

电磁连铸 2219 铝合金铸锭组织特性及均匀化研究

杨春峰¹ 周秉文^{1,2} 孟令刚^{1,2} 亚 斌^{1,2} 徐大召¹ 姜明希¹ 张兴国^{1,2}
(1.大连理工大学材料科学与工程学院,2.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 在半连续铸造过程中施加中频磁场制备了 $\phi 180$ mm 的 2219 铝合金铸锭,研究电磁场对铸锭微观组织的影响,以及不同均匀化处理制度下微观组织的变化。结果表明,电磁场引起的电磁搅拌作用能明显细化晶粒,促进晶间第二相呈断续粒状分布,有效抑制枝晶偏析;均匀化处理后,第二相回溶更加充分,颗粒更加细小均匀,扩大了均匀化窗口。确定电磁连铸 2219 铝合金较合理的均匀化制度为 $530\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 。

关键词 2219 铝合金;电磁连铸;第二相细化;均匀化
中图分类号 TG146.21;TG249.7 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure Characteristics and Homogenization of 2219 Aluminum Alloy
Ingot by Electromagnetic Continuous Casting

Yang Chunfeng¹, Zhou Bingwen^{1,2}, Meng Linggang^{1,2}, Ya Bin^{1,2}, Xu Dazhao¹, Jiang Mingxi¹,
Zhang Xingguo^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology)

Abstract: 2219 aluminum alloy ingot with diameter of $\phi 180$ mm was successfully prepared by applying medium frequency magnetic field during semi continuous casting process, and the influence of electromagnetic field on microstructure of ingot as well as microstructure evolution under different homogenization treatment systems were investigated. The results indicate that electromagnetic stirring induced by electromagnetic field can obviously refine grains, which promotes the intermittent granular distribution of the intergranular second phase and effectively inhibits dendrite segregation. The homogenization treatment of electromagnetic casting ingot leads to sufficient remelting of the second phase with fine and uniform grains, expanding the homogenization window. Therefore, the reasonable homogenization system of 2219 aluminum alloy by electromagnetic continuous casting was determined as $530\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$.

Key Words: 2219 Aluminum Alloy, Electromagnetic Continuous Casting, Second Phase Refinement, Homogenization

2219 铝合金具有高强、可焊、耐蚀及良好的力学性能等特点,近年来被广泛应用于航空航天等领域,如新一代重型运载火箭燃料贮箱的过渡环^[1-4]。但是由于 2219 铝合金中 Cu 的质量分数为 5.8%~6.8%,而 Al 基体中 Cu 元素的饱和溶解度为 5.65%,使其在凝固过程中富集,沿晶界析出 $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}$ 共晶组织,形成严重的枝晶偏析,因遗传效应导致材料经后续加工后的性能差,极大地限制了其在航空航天等领域的应用。

近年来,在半连续铸造过程中主要通过施加物理外场如超声场^[5-7]、电磁场^[8]等来有效改善 2219 铝合金铸

锭的凝固组织,细化晶粒、减小枝晶偏析。钟贞涛等^[9]通过对 2219 铝合金熔体施加超声场,发现超声能细化晶粒,尤其是心部晶粒的细化率最高,达到 39.6%。文嘉利等^[10]采用电磁搅拌技术制备的 2219 铝合金铸锭,相比常规铸锭,整体平均晶粒尺寸由 $546\text{ }\mu\text{m}$ 减小为 $186\text{ }\mu\text{m}$ 。邱阳^[11]采用内置电磁熔体处理技术制备的 2219 铝合金铸锭平均晶粒尺寸在 $124\sim 135\text{ }\mu\text{m}$ 之间,组织整体上分布均匀,显著改善了 Cu 元素的宏观偏析。ZHAO H D 等^[12]在铸造过程中施加复合反向电磁场,可以显著细化 2219 铝合金铸锭中心的晶粒,使整

收稿日期:2023-01-09;修改稿收到日期:2023-03-11
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702900);国家自然科学基金资助项目(51971049)
第一作者简介:杨春峰,男,1998 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail:yl5935345845@163.com
通信作者:周秉文,男,1981 年出生,副教授,辽宁大连(116024),E-mail:zbw@dlut.edu.cn
引用格式:杨春峰,周秉文,孟令刚,等. 电磁连铸 2219 铝合金铸锭组织特性及均匀化研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12):1 658-1 663.
YANG C F, ZHOU B W, MENG L G, et al. Microstructure characteristics and homogenization of 2219 aluminum alloy ingot by electromagnetic continuous casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 658-1 663.

