2016年4月 April 2016

文章编号: 1004-0609(2016)-04-0707-08

复合场作用下 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金的 显微组织和力学性能



罗 执,张 杨,赵愈亮,张卫文

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘 要: 将压力场和超声场复合作用于铝合金的凝固过程,并对比分析无外场、单一外场(压力场、超声场)和复合场的作用效果。采用定量金相分析、扫描电镜、电子探针等手段研究压力场、超声场以及压力和超声复合场作用下 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金的显微组织和显微硬度。结果表明:分别施加 50 MPa 压力场和 800 W 超声场均能减少 a(Al)二次枝晶间距,细化并分散富铁相和 θ(Al₂Cu)相,同时改变富铁相的形貌,使针状的 Al₇Cu₂Fe 相转变成汉 字状的富铁相 Al₆(CuFe);同时复合场比单一外场能更大程度地细化 a(Al)二次枝晶间距、富铁相和 θ(Al₂Cu)相; 单独施加压力 50 MPa 比单独施加 800 W 的超声更能够有效减少缩松,但同时施加压力和超声时效果最佳;同时 施加压力和超声场时可获得最高的 a(Al)基体显微硬度。对复合场的作用效果进行初步探讨,这是超声场的空化 效应以及声流效应和压力场的压力效应共同作用的结果。

关键词: Al-5.0Cu-1.0Fe 合金; 超声场; 压力场; 富铁相; 显微组织; 显微硬度 中图分类号: TG292 文献标志码: A

Al-Cu 系合金由于 Cu 的固溶作用而具有较好的 强韧性,同时具有较高的比强度和硬度、良好的耐腐 蚀性、易于加工等优点而被广泛应用于汽车、军事、 航空航天工业^[1-3]。但是,由于 Al-Cu 系合金的结晶温 度范围宽、流动性差、铸造性能较差,同时由于杂质 元素 Fe 在铝合金中难以避免, 会形成 α -富 Fe 相, β -富 Fe 相以及固溶少量 Mn、Cu 原子的 Al"Fe、Al₃Fe 与 Al₆Fe,降低了基体中有效 Cu 的含量,恶化了铸造 Al-Cu 合金的力学性能,限制了其应用^[4-7]。在这几种 富铁相中, β-富 Fe 相组成多为 β-Al₅FeSi、Al₉Fe₂Si₂、 Al₇Cu₂Fe和Al₇Cu₂(FeMn)等,常以针片状的形貌出现, 此形貌易形成应力集中,割裂基体,脆性较大,α-富 Fe 相组成多为 α-Al₈Fe₂Si、Al₁₂Fe₃Si₂和 Al₁₅(FeMn)₃-(SiCu)₂等,通常为汉字状或骨骼状,排布紧密,末端 呈球状。而 Al₆Fe 与 Al_mFe 作为非平衡铁相,易在较 高的冷却速率下形成,通常为汉字状、鱼骨状或是块 状,应力集中小^[7]。因此, β -富 Fe 相对合金性能危害 更大^[8-11]。而且,当Fe量较大时,粗大的针片状富铁 相会阻碍枝晶间液态金属的流动,降低 Al-Cu 熔体的 流动性和充型能力。所以,通过优化工艺来减少杂质 Fe的有害影响对于开发高性能低成本的 Al-Cu 合金材

料具有重要的指导意义。

目前,国内外通过减小 Fe 在合金中含量和改变富 铁相形貌的方法来降低铝合金熔体中 Fe 的危害作 用^[4, 12],利用诸如压力场、超声场等外加场^[13-27]成为 一种重要的途径。挤压铸造作为一种优质、高效、节 能的近净成形技术,其工艺流程简单,能获得组织致 密、力学性能优异的合金铸件^[28-29]。DONG 等^[13]研究 了挤压铸造 Al-7Si-0.3Mg 合金,发现挤压铸造能细化 富铁相,并且提高合金的力学性能。ARHAMI 等^[14] 对挤压铸造 Al-8Fe-1.4V-8Si 合金进行了研究,能使 β -富 Fe 相转变成危害性较小的 α -富 Fe 相。本课题组 的前期研究^[4, 15-18]表明,当挤压压力从 0 MPa 增大到 75 MPa 时,Al-5.0Cu 合金中针状 β -富 Fe 相转变为汉 字状的 α -富 Fe 相,强度和伸长率增加。

