

Mg-Gd 系合金中微量元素作用机制及其研究进展

陈 柯^{1,2} 李泽华^{1,2} 安小鹏³ 宋子杨^{1,2} 张志龙⁴ 鲍志鹏⁴ 郭志生⁵ 闫 靖⁶

[1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 沈阳 110022; 2. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 沈阳 110022; 3. 新乡航空工业(集团)有限公司, 新乡 453049; 4. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002; 5. 北京新风航天装备有限公司, 北京 100854; 6. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130022]

摘 要 Mg-Gd 系合金因其显著的时效析出强化效应及优异的室温与高温力学性能而备受关注。系统论述了合金元素对 Mg-Gd 系合金组织与性能的影响机制。稀土元素的添加不仅显著提升了合金的力学性能, 还增强了其高温稳定性和抗蠕变性能; 部分稀土元素通过促进致密氧化膜的形成, 有效改善了合金的耐腐蚀性能。在非稀土元素中, Zn 与 Gd 的协同作用可促进时效硬化反应, 经热处理后析出更多细小强化相; Al 元素通过形成 $Mg_{17}Al_{12}$ 等强化相来提升合金的强度; Mn 元素则通过细化晶粒改善合金的力学性能和加工性能。得益于其优异的高温性能保持能力, Mg-Gd 系合金在航空航天、汽车发动机等高温部件领域展现出广阔的应用前景。

关键词 Mg-Gd 系合金; 显微组织; 力学性能; 稀土元素; 热处理

中图分类号 TG27; TG146.22

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250150

Action Mechanisms and Research Progress in Trace Elements in Mg-Gd Series Alloys

CHEN Ke^{1,2}, LI Zehua^{1,2}, AN Xiaopeng³, SONG Ziyang^{1,2}, ZHANG Zhilong⁴, BAO Zhipeng⁴, GUO Zhisheng⁵,
YAN Jing⁶

[1. Shenyang Research Institute of Foundry, China National Machinery Industry Corporation, Shenyang 110022; 2. National Key Laboratory of High-end Equipment Casting Technology, Shenyang 110022; 3. Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Xinxiang, 453049; 4. AECC Hunan Aviation powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002; 5. Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd., Beijing 100854; 6. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun, 130022]

Abstract: Mg-Gd series alloys are paid much attention due to the notable age-hardening precipitation effects and excellent mechanical properties at both room and elevated temperatures. The influence mechanisms of alloying elements on microstructure and properties of Mg-Gd series alloys were reviewed. The addition of rare earth elements not only significantly enhances the mechanical properties of alloy, but also improves high-temperature stability and creep resistance. Certain rare earth elements effectively improve the corrosion resistance by promoting the formation of a dense oxide film. Among non-rare earth elements, synergy of Zn and Gd facilitates age-hardening reactions, resulting in the precipitation of more fine strengthening phases after heat treatment. Al addition enhances strength of alloy through the formation of $Mg_{17}Al_{12}$ strengthening phases, while Mn refines the grain structure to enhance mechanical and processing properties. Owing to the excellent high-temperature performance retention, Mg-Gd series alloys exhibit broad application prospects in high-temperature components for aerospace, automotive engines, and other fields.

Key Words: Mg-Gd Series Alloys, Microstructure, Mechanical Properties, Rare Earth Elements, Heat Treatment

镁合金作为轻质的金属结构材料, 因其优异的比强度、比刚度、电磁屏蔽性、减震性、散热性以及良好的加工铸造性能, 在汽车制造和航空航天等领域展现出广阔的应用前景^[1-3]。我国丰富的镁资源储备为镁合金的广泛应用提供了有利条件, 这不仅有助于缓解

Fe、Al 等传统金属材料的资源短缺问题, 还可显著减少环境污染^[4]。然而, 镁合金固有的密排六方(hcp)结构导致其室温下滑移系较少, 带来了一系列应用瓶颈^[5]。首先, 耐腐蚀性能不足限制了其在腐蚀环境中的应用; 其次, 室温加工性能较差、滑移系较少不利于

收稿日期: 2025-04-09; 修订日期: 2025-05-23

第一作者: 陈柯, 男, 2001 年出生, 硕士研究生, E-mail: 2581948782@qq.com

引用格式: 陈柯, 李泽华, 安小鹏, 等. Mg-Gd 系合金中微量元素作用机制及其研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 657-663.

CHEN K, LI Z H, AN X P, et al. Action mechanisms and research progress in trace elements in Mg-Gd series alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 657-663.

