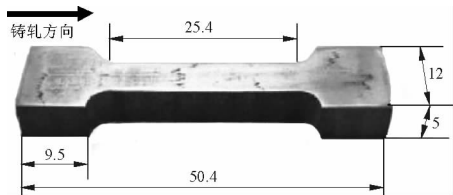


图 2 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金拉伸试样

Fig.2 Schematic diagram of Al-Zn-Mg-Cu alloy tensile specimens

2 试验结果与讨论

2.1 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金铸轧板坯的微观组织

不同频率脉冲调控的 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金铸轧板坯横截面中心部分微观组织见图 3。可以看出,无脉冲调控的常规铸轧条件下,α-Al 基体由数量较多的发达的枝晶组成,见图 3a;随着凝固进行,潜热释放迅速并在板坯横截面处形成严重的带状偏析;当施加 20、50 Hz 脉冲电流时,中心带状偏析消失,晶间沉淀相弥散且尺寸细小,枝晶不明显,整个组织呈现细小等轴晶化,见图 3b 和图 3c;在 150 Hz 电脉冲下,凝固组织中发现多条偏析线,组织同时呈现粗大的枝晶和等轴晶,且晶粒尺寸相差较大(见图 3d),可见经 150 Hz 的脉冲电流处理对晶粒细化的作用弱于低频脉冲。

在电脉冲条件下,固液界面前沿会产生 Joule-Thomson-Peltier 热效应。一般来说,枝晶是沿着潜热释放相反方向生长。假设界面传热稳定,满足下式^[10]:

$$T_L^e = T_m + \frac{\lambda_L G_L}{v c_L \rho_L} (1 - e^{-\frac{v c_L \rho_L}{\lambda_L} z}) + \frac{j^2}{v \sigma_L c_L \rho_L} \left[\frac{\lambda_L}{v c_L \rho_L} (1 - e^{-\frac{v c_L \rho_L}{\lambda_L} z}) - z \right] \quad (1)$$

式中,λ_L为熔体的传热系数;c_L为液相的平均比热容,J/(kg·K);ρ_L为液相密度,kg/m³;v 为枝晶生长速率,m/s;j 为电流密度,A/m²;z 为汤姆逊常数;T_m为合金熔点,℃;G_L为凝固温度梯度,℃/m。

由式(1)可知:

$$\frac{\partial G_L^e}{\partial j} = \frac{2j}{v \sigma_L c_L \rho_L} (e^{-\frac{v c_L \rho_L}{\lambda_L} z} - 1) \quad (2)$$

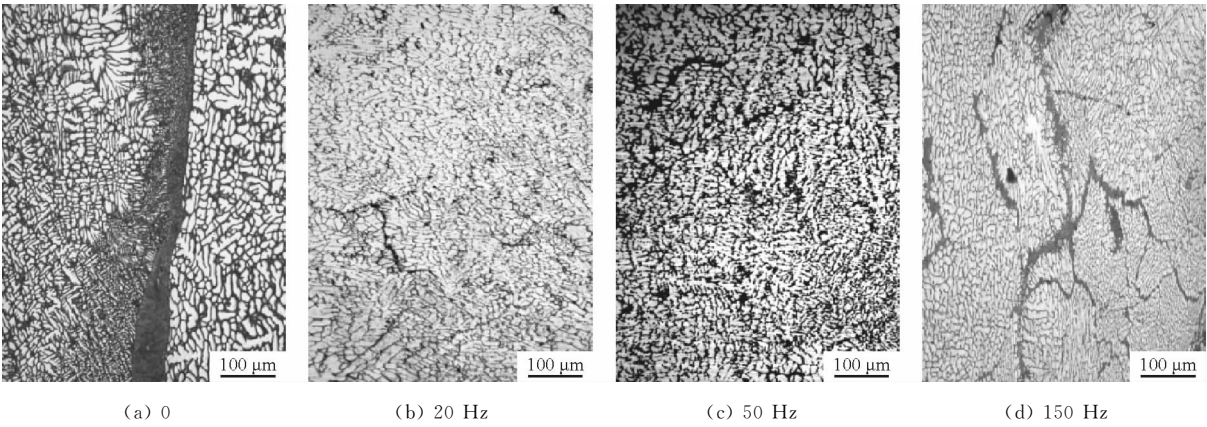


图 3 不同脉冲频率处理的 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金铸轧板坯横截面中心微观组织
Fig.3 Central microstructure of cross section of Al-6Zn-3Mg-2Cu strips regulated by various EP frequencies