个横截面的平均晶粒尺寸保持在 149~223 μm 之间,而且 Cu 元素的分布更加均匀。

由于 2219 铝合金铸锭铸态组织存在大量非平衡共晶相,需要通过均匀化处理来进一步消除,最大限度地提高合金的加工性能^[13-14]。黄元春等^[15]对常规铸造 2219 铝合金进行 455℃×20 h+530℃×20 h 双级均匀化处理后,发现组织中的非平衡共晶相(Al₂Cu)仍存在少量长针状残余。谢皎等^[16]发现超声铸造 2219 铝合金在 550℃×24 h 均匀化处理后,第二相的溶解并不充分,在晶界上仍分布着少许 Al₂Cu 相。可以看出,均匀化处理需要在高温下保温很长时间才会达到比较满意的效果,且结合实际生产,造成了大量能源和成本上的消耗。

通过施加物理外场虽然可以细化晶粒与共晶相,但目前并未将该工艺与均匀化工艺建立起密切的联系以及系统的优化,相关的研究报道较少。电磁连铸技术是在电磁铸造的基础上,在感应线圈内增加了带有切缝的结晶器,可以减少约束熔体所需的电磁能量,减轻金属液面的波动,得到更加优异的铸坯^[17]。本研究通过制备常规铸造和电磁连铸 2219 铝合金铸锭,探讨电磁场在铸造过程中对晶界非平衡共晶相以及对后续均匀化工艺相转变的影响,以期获得高品质铸坯、控制共晶相组织以及优化均匀化工艺提供参考。

1 试验方法

以纯铝(99.75%,质量分数,下同)、Al-50Cu、Al-10Mn、Al-5V、Al-5Ti 和 Al-5Zr 为原材料熔炼制备 2219 铝合金铸锭,其实际的化学成分见表 1。

表 1 试验用 2219 铝合金的化学成分

Tab.1	Chemical composition of 2219 aluminum alloy					%
成形方法	w_B					
	Cu	Mn	Zr	Ti	V	Al
常规铸造	6.38	0.32	0.18	0.07	0.10	余量
电磁连铸	6.30	0.32	0.20	0.05	0.10	余量

分别采用常规铸造和电磁连铸工艺制备了 φ180 mm 的 2219 铝合金铸锭,试验装置见图 1。具体铸造参数如下:浇注温度为 760℃,拉坯速度为 65 mm/min,冷却水量为 60 L/min,液柱高度为 40 mm,中频电源功率为 12.42 kW,频率为 2 500 kHz。

采用 404C 型差示扫描量热仪对两种方法所得 2219 铝合金试样进行 DSC 分析,确定合金的过烧温度。然后采用箱式电阻炉对试样进行不同均匀化温度(515、530、545℃,8 h)和均匀化时间(530℃,6、8、10、12 h)处理,空冷。

采用 X 射线荧光光谱仪(D8 Advance)对沿半径方

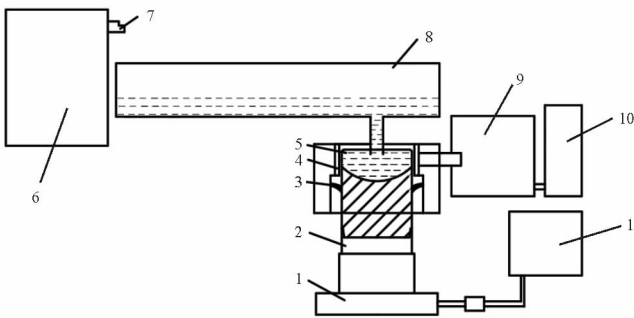


图 1 电磁连铸系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic continuous casting system

1.铸造平台 2.底模 3.冷却水 4.感应线圈 5.金属液 6.倾翻式熔化炉 7.浇口 8.流槽 9.变压器 10.中频电源 11.控制系统

向从边部至中部均匀选取的 6 个试样(记为 A~F)进行成分检测。将均匀化前后的试样打磨、抛光后,采用 SU5000 型扫描电镜观察晶界第二相数量、形貌及分布特征,并用 ImageJ 对第二相的尺寸与分布进行统计,用 EDS 能谱仪对第二相粒子的化学成分进行分析,然后用 Keller 试剂腐蚀后在 YT-3 型光学显微镜下进行金相组织观察,用线性截距法测量晶粒尺寸,并对结果进行统计分析。

