

ZM6 稀土镁合金铸件荧光线性缺陷形成机理

王晓明¹, 宋志^{2,3}, 张伦勇^{2,3}, 韩永华¹, 康洪岩¹, 沈红先^{2,3}, 邱子傲^{2,3},
蔡增辉¹, 韩朝伟¹, 赵银虎⁴, 曹福洋^{2,3}, 孙剑飞^{2,3}

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

(2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(3. 哈尔滨工业大学 精密热成形重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(4. 内蒙古第一机械集团有限公司, 内蒙古 包头 014032)

摘要: 当前稀土镁合金作为一种新型高强轻合金材料在航空航天领域的应用日益广泛, 但其铸造缺陷问题日益凸显。荧光线性缺陷是该类合金典型缺陷, 其形成机制尚不明确, 缺乏精准调控方法。本工作以砂型低压铸造 ZM6 (Mg-Nd-Zr) 合金机匣构件为研究对象, 系统表征荧光线性缺陷的成分、形貌与微观结构, 结合充型流场数值模拟揭示缺陷演化规律。结果表明, 该合金荧光线性缺陷由具有多尺度、多形态特征的双层氧化膜形成。氧化膜以疏松 MgO 为基体, 包含 Nd₂O₃ 颗粒。膜体韧性差, 易破碎, 在氧化膜周围形成小尺寸氧化夹杂。充型流场分析表明, 熔体充型过程中存在的汇流与回流现象造成熔体表面氧化膜折叠并卷入熔体, 进而产生双层氧化膜, 导致荧光线性缺陷。

关键词: ZM6 机匣铸件; 荧光缺陷; 氧化膜; 充型流场; 低压铸造

中图分类号: TG146.22; TG146.4⁵

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)12-3215-07

1 引言

稀土镁合金(Mg-RE 合金)因其低密度、优异的比强度和刚度以及高耐热性等特点, 被认为是航空航天轻质结构部件的首选材料^[1-3]。随着航空航天装备性能要求提升, 相关铸件的质检要求日益严苛。多种型号稀土镁合金大型复杂铸件在荧光检测中铸件表面存在严重的荧光线性缺陷。这些缺陷分布在内壁平面、凸板、加强筋和端框等多种部位, 导致铸件无法满足设计要求, 甚至报废, 成为制约新一代稀土镁合金航空航天铸件应用发展的瓶颈问题, 亟待解决^[4-7]。

近几十年来, 该类问题受到以 Campbell 为代表的国内外学者高度关注。荧光线性缺陷是一类由双层氧化膜构成的呈现一维线性特征的氧化型缺陷^[8]。实验研究证实, 双层膜不仅存在于镁合金中, 也广泛存在于铝合金、铝青铜、高温合金等其他合金体系中^[9]。目前的工作着重在双层氧化膜缺陷的结构与成分表征和形成机制上, 研究者普遍认为此类膜状夹杂缺陷的成分应为金属基体元素的氧化物。铝、镁合金铸件中氧化膜缺陷的成分多为 Al₂O₃ 和 MgO, Zn-4Al 和 ZA27 合金中双层膜中存在 Al 元素和 O 元素富集, 因而推测其成分也为 Al₂O₃, 这表明

氧化性元素在此类膜状缺陷形成中的重要性^[10-11]。为避免合金基体干扰膜体成分的分析, Song 等人^[12-13]近开发出铸件氧化膜缺陷化学萃取分离技术, 从镍铝青铜合金铸件中分离出了双层膜类物质, 分析表明虽然其成分皆为 Al₂O₃, 但其相态结构复杂。较小厚度的膜由非晶态 Al₂O₃ 组成, 较大厚度的膜则由晶态 Al₂O₃ 构成, 即铸造过程中膜状物质的生成具有非平衡凝固特征。此外, 在 ZL101A 合金铸件中, 双层膜内远离及基体的表层成分以 MgO、MgAl₂O₄ 为主, 形成一个 Mg 含量由外向内逐渐降低、Al₂O₃ 含量逐渐升高的过渡层, 说明氧化膜在生成过程中与基体间存在一定的原子扩散交换与相竞争行为^[14]。现有理论通常认为, 熔炼过程中熔体表面自然生成的氧化膜在浇注过程中因液面剧烈湍流卷入型腔而形成铸件内部膜体物质^[8]。然而, 该机制难以解释目前在航空航天大型复杂镁合金铸件研制生产中普遍采用的反重力铸造工艺铸件中依然存在双层膜缺陷的事实。在反重力铸造(低压、差压)过程中, 升液管入口置于熔体液面以下, 浇注过程中熔体液面平稳下降, 可以有效控制和避免表面氧化膜卷入型腔^[15]。因此, 此类氧化膜缺陷实为充型过程中高温金属熔体与铸型表面或型腔气氛接触发生化学反应而在接触面上形成的二次氧化膜。当其卷入

