

微量Nd添加对AM50镁合金组织和热裂性能的影响

赵 帅¹ 刘文君¹ 乐驰腾¹ 朱志凯¹ 尹天财¹ 王维青¹ 宋江凤² 蒋 斌²

(1. 重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要 以典型商用AM50铸造镁合金为对象,通过微量Nd(0.02,0.2,0.4,0.6,0.8,%,质量分数,下同)添加对其微观组织和热裂敏感性进行调控。结果表明,随Nd含量增加,合金晶粒先细化后粗化,但整体变化量不大,合金的热裂敏感性呈现先减小后增加的变化趋势。Nd添加生成的 $Al_{11}Nd_3$ 相是影响合金热裂敏感性的主要因素。添加0.2%的Nd的合金中晶粒细化和微小颗粒状 $Al_{11}Nd_3$ 相的弥散分布使其表现出最好的抗热裂性能。随Nd含量继续增加,合金中的 $Al_{11}Nd_3$ 相增多并转变为针状,进而偏聚为粗大的块状,阻断 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的补缩通道,使得合金抗热裂性能显著恶化。

关键词 AM50合金;Nd;微观组织;热裂性能

中图分类号 TG146.22;TG113.12

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250267

Effects of Trace Nd Addition on Microstructure and Hot Cracking Properties of AM50 Magnesium Alloy

ZHAO Shuai¹, LIU Wenjun¹, LE Chiteng¹, ZHU Zhikai¹, YIN Tiancai¹, WANG Weiqing¹, SONG Jiangfeng²,
JIANG Bin²

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: The microstructure and hot cracking sensitivity of typical commercial AM50 cast magnesium alloy were regulated by adding trace amounts of Nd (0.02,0.2,0.4,0.6,0.8,%, mass fraction). The results reveal that the grains of the alloy are refined firstly and then coarsened with Nd content rising, while the overall change is little, and hot cracking sensitivity is decreased firstly and then increased. Nd addition leads to $Al_{11}Nd_3$ phase, which is the main factor affecting hot cracking sensitivity. The alloy with 0.2%Nd addition exhibits desirable hot crack resistance due to the grain refinement and dispersive distribution of micro granular $Al_{11}Nd_3$ phase. As Nd content rises continuously, the amounts of $Al_{11}Nd_3$ phase are increased, of which the morphology is transformed to acicular, and then segregates into coarse blocks, inhibiting the feeding channel of $Mg_{17}Al_{12}$ phase, leading to the deterioration of hot crack resistance.

Key Words: AM50 Alloy, Nd, Microstructure, Hot Cracking

镁合金因轻量化效果好、比强度高、减震性好以及环保性高等特点,在航空航天和汽车轻量化领域应用前景广阔^[1-2]。然而,随着零部件日益薄壁化、复杂化,AM系镁合金,如AM50镁合金,因其较宽的结晶温度范围和较大的收缩应力导致其在铸造过程中极易形成热裂缺陷,严重影响铸件的合格率和服役性能^[3]。

针对镁合金的热裂调控问题,研究者目前主要通过合金化^[4-20]的方法从本质上对合金的凝固收缩以及补缩行为进行调控。其中,稀土合金化因可同时兼顾

组织细化和引入高温强化相而成为镁合金热裂调控的重要元素。此外,稀土元素对镁合金熔体的净化作用和铸件表面稀土钝化膜的存在还可有效提高铸件的综合服役性能。LI X X等^[17]发现在Mg-4.5Zn-1Y-0.5Zr合金中添加(质量分数,下同)2%的Nd,可使合金晶粒细化,通过调整合金中的高熔点W相 $[Mg_3Zn_3(Y,Nd)_2]$ 和I相 (Mg_3Zn_6Y) 的比例,增强合金高温下的协调变形能力,有效降低了合金的热裂敏感性。然而,LPSO相只适用于特定的Mg-Zn-RE和

收稿日期:2025-07-01;修订日期:2025-07-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB3709300);重庆市教委科学技术研究计划资助项目(KJQN202201136,KJQN202501124);重庆理工大学科研创新团队培育计划资助项目(CXQT20023);重庆理工大学研究生实践基地资助项目(gzlj2025201,gzlj2024201);重庆理工大学研究生创新资助项目(gzlcx20242024)

第一作者:赵帅,男,2002年出生,硕士研究生,E-mail:1106108492@qq.com

通信作者:刘文君,女,1985年出生,博士,E-mail:wjliu@cqu.edu.cn

引用格式:赵帅,刘文君,乐驰腾,等.微量Nd添加对AM50镁合金组织和热裂性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2026,46(7):1062-1068.

ZHAO S, LIU W J, LE C T, et al. Effects of trace Nd addition on microstructure and hot cracking properties of AM50 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1062-1068.

Mg-Ni-RE 等体系,针对典型的商用 Mg-Al 系合金,目前主要采用 Gd^[11]、Ce^[12]、La^[13-14]、Y^[16]、Nd^[14,18] 添加后形成的非 LPSO 相来调控镁合金的抗热裂性能。崔鹏星^[14]在 AZ91 镁合金中添加 2% 的 La+Nd 混合稀土,发现随 La、Nd 质量比增加,合金中 Al₁₁La₃ 与 Al₂Nd 相含量升高使得组织的强塑性有所增加,同时枝晶组织有所细化,最终改善了合金的抗热裂性能。YAO S 等^[16]在 AZ91 合金中添加 1.5% 的 Y,通过析出 Al₂Y 相作为 α -Mg 的异质形核核心,使得合金组织细化,形貌由树枝晶转变为等轴晶,从而提高了合金抗凝固收缩能力。因此,稀土元素的添加可改善合金的抗热裂性能。

