

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5053

组织缺陷对 Mg-Y-Ca-Zr 镁合金力学性能的影响

蔡菲儿¹, 王议坚¹, 王文礼²

(1. 苏州科技大学材料科学与工程学院, 江苏苏州 215009; 2. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西西安 710055)

摘要: 镁合金通过元素添加可显著拓宽其性能边界与应用场景, 但这一过程往往伴随多种潜在缺陷的引入。本研究旨在深入剖析 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金中组织缺陷的形成机制及其对力学性能的影响, 为优化合金性能提供理论依据。通过合金铸锭熔炼制备、合金板材轧制加工, 并综合运用金相组织观察、室温拉伸力学性能测试、能谱成分分析及扫描电镜微观形貌表征等手段, 系统开展铸态与轧态合金的组织性能研究。实验结果表明, 合金中的缺陷主要为偏析和孔洞, 其中偏析是主导缺陷, 导致晶粒不均、性能降低, 铸态合金抗拉强度 154 MPa、屈服强度 83 MPa、伸长率 5.1%。轧制后缺陷减少, 性能提升, 轧态合金抗拉强度 276 MPa、屈服强度 105 MPa、伸长率 7.1%。

关键词: 镁合金; 稀土; 凝固组织; 缺陷

中图分类号: TG146.2+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)07-0695-07

Influence of Microstructural Defects on the Mechanical Properties of Mg-Y-Ca-Zr Magnesium Alloys

CAI Feier¹, WANG Yijian¹, WANG Wenli²

(1. School of Materials Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The addition of various elements to magnesium alloys has expanded their applications but has resulted in numerous defects. This study delves into the formation mechanism of microstructure defects in Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloys and their impacts on mechanical properties, aiming to optimize alloy performance. A systematic study on the microstructure and properties of the as-cast and as-rolled alloys was carried out through the preparation of alloys by melting and rolling and comprehensive methods such as metallographic structure observation, room-temperature tensile mechanical property testing, energy dispersive spectroscopy composition analysis, and scanning electron microscopy micromorphology characterization. The results indicate that segregation and holes are the main defects, with segregation being the key defect. This phenomenon causes nonuniformity in the grains and performance degradation. The as-cast alloy has a tensile strength of 154 MPa, yield strength of 83 MPa, and elongation of 5.1%. Rolling reduces defects and enhances performance, and the as-rolled alloy exhibits a tensile strength of 276 MPa, yield strength of 105 MPa, and elongation of 7.1%.

Key words: magnesium alloy; rare earths; microstructure; defects

镁合金因其低密度、高比强度及出色的减振特性, 作为一种潜力较大的轻质结构材料, 在航空航天、汽车制造和电子产业等多个领域得到广泛关注^[1-3]。然而镁合金存在一系列缺点, 如耐腐蚀性低、加工工艺复杂、易于氧化和燃烧, 这些缺点极大地限制了镁合金应用范围^[4-6]。

镁合金是密排六方结构, 常温下难以发生塑性变形。提升变形温度能够激活镁合金的锥面滑移和棱柱面滑移, 进而提升镁合金的塑性^[7]。由于镁合金在高温下熔炼和变形期间易燃烧, 因此要开发大变形的镁合金, 需提升镁合金的变形温度, 以保证镁合金在高温下变形而不会产生燃烧。提升镁合金的阻

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 宝玛克(合肥)科技有限公司企业项目

作者简介: 蔡菲儿, 2004年生, 本科生. 研究方向为金属材料、电化学合成. Email: 1768078287@qq.com

通信作者: 王文礼, 1977年生, 博士, 教授. 研究方向为金属材料微观组织控制. Email: wangwl@nwpu.edu.cn

引用格式: 蔡菲儿, 王议坚, 王文礼. 组织缺陷对 Mg-Y-Ca-Zr 镁合金力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 695-701.

CAI F R, WANG Y J, WANG W L. Influence of microstructural defects on the mechanical properties of Mg-Y-Ca-Zr magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 695-701.

