

疏松缺陷对高强稀土镁合金组织和力学性能的影响

王晓明¹ 樊志杰² 骆立峰¹ 杨光山¹ 王志超¹ 蔡增辉¹ 陈庆军²

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150060; 2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘要 系统探究了不同疏松缺陷等级的稀土镁合金在室温和150℃下的力学性能及断裂行为。通过X射线无损探伤技术将试样分为5个疏松等级, 结合金相、扫描电镜(SEM)和力学测试分析发现, 随疏松等级升高, 凝固补缩不足导致孔隙率增加, 局部热流不均显著加速晶粒粗化。在室温拉伸试验中屈服强度、抗拉强度和伸长率随疏松等级单调下降。断口以河流纹理、裂纹切面为主, 局部浅韧窝表明材料的有限延展性。在150℃拉伸试验中材料的抗拉强度呈现先升高后降低的趋势, 屈服强度则单调下降, 伸长率略有提升。宏观断口呈典型的杯-锥状形貌, 其断裂机制以微孔聚合为主导, 并观察到均匀分布的韧窝, 表明材料的塑性增强。

关键词 镁合金; 疏松等级; 力学性能; 拉伸断口; 高温拉伸

中图分类号 TG146.22; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250221

Effects of Shrinkages on Microstructure and Mechanical Properties of High-strength RE Magnesium Alloys

WANG Xiaoming¹, FAN Zhijie², LUO Lifeng¹, YANG Guangshan¹, WANG Zhichao¹, CAI Zenghui¹,
CHEN Qingjun²

(1. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150060; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: Tensile properties and fracture behavior of rare earth magnesium alloys with different shrinkage grades at room temperature and 150℃ were systematically explored. The specimens were divided into five grades by X-ray non-destructive testing technology, and combined with metallography, scanning electron microscopy (SEM) and mechanical testing, it is found that the porosity is increased with the increase of shrinkage grade due to insufficient solidification and contraction, and uneven local heat flow significantly accelerates the coarsening of grain. During room temperature tensile test, the yield strength, tensile strength and elongation are decreased monotonically with shrinkage grade. The fracture is dominated by river texture and crack section, and local shallow tough sockets reveals limited ductility. In the tensile test at 150℃, the tensile strength of the alloy presents a trend of first increase and then reduction, while the yield strength is declined monotonously, and elongation is increased slightly. The macro fracture exhibits a typical cup-cone morphology, and fracture mechanism is dominated by microporous polymerization, accompanied with uniformly distributed dimples, indicating enhanced plasticity.

Key Words: Magnesium Alloy, Shrinkage Grade, Mechanical Properties, Fracture Morphology, High-temperature Tensile

镁合金因其低密度、高比强度等特点, 在航空航天、汽车工业及生物医疗等领域得到广泛应用^[1-3]。然而, 铸造镁合金在凝固过程中易形成显微疏松, 这类缺陷通常由溶解气体析出或补缩不足导致, 其分布与严重程度直接影响材料的力学性能, 尤其是抗拉强度和延展性^[4-7]。因为疏松缺陷减小了铸件有效承力面积, 在承受交变载荷时产生缺口效应^[8-12], 造成较大的局部

应力集中, 极易形成疲劳裂纹源, 进而降低铸件长时服役条件下的疲劳性能, 导致关键承力铸件过早失效, 危害严重^[13-16]。因此, 有必要对含有疏松缺陷的稀土镁合金的力学性能及变化规律进行分析和研究^[17-18]。赵朋飞等^[19]通过研究含疏松缺陷ZL205A材料, 总结了含不同疏松等级的ZL205A的力学行为规律。

为了研究疏松缺陷对稀土镁合金组织及力学性能

收稿日期: 2025-05-30; 修订日期: 2025-07-28

基金项目: 中国航发集团自主创新专项资金资助项目(ZZCX-2022-006)

第一作者: 王晓明, 男, 1990年出生, 高级工程师, E-mail: wxm7256@163.com

引用格式: 王晓明, 樊志杰, 骆立峰, 等. 疏松缺陷对高强稀土镁合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 1057-1061.