需要注意的是,稀土元素的大量添加会带来成本的升高,同时影响合金的铸造性能,特别是流动充型性能。DU X D 等^[11]在 Mg-5Al-3Ca 合金中单独添加 0.5% 的 Gd,发现合金组织明显细化,但脆性温度区间增大,同时组织中粗大 Al₂Gd 和 Al₂Gd₃ 相的形成使得共晶相含量发现,合金补缩能力下降,导致合金热裂敏感性增大。LIU W J 等^[12]在 AZ91 合金中添加质量分数 $\leq 1.0\%$ 的微量 Ce 元素,发现合金中析出了针状和块状的 Al₁₁Ce₃ 相,使得合金组织粗化,且组织中的低熔点 Mg₁₇Al₁₂ 相含量明显发现,引起合金热裂敏感性升高。因此,Gd、Ce 稀土的微量添加并未达到预期的效果。结合相关研究^[14,16,21-24]可知,La 在 Mg-Al 基合金中的强化机制依赖于大量 Al-La 相的生成,对合金的流动性不利;Y 价格偏贵,通常更适用于有较高温度需求(350 ℃以上)的合金。对于 AM50 镁合金,Nd 元素与 Y 元素相似,且成本更低,具有更好的应用前景。王祯寅等^[23]在 Mg-2Zn-0.2Sr-0.6Zr 合金中单独添加 2% 的 Nd,发现合金晶粒细化,第二相呈弥散分布,力学性能得到有效提升。李威等^[22]在 Mg-8.5Al-0.5Zn 合金中单独添加 1% 的 Nd,发现生成的 Al₃Nd 相可以在高温下有效钉扎位错,使合金的高温性能得到有效提升。

综上,从商用镁合金的铸造性能和成本控制角度出发,研究微量 Nd 添加对 AM50 合金微观组织演变的影响,探究不同 Nd 含量下合金的热裂行为,将进一步丰富稀土微合金化调控 AM50 镁合金热裂的研究,旨在为高铸造性能镁合金的设计提供参考。

1 试验材料及方法

通过重力铸造制备不同 Nd 含量(实际含量为 0.02, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, %, 质量分数,下同)的 AM50-Nd 镁合金试样。选用商用 AM50 和 Mg-30Nd 中间合金为原材料,在 RPM-20-9 井式电阻炉中熔炼。熔炼时先将去除氧化皮和水汽的 AM50 加入坩埚中,并升温至 700 ℃,待其完全熔化后加入 Mg-30Nd 中间合金,再

升温至 720 ℃使所有原材料全部熔化。随后在该温度下使用 C₂Cl₆(0.3%~0.5%,体积分数)进行 1~2 min 的精炼后除渣、搅拌再静置 15 min。将再次除渣后的熔体在 720 ℃时浇注到预热至 250 ℃的“E”型约束棒模具^[24]中进行热裂倾向评估。合金熔炼过程中采用 CO₂ 和 0.1%~0.3% (体积分数)SF₆ 的混合气体保护。采用 ICP-5000 电感耦合等离子体(ICP)光谱仪测定各合金的化学成分,结果见表 1。

表 1 不同 Nd 含量 AM50 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AM50 magnesium alloys with different Nd contents %

合金编号	w_B				
	Al	Mn	Zn	Nd	Mg
AM50-0.02Nd (0.02Nd)	4.84	0.29	0.21	0.02	余量
AM50-0.2Nd (0.2Nd)	4.86	0.28	0.22	0.19	余量
AM50-0.4Nd (0.4Nd)	4.87	0.31	0.21	0.41	余量
AM50-0.6Nd (0.5Nd)	4.84	0.29	0.22	0.57	余量
AM50-0.8Nd (0.6Nd)	4.85	0.30	0.23	0.78	余量

热裂试样均未出现明显断裂,取 E 型试样最长约束棒的热节处进行观察。沿分型面纵向剖开,横向截取边长约为 10 mm 的方块,对试样剖面上部、中上部、中下部和下部的裂纹面积进行统计,从而建立合金元素与合金热裂敏感性(HTS)的关系。用体积分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀 10~15 s,随后采用徕卡金相显微镜(DMI5000M)观察其金相组织。利用 Image-Pro Plus6.0 软件统计金相组织中的二次枝晶臂间距。采用配备能量色散 X 射线光谱(EDS)的扫描电镜(SEM, Zeiss Sigma)分析共晶体特征和第二相、热裂纹形貌和元素分布。使用 Panalytical 型 X 射线衍射仪在 Cu-K α 辐射下,对合金进行 20°~90°扫描范围内的检测,从而确定合金物相组成。利用 STA449F3 差示扫描量热仪(DSC)测量合金相变及相变温度(加热速率为 10 ℃/min,温度范围为 30~700 ℃),验证合金物相组成。

2 试验结果观察

2.1 微观组织演变

合金热节区的金相组织见图 1。可以看出,合金的微观组织由灰白色 α -Mg 枝晶和黑色的第二相组成。对合金金相组织中的二次枝晶臂间距进行统计,结果见图 2。可以看出,随 Nd 含量增加,枝晶组织先细化后逐渐粗化,在 Nd 含量为 0.4% 时最细,为 9.53 μm ,这表明 Nd 元素的适当添加可以细化 AM50 镁合金组织^[14,18]。稀土 Nd 是 Mg 的表面活性元素^[25],在凝固过程中稀土元素会在固/液界面前沿富集引起成分过冷,从而提高形核率。另外,添加 Nd 在合金枝晶间形成高熔点的 Al-RE 相,尤其是 Al₁₁RE₃ 相^[26],也会阻碍 α -Mg