燃性能,开发高性能的阻燃镁合金已成为研究热点^[8]。Mg-Re系合金为常见的阻燃镁合金。有研究表明,在同样的实验环境下AZ91合金发生燃烧,而Mg-4Y-3Re-0.6Zr合金并未观测到燃烧的发生,这归功于Y元素在镁合金中起到了阻燃的作用^[9]。You等^[10]研究发现Ca元素能增加镁合金的抗氧化性能。升温后,Mg-Ca合金形成外层为MgO和CaO混合,内层为MgO组成的致密双层保护膜,因此抗氧化性能增强。

Zr元素作为常用的晶粒细化剂,能够成为自发形核的核心,在凝固过程中阻止 α -Mg长大,从而细化晶粒,但Zr元素极易造成元素偏析^[8,11-12]。Zr元素的实际加入量及其在Mg中的溶解度很大程度受到诸如搅拌速度等人为因素以及室内温度和湿度等影响^[13-15]。在镁合金的熔炼过程中Zr元素的加入普遍采用Mg-Zr中间合金的形式^[16-17]。

近年来,研究者围绕多元镁合金体系开展了大量探索。Chen等^[18]系统探究了Ca、Sn、Zn元素添加对Mg-Al基合金在453 K时蠕变性能的影响;Mandal等^[19]发现Mg-Al-Zn-Sn-Sn-Pb合金添加Ag和Zr后抑制了Mg₁₇Al₁₂相的形成并细化了晶粒,提高了机械性能。然而,现有研究多聚焦于单一或二元合金元素对镁合金性能的影响,对Y、Ca、Zr三元协同作用机制及引发的组织缺陷问题仍缺乏系统性研究。

综上所述,微量元素显著影响镁合金的组织与性能,现有研究对Y、Ca、Zr三元协同作用机制及其引发的组织缺陷问题仍缺乏系统性研究。与其他镁合金相比,Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr镁合金具备优良的高温性能与优异的力学性能。然而,其性能提升过程中也衍生出诸多组织缺陷。根据文献[20]报道,Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr镁合金存在明显的组织缺陷。这些缺陷对合金的力学性能产生不良影响。当缺陷减少时,Mg-Y-Ca-Zr合金的力学性能会提升。在高温下,Zr元素会驱动稀土元素Y和Ca元素形成偏析^[21]。

本文通过熔炼和轧制制备Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr合金铸锭及板材,采用EDS分析、金相分析、拉伸试验以及扫描电镜微观形貌表征研究了铸态和轧态Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr合金的元素分布、显微组织、力学性能和断口形貌。通过比较铸态和轧态合金的显微组织和力学性能分析,研究合金中缺陷的形成原因及对合金力学性能的影响,并通过EDS测定元素的含量和分布辅助说明缺陷的形成原因。

1 实验材料与方法

1.1 熔炼

铸锭熔炼的原材料选用纯镁(纯度99.95%,质量分数,下同)、Mg-30%Y中间合金、Mg-15%Ca中间合金及Mg-30%Zr中间合金。首先,将原料置于200℃的井式电阻炉中,以5℃/min的升温速率加热,保温10 min后取出备用。随后,将电阻炉以10℃/min的速率升温至700℃,待温度稳定后,通入由130 mL CO₂和20 mL SF₆组成的混合保护气体,防止合金在熔炼过程中燃烧。当炉内温度进一步稳定升至750℃时,加入纯镁。约30 min后纯镁完全熔化,采用石墨搅拌棒以80 r/min的转速搅拌溶液1~2 min,并及时扒渣;接着加入Mg-15%Ca中间合金,待其熔化后,以同样的转速搅拌1~2 min并扒渣;随后加入Mg-30%Y中间合金,搅拌扒渣后,将电阻炉以5℃/min的速率升温至780℃,并将SF₆流量调至40 mL,温度稳定后加入Mg-30%Zr中间合金。

1.2 轧制

轧制过程采用LG-300-6二辊轧机,轧制前板材厚度为4 mm。轧前将板材置于400℃的CWF1100退火炉中,以3℃/min的升温速率加热至目标温度,保温2 h消除应力。轧制采用全纵轧工艺,起始道次每道次压下量为0.38 mm,当累计压下量达到28%时,后续道次压下量调整为0.24 mm。每道次轧制结束后,立即将板材放入400℃的退火炉中,以5℃/min的降温速率冷却至目标温度,保温15 min消除加工硬化。轧制过程持续进行,直至板材出现边裂或裂纹等缺陷时停止。最终完成七道次轧制,轧后板材厚度为1.9 mm,总压下率达52.5%。轧制结束后,板材在空气中自然冷却,冷却速率约为1~2℃/s。

