

EV31、WE43和DAM1高强镁合金热裂倾向性研究

王晓明¹ 徐琳² 蔡增辉¹ 康洪岩¹ 杨光山¹ 李勇军¹ 宁志良²

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150066; 2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要 选取3种高强铸造合金EV31、WE43和自主研发的DAM1作为研究对象,结合差热分析、ProCAST数值模拟及“T”型试样约束凝固试验,综合分析其热裂敏感性及其形成机制。结果表明, EV31合金的热裂敏感性最高, WE43次之, DAM1最低。EV31合金枝晶搭桥温度高、残余液体补缩能力差,热裂易于萌生并扩展; WE43合金虽具有较早析出的第二相,但残余液体含量有限,热裂难以完全抑制; DAM1合金第二相析出温度适中,含量最高,枝晶搭接温度最低,晶间搭桥数量多,补缩通道保持时间长,有效缓解凝固收缩应力的积累,显著降低了热裂倾向性。该研究揭示了第二相析出行为与热裂敏感性之间的内在关联,为新型Mg-RE合金的成分设计与铸造工艺优化提供参考。

关键词 Mg-RE合金;热裂倾向性;数值模拟;形成机制

中图分类号 TP311;TG146.22;TG249

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250041

Hot Tearing Susceptibility of EV31, WE43 and DAM1 High-strength Alloy

WANG Xiaoming¹, XU Lin², CAI Zenghui¹, KANG Hongyan¹, YANG Guangshan¹, LI Yongjun¹,
NING Zhiliang²

(1. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150066; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The hot tearing susceptibility and formation mechanism of EV31, WE43, and independently developed DAM1 high-strength alloys were investigated using thermal analysis, ProCAST numerical simulation, and constrained solidification tests with T-shaped specimens. The results reveal that EV31 alloy exhibits desirable hot tearing susceptibility, followed by WE43, and DAM1 possesses the lowest susceptibility. EV31 suffers from a high dendrite coherency temperature and poor feeding capability, leading to severe initiation and propagation of hot crack. WE43 benefits from early second-phase precipitation, while low residual liquid fraction limits crack healing. In contrast, DAM1 possesses the lowest dendrite coherency temperature and the highest second-phase content with moderate temperature, promoting abundant intergranular bridging and prolonged feeding channels, effectively alleviating shrinkage stress accumulation and suppressing hot tearing susceptibility. The intrinsic relationship between second-phase evolution and hot tearing behavior was elucidated, providing guidance for alloy design and casting process optimization of Mg-RE alloys.

Key Words: Mg-RE Alloys, Hot Tearing Susceptibility, Numerical Simulation, Formation Mechanism

镁合金凭借低密度、高比强度以及良好加工性能等特点,在航空航天、汽车制造等行业展现出巨大的应用潜力,成为轻量化材料研究的重点^[1-3]。在航空航天领域,使用镁合金制造零部件能够有效减轻飞行器质量,进而提升其燃油效率和性能^[4]。然而,镁合金凝固收缩量大,在凝固过程中极易形成热裂缺陷,不仅降低了铸件质量,导致产品废品率增加,还会影响生产效率,增加了生产成本,成为镁合金产业发展的瓶颈^[5-7]。

为解决镁合金热裂敏感性高的问题,合金化手段

成为研究热点,其中添加稀土元素备受关注。稀土元素独特的电子结构使其在镁合金中能够发挥细化晶粒、净化熔体和改善合金组织等重要作用,从而达到改善镁合金热裂敏感性的目的^[8-10]。SU X等^[11]研究了低频交变磁场如何影响EV31(Mg-3Nd-1Gd-0.5Zr)合金的热裂敏感性。结果表明,增强磁场强度可同时起到缩小合金的凝固温度区间和枝晶搭接温度的作用,显著增加了EV31合金的补缩时间,有利于热裂敏感性的降低。SU X等^[12]还探究了浇注温度和模具温度等工

收稿日期:2025-01-22;修订日期:2025-03-19

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,徐琳,蔡增辉,等. EV31、WE43和DAM1高强镁合金热裂倾向性研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(4):518-524.

WANG X M, XU L, CAI Z H, et al. Hot tearing susceptibility of EV31, WE43 and DAM1 high-strength alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 518-524.