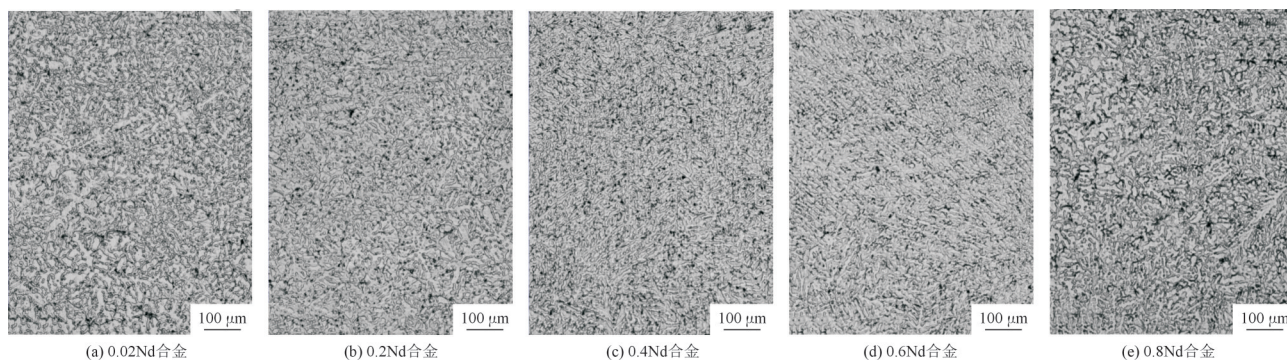


图1 AM50-Nd 镁合金的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of AM50-Nd magnesium alloy

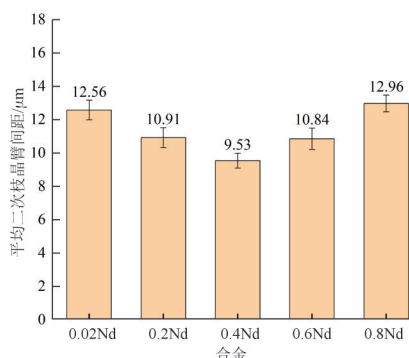


图2 AM50-Nd 镁合金的平均二次枝晶臂间距

Fig.2 Average secondary dendrite arm spacing of AM50-Nd magnesium alloy

晶粒的生长,从而进一步细化晶粒。然而,随Nd含量进一步增加,合金枝晶组织又逐渐粗化,最大为12.96 μm。AM50-Nd 镁合金中,二次枝晶臂间距的最大变化量仅为3.43 μm,这表明微量Nd添加细化效果并不明显。

图3为AM50-Nd 镁合金的XRD图和DSC曲线。可以看出,AM50合金主要由 α -Mg和 $Mg_{17}Al_{12}$ 相组成,而0.4Nd、0.6Nd和0.8Nd合金的XRD图谱中还出现了 $Al_{11}Nd_3$ 的衍射峰,且随Nd含量增加, $Al_{11}Nd_3$ 衍射峰的强度增加^[14,18]。这说明低含量的Nd添加并未改变合金的相组成,高Nd含量添加才会析出 $Al_{11}Nd_3$ 新相。对 α -Mg的四强峰进行放大(见图3b),发现0.2Nd合金在(0002)面出现明显的衍射峰宽化。基于Nd比 α -Mg更大的原子半径和其在 α -Mg中的较大固溶度(相图显示为3%,摩尔分数)^[27],可知Nd在 α -Mg基面上的置换固溶引起局部晶格畸变,使其衍射峰出现微观应变宽化^[28]。因此,0.2Nd合金中的Nd元素主要固溶于基体中,0.4Nd、0.6Nd和0.8Nd合金中的Nd主要以 $Al_{11}Nd_3$ 形式存在。此外,随Nd含量增加,合金中 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的衍射峰强度减弱,在0.4Nd、0.6Nd和0.8Nd合金中减弱明显,说明 $Al_{11}Nd_3$ 新相的形成降低了组织中 $Mg_{17}Al_{12}$