合金的塑性变形与冷加工,而固态成形需要高温条件,增加了生产成本并降低了效率^[6-10]。此外,其室温及高温下的力学性能、耐热性和抗蠕变性能仍需进一步提升^[5-9]。这些因素严重限制了镁合金在工程领域的广泛应用。

镁合金的强化机制主要包括固溶强化、细晶强化、弥散强化和时效强化^[10-12],其中,添加稀土元素是提升镁合金性能的有效途径。稀土元素的添加主要通过以下机制提升 Mg-Gd 系合金的综合性能:①晶粒细化 稀土元素通过抑制晶界迁移和促进异质形核,显著细化合金晶粒,从而提高合金的强度和塑性。②第二相强化 稀土元素与基体反应形成热稳定性高的金属间化合物相,可有效钉扎位错和晶界运动,提升合金强度。③热稳定性提升 稀土元素的添加可显著提高合金的再结晶温度,抑制高温条件下的晶粒长大,改善高温性能。④铸造性能改善 稀土元素可降低熔体表面张力,提高熔体流动性,从而减少铸造缺陷,改善铸件质量。综上,通过优化稀土元素的种类和含量,并结合适当的热处理工艺和形变加工技术,可显著提升 Mg-Gd 系合金的综合性能。

因此,研究者正致力于通过合金化、热处理和表面处理等技术手段改善镁合金的综合性能,以期突破现有局限,拓展其应用领域,为工程材料领域带来新的发展机遇。

1 Mg-Gd 二元合金

钆(Gd)作为重要稀土元素,兼具银白色金属光泽、室温铁磁性^[6-7]及优异的高温特性(熔点为 1 313 ℃,沸点为 3 273 ℃,密度为 7.901 g/cm³),其在元素周期表中处于轻稀土(La-Eu)与重稀土(Tb-Lu,Y)的分界点^[9],凭借大的热中子俘获截面,成为核工业控制/防护材料的核心组分,其应用已拓展至工业、医疗等领域^[13-19]。Mg-Gd 合金因显著时效强化效应备受关注^[20-21]。图 1 为 Mg-Gd 二元相图。可以看出,Gd 在 Mg 基体中固溶度呈现强温度依赖性:548 ℃时达 23.49% (质量分数,下同),200 ℃骤降至 3.82%^[22-23],此特性奠定了其作为典型时效强化体系的理论基础^[24]。较大原子半径的 Gd 倾向于晶界偏聚,通过降低弹性应变能^[25-26]和钉扎晶界迁移^[27-30]协同调控微观组织。特别地,Gd 偏聚可弱化镁合金变形织构强度,同时诱导稀土织构形成,实现织构演变的双重调控^[31-32]。

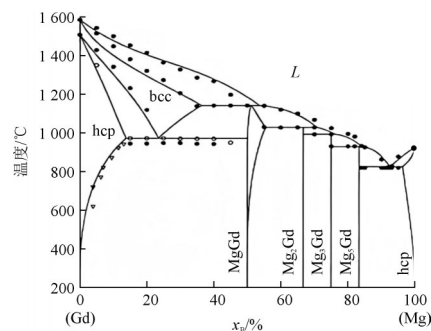


图 1 Mg-Gd 二元相图^[9]

Fig.1 Mg-Gd binary phase diagram

2 稀土复合添加对 Mg-Gd 合金组织及力学性能影响

2.1 Mg-RE 系合金的强化机制与性能优化

Mg-RE 系合金是开发高性能镁合金的重要方向,其强化效果与稀土元素(RE)在镁基体中的固溶度密切相关。研究表明,Nd、Y、Gd 在镁中的固溶度依次增大(表 1),其中 Gd 的固溶度最高,可达 23.5%^[33-34]。

表 1 稀土元素在镁中固溶度

Tab.1 Solid solution of RE element in Mg alloy

元素	原子半径/nm	固溶度/%	共晶温度/℃
Sc	0.164 1	25.9	—
Y	0.180 3	12.6	565
La	0.188 7	0.80	613
Ce	0.182 4	1.6	560
Pr	0.182 1	1.7	575
Nd	0.182 8	3.6	548
Pm	0.181 1	—	550
Sm	0.180 4	5.8	542
Eu	0.204 2	—	571
Gd	0.180 3	23.5	548
Tb	0.178 3	24.0	559
Dy	0.177 4	25.8	559
Ho	0.176 6	28.0	561
Er	0.175 7	32.7	565
Tm	0.174 6	31.8	584
Yb	0.194 0	3.3	592
Lu	0.173 5	41.0	616

2.1.1 Mg-Gd-Zr 系合金

郑天旭^[35]研究发现,稀土元素 Gd 通过界面偏聚行为降低晶界迁移率,而 Zr 元素则发挥晶界钉扎效应,二者的协同作用显著提高了晶粒形核密度并抑制晶粒粗化趋势,从而有效改善其力学性能。肖阳等^[36]通过热挤压结合 T5 峰值时效工艺(Ext-T5 态)成功制备了 Mg-15Gd-0.6Zr 合金。研究发现,经 Ext-T5 处理的合

金表现出显著的时效硬化效应,其峰值硬度达到最高值(见图2,其中 t 为时效时间)。值得注意的是,该合金在高温条件下同时具备优异的抗拉强度和伸长率,这种独特的强度-塑性协同效应使其在高温结构材料领域展现出良好的应用前景。

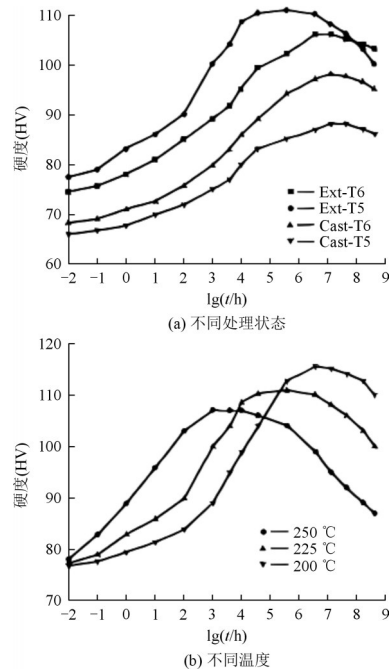


图2 Mg-15Gd-0.6Zr合金的时效硬化曲线^[36]

