

冷却速度对 Al-3Fe 合金凝固特性和微观组织的影响

何克准^{1,3,4} 吕 君² 史晓明² 王春霞²

(1.中南大学粉末冶金研究院; 2.桂林理工大学材料科学与工程学院; 3.广西南南铝航空
交通铝合金新材料与应用研究院; 4.广西南南铝加工有限公司)

摘 要 采用冷却曲线测定、光学显微镜(OM)和 X 射线衍射仪(XRD)研究了冷却速度对 Al-3Fe 合金凝固特性和凝固组织的影响。结果表明,在冷却速度为 0.69~11.8 ℃/s 的范围内,Al-3Fe 合金的显微组织均由 α-Al 枝晶、初生富 Fe 相及枝晶间的共晶组织组成,其中富 Fe 相主要为 Al₃Fe、Al₅Fe₂和 Al₆Fe 相。冷却速度对 Al-3Fe 合金的凝固特性和凝固组织有明显的影响。随着冷却速度的提高,合金初生相形核温度和共晶反应温度降低,合金的凝固组织明显细化。

关键词 Al-3Fe 合金;冷却速度;凝固特性;显微组织

中图分类号 TG146.21;TG166.3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cooling Rate on Solidification Characteristics and Microstructure
of Al-Fe Alloy

He Kezhun^{1,3,4}, Lü Jun², Shi Xiaoming², Wang Chunxia²

(1.Powder Metallurgy Research Institute, Central South University; 2.College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology; 3.Guangxi Alnan Research Institute for Aviation and Transportation Aluminum Alloy Material & Application; 4.Guangxi Alnan Aluminium Inc.)

Abstract: The effects of cooling rate on the solidification characteristics and microstructure of Al-3Fe alloy were investigated by cooling curve measurement, optical microscope (OM) and X-ray diffraction (XRD). The results indicate that in the cooling rate of 0.69~11.8 ℃/s, the microstructure of Al-3Fe alloy is composed of α-Al dendrites, primary Fe-rich phases, which mainly contains Al₃Fe, Al₆Fe and Al₅Fe₂ phases, and interdendrite eutectic structures. the cooling rates have an obvious effect on the solidification characteristics and microstructure of Al-3Fe alloy. With the increase of cooling rates, the nucleation temperature of primary phases and eutectic reaction temperature are decreased, with the solidification structures refined significantly.

Key Words: Al-3Fe Alloy, Cooling Rate, Solidification Characteristics, Microstructure

铝铁合金因具有高硬度、耐磨性、耐热性和耐腐蚀性等诸多优良性能^[1],受到了广泛关注。从 20 世纪 70 年代开始,已经把 Al-Fe 合金作为一个合金系来研究。然而,由于普通凝固的 Al-Fe 合金中 Al₃Fe 相呈粗大的针状或板条状,严重割裂基体,大幅降低其力学性能^[1,2],至今 Al-Fe 合金尚未作为一种结构材料应用于工业或民用领域。目前,主要采用添加合金元素^[1,3]、快速凝固^[4]、机械合金化^[5]和剧烈塑性变形^[2,6]等方法细化 Al-Fe 合金中的 Al₃Fe 相,以改善合金的力学性能。本课题以 Al-3Fe 合金为研究对象,采用光学显微镜、X 射线衍射仪等主要测试手段,研究了冷却速度对

合金微观组织的影响,旨在为 Al-Fe 合金的应用提供参考。

1 试验材料和方法

以工业纯铝、纯铁为原料,配制 Fe 含量为 3% (质量分数,下同)的 Al-Fe 合金。将合金在箱式电阻炉中熔化,保温 30 min 后用 C₂Cl₆精炼,20 min 后扒渣、搅拌,在 780 ℃时浇入水冷阶梯型铜模中,铸坯的厚度依次为 5、10、20、30 mm;在浇注过程中,采用 KLCOM100 型温度记录仪测定合金不同厚度铸坯的冷却曲线,模具及其测温点位置见图 1。在不同厚度铸坯

收稿日期:2020-10-20;修改稿收到日期:2020-11-26
基金项目:广西科技重大专项基金资助项目(桂科 AA17204012);桂林理工大学科研启动基金资助项目(GLUTQD2014052)
第一作者简介:何克准,男,1984 年出生,高级工程师,长沙(410083),E-mail:99115890@qq.com
通信作者:王春霞,女,1982 年出生,讲师,广西桂林(054300),E-mail:wangcx@glut.edu.cn
引用格式:何克准,吕君,史晓明,等. 冷却速度对 Al-3Fe 合金凝固特性和微观组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):325-327.
HE K Z, LU J, SHI X M, et al. Effects of cooling rate on solidification characteristics and microstructure of Al-Fe alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):325-327.

