1116 1116 FOUNDRY 有色合金

大规格 7A04 铝合金铸锭 裂纹缺陷的研究

崔晓晴¹,孙小涵²,贺永东¹,赵亿坤¹

(1. 新疆大学物理科学与技术学院,新疆乌鲁木齐 830046;2. 山东能源数字科技有限公司,山东济南 250000)

摘要: 采用电磁铸造法制备880 mm规格直径的7A04铝合金铸锭,通过工业CT扫描、SEM和 EDS等检测分析手段研究了该铝合金铸锭中裂纹缺陷的形成原因和抑制措施,同时对缺陷附 近区域微小缺陷的数量与分布进行了分析。结果表明,该铸锭出现裂纹的实质为Al₂O₃(氧化 物)和少量Fe元素富集,位置靠近铸锭中心区域。观察微小缺陷其数量随半径尺寸的增大而 略有减少,且大于40 μm的缺陷占比最大。通过分析,微小缺陷的形成与裂纹缺陷的形成有 关。在铸造前从合金熔体中去除夹杂物和气体氢,完善除气、扒渣等工艺过程是避免这些缺 陷的方法。

关键词: 7A04铝合金铸锭; 裂纹; Al₂O₃; Fe元素富集

7xxx系(Al-Zn-Mg-Cu)铝合金是在Al-Zn-Mg元素的基础上添加Cu元素而发展 起来的热处理可强化合金,具有强度高、成形性能优良和焊接性能优良等特点,是 航空航天的主要结构材料^[1-2]。7A04铝合金是7XXX系铝合金中的一类,以Zn为主要 元素,广泛应用在航空航天、兵器等特殊领域^[3],对铸造工艺、检测体系的要求极其 严格。近些年来随着铸造工艺的日益优化,应用于企业中的大部分铝合金铸锭均可 满足供应需求^[4],但个别批次却仍存在缺陷。为了进一步提高铸锭生产质量,需要采 用合理的分析设备和完善的检测流程对缺陷进行实质分析,从而改进铸锭铸造的工 艺过程,提高生产效率。

关于铝合金中缺陷的检测与分析已有学者做过研究。Emmanuel、Akshay等人通 过计算感应炉中的数据建立了夹杂物的流体动力学模型,研究了关于熔体中夹杂物 运动的具体问题^[5],展示了在不同充液速率条件下的试验结果。李秋梅、刘昌明等人 针对6060铝合金表面氧化后的异色现象^[6],运用晶间腐蚀法对其显微组织、微区表面 和耐蚀性能进行了分析,并从熔铸和挤压工艺等方面分析了缺陷产生的原因,提出 了合理性预防建议。Pablo、Nicolas等人提出了一种寻找缺陷群(尺寸和空间分布) 的潜在特征的方法^[7],确定了它们在应力应变存在时对疲劳行为的影响。

目前,对于铝合金缺陷的研究大多聚焦于表面位置缺陷或小规格铝材。由于铸锭的尺寸大、检测流程复杂、精度要求高等原因,大规格铝合金铸锭内部缺陷的研究并不多。本试验对880 mm规格直径的7A04铝合金铸锭内部缺陷进行了详细地检测与分析,通过缺陷的形貌、成分以及附近区域微小缺陷的形成,确定了缺陷的实质,分析了缺陷产生的根本原因并提出了合理、有效地抑制措施,为铝合金铸造工艺的改进提供了指导。

1 试验过程

1.1 材料和样品的制备

本试验采用电磁铸造法制备大规格7A04铝合金铸锭,标准样品与试验样品的

作者简介: 崔晓晴(1996-),女,硕 士生,研究方向为材料工 程及有色冶金。E-mail: 15242375572@139.com 通讯作者: 贺永东,男,教授,博士, 博导。电话: 15099679680, E-mail: hydongg@126.com

中图分类号: TF807; TG245 文献标识码: A 文章编号: 1001-4977(2024) 08-1116-07

基金项目:

新疆科技厅重点研发任务专 项资助:航空航天用7系铝 合金的制备技术研发与应用 (20231108B)。 收稿日期: 2023-10-11收到初稿, 2023-11-27收到修订稿。 成分见表1。合金以工业纯铝(质量分数为99.9%)、 Zn、Cu、Mg以及少量微量元素组成。首先将纯铝锭加 入到感应加热炉内熔炼,当炉内铝锭基本熔化后,再 依次加入Cu、Zn、Mg和微量元素,接着进行除气、扒 渣等过程,再转入电阻静置炉(中间包)中过滤,最 后再进行二次除气和扒渣,以减少含气量和含渣量对 组织性能的影响^[8-9]。铸造时浇注温度为700~720 ℃。 为了避免铸造初期波动对铸锭的影响,试验采用了稳 定铸造状态下的铸锭进行研究。

图1显示了样块的取样位置。如图所示,带有缺陷

有色合金 FOUNDRY 信告 1117

表1 7A04 铝合金的化字成分 Table 1 Chemical compositions of the 7A04 aluminum alloy									W	$w_{\rm B}/\%$	
项目	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti	Al		
标准成分	0.5	0.5	1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	0.1~0.25	5.0~7.0	0.1	余量		
试样成分	0.04	0.07	1.6	2.1	0.32	0.15	5.4	0.04	余量		





的样片从铸锭内部切割取出,厚度为30 mm。在获得的样片上获取工业CT样块,再沿样片横截面的半径方向(缺陷附近区域)取出尺寸为30 mm×30 mm的样块(位置如图),用来分析微小缺陷的数量和分布。由图可知,沿着半径方向切割了9个样品。

1.2 试验设备及方法

电磁铸造法制备出铝合金铸锭后,利用无损超声 探伤仪对切削后的整根铸锭进行质量监测,初步确定 缺陷的大小和位置。接着在铸锭缺陷处取样进行基于 工业CT设备的断层扫描,实现内部缺陷的精准定位与 直观观察。在缺陷处将样块剖开,观察缺陷的宏观形 貌,再采用金相显微镜、SEM与EDS对缺陷位置进行 表征,根据表征结果判断缺陷类型、分析缺陷的形成 过程。

本试验还对最大缺陷附近区域进行了取样研究。 将样品抛光后进行观察,发现在最大缺陷附近存在微 小缺陷。观察微小缺陷显微组织特点并采集图像,再 将采集后的图像利用Photoshop工具进行顺序拼接,从 而计算微小缺陷的面积分数,获得分布特征。图2显示 了缺陷研究过程的示意图。

2 试验结果及讨论

2.1 无损超声探伤分析

超声探伤检测发现铝合金铸锭内部有超标准面积 缺陷,位置靠近铸锭中心区域。如表2探伤结果显示了 铸锭内部有7处缺陷,最大缺陷的尺寸为2.53 mm,深 度为522.8 mm。根据数据确定每处缺陷的具体位置, 如图3所示。该图还显示了超声探伤探头检测时的方



图2 缺陷研究过程示意图 Fig. 2 Schematic diagram of the defect research process

Table 2 Flaw detection data								
编号	灵敏度/dB	声速/ (m・s ⁻¹)	铸锭长度/mm	增益/dB	距头部距离/mm	纵深/mm	当量尺寸/mm	
1	97	6 250	2 802	84	635	308.6	1.88	
2	97	6 250	2 802	81	740	263.3	1.91	
3	97	6 250	2 802	82	1 035	325.8	2.15	
4	97	6 250	2 802	94	1 345	521.2	2.03	
5	97	6 250	2 802	91	1 515	522.8	2.53	
6	97	6 250	2 802	93	1 810	513.2	1.87	
7	97	6 250	2 802	92	2 300	259.5	1.78	