在电流作用下,枝晶生长速率 v 沿凝固方向不低于 0,因此 $e^{-\frac{v \cdot L \cdot \rho_L}{\lambda_L} \tau} - 1 < 0$,即固液界面的温度梯度随电流密度的增加而单调下降。糊状区枝晶生长过程温度梯度示意图见图 4,可见枝晶尖端熔断导致生长缓慢甚至停止。同时,合金原子的横向扩散更为充分。

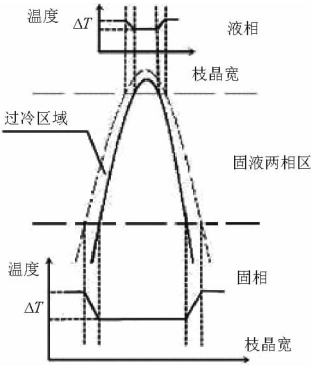


图 4 枝晶生长中的电流密度和温度梯度示意图
Fig.4 Schematic diagram of current density and the corresponding temperature gradient of growing dendrites

当脉冲频率偏低时,产生的热量足以熔化枝晶尖端,而枝晶根部由于电流产生的热量相对较小,因而枝晶根部生长较为迅速,使整个晶体形态逐渐趋于等轴晶。随着脉冲电流作用时间降低,凝固过程枝晶生长的过冷度逐渐提高^[11],溶质原子沿着凝固方向聚集,最终形成带状偏析。

2.2 微观偏析及成分分析

图 5 为 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金铸轧板完全退火后的微观形貌。可以看出,常规铸轧试样与 150 Hz 脉冲铸轧试样凝固形成的微偏析在后续退火工艺中残留下来,并形成网状组织。而图 5b 和图 5c 中脉冲电流处理试样中微观偏析弥散化,且呈较大尺寸斑、岛状形态,可见较长的脉宽能够影响合金元素分布,且影响合金固溶度。表 2 为各脉冲铸轧条件下合金偏析点成分分析。

由表 2 可知,在常规铸轧和 20 Hz 脉冲下,Mg 摩尔分数差异较大,从约 23%(无电流)降低至约 15.5%;Zn 摩尔分数也有类似的趋势。与 Mg 不同,Cu 的摩尔

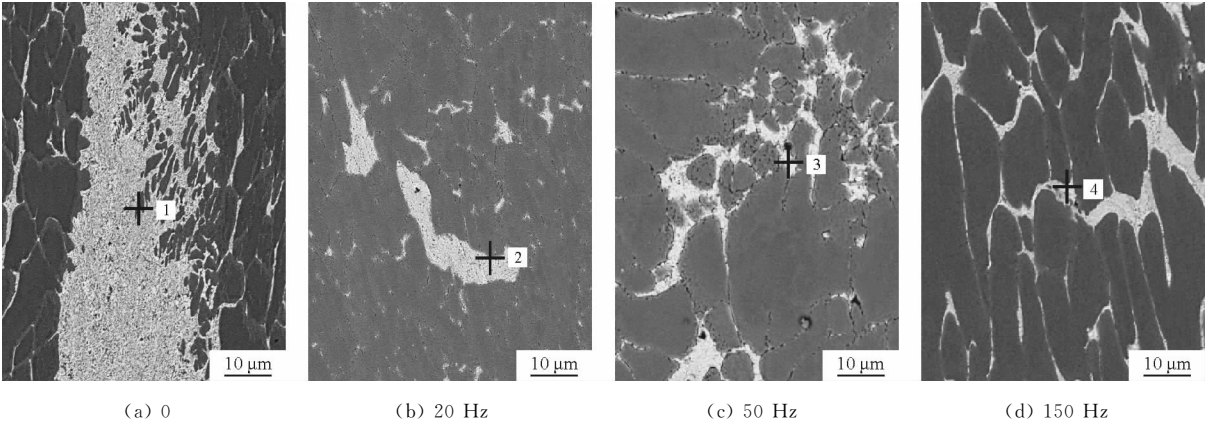


图 5 不同脉冲频率 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金的 SEM 形貌
Fig.5 The SEM images of Al-6Zn-3Mg-2Cu alloy modified by various EP frequencies