Fig.2 Aging hardening curves of Mg-15Gd-0.6Zr alloy^[36]

罗时峰^[37]用同步辐射X射线衍射发现,Mg-10Gd和Mg-10Gd-0.4Zr合金熔体呈现长程无序、短程有序结构。当向Mg-10Gd熔体中加入0.4Zr时,熔体中Mg-Mg原子对的距离将会增大(见表2),而周围的Mg和Gd原子将向该原子对移动,致使Mg原子周围的配位数和Mg-Mg-Mg键角增大。

表2 添加Zr对合金影响

Tab.2 Effects of Zr addition on Mg alloy

合金体系	熔体结构特征	Zr添加影响
Mg-10Gd	长程无序、短程有序结构, Mg-Mg原子间距为0.311 nm,最近邻原子数为13.08	无
Mg-10Gd-0.4Zr	Mg-Mg原子间距增至0.322 nm,最近邻原子数增至13.28, Mg-Mg-Mg键角上升至53.60°	Zr诱导Mg、Gd原子向Mg-Mg键周围聚集,协调结构畸变,优化熔体短程有序性

严安庆^[38]观察了不同热处理态Mg-12Gd-3Y-0.6Zr镁合金在质量分数为3.5%的NaCl溶液浸泡2 d后的宏观腐蚀形貌,以及采用析氢法测试耐腐蚀速率,将不同热处理态镁合金的耐腐蚀性能作比较,得出T4态耐蚀性显著优于其他状态,归因于固溶处理消除第二相微电偶效应,形成致密腐蚀产物层,见表3。

表3 不同热处理状态的镁合金的耐腐蚀性能

Tab.3 Corrosion resistance of Mg alloy under different heat

状态	宏观腐蚀特征	微观腐蚀特征
F(挤压态)	局部深腐蚀坑	疏松腐蚀产物,无保护性
T4(固溶)	表面基本未腐蚀	致密腐蚀产物层,有效阻挡腐蚀
T5(时效)	边缘深坑+大量腐蚀产物	方块相割裂基体,产物疏松
T6(固溶+时效)	类似T5处理后但程度略轻	析出相聚集,加速局部腐蚀

2.1.2 Mg-Gd-Y系合金

Y元素在镁合金中具有较高的固溶度(12.5%),且其密度较低、成本较Gd更具优势。Gd与Y的协同作用可形成高熔点第二相,在高温下有效钉扎位错和晶界运动,显著提升合金的高温力学性能^[39-40]。于金程等^[40]通过分离式霍普金森压杆(SHTB)试验研究发现,Mg-Gd-Y合金在高应变速率下表现出连续屈服现象和正应变速率效应,并且在高应变速率下,位错增殖速率超过动态回复能力,形成高密度位错缠结结构,导致显著的加工硬化效应。同时,稀土元素偏聚于晶界形成GdY₂Mg₃相,抑制动态再结晶进程,使塑性变形更依赖位错滑移而非晶界协调机制,因此断口呈现解理断裂特征。

张奇^[41]基于Mg-Gd-Y-Mn合金体系,通过调整Y含量(1%~3%,质量分数,下同)及添加Zn元素(1%),结合固溶[(460~520) °C×(4~24) h]和时效[(200~250) °C×24 h]热处理,系统探究了合金显微组织演变规律及力学性能响应。发现2%的Y含量为最优值,平衡第二相数量与晶粒尺寸,避免过量Y导致的脆性相聚集。Zn添加虽略微降低强度,但显著提升伸长率(提高了32%),适合对韧性要求高的场景(见表4),通过调控Y含量(2%为临界点)及引入Zn元素,结合长时固溶+中温时效,可实现Mg-Gd-Y-Mn合金强度与塑性的协同优化。杨庆波等^[42]针对GW94镁合金(Mg-9Gd-4Y-0.6Zr)的成分优化进行分析,发现当Gd含量提升至9%时,合金的室温抗拉强度和屈服强度分别达到213.7 MPa和156 MPa,但因粗大Mg₂₄Gd₅相沿晶界连续析出,导致伸长率骤降至1.29%(见图3)。

HE S M等^[43]基于Mg-10Gd-2Y-0.5Zr合金体系,

表4 Zn对于镁合金性能影响

Tab.4 Effects of Zn on properties of Mg alloy

参数	最佳时效抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	强化机制
不含Zn合金(2%的Y)	228.4	186.5	7.4	弥散析出相+细晶强化
含Zn合金(2%的Y)	212.7	189.6	9.8	多相共晶+伸长率优化