1.3 试样制备和实验测试

从铸锭中部切取10 mm×10 mm×15 mm立方体以制备铸态金相试样。从轧制后的板材中部切取10 mm×10 mm×1.9 mm立方体试样,并在镶样机中进行热镶。抛光剂使用酒精,腐蚀剂使用10 mL H₂O、5 mL乙酸、92 mL酒精和5.5 g苦味酸。

拉伸试验采用狗骨状试样,使用电火花数控切割机从铸态合金和轧态合金的中部切样。铸态和轧态合金分别切三个平行样以消除实验误差。拉伸试样尺寸和形状如图1所示。使用光学显微镜分析合金的金相显微组织。通过EDS分析合金中元素的分布以及缺陷中元素的含量。使用INSTRON8801电脑伺服控制材料试验机完成铸态和轧态合金的室温拉伸试验,测试合金力学性能,分析缺陷对于合金力学

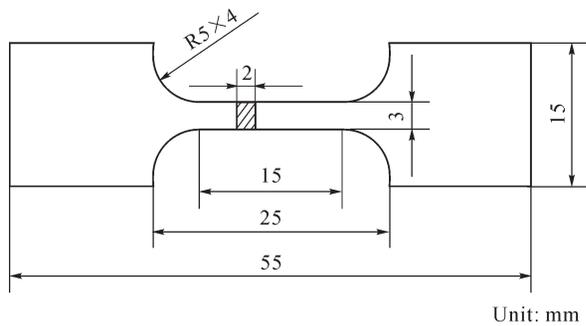


图1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Size of the tensile test sample

性能的影响,拉伸速度为 0.5 mm/min,轧制方向即为拉伸方向。拉伸试验完成后,借助 JMS-6400 钨灯丝扫描电子显微镜对试样断口截面展开观察,分析合金的微观组织和缺陷的位置,并对断裂原因进行探究。

2 实验结果及讨论

2.1 铸态合金缺陷

图 2 为铸态合金显微组织图,可看到铸态合金晶粒尺寸不均匀,晶界呈网状,形状不规整。晶界处析出物不同的黑度说明元素在晶界处的偏析在区域和位置上具有择优选择。

从小晶粒形状可以看出,等轴晶内部也有类似树枝状晶的生长方式。小晶粒的生长将大晶界分成不连续的网格。合金元素的偏析使它们主要呈现深

灰色,此处为元素富集区。大颗粒的横截面呈现出纯镁本来的银白色,此处为元素贫瘠区。晶粒灰度差别明显,晶粒形状极不规则。元素偏析造成晶粒内部元素分布不均匀。晶界处有黑色的析出物,并且分布不均匀,整体是沿着小晶粒的晶界处出现的,尤其是三叉晶界处的析出物更加明显。晶粒内部有两种不同的黑色物质,一种为较小的均匀的点状物质,另一种为不均匀的大块团聚状黑色物质。

Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 铸态镁合金的拉伸试验结果如表 1 所示,铸态合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率都不高,力学性能较低。平均 3 组平行试样的拉伸试验数据结果得出,铸态合金的抗拉强度为 154 MPa,屈服强度 83 MPa,伸长率 5.1%。

表1 铸态Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr合金拉伸性能
Tab.1 Tensile properties of the as-cast Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy

No.	Tensile strength/MPa	Error /MPa	Yield strength/MPa	Error /MPa	Elongation /%	Error /%
1	154	±7	84	±2	5.0	±0.3
2	155	±6	82	±2	5.2	±0.3
3	153	±8	81	±3	5.1	±0.4

2.2 轧态合金缺陷

图 3 为轧态 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金的显微组织。与图 2 中铸态合金显微组织相比,轧态合金晶粒内部亮度较高的区域,仍然存在元素富集现象,但相比铸态,高亮区域减少且元素分布更加均