2 试验结果与分析

2.1 铸态组织分析

图 2 为常规铸造和电磁连铸 2219 铝合金铸锭的显微组织。可以看出,常规铸造 2219 铝合金铸锭组织粗大,分布不均匀。在铸造过程中由于结晶器铜线圈和冷却水的激冷作用,导致铸锭边部含有较多的等轴晶(见图 2a),晶粒尺寸为 228.17 μm;而铸锭内部温度较高,形成了较大的温度梯度,使 1/2 半径处和心部以粗大的等轴晶和树枝晶为主(见图 2b 和图 2c),晶粒尺寸分别为 267.60 μm 和 267.81 μm,很明显常规铸锭整个横截面上的晶粒尺寸相差较大。电磁铸锭的各个位置的组织分布均匀,以细小的等轴晶为主(见图 2d~图 2f),铸锭的边部、1/2 半径处和心部的晶粒尺寸分别为 115.91、110.35 和 118.58 μm,整个横截面上的晶粒尺寸相差不大。这是由于在电磁搅拌作用下,固液界面处粗大的枝晶被流动的熔体冲断,破碎的枝晶成为了异质形核的核心,而且整个熔体都受到了强制对流作用的影响,因此电磁连铸技术的晶粒细化作用遍布整个铸锭,不同位置的晶粒尺寸相近。此外,常规铸锭的晶界更为粗大,表明晶界上存在大量的第二相组织,成分偏析现象严重,而电磁铸锭的晶界明显细小均匀。

图 3 为 2219 铝合金通过两种铸造方式所得铸锭的 SEM 照片。其中亮白色部分是第二相,黑色区域为

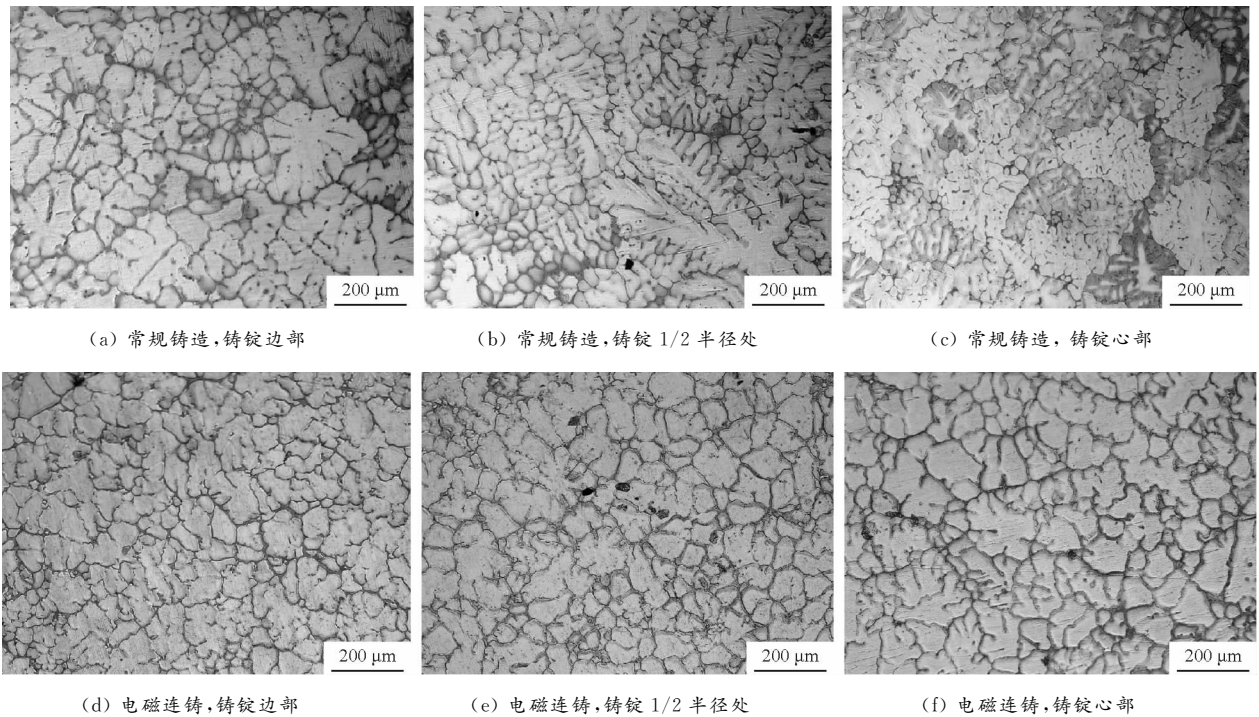


图 2 不同铸造方法所得 2219 铝合金铸锭的微观组织

Fig.2 Microstructure of 2219 aluminum alloy ingots obtained by different casting methods