WANG X M, FAN Z J, LUO L F, et al. Effects of shrinkages on microstructure and mechanical properties of high-strength RE magnesium alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1057-1061.

的影响,本研究采用室温拉伸测试和150℃高温拉伸测试,并结合金相显微镜(OM)及扫描电镜(SEM)观察等方法,研究含疏松缺陷稀土镁合金的缺陷形貌和力学性能,旨在为相关研究提供参考。

1 试验方法与设备

采用Mg-Gd-Nd-Zn-Zr稀土镁合金,其化学成分见表1。疏松缺陷会导致材料的致密度和有效截面积降低,从而降低材料的力学性能。一方面,疏松缺陷易

表1 Mg-Gd-Nd-Zn-Zr合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Mg-Gd-Nd-Zn-Zr alloy %

w_B				
Gd	Nd	Zn	Zr	Mg
6	2	0.3	0.5	余量

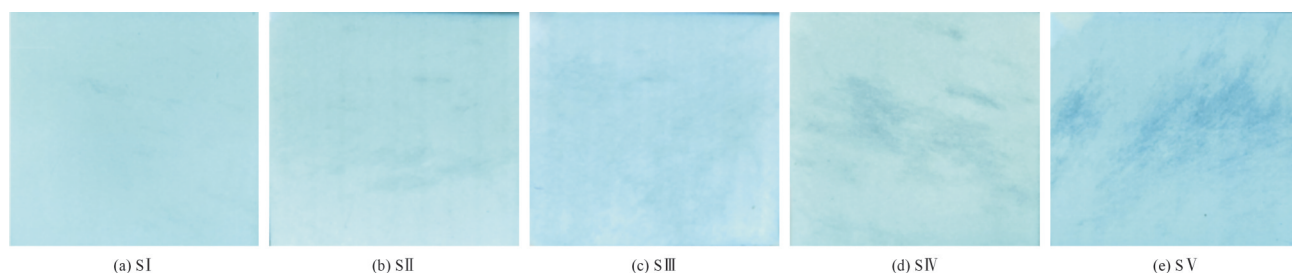


图1 试样HB6578标准底片

Fig.1 Standard negative of HB6578 specimen

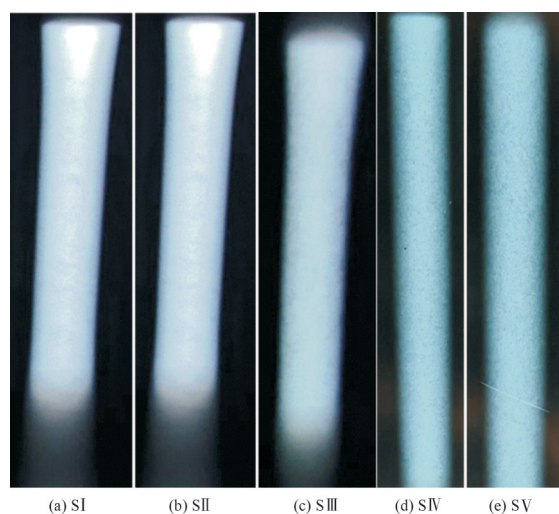


图2 缺陷试样透照底片

Fig.2 Transillumination negative of defective specimen

对含缺陷试样进行室温拉伸和150℃的高温拉伸测试和金相观察。拉伸试样为板状试样,尺寸示意图见图3。力学性能测试在MTS电子万能试验机上进行,根据HB5143进行测试,设置拉伸速率为0.5 mm/min。金相观察试样依次使用400、1 000、1 500和2 000目的砂纸从粗到细进行预磨,采用体积分数为5%的硝酸酒精腐蚀7~8 s,随后进行抛光观察。金相

形成应力集中,使得局部应力超过材料的临界拉应力值,导致裂纹的扩展和脆性断裂,从而导致伸长率下降。另一方面,由于孔隙或空洞使材料的有效截面积减小,单位面积上的应力增大,导致屈服在较低的外力下发生,使得材料在拉伸过程中更易发生塑性流动,导致屈服强度降低。

