

稀土元素对Mg-Al-Zn系镁合金组织与性能影响研究进展

张文轩, 王洋, 王思维, 刘得志, 宁江利

华北理工大学 河北唐山 063210

摘要: Mg-Al-Zn系镁合金作为Mg-Al系镁合金中发展较为广泛的一个分支, 凭借其优异的综合性能, 展现出良好的应用前景。在众多改性手段中, 合金化与微合金化技术因其显著的效果而受到学者们的广泛关注。综述了La、Nd、Pr、Y和Gd等常见稀土元素对Mg-Al-Zn系镁合金显微组织与力学性能的影响, 并深入探讨了这些稀土元素改性Mg-Al-Zn系镁合金的优缺点及未来发展方向。

关键词: 镁合金; Mg-Al-Zn系合金; 合金化; 稀土元素

Research progress on the influence of rare earth elements on the microstructure and properties of Mg-Al-Zn magnesium alloys

ZHANG Wenxuan, WANG Yang, WANG Siwei, LIU Dezhi, NING Jiangli

North China University of Technology, Tangshan 063210, Hebei, China

Abstract: Mg-Al-Zn magnesium alloys, as a widely developed branch of Mg-Al magnesium alloys, have shown promising application prospects due to their excellent comprehensive properties. Among various modification methods, alloying and microalloying techniques have attracted widespread attention from scholars due to their significant effects. This article reviews the effects of common rare earth elements such as La, Nd, Pr, Y, and Gd on the microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn magnesium alloys, and explores in depth the advantages, disadvantages, and future development directions of these rare earth element modified Mg-Al-Zn magnesium alloys.

Keywords: magnesium alloy; Mg-Al-Zn alloy; alloying; rare earth element

1 序言

近年来, 随着轻量化设计需求的不断提升, 压铸Mg-Al系镁合金因其出色的力学性能和良好的可加工性, 成为了材料研究领域的重要研究对象^[1, 2]。而Mg-Al-Zn系镁合金因其优异的比强度和比刚度而备受关注^[3]。为了进一步提升这类合金的性能, 研究者们探索了稀土元素对Mg-Al-Zn系镁合金微观结

构和力学性能的影响^[4, 5]。特别是稀土元素的添加被发现能够显著改善合金的微观结构和力学性能^[6, 7]。众多研究者在稀土元素对Mg-Al-Zn合金的显微组织与力学性能影响方面展开了大量研究。以此为基础, 本课题对一些常见稀土元素影响Mg-Al-Zn合金显微组织与力学性能的研究成果进行综述, 为开发低成本、高性能的Mg-Al-Zn系镁合金提供参考。

2 轻稀土元素对Mg-Al-Zn系镁合金的影响

2.1 La的影响

La通过形成 $Al_{11}RE_3$ 相促进晶格畸变,这不仅改变了合金的微观结构,还可能影响合金的热处理的效果和加工性能。这种晶格畸变可能导致合金在热处理过程中的沉淀行为发生变化,从而影响其最终的力学性能。XUE等^[8]研究了La对AZ80-Ce镁合金中Al-RE相的影响,发现La的添加导致 $Al_{11}RE_3$ 相从针状转变为管状(见图1),并加速了该相在

(001)方向的生长速率。这一转变归因于La引起的晶格畸变,增加了 $Al_{11}RE_3$ 相生长表面的能量。王社斌等^[9]在AZ91镁合金中观察到,La的添加使 $Mg_{17}Al_{12}$ 枝晶变得短小且致密,网状线由连续变为断续,且当La质量分数为0.16%时,晶粒尺寸可细化到 $40\mu m$ 。裴利霞等^[10]研究指出,加入La后,AZ91合金的铸态晶粒得到细化, $Mg_{17}Al_{12}$ 相减少,且大部分La与Al结合生成高熔点、高热稳定性的针状稀土相($Al_{11}La_3$),从而改善晶界相的分布,并