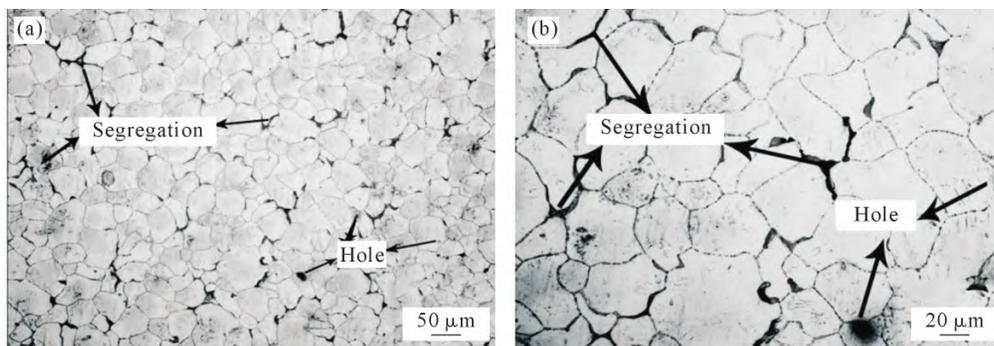


图2 铸态 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金显微组织:(a) 200×; (b) 500×

Fig.2 Microstructure of the as-cast Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy: (a) 200×; (b) 500×

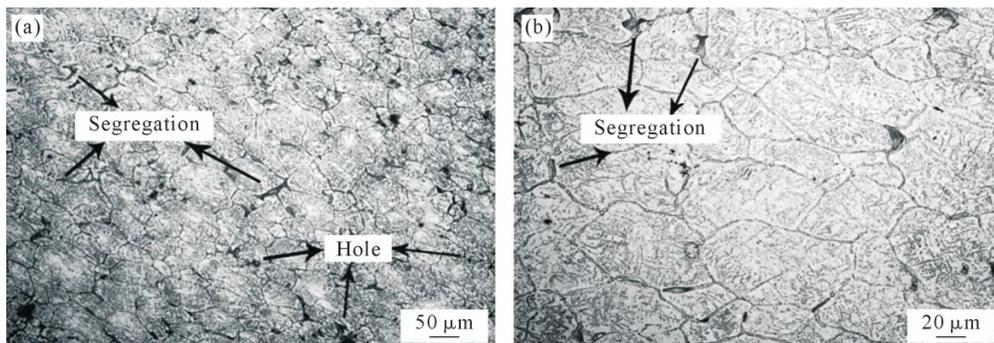


图3 轧态 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 显微组织:(a) 200×; (b) 500×

Fig.3 Microstructure of the as-rolled Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy: (a) 200×; (b) 500×

匀。铸态晶粒中,大多数严重偏聚的合金元素重新溶解至基体内,但晶界处仍存在较多偏聚现象。轧态合金显微组织中,晶界更为连续,晶界处析出物较铸态合金显著减少,且析出物的灰度变化更趋模糊。部分铸态合金中析出物较少的区域,轧制后析出物消失;部分铸态合金中析出物较多的区域,轧制后析出物变小。轧制后的合金晶粒分布更均匀,晶粒内部大块团聚状黑色物质也较铸态合金大幅减少。

由于采用全纵轧制方法,轧制方向的一致性在轧态合金金相显微组织图中得到清晰呈现。对比图 3a 和 b 可见,高倍视野下晶界轮廓更为分明,晶粒内条状物的规律性分布特征显著增强,晶粒中显现出各向异性。

表 2 为轧态 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金的拉伸试验结果。可以看出,轧态合金的力学性能明显得到改善,其强度与塑性均获得显著提升。平均 3 组平行试样的拉伸试验数据得出,轧态合金抗拉强度为 276 MPa,屈服强度为 105 MPa,伸长率 7.1%。抗拉强度提升最为显著,提升了 44%,屈服强度提升了 21%,伸长率提升了 28%。

表2 轧态Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr合金拉伸性能
Tab.2 Tensile properties of the as-rolled Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy

No.	Tensile strength/MPa	Error /MPa	Yield strength/MPa	Error /MPa	Elongation /%	Error /%
1	279	±10	97	±5	6.7	±0.3
2	273	±11	107	±6	7.6	±0.4
3	276	±9	112	±6	6.9	±0.3

通过对铸态和轧态合金显微组织和力学性能的对比,轧态合金显微组织中的缺陷数量少于铸态合金,且其力学性能显著优于铸态合金。

2.3 断口形貌

图 4 为铸态和轧态 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 镁合金拉伸断口形貌。不论是铸态合金还是轧态合金,断口的断裂源均来自缺陷存在区域,且断口缺陷显

著、占比面积大,缺陷区域均已氧化。放大缺陷区域图片可见,缺陷对合金组织造成极大破坏。

图 4 为铸态和轧态合金拉伸断口的宏观形貌。铸态合金拉伸断口截面存在大面积缺陷区域,面积占比达整个截面的 1/3~1/2,断裂源为缺陷区域,且缺陷区域氧化严重。与纯合金相比,缺陷更易被氧化。轧态合金拉伸断口的断裂仍始于缺陷区域,但缺陷占比面积更小。断口部分区域残留的灰色物质少于铸态合金,但聚集程度更显著。

试样的拉伸断口形貌揭示了该合金的裂纹拓展过程和综合的断裂行为。在合金拉伸试样断口处明显观察到断裂时造成的解理面和台阶,断口处有灰色的物质聚集,这证实了晶体特定区域内存在严重的元素偏聚现象。合金的断裂源为大面积缺陷区域,这说明缺陷对合金拉伸性能有决定性作用。

2.4 缺陷的分布和形式分析

图 5 为 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金显微组织的 EDS 分析。从图 5a 中可以看出,Y 和 Ca 元素偏析分布在晶界处。如图 5b 所示,显微组织晶粒内部为纯净的 Mg 基体。而图 5c 则说明 Zr 元素作为弥散质点弥散在基体内。

合金缺陷的 EDS 分析说明在合金的显微组织中,晶界处的黑色物质为合金元素 Y 和 Ca 在晶界处的偏析,其含量显著高于平均分布含量,造成合金显微组织内部分布不均匀。从图 5a 来看,缺陷是由合金本身的元素造成,并无其它元素,说明这些灰色物质是由合金元素偏析产生的元素富集点,并不是其它元素引起的杂质物质。而晶粒内部均匀的小颗粒状黑色物质为均匀弥散在晶粒内部的 Zr,在电镜下亮度明显。

合金显微组织中晶界处的黑色析出物属于偏析缺陷。元素偏析会导致合金元素分布不均,进而影响合金力学性能,且该问题无法通过人工搅拌解决。如图 6 所示,Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 镁合金中还存在另一种缺陷形式,即孔洞。孔洞多分布于晶粒内部,呈

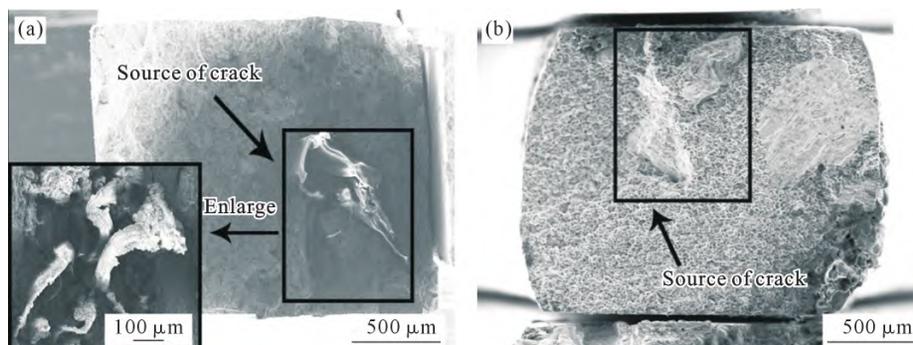


图 4 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金断口 SEM 像:(a) 铸态;(b) 轧态
Fig.4 SEM images showing the fracture of the Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy: (a) as-cast; (b) as-rolled