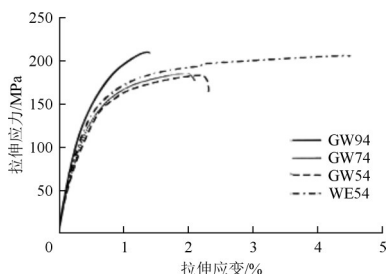


图3 4种铸态合金的室温拉伸应力-应变曲线^[42]
Fig.3 Stress-strain curves of as-cast alloys at room temperature^[42]

通过差示扫描量热(DSC)、透射电镜(TEM)及力学性能测试,揭示了时效热处理过程中 β -Mg₂(Gd,Y)强化相的相变动力学特征及其与基体的微观作用机制。研究表明,在200~300℃时效温度范围内, β' 亚稳相呈现纳米级弥散分布形态,通过析出相与基体间的共格强化效应,促使合金屈服强度显著提升至210 MPa。基于量化分析,该研究构建了时效温度-析出相形貌特征-力学性能响应之间的定量构效关系模型,为调控稀土镁合金强化效应提供了参考。靳学泽^[44]研究发现,在350~500℃范围内,Mg-6Gd-3Y-0.5Zn-0.5Zr合金在相同应变速率下,随着温度升高,合金的流变应力显著下降,在相同温度下,应变速率增大会导致流变应力上升。这是因为在高温下,动态回复(DRV)和动态再结晶(DRX)更容易发生,软化机制增强,抵消了加工硬化效应。

邓代亿^[45]针对Mg-9.5Gd-1Y-0.5Zn-0.5Zr铸造合金,设计单级固溶(480℃×24 h)、双级固溶(490℃×12 h+520℃×12 h)与多级时效工艺(180℃×204 h、200℃×72 h+220℃×36 h),借助场发射扫描电镜(FE-SEM)和电子背散射衍射(EBSD)定量分析了长周期堆垛有序(LPSO)相、 β -Mg₂Gd基体析出相、 γ' -Mg₁₂(Gd,Y)强化相及Zn-Zr纳米团簇的演变规律,见表5~表7。发现通过“析出强化-晶界修饰-位错增殖”协同机制,实现室温力学性能的突破性提升,其中抗拉强度(σ_b)从铸态的254 MPa增至382 MPa,伸长率(δ)从7.9%提升至17.2%,实现了镁合金强度塑性协同提升。

表5 温度与时间对镁合金中组织的影响

Tab.5 Effect of temperature and time on microstructure of Mg alloy

固溶条件	显微组织演变	力学性能变化
480℃×12 h	晶界鱼骨状Mg ₅ (Gd,Y,Zn)相消失,18R-LPSO→14H-LPSO(层状+块状),晶内Zn-Zr相形成	塑性最优, δ =29%
500℃×12 h	LPSO相部分溶解,晶粒粗化至35.1 μm,Zn-Zr相长大,GdY相析出	综合性能最佳, σ_b =284 MPa, δ =19.5%
520℃×12 h	晶界LPSO完全消失,晶内析出薄片状14H-LPSO,晶粒显著粗化(45.5 μm)	强度降低,因晶粒粗化与相分布劣化

表6 时效工艺优化对镁合金组织和性能的影响

Tab.6 Effects of aging process optimization on microstructure and properties of Mg alloy

时效条件	力学性能	组织特征
480℃×12 h+200℃×48 h	峰值性能: σ_b =382 MPa, $\sigma_{0.2}$ =255 MPa, δ =14.5%	β' 相(40.2 nm)与晶界块状LPSO协同强化,细小 γ' 相弥散析出
480℃×12 h+200℃×180 h	第二峰性能: σ_b =367 MPa, $\sigma_{0.2}$ =239 MPa, δ =17.2%	β' 相粗化(58.8 nm),14H-LPSO薄片与 γ' 相增多,长链 $\beta'+\beta_1$ 提升塑性

表7 双峰时效机制解析

Tab.7 Mechanism analysis of double peak ageing

时效阶段	强化相与机制	性能贡献
第1峰	β' 相(共格棱柱面析出)+晶界块状LPSO相	高强度:阻碍基面滑移
第2峰	γ' 相(基面析出)+晶内薄片14H-LPSO+ $\beta'+\beta_1$ 相链状结构	高塑性:协调变形
协同效应	三维分布的 β' 相链与LPSO/ γ' 相形成互锁结构,抑制裂纹扩展	强韧化平衡

焦迪等^[46]研究了热处理工艺对Mg-Gd-Y合金显微组织及腐蚀行为的影响机制。通过对比分析铸态、固溶态和时效态3种热处理状态下合金在3.5%NaCl溶液中的腐蚀行为,采用扫描电镜(SEM)结合能谱分析(EDS)对腐蚀前后的微观组织进行了系统表征,并通过静态浸泡试验定量测定了合金的腐蚀速率。结果表明,合金在3.5%NaCl溶液中呈现典型的局部腐蚀特征。腐蚀过程遵循以下演变规律,初始阶段优先在Zr相周边发生腐蚀,随后沿晶界Mg-RE相扩展,并伴随基体内部点蚀的形成(见表8)。组织演变观察表明,铸态合金晶界处存在大量Mg-RE共晶组织。固溶处理后,大部分的第二相粒子溶解进入基体,组织均匀性显著提升,合金的耐蚀性能得到改善。时效处理后,晶界处析出纳米级第二相颗粒,与基体形成微电偶腐蚀,导致耐蚀性能较固溶态下降。