艺参数对 WE43(Mg-4Y-3Nd-0.5Zr)合金的热裂敏感性的影响。研究发现,相对于模具温度,浇注温度对 WE43合金的热裂敏感性影响更大。由于 WE43合金的残余共晶液相分数较低,且不可避免存在 Y_2O_3 夹杂物,因此其热裂敏感性较高。GUO X 等^[13]研究表明,添加 Ca 降低了 WE43合金的热裂敏感性,其中在 WE43-2.0Ca 合金中,热裂敏感性最低,这与大量 Mg_2Ca 相的析出有关。

EV31合金由于具有较高的力学性能和良好的铸造性能,在机匣类铸件中大量使用,其特点是结构复杂、内置油路多、壁厚突变大,铸件力学性能及冶金质量要求高。随着该类铸件结构设计轻量化要求的不断提升,亟需开发具有更高性能的 Mg-RE 合金。作为新研发的高性能 Mg-Gd-Nd-Zn-Zr 合金,DAM1合金力学性能高于 EV31合金,与 WE43合金相当,但由于不含稀土 Y,铸件的冶金质量高。因此,全面研究该合金的铸造工艺性能具有积极意义。

鉴于此,本研究深入分析 EV31、WE43 和 DAM1合金的热裂形成机制,旨在优化 DAM1合金铸造工艺、降低复杂铸件热裂产生的可能性、提高铸件合格率,并为相关合金材料的开发提供参考。

1 试验方法与设备

1.1 试验材料及熔炼

采用 EV31、WE43 和 DAM1 合金,熔炼时将成品铸锭放入涂好 BN 的不锈钢坩埚中,在高纯 N_2 和 SF_6 保护气氛(体积比为 99.8:0.2)的电阻炉中于 $720\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温,待不锈钢坩埚内合金完全熔化后进行搅拌、除渣,继续在 $720\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 15 min,随后将熔体浇入预热至 $320\text{ }^\circ\text{C}$ 的约束杆热裂试验模具中进行凝固。每种合金进行 3 次重复试验以减小误差。3 种合金的名义化学成分见表 1。

表 1 EV31、WE43 和 DAM1 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of EV31, WE43 and DAM1 alloys %

合金	w_B					
	Nd	Gd	Y	Zn	Zr	Mg
EV31	2.6~3.1	1.0~1.7	—	0.2~0.5	0.42	余量
WE43	2.4~4.0	—	3.7~4.3	—	0.42	余量
DAM1	2.4~3.0	5.5~6.4	—	0.1~0.5	0.42	余量

1.2 热裂测试及双热电偶差热分析系统

热裂倾向性测试装置见图 1。测试原理及方法详见参考文献^[14]。测试合金凝固曲线的差热分析系统示意图见图 2^[15]。该系统可以获得凝固过程液相分数、第二相析出温度、合金凝固析出量、枝晶搭接温度等特征值。

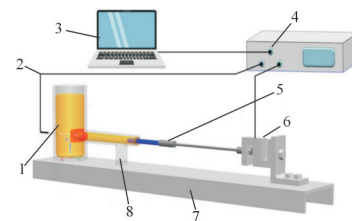


图 1 热裂检测装置示意图^[14]

Fig.1 Detection device for hot tearing^[14]

1. 铸件 2. 热电偶 3. 计算机 4. 数据采集系统 5. 约束杆
6. 传感器 7. 钢构平台 8. 模具

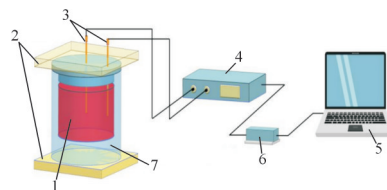


图 2 差热分析系统示意图^[15]

Fig.2 Schematic diagram of differential thermal analysis system^[15]

1. 金属液 2. 石棉绝热板 3. 热电偶 4. 数据采集系统 5. 计算机
6. 数模转换器 7. 石墨坩埚

1.3 显微组织观察

采用 Hitachi S-3400N 型扫描电镜(SEM)分析合金的显微组织和断口形貌。从合金试样上切取边长为 10 mm 的立方块,首先用不同目数的砂纸按照从粗到细的顺序进行打磨。打磨时,先在一个方向打磨,之后旋转 90° 继续打磨,直到试样划痕覆盖上一个方向的划痕,之后用更细的砂纸继续打磨,再使用抛光剂进行抛光处理抛至试样表面无任何划痕。抛光后的试样采用体积分数为 4% 的硝酸酒精进行腐蚀。

2 试验结果分析

2.1 热裂敏感性的预测

EV31、WE43 和 DAM1 合金的凝固曲线见图 3。通过合金的凝固曲线可以得到温度与固相分数的关系,以及合金的凝固区间,还可以用来进行合金热裂敏感性的预测。