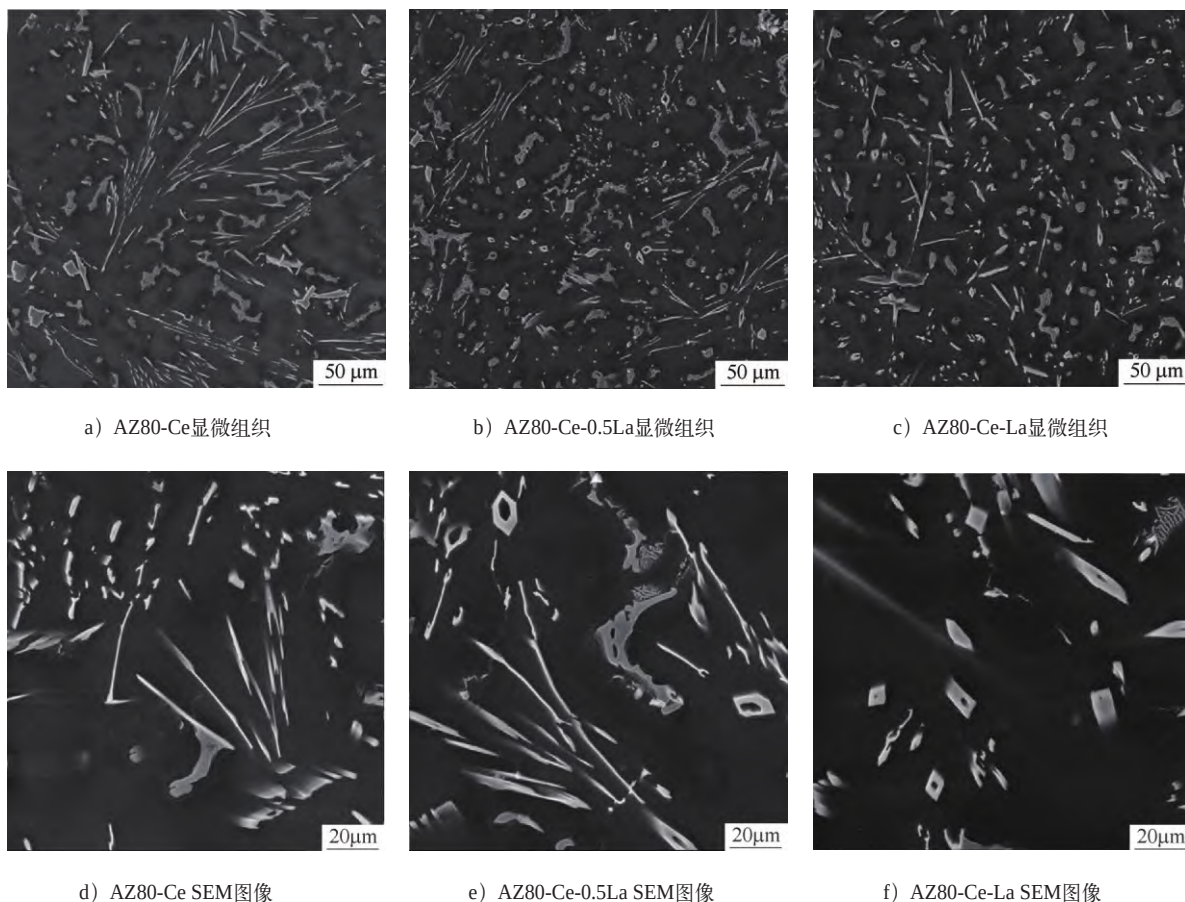


图1 AZ80-Ce-xLa镁合金的微观结构^[8]

提高铸态宏观硬度。

2.2 Nd的影响

Nd添加到Mg-Al-Zn系镁合金中,主要通过以下几种方式细化晶粒。

1) Nd与Al形成 Al_3Nd 相^[11]。这些相颗粒在合金熔体中分布,为 α -Mg相提供形核位置,增加形核率,从而细化 α -Mg相的晶粒尺寸。 Al_3Nd 相颗粒在晶界或晶内存在时,会阻碍 α -Mg相晶粒的生长。这种阻碍作用可以抑制晶粒长大,实现晶粒细化。Nd