的中心位置切取 10 mm×10 mm×10 mm 的试样,经研磨、抛光并用 Keller's 试剂腐蚀后,在 Lecia DMI8 光学显微镜上进行显微组织观察。并利用 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪对合金中的物相进行分析。

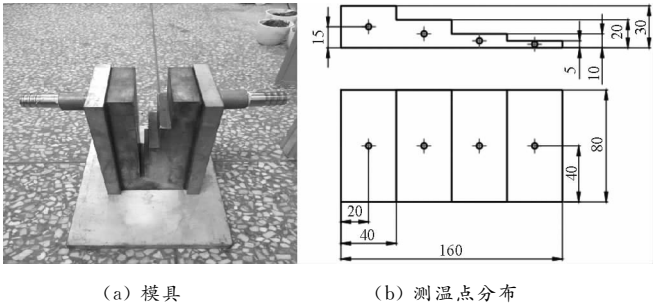


图 1 模具及其测温点位置
Fig.1 The mould and location of temperature measuring point

2 试验结果与讨论

2.1 冷却曲线分析

图 2 为不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯的冷却曲线。不同厚度铸坯的浇注温度相同,但冷却速度不同。测定从初晶形成到结晶完成时间段的平均冷却速度,计算出不同厚度铸坯的平均冷却速度,见表 1。可以看出,随着铸坯厚度减小,合金凝固过程中的冷却速度增大。同时,冷却曲线上有两个明显的相变:一为初生相的形核温度,随着铸坯厚度减小,冷却速度增加,初生相的形核温度降低,厚度为 30 mm(冷却速度为 0.69 °C/s)、20 mm(冷却速度为 1.03 °C/s)、10 mm(冷却速度为 3.01 °C/s)铸坯中,初生相的形核温度依次为 679.2、664.8、658.7 °C,而在厚度为 5 mm(冷却速度为 11.8 °C/s)的铸坯中,可能由于冷速过快,热量的释放过快,未检测出初生相的形核温度;二为共晶反应的温度(图 2 中的平台),同样,随着冷却速度的增加,共晶温度降低,从厚度为 30 mm 到 5 mm 的铸坯凝固过程中,共晶反应温度依次为 655.2、652.7、651.5、649.1 °C,且共晶反应随着冷却速度的增大而变快。随着铸坯厚度减薄,冷却速度增大,其过冷度增大,而过冷度是初生相、共晶相形核和长大的驱动力^[7,8]。

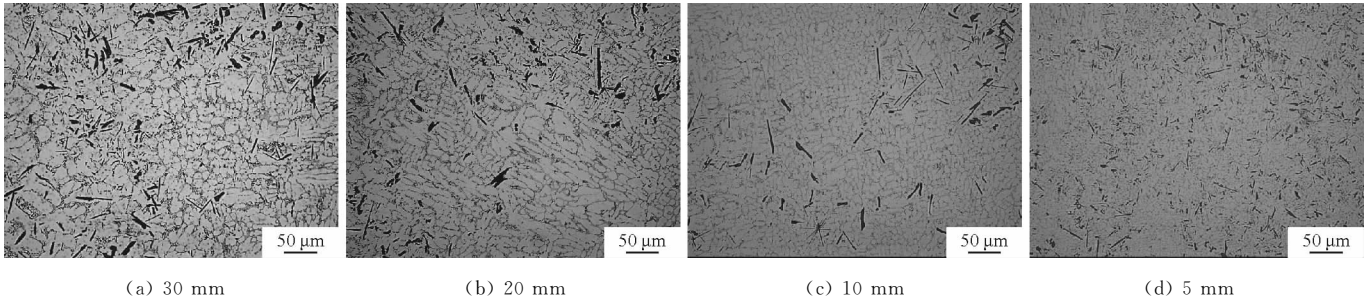


图 3 不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯的低倍光学显微组织
Fig.3 Low-magnification optical microstructures of Al-3Fe alloy ingots with different thickness