表8 不同状态下镁合金腐蚀速率对比

Tab.8 Corrosion rate comparison of magnesium alloy under varied conditions

合金状态	腐蚀速率排序	关键原因
铸态	最高	晶界处大量第二相(Mg-Zn-RE、富Zr相)与 α -Mg基体形成微电偶,加速局部腐蚀
固溶态	最低	共晶相溶解,晶界强化,减少微电池效应,腐蚀趋于均匀
时效态	介于铸态与固溶态之间	晶界析出细小弥散相(如 β' 相),形成新的微电偶,但整体仍优于铸态

2.1.3 Mg-Gd-Nd系合金

不同稀土元素间的协同作用可显著改变时效析出动力学行为,促进新型三元析出相的形成,从而有效提高时效强化效果^[47]。李军舰^[48]研究发现,在Mg-9Gd-0.5Zr基合金体系中,Nd元素的添加量对材料微观组织

演变与力学性能提升具有显著调控作用。随着 Nd 含量增加,合金凝固组织呈现梯度细化的特征,平均晶粒尺寸减小,这种微观结构优化直接导致材料屈服强度与抗拉强度显著提升。稀土元素 Nd 通过改变合金体系固溶度积和界面能,有效抑制晶粒异常长大,同时诱发细晶强化与第二相强化的协同效应。该发现为通过稀土组元设计实现镁合金强塑性协同优化提供了新的调控维度。吴旻^[49]研究了形变工艺和热处理对 Mg-Gd-Nd 系合金组织性能的影响,发现 GN63 合金的力学性能显著优于 G9 合金,该强化效应源于两方面:一是 Nd 原子在晶界偏聚形成“溶质拖曳”效应,抑制晶粒长大;二是纳米级 $\text{Mg}_{12}(\text{Gd}, \text{Nd})$ 相通过共格析出产生的错配应力场,有效阻碍位错运动。

2.1.4 稀土元素对合金性能的影响

Y 元素凭借高固溶度(12.5%)和低成本优势,与 Gd 协同形成高熔点第二相,有效钉扎位错和晶界,显著提升合金的高温性能。Y 含量存在临界值,过量会导致脆性相聚集,而 Zn 的添加可优化塑性。通过固溶-时效热处理,可调控 LPSO 相、 β' 相和 γ' 相的分布,实现强度-塑性协同提升。此外, Mg-Gd-Nd/Zr 系合金中, Nd 和 Zr 的添加进一步细化晶粒并优化熔体结构,增强时效强化效果。

2.2 非稀土元素对 Mg-Gd 系合金组织与性能的影响

2.2.1 Al、Ca 元素的影响

李武钊等^[50]系统研究了 Al 和 Ca 含量对 Mg-10Gd- $x\text{Al}-y\text{Ca}$ ($x+y=2$) 合金力学性能的影响。发现随着 Ca 对 Al 的替代量增加,合金中 $(\text{Mg}, \text{Al})_3\text{Gd}$ 三元析出相的形貌呈现显著演变,即当 Ca 含量小于 0.5% 时,该相由粗大花瓣状逐渐转变为均匀分布的短棒状及颗粒状。而当 Ca 含量超过 0.5% 时,晶界处开始析出尺寸达 10 μm 以上的粗大 Mg_2Ca 共晶相。当 Ca 含量为 0.5% 时, Ca 元素在 α -Mg 基体中的固溶度达到极限值(0.48%),产生显著的晶格畸变强化,使合金室温抗拉强度达 210.3 MPa,伸长率为 15.6%,此时断裂模式以穿晶韧性断裂为主,断口可见大量深韧窝。研究揭示了 Ca 元素在 Mg-Gd-Al 合金体系中的临界作用浓度,为低成本高强韧镁合金的成分设计提供了关键参数窗口。

2.2.2 Mn 元素的影响

古东懂等^[51]研究了 Mn 元素和退火工艺对挤压态 Mg-2Gd 合金微观组织及力学性能的影响。研究表明, Mn 元素在 350 $^{\circ}\text{C}$ 退火时促进晶粒均匀长大,而在 400 $^{\circ}\text{C}$ 时则加速晶粒异常长大。Mn 元素的加入导致合

金的 Hall-Petch 系数(K_H 值)显著减小,削弱了晶粒尺寸对硬度的影响,同时加速了残余应力的消除。当退火工艺为 350 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$ 时, Mg-2Gd-0.8Mn 合金的伸长率达到 32.39%,表现出最佳塑性(见图 4)。

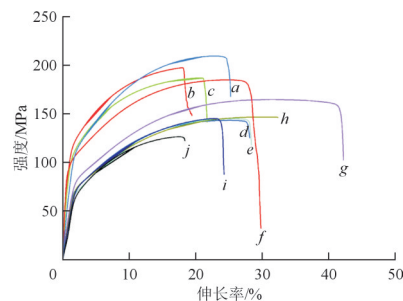


图4 不同退火工艺下 Mg-2Gd(-0.8Mn)合金试样的室温应力-应变曲线^[51](a. Mg-2Gd, 挤压态; b. Mg-2Gd, 350 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$; c. Mg-2Gd, 350 $^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$; d. Mg-2Gd, 400 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$; e. Mg-2Gd, 400 $^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$; f. Mg-2Gd-0.8Mn, 挤压态; g. Mg-2Gd-0.8Mn, 350 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$; h. Mg-2Gd-0.8Mn, 350 $^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$; i. Mg-2Gd-0.8Mn, 400 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$; j. Mg-2Gd-0.8Mn, 400 $^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$)