可能在晶界处富集,改变晶界的能量状态,阻碍晶粒生长。这种作用可以降低晶界的迁移速率,进一步细化晶粒。

这种细化主要是针对 α -Mg相的晶粒尺寸。减少 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的形成(见图2),Nd不仅细化了 α -Mg相的晶粒,还改善了合金微观结构的均匀性。这种细化对提高合金的屈服强度和抗拉强度很重要。

2) Nd能促进AZ31镁合金在凝固过程中的晶粒细化。这种细化是因为Nd与Al形成的 Al_3Nd 相阻

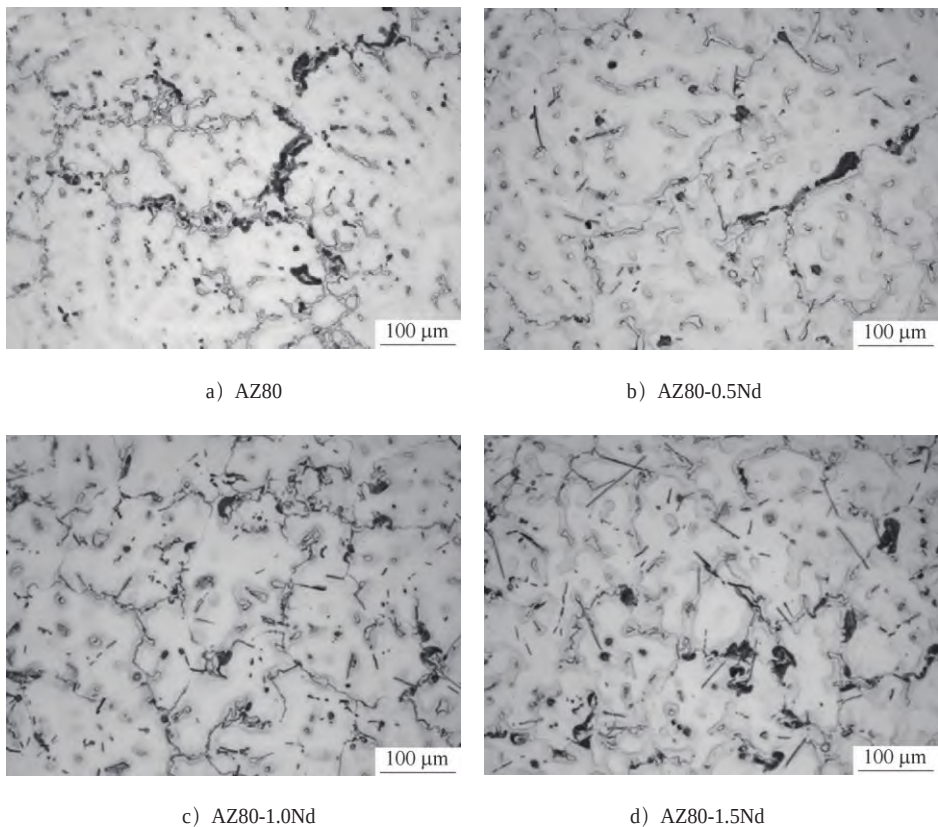


图2 AZ80-xNd镁合金的OM图像^[14]

碍了晶粒生长。同时，Nd添加还会形成新的Al-Nd相，如 Al_2Nd 和 $Al_{11}Nd_3$ ^[12]。这些相的形态和分布对合金的微观结构有影响。随着Nd含量增加， Al_2Nd 相可能转变为 $Al_{11}Nd_3$ 相，这种相变也会影响合金的微观结构^[13]。

Nd添加可以提高室温下镁合金的屈服强度和抗拉强度。含Nd元素AZ系镁合金的力学性能见表1。

WANG等^[14]研究发现，添加1.0%Nd后，AZ80合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率，分别达到103.7MPa、224.0MPa和8.4%。ZHANG等^[13]研究发现，当Nd添加量为1.05%时，AZ31合金的力学性能最佳。JIANG等^[15]研究发现，AZ80-0.6Nd合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率，分别达到125MPa、200MPa和7.67%。

