● 材料改性 Material Propertiest ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.012

热处理对 ZM61 镁合金组织与力学性能的影响

李伟莉,刘 涛,王小刚,冯露露,于晨凯
(山西银光华盛镁业股份有限公司 技术中心,山西 闻喜 043800)

摘 要:通过对挤压态 ZM61 合金进行不同工艺的时效热处理,探究了时效工艺对 ZM61 合金显微组织及力学性能的影响。结果表明,进行双级时效热处理可以析出更多的 GP 区,且生成了更多的退火孪晶,使得合金的力学性能大幅度提高。经过双级时效处理后最终合金的抗拉强度,屈服强度和伸长率分别为 345 MPa,323 MPa 和 8%。

关键词:ZM61;时效处理;力学性能;显微组织

中图分类号:TG156; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)10-0884-03

Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of ZM61 Mg Alloy

LI Weili, LIU Tao, WANG Xiaogang, FENG Lulu, YU Chenkai
(Shanxi Wenxi Yinguang Huasheng Magnesium Co., Ltd., Wenxi 043800, China)

Abstract: The effect of aging process on microstructure and mechanical properties of ZM61 alloy was investigated by different aging processes. The results show that the two-stage aging treatment can precipitate more GP zones and generate more annealing twins, which greatly improves the mechanical properties of the alloy. The ultimate tensile strength, yield strength and elongation of the alloy after two-stage aging treatment are 345 MPa, 323 MPa and 8%, respectively.

Key words: ZM61, aging treatment; mechanical properties; microstructure

随着国家对国防安全及资源环境的重视,镁合金在军工、电子 3C 等领域应用越发广泛。目前,镁合金的成形方式主要有挤压、锻压、轧制等,但是在成形过程中仍存在强塑性不匹配、性能不稳定,难以成形等问题,这主要是由于镁合金独特的密排六方结构导致滑移系少各向异性严重,从而塑性变形困难[1-3]。另外在镁合金的成形过程中,容易形成强基面织构,导致塑性变形能力降低,严重限制了镁合金的广泛应用。Walde[4-6]等人研究发现,轧制镁合金板材通常具有基面平行于轧制方向(RD)的基面织构,挤压镁合金板材通常具有基面平行于挤压方向(ED)的强基面织构。

热处理是改变镁合金晶粒尺寸、提升综合性能的有效手段。对于可时效强化的 Mg-Zn 系合金而言,热处理不仅可以消除铸态组织缺陷,均匀组织,而且可以减小变形过程中的应力,析出细小弥散沉淀相,提升变形合金的强度。Mg-Zn-Mn 合金作为一种新型变形镁合金,其用价格低廉的 Mn 取代 Zr 元素,并延续了 Mg-Zn 系合金的时效强化效应。整体来看,Mg-Zn-Mn 系合金制备成本低,并且具有挤压温度低,成型性好等优点,此外,还可通过时效强化达到较高强度,有广泛的应用前景。因此,本文作者选用 Mg-6Zn-1Mn(ZM61)合金,通过挤压变形得到性能稳定的挤压棒材,后续进一步进行热处理提升其综合力学性能。研究挤压后固溶及时效工艺对合金力学性能的影响,揭示时效工艺对 ZM61 合金力学性能的影响机理,为进一步拓宽镁合金的工程化应用奠定基础。

1 实验材料与方法

所用材料为纯 Mg 锭 (>99.7%)、纯 Zn 锭、Mg-15% Mn 中间合金,首先将坩埚温度升到 740 ℃,待镁锭、锌锭全部融化后,加入 Mg-15% Mn 中间合金,充分搅拌精炼 9~10 min,然后加热到 760 ℃后静置 30 min 后降温到 720 ℃。最后通过半连续铸造将合金液体浇铸成棒坯,其中铸造速度 130 mm/min。浇铸过程中以 SF_6+CO_2 为保护气体,铸造完成后取小样进行 ICP (电感耦合等离子体原子发射光谱仪)化学成分分析,具体成分如表 1。铸造完成后将合金在 330 ℃保温 24 h 进行均匀化处理,随后在 300~330 ℃进行挤压变形,挤压速度 2 m/min。显微

收稿日期:2021-07-14
作者简介:李伟莉(1989—),女,河南新乡人,中级工程师.主要从事镁合金铸造及热处理方面的工作.
电话:15110487454,Email:liweili@163.com

表1 合金的化学成分分析结果 w(%)
Tab.1 The chemical composition analysis results of the alloy

Alloys	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni
ZM61	0.008 7	6.09	1.37	0.008 8	0.010 1	0.001 7	0.000 66