目前,通常采用裂纹敏感系数(Cracking susceptibil-

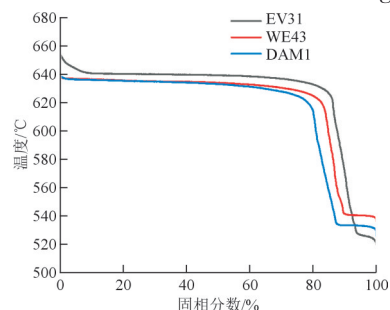


图 3 EV31、WE43 和 DAM1 合金的凝固曲线

Fig.3 Solidification curves of EV31, WE43 and DAM1 alloys

ity coefficient, C_{sc}) 指数来预测或量化合金的热裂敏感性。

基于 Clyne-Davies 模型^[16], C_{sc} 定义为:

$$C_{sc} = \frac{T_v}{T_R} = \frac{T_{99} - T_{90}}{T_{90} - T_{40}} \quad (1)$$

式中, T_v 为液相分数在 1%~10% 之间的温度; T_R 为液相分数在 10%~60% 之间的温度。

EV31、WE43 和 DAM1 合金的凝固特征强度及表 2 EV31、WE43 和 DAM1 合金的凝固特征温度及 C_{sc} 值

Tab.2 Solidification characteristic temperature and C_{sc} of EV31, WE43 and DAM1 alloys

合金	$T_{40}/^{\circ}\text{C}$	$T_{90}/^{\circ}\text{C}$	$T_{99}/^{\circ}\text{C}$	C_{sc}
EV31	639.5	571	523.9	0.687
WE43	634.4	541.4	539.4	0.022
DAM1	633.8	533.3	531.5	0.018

注: T_{40} 是液相率为 60% 的温度; T_{90} 是液相率为 10% 的温度; T_{99} 是液相率为 1% 时的温度。

C_{sc} 值见表 2。可以看出, EV31 合金的热裂敏感性最高, WE43 其次, DAM1 合金的热裂敏感性最低。

通过 ProCAST 软件数值模拟得到热裂敏感指数 (Hot tearing indicator, I_{HT}), 也可以预测合金的热裂敏感性。该模块来源于 Gurson 提出的在凝固过程中判定合金热裂倾向的应变驱动模型^[17-19]。浇注温度为 720 °C, 模具温度为 320 °C, 采用 ProCAST 软件中的 HTI 模块模拟的 EV31、WE43 和 DAM1 合金的热裂倾向性见图 4。在合金铸件与横拉杆相交的热节位置处, 热裂倾向性较大, 见白色圆圈。通过该部位的放大图可以看出, 热节的上半部的热裂倾向性大于下半部。图 5 为 EV31、WE43 和 DAM1 合金铸件在图 4 热节区域的平均 I_{HT} 值和等效应力。采用 ProCAST 数值模拟的热裂敏感性预测结果为: EV31 > WE43 > DAM1, 与 Clyne-Davies 模型预测结果一致。

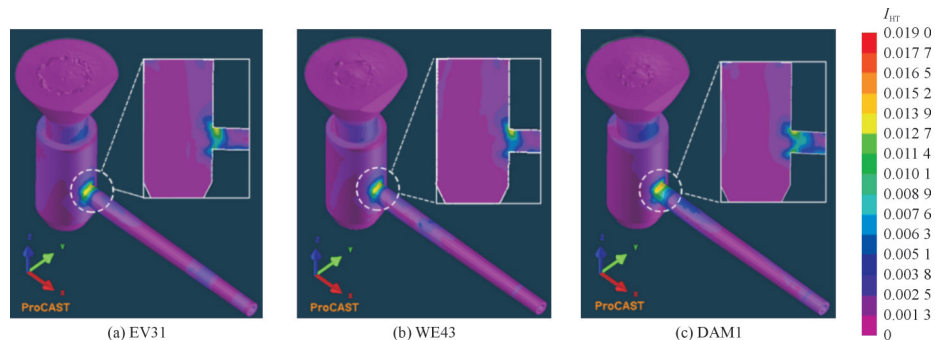


图 4 不同合金的热裂模拟结果

Fig.4 Hot tearing simulation results of different alloys

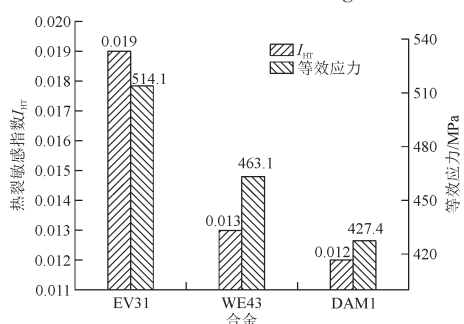


图 5 不同合金的平均热裂敏感指数和等效应力

Fig.5 Average hot tearing susceptibility index and equivalent stress of different alloys

2.2 热裂行为测试

图 6 为 EV31、WE43 和 DAM1 合金在约束条件下“T”形试样热节处表面裂纹形貌。从图 6a 可以看出, EV31 合金在热节处发生完全断裂, 表明合金具有较高的热裂敏感性。从图 6b 和图 6c 可以看出, WE43 合金和 DAM1 合金在热节处均未出现明显的裂纹, 表明这两种合金都具有较低的热裂敏感性。通过比较热裂实测与模拟结果可以发现, CSC 模型和数值模拟的 I_{HT} 指