2.3 Pr的影响

Pr引入的新相 $Al_{11}Pr_3$ 和 Al_6Mn_6Pr 可通过晶界强化和固溶强化来提高合金的力学性能。这些新相的形成可能对合金的塑性和韧性也有影响，尤其是在多轴应力状态下。通过添加不同含量（质量分数）的Pr（0.4%、0.8%、1.2%）到AZ91D镁合金中，可显著影响合金的微观结构和力学性能。含Pr元素AZ

表1 含Nd元素AZ系镁合金的力学性能^[11, 13-15]

合金	状态	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
AZ80	时效	122.0	224.0	4.8
AZ80-1.0Nd	时效	141.1	231.1	4.4
AZ80	铸态	96.8	203.8	7.2
AZ80-0.5Nd	铸态	94.7	207.7	7.6
AZ80-0.6Nd	铸态	125	200	7.67
AZ80-1.0Nd	铸态	103.7	224.0	8.4
AZ80-1.5Nd	铸态	94.4	213.1	8.0
AZ31-0.38Nd	铸态	75	184	13.1
AZ31-0.79Nd	铸态	79	185	13.9
AZ31-1.05Nd	铸态	79	200	14.2
AZ31-1.46Nd	铸态	76	180	11.3

系镁合金的力学性能见表2。CUI等^[16]研究发现，随着Pr含量的增加，合金中出现了新的 $Al_{11}Pr_3$ 和 Al_6Mn_6Pr 相（见图3），这些相的尺寸和分布对合金

的力学性能有重要影响。特别是,当Pr含量为0.8%时,合金展现出最佳的力学性能,这主要归因于晶界强化和固溶强化的效果。王敏等^[17]的研究进一步证实了Pr对AZ91D镁合金晶粒细化和力学性能改善的作用。发现Pr的添加可以促进形成新的AlPr相,尤其是当Pr含量为0.8%时,合金的室温力学性能最佳。这表明Pr的添加不仅改变了合金的微观结构,还通过细晶强化、析出强化和固溶强化的综合作用提高了合金室温下的力学性能。

表2 含Pr元素AZ系镁合金的力学性能^[16, 17]

合金	状态	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
AZ91-0.4Pr	铸态	105	200	4.5
AZ91-0.8Pr	铸态	137	228	6.8
AZ91-1.2Pr	铸态	128	222	6.2
AZ91-0.4Pr	铸态	—	200	4.2
AZ91-0.8Pr	铸态	—	226	7.8
AZ91-1.2Pr	铸态	—	218	6.5

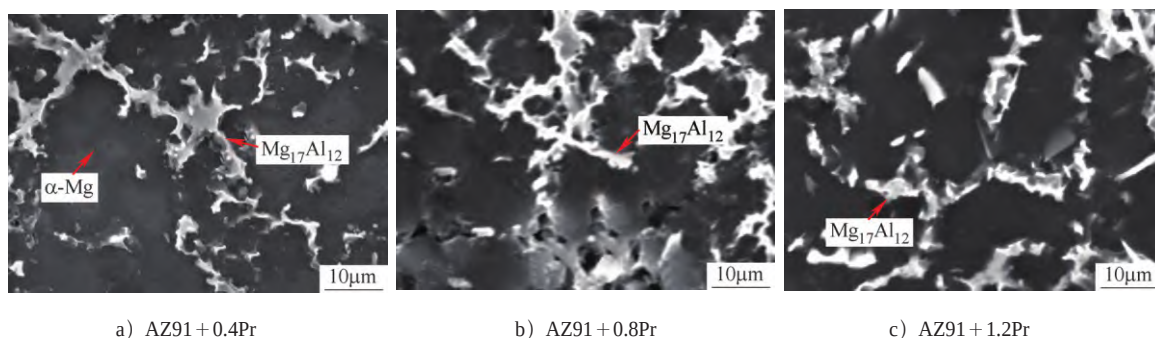


图3 压铸镁合金的SEM照片^[16]