为了获得符合缺陷等级的试样以满足后续的力学性能测试,首先,通过一定的工艺调整让缺陷出现的概率增加;然后,从产品上直接切取,从大量的试样件中筛选,从而得到符合缺陷等级的试样。通过X射线无损探伤技术可以获取试样内部结构图像信息,实现对试样内部质量的全面评估。根据HB6578标准对缺陷试样进行评级,获得了5个等级(I~V)的疏松缺陷,见图1和图2。以SI-SV表示疏松等级I-V。

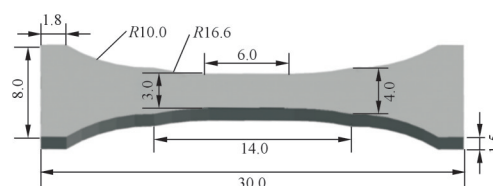


图3 拉伸试样尺寸示意图

Fig.3 Schematic diagram of dimension of tensile specimens

分析采用XJP3Ad型光学显微镜,采用S-3400N型SEM和SU1510型扫描电镜观察断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 金相形貌

图4为对应疏松缺陷等级I~V的镁合金试样。可以看到,随疏松等级由低到高,晶粒尺寸呈明显递增趋势。I级缺陷试样中晶粒以规则等轴多边形为主,晶界清晰且无明显变形痕迹;II级缺陷晶粒略微长大,至III级缺陷,晶粒尺寸分布呈双峰化特征,并可见轻微晶内畸变;IV级缺陷时,晶粒长大,孪晶带在部分晶界处显著;V级缺陷则出现晶界变粗,晶粒的长大。上述金相组织变化直接受疏松缺陷等级调控。疏松缺陷源于凝固补缩不足、孔隙增加,等级升高导致局部热流不

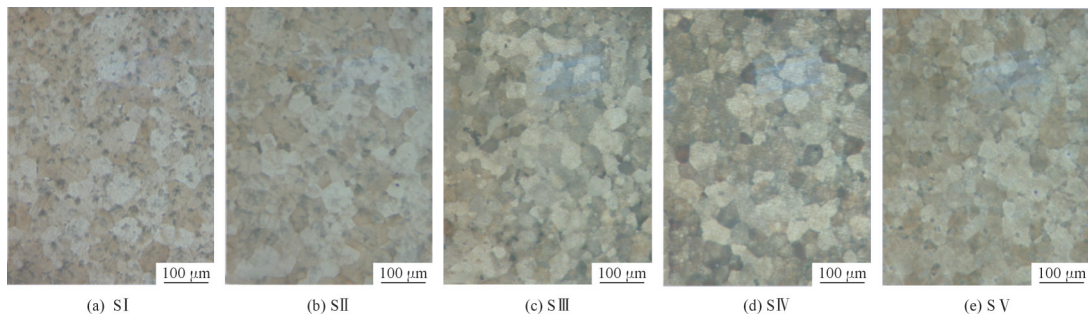


图4 试样的金相显微组织

Fig.4 OM images of specimens

均,加速晶粒长大和析出相粗化。低等级(SI-SII)孔隙少,凝固充分,形成细小等轴晶和断续网状Mg-RE析出相;高等级(SIV-SV)孔隙多,热集中引发晶粒粗化晶界变粗和析出相连续化。这种变化是由于孔隙减少了有效导热路径,促使晶界迁移和析出相聚集,进而影响力学性能。

扫描电镜观察结果见图5。对在晶界和晶内析出物进行能谱分析,见表2和表3。发现晶界处白色亮点为Mg-RE共晶相,高熔点稀土(Gd、Nd)在凝固时偏聚晶界,形成粗大网状、块状析出。在拉伸过程中通过晶界钉扎作用,网状、块状析出相阻碍位错滑移和晶界迁移,提高了屈服强度。晶内明亮的圆形亮点对应Zr富集相。Zr颗粒可作为形核核心,细化晶粒从而改善强度和韧性。同时纳米级Zr颗粒阻碍位错运动,促进位错缠结,增强加工硬化能力。另外,晶内析出物分散应力集中,延缓颈缩失稳,促进再结晶形成,提升高温变形能力。