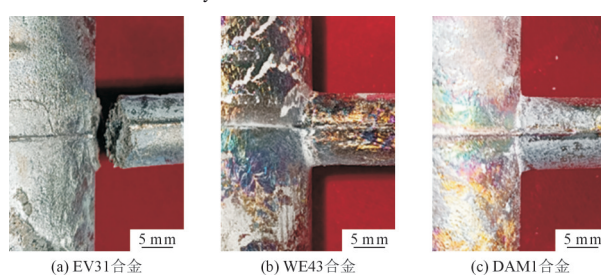


图 6 热节处表面裂纹宏观形貌

Fig.6 Macro morphologies of cracks on hot spot

数及等效应力值较好地预测了 3 种合金的热裂敏感性: EV31 合金的热裂敏感性远高于 WE43 和 DAM1 合金, 而 WE43 和 DAM1 合金的热裂敏感性接近。

图 7 为凝固过程中 EV31、WE43 和 DAM1 合金的“T”形试样收缩应力 (F)-时间 (t) 曲线和凝固温度 (T)-时间 (t) 曲线。从图 7a 中可以看出, EV31 合金在 549 °C 出现了明显的应力下降, 随时间延长应力上升。当热裂萌生温度较高时 (远高于第二相析出温度), 枝晶表面的液膜使得枝晶间具有一定的结合力。根据热裂形成的液膜理论, 凝固过程中热节处的应力最大, 当应力超过该温度下液膜强度时将会产生热裂, 而此时处于

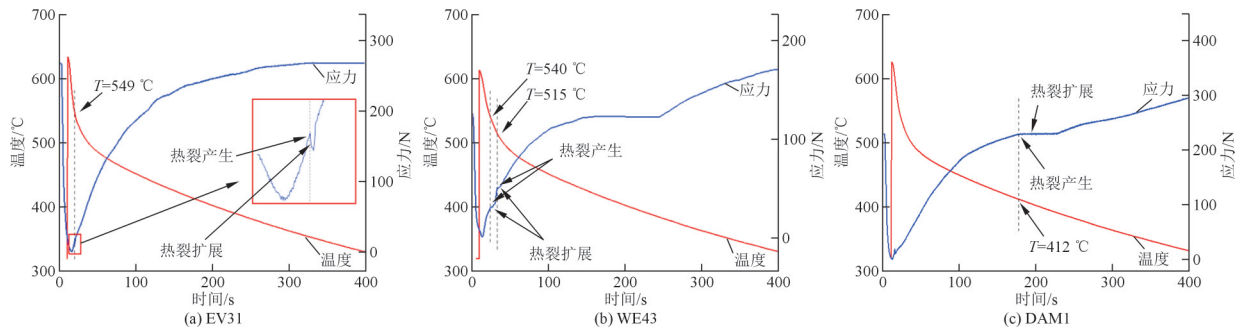


图7 不同合金应力-温度-时间曲线

Fig.7 Stress-temperature-time curves of alloys

凝固末期,枝晶间的残余液相含量较低,且枝晶间的流动阻力较大,热裂就会萌生并扩展。对于EV31合金来说,枝晶搭接温度较高,第二相含量较低,因此合金在热节处发生了完全断裂。从图7b中可以观察到,温度为540℃和515℃时,WE43合金的应力-时间曲线显示出两个应力下降过程。WE43合金中第二相析出温度为540℃,并具有较高的第二相含量,这意味着热裂萌生时,没有凝固的残余液相能够及时填充裂纹,随着凝固收缩应力的发展,第二相能够及时析出建立晶间搭桥,阻碍裂纹的萌生及进一步扩展。应力平台也能很好地反映热裂是从萌生到扩展的演化过程,平台的出现通常意味着第二相析出形成晶间搭桥阻碍裂纹扩展的过程。对于DAM1合金,其应力-时间曲线中只观察到一次应力下降情况,即在温度为412℃时,见图7c。DAM1合金中的第二相析出温度较高,在凝固过程中

合金的第二相析出在晶间形成搭桥的时间早于热裂萌生的时间。当合金中的第二相析出温度较高,且高于其热裂萌生温度时,热裂产生的机理主要由晶间搭桥为主^[20]。另外,DAM1合金中的第二相含量最高,表明晶间搭桥数量最多,能够对两侧晶间形成强有力的钉扎效应。晶间搭桥的强度高于液膜,意味着DAM1合金具有较低的热裂敏感性。