3 重稀土元素对Mg-Al-Zn系镁合金的影响

3.1 Y的影响

Y元素的加入可有效细化合金组织,且Y元素通过形成Al₂Y相减少Al在 α -Mg中的固溶量,这可能影响合金的时效硬化效果。Y元素的添加可以显著提高合金常温下的力学性能。含Y元素AZ系镁合金的力学性能见表3。

表3 含Y元素AZ系镁合金的力学性能^[18, 21]

合金	状态	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
AZ81	铸态	172	203	4.3
AZ81-0.5Y	铸态	201	241	4.5
AZ81-1Y	铸态	213	253	5.1
AZ81-1.5Y	铸态	246	298	5.4
AZ81-2Y	铸态	224	263	4.3
AZ91-1.0Y	铸态	184	272	—

武波涛等^[18]在AZ81镁合金中添加Y元素,发现Y的加入可有效细化晶粒组织,且细化效果随Y含量的增加而逐渐增强,当Y含量达到1.5%时,细化效果达到最大(见图4)。随着稀土元素Y的加入,AZ81镁合金的室温强度获得了明显的提升,且屈服强度和抗拉强度随Y含量的增高均呈现出先增加

后降低的趋势,当Y含量为1.5%时达到最大。张诗昌等^[19]的研究也证实了Y元素对Mg-9Al-1Zn合金晶粒细化的影响,其研究发现,Y与Al形成的Al₂Y相不能溶于 α -Mg基体中,从而减少了Al在 α -Mg中的固溶量,降低了时效驱动力。杨明波等^[20]的研究进一步表明,微量Y元素的加入使Mg₁₇Al₁₂相转变为断续状和颗粒状分布,晶粒尺寸减小,组织细化。TONG等^[21]研究发现,Y和Nd元素的添加则显著提高了蠕变抗力。同时还观察到,随着Y和Nd元素的添加,合金的晶粒尺寸减小,且Mg₁₇Al₁₂相由连续网状转变为断续状和颗粒状分布。WANG等^[22]的研究也表明,Y和Ca元素的联合添加可细化AZ91合金的晶粒结构,形成Al₂Ca和Al₂Y相,抑制Mg₁₇Al₁₂相的沉淀。

3.2 Gd的影响

Gd的添加通过改变Al₁₁La₃相的生长特性来提高合金的力学性能。在微观组织方面,李向平等^[23]通过研究AZ61+x%Gd镁合金发现,随着Gd含量的增加,基体相 α -Mg的晶粒逐渐细化, β -Mg₁₇Al₁₂相由连续的网状或块状分布转变为连续、弥散的小块状分布,同时在晶内形成了具有规则几何形状的Al₂Gd相(见图5)。随着Gd含量的增加,AZ61+