Fig.4 Room temperature strain-stress curves of Mg-2Gd (-0.8Mn) alloys under different annealing processes^[51]

2.2.3 Zn 元素的影响

袁淑等^[52]系统研究了 Zn 元素对 Mg-10Gd-2Y-0.5Zr 合金显微组织和力学性能的影响。发现添加 0.5%~1.5% 的 Zn 后,合金中形成 $\text{Mg}_5(\text{Gd}, \text{Y}, \text{Zn})$ 、 $\text{Mg}_{24}(\text{Y}, \text{Gd}, \text{Zn})_5$ 及 $\text{Mg}_{12}(\text{Gd}, \text{Y})\text{Zn}$ 等新相。当 Zn 含量为 0.5% 时,合金综合力学性能最优,其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 197 MPa、160 MPa 和 4.37%。然而,当 Zn 含量超过 1.0% 后,过多的第二相导致力学性能显著下降。

孟姣等^[53]研究了 Zn 含量对 Mg-11Gd-(1, 1.5, 2) Zn 合金组织性能的影响。结果表明,随着 Zn 含量增加, $(\text{Mg}, \text{Zn})_3\text{Gd}$ 相和 14H 型 LPSO 相的体积分数均增加。常温下,合金抗拉强度随 Zn 含量增加而降低,其中 Mg-11Gd-1Zn 合金在 T6 处理后呈现最高的强度和良好的塑性。然而,当 Zn 含量较高时, T6 处理效果不如 T5 处理的。此外,随 Zn 含量增加,合金在 200 $^{\circ}\text{C}$ 下的抗蠕变性能略有下降,但仍优于商用 WE54 合金。

贾森森等^[54]利用同步辐射原位成像技术,实时动态观测研究了 Mg-Gd-Zn 系合金的凝固过程,并对不同 Zn 含量的 Mg-Gd 系合金的枝晶生长、二次枝晶臂间距及尖端半径进行半定量研究。发现随 Zn 含量增加,生长速率显著加快,表明 Zn 通过改变固液界面能或溶质扩散系数,促进枝晶快速生长,1% 的 Zn 更有利于形成粗化二次臂+大尖端半径的枝晶结构,可改善合金塑性,2% 的 Zn 虽加速生长,但可能导致微观组织不均匀性增加(见表 9)。

表 9 Zn 含量的优化作用与机制

Tab.9 Optimization effect and mechanism of Zn content

$w(\text{Zn})/\%$	枝晶生长 速率	二次臂间 距(λ_2)	尖端半径 (R)	潜在机制
0	最慢(V_0)	中等(λ_0)	最小(R_0)	纯 Gd 主导,溶质扩散受限
1	中等(V_1)	最大(λ_1)	最大(R_1)	Zn 优化溶质场,延缓枝晶粗化
2	最快(V_2)	最小(λ_2)	中等(R_2)	高 Zn 加速凝固,但导致局部偏析

精确控制合金元素含量对优化 Mg-Gd 系合金性能至关重要。未来研究可进一步探索元素添加的“黄金比例”,并结合先进表征技术(如 APT、HRTEM 等)和热处理工艺优化,深入理解元素作用机制,从而开发出性能更优异的 Mg-Gd 系合金。

2.2.4 非稀土元素对 Mg-Gd 系合金的影响

非稀土元素在 Mg-Gd 系合金中发挥着重要作用,其影响主要体现在以下几个方面。

(1)力学性能优化 Zn 元素通过固溶强化和形成金属间化合物显著提升合金强度,而适量 Al 元素的加入则有助于实现强度与塑性的平衡。研究表明,Ca 元素的添加可促进合金形核、细化晶粒,从而改善力学性能。

(2)耐腐蚀性能提升 Ca 元素能够形成致密稳定的氧化膜,有效阻挡腐蚀介质侵入,降低腐蚀速率。Mn 元素在含氯离子环境中表现出优异的耐点蚀性能,通过与杂质元素形成化合物,减少其对腐蚀的促进作用,提高合金的耐蚀稳定性。

(3)加工性能改善 Al 元素的加入能形成 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相,提高合金的强度和硬度,优化了合金的热加工性能,降低了热裂和变形风险。同时,这些元素还改善了合金的淬透性,使镁合金热处理后获得更加均匀细小的组织结构。

(4)协同效应 Zn 与 Al 协同作用生成 Mg-Zn-Al 相,细化晶粒,改善时效硬化效果,提升热处理后的性能,这种相互作用为合金性能的提升提供了多种可能路径,在合金设计和优化过程中需要综合考虑。