图8为EV31、WE43和DAM1合金的显微组织及EDS分析。可以看出,3种合金组织都主要由 α -Mg基体和各合金中不同类型的第二相组成。从图8a和图8d并结合图8g可以看出, EV31合金中的第二相为Mg-Zn-RE(Nd, Gd)相。晶界处的第二相一般为亮白色条状,而三晶粒交叉处的第二相形貌呈亮白色鱼骨状。这种大尺寸鱼骨状第二相极易在析出时形成应力集中而使枝晶分离,若残余液相补缩不及时,就会形成热裂纹。

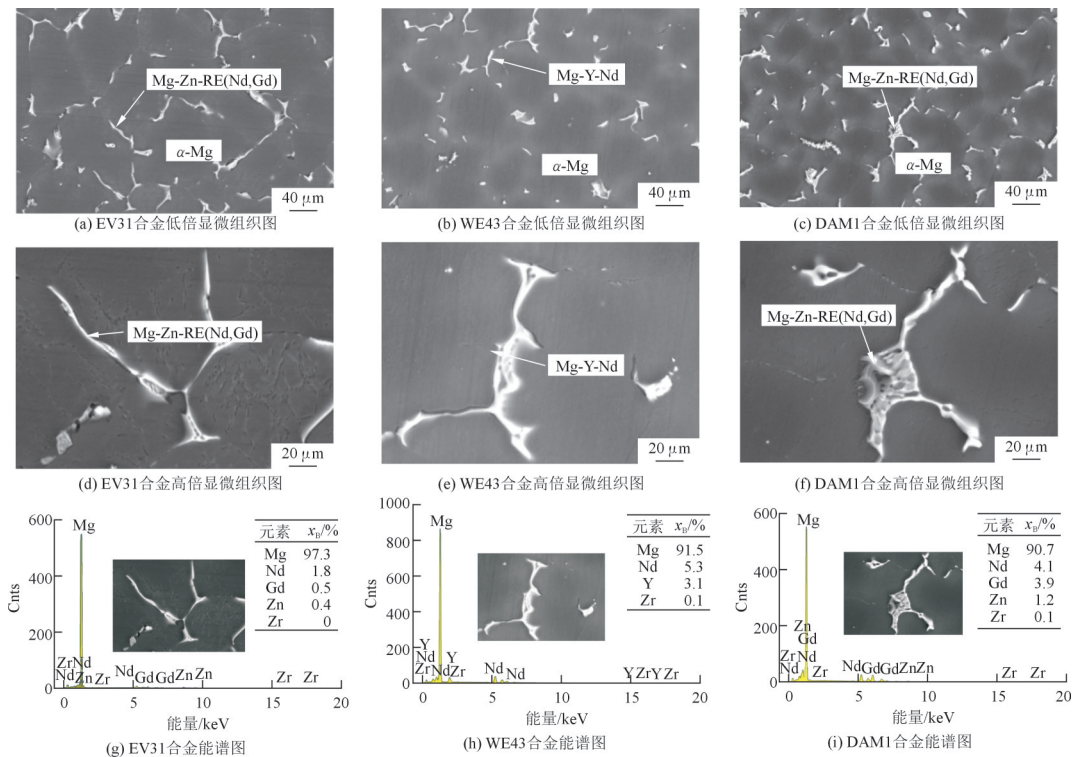


图8 不同合金的显微组织及能谱图

Fig.8 Microstructure and energy spectrum of alloys

从图8b和图8e并结合图8h可以看出,WE43合金中的第二相为Mg-RE(Y,Nd)相,形貌呈亮白色块状鱼骨结构,弥散分布于基体内。从图8c和图8f并结合图8i可以看出,DAM1合金中的第二相为Mg-RE(Nd,Gd)-Zn相,形貌呈亮白色条状鱼骨结构,弥散分布于基体内。弥散分布的第二相在凝固时对收缩应力累积的贡献较低,这使合金凝固过程中的凝固收缩应力发展较为延缓,降低了合金骨架对抗收缩应力的难度,降低了合金的热裂敏感性。

3 结果讨论与分析

3.1 合金的凝固路径

图9为EV31、WE43和DAM1合金的凝固曲线。图中红色线段代表凝固温度,蓝色线段是凝固温度曲线求一阶导数得到的,黑色线段是凝固温度一阶导数的基线。合金的凝固析出温度和特征参数统计见表3。从图9a可以看出,当凝固温度达到639℃时,EV31