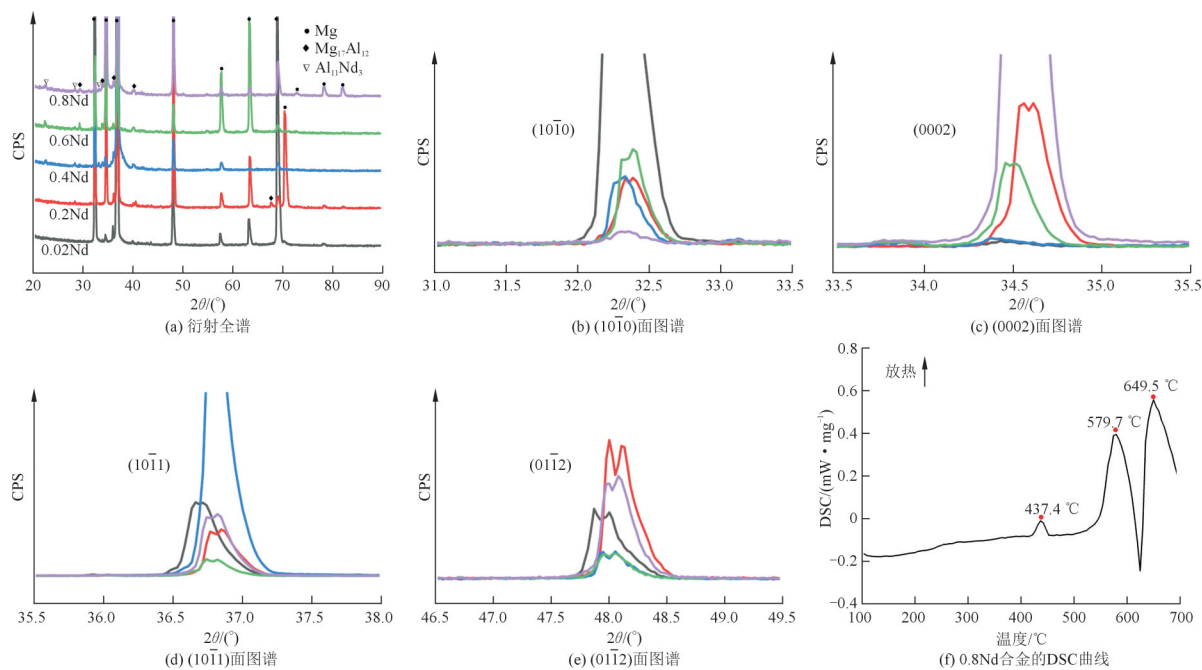


图3 AM50-Nd 镁合金的XRD图谱与DSC曲线

Fig.3 XRD patterns and DSC of AM50-Nd magnesium alloy

相的含量。图 3f 显示 DSC 升温曲线随温度升高依次出现 3 个明显的吸热峰,代表合金凝固过程中存在 4 个相变点。从左到右依次为 $Mg_{17}Al_{12}$ 相变(温度约为 $437.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $Al_{11}Nd_3$ 相变(温度约为 $579.7\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $\alpha\text{-Mg}$ 相变(温度约为 $649.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),从而证实了试验合金中的相组成及其凝固顺序。

为明确相组成对合金的影响,合金组织的第二相扫描电镜和 EDS 能谱分析见图 4 和表 2。在 0.02Nd 合

金中可见长条状和短棒状的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相以半连续网状形式分布于基体中。随 Nd 含量增加,0.2Nd 合金中的微小颗粒状 $Al_{11}Nd_3$ 相和短棒状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相主要以弥散形式分布于枝晶间。当 Nd 含量进一步增加至 0.4% 时,组织中的 $Al_{11}Nd_3$ 相开始由颗粒状转化为针状并同时增多。当 Nd 含量增加至 0.6% 时,组织中出现大量弥散分布的针状 $Al_{11}Nd_3$ 相。最后,针状的 $Al_{11}Nd_3$ 相在 0.8Nd 合金中聚集成为更加粗大的块状。

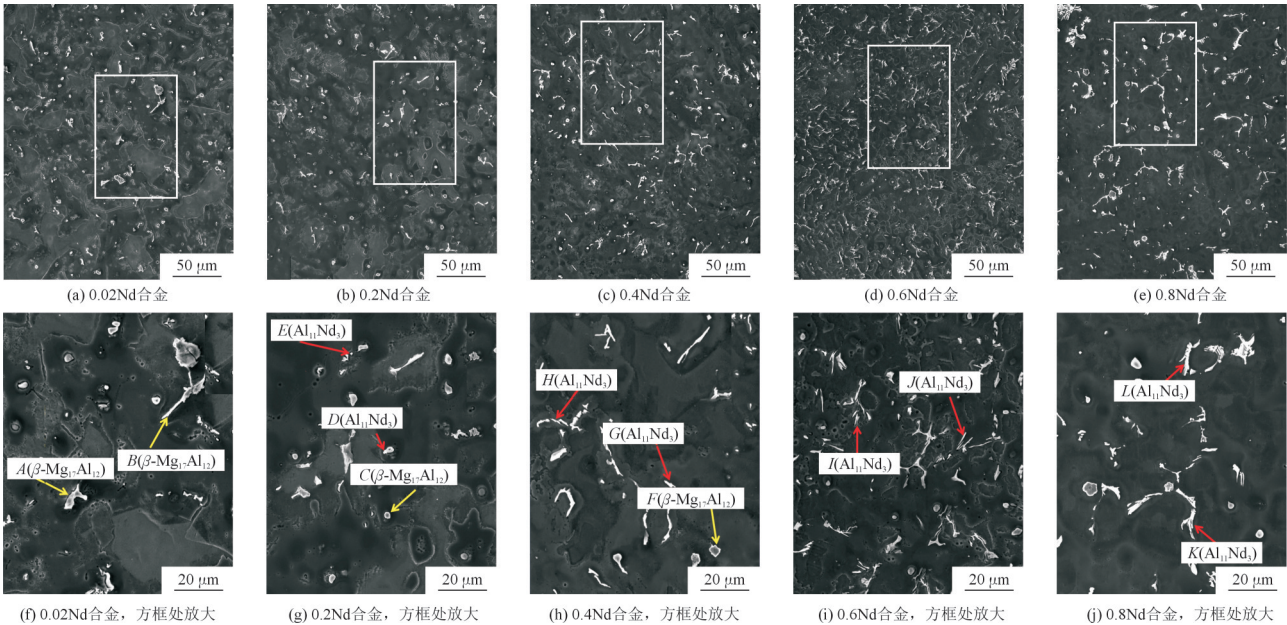


图 4 AM50-Nd 镁合金的第二相扫描电镜分析

Fig.4 SEM analysis of the second phase in AM50-Nd magnesium alloy

表 2 图中各点的 EDS 分析

Tab.2 EDS analysis of points in Fig.4 %

点	x_B		
	Mg	Al	Nd
A	61.85	38.15	—
B	62.49	37.51	—
C	59.98	40.02	—
D	51.71	37.94	10.35
E	59.56	31.77	8.67
F	61.08	38.92	—
G	52.77	37.12	10.11
H	56.91	33.86	9.32
I	46.91	41.11	11.38
J	53.85	36.26	9.89
K	40.47	46.77	12.76
L	67.56	25.49	6.95