组织观察前首先将试样依次从 600# 砂纸、2000# 砂纸进行预磨，然后进行抛光机器粗、精细抛光，金相腐蚀液采用配制的硝酸酒精溶液。拉伸试样尺寸符合 GB/T 228.1-2010。挤压后热处理工艺制度如表 2。

表2 热处理工艺制度
Tab.2 Process system for heat treatment

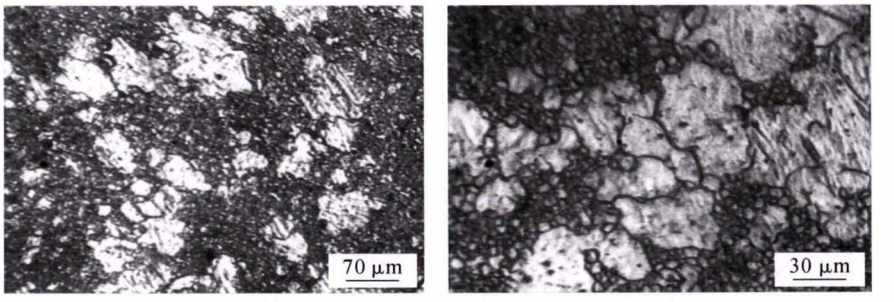
工艺制度	固溶(水冷)	时效(空冷)
单级	随炉加热 420 ℃、保温 2 h	180 ℃、保温 16 h
双级	随炉加热 420 ℃、保温 2 h	90 ℃、保温 24 h+180 ℃、保温 16 h

2 实验结果与分析

图 1 为挤压态 ZM61 合金不同倍数下的微观组织，从图中看出经过挤压变形后，发生了动态再结晶，大部分晶粒细化，并有部分大晶粒的存在，呈现出大晶粒被小晶粒包围的双峰组织结构，双峰晶粒组织结构将有利于强度的提升。相对于大晶粒，位错在小晶粒中滑移的距离更短、分布更均匀，内部应力集中更容易通过晶界滑移释放。一般情况下，相对于小晶粒，大晶粒内部更容易发生孪生。吉林大学的 Wang 等人[7]研究发现，在室温拉伸变形时，大晶粒尺寸的 AT33 合金较小晶粒尺寸的 AT33 合金更容易出现孪晶。澳大利亚迪肯大学 Barnett 教授[8]研究发现，对于轧制镁合金，在压缩变形中，当试样晶粒尺寸增大时，孪生程度加剧，孪晶数量也相应增加。当晶粒达到一定尺寸时，镁合金的变形机制从滑移主导变为孪生主导。

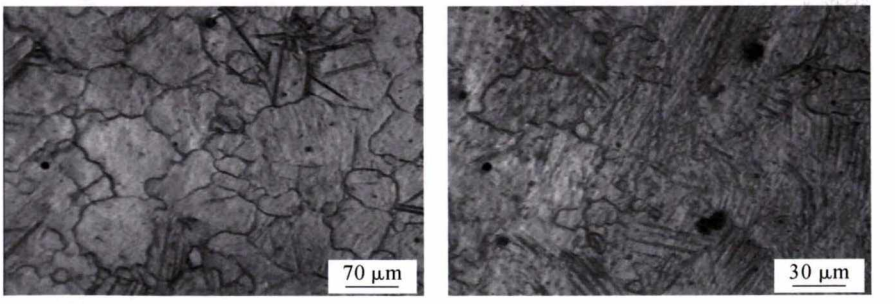
图 2 为 ZM61 合金不同时效处理的微观组织，从图 2(a)中看出，经过单级时效处理后，合金的组织变的更加均匀，其中动态再结晶小晶粒发生了长大，且存在有少量的孪晶。而经过双级时效处理后，除孪晶产生外，在晶粒内部析出大量细小的弥散相，这将作为强化相提高合金的强度。很容易得知孪晶是由于预变形时，镁合金的孪生产生的，且孪晶随着时效的进行，逐渐变得稀疏。且在时效过程中，一个晶粒中同时存在多个孪晶并全部贯穿整个晶粒。

图 3 为 ZM61 合金挤压态和不同时效处理的力学性能，从图中看出与挤压态合金相比，经过固溶时效处理后合金的强度明显提升，但伸长率有所下降，合金得到强化主要还是靠第二阶段的预时效析出的 GP 区。经过双级时效后强度提升最为明显，其抗拉强度达 345 MPa，屈服强度 323 MPa，相比挤压态合金分别提升了 9.8%，20.9%。主要是由于在双级时效过程中，经过长时间的低温时效处理后，合金在 GP 区更容易析出弥散的第二相，这将进一步提高合金的强度，具体力学性能如表 3。