合金开始析出 α -Mg母相,随后继续凝固,于525℃时析出第二相。随着凝固进行,当温度降低至634℃时, α -Mg母相开始大量析出,随后温度降低至540℃时开始析出第二相,见图9b。合金在634℃时析出 α -Mg母相,在凝固温度降低至533℃时析出第二相,见图9c。可以看出,WE43合金中的第二相最先析出,能够率先形成晶间搭桥而钉扎两侧晶界,强化晶间结合力。DAM1合金第二相(Second phase)放热峰的面积(S_{sp})与 α -Mg母相的面积比值最高($S_{sp}/S_{\alpha-Mg}=0.16$),这意味着该合金残余液相补缩含量最高,而且第二相凝固时释放的潜热量也最高。较高的凝固潜热释放量可以延缓枝晶演化,降低凝固收缩应力(应变)的累积速度,还能够提高合金液在凝固末期的流动性(降低熔体黏度),其能够与含量较高的残余液相共同填充固化收缩以及愈合萌生的热裂纹。虽然,DAM1合金第二相析出温度略低于WE43合金,但其晶间搭桥数量较多,也可以有效强化晶间结合力,对抗凝固收缩应力导致的枝晶分离。

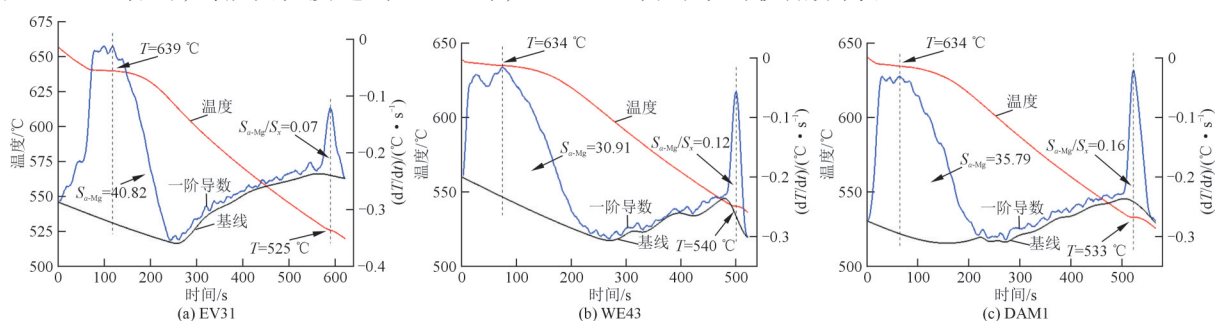


图9 3种合金的凝固曲线

Fig.9 Solidification curves of alloys

从表3中可以看出,EV31、WE43和DAM1 3种合金的凝固区间分别为136.9、102.2和115.1℃。可见,第二相析出温度的提高有效地缩短了合金的凝固区间。DAM1合金的凝固区间略高于WE43合金,这是由于第二相析出温度的降低,同时含量增多延长了凝固时间。通常,凝固区间越短,即合金在凝固糊状区(枝晶搭接后,合金骨架能够传递应力时被认为是糊状区上边界)停留的时间越短,合金具有越低的热裂敏感性。但热裂是一个复杂的现象,合金中存在较多含量的第二相时,第二相析出行为对热裂敏感性的影响同样不可忽视。

图10为3种合金的枝晶搭接温度 T_{coh} 和相对应的

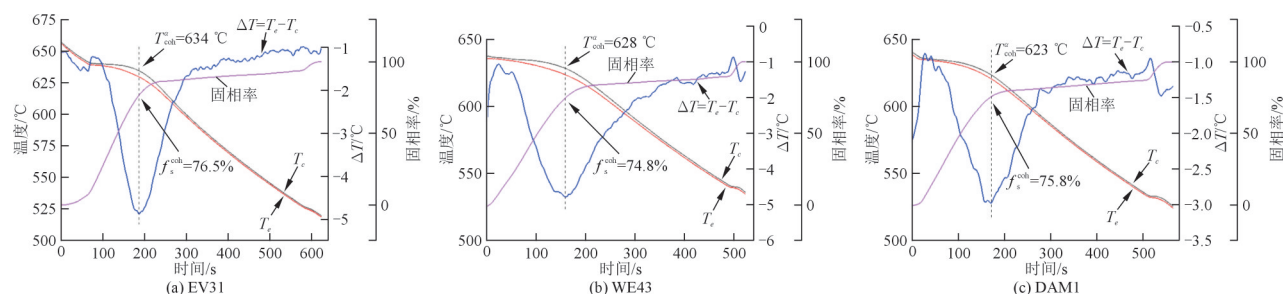
表3 EV31、WE43和DAM1合金的凝固特征参数

Tab.3 Solidification characteristic parameters of EV31, WE43 and DAM1 alloys

合金	$T_{\alpha-Mg}/^{\circ}C$	$T_{第二相}/^{\circ}C$	$S_{sp}/S_{\alpha-Mg}$	$\Delta T/^{\circ}C$
EV31	639	525	0.07	136.9
WE43	634	540	0.12	102.2
DAM1	634	533	0.16	115.1