2.2 热裂敏感性

图 5 为 AM50-Nd 合金在 E 型直浇道和最长约束棒连接的热节区域的裂纹宏观分布图。其中,裂纹主要出现在靠近约束棒的一端,这可能是由于约束棒分支小而长的形状,充型后优先凝固,其冷却速度较直浇道要更快更早。优先凝固的约束棒端同时受到自身凝固

收缩和直浇道凝固收缩的影响,且补缩受限,而稍后凝固的直浇道因有熔体的补充和尺寸更大,表现出更好的承载能力,使得热裂更易发生在靠近约束棒端的区域。从图 5 中可以看出,随 Nd 含量的增加,合金的热裂纹先变细,在 0.2Nd 合金中最细,随后又逐渐变粗。

对 AM50-Nd 合金热节区域的热裂纹进行分区(上部,中上部,中下部,下部)观察,见图 6。可以看出,热节区主要由枝晶组织和组织上的黑色裂纹区组成。随 Nd 含量增加,不同分区的裂纹面积具有不同的变化趋势。对图 6 中 AM50-Nd 合金不同分区的裂纹面积进行统计并计算不同分区的裂纹面积总和,结果见图 7。可以看出,合金上部和下部的裂纹面积普遍要大于中上部和中下部,原因是合金凝固时靠近模具的部分温度率先降低,而远离模具的部分温度降低较慢,同一时刻下合金内部液相相对较多,对热裂纹进行补缩的能力更强。此外,虽然不同分区的裂纹面积变化趋势不同,但合金热节区域的热裂纹总面积随 Nd 含量增加呈现先减小后增加的趋势,并在 Nd 含量为 0.2% 时达到最小值,在 Nd 含量为 0.8% 时达到最大值。这表明 0.2Nd 合金的抗热裂性能最好,而 0.8Nd 合金的抗热裂性能最