超声熔体处理通过空化效应、声流效应和热效应 等多种效应的综合作用,改变金属的凝固过程,最终 改善和控制金属的凝固行为。张勇等^[19]采用受控凝固 和受控振动相结合的实验装置和方法,在 Al-Fe 合金 中引入不同功率的超声振动,揭示了超声可以显著细 化铁相,大幅提高了抗拉强度。吴树森课题组^[20-24]和 OSAWA 等^[25]则对高硅高铁铝合金熔体施加超声振动

收稿日期: 2015-04-19; 修订日期: 2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374110);广东省自然科学基金团队项目(2015A030312003)

通信作者: 张卫文, 教授, 博士; 电话: 020-87112933; E-mail: mewzhang@scut.edu.cn

后浇注, 富铁相细化和其形态发生改变, 块状和短条状 δ -富 Fe 相增多, 而针状 β -富 Fe 相减少。李廷举 等^[26]对 Al-12%Si-2%Fe 合金进行超声处理, 发现随超 声时间增长, α -富 Fe 相逐渐增多, 而 β -富 Fe 相逐渐 减少。同时, KHALIFA 等^[27]对含铁量为 0.78%的 ADC12 铝合金施加超声振动, 同样得到富铁相形貌改 变和强度提高的结论。由此可知, 超声处理能细化铝 合金的富铁相, 但超声处理多用于 Al-Si 系合金中, 而对 Al-Cu 系合金的研究则较少。

当前,国内外通常单独利用挤压铸造压力场或超 声场来改善铝合金中的富铁相,然而,THIRUMAL 等^[30]研究了 AA6061 合金挤压铸造和超声振动的作 用,两者均能提高合金性能。DAI 等^[31]也尝试用两种 外场来改变 AlCuMnTi 合金的组织和性能,同样效果 明显。上述研究均是将合金熔体先超声处理再进行不 同工艺参数的挤压铸造,而本文作者则是首次使超声 场和挤压铸造压力场同时作用于合金熔体,相对前者 本研究组织细化效果更加明显,组织缺陷较少,实验 流程更短。本文作者选择一种成分简单、含铁量较高 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金为研究对象,研究不同条件下该 合金的显微组织和力学性能,一方面填补超声处理 Al-Cu 系合金研究的空白,另一方面开创一种新型复 合场,为开发高性能低成本的 Al-Cu 系合金提供理论 指导和实验支撑。

1 实验

本试验中所用原材料为高纯铝锭(99.95%,质量分数)、Al-50Cu、Al-5Fe 中间合金,在 7.5 kW 坩埚井式 电阻炉中熔炼合金,完全熔化后使用商用固体精炼剂 进行精炼除气除渣,控制熔体温度在 710 ℃左右,利 用 *d* 80 mm×100 mm 大小的浇勺快速浇注,合金通过 光谱仪分析,成分如表 1 所列。

复合场装置如图 1 所示,装置由两部分构成:超 声振动系统和挤压铸造系统。超声振动系统由空冷的 频率为 20 kHz 的发生器、PZT 合金制成的换能器和一 个工作杆组成。实验中使用的超声功率为 800 W,频 率为 19.3 kHz,超声的时间为 30 s。挤压铸造系统中 的压机液压力为 100 t,铸造模具材料为 H13 钢,尺寸 为 75 mm×75 mm×100 mm。模具的预热温度为 200 ℃,挤压压力分别为 0、50 MPa,挤压速度为 10~ 20 mm/s,保压时间为 30 s,获得铸锭尺寸为 75 mm× 75 mm×70 mm。在复合场下,超声功率为 800 W,挤压压力 50 MPa,共同作用时间为 30 s。



图1 复合场装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of compound field system: 1— Ultrasonic generator; 2—Transducer; 3—Radiator bar; 4— Punch; 5—Mold; 6—Molten melt; 7—Ejector

表1 合金的化学成分

Table 1	Chemical	composition	of alloy	(mass fraction,	%)	,
---------	----------	-------------	----------	-----------------	----	---

Cu	Fe	Si	Zn	Al	
5.11	1.07	0.04	0.02	Bal.	