收稿日期: 2025-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(U24B2052)

作者简介: 王晓明, 男, 1990 年生, 博士, 高级工程师, 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060, E-mail: wxm7256@163.com

熔体或残留于铸件表面并嵌入皮下,即形成双层膜氧化型线性缺陷。

综上所述,传统的夹杂理论难以解释稀土镁合金氧化型线性缺陷的形成机制。此类缺陷的成分、分布、形态与合金元素类型,尤其是稀土元素及其含量密切相关,还受到复杂型腔结构等因素的影响。因此,本工作针对砂型差压铸造成形 ZM6 机匣构件在表面荧光检测过程中出现的线性缺陷进行微观结构和化学成分分析,明晰合金元素尤其稀土元素对线性缺陷形态及分布的影响。利用铸造模拟软件 ProCAST 对机匣低压铸造过程进行模拟仿真,分析充型流场特征,探讨稀土镁合金铸件表面荧光线性缺陷形成原因和机理,厘清铸件结构对线性缺陷产生的影响。该研究成果可以促进对稀土镁合金荧光线性缺陷这一新型铸造冶金缺陷的认知,支撑稀土镁合金大型复杂构件在航空航天轻量化中的应用。

2 实验

选用 ZM6 稀土镁合金机匣铸件为研究对象。镁合金材料熔炼采用 Mg-30Nd 中间合金、Mg-30Zr 中间合金、纯 Zn 以及纯 Mg。当熔体温度降至 $745\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后浇注,采用哈尔滨工业大学研制的 VISF 25 型号大型复杂构件反重力精密铸造装置和酚醛树脂砂型,并基于低压铸造工艺成形机匣铸件。

采用电感耦合等离子体原子发射光谱方法(ICP-AES)确定合金化学成分,结果如表 1 所示。

选用荧光检测方法对 ZM6 镁合金铸件进行渗透检测,首先将荧光渗透剂涂在清洁、干燥的铸件表面,然后去除表面多余的荧光剂,施加显像剂,渗入铸件表面开口缺陷中的渗透剂被吸出,在紫外线照射下缺陷显示出黄绿色。

表 1 ZM6 合金实际化学成分

Table 1 Actual chemical composition of ZM6 alloy (wt%)

Nd	Zn	Zr	Mg
2.4	0.6	0.5	Bal.

采用线切割机进行荧光缺陷部位取样,经过清洗和喷金后使用 TESCAN AMBER 扫描电镜(SEM)及其配备的 X 射线能谱仪(EDS)对铸件表面荧光条纹缺陷进行形貌和成分分析。缺陷横截面形态和结构经过抛光和喷金后进行扫描能谱分析。采用三点弯曲打开线性缺陷,清洗喷金后对缺陷表面形貌和组成同样进行扫描能谱分析,采用 OLS3000 激光共聚焦显微镜(日立 OLYMPUS 公司)表征缺陷表面形貌。利用 DX-2700X 射线衍射仪分析线性缺陷表面相结构。

为明确稀土镁合金复杂铸件荧光线性条纹缺陷的形成机理,采用 ProCAST 软件进行铸造过程数值模拟^[16]。砂型材料选择树脂砂。低压铸造工艺模式,浇注温度为 $745\text{ }^{\circ}\text{C}$,升液速率为 1 kPa/s ,充型速率为 0.8 kPa/s ,保压压力为 35 kPa ,保压时间 870 s 。铸件与砂型、铸件与冷铁、冷铁与砂型之间的传热系数设定为分别取 500 、 1000 和 $750\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,砂型表面空冷。

3 结果与分析

3.1 ZM6 镁合金铸件的荧光线性缺陷形貌与结构

ZM6 镁合金铸件荧光检测结果如图 1 所示,铸件表面荧光线性缺陷由点线状构成,长度 $1\sim 5\text{ cm}$ 不等。荧光线性缺陷主要出现在铸件凹槽顶端(图 1a)和连接筋上表面(图 1b)。

图 2 为 ZM6 铸件表面荧光线性缺陷的 SEM 照片,可

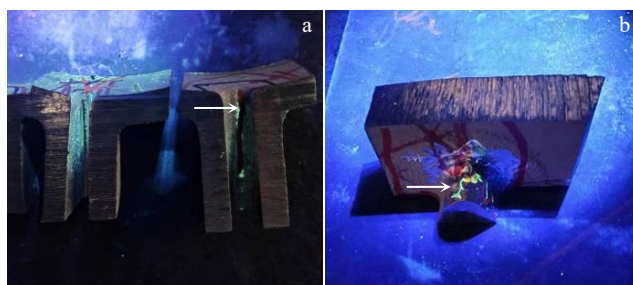


图 1 ZM6 铸件荧光检测结果

Fig.1 Fluorescence inspection results of ZM6 casting: (a) top of the slot and (b) connecting rib