α -Al 基体。可以看出, 2219 铝合金常规铸锭的边部因激冷形成的第二相尺寸小、呈断续状均匀分布, 但到铸锭 1/2 半径处, 就出现了明显的网状化演变, 大量连续第二相分布在晶界上, 并因严重的枝晶偏析出现了粗大网状第二相聚集 (见图 3b), 该区域的第二相宽度为 $11.94\mu\text{m}$, 而在铸锭心部, 该尺寸所占的区域明显扩大,

第二相宽度达到了 $13.48\mu\text{m}$, 连续的网格状第二相的整体宽度也明显增大。表 2 为不同铸造方法所得铸锭截面元素含量。可以看出, 两种铸造方法所得铸锭除主合金元素 Cu 外, 其他元素在沿半径方向上的含量基本一致。但因非平衡凝固, 常规铸锭边部 Cu 含量为 5.82%, 明显低于心部 E 点的含量, 而电磁铸锭在电磁

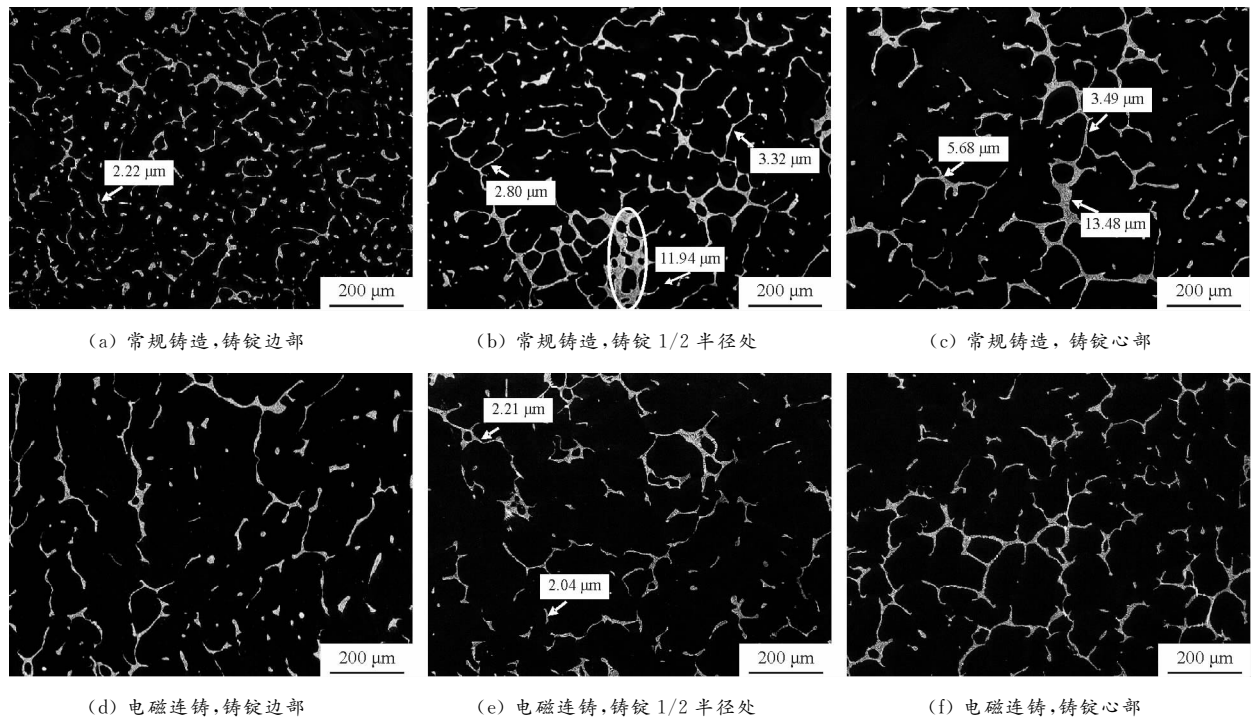


图 3 不同铸造方法所得 2219 铝合金铸锭第二相分布

Fig.3 The second phase distribution of 2219 aluminum alloy ingots produced by different casting methods