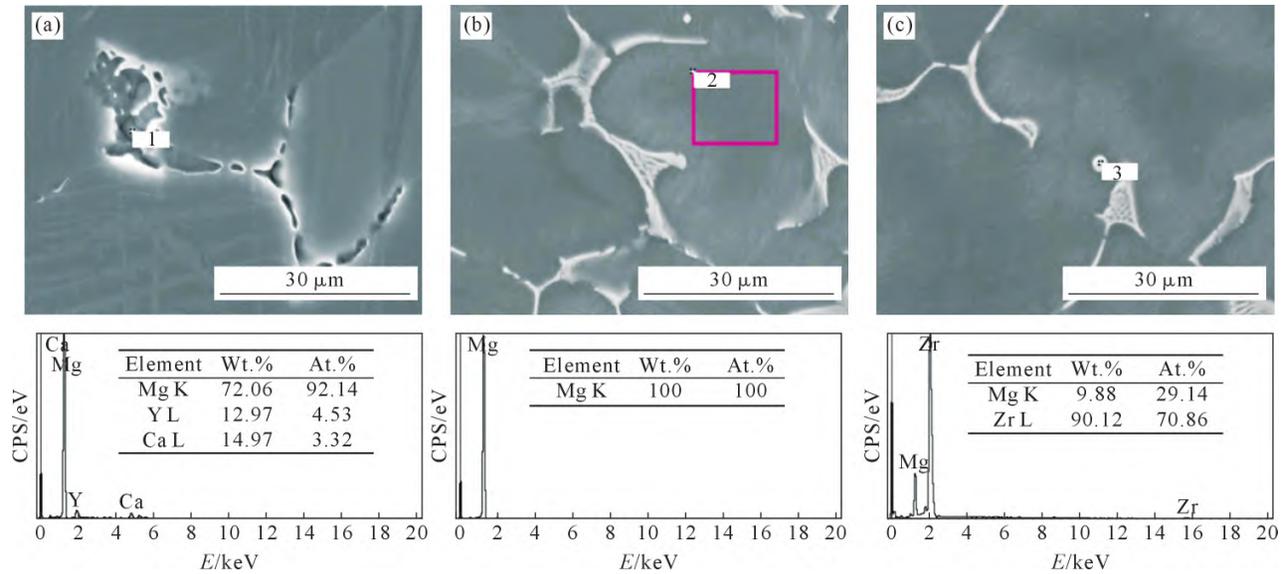


图5 铸态 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金 EDS 分析:(a~c) 点扫结果
Fig.5 EDS analysis of the as-cast Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy: (a~c) point scanning results

大小不一的大块黑色团聚状物质,在电子显微镜聚焦过程中,其并非平面的点,而是明显呈现三维立体结构。

2.5 讨论

从图 2b 和图 5a 可以看出,Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金晶界处聚集的黑色析出物含有合金元素 Y 和 Ca,且沿晶界分布,偏析严重区域覆盖 2~3 个小晶粒,导致合金元素分布不均。

从图 2b 和图 6 中可以看出,部分团聚状黑色物质分布于晶界和晶粒内部,为合金中的孔洞缺陷。对比铸态与轧态合金显微组织图,两类缺陷在轧态组织中均显著减少。缺陷作为裂纹源,使得合金试样从缺陷处萌生裂纹并逐渐扩展至断裂。综合实验结果可初步判断,缺陷已成为影响 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金力学性能的主要原因。而 Hall-Petch 定律基于晶界对塑性变形的阻碍作用,揭示了晶粒尺寸与金属屈服强度间的定量关系,适用于细晶强化机制显著的材料体系。在本研究中,Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金经工艺处理后晶粒尺寸显著减小,满足 Hall-Petch 定律的应用前提。通过该定律,可量化晶粒细化对

合金强度的提升效果,为缺陷与力学性能的关联分析提供理论支撑。根据 Hall-Petch 定律:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

式中, σ_y 为材料屈服极限; σ_0 和 k_y 为 2 个与合金晶体类型相关的常数; d 为晶粒平均直径。

Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 合金是一种新型合金,其 σ_0 和 k_y 2 个常数可通过平行试验中样品 1 和 2 解出。假设铸态镁合金中试样 1 和 2 屈服极限分别为 σ_{y1} 和 σ_{y2} ,晶粒平均直径分别为 d_1 和 d_2 。轧态镁合金的理论抗拉强度假定为 σ_{y3} ,实际抗拉强度假定为 σ_{y3}' ,晶粒平均尺寸假定为 d_0 ,常数 σ_0 和 k_y 不变。计算所需要的实验数据和最终计算结果列于表 3 中。