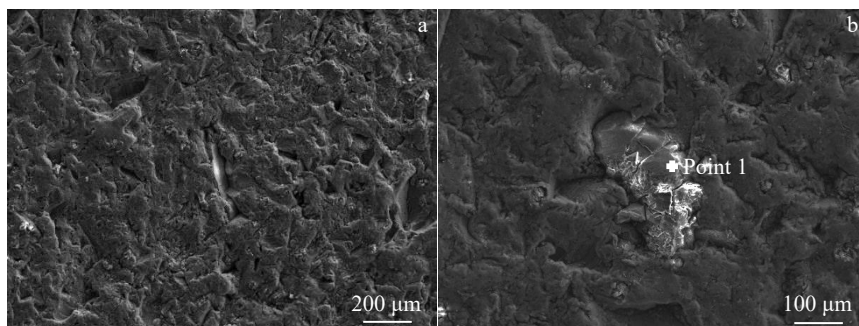


图 2 ZM6 铸件表面荧光线性缺陷形貌

Fig.2 Morphologies of linear defects on ZM6 casting surface: (a) crack-like defects and (b) cluster-like defects

见缺陷主要呈现为表面裂纹。能谱分析线性缺陷成分为镁和钕的氧化物,如表2所示。

如图 3a 所示,线状缺陷与铸件表面相互连接,由于连续折叠而呈现不规则形状,由铸件表面向基体内部延伸,破坏了基体的结构连续性。图 3b 显示线性缺陷周围分布有数量众多的氧化夹杂,尺寸数十至数百微米,EDS 图谱显示成分为镁和钕氧化物,为破碎的氧化膜。

线性缺陷局部放大后的形貌如图 4 所示,可见线性缺陷具有双层氧化膜结构,两层氧化膜之间没有冶金结合。EDS 图谱显示氧化膜富含 Mg、Nd 和 O,推测为 MgO 和 Nd₂O₃ 复合膜。

本研究进一步观察了样品的断裂表面,以分析线性缺陷处氧化膜的形貌与结构。图 5 为 ZM6 荧光缺陷试样断口,在断裂表面的两侧都可以看到几乎覆盖整个断口

的对称深色膜状物质。膜状物质(点2)与基体(点3)的成分如表3所示,缺陷表面膜为MgO和Nd₂O₃。

图 6a 是缺陷表面形貌的放大照片,可见氧化膜表面存在大量折叠褶皱。三维形貌分析表明缺陷表面落差很大,探测范围内最低点和最高点相差 140 μm,缺陷表面分布丰富的褶皱和沟壑,可见形成过程中氧化膜受到熔体的动态作用(图 6b)。图 6c 为 ZM6 荧光缺陷氧化膜高倍形貌,氧化膜由暗色基体和亮颗粒组成,表面疏松,具有纳米层片结构。氧化物层的元素面扫描结果如图 6d 所示,暗色基体富含 Mg,而明亮颗粒中富含 Nd,可以推断暗色基体的成分是 MgO,明亮的颗粒是 Nd₂O₃。因此 ZM6 铸件线性缺陷氧化膜结构为疏松 MgO 膜基体上分布颗粒状 Nd₂O₃。

3.2 ZM6 镁合金铸件线性缺陷氧化膜的形成机制

X 射线衍射分析表明氧化膜主要由 MgO 组成,伴有少量 Nd₂O₃(图 7)。XRD 图谱中的 α-Mg 峰源于基体。

ZM6 线性缺陷氧化膜的形成过程如图 8 所示,初始阶段合金熔体暴露在型腔气氛中,根据热力学理论,Mg 和 Nd 主要合金元素与氧气发生以下反应^[17-18]:

表2 图2b中点1处EDS结果

Table 2 EDS results at point 1 marked in Fig.2b (wt%)

Nd	Zn	Zr	O	Mg
13.11	0.31	1.42	15.45	Bal.