在超声杆尖端处截取 d 10 mm×12 mm 的金相试 样, 抛光后采用质量分数为 0.5%的 HF 溶液腐蚀, 在 LEICA/DMI 5000M 型金相显微镜下进行显微组织观 察,并利用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件进行第二 相比例分数的定量分析,在放大 500 倍下选取不少于 30 个视场,每个视场选取不少于 10 条截线。采用定 量立体测量学中所公认的公式 A_=V_V^[32],即第二相的 面积分数(A_A)等于体积分数(V_V),将软件计算出的面积 分数转换为体积分数。金相中的孔洞以及第二相具体 成分在 Quanta 2000 型扫描电子显微镜下进行。在维 氏硬度计上测 α(Al)基体的显微硬度,其中载荷为 0.49 N, 保压时间为 15 s, 试验结果是 10 个测试点的 平均值。采用 EPMA-1600 型波谱仪分析了不同条件 下铸态合金 α (Al)基体中 Cu 的成分, 探究合金的硬度 变化原因。同时,为更清晰地观察富铁相的三维立体 形貌,将抛光后的金相样品倒置于浓度为 10 g/mL 的 碘甲醇溶液中 4~5 h, 然后用酒精和超声波清洗后, 采用 Nova Nano SEM 430 型扫描电子显微镜观察合金 的显微组织。

2 结果与分析

2.1 合金的显微组织

不同条件下的铸态合金的显微组织如图2所示。

由图 2 可知,合金铸态组织为典型的枝晶结构,主要 由 α(Al)枝晶及分布在枝晶之间的各种第二相组成。在 图 2(a)中,在无外场的作用下,合金在富铁相周围出 现大量的缩松,根据 Al-Cu-Fe 三元合金相图^[33]看出, 富铁相在金属熔液降温过程中逐渐形成,无液态金属 补缩,而形成缩松。在图 2(b)中,50 MPa 挤压压力下 的组织得到细化,缩松大幅减少,并且出现明显的双 峰组织。在图 2(c)中,相对图 2(a)而言,缩松减少, 晶粒细化,并且富铁相也较分散。图 2(d)中枝晶的细 化程度更加明显,同时富铁相尺寸也减小。由此可见, 压力场和超声场的共同作用使得对枝晶的作用更明 显,但却并不是简单意义上的加成。

不同方法下相的体积分数与 *α*(Al)基体的二次枝 晶间距的大小如图 3 所示。可以看出,当施加复合场 时,*α*(Al)的二次枝晶间距相对于无外场作用的 72.5 μm 减小到 12.5 μm,减小了 80%,富铁相的平均长度



图 2 不同条件下的铸态合金的显微组织

Fig. 2 Microstructures of as-cast alloys under different conditions: (a) Without field; (b) With 50 MPa pressure field; (c) With ultrasonic field; (d) With compound field





Fig. 3 Sizes(a) and volume fraction(b) of phases in alloys under different conditions: 1—Without field; 2—With 50 MPa pressure field; 3—With ultrasonic field; 4—With compound field

由 22.5 µm 減小到 4.6 µm,平均宽度由 13.4 µm 減小 到 2.3 µm, θ (Al₂Cu)相的最大宽度也由 14.1 µm 減小 到 1.8 µm。复合场的作用也使得 θ (Al₂Cu)相的体积分 数由 5.5%减小到 0.6%, β -富 Fe 相的体积分数由 1.2% 减小到 0.1%, Al₆(CuFe)的体积分数由 1.6%增加到 2.9%。因此,复合场的引入,不仅能细化第二相,而 且使得针状富铁相减少,汉字状富铁相增多。