非稀土元素的添加显著改善了 Mg-Gd 系合金的综合性能。随着研究的深入,对非稀土元素作用机制的理解将更加深入,为新型合金材料的开发提供理论支撑。通过优化非稀土元素的添加量和配比,可进一步提升 Mg-Gd 系合金的性能,推动其在工程领域的应用。

3 结 语

论述了不同元素对 Mg-Gd 系合金组织与性能的影响,

揭示了稀土元素(如 Gd、Y、Nd、Zr)和非稀土元素(如 Zn、Al、Ca、Mn)在合金中的强化机制及其对力学性能、耐腐蚀性能和加工性能的优化作用。稀土元素通过固溶强化、细晶强化、第二相强化和热稳定性提升等机制显著改善了合金的综合性能。非稀土元素则通过协同作用进一步优化了合金的力学性能,Mg-Gd 系合金为航空航天、汽车制造等高温部件领域的应用提供了参考。

尽管国内外对于 Mg-Gd 系合金研究取得了一定的成果,但仍存在一些局限性,如对合金元素的最佳配比和热处理工艺仍需进一步优化。未来研究可以从以下几个方面展开。

(1)深入探究元素作用机制 通过先进表征技术(如透射电镜、原子探针断层扫描等)进一步揭示稀土和非稀土元素在合金中的微观作用机制,特别是其在高温和腐蚀环境下的行为。

(2)优化合金元素配比 通过系统试验和理论计算,探索稀土和非稀土元素的“黄金比例”,以实现合金强度、塑性和耐腐蚀性能的最佳平衡。

(3)开发新型热处理工艺 结合先进的热处理技术(如等温时效、双级时效等),进一步优化合金的微观组织,提升其综合性能。

(4)拓展应用领域 基于 Mg-Gd 系合金的优异性能,探索其在新能源、医疗器械等新兴领域的应用潜力,特别是在轻量化、高强度和耐腐蚀要求较高的场景。

参 考 文 献

- [1] 王小强.稀土元素 Nd、Y 和 Gd 对 AZ 系镁合金组织和高温力学性能的影响[D].河南洛阳:河南科技大学,2007.
- [2] 张清,李全安,张兴渊,等.Mg-Gd 系耐热镁合金的研究进展[J].铸造,2011,60(11):1 080-1 083.
- [3] 杨青山,颜宏伟,彭鹏,等.高成形镁合金板材最新研究进展[J].稀有金属,2024,48(3):398-410.
- [4] 唐昌平,张超,王雪兆,等.镁合金非对称变形研究进展[J].稀有金属,2021,45(12):1 501-1 511.
- [5] 潘复生,蒋斌.镁合金塑性加工技术发展及应用[J].金属学报,2021,57(11):1 362-1 379.
- [6] YANG M B, PAN F S.Effects of minor Zr and Sr on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-4Y-1.2Mn-1Zn magnesium alloy[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 528(1):4 292-4 299.
- [7] 翟春泉,曾小勤,丁文江,等.镁合金的开发与应用[J].机械工程材料,2001,25(1):6-10.
- [8] 谢中柱,许并社,孙威.Mg-Gd-Nd 合金极限高温时效析出相的研究[J].热加工工艺,2011,40(2):170-172.
- [9] 汤伊金.Mg-Gd 二元合金的时效析出相变研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [10] 吴文祥,靳丽,董杰,等.Mg-Gd-Y-Zr 高强耐热镁合金的研究进展