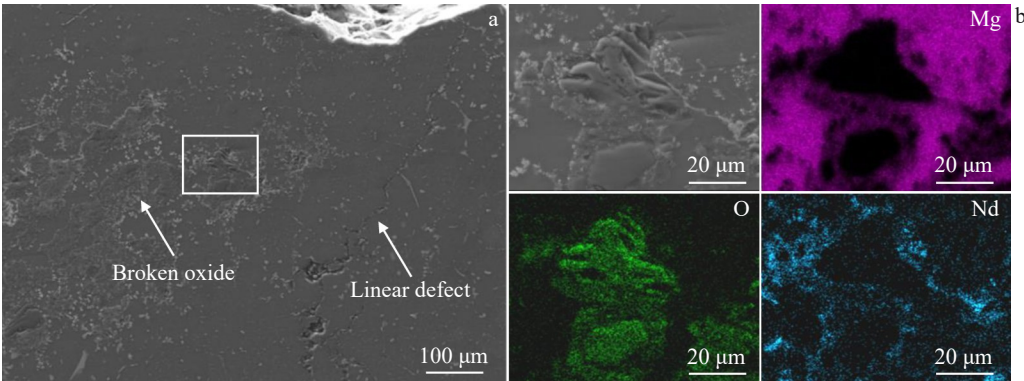


图3 ZM6 铸件裂纹状线性缺陷及周围破碎氧化膜的截面形貌及破碎氧化膜EDS面分布图
Fig.3 Cross-sectional morphology of crack-like linear defects and the surrounding broken oxide film in ZM6 casting (a) and EDS mappings of broken oxide film (b)

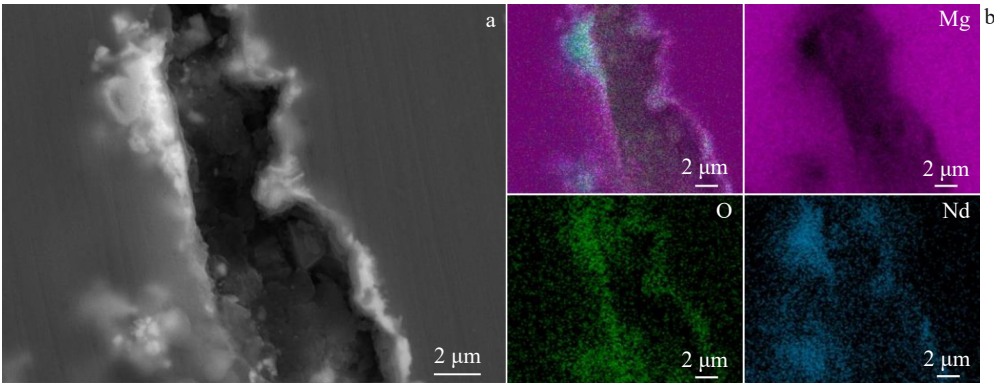


图4 荧光线性缺陷双层氧化膜结构及 EDS 面分布图
Fig.4 High-magnification morphology of double oxide film structure of fluorescent line defect (a) and corresponding EDS element mappings (b)

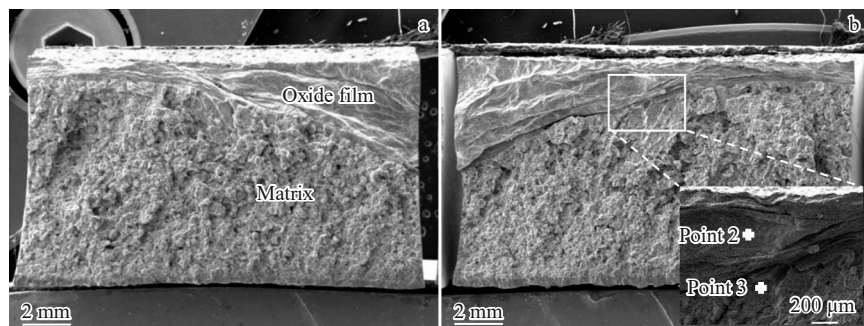


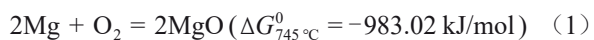
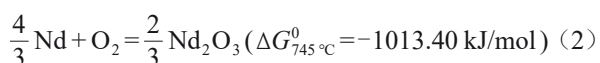
图5 ZM6荧光缺陷试样两侧断口形貌及氧化膜与基体分界处放大形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of ZM6 fluorescent defect sample: (a) left fracture surface; (b) right fracture surface and enlarged morphology of the boundary between oxide film and matrix

表3 图5b中氧化膜和基体的化学成分

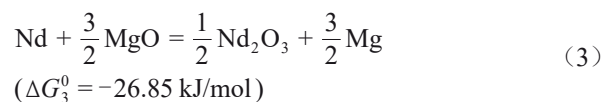
Table 3 Chemical composition of oxide film and matrix marked in Fig.5b (wt%)

Point	Nd	Zn	Zr	O	Mg
2	10.16	0.52	0.93	12.87	Bal.
3	2.98	0.62	0.54	-	Bal.