固相分数 f_s^{coh} 曲线。EV31、WE43和DAM1合金的 T_{coh} 值分别为634、630和623℃。DAM1合金的 T_{coh} 最低,表明 α -Mg形成的温度最低,即枝晶出现搭接时的温度较低。随着合金组元及成分的改变, α -Mg析出温度的降低也会延缓 α -Mg枝晶的生长,改善残余液体的补缩通道,降低合金的热裂敏感性。

EV31、WE43和DAM1合金的 f_s^{coh} 分别为76.5%、81.4%和75.8%。当枝晶搭接并压紧后,合金骨架开始传递应力,凝固进入热裂高风险区(糊状区)。若此时合金具有较高的固相率意味着能够在第二相析出后抵抗更高的凝固收缩应力,具有更低的热裂敏感性。在凝固收缩过程中,如果晶界两侧的“桥”发生断裂,热裂将在断裂处萌生^[21]。在3种合金中,DAM1合金具有最低的 T_{coh} 和较高的 f_s^{coh} ,这表明该合金残余液相自由补缩区间最长,而 f_s^{coh} 低于其他两种合金可能是由于凝固末期残余液相含量增多所引起的。WE43合金的 f_s^{coh} 略高于EV31合金,这会改善其较早对抗凝固收缩应力的能力。

图10 不同合金的 T_{coh} 和相应的 f_s^{coh} 曲线Fig.10 T_{coh} and corresponding f_s^{coh} curves of different alloys

3.2 合金的热裂机制

图11为EV31合金的断口形貌。箭头处为断口的主要组成部分,有分离的枝晶、被撕裂的液膜和褶皱等。由于液膜能够提供的晶间结合力很低,一旦收缩应力超过其抵抗能力时,热裂就会萌生。当第二相析出时,合金枝晶分离和开裂扩展程度均已较大,形成含量较少的搭桥已经无法有效阻碍裂纹的扩展。相反,第二相析出会加速凝固收缩应力的发展,进一步促进热裂纹的扩展。因此,合金的热裂断口形貌中并未观察到明显的搭桥痕迹。基于此,在3种合金中,EV31合金的热裂敏感性最高,并且热裂机理主要遵循于液膜理论。