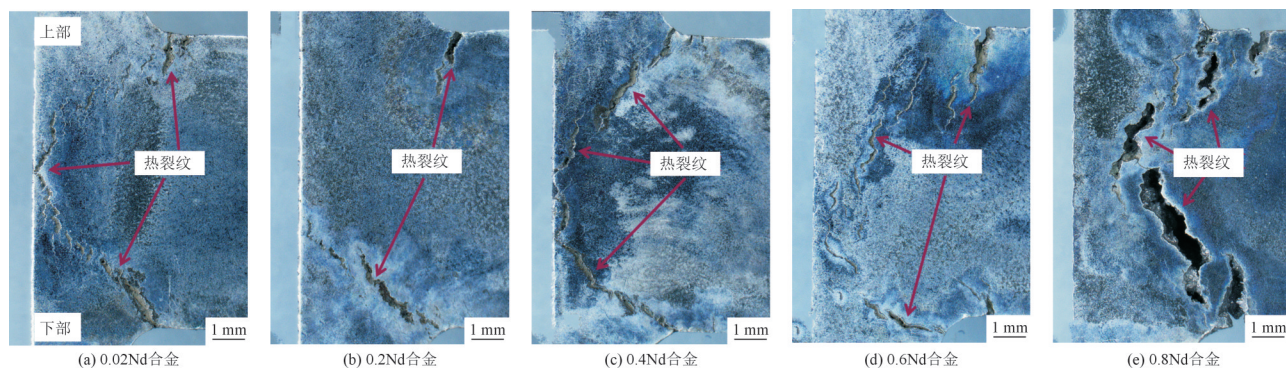


图 5 AM50-Nd 镁合金热节区的裂纹宏观分布图

Fig.5 Macro distribution of cracks in hot spot region of AM50-Nd magnesium alloy

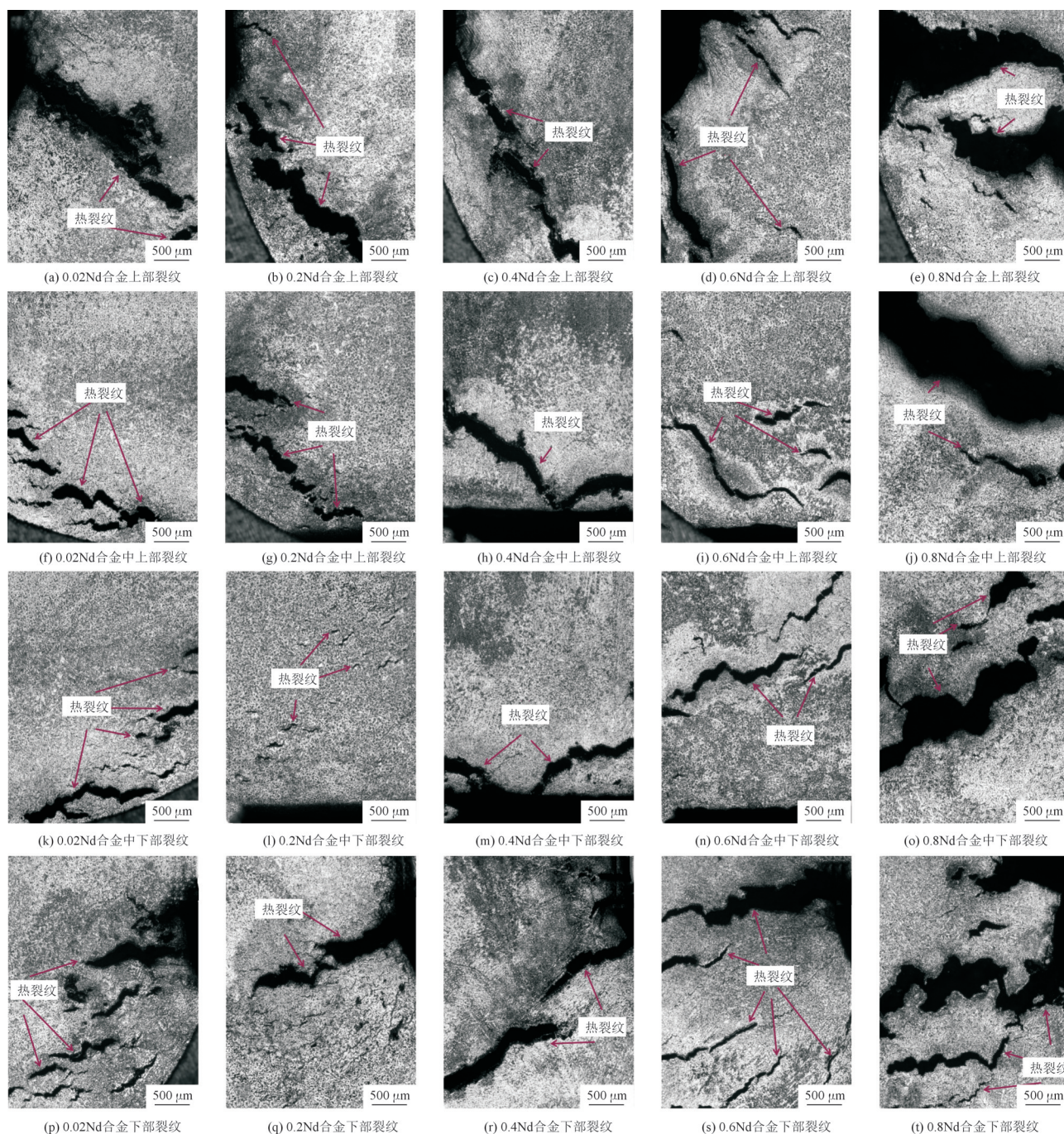


图 6 AM50-Nd 镁合金热节区的裂纹分布图

Fig.6 Crack distribution in hot spot region of AM50-Nd magnesium alloy

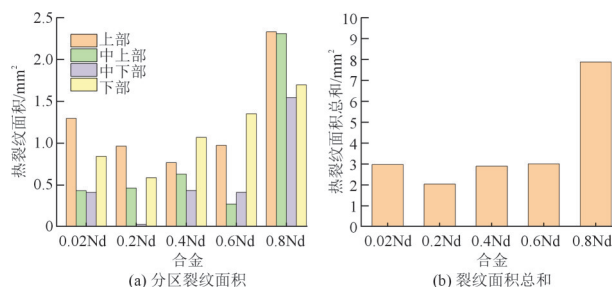


图7 AM50-Nd镁合金热节区的热裂纹面积统计图

Fig.7 Statistical diagram of crack area in hot spot region of AM50-Nd magnesium alloy

差。因此,不同程度的Nd添加对AM50镁合金热裂性能的影响也不同。

2.3 热裂补缩分析

为探究AM50-Nd镁合金中的热裂补缩行为,对热节区的组织进行了扫描电镜分析,结果见图8。所有合金中均可明显观察到不同程度的热裂纹和灰白色的补缩痕迹,且开裂程度随Nd含量的变化趋势与图7的结果一致。对补缩痕迹的区域进行放大观察,发现主要是低熔点的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相和高熔点的 $Al_{11}Nd_3$ 相(图8l~图8o)。

根据Hume-Rothery定律, $Mg(1.31)$ 、 $Al(1.61)$ 、 Nd

(1.14)三者的相对电负性的差值中Al与Nd之间的差值最大^[29],可知Nd添加后会优先与Al反应形成高熔点的 $Al_{11}Nd_3$ 相。在0.2Nd合金中,微小颗粒状的 $Al_{11}Nd_3$ 相^[18]和短棒状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的弥散分布以及微观组织的细化使得合金表现出最好的抗热裂性能^[30-31],此时,微小的颗粒状 $Al_{11}Nd_3$ 相不足以阻塞补缩通道(图8l),对合金的负面影响非常小,合金凝固过程中产生的热裂纹能够及时被液相补缩愈合。随Nd含量继续增加,0.4Nd合金虽然晶粒细化,但 $Al_{11}Nd_3$ 相含量增加,且由颗粒状转变为针状形式存在于基体中。同时,组织中的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相含量因Al元素的消耗而降低,并以细小短棒状形式零散分布于基体中。结合液膜理论^[32]可知,此时0.4Nd合金中可用于凝固补缩的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相含量有限,同时针状的 $Al_{11}Nd_3$ 相可能会阻碍合金凝固后期的液相补缩(图8m),因此,合金的热裂敏感性提高。随Nd含量增加到0.6%,合金中出现大量弥散分布的 $Al_{11}Nd_3$ 相(图8n),此时合金相较于0.4Nd合金晶粒粗化,同时用于凝固补缩的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相含量进一步下降,但大量呈弥散分布的 $Al_{11}Nd_3$ 相可以阻碍晶界滑移和基面方向的位错滑移,使合金具有良好的晶粒热稳定