图 4 所示为不同条件下铸态合金富铁相的 3D 形 貌。可以看出,在无外场下,针片状 Al₇Cu₂Fe 较细长,同时贯穿于骨骼状 Al₆(CuFe),而 Al₆(CuFe)则较粗大, 呈块状。当施加压力场时,铁相变短小,骨骼状的 Al₆(CuFe)更加细小,且更分散,而施加超声场时,针 片状铁相几乎看不到。当复合场作用时,富铁相的细 化效果更明显,主要出现椭圆花纹状铁相,而没有针 状铁相。

2.2 缩松

图 5 所示为不同铁相附近的缩松。缩松周围出现的相也是合金中存在的相,其能谱分析结果如表 2 所列。其所对应的相分别为黑色汉字状富铁相Al₆(CuFe),针片状富铁相 Al₇Cu₂Fe,灰色花纹状相Al₂Cu,与相关文献^[10, 17, 34]的报道一致。由于宽的结晶温度范围,所以 Al-Cu 合金中较易形成缩松。合金的实际密度采用阿基米德排水法测得,缩松体积分数采用定量金相分析软件 IPP 算得,不同条件下的实际密度与缩松体积分数如图 6 所示,外场的作用使得合金



图 4 不同条件下的铸态合金富铁相的 3D 形貌

Fig. 4 Three-dimensional morphology of Fe-rich intermetallics of as-cast alloys under different conditions: (a) Without field; (b) With 50 MPa pressure field; (c) With ultrasonic field; (d) With compound field



图 5 合金中紧挨富铁相的孔洞

Fig. 5 Porosity in alloy associated with Al₇Cu₂Fe phase without field (a) and Al₆(CuFe) phase with ultrasonic field (b)

表 2 图 5 中各点的 EDS 能谱分析结果

 Table 2
 EDS analysis results of locations in Fig. 5

Location	Mole fraction/%			Dhaaa
in Fig. 5	Al	Cu	Fe	Phase
A	72.81	16.54	10.65	Al ₇ Cu ₂ Fe
В	67.84	32.16		Al ₂ Cu
С	82.21	5.18	12.61	Al ₆ (CuFe)
D	83.11	5.34	11.55	Al ₆ (CuFe)





Fig. 6 Density and volume fraction of porosity of alloys under different conditions: 1—Without field; 2—With 50 MPa pressure field; 3—With ultrasonic field; 4—With compound field

的密度上升,缩松体积分数减少,尤其是复合场作用下,相对无外场作用时而言,密度上升 3.85%,缩松体积分数减少 68.0%。

2.3 显微硬度

不同条件下铸态合金的显微硬度如图 7 所示,从 图 7 中可以看出,在施加压力场、超声场或压力超声 复合场时,显微硬度都较无外场时大,且复合场时合 金的显微硬度最大。与无外场相比,当施加 50 MPa 压力场时,铸态下显微硬度从 32 HV 增大到 39 HV, 增幅为 21.9%;当施加超声场时,显微硬度从 32 HV 增大到 37 HV,增幅为 15.6%;当施加复合场时,显 微硬度从 32 HV 增大到 50 HV,增幅为 56.3%。复合 场时性能的提高并非两种外场的简单叠加,铸态合金 复合场作用下相对无外场显微硬度的增幅大于单一外 场作用增幅的加和。通过 EPMA 测试铝合金基体中 Cu 的含量,如图 8 所示,在外场的作用下,合金元素 Cu 在基体中的溶解度增大,合理地解释了复合场下显 微硬度最大这一现象。这是由于 Cu 在 α(Al)中的溶解 度较大(达到 4.5%),随着压力的增加, Cu 在 α(Al)中 的溶解度增大,这与本课题组的前期研究^[17]是一致 的。





Fig. 7 Micro-hardness of α (Al) matrix in alloys under different conditions: 1—Without field; 2—With 50 MPa pressure field; 3—With ultrasonic field; 4—With compound field