在熔体表面迅速形成大量 MgO 和少量 Nd₂O₃ 组成的复合氧化层,这个过程由反应速率控制,并由每种氧化物的吉布斯自由能 (ΔG) 决定。由于 Mg 的 Pilling-

Bedworth 比低于 1 (0.81), 形成的氧化层是松散的。在第二阶段,熔体中 Nd 与 MgO 之间发生反应^[19]:



该反应发生在熔体中,因此在计算吉布斯自由能的变化时应考虑熔体中反应物的实际活度。在现有条件下,该反应的吉布斯自由能的变化可以用以下公式表示:

$$\Delta G_3 = \Delta G_3^0 + RT \ln \frac{\alpha_{\text{Mg}}^{3/2}}{\alpha_{\text{Nd}}} \quad (4)$$

其中, ΔG_3 为吉布斯自由能, ΔG_3^0 为反应标准吉布斯自由能, R 为理想气体常数, T 为温度, α_{Mg} 为 Mg 的活度, α_{Nd} 为 Nd 的活度。

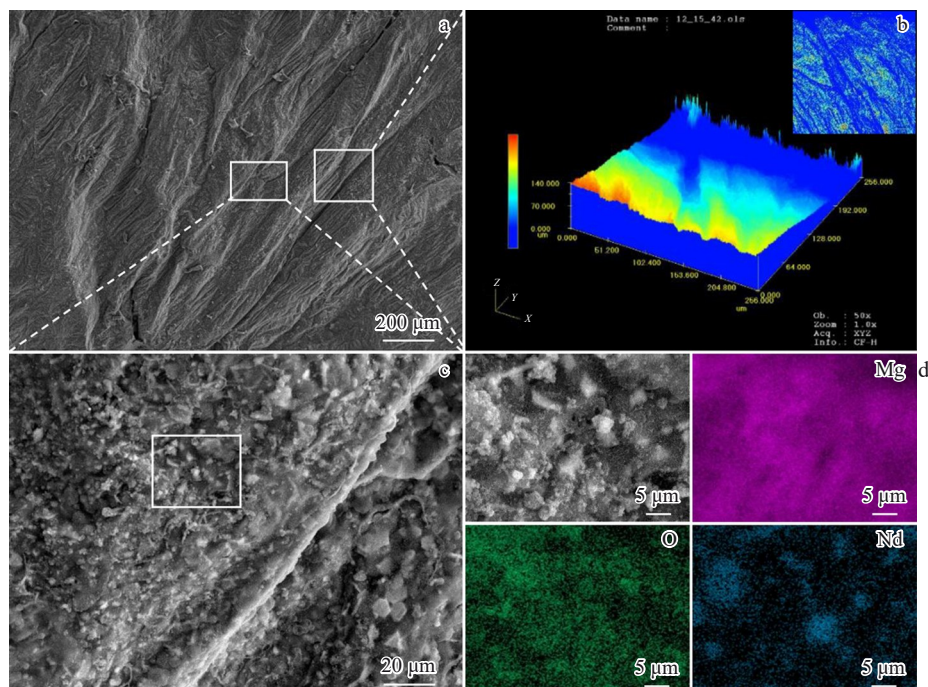


图6 ZM6线性缺陷氧化膜的表面分析

Fig.6 Surface analysis of the oxide film of ZM6 linear defect: (a) low-magnification morphology; (b) CLSM three-dimensional morphology; (c) high-magnification morphology; (d) SEM image and corresponding EDS element mappings

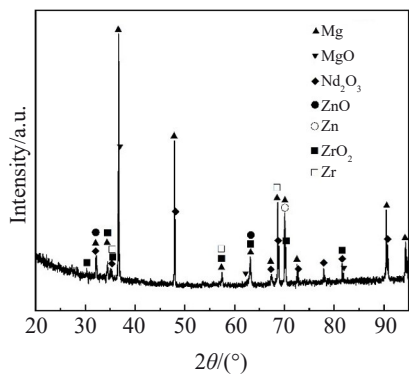


图 7 ZM6 线性缺陷氧化膜 XRD 图谱

Fig.7 XRD pattern of oxide film of ZM6 linear defect

为简化计算模型,假设Mg的活度为1,并以Nd在熔体中的原子分数直接替代其活度。根据这一假设,可以计算出该反应中Nd元素的平衡浓度在745℃时为57 wt%,远高于熔体中Nd的浓度。因此,第二阶段熔体中Nd元素与MgO的反应可以忽略不计。另一方面,大量MgO的形成使得MgO/ Nd₂O₃复合膜疏松。氧气仍可透过氧