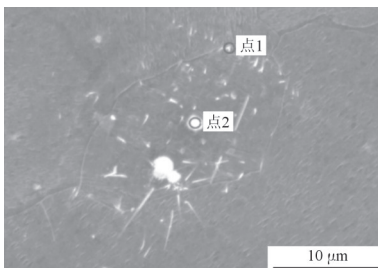


图5 典型试样金相组织

Fig.5 Metallographic sstructure of typical specimen

表2 点1晶界析出物成分

Tab.2 Precipitates compositions in point 1 at grain boundary %

w_B					x_B				
Mg	Zn	Zr	Nd	Gd	Mg	Zn	Zr	Nd	Gd
84.94	2.19	6.76	1.80	4.31	95.96	0.92	2.03	0.34	0.75

表3 点2晶内部析出物成分

Tab.3 Transgranular precipitates compositions in point 2 %

w_B				x_B			
Mg	Zn	Zr	Gd	Mg	Zn	Zr	Gd
37.67	11.19	48.94	2.20	68.22	7.54	23.62	0.62

2.2 力学性能及断口分析

图6为试样室温应力-应变曲线和力学性能。力学

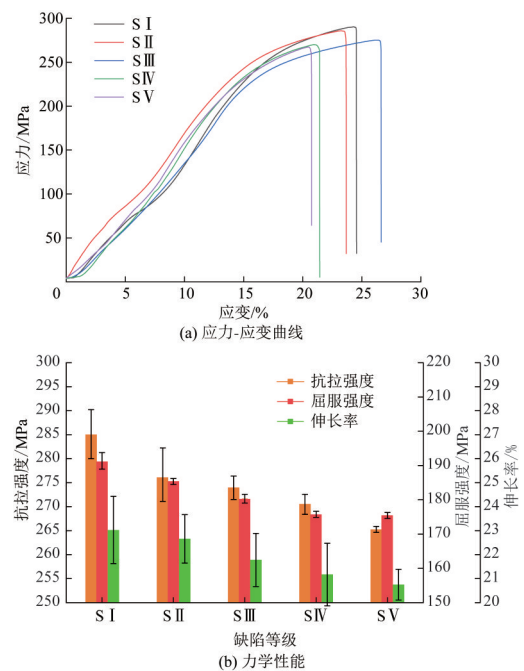


图6 试样室温拉伸应力-应变曲线和力学性能

Fig.6 Tensile stress-strain curves and mechanical properties of specimens at room temperature

性能变化源于疏松缺陷通过组织形貌的间接作用:低等级细小晶粒提高强度但引发沿晶断裂,高等级粗晶在高温下激活滑移,提升塑性,即缺陷状态驱动组织演化,性能响应表现为强度-塑性平衡。

2.2.1 室温力学性能及断口分析

本研究的Mg-6Gd-2Nd-0.3Zn-0.5Zr合金展现出优异的室温塑性。随疏松等级升高缺陷状态恶化,屈服强度、伸长率和抗拉强度呈下降趋势,这表明疏松增加导致材料强度降低,一方面,由于孔隙作为应力集中点,降低了材料的承载能力;另一方面,疏松导致组织形貌恶化和晶粒粗化、析出相连续导致强度降低。这是因为粗大晶粒减少了晶界密度,削弱了位错滑移阻力。同时,连续Mg-RE析出相成为弱界面,引发沿晶

裂纹,降低了有效承载面积。因此,疏松对材料的塑性和强度均有负面影响。

图7为典型试样拉伸断口的SEM组织。可以看出,试样典型断口表面呈现明显的裂纹切面和河流纹理(见图7b),这些是脆性断裂的典型标志。裂纹切面为平坦且棱角分明的平面,表明断裂沿晶体学特定平面发生。河流纹理显示裂纹传播的方向,指向裂纹起始点。尽管以脆性为主,也观察到一些浅凹坑或小型凹陷,表明局部存在延性撕裂。这些特征在某些区域(见图7c)较为明显,但总体占比较小,表明延展性贡