表 2 不同铸造方法所得铸锭截面元素含量
Tab.2 Element content of ingot section obtained by

成形 方式	取样 位置	different casting methods							%
		Cu	Mn	Zr	Ti	V	Fe	Al	
名义成分	-	5.8~ 6.8	0.2~ 0.4	0.10~ 0.25	0.02~ 0.1	0.05~ 0.15	≤ 0.30	余量	
常规铸造	A	5.82	0.33	0.21	0.06	0.12	0.09	余量	
	B	6.01	0.32	0.19	0.09	0.12	0.10	余量	
	C	6.29	0.32	0.19	0.09	0.12	0.10	余量	
	D	6.32	0.32	0.18	0.07	0.11	0.11	余量	
	E	6.59	0.33	0.17	0.05	0.09	0.11	余量	
	F	6.38	0.33	0.17	0.05	0.09	0.11	余量	
电磁连铸	A	6.04	0.33	0.20	0.06	0.12	0.10	余量	
	B	6.19	0.34	0.19	0.04	0.10	0.10	余量	
	C	6.34	0.34	0.19	0.05	0.11	0.10	余量	
	D	6.37	0.34	0.19	0.05	0.10	0.10	余量	
	E	6.38	0.34	0.19	0.05	0.10	0.10	余量	
	F	6.36	0.32	0.18	0.06	0.11	0.11	余量	

场的作用下,A 点 Cu 含量升高到 6.04%,使边部 Cu 元素的负偏析程度减小,且 C~F 点的含量相差不大,可见电磁场有效抑制了枝晶偏析,整体的第二相在相对一致的基础上,网状分布特征有所减弱,且1/2半径处第二相的平均宽度减小到 2.12 μm,晶界第二相的面积分数由 7.98%减小到 3.49%。

图 4 为 2219 铝合金常规铸锭和电磁铸锭 1/2 半径处所取试样的晶界第二相组织形貌。可以看出,第二相以 Al₂Cu/Al 共晶组织为主,伴随少量形状不规则的骨骼状 Al₂Cu 相。电磁场对晶界第二相的内部结构同样产生了显著影响,常规铸造下的共晶第二相内的 Al₂Cu 相粗大,且更易形成骨骼状 Al₂Cu 相,而图 4 左侧圆圈和箭头①的较宽的共晶区域内,电磁铸锭的共晶第二相内的 Al₂Cu 相得到了明显细化,右下圆圈和除箭头①外其他箭头处较窄的共晶区域位置,电磁铸锭仍可较好的保持共晶相形态。共晶组织中 Al₂Cu 相越细小,越有利于 Cu 元素在均匀化处理过程中固溶于 Al 基体中。

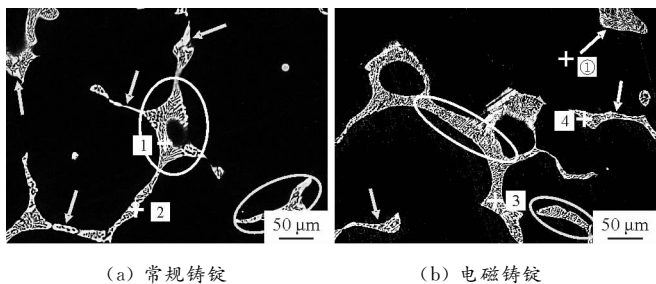


图 4 不同铸造方法所得 2219 铝合金 1/2 半径处的高倍 SEM 照片

Fig.4 High magnification SEM images of 2219 aluminum alloy at 1/2 radius obtained by different casting methods

对图 4 中 1~4 点的特征部位进行微区 EDS 能谱

分析,结果见表 3。可以看出,Al₂Cu/Al 共晶组织中的 Al、Cu 含量基本一致,但电磁铸锭的相内部的 Fe 杂质元素的固溶含量有所提高,表明电磁场作用下抑制了杂质相的形成。

表 3 铸态 2219 铝合金第二相的化学成分
Tab.3 Chemical composition of the second phase in as-cast 2219 aluminum alloy

测试 位置	w _B				x _B				%
	Al	Cu	Mn	Fe	Al	Cu	Mn	Fe	
1	69.91	29.07	0.22	0.80	84.70	14.72	0.13	0.45	
2	66.31	32.86	0.13	0.70	82.44	17.09	0.07	0.40	
3	68.52	29.54	0.40	1.54	83.69	15.16	0.23	0.92	
4	65.63	33.11	0.36	0.90	81.71	17.49	0.25	0.55	