分数在脉冲作用下提高。排除了 α -Al 基体的干扰,Mg、Cu、Zn 摩尔比约为 4 : 1 : 2(无电流),在 20 Hz 脉冲电流下 Mg、Cu、Zn 摩尔比约为 5 : 4 : 3,50 Hz 脉冲

条件下的摩尔比为 1 : 1 : 1,150 Hz 脉冲条件下的摩尔比为 2 : 1 : 1。可见,脉冲电流能够提高合金元素的固溶度,改善凝固组织并强化铝基体。

表 2 图 5 中测试点的偏析点化学成分分析
Tab.2 Chemical composition analysis of segregation
points in Fig.5

位置	Mg		Al		Cu		Zn	
	w_B	x_B	w_B	x_B	w_B	x_B	w_B	x_B
1	16.98	23.05	48.60	59.15	11.14	5.78	23.28	11.75
2	10.85	15.54	48.31	62.35	23.40	12.82	17.45	9.29
3	9.47	14.16	44.39	59.79	24.93	14.26	21.22	11.79
4	15.73	22.46	43.04	55.38	17.66	9.65	23.57	12.52

2.3 力学性能分析

图 6 为不同脉冲频率下 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金铸轧板坯沿铸轧方向的抗拉强度。可以看出,在 20 Hz 脉冲电流下的合金板坯最大抗拉强度为 320 MPa,平均为 316 MPa,相当于常规铸轧板坯试样强度的 1.3 倍。随着脉冲频率增加,其板坯抗拉强度下降。在 150 Hz 时铸轧板的抗拉强度约为 260 MPa,与无脉冲处理的板坯强度接近。

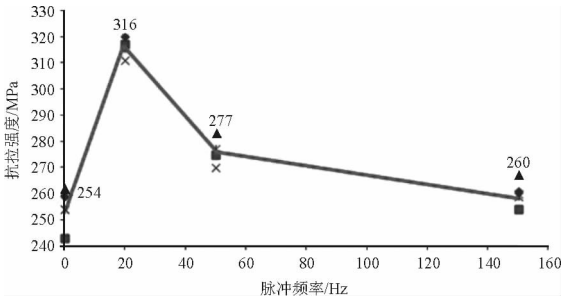


图 6 不同脉冲电流下的 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金的抗拉强度
Fig.6 Tensile strength of Al-6Zn-3Mg-2Cu alloy with varied EP frequencies

图 7 为 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金铸轧板坯的断口形貌。可以看出,板坯断口为典型的脆性断裂特征。经过脉冲处理后铸轧板坯断口局部存在撕裂棱和韧窝堆积,形成准解理断裂面。在 20 Hz 脉冲条件下,韧窝较多,表明板坯韧性增强,而在 150 Hz 脉冲条件下的板坯具有明显的撕裂棱。