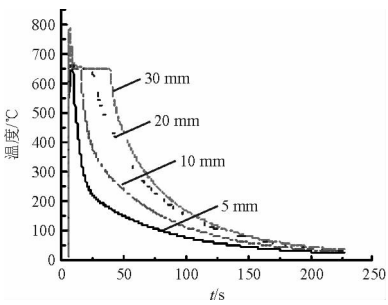


图 2 不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯的冷却曲线
Fig.2 Cooling curves of Al-3Fe alloy ingots during solidification with different thickness

表 1 不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯凝固阶段的平均冷却速度

Tab.1 Average cooling rates of Al-3Fe alloy ingots during solidification with different thickness

合金铸坯厚度/mm	冷却速度/(°C·s ⁻¹)
30	0.69
20	1.03
10	3.01
5	11.8

2.2 Al-3Fe 合金的显微组织

图 3 和图 4 分别为不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯的低倍和高倍显微组织。可以看出,不同厚度铸坯均由 α -Al 枝晶、初生富 Fe 相及枝晶间的共晶组织组成。在厚度为 30 mm 的铸坯中,其凝固组织由宽度为 2.5~5 μ m, 长度为 10~50 μ m 的粗大板条状或块状初生富 Fe 相, 尺寸为 10~50 μ m 的粗大 α -Al 枝晶及枝晶间共晶相组成(见图 3a),其共晶富 Fe 相呈较粗大的针状或颗粒状分布(见图 4a);在厚度为 20 mm 的铸坯中,初生富 Fe 相呈板条状或块状,宽度为 1~3 μ m, 长度为 5~30 μ m, α -Al 枝晶尺寸为 6~35 μ m(见图 3b),其共晶富 Fe 相也呈针状或颗粒状分布,但针状相的数目减少(见图 4b);当铸坯的厚度为 10 mm 时,合金中的初生富 Fe 相呈针状或尺寸较小的块状, α -Al 枝晶的尺寸大幅降低,其尺寸为 5~25 μ m(见图 3c),共晶富 Fe 相呈蠕虫状或颗粒状分布(见图 4c);当铸坯的厚度为 5 mm 时,合金组织细化程度更好,合金中的初生相基本为细小的块状,其平均尺寸约为 2.5 μ m, α -Al 枝晶的平均尺寸约为

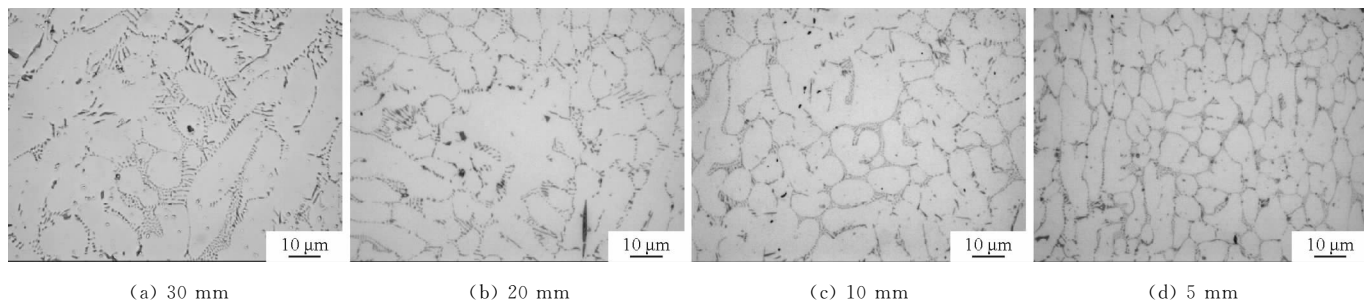


图4 不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯的高倍光学显微组织

Fig.4 High-magnification optical microstructure of Al-3Fe alloy ingots with different thickness