献有限。断口整体粗糙不平,呈现复杂的三维立体形态,显示出晶间和晶内断裂的混合特征。晶间断裂表现为沿晶界的不规则分离,晶内断裂则表现为穿过晶粒的裂纹切面。在断口表面观察到小型孔隙或空腔(见图7a),为预先存在的缺陷或次级裂纹。这些孔隙作为应力集中点,促进裂纹的开始和传播。此状态下合金断裂方式属于韧-脆混合型断裂。高的伸长率则得益于晶内析出的Zr细化了晶粒,且Zn和Gd含量少,减少了LPSO相的形成,从而改善了合金的延展性。

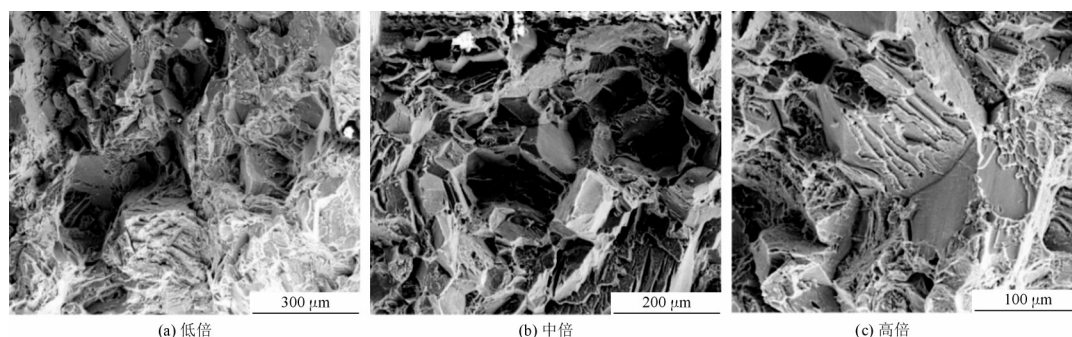


图7 典型试样室温拉伸断口的SEM组织

Fig.7 SEM images of tensile fracture of typical specimen at room temperature at room temperature

2.2.2 150 °C力学性能及断口分析

图8为试样150 °C拉伸应力-应变曲线和力学性能。图9为典型试样150 °C拉伸断口的SEM组织。可以看出,在150 °C下的高温拉伸呈现出的情况却与室温下不

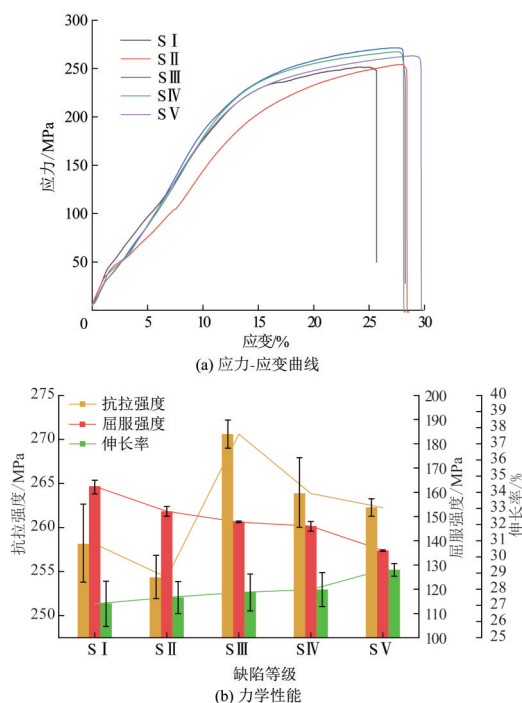


图8 试样150 °C拉伸应力-应变曲线和力学性能变化曲线

Fig.8 Tensile stress-strain curves and mechanical property variation curve of specimens at 150 °C