2.2 均匀化态组织分析

图 5 为两种铸造方法所得 2219 铝合金的铸态 DSC 曲线。可以看出,两种铸造方法所得铸锭的 DSC 曲线都出现了两个明显的吸热峰,652.5 °C 为常规铸造 2219 铝合金的熔化峰值温度,548.6 °C 为低熔点非平衡共晶相(Al₂Cu 相)的熔化温度^[18],即在该温度下,Al₂Cu 相开始回溶到 α-Al 基体当中;电磁连铸 2219 铝合金熔化峰值温度为 655.6 °C,低熔点非平衡共晶相(Al₂Cu 相)的熔化温度为 547.8 °C。相比常规铸造,电磁连铸下的 Al₂Cu 相的熔化温度降低了 0.8 °C,结合表 3 中 Fe 元素在 Al₂Cu/Al 共晶组织中的含量升高,可判断其为产生偏差的主要原因之一,但这种小幅度的降低也将对铸锭的均匀化处理产生有利作用。

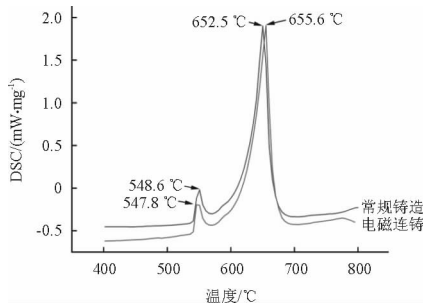


图 5 不同铸造方法下铸态 2219 铝合金的 DSC 曲线
Fig.5 DSC curves of as-cast 2219 aluminum alloy obtained by different casting methods

图 6 为两种铸锭在 1/2 半径处取样经不同温度均匀化处理 8 h 后的 SEM 照片。可以看出,随着均匀化温度提高,晶界上的第二相不断减少,连续网状结构被破坏,Cu 渐渐固溶到基体中。对比图 6a 和图 6d 可知,经 515 °C×8 h 处理后,常规铸锭的第二相形貌整体未发生明显改变,而电磁铸锭中第二相的网状结构已基本被破坏,在低温均匀化处理下表现出了优异的快速分解特性;温度升高至 530 °C 后,电磁铸锭中第二相的面积分数由 3.44%减小到 2.08%,绝大部分已经回溶到基体当中,仅在沿晶界和枝晶臂间残余细小颗粒状相,而常

规铸锭晶界处仍残余大量连续白亮色的共晶相。继续升温到 545 ℃ 后,电磁铸锭枝晶臂间的细小第二相继续被固溶消除,残余相整体分布均匀,无明显不规则大块相残余,但常规铸锭在此温度下第二相的面积分数为 2.45%,此工艺下才接近电磁铸锭在 530 ℃ 保温 8 h 后的均匀化效果,且仍有大量亮白相残余。综合对比可以

确定 530 ℃ 为电磁连铸 2219 铝合金的理想均匀化温度,较常规铸造降低了 15 ℃ 左右。

图 7 为两种铸造方法所得铸锭在 1/2 半径处所取试样在 530 ℃ 不同均匀化时间处理后合金的 SEM 照片。可以看出,保温时间对第二相的固溶影响明显,电磁连铸 2219 铝合金在 530 ℃ 下保温 6 h,晶界上仍残余