表2 超声探伤数据 Table 2 Flaw detection data



图3 缺陷标注图 Fig. 3 Defect callout diagram

向。需要注意的是,实际探伤检测操作应在切削后的 铸锭上进行。

2.2 工业 CT 检测

工业CT扫描可对铝合金样品内部缺陷的位置、形 貌等信息进行检测,能够在不接触、不破坏的条件下 快速生成所测样品的透视影像。确定了最大尺寸缺陷 位置后,在样片上取下一部分进行基于工业CT设备的 断层扫描。如图4所示,该缺陷形态为内部有裂纹的高 密度夹杂,尺寸为2.6 mm左右。



图4 不同深度所在位置的工业CT扫描图 Fig. 4 Industrial CT scans of the locations at different depths

2.3 缺陷形态与成分分析

根据探伤检测与工业CT扫描后的数据,将样块在 缺陷处剖开进行检测。图5显示了铸锭缺陷剖开后的宏 观形貌。根据标准GB/T 26492.1—2011《变形铝及铝 合金制品检验方法》,对铝合金铸锭中的缺陷进行比 对。可以看出,缺陷的密度与基体不同,除裂纹缺陷 外,夹杂也是主要缺陷。图6显示了裂纹与夹杂缺陷处 的金相显微组织形貌。可以明显观察到,图6a和b中均 存在裂纹缺陷,图6a中的裂纹长而深,图6b中的裂纹 短而浅,且两处裂纹处均存在夹杂缺陷。



图5 缺陷的宏观形貌 Fig. 5 Macroscopic morphology of the defects

有色合金 FOUNDRY 情选 1119



(a)裂纹位置

(b) 夹杂位置

图6 缺陷的金相显微组织形貌 Fig. 6 Metallographic microstructures of the defects

实验室配备扫描电镜(EVO50,德国蔡司)与 EDS能谱仪(Quantax400,德国布鲁克)用于不同样 品的微观形貌和成分分析,能快速灵活地对样品进行 表面成像,实现元素的自动标定、扫描与定量定性检测。将缺陷试样置于扫描电镜下进行微观形貌观察。 图7a显示的是裂纹缺陷位置的表征结果,可以看到,



(a) SEM图像

Al kal O kal Mg kal 100 µm 100 µm 100 µm (b) Al元素分布情况图 (c) O元素分布情况图 (d) Mg元素分布情况图 Zn kal Cu kal Fe kal 100 µm 100 µm 100 µm (f)Cu元素分布情况图 (g)缺陷区域Fe元素分布情况图 (e) Zn元素分布情况图



(h)缺陷区域元素含量图谱图7 缺陷区域的SEM 和 EDS面扫描图像Fig. 7 SEM and EDS images of the defective areas

1120 **结造** FOUNDRY 有色合金

裂纹缺陷特征明显且缺陷区域由氧、铜、镁、锌和铝 元素组成,裂纹深处氧元素含量明显超标,各个元素 的分布也并不均匀。同时中间6张图可以清晰地观察到 缺陷区域各个元素的含量对比与分布。图7h为缺陷区 域元素含量图谱。根据数据显示,缺陷处除了氧元素 含量过高外还含有少量超标准的Fe元素。Fe 是 7XXX 系合金中的主要杂质元素,所形成的富Fe粗大难溶杂 质相容易在生产过程中富集,其含量的增加会明显降 低合金的性能。但Fe元素含量的增加对合金强度的影 响不大,在后续的均匀化热处理过程中可以得到有效 消除。因此,可以判断裂纹缺陷形成的实质为Al₂O₃ (氧化物)和少量Fe元素富集。

2.4 微缺陷的面积分数

图8为铸锭缺陷附近区域微小缺陷的显微组织形貌 图,可以看到,微小缺陷的形态为枝晶状,分布在枝 晶壁上,分布无规律,呈现与基体不同。这是由于在 金属凝固过程中,结晶收缩受到阻碍而产生拉应力, 若拉应力大于该区域金属的强度极限,则会产生裂纹 缺陷。因此,微小缺陷的形成与裂纹缺陷的形成密不 可分。