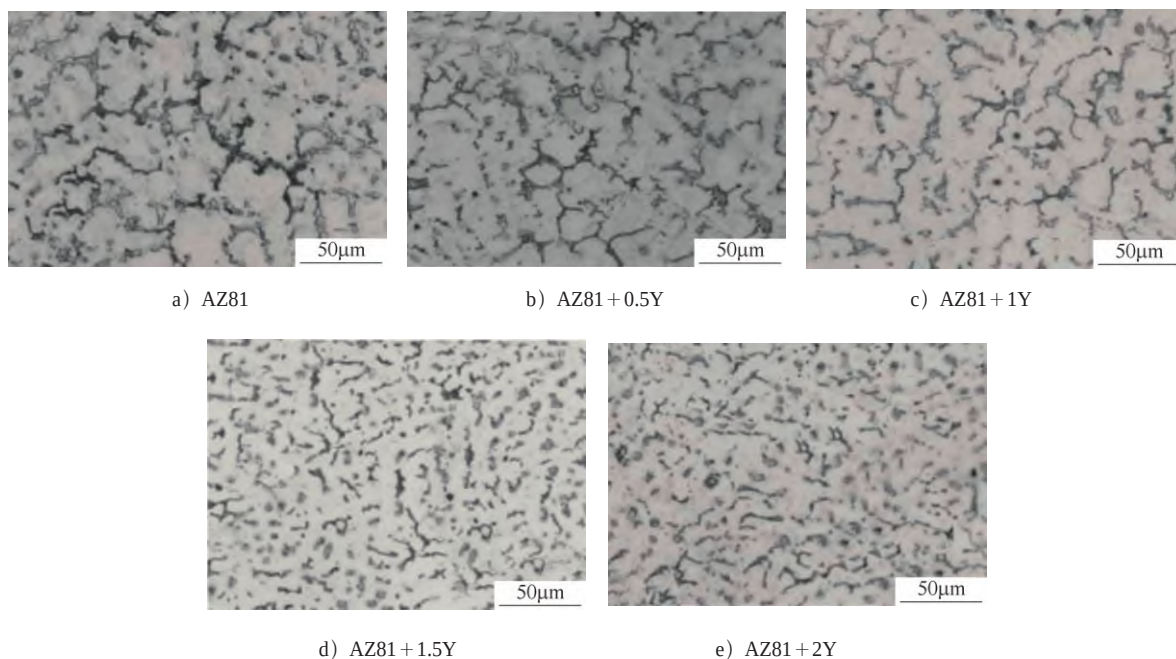


图4 不同Y含量AZ81镁合金显微组织^[18]

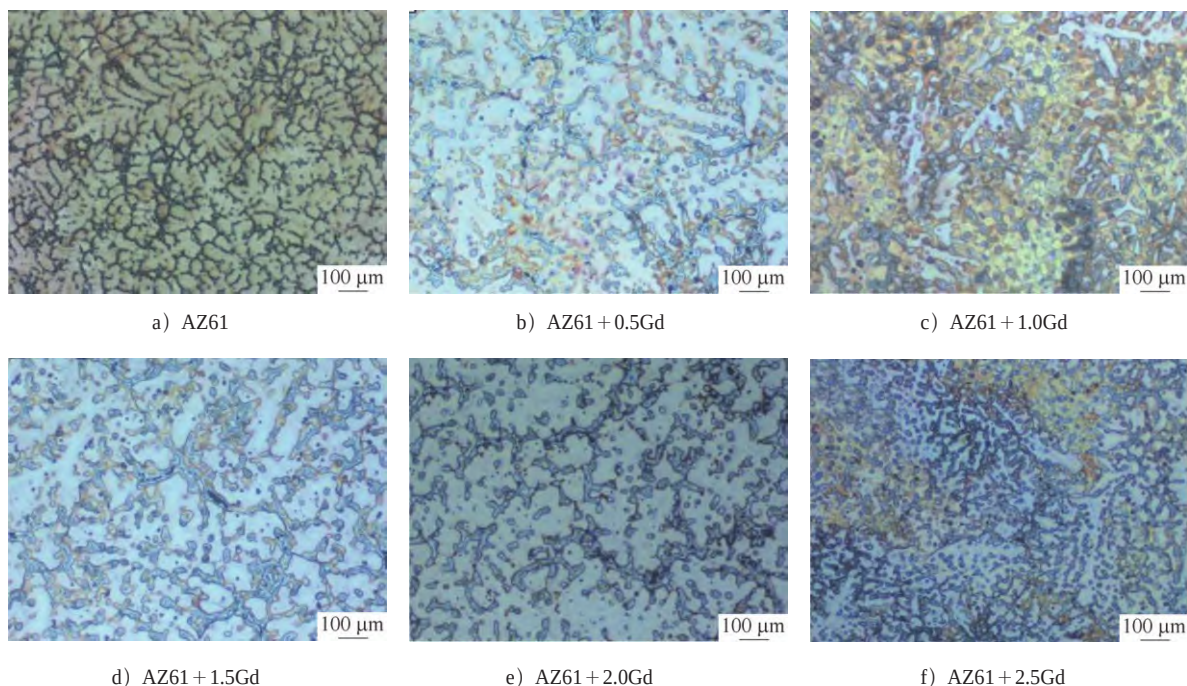


图5 AZ61 + x%Gd合金铸态金相组织^[23]

x%Gd合金的铸态力学性能逐步提高,当Gd含量达到2%时,合金的抗拉强度和伸长率分别达到最大值204MPa和9%。相较于AZ61合金抗拉强度和伸长率分别提升了25.9%和4%。这表明适量添加Gd元素可显著提高AZ61合金的力学性能。此外,ZHANG等^[24]在研究AZ91合金时也发现,添加Gd元素能够改变 $Mg_{17}Al_{12}$ 相,提高合金的高温力学性能,且通过第一性原理计算证实了Gd原子能够稳定吸附在