同,随着疏松缺陷等级从SI增至SV,合金屈服强度降低,从162.48 MPa降至136.01 MPa。抗拉强度在254~270 MPa之间波动,伸长率略有增加,从27.10%提高至29.20%。这是因为SII晶粒尺寸较SI略微长大,晶界处仍存在粗大连续的Mg-RE共晶脆性相,150 °C下位错滑移被激活,但SII的晶界脆性相在高温下成为薄弱点,导致位错在晶界处塞积产生应力集中。同时,轻微长大的晶粒使位错运动阻力略低于SI,但不足以抵消晶界弱化的负面影响,因此屈服强度低于SI。SIII的异常是因为晶内畸变明显。150 °C促进非基面滑移开动,与孪生协调变形,缓解局部应力集中。高温下晶内畸变区触发DRX(动态再结晶),形成无缺陷新晶粒,延缓裂纹萌生。SV的异常则是因为晶粒极度粗大,晶界宽阔。极度粗化的晶粒在高温下更易协调位错滑移和晶界滑动,减少应力集中,而宽阔晶界延缓微孔聚合,需更大塑性变形才能断裂。疏松区域作为应力集中点降低屈服强度,但提供空洞形核点使塑性变形增加。

伸长率高表明断裂为韧性断裂,试样典型断口表面显示凹点特征(见图9a),且可以看出存在很多韧窝微孔等特征(见图9b),这是塑性变形前的典型标志。疏松也会作为空洞形核点,进一步促进延展性断裂,断口显示较大的空洞(见图9c)。晶内析出物(表3)富含Zr和Zn,通过分散强化增强基体强度,同时保持延展