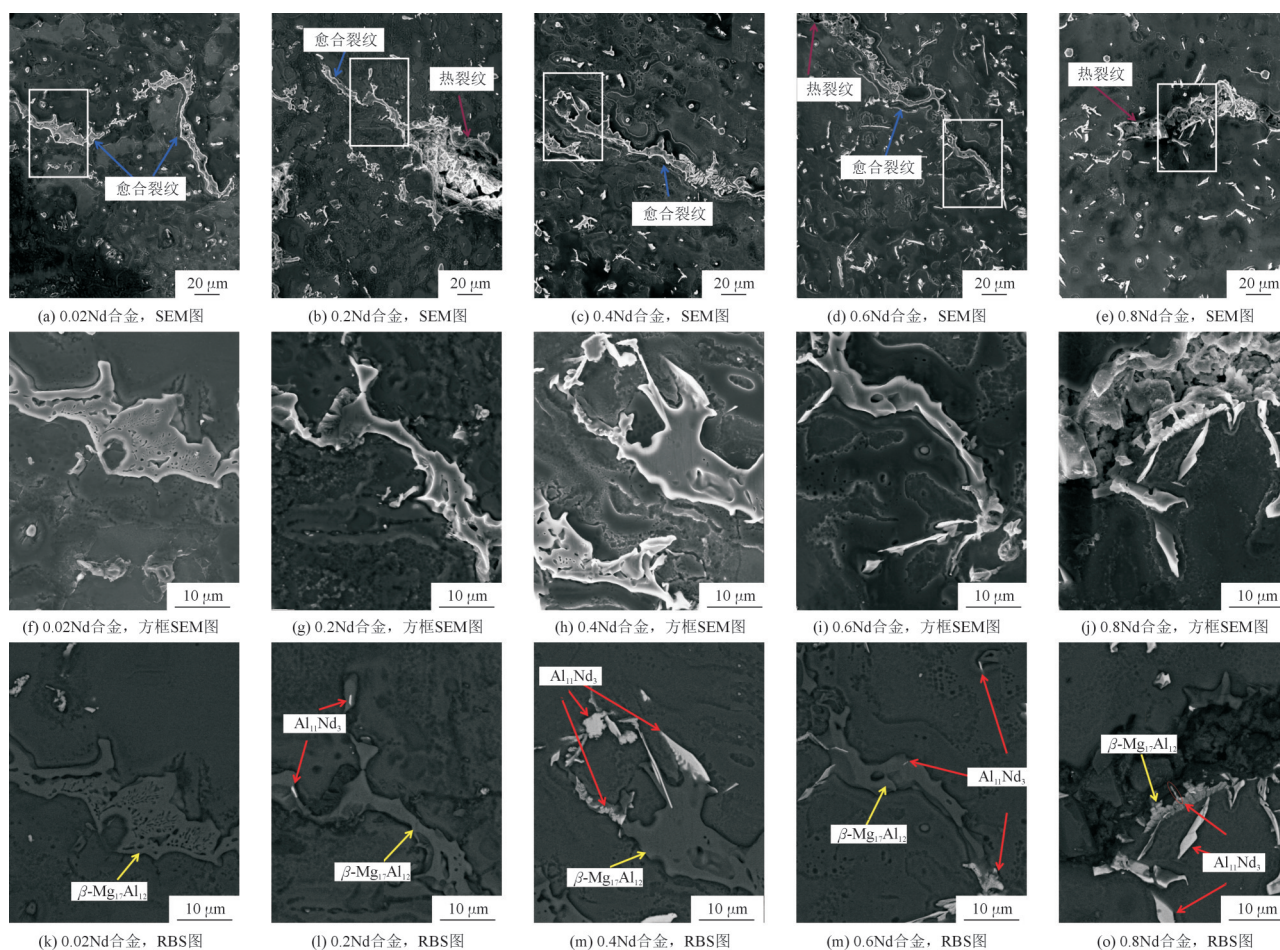


图8 AM50-Nd镁合金的热裂补缩形貌

Fig.8 Hot crack feeding morphologies of AM50-Nd magnesium alloy

性^[14,27],又降低了合金的热裂敏感性。综合作用下,0.6Nd合金的热裂敏感性相比0.4Nd合金略有升高。0.8Nd合金中,针状 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相聚集成更加粗大的块状相(图8o),在堵塞补缩通道、失去对基体强化作用的同时,因与基体较差的应变匹配更容易成为裂纹形核源^[33-34],进一步恶化合金的抗热裂性能,从而使得0.8Nd合金的热裂倾向最大。

3 结 论

(1)随Nd含量增加,合金组织先细化后粗化,但变化量不大。合金的热裂敏感性呈现先减小而后增大的变化趋势,在Nd含量为0.2%时,合金的热裂敏感性最小,在Nd含量为0.8%时,合金的热裂敏感性最大。

(2)随Nd含量增加,组织中的低熔点 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相含量逐渐减少,而新生成的高熔点 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相含量增加。在0.2Nd合金中,晶粒细化以及粗棒状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和微小颗粒状 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相弥散分布于基体中,使得合金呈现出最好的抗热裂性能。随Nd含量继续增加,0.4Nd合金中 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相转变为针状,堵塞液相补缩,提高了合金的热裂敏感性。0.6Nd合金中 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相增多并呈密集弥散分布,阻碍晶界滑移,提高了晶粒的热稳定性。0.8Nd合金中 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相进一步增多并偏聚为粗大的块状形貌,同时 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相偏聚于 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相附近,阻断了低熔点相的补缩通道,使得合金呈现出最差的抗热裂性能。

(3)在AM50镁合金中,组织细化可在一定程度上减小合金的热裂倾向,但当组织中大量 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相和少量 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相同时存在时,合金热裂倾向主要受组织中 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 相形貌与分布的影响。