(a)　　(b)

图 1 不同倍数下挤压态 ZM61 合金的微观组织
Fig.1 Microstructure of as extruded ZM61 alloy under different magnification



(a)单级时效　　(b)双级时效

图 2 ZM61 合金不同时效处理的微观组织
Fig.2 Microstructure of extruded ZM61 alloy with different aging treatments

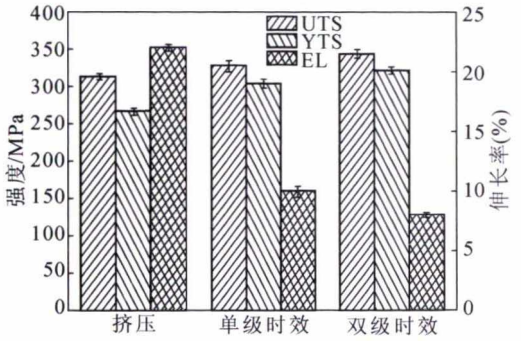


图 3 挤压后固溶+时效(T6)处理 ZM61 合金的力学性能
Fig.3 Mechanical properties of ZM61 alloy treated with solution +aging (T6) after extrusion

表3 ZM61合金挤压态和不同时效处理的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of ZM61 alloy under as extruded and different aging treatments

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)
挤压	314	267	22
单级时效	328	305	10
双级时效	345	323	8

3 结论

通过进行不同的热处理工艺，研究了变形态 ZM61 镁合金的微观组织与力学性能的变化情况，主要研究结果表明:相比单级时效热处理,经过双级时效热处理后,合金析出更多的 GP 区,且产生更多的孪晶,导致强度升高。最终双级处理后抗拉强度 345 MPa,屈服强度 323 MPa,远远高于挤压态合金的性能。

参考文献:

[1] BYER C M, LI B, CAO B, et al. Microcompression of singlecrystal magnesium [J]. Scripta Materialia, 2010, 62(8):536-539.

[2] WANG X G . Excellent ductility and stretch formability of Mg-2Zn-1Mn-0.5Ca-0.1Gd sheet at room temperature [J]. Materials Letters, 2020, 276.

[3] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.

[4] KHAN A S, PANDEY A, GNNÄUPEL-HEROLD T, et al. Mechanical response and texture evolution of AZ31 alloy at large strains for different strain rates and temperatures [J]. International Journal of Plasticity. 2011, 27: 688-706.

[5] WALDE T, RIEDEL H. Modeling texture evolution during hot rolling of magnesium alloy AZ31 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 443: 277-284.

[6] SHI Z Z, ZHANG Y, WAGNER F, et al. On the selection of extension twin variants with low Schmid factors in a deformed Mg alloy [J]. Acta Materialia, 2015, 83: 17-28.

[7] ZHANG D F, SHI G L, DAI Q W, et al. Microstructures and mechanical properties of high strength Mg-Zn-Mn alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18: 59-63.

[8] NIU C J, LIU M, LI C R. Thermodynamic description on the miscibility gap of the Mg-based solid solution in the Mg-Zn, Mg-Nd and Mg-Zn-Nd systems[J]. Calphad, 2010, 34(4):428-433.

均衡凝固技术资料邮购

国家科技成果重点推广计划项目 编号：I-1-5-3
西安理工大学均衡凝固技术科研成果汇编

铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例

《铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例》是西安理工大学均衡凝固技术科研成果的汇编，被列为国家科技成果重点推广计划项目，编号I-1-5-3。汇编共分6章：第一章 铸铁件均衡凝固与有限补缩。第二章 铸铁件冒口补缩设计。第三章 浇注系统当冒口补缩设计方法。第四章 浇注系统大孔出流理论与设计。第五章 铸钢 白口铸铁 铝钢合金铸件的均衡凝固工艺。第六章 铸件充填与补缩工艺定量设计实例。可用于铸件浇注系统，冒口补缩系统的定量设计，包括浇口、冒口的位置、大小、个数，冷铁的放置。也可用于对已有铸件浇口、冒口设计的定量评估，及对已产生的铸造缺陷的分析与防治。浇口、冒口的开设要防止几何热节、接触热节、流动热节的重合；在冒口颈处放冷铁消除冒口根缩孔、缩松缺陷；控制浇口截面比实现垂直分型等压等流量设计等技术，通过生产实例给予展现，可供生产应用参考。汇编邮购价160元。

联系地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼三层
联 系 人：李巧凤 13991824906 QQ：53985132 E-mail:53985132@qq.com
李亚敏 15829361158 QQ：412008096 E-mail:412008096@qq.com
技术咨询：魏 兵 13609155628