7 μm (见图 3d),共晶富 Fe 相基本呈细小的颗粒状分布(见图 4d)。

从图 3、图 4 中可以看出,随着铸坯厚度的减小,冷却速度不断增大,合金组织不断细化。这是由于在凝固过程中,主要发生液相向固相的转变,包括形核和长大过程。随着冷却速度加快,过冷度增大,形核的驱动力增大,促进形核,且在冷却速度较大的情况下,抑制了原子的扩散迁移和聚集,使晶粒来不及长大凝固过程已经完成,从而获得比较细小的微观组织^[8,9]。初生富 Fe 相的生长具有择优取向,呈小平面生长,且常以(001)和(100)晶面为侧面,沿着[010]晶向生长,因此在凝固过程中初生富 Fe 相一般为针片状^[10,11]。当冷却速度较大时,凝固偏离平衡态,形核温度降低,且 Fe 原子的扩散受到抑制,初生富 Fe 相的生长受阻,因此得到较为细小的初生富 Fe 相^[8]。

图 5 为不同厚度(不同冷却速度)Al-3Fe 合金铸坯的 XRD 图谱。可以看出,不同厚度的 Al-3Fe 合金中物相种类基本没有改变,均由 $\alpha\text{-Al}$ 、 Al_3Fe 、 Al_6Fe 和 Al_5Fe_2 相组成。这是因为,不同厚度铸坯的凝固过程均采用水冷,属于非平衡凝固过程,因此得到了 Al_6Fe 和 Al_5Fe_2 非平衡相。

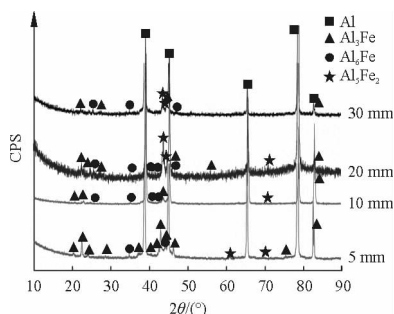


图5 不同厚度 Al-3Fe 合金铸坯的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of Al-3Fe alloy ingots with different thickness

提高到 11.8 $^{\circ}\text{C/s}$,不仅降低了合金初生相的形核温度,而且降低了合金的共晶反应温度。

(2)在冷却速度为 0.69~11.8 $^{\circ}\text{C/s}$ 的范围内,Al-3Fe 合金的微观组织均由 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶、初生富 Fe 相及枝晶间的共晶组织组成,且富 Fe 相主要为 Al_3Fe 、 Al_6Fe 和 Al_5Fe_2 相。

(3)随着冷却速度增大,Al-3Fe 合金中 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶和第二相尺寸明显减小,合金的凝固组织明显细化。

参 考 文 献

- [1] 向青春,王静媛,周振平,等. 铝铁合金的研究进展与应用状况[J]. 铸造,2006,55(9):875-879.
- [2] 王快社,林兆霞,周龙海,等. 搅拌摩擦加工铸态铝铁合金的显微铸造[J]. 中国有色金属学报,2012,22(5):1 270-1 275.
- [3] 马建超,李荣德,周振平. Mg 对共晶 Al-2Fe 合金显微组织的影响[J]. 材料科学与工艺,2006,14(1):57-59.
- [4] YANEVA S, KALKANLI A, PETROV K, et al. Structure development in rapidly solidified Al-Fe-V-Si ribbons[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A373: 90-98.
- [5] NAYAKA S S, WOLLGARTEN M, BANHART J, et al. Nanocomposites and an extremely hard nanocrystalline intermetallic of Al-Fe alloys prepared by mechanical alloying[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527: 2 370-2 378.
- [6] STOLYAROV V V, LAPOVOK R, BRODOVA I G, et al. Ultrafine-grained Al-5Fe alloy processed by ECAP with back pressure[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A357: 159-167.
- [7] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [8] 郭永春,王艳山,彭渝丽,等. 冷却速度对 Mg-9Gd-3Y 合金铸态组织与性能的影响[J]. 稀有金属,2015,39(5):392-398.
- [9] 刘峰,冯可芹,杨屹. 镁合金晶粒细化的研究现状及发展[J]. 铸造技术,2004,25(6):450-452.
- [10] LIANG D, GILGIEN P G, JONES H. Effect of silicon alloying additions on growth temperature and primary spacing of Al_3Fe in Al-8Fe alloy[J]. Scripta Metall. Mater., 1995, 32: 1 513-1 518.
- [11] 李荣德,马冰,徐玉桥,等. 铝铁合金凝固特性的进展[J]. 铸造,1999(1):51-54.

(编辑:栗万仲)

3 结 论

(1)对于 Al-3Fe 合金,随着冷却速度由 0.69 $^{\circ}\text{C/s}$