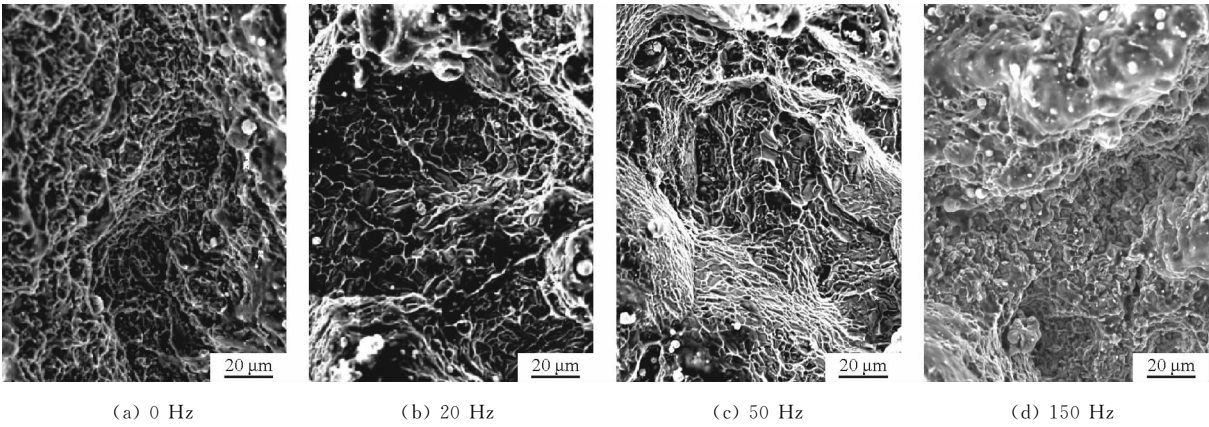


图 7 不同脉冲频率下 Al-Zn-Mg-Cu 合金拉伸试样的断口形貌

Fig.7 The fracture morphology of Al-Zn-Mg-Cu alloy tensile specimens under various EP conditions

3 结 论

(1)20 Hz 和 50 Hz 的脉冲电流能够抑制 Al-6Zn-3Mg-2Cu 合金枝晶的尖端生长,其凝固组织等轴化;同时,能够使得带状偏析缺陷减轻甚至消失。在 150 Hz 脉冲电流处理后铸轧板坯的凝固组织内的晶体形态恢复枝晶形貌,且偏析缺陷程度增强。在铸轧过程中,引入低频脉冲电流有助于凝固组织细化和成分均匀化。

(2)20 Hz 脉冲电流处理的 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金板坯抗拉强度为 316 MPa;150 Hz 脉冲电流处理板坯的抗拉强度和未处理时接近。对比之下,较低的脉冲频率能够有效改善 Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金铸轧板坯的力学性能。断口分析表明,脉冲电流处理的铸轧板坯均呈现脆性断裂特征,脉冲频率降低,板坯的韧性增加。

(3)施加 20 或 50 Hz 脉冲电流后,Al-6Zn-3Mg-2Cu 铝合金板坯的网状微观偏析形态被破坏,形成不连

续的斑、岛状形态弥散分布,同时微观偏析尺寸减小。

参 考 文 献

[1] WANG X D, NIE Z R, LIN S P, et al, Effect of trace element erbium on corrosion resistance properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science Forum, 2009, 610-613: 663-667.

[2] STILLER K, WARREN P J, HANSEN V, et al. Investigation of precipitation in an Al-Zn-Mg alloy after two step ageing treatment at 100 °C and 150 °C[J]. Materials Science and Engineering, 1999, A270: 55-63.

[3] 吴存有,周月明,侯晓光.电磁搅拌技术的发展[J]. 世界钢铁, 2010 (2): 36-41.

[4] DONG J, CUI J Z, YU F X, et al. Effect of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macro segregation of ϕ 270 mm DC ingots if an Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy[J]. Materials Letters, 2005, 59: 1 502-1 506.

[5] ZUO Y B, CUI J Z, ZHAO Z H, et al. Effect of low frequency electromagnetic field on casting and crack during super-high strength aluminum alloy ingot[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A406: 286-292.

稀土微合金化对 Mg-9Li-1Zn 合金组织性能的影响

王红亮¹ 谢圣中¹ 林建国²

(1.湖南有色金属职业技术学院; 2.湘潭大学材料科学与工程学院)