$Al_{11}La_3$ (001) 生长表面,改变其生长特性,从而提高合金的力学性能。

4 结束语

本文综述了La、Nd、Pr、Y和Gd等常见稀土元素对Mg-Al-Zn系镁合金显微组织与力学性能的影响。这些稀土元素通过形成特定的相结构(如 $Al_{11}La_3$ 、 Al_3Nd 等)或改变合金的微观结构,显著改

善了合金的力学性能。此外,考虑到稀土元素的环境影响和成本,未来的研究应评估稀土元素添加的环境友好性和经济性,以实现可持续发展。建议开发一种低成本、高性能的稀土改性镁合金,通过优化稀土元素的添加量和组合,实现合金性能的最大化,同时减少对环境的影响。另外,建议推动稀土元素改性镁合金在航空航天、汽车制造、电子产品等领域的应用研究,特别是在室温和高强度应用环境下的性能评估。通过深入研究稀土元素对镁合金微观结构影响的机理,包括晶粒生长、相变和界面特性,为合金设计提供理论基础。总之,稀土元素在Mg-Al-Zn系镁合金中的应用前景广阔,但需要进一步的试验研究和理论探索,以充分发挥其潜力。

参考文献:

- [1] ALYALDIN L, ELGALLAD E M, SAMUEL A M, et al. Effect of additives and heat treatment on the tensile properties of 354 alloy at 25℃ and 250℃[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 708: 77-90.
- [2] SU M J, KIM S D, KIM T H, et al. Sequential precipitation behavior of $Mg_{17}Al_{12}$ and Mg_2Sn in Mg-8Al-2Sn-1Zn alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 794-802.
- [3] XIE H, WANG J, LI Y, et al. Fast shot speed induced microstructure and mechanical property evolution of high pressure die casting Mg-Al-Zn-RE alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 331: 118523.
- [4] ASHRAFIZADEH S M, MAHMUDI R, GERANMAYEH A R. A comparative study on the effects of Gd, Y and La rare-earth elements on the microstructure and creep behavior of AZ81 mg alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 790: 139712.
- [5] ZHANG S, HU M, WANG Y, et al. Microstructural evolution mechanism and mechanical properties of La and Gd on AZ91 alloy: Experiments and first-principles calculations[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176667.
- [6] SHEIKHANI A, ROUMINA R, MAHMUDI R. Texture softening in a rare earth elements-containing AZ31 magnesium alloy during hot compression deformation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 4089-4098.
- [7] KONG F, CHEN H, CUI X, et al. Texture weakening and ductility improvement of Mg-1.1Mn-0.5Al alloy via medium temperature-high reduction rolling: Twinning variants selection and dynamic recrystallization mechanism[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 3243-3257.
- [8] XUE H, XIE W, LIU S, et al. The formation mechanism of Al-RE tubular phase in AZ80-Ce magnesium alloy by La doping[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1105-1114.
- [9] 王社斌, 张金玲, 祁小叶, 等. La对AZ91镁合金铸态组织的影响及其细化机制 [J]. 材料工程, 2009, (S1): 303-307.
- [10] 裴利霞, 张金山, 高义斌, 等. 稀土元素铈对AZ91镁合金显微组织及硬度的影响[J]. 铸造设备研究, 2005 (1): 20-22.
- [11] WANG Y X, FU J W, YANG Y S. Effect of nd addition on microstructures and mechanical properties of AZ80 magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (6): 1322-1328.
- [12] ARRABAL R, MATYKINA E, PARDO A, et al. Corrosion behaviour of AZ91D and AM50 magnesium alloys with Nd and Gd additions in humid environments[J]. Corrosion Science, 2012, 55: 351-362.
- [13] ZHANG A, HAO H, LIU X, et al. Effects of precipitates on grain size and mechanical properties of AZ31-x%nd magnesium alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2014, 32 (5): 451-457.
- [14] WANG Y X, FU J W, YANG Y S. Effect of Nd addition on microstructures and mechanical properties of AZ80 magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (6): 1322-1328.
- [15] JIANG N, CHEN L, MENG L, et al. Effect of neodymium, gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34 (6): 632-637.