参 考 文 献

- [1] 苗宏卫,黄华,杨立山.镁合金在商用航空发动机支架领域的应用分析[J].矿冶工程,2024,44(3):149-155.
- [2] 梁宇,张理达,贾卫.镁合金在机载电子设备中的应用与展望[J].科技与创新,2023(24):63-67.
- [3] ZHONG H G, LIN Z H, HAN Q Y, et al. Hot tearing behavior of AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(8): 3 431-3 440.
- [4] VINODH G, JAFARI-NODOOSHAN H R, LI D J, et al. Effect of Al content on hot-tearing susceptibility of Mg-10Zn-xAl alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, 51(4): 1 897-1 910.
- [5] SHANDLEY R, SRINIVASAN A, GANDI-APPALA N, et al. Predicting the hot tearing susceptibility of Mg-10Gd-xZn alloys from a perspective of thermal analysis and thermodynamic modeling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 945: 169 262.
- [6] 王峰,董海阔,王志,等. Mg-5Al-xCa合金的热裂行为[J].金属学报,2017,53(2):211-219.
- [7] 邱克强,陶思伟,热焱,等. Sr对Mg-7Al-2Ca-2Si-0.8Zn-0.4Mn铸造合金热裂倾向性的影响[J].铸造,2013,62(2):103-108.
- [8] 王峰,马德志,王志,等. AM50-x(Zn,Y)镁合金的显微组织、力学性能与凝固行为[J].金属学报,2016,52(9):1 115-1 122.
- [9] LIU Z, ZHANG S B, MAO P L, et al. Effects of Y on hot tearing formation mechanism of Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(10): 1 214-1 222.
- [10] QIN H, YANG G Y, ZHENG X W, et al. Effect of Gd content on hot-tearing susceptibility of Mg-6Zn-xGd casting alloys[J]. China Foundry, 2022, 19(2): 131-139.
- [11] DU X D, WANG F, WANG Z, et al. Effect of addition of minor amounts of Sb and Gd on hot tearing susceptibility of Mg-5Al-3Ca alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(2): 694-705.
- [12] LIU W J, JIANG B, YANG Q S, et al. Effect of Ce addition on hot tearing behavior of AZ91 alloy[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2019, 29(4): 453-456.
- [13] TAO C C, YUAN X G, LIU J, et al. Effect of La on hot cracking susceptibility of Al-Cu-Mg alloy[J]. Materials Research Express, 2019, 6: 105 802.
- [14] 崔鹏星. La和Nd复合添加AZ91镁合金显微组织调控及强化机理[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2023.
- [15] 魏子淇.几种Mg-Zn-RE(Y,Gd)系合金凝固行为对热裂机制的影响[D].沈阳:沈阳理工大学,2021.
- [16] YAO S, WANG Z, WANG F, et al. An investigation on hot tearing of AZ91 alloys with yttrium additions[J]. Materials Research Express, 2019, 6(1): 016 554.
- [17] LI X X, LIU S M, LIU Z, et al. Influence of Nd on hot tearing susceptibility and mechanism of Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10): 1-13.
- [18] 李慧. AM50-Nd铸造镁合金热裂行为研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2016.
- [19] ZHOU Y, MAO P L, ZHOU L, et al. Effect of long-period stacking ordered phase on hot tearing susceptibility of Mg-1Zn-xY alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020(4): 1 176-1 185.
- [20] WEI Z Q, MU W P, LIU S M, et al. Effects of Gd on hot tearing susceptibility of as-cast $\text{Mg}_{96.94}\text{-Zn}_1\text{-Y}_{(2-x)}\text{-Gd}_x\text{-Zr}_{0.06}$ alloys reinforced with LPSO phase[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 926: 162 743.
- [21] 黄晓峰,王渠东,曾小勤,等.稀土对AM50力学性能及高温蠕变的影响[J].中国稀土学报,2004(4):493-496.
- [22] 李威,许春香,王振强,等.微量Nd的添加对Mg-Al-Zn合金微观组织和高温力学性能的影响[J].锻压装备与制造技术,2011,46(3):77-79.
- [23] 王祯寅,徐玉召,李静媛.微量Nd对Mg-2Zn-0.2Sr-0.6Zr-xNd医用镁合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 238-1 244.
- [24] XIANG H C, LIU W J, WANG Q, et al. Improvement of hot tearing resistance of AZ91 Alloy with the addition of trace Ca[J]. Materials, 2023, 16(10): 3 886.
- [25] 刘权,肖祁陵,罗群,等. Nd和Gd对Mg-3Al合金的细晶行为及影响机理[J].中国有色金属学报,2023,33(3):653-664.
- [26] 赵源华,陈云贵,唐永柏,等. AZ91+(0~2.0)%La铸造镁合金的组织与力学性能[J].稀有金属材料与工程,2010,39(5):843-847.
- [27] 赵丽丽.铸造Mg-Y-Nd-Al合金组织演变及力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- [28] TERBUSH J R, SUZUKI A, SADDOK N D, et al. Dislocation substructures of three die-cast Mg-Al-Ca-based alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(10): 914-917.
- [29] 吴钰.电负性概念的新标度及其应用[J].产业与科技论坛,2020,19(7):42-43.
- [30] LI X X, LIU Z, WANG Y, et al. Investigation on hot tearing behavior and its mechanism of Mg-4.5Zn-xY-yNd($x+y=6$, $x=0, 1, 3, 6$) alloys[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 106 535.
- [31] 胡中潮,高忠玉,陈湖演,等. Mg-Al合金晶粒细化综述及未来展望[J].有色金属加工,2022,51(1):15-20.
- [32] 王业双,王渠东,丁文江,等.合金的热裂机理及其研究进展[J].特种铸造及有色合金,2000(2):48-50.
- [33] ESKIN D G, SUYITNO, KATGERMAN L. Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys[J]. Progress in Materials Science, 2004, 49(5): 629-711.
- [34] CAO G, HAYGOOD I, KOU S. Onset of hot tearing in ternary Mg-Al-Sr alloy castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, A41(8): 2 139-2 150.

(编辑:张正贺)