化膜继续与熔体中的Mg和Nd反应,使氧化层逐渐增厚。

3.3 荧光线性缺陷形成机理分析

ZM6 机匣铸件挖槽顶部是荧光线性缺陷多发区域,该部位充型过程模拟结果如图9所示。首先对速度场分析,金属液由挖槽两侧进行充型,两侧金属液在挖槽顶端汇流,速度增加。图9c为挖槽汇流区域速度场放大图,两侧金属液速度相反,发生汇流;图9d显示该部位氧化夹杂分布情况,挖槽顶部汇流位置存在较多氧化夹杂,线性缺陷分布在汇流中线。

图10展示了挖槽顶部线性缺陷形成过程的模拟结果。在该图中,红色代表熔融金属,蓝色表示腔内空气,绿色则表示覆盖在金属表面的氧化膜。挖槽两侧金属液前沿均覆盖一层氧化膜,当金属液汇流时两层相互干燥的氧化膜彼此搭接形成双层氧化膜缺陷^[20]。图10c和10d所示汇流后挖槽顶端氧化物浓度高,与图1a中检测出线性缺陷分布在挖槽顶部汇流中线处一致。

综上所述,ZM6 铸件中线性缺陷的形成过程如图11

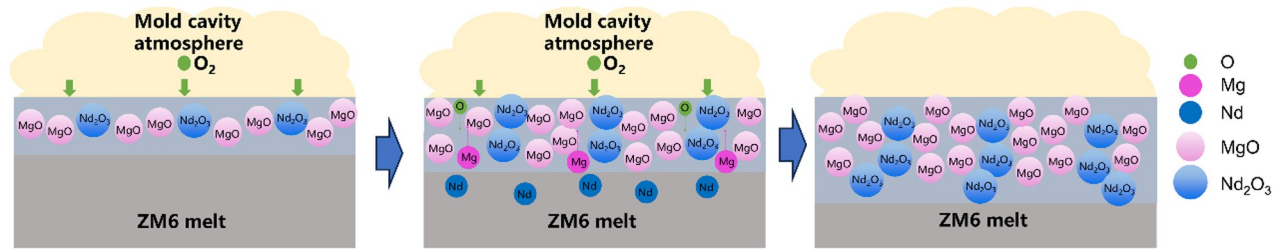


图 8 ZM6 线性缺陷氧化膜的结构演化示意图

Fig.8 Schematic diagram of structural evolution of oxide film of ZM6 linear defect

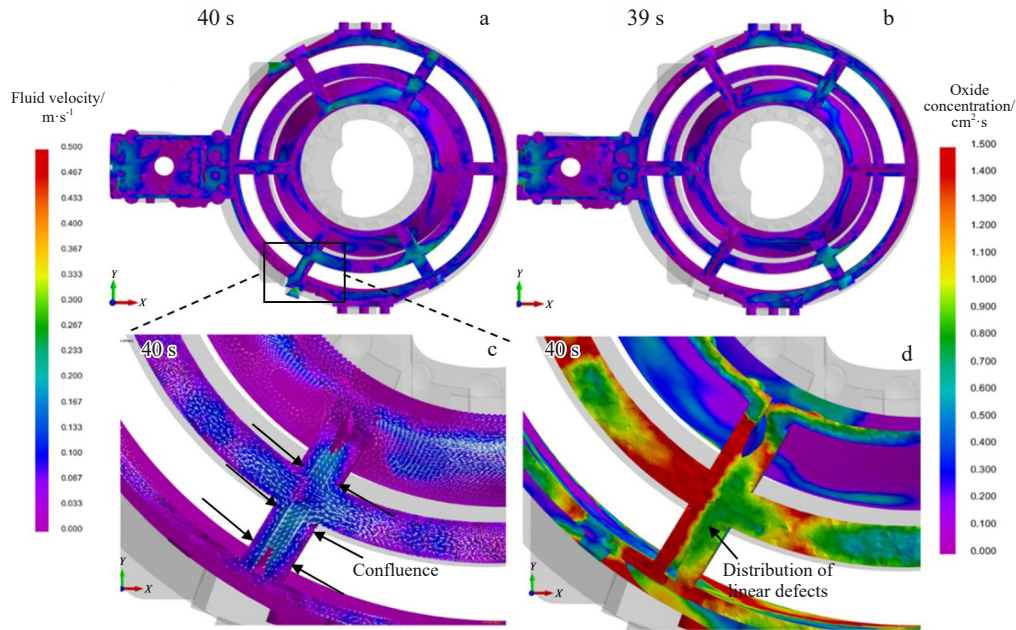


图 9 ZM6 铸件充型过程模拟结果

Fig.9 Simulation results of solidification process of ZM6 casting: (a-c) flow velocity field; (d) distribution of oxide concentration