Fig. 8 Cu content in α (Al) matrix in cast alloys under different conditions: 1—Without field; 2—With 50 MPa pressure field; 3—With ultrasonic field; 4—With compound field

3 讨论

试验结果表明,在施加外场的作用时,晶粒的二 次枝晶间距减小,针状 β-富 Fe 相与缩松体积分数减 少。针对压力场而言,一方面,由克拉佩龙方程可知, 压力能使凝固点升高,使原本过热的金属液出现过冷的状态,增大形核率,单位体积的晶核数目越多,长成的晶粒越细小,同时压力缩小结晶温度区间,更快的形核也使铸件缩松、孔洞减少^[35]。另一方面,由于金属的散热速率快于气体的,而压力使铸件与模具接触更为紧密,提高了二者之间的热传递效率,导致铸件的冷却速率升高,铸件的凝固时间缩短^[36]。LIU等^[7]和 KAMGA等^[37]分别对 Al-4.6Cu-0.5Fe 和 B206 合金的研究表明,提高冷却速率能促使针片状β-富 Fe 相转变汉字状 Al₆(CuFe),这是由于,一方面凝固点升高使得 Al₆(CuFe)的形核、生长的温度区间增大,另一方面过冷度的增大也促进了 Al₆(CuFe)的形核。此外, 正交晶格 Al₆(CuFe)的形核动力能大于四方晶格 β-Fe 的,冷却速度很快时,Fe 原子更易成长为 Al₆(CuFe)。

对超声场而言,超声波在熔体中传播时会产生空 化效应和声流效应,空化效应一方面使气泡破裂产生 瞬时高压,使液态金属局部压力过大,造成过冷度的 增加,从而提高了形核率;另一方面气泡在长大、上 升、破灭的过程中,吸收了一部分的热量,导致气泡 周围的金属熔液过冷,也使得形核率增大。声流效应 是超声波在介质中衰减而使沿超声波传播方向的声压 减小的现象,声压梯度使得液体介质高速流动,大量 的早期形成的枝晶被打断、富铁相受到冲击,最终富 铁相均匀分布,晶粒细化,缩松等缺陷减少^[38-39]。而 根据 SALAS 等^[40]的研究表明,在 AlCu 合金中,冷却 速度越快,二次枝晶间距越小,也解释了合金在受到 外场的作用下,二次枝晶间距减小的现象。

在这两种外场单独作用时,合金中的缩松都有一 定程度的减少,单独施加压力 50 MPa 比单独施加 800 W 的超声更能够有效减少缩松。在合金液降温过程 中,富铁相首先形成,不同形貌、尺寸的富铁相阻碍 了金属液的流动通道,从而产生缩松,同时缩松也较 易紧挨富铁相形成。随着外场的加入,合金中的缩松 体积分数减少,这是由于在压力场下,压力提高了金 属液的流动速度;在超声场下,声流效应加剧了液体 的对流,也使得缩松减少。

由于两种外场各自对合金显微组织的影响,所以 试验首次将两种外场结合起来应用于铸造 Al-Cu 系合 金的研究中,初步探讨了复合场对合金组织与力学性 能的影响。在复合场中,超声场的空化效应和压力场 的共同作用使合金的冷却速度增加,因此合金的晶粒 尺寸和二次枝晶间距变得细小,第二相由稳定的 Al₇Cu₂Fe 相向亚稳的 Al₆(CuFe)相转变。同时在超声场 声流效应的作用下,合金中的第二相细小均匀地分布 在基体上,并且在挤压铸造中经常出现的双峰组织也 明显减轻。同时复合场的外场的效应使得晶粒形核增 多,晶粒明显细化,且缩松随之减少,Cu元素在基体 溶解度的提高也使得合金的显微硬度得到提高。但是, 复合场共同作用机制仍未被深入研究清楚。作为一种 新颖的方法,更多的研究有待进一步的开展。