如表 2 所示,实验测得 σ_{y3}' 为 105 MPa,即 $\sigma_{y3}' - \sigma_{y3} > 0$,因此细晶强化不是提高强度的全部原因。在轧制过程中,为了避免加工硬化的影响,将合金放入退火炉中以消除加工硬化。实验结果及上述计算结果证明缺陷的减少可提高 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 镁合金的力学性能。

综上所述,Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 中存在两种缺

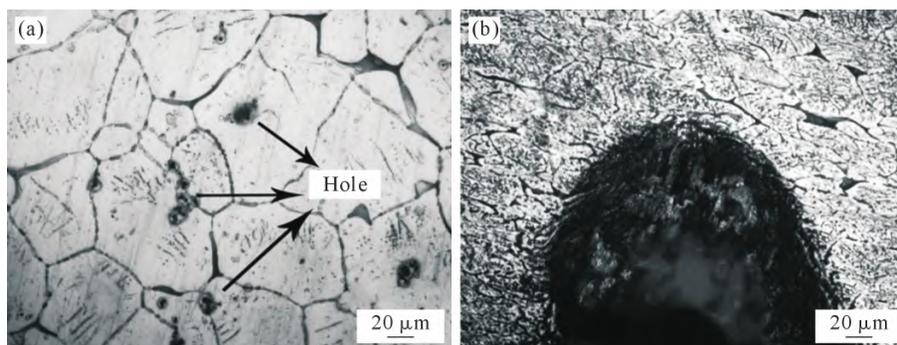


图6 合金金相组织中的缺陷:(a~b) 孔洞
Fig.6 Defects in the metallographic structure of the alloy: (a~b) hole

表3 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr合金实验数据和计算结果
Tab.3 Experimental data and calculated results for the
Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr alloy

No.	σ_f /MPa	d /mm	σ_0 /MPa	k_y
1	84	20	54	133
2	82	23	54	133
3	87	17	54	133

陷,显著影响了合金的力学性能。控制缺陷的产生可提升 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 阻燃镁合金产品的稳定性和力学性能。为改善缺陷并实现该镁合金的性能提升,仍需开展更多理论研究与技术改进。

3 结论

(1)显微组织中存在的缺陷会对 Mg-3.5Y-0.9Ca-0.6Zr 阻燃镁合金产生影响,导致合金力学性能下降。这些缺陷主要表现为晶界处的黑点团块和晶粒内不均匀的团状黑色物质。显著降低了合金力学性能,铸态合金抗拉强度为 154 MPa,屈服强度 83 MPa,伸长率 5.1%;轧态合金抗拉强度提升至 276 MPa,屈服强度提升至 105 MPa,伸长率提升至 7.1%,轧态合金因缺陷减少力学性能明显优于铸态合金。

(2)合金中缺陷主要有两种形式:①晶界处的黑点团块,为 Y 和 Ca 元素在晶界处的偏析,以及添加 Zr 元素导致的部分区域元素富集,元素偏析是主要缺陷;②晶粒内的不均匀团状黑色物质,为合金中的孔隙,是在熔融过程中熔液产生的杂质和难熔物被氩气吹出后留下的空位,部分在浇注后保留。

参考文献:

- BAI J Y, YANG Y, WEN C, CHEN J, ZHOU G, JIANG B, PENG X D, PAN F S. Applications of magnesium alloys for aerospace: A review [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(10): 3609-3619.
- SHE J, CHEN J, XIONG X M, YANG Y, PENG X D, CHEN D L, PAN F S. Research advances of magnesium and magnesium alloys globally in 2023 [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12(9): 3441-3475
- YIN Z Y, LE Q C, CHEN X R, JIA Y H. The grain refinement of Mg alloy subjected to dual-frequency ultrasonic melt treatment: A physical and numerical simulation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 1554-1569.
- 曾小勤. 阻燃镁合金及其阻燃机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
ZENG X Q. Study on ignition proof magnesium alloy and its ignition proof principle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2000.
- QIN L, DING J, ZHAO W M, FANG Z. Oxidation behavior and surface tension of Mg-1.2Ca alloy with Ce addition[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(1): 23-27.
- CHEN X H, GENG Y X, PAN F S. Research progress in magnesium alloys as functional materials[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(9): 2269-2274.
- 王博, 刘正, 毛萍莉, 王志, 王峰. Sn 对 Mg-Al-Ca 系合金热裂敏感性的影响[J]. *稀有金属*, 2016, 40(7): 647-653.
WANG B, LIU Z, MAO P L, WANG Z, WANG F. Hot tearing susceptibility of Mg-Al-Ca alloy with different Sn additions[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2016, 40(7): 647-653.
- DONG H W, WANG L D, WU Y M, WANG L M. Preparation and characterization of Mg-6Li and Mg-6Li-1Y alloys[J]. *Journal of Rare Earths*, 2011, 29(7): 645-649.
- RAVIKUMAR N V, BLANDIN J J, SUÉRY M, GROSJEAN E. Effect of alloying elements on the ignition resistance of magnesium alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49(3): 225-230.
- YOU B S, PARK W W, CHUNG I S. The effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 42(11): 1089-1094.
- 顾侃, 肖旅, 曾小勤, 陈彬. 航空航天用高强度 Mg-RE 系合金的研究进展[J]. *上海航天(中英文)*, 2022, 39(6): 84-95.
GU K, XIAO L, ZENG X Q, CHEN B. Recent development of high strength Mg-RE alloys for aerospace application[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2022, 39(6): 84-95.
- WANG F J, HUANG Y F, LI W, XUE M S, OU J F. Thin-film transistors with sol-gel deposited $Mg_{0.1}Zn_{0.9}O$ films as active channel layer[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 520(1): 519-522.
- LYU Y Z, WANG Q D, ZENG X Q, ZHU Y P, DING W J. Behavior of Mg-6Al-xSi alloys during solution heat treatment at 420 °C[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 301(2): 255-258.
- FAN J F, CHEN Z Y, YANG W D, FANG S, XU B S. Effect of yttrium, calcium and zirconium on ignition-proof principle and mechanical properties of magnesium alloys [J]. *Journal of Rare Earths*, 2012, 30(1): 74-78.
- WANG J, ZHU X R, WANG R, XU Y D, NIE J J, LING G P. Microstructure and mechanical properties of Mg-xY-1.5MM-0.4Zr alloys[J]. *Journal of Rare Earths*, 2011, 29(5): 454-459.
- QIAN M, ZHENG L, GRAHAM D, FROST M T, STJOHN D H. Settling of undissolved zirconium particles in pure magnesium melts[J]. *Journal of Light Metals*, 2001, 1(3): 157-165.
- ZENG X Q, WANG Q D, LYU Y Z, DING W J, LU C, ZHU Y P, ZHAI C Q, XU X P. Study on ignition proof magnesium alloy with beryllium and rare earth additions[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(5): 403-409.
- CHEN T, HU Q H, HU S J, WANG C Y, ZHANG Y X, ZHANG Z R, LI S Q, YANG X Y. Tracing the effects of calcium, stannum, and zinc additions on the creep resistance of Mg-Al-based alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2023, 54: 2730-2743.
- MANDAL D, MURMU L, CHOUDHARY C, SINGH G, SAHOO K L. Influence of alloying elements and grain refiner on microstructure, mechanical and wear properties of Mg-Al-Zn alloys[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2019, 58(2): 241-251.
- 韩刚. 新型镁合金 Mg-3.5Y-0.8Ca-0.5Zr 力学性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.

HAN G. Research of the mechanical property of new magnesium alloy Mg-3.5Y-0.8Ca-0.5Zr [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.

treatment on microstructural and mechanical properties of cast magnesium alloys [J]. Materials Transactions, 2009, 50 (2): 401-408.

[21] CHEN Y J, HSU W N, SHIH J R. The effect of ultrasonic

(责任编辑:杨浩雪)