- [J].中国有色金属学报,2011,21(11):2 709-2 718.
- [11] 方西亚,易丹青,王斌,等.Mg-Gd-Y-Mn合金挤压及时效过程中的组织与力学性能[J].材料热处理学报,2008,29(3):108-112.
- [12] 肖伟.熔模精密铸造 Mg-Zn-Al合金的组织性能及化学镀工艺[D].沈阳:沈阳理工大学,2011
- [13] SHIN D, WOLVERTON C. First-principles study of solute-vacancy binding in magnesium[J].Acta Materialia, 2010, 58(2): 531-540.
- [14] KLEIN R T, LOHMANN K C, THAYER C W. Bivalve skeletons record sea-surface temperature and $\delta^{18}\text{O}$ via Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios[J].Geology, 1996, 24(5):415.
- [15] ELIEZER D, AGHION E, FROES F H. Magnesium science, technology and applications[J].Advanced Performance Materials, 1998, 5(3):201-212.
- [16] NIE J F. Precipitation and hardening in magnesium alloys[J].Metallurgical and Materials Transactions, 2012, A43(11):3 891-3 939.
- [17] GAO X, NIE J F. Characterization of strengthening precipitate phases in a Mg-Zn alloy[J].Scripta Materialia, 2007, 56(8): 645-648.
- [18] ANYANWU I A, KAMADO S, KOJIMA Y. Creep properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Mater.Trans., 2001, 42(7): 1 212-1 218.
- [19] LI R, NI N. Recovery after ageing of Mg-Y and Mg-Gd alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1998(2):279.
- [20] 谢泽峰.Mg-Gd和Mg-Zn系合金时效析出行为及力学性能研究[D].长春:长春理工大学,2023.
- [21] LIANG S, GUAN D, TAN X, et al. The Effect of isotherm aging on the micro structure and properties of as-cast Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528(3):1 589-1 595.
- [22] 赵俊.微合金化Mg-Gd变形镁合金的组织与力学性能研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [23] 刘楚明,张秀荣,周海涛.镁合金相图集[M].长沙:中南大学出版社,2006.
- [24] BALASUBRAMANI N, PILLAI U T S, PAI B C. Effect of Zn concentration on the microstructure and phase formation of Mg-5Gd alloy[J].Journal of Alloys & Compounds, 2008, 460(1-2):6-10.
- [25] 张帆,谭成文,于晓东,等.应变率对Mg-Gd-Y合金断裂机制的影响[J].稀有金属,2011, 35(5):5-8.
- [26] 任睿卓.Mg-Gd系合金析出相形貌的相场法研究[D].郑州:郑州轻工业大学,2024.
- [27] 袁付庆,张静,方超.稀土元素对镁合金晶粒细化的研究[J].热加工工艺,2012,41(02):30-33,37.
- [28] WU G, WANG C, SUN M, et al. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloy, 2020, 9(1):1-20.
- [29] 张丁非,湛夏,潘复生,等.稀土元素对镁合金力学性能影响的研究进展[J].功能材料,2014,45(5):5 001-5 007.
- [30] 张迁,李全安,陈晓亚.Mg-Gd-Nd系合金组织和力学性能的研究进展[J].中国稀土学报,2021,39(2):206-217.
- [31] WU W X, JIN L, ZHANG Z Y, et al. Grain growth and texture evolution during annealing in an indirect-extruded Mg-1Gd alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 585:111-119.
- [32] 顾崑,蒋清,常志勇,等.Mg-Gd-Y合金及其构件的组织与性能研究[J].精密成形工程,2024,16(2):38-45.
- [33] 王一立,刘继良,王礼营,等.热处理对轧制态GWZ932镁合金微观组织和力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2026,55(6): 1 583-1 596.
- [34] ROKHLIN L L. Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals: Structure and Properties[M].USA:CRC Press,2023.
- [35] 郑天旭.高塑性Mg-Gd-Zr合金的组织形成机理与变形机制[D].重庆:重庆大学,2023.
- [36] 肖阳,张新明,陈健美,等.Mg-15Gd-0.6Zr合金的组织与力学性能[J].中国有色金属学报,2006,16(11):1 888-1 894.
- [37] 罗时峰.Mg-Gd系合金凝固特性、微观组织与力学性能研究[D].西安:西北工业大学,2020.
- [38] 严安庆.热处理工艺对挤压态Mg-12Gd-3Y-0.6Zr合金耐腐蚀性能的影响[J].湖南有色金属,2010,26(5):3 358-3 362.
- [39] YANG Q, XIAO B L, MA Z Y. Enhanced superplasticity in friction stir processed Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 551:61-66.
- [40] 于金程,刘正,董阳,等.高应变速率下Mg-Gd-Y镁合金动态拉伸性能与失效行为[J].沈阳工业大学学报,2015,37(6):650-655.
- [41] 张奇.Mg-10Gd-xY-(Zn)-0.6Mn铸造镁合金的显微组织和力学性能研究[D].重庆:重庆理工大学,2021.
- [42] 杨庆波,吴迪,陈荣石,等.Gd元素含量对砂型铸造Mg-Gd-Y合金微观组织和力学性能的影响[J].铸造,2015,64(9):887-892.
- [43] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Microstructure and strengthening mechanism of high strength Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy[J].Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427(1-2):316-323.
- [44] 靳学泽.Mg-Gd-Y稀土镁合金热塑性加工组织演化及强化机制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [45] 邓代亿.热处理对铸造Mg-9.5Gd-1.5Y-0.8Zn-0.5Zr镁合金显微组织和力学性能的影响[D].重庆:重庆理工大学,2024.
- [46] 焦迪,王萍.热处理工艺对Mg-Gd-Y合金组织及耐腐蚀性能的影响[J].材料热处理学报,2020,41(9):59-66.
- [47] LI D H, DONG J, ZENG X Q, et al. Age hardening characteristics and mechanical properties of Mg-3.5Dy-4.0Gd-3.1Nd-0.4Zr alloy[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006(23), 1 694-1 697.
- [48] 李军舰.Nd含量对Mg-9Gd合金组织及力学性能的影响[D].太原:太原理工大学,2020.
- [49] 吴旻.Mg-Gd系高强变形镁合金的研究[D].南京:东南大学,2009.
- [50] 李武钊,王武孝,陈晓港,等.Al、Ca微合金化对Mg-Gd合金组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):836-840.
- [51] 古东懂,谢世坤,彭建.Mn和退火工艺对挤压态Mg-Gd合金组织和性能的影响[J].材料热处理学报,2022,43(12):28-35.
- [52] 袁淑,张奇,李林峰,等.Zn对Mg-10Gd-2Y-0.5Zr镁合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(2):163-167.
- [53] 孟姣,薛烽,孙晶晶,等.Zn含量对Mg-Gd-Zn合金显微组织与力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2015,44(10):2 429-2 434.
- [54] 贾森森,刘新田,黄蓉,等.微量Zn对Mg-Gd系合金凝固微观组织演化的影响[J].热加工工艺,2020,49(21):6-10.

(编辑:张正贺)