(下转第142页)

4 结束语

1) 仿真数据显示,在最终状态下,叶身处等效应变较大,叶根、叶冠处等效应变较小,叶身、叶冠和叶根的等效应力分布均匀。

2) 经自由锻和模锻后,叶身部位组织相比叶根和叶冠处组织晶粒更加细小,这是因叶身部位变形程度较大所致。

3) 在该工艺条件下生产的TC4钛合金锻件可获得性能良好的等轴初生 α 相和含针状 α 相转变 β 相的金相组织。

4) 该工艺条件下生产的TC4钛合金叶片锻件满足技术条件的要求,且整体力学性能较为均匀,叶身部位强度比叶根和叶冠部位稍高,塑性水平各部位基本相同。

参考文献:

[1] 王亚光,张明玉,豆成斌,等. 固溶温度对TC19钛合金组织与力学性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2023(1): 55-58.

- [2] 王庆娟,田云飞,高贝特,等. 工业纯钛TA1的双道次热压缩变形及软化行为[J]. 金属热处理, 2022, 47(4): 75-80.
- [3] 李尚霖,王珂娜,何伟,等. Gr.37钛合金相变点的测定与分析[J]. 新疆有色金属, 2021(6): 109-110.
- [4] 余世伦,张孝军,孔玢,等. 退火工艺对冷轧工业纯钛带卷各向异性的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 82-87.
- [5] 周俊,汪宏斌,徐雨浩,等. 固溶处理对TC4钛合金组织和力学性能的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(6): 47-54.
- [6] 禹东,乔柳平,邹楠,等. 热处理工艺对Ti-6Al-4V等离子弧熔丝增材钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2023(11): 1-6.
- [7] 潘洪泗,揭念柱,方旭. TC4钛合金叶片等温成形多塑性变形机制模拟分析[J]. 热力透平, 2014, 43(3): 227-230.

(收稿日期: 20250310)

(上接第137页)

- [16] CUI X P, LIU H F, MENG J, et al. Microstructure and mechanical properties of die-cast AZ91D magnesium alloy by Pr additions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 435-438.
- [17] 王敏,王海东,徐学东. 稀土Pr对AZ91D镁合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 19-21.
- [18] 武波涛,马雷,武运卓. 稀土元素Y对汽车用AZ81镁合金铸造性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(5): 62-64.
- [19] 张诗昌,魏伯康,林汉同. 钇对Mg-9Al-1Zn合金铸态组织及时效特性的影响[J]. 金属热处理学报, 2003(3): 23-26, 91-92.
- [20] 杨明波,潘复生,程仁菊,等. Y对Mg-3Al-1Zn镁合金铸态组织的影响[J]. 轻合金加工技术, 2007, (7): 13-15.
- [21] TONG G D, LIU H F, LIU Y H. Effect of rare

earth additions on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 336-340.

- [22] WANG F, WANG Y, MAO P L, et al. Effects of combined addition of Y and Ca on microstructure and mechanical properties of die casting AZ91 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 311-317.
- [23] 李向平,李元,孙亚肖,等. AZ61+x%Gd镁合金铸态组织及性能研究[J]. 机车车辆工艺, 2022(5): 14-16.
- [24] ZHANG S, HU M, WANG Y, et al. Microstructural evolution mechanism and mechanical properties of La and Gd on AZ91 alloy: Experiments and first-principles calculations[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176667.

(收稿日期: 20241225)