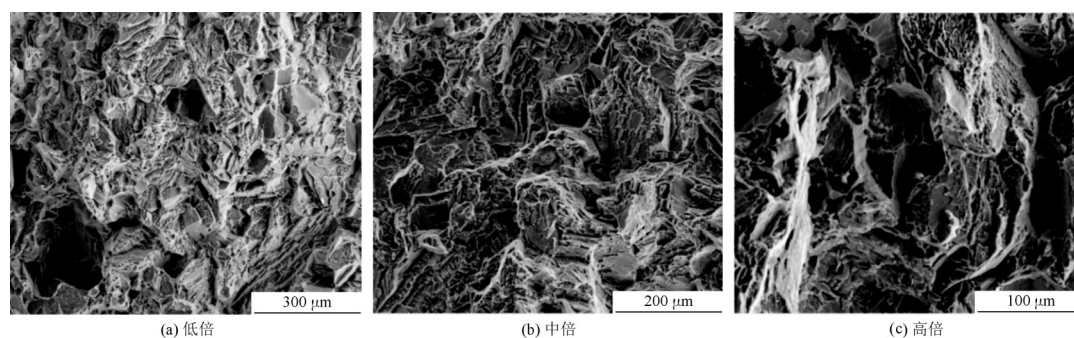


图9 典型试样150℃拉伸断口的SEM组织

Fig.9 SEM images of tensile fracture of typical specimen at 150 °C

性,不显著降低韧性。断裂机制主要是通过空洞在疏松和析出物处的形核、生长和聚合实现。

3 结 论

(1)随疏松等级升高,凝固补缩不足导致孔隙率增加,显著改变了合金的微观组织。

(2)在室温拉伸试验中,试样表现为韧-脆混合型断裂。断口可见明显的裂纹切面、河流纹理以及少量浅韧窝。断裂主要受晶界连续脆性相和孔隙引发的沿晶开裂主导。

(3)在150℃下,镁合金表现出显著的塑性增强,出现更多的微孔聚集和塑性流动。断口呈现大量韧窝和微孔聚合特征,伴随较大的孔洞与疏松。

(4)温度提高使得材料的塑性显著增强,150℃的拉伸试验中,所有缺陷等级的伸长率都提升,而抗拉强度变化相对较小。

(5)低级别疏松缺陷的断口表现出较多的脆性特征和微裂纹扩展,而高级别疏松缺陷则表现为更多的微孔聚合、塑性流动和显著的颈缩特征。

参 考 文 献

- [1] YANG C Y, WANG L F, XUE L L, et al. Weakened in-plane anisotropy of AZ31 magnesium alloy sheet induced by pre-enhanced non-basal slips during hot rolling [J]. Journal of Central South University, 2025, 32(3): 706-726.
- [2] ZHANG H Y, NIE H H, XU X, et al. Abnormal texture and sensitivity to strain rate during hot-tension of Mg alloy sheets [J]. Journal of Central South University, 2025, 32(3): 991-1007.
- [3] 曾小勤,吴玉娟,彭立明,等.Mg-Gd-Zn-Zr合金中的LPSO结构和时效相[J].金属学报,2010,46(9): 1 041-1 046.
- [4] TIAN J, DENG J F, LIANG W, et al. Influence of microstructure uniformity on fracture behavior of magnesium alloy rolling sheet based on slip trace analysis [J]. Transactions of Nonferrous Metals

Society of China, 2025, 35(4): 1122-1136.

- [5] 李星星,刘正,王越,等.铸态镁合金Mg-xZn-0.5Y-0.5Zr热裂缺陷研究[J].稀有金属,2020,44(7): 697-705.
- [6] 朱嘉楠,李志清,陈洪美,等.Mg-Gd-Y-Zn-Zr稀土镁合金的组织性能[J].特种铸造及有色合金,2018,38(5): 571-574.
- [7] GU L D, SHANG X Q, WANG J, et al. Effect of hierarchical cell structure and internal pores on mechanical properties of thixomolded AZ91D magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(3): 749-764.
- [8] HUANG Z Y, LIU C M, JIANG S N, et al. Achieving high-strength nanocrystalline WE43 Mg alloy by a combination of cold rotary swaging and aging treatment[J]. Vacuum, 2022, 197: 110 840.
- [9] 郑惠泽,何建丽,高晨鑫,等.WE43镁合金温热压缩下织构演变及再结晶行为[J].材料导报,2025,39(5): 203-209.
- [10] 杨天龙,唐昌平,董宇,等.细晶镁合金超塑性研究进展[J].中国有色金属学报,2025,35(3): 785-804.
- [11] PEREIRA G S, KOGA G Y, AVILA J A, et al. Corrosion resistance of WE43 Mg alloy in sodium chloride solution [J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 272: 124 930.
- [12] 张玺,韩峰,赵柯,等.离焦量对ZK60镁合金激光表面熔凝组织及性能的影响[J].有色金属工程,2023,13(8): 56-61.
- [13] 何维维,陈军洲,郝敏,等.WE43镁合金的热变形行为及热加工图[J].机械工程材料,2021,45(7): 69-74.
- [14] KHARITONOV D S, ZIMOWSKA M, RYL J, et al. Aqueous molybdate provides effective corrosion inhibition of WE43 magnesium alloy in sodium chloride solutions [J]. Corrosion Science, 2021, 190: 109 664.
- [15] 张涛,邹金超,黄志权,等.轧制温度对AZ61镁合金耐腐蚀性的影响[J].有色金属科学与工程,2023,14(4): 473-480.
- [16] 耿纪龙,闫志峰,张红霞,等.超声表面滚压处理对AZ31B镁合金组织和性能的影响[J].表面技术,2022,51(1): 368-375.
- [17] 黄卓,袁欣,丁汉林,等.室温压缩变形对AZ80镁合金时效析出行为的影响[J].材料热处理学报,2025,46(3): 68-76.
- [18] 张立杰,王淳嫒.AZ91D镁合金表面Ni基激光熔覆涂层的组织和性能[J].粉末冶金工业,2021,31(4): 77-81.
- [19] 赵朋飞,王育红,张新运,等.含疏松缺陷的ZL205A合金力学性能研究[J].装备环境工程,2017,14(8): 88-92.

(编辑:张正贺)