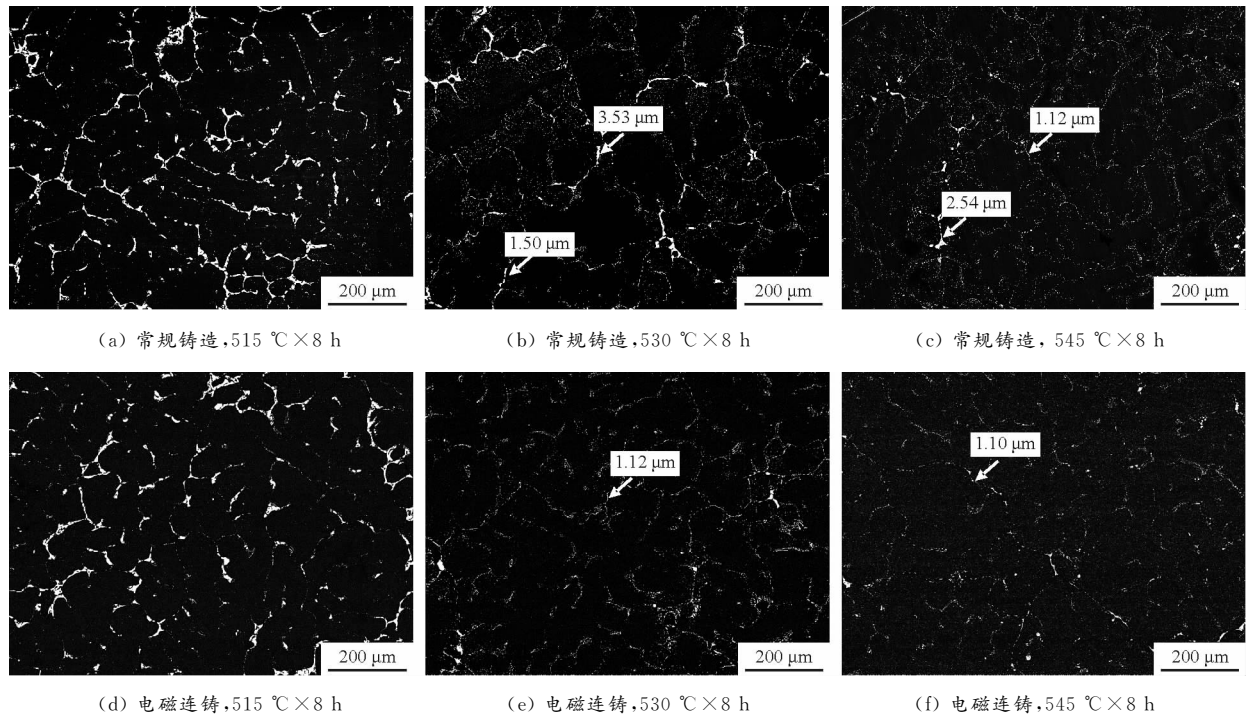


图 6 不同铸造方法所得 2219 铝合金不同均匀化温度处理 8 h 后的 SEM 照片

Fig.6 SEM images of 2219 aluminum alloy obtained by different casting methods after homogenization treatment at different temperatures for 8 h

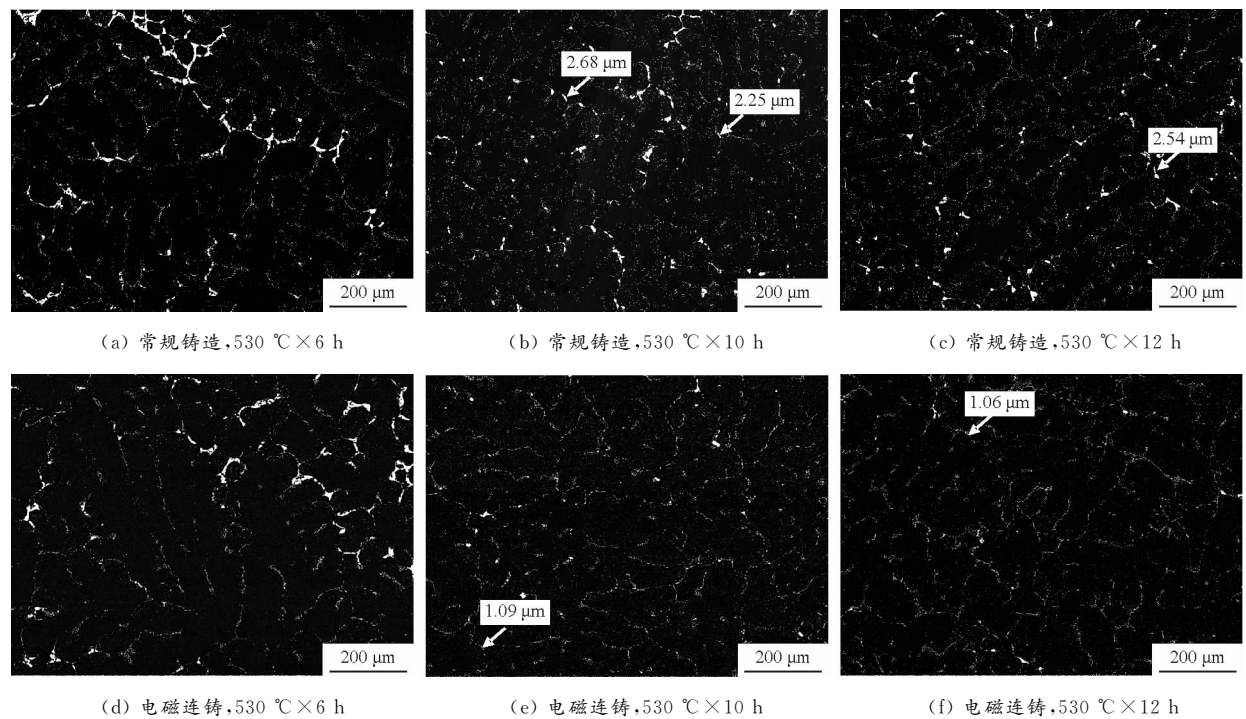


图 7 不同铸造方法所得 2219 铝合金在 530 ℃ 不同均匀化时间处理后的 SEM 照片

Fig.7 SEM images of 2219 aluminum alloy obtained by different casting methods after homogenization at 530 ℃ for different time