摘 要 通过复合添加 0.2% 的 Y+0.1% 的 Nd+0.05% 的 Gd(质量分数,下同)制备了轻质高强 Mg-9Li-1Zn-RE 合金(LZ91-RE),随后对其进行锻造和冷轧。采用 OM、SEM、EDS、XRD、TEM 对锻造态和冷轧态 LZ91 合金和 LZ91-RE 合金进行组织及物相分析,同时利用拉伸试验机进行力学性能测试。结果表明,LZ91 合金组织由 α -Mg 和 β -Li 两相组成,添加多元稀土元素后 LZ91 合金中 α 相体积分数减少了 26.5%,晶粒得到显著细化,同时原位析出了富 Y、富 Nd、Mg₁₂Nd 及 Mg₃RE 稀土强化相,但存在局部偏聚现象;LZ91-RE 合金经过大应变冷轧变形,稀土强化相被破碎细化且分布更加均匀。此外,与 LZ91 合金相比,锻造态的 LZ91-RE 合金抗拉强度比 LZ91 合金提高了 13.9%。冷轧态的 LZ91-RE 合金的抗拉强度比 LZ91 合金提高了 19%,而伸长率只下降了 4.4%。

关键词 Mg-9Li-1Zn 合金;稀土元素;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of Mg-9Li-1Zn Alloy with RE Elements Multi-micro Alloying

Wang Hongliang¹, Xie Shengzhong¹, Lin Jianguo²

(1.Hunan Nonferrous Metals Vocational and Technical College;

2.School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University)

Abstract: The multiple trace rare earth elements RE (0.2% Y+0.1% Nd+0.05% Gd) (mass percentage) were added to prepare light and high-strength Mg-9Li-1Zn-RE alloy (LZ91-RE), which was subsequently forged and cold rolled. The microstructure and phase of the as-forged and as-rolled LZ91 alloy and LZ91-RE alloy were analyzed by means of OM, SEM, EDS, XRD, TEM. Meanwhile, the mechanical properties of the alloy prepared were tested by the tensile testing machine. The results reveal that the microstructure of LZ91 alloy consists of two phases of α -Mg and β -Li. After the addition of multiple rare earth elements, the volume fraction of α phase in LZ91 alloy is reduced by 26.5%, and the grains are significantly refined. Y-rich, Nd-rich, Mg₁₂Nd and Mg₃RE rare earth strengthening phases are in-situ precipitated, however there exists a local segregation. After deformation of the LZ91-RE alloy by cold rolling with large strain, the rare earth strengthening phases in the alloy are broken and refined with more uniform distribution. In addition, compared with that of the LZ91 alloy, the tensile strength of the as-forged LZ91-RE alloy is increased by 13.9%. The tensile strength of the cold-rolled LZ91-RE alloy is increased by 19%, while the elongation is only reduced by 4.44%.

Key Words: Mg-9Li-1Zn Alloy, Rare Earth, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2020-09-19;修改稿收到日期:2020-10-29

基金项目:湖南省教育厅科学研究资助项目(19C1376);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ5047)

第一作者简介:王红亮,男,1988 年出生,讲师,湖南株洲(412000),E-mail:hlwang69@163.com

通信作者:谢圣中,男,1977 年出生,教授,湖南株洲(412000),E-mail: xiesz68@163.com

引用格式:王红亮,谢圣中,林建国. 稀土微合金化对 Mg-9Li-1Zn 合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 344-348.

WANG H L, XIE S Z, LIN J G. Microstructure and mechanical properties of Mg-9Li-1Zn alloy with RE elements multi-micro alloying[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 344-348.

[6] LIAO X L, ZHAI Q J, CHEN W J, et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum[J]. Acta Meterialia, 2007, 55: 3 103-3 109.

[7] LIAO X L, ZHAI Q J, SONG C J, et al. Effect of electric current pulse on stability of solid/liquid interface of Al-4.5Cu alloy during directional solidification[J]. Material Science and Engineering, 2007, A466: 56-60.

[8] 李元东, 郝远, 阎峰云, 等. AZ91D 镁合金在半固态等温热处理中的组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 571-575.

[9] 龚海军. 电磁-凝固传输间接耦合过程的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013

[10] 刘金炎, 王家淳, 郭世杰, 等. 电磁场对 7050 铝合金凝固组织和元素分布影响[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(1): 7-10.

[11] 王晨, 周静, 杨志峰, 等. 7050 铝合金铸锭均匀化过程中相的转变[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(1): 23-25.

(编辑: 栗万仲)