4 结论

1) 压力场和超声场组成的复合场较单一外场而 言,更大程度地细化二次枝晶,缩松、孔洞减少,SDAS 由 72.5 μm 减小到 12.5 μm,减小了 80%,孔洞体积 分数减少了 68%。

2) 复合场下细化、减少以及分散了第二相,使得合金富铁相从针片状 Al₇Cu₂Fe 相大量地向危害性较小的汉字状 Al₆(CuFe)相转变,同时促进了 Cu 元素在基体中的溶解,提高了合金的显微硬度。

3)复合场的作用机制在试验中得到了初步探讨, 压力场和超声场均提高合金的冷却速率,同时超声场 的空化效应和声流效应提高了形核率,细化了晶粒, 促进了第二相的形核、生长。

REFERENCES

 王瑞红,王永俊,王艳红. 微量钪添加对 Al-Cu 合金时效析出 及电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国稀土学报, 2014, 4, 32(2): 190-196.

WANG Rui-hong, WANG Yong-jun, WANG Yan-hong. Effect of minor scandium addition on precipitation and electrochemical corrosion of Al-Cu alloy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2014, 4, 32(2): 190–196.

- [2] 陈子勇, 舒 群, 陈玉勇. 高强铸造铝铜合金显微组织和力 学性能的研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 10, 15(5): 718-722.
 CHEN Zi-yong, SHU Qun, CHEN Yu-yong. The study of microstructure and mechanical properties of high strength and toughness casting Al-Cu alloy[J]. Materials Science and Technology, 2007, 10, 15(5): 718-722.
- [3] GUO Hong-min, ZHANG Ai-sheng, YANG Xiang-jie, YAN Ming-ming. Grain refinement of Al-5%Cu aluminum alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(8): 2489–2496.
- [4] 林 波,张卫文,程 佩,汪先送,李元元.挤压铸造 Al-5.0Cu-0.6Mn-0.5Fe 合金的显微组织和力学性能[J].中国 有色金属学报,2013,23(5):1195-1201.
 LIN Bo, ZHANG Wei-wen, CHENG Pei, WANG Xian-song, LI Yuan-yuan. Microstructure and mechanical properties of Al-5.0Cu-0.6Mn-0.5Fe alloy prepared by squeeze casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1195-1201.

- [5] COUTURE A. Iron in aluminum casting alloys-a literature survey[J]. American Foundry Society International Cast Metal Journal, 1981(6): 9–17.
- [6] TSENG C J, LEE S L, WU T F. Effect of Fe content on microstructure and mechanical properties of A206 alloy[J]. Materials Transactions, 2000, 41(10): 708–713.
- [7] LIU K, CAO X, CHEN X G. Formation and phase selection of iron-rich intermetallics in Al-4.6Cu-0.5Fe cast alloy[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2013, 44(2): 682–695.
- [8] SALEM S, STEN J, INGVAR L S. The influence of cooling rate and manganese content on the α-Al₅FeSi phase formation and mechanical properties of Al-Si-based alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 490: 385–390.
- [9] SHABESTARI S G. The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compounds in aluminum-silicon alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 383: 289–298.
- [10] SREEJA KUMARI S S, PILLAI R M, RAJAN T P D, PAI B C. Effects of individual and combined additions of Be, Mn, Ca and Sr on the solidification behaviour, structure and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg-0.8Fe alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 460/461: 561–573.
- [11] LIU K, CAO X, CHEN X G. Effect of Mn, Si, and cooling rate on the formation of iron-rich intermetallics in 206 Al-Cu cast alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43: 1231–1240.
- [12] 孙常明, 史志铭, 李志芳. 利用富铈混合稀土改善工业纯铝 中富铁相形貌的研究[J]. 中国稀土学报, 2007, 25(3): 318-322. SUN Chang-ming, SHI Zhi-ming, LI Zhi-fang. Improvement of morphology of Fe-riched phase in commercial pure aluminum by Ce-riched rare earth modification[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2007, 25(3): 318-322.
- [13] DONG J X , KARNEZIS P A , DURRANT G, CANTOR B.The effect of Sr and Fe additions on the microstructure and mechanical properties of a direct squeeze cast Al-7Si-0.3Mg alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 10: 1341–1356.
- [14] ARHAMI M, SARIOGLU F, KALKANLI A, HASHEMIPOUR M. Microstructural characterization of squeeze-cast Al-8Fe-1.4V-8Si[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 405: 218–223.
- [15] ZHANG W W, LIN B, FAN J L, ZHANG D T, LI Y Y. Microstructures and mechanical properties of heat-treated Al-5.0Cu-0.5Fe squeeze cast alloys with different Mn/Fe ratio[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 588: 366–375.
- [16] ZHANG W W, LIN B, CHENG P, ZHANG D T, LI Y Y. Effects of Mn content on microstructures and mechanical properties of Al-5.0Cu-0.5Fe alloys prepared by squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1525–1531.
- [17] ZHANG W W, LIN B, ZHANG D T, LI Y Y. Microstructures