大量非平衡共晶相,与常规铸造相似。但在一定时间后就表现出了快速固溶特征与优势,而常规铸造下的第二相则固溶速率较慢,8 h 仍为连续的网状特征。随着均匀化时间的继续延长,常规铸锭的第二相虽然能够通过进一步的固溶破坏连续性,但大量残余晶界的大尺寸第二相难以得到继续固溶,这与图 4 中大量粗化的骨骼状 Al_2Cu 相密切相关。而电磁铸锭随着保温时间的延长,细小的颗粒状第二相可得到进一步的固溶,结合图 6 和图 8,此工艺下第二相的面积分数为 1.92%,达到与 545 $^{\circ}\text{C}$ (此工艺下第二相的面积分数为 2.02%) 相近的固溶效果。当保温时间延长到 12 h 后,未溶解第二相也不再发生明显变化,组织趋于稳定。

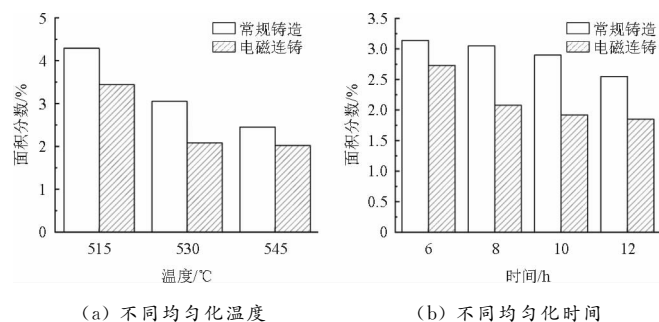


图 8 不同铸造方法所得 2219 铝合金在不同均匀化工艺处理后的第二相所占面积分数

Fig.8 Area fraction of the second phase of 2219 aluminum alloy obtained by different casting methods after different homogenization processes

综上,电磁连铸 2219 铝合金合适的均匀化工艺为 530 $^{\circ}\text{C} \times 8 \text{ h}$ 。可见,在经过电磁搅拌和均匀化处理双重作用后,2219 铝合金中第二相的回溶更加充分,第二相尺寸细小、含量更低且分布均匀,在降低均匀化工艺的要求、节省能源与降低成本的同时,可以有效改善 2219 铝合金后续的热加工性能。

3 结 论

(1)相比常规铸造,2219 铝合金在电磁场作用下,大部分粗大树枝晶被打碎,制备出的 2219 铝合金铸锭凝固组织更加细小均匀,整个横截面的晶粒尺寸相近。

(2)常规铸造 2219 铝合金铸锭存在大量的粗大网状第二相;而电磁场有效抑制了枝晶偏析,整体的第二相尺寸相对一致,且共晶区域内的 Al_2Cu 相也得到了明显细化。

(3)相比常规铸造均匀化结果,2219 铝合金在电磁场和均匀化处理双重作用后,第二相回溶更加充分,颗粒更加细小均匀,且较理想的均匀化工艺为 530 $^{\circ}\text{C} \times 8 \text{ h}$ 。

参 考 文 献

- [1] XU D F, CHEN K H, CHEN Y Q, et al. Evolution of the second-phase particles and their effect on tensile fracture behavior of 2219 Al-xCu alloys[J]. Metals, 2020, 10(2): 197.
- [2] 鄢东洋,郭彦明,董曼红,等.贮箱结构用 2A14 和 2219 铝合金的特性研究与分析[J].导弹与航天运载技术, 2019(3): 102-107.
- [3] 张昀,李晓谦,李瑞卿,等.2219 铝合金火箭贮箱过渡环复杂成形过程中 Al_2Cu 结晶相组织演变与力学性能研究[J].塑性工程学报, 2021, 28(5): 84-93.
- [4] QIU Y, ZHENG K H, LI X T, et al. Processing map of 2219 Al alloy prepared by internal electromagnetic stirring direct chill casting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 2 885-2 895.
- [5] ZHANG L, LI X Q, LI R Q, et al. Effects of high-intensity ultrasound on the microstructures and mechanical properties of ultra-large 2219 Al alloy ingot[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A763: 138 154.
- [6] LIU Z L, LI R Q, JIANG R P, et al. Scalable ultrasound-assisted casting of ultra-large 2219 Al alloy ingots[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, A50(3): 1 146-1 152.
- [7] LI A Q, JIANG R P, LIU Z