图12为合金热节处裂纹附近的显微组织。从图12a可以发现,EV31合金残余液体的补缩能力很差,

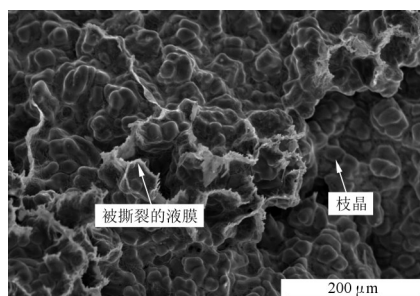


图11 EV31合金的断口形貌

Fig.11 Fracture morphologies of EV31 alloy

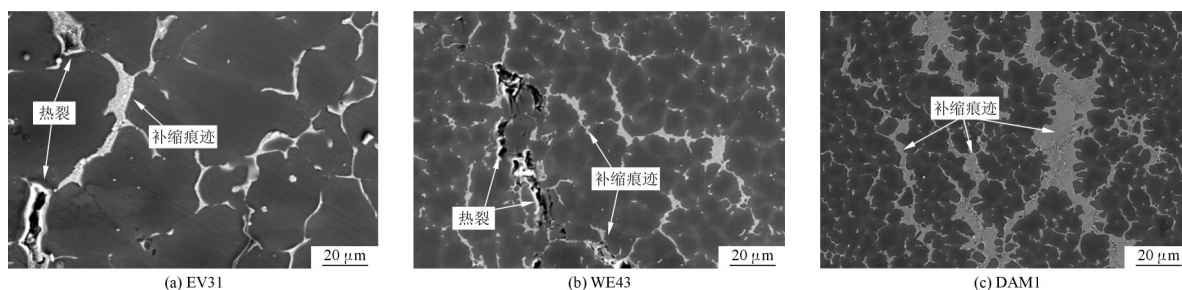


图12 3种合金裂纹附近的显微组织

Fig.12 Microstructure of alloys near cracks

4 结论

(1)3种合金中热裂敏感性由高至低的顺序为:EV31>WE43>DAM1。

连尺寸较小的二次裂纹也无法有效愈合,显微组织中裂纹尖端附近几乎观察不到补缩的痕迹,这导致该合金铸件发生了程度较大的热裂。EV31合金的枝晶搭桥温度最高,自由补缩通道封闭得最早,从而使得残余液相较早地被分割成多个独立的小熔池,流动受限而无法及时补充固化收缩和愈合萌生的热裂纹。该合金熔体的流动性较差,第二相含量较少,都使得残余液相补缩能力较差。另外,发展速度较快的枝晶会提高凝固收缩应力累积速度,进一步提高合金的热裂敏感性。WE43合金热节处存在细小裂纹,见图12b,并且可以观察到较多的补缩痕迹,这意味着该合金残余液体的补缩能力有所提高,能够部分愈合萌生的二次裂纹,有效阻碍裂纹的进一步扩展。另外,WE43合金熔体流动性要好于EV31合金,而且枝晶搭接温度的降低和残余液相含量的增加并耦合良好的流动性,会降低合金的热裂敏感性。DAM1合金热节处没有热裂纹出现,河流状补缩花样的数量和宽度最高,这意味着在凝固过程中尺寸较大的热裂纹可以被补缩能力很强的残余液相愈合,裂纹无法继续扩展。另外,数量较多的补缩痕迹也可以反映出热裂萌生后,残余液相的补缩对抗热裂纹扩展的情况,见图12c。基于此,DAM1合金具有最低的热裂敏感性。

(2)DAM1合金具有最低的应力演化速率,这降低了其热裂萌生温度。

(3)DAM1合金具有最低的枝晶搭接温度和最多的第二相析出含量,使得合金凝固收缩时得到充分的

补缩并有效缓解合金骨架收缩,从而降低合金的热裂倾向性。

参 考 文 献

- [1] 苏阳,郝亮,李扬欣,等. 航空航天用高性能镁合金的研究进展[J]. 空天防御, 2024, 7(6): 1-11.
- [2] 孙庆亚. WE43A 镁合金凝固过程偏析及热裂研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [3] 李蒙,李辉,张旭亮,等. 双级固溶处理对 Mg-4Nd-1Gd-0.3Zn-0.6Zr 合金的显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2024, 73(11): 1554-1560.
- [4] WU G H, WANG C L, SUN M, et al. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(1): 1-20.
- [5] 王峰,白盛巍,王志,等. Mg-Zn 系合金热裂行为的研究进展[J]. 金属学报, 2024, 60(6): 743-759.
- [6] 伍迪灿,王云峰,杜文博,等. Mg-xGd-1Er-0.5Zr 合金热裂敏感性研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 375-385.
- [7] 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: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [8] 曾奕琦. 稀土成分对 EA43 合金组织、力学及导热性能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [9] 张林林,郭俊卿,董帅,等. Mg-Gd-Y-Zn-Zr 镁合金的 LPSO 相演化及其强化机制[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(12): 185-194.
- [10] 李伟莉,刘涛,赵春博,等. 锻后热处理对 Mg-6.5Gd-3.5Y-1Zn-0.5Zr 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59(6): 90-94.
- [11] SU X, FENG Z J, HUANG J F, et al. Influence of a low-frequency alternating magnetic field on hot tearing susceptibility of EV31 magnesium alloy[J]. China Foundry, 2021, 18(3): 229-238.
- [12] SU X, FENG Z J, LI Y F, et al. Effect of pouring and mold temperatures on hot tearing susceptibility of WE43 magnesium alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15(2): 576-586.
- [13] GUO X, ZHAO H, SONG J F, et al. Effect of Ca on hot tearing susceptibility of WE43 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1002: 175451.
- [14] 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.
- [15] MU W P, WEI Z Q, MAO P L, et al. Effects of Ni content on solidification behavior and hot tearing susceptibility of LPSO-reinforced Mg-4Y-xNi alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(3): 2670-2687.
- [16] CLYNE T W, DAVIES G J. The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems[J]. British Foundryman, 1981(74): 65-73.
- [17] ZHOU Y, MAO P L, WANG Z, et al. Experimental investigation and simulation assessment on fluidity and hot tearing of Mg-Zn-Cu system alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117259.
- [18] 李龙飞. 铸造铝合金凝固糊状区力学特性及热裂缺陷预测研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [19] SHAO L X, LI X F, ZHAO G P, et al. Experimental investigation and simulation assessment on fluidity and hot tearing susceptibility of Al-Li-Cu-X alloy: The role of microalloying elements [J]. Materials Characterization, 2024, 218: 114469.
- [20] LIU S M, WEI Z Q, LIU Z, et al. Effect of Zn content on hot tearing susceptibility of LPSO enhanced MgZn_xY₂Zr_{0.06} alloys with different initial mold temperatures [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 904: 163963.
- [21] WEI Z Q, MU W P, LIU S M, et al. Effects of Gd on hot tearing susceptibility of as-cast Mg_{96.94}Zn₁Y_(2-x)Gd_xZr_{0.06} alloys reinforced with LPSO phase [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 926: 166895.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