and mechanical properties of squeeze cast Al-5.0Cu-0.6Mn alloys with different Fe content[J]. Materials and Design, 2013, 52: 225–233.

- [18] LIN B, ZHANG W W, LOU Z H, ZHANG D T, LI Y Y. Comparative study on microstructures and mechanical properties of the heat-treated Al-5.0Cu-0.6Mn-*x*Fe alloys prepared by gravity die casting and squeeze casting[J]. Materials and Design, 2014, 59: 10–18.
- [19] 张 勇,何德坪,陈 峰. 超声振动细化Al-Fe 合金的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 1992, 15(9): 1-5.
 ZHANG Yong, HE De-ping, CHEN Feng. The research of the microstructure of Al-Fe alloy treated by ultrasonic vibration[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1992, 15(9): 1-5.
- [20] 林 冲, 吴树森, 钟 鼓, 戴 维. 超声振动对 Al-17Si-xFe 合金富铁相形貌的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(11): 1012-1017.

LIN Chong, WU Shu-sen, ZHONG Gu, DAI Wei. Effects of ultrasonic vibration on morphology of iron-containing intermetallic compounds in Al-17Si-*x*Fe alloys[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2011, 31(11): 1012–1017.

- [21] LIN C, WU S S, LU S L, AN P, WAN L. Effects of ultrasonic vibration and manganese on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys with 2%Fe[J]. Intermetallics, 2013, 32: 176–183.
- [22] LIN C, WU S S, LU S L, AN P, WAN L. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast hypereutectic Al-Si alloy with 2%Fe assisted with ultrasonic vibration process[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2013, 568: 42–48.
- [23] LIN C, WU S S, ZHONG G, WAN L, AN P. Effect of ultrasonic vibration on Fe-containing intermetallic compounds of hypereutectic Al-Si alloys with high Fe content[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(5): 1245–1252.
- [24] ZHONG G, WU S S, JIANG H W, AN P. Effects of ultrasonic vibration on the iron-containing intermetallic compounds of high silicon aluminum alloy with 2% Fe[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2010, 492: 482–487.
- [25] OSAWA Y, TAKAMORI S, KIMURA T, MINAGAWA K, KAKISAWA H. Morphology of intermetallic compounds in Al-Si-Fe alloy and its control by ultrasonic vibration[J]. Materials Transactions, 2007, 48(9): 2467–2475.
- [26] ZHANG Y B, JIE J C, GAO Y, LU Y P, LI T J. Effects of ultrasonic treatment on the formation of iron-containing intermetallic compounds in Al-12%Si-2%Fe alloys[J]. Intermetallics, 2013, 42: 120–125.
- [27] KHALIFA W, TSUNEKAWA Y, OKUMIYA M. Effect of ultrasonic treatment on the Fe-intermetallic phases in ADC12 die cast alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2178–2187.
- [28] ZHANG M, ZHANG W W, ZHAO H D, ZHANG D T, LI Y Y. Effect of pressure on microstructures and mechanical properties of Al-Cu-based alloy prepared by squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(3):

496-501.