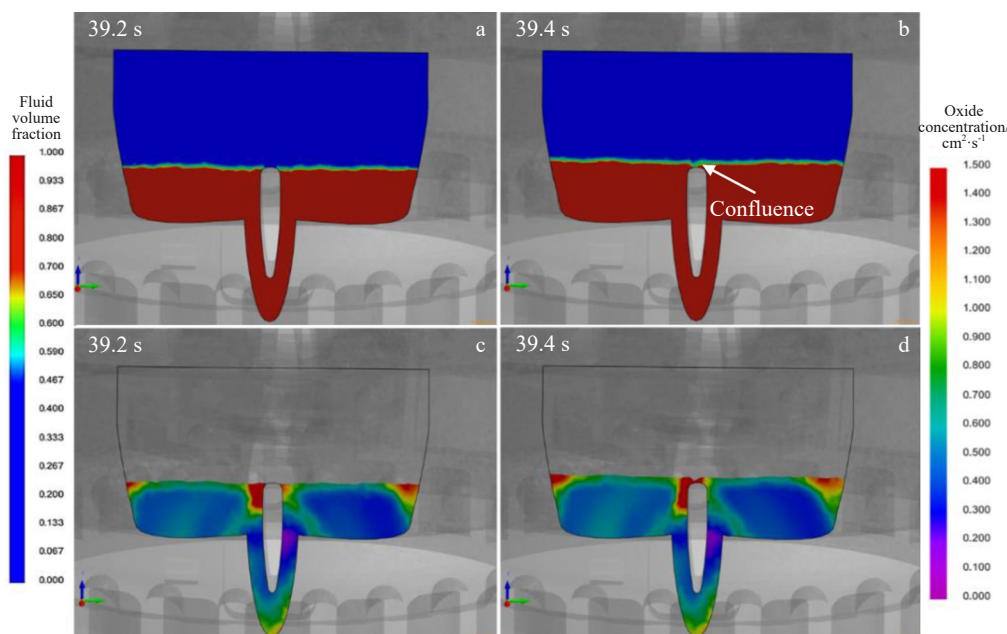


图 10 ZM6 铸件充型时固液界面与氧化物浓度分布

Fig.10 Solid-liquid interface during filling (a-b) and distributions of oxide concentration (c-d)

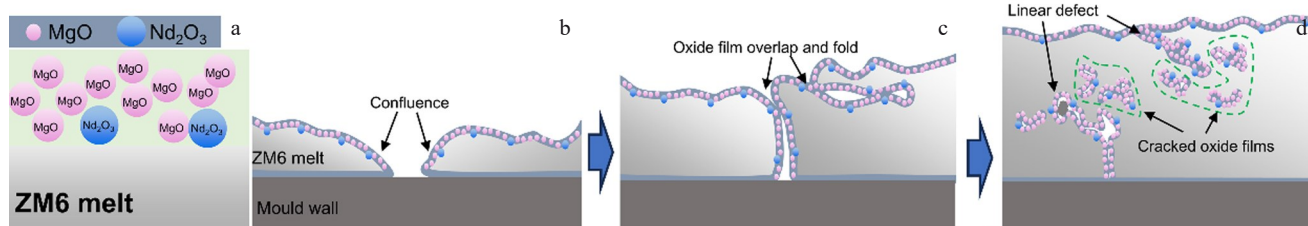


图 11 充型过程线性缺陷缺陷的形成示意图

Fig.11 Schematic diagrams of the formation of linear defects during the filling process: (a) oxide film structure; (b) confluence; (c) oxide film folding; (d) formation of linear defects and surrounding broken oxide film

所示。如前所述,ZM6 中形成以 MgO 为基体的松散氧化膜(图 11a),据文献报道,MgO 弹性模量为 200~300 GPa,剪切模量为 130~160 GPa^[21],膜体韧性差、易破碎,如图 11b~11d 所示,当熔体在充型过程发生汇流时,表面氧化膜能够相互搭接或折叠,进而卷入并残留于铸件内部,形成大尺寸线性缺陷。另一方面,氧化膜亦可在充型过程中发生破碎,形成分布于线性缺陷周围的小尺寸氧化夹杂物。

4 结论

1) ZM6 合金机匣铸件表面荧光线性缺陷为双层氧化膜,ZM6 铸件线性缺陷氧化膜结构为 MgO 膜基体分布颗粒状 Nd₂O₃。

2) 线性缺陷的形成机制可归结为:在充型过程中,多股熔体汇流导致其表面氧化膜发生折叠并被卷入,附着于铸型壁面上,最终在铸件表面形成缺陷。

3) ZM6 合金的 MgO/Nd₂O₃ 复合氧化膜结构疏松,韧

性差,易于破碎,既可形成线性缺陷,亦可形成小尺寸氧化夹杂物。

参考文献 References

- [1] Yang Y, Xiong X M, Chen J *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2021, 9(3): 705
- [2] Shi Z Z, Chen H T, Zhang K *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2021, 9(2): 416
- [3] Du Wenbo(杜文博), Wu Yufeng(吴玉峰), Nie Zuoren(聂祚仁) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(9): 1345
- [4] Xiao Lv(肖 旅), Zou Wenbing(邹文兵), Liu Yingzhuo(刘颖卓) *et al. Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2015(1): 18
- [5] Cui Enqiang(崔恩强), Sun Hao(孙 浩), Liu Yingzhuo(刘颖卓) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2019, 39(11): 1223
- [6] Chen Ge(陈 舸), Jiang Shanyao(江善尧), Xiao Lv(肖 旅) *et al. Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2021,

- 51(4): 159
- [7] Dai Xuemei(戴雪梅), Su Qingfeng(苏清风), Zhu Xiaoxing(朱晓星). *Foundry*(铸造)[J], 2011, 60(10): 994
- [8] Campbell J, Li Dianzhong(李殿中), Li Yiyi(李依依). *Castings*(铸造原理)[M]. Beijing: Science Press, 2011
- [9] Campbell J, Tiryakioglu M. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2012, 43: 902
- [10] Divandari M, Mehrabian M. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*[J], 2017, 14(3): 34
- [11] Hanieh S, Ramin R. *International Journal of Cast Metals Research*[J], 2023, 36(1–3): 45
- [12] Song H Q, Zhang L Y, Cao F Y et al. *Applied Surface Science*[J], 2021, 541: 148491
- [13] Song Heqian(宋和谦). *Formation and Evolution of Bifilm Defects in Casting Processes*(铸造过程中的双层氧化膜缺陷形成与演化)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021
- [14] Song H Q, Zhang L Y, Cao F Y et al. *Materials Letters*[J], 2021, 285: 129089
- [15] Liu Shanguang(刘闪光). *Hydrodynamics of Mold Filling and Entrainment of Oxide Film in Counter-gravity Casting*(反重力铸造充型过程的水力学特征和氧化膜卷入机制)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [16] Cui Yuwei(崔雨薇), Pan Yue(潘 玥), Duan Zhiqiang(段志强) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2026, 55(5): 1348
- [17] Zhao X Y, Ning Z L, Li Z Q et al. *Journal of Materials Science*[J], 2018, 53: 11091
- [18] Wang X M, Zeng X Q, Wu G S et al. *Applied Surface Science*[J], 2007, 253(22): 9017
- [19] Aydin D, Bayindir Z, Pekguleryuz M. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 584: 558
- [20] Hsu F Y, Yang Y M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(4): 825
- [21] Tan Q Y, Mo N, Lin C L et al. *Corrosion Science*[J], 2018, 132: 272

Formation Mechanism of Fluorescent Linear Defects in ZM6 Mg-RE Alloy Castings

Wang Xiaoming¹, Song Zhi^{2,3}, Zhang Lunyong^{2,3}, Han Yonghua¹, Kang Hongyan¹, Shen Hongxian^{2,3}, Qiu Ziao^{2,3},
Cai Zenghui¹, Han Chaowei¹, Zhao Yinhu⁴, Cao Fuyang^{2,3}, Sun Jianfei^{2,3}

(1. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd, Harbin 150060, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(3. Key Laboratory of Precision Hot Forming, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(4. Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd, Baotou 014032, China)

Abstract: Rare-earth magnesium alloys, as a new type of high-strength lightweight structural material, have become increasingly widespread in the aerospace industry. However, issues related to casting defects have grown more prominent. Fluorescent linear defects are a typical defect found in this class of alloys. Nevertheless, their formation mechanism remains unclear, and there is a notable lack of precise control methods to mitigate them. This study systematically characterized the composition, morphology, and microstructure of fluorescent linear defects in a sand-cast low-pressure ZM6 (Mg-Nd-Zr) alloy casing component, and revealed the defect evolution mechanism through numerical simulations of the filling flow field. The results show that fluorescent defects are formed by multi-scale and multi-morphology double-layer oxide films. Meanwhile, the oxide film in ZM6 consists of porous MgO as the matrix, containing Nd₂O₃ particles. This film exhibits poor toughness and is prone to fragmentation, resulting in the formation of small-sized oxide inclusions around the oxide film. Combined with the analysis of the casting structure and filling flow field, it is found that the convergence and backflow of the melt during the filling process cause the oxide film on the melt surface to fold and be incorporated, thereby generating double-layer oxide film that can be displayed by fluorescent inspection.

Key words: ZM6 casing parts; fluorescent defects; oxide films; filling flow fields; low-pressure casting

Corresponding author: Zhang Lunyong, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Precision Hot Forming, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: zhangly@hit.edu.cn; Cao Fuyang, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Precision Hot Forming, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: caofuyang@hit.edu.cn