如上所述,用光学显微镜观察并捕获微小缺陷,



图8 试样的显微组织形貌图 Fig. 8 Microstructure morphologies of the specimen

根据其直径将缺陷分为两种类型,直径为10~40 μm和 直径大于40 μm的缺陷。分析缺陷时省略了小于10 μm 直径的缺陷,因为划痕、污点、晶界或相成分可能因 其小尺寸而被错误地分类为铸造缺陷。

图9为1/2*R*处样块的微小缺陷的采集和提取图,缺陷及其分布清晰可见。同时如图9b所示,通过调整图像的阈值来突出矩阵中的缺陷。根据缺陷直径将缺陷(即图9b中的红色区域)计数。并用以下公式计算缺

陷的面积分数:

$$c = \frac{S_{\rm m}}{S_{\rm total}} \times 100\% \tag{1}$$

式中: *c*为缺陷的面积分数, *S*tota为总分析面积, *S*m为区域中缺陷的面积。运用此公式进行计算,结果表明, 在统计的两类缺陷中,大于40 µm的缺陷占比最大。统 计结果如图10所示。

在大尺寸铸锭中,由于铸造速度、金属凝固界面



(a)缺陷采集
(b)缺陷提取
图9 1/2R处样块微小缺陷的采集和提取
Fig. 9 Acquisition and extraction of the small defects in the sample block at 1/2R



图10 铸锭微小缺陷的面积分数 Fig. 10 The area fraction of the minor defects

移动速度、模具中的深熔池等因素,释放的氢原子和 细小的夹杂物往往会积聚在铸锭的内部。通过对缺陷 的面积分数计算,可以清楚地获得铸锭中微小缺陷的 分布和数量信息,有助于评估铸锭的质量。

2.5 缺陷形成的原因以及控制措施

铸造过程中,铝合金熔体极易氧化,氧化后的氧 化物密度与铝液相近,混入铝液难以浮起,从而产生 氧化夹杂缺陷^[10-11]。氧化物夹杂通常与裂纹和气孔等铸 造缺陷有关,而这些缺陷的产生不利于合金的性能^[12-13]。 本文研究的880 mm规格直径的7A04铝合金铸锭缺陷主 要为裂纹和夹杂。以夹杂形式存在的缺陷主要是由于 铸造前熔体中的气体引起。Fe元素是铝合金铸锭中的 一种固有杂质元素,当铝合金中铁元素含量较高时, 容易在铝合金生产过程中富集,这种组织会增加区域 的脆性^[14-15],致使拉应力大于该区金属的强度极限产生 裂纹。

结合分析结果,提出以下工艺参数优化及成分控 制方案:①完善除气、扒渣等工艺过程,净化铝合金 熔体;②提高熔炼温度,减少铝液的吸气;③严格控 制铝合金配料时的元素,为合适范围中的下限;④严 格管理铸造过程中使用的工具和设备。经过对工艺过 程的改善和控制后的7A04铝合金铸锭,超声探伤结果 如表3所示,从结果来看,7A04铝合金铸锭内部缺陷情 况有明显改善。在同一批次的铸锭中缺陷的个数由原 来的7个降低到1-3个,缺陷的平均尺寸由原来的2.02 mm 降低到1.26 mm。

表3 工艺改善后的探伤结果 Table 3 Flaw detection data after process improvement

批号	铸锭长度	缺陷个数	缺陷当量尺寸大小/mm	缺陷深度/mm	
1 [#]	2 802	1	1.16	360.4	
$2^{\#}$	2 803	3	1.34 ~ 1.36	334.8~354.1	
3*	2 801	0	-		
$4^{\#}$	2 801	0	-		
5#	2 803	0	-		

3 结论

(1)探伤处理和基于工业CT的断层扫描发现铸锭 内部有缺陷,且位于铸锭中心区域,形态为有裂纹的 高密度夹杂,特征为密度、颜色与铝差别较大的金属 聚集物。

(2)SEM和EDS表征分析表明,氧和铝元素为缺陷部位主要元素,同时伴随少量Fe元素,表明夹杂物

由氧化物(Al₂O₃)和Fe元素富集组成。

(3)运用缺陷公式,对铸锭微小缺陷进行了分析 计算,结果显示,大于40μm的缺陷所占比例最大。微 小缺陷的形成与裂纹缺陷的形成有关。

(4)对于由夹杂物引起的裂纹缺陷,完善除气、 扒渣等工艺过程,提高熔炼温度、严格控制铝合金配 料时Fe元素的含量是避免这些缺陷的方法。

参考文献:

- [1] 刘静安,罗昭敏.现代铝及铝加工业的发展特点及国内外发展水平对比 [J]. 铝加工, 2009 (3): 38-45.
- [2] 高一涵, 刘刚, 孙军. 中国材料进展 [J]. 2019, 38 (3): 231-241.
- [3] 杨守杰,戴圣龙.航空铝合金的发展回顾与展望[J].材料导报,2005(2):76-80.
- [4] 宋仁国. 高强度铝合金的研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报, 2000, 14(1): 20-21.
- [5] EMMANUEL W, AKSHAY B, PIERRE C. Modeling of inclusion behavior in an aluminum induction furnace [J]. Light Metals, 2016: 850–854.

1122 FOUNDRY 有色合金

- [6] 李秋梅,刘昌明,冯静阳,等.6060铝合金表面氧化缺陷分析 [J]. 热处理技术与装备,2020,41(2):54-58.
- [7] PABLO W, NICOLAS S, THIERRY P, et al. Statistical study of the size and spatial distribution of defects in a cast aluminium alloy for the low fatigue life assessment [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 166 (1): 23–56.
- [8] DOU C. Effect of electromagnetic casting on microstructure properties of high-strength aluminum alloy [J]. Thermal Processing Process, 2015, 44 (7): 1001–3814.
- [9] 窦超. 电磁铸造对高强铝合金组织性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (7): 14-16.
- [10] DESCHAMPS A, GEUSER D F, HUTCHINSON R C, et al. Dynamic interactions between precipitation and plastic deformation in aluminium alloys [J]. Materials Science Forum, 2014, 3225 (794–796): 1133–1140.
- [11] 李谢. 氢与夹杂对铝合金的组织与性能的影响 [D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- [12] 钱伟涛,宗福春, 葛素静,等.铸造铝合金中典型夹杂物微观特征和成分研究 [J].铸造, 2023, 72 (2): 153-159.
- [13] 曹学锋,朱大智,张少文,等.铝合金车轮铸造裂纹研究[J].铸造,2022,71(9):1178-1181.
- [14] 胡万文,康福伟,汪恩浩.Fe元素对6082铝合金组织和性能的影响[J].热加工工艺,2019,48(20):62-64.
- [15] 罗筱雄,崔建忠,长海博文,等.铝合金熔体中夹杂物及其在线检测技术研究进展[J].铸造,2014,63(2):138-144.

Study on Crack Defects of Large-Sized 7A04 Aluminum Alloy Ingots

CUI Xiao-qing¹, SUN Xiao-han², HE Yong-dong¹, ZHAO Yi-kun¹

(1. School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Shandong Energy Digital Technology Co., Jinan 250000, Shandong, China)

Abstract:

The 880 mm diameter 7A04 aluminum alloy ingot was prepared by electromagnetic casting method, and the formation causes and inhibition measures of the crack defects in this aluminum alloy ingot were investigated by industrial CT scanning, SEM & EDS and other inspection and analysis means, and the number and distribution of the tiny defects in the region near the defects were analyzed at the same time. The results showed that the essence of cracks in this ingot was the enrichment of Al_2O_3 (oxide) and a small amount of Fe elements, and the location was close to the center of the ingot. It is observed that the number of micro defects decreased slightly with the increase of radius size and the largest percentage of the defects was more than 40 μ m. The analysis showed that the formation of micro defects was related to the formation of crack defects. Removal of inclusions and gaseous hydrogen from the alloy melt before casting, perfecting the process of degassing and slag removal are ways to avoid these defects.

Key words:

7A04 aluminium alloy ingot; crack; Al₂O₃; Fe elemental enrichment