- [29] ZHANG M L, XING S M, XIAO L M. Design of process parameters for direct squeeze casting[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 15(3): 339–343.
- [30] THIRUMAL A M, MOHAN B, RAJADURAI A. Comparative study of squeeze casting of AA6061 with and without employing ultrasonic cavitations[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 541/542: 349–353.
- [31] DAI W, WU S S, LU S L, LIN C. Effects of rheo-squeeze casting parameters on microstructure and mechanical properties of AlCuMnTi alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 538: 320–326.
- [32] RUSS J C. Practical stereology[M]. New York: Plenum Press, 1986.
- [33] MONDOLFO L F. Aluminum alloys: Structure and properties[M]. London: Butterworths, 1976.
- [34] 范建磊,郑成坤,罗宗强,张卫文. 压力对铸造 Al-Li-Cu 合金 组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9): 2307-2314.
 FAN Jian-lei, ZHENG Cheng-kun, LUO Zong-qiang, ZHANG Wei-wen. Effect of pressure on macro-/micro- structures and mechanical properties of Al-Li-Cu cast alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(9): 2307-2314.
- [35] GHOMASHCHI M R, VIKHROV A. Squeeze casting: An

overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101: 1-9.

[36] 罗守靖,陈炳光,齐丕骧. 液态模锻与挤压铸造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
 LUO Shou-jing, CHEN Bing-guang, QI Pei-xiang. The

technology of liquid forging and squeeze casting[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

- [37] KAMGA H K, LAROUCHE D, BOURNANE M, RAHEM A. Solidification of aluminum-copper B206 alloys with iron and solid additions[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(11): 2845–2855.
- [38] 刘清梅. 超声波对金属凝固特性及组织影响的研究[D]. 上海: 上海大学, 2007.
 LIU Qing-mei. Research of ultrasonic treatment on solidfication characteristics and structure of metals[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.
- [39] JIANA X, XUA H, MEEKA T T, HAN Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials Letters, 2005, 59: 190–193.
- [40] SALAS G F, NOGUEZ M E, RAMIREZ J G. Application of secondary dendrite arm spacing-cooling rate equation for cast alloys[J]. Transactions of the American Foundry Society, 2000, 108: 593–597.

Microstructure and mechanical property of Al-5.0Cu-1.0Fe alloy treated by compound field

LUO Zhi, ZHANG Yang, ZHAO Yu-liang, ZHANG Wei-wen

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, China)

Abstract: Compound field was firstly used to influence the solidification of Al alloy, and the effect of different field on the microstructure and mechanical properties was investigated. The microstructure and micro-hardness of Al-5.0Cu-1.0Fe alloy treated by compound field (combination of 50 MPa pressure field and 800 W ultrasonic field) were studied by image analysis, scanning electron microscopy and electron probe micro-analysis. The results show that both 50 MPa pressure field and ultrasonic field decrease the second dendritic arm spacing, thin and spread the second intermetallics. Meanwhile, large amounts of iron-rich phases transform from acicular shape to Chinese script morphology. Compared with the single field, the microstructure of the alloy treated by compound field is refined and modified more obviously. The casting defects, such as porosity, are reduced more efficiently when 50 MPa pressure field is applied, and the alloy applied compound field has the highest micro-hardness with the smallest volume percentage of porosity. The mechanism of compound field was also preliminarily discussed, which results from ultrasonically-induced cavitation and acoustic streaming effect and pressurely-induced pressure effect.

Key words: Al-5.0Cu-1.0Fe alloy; ultrasonic field; pressure field; iron-rich phases; microstructure; micro-hardness

Foundation item: Project(51374110) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2015A030312003) supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China

Received date: 2015-04-19; Accepted date: 2015-11-30

Corresponding author: ZHANG Wei-wen; Tel: +86-20-87112933; E-mail: mewzhang@scut.edu.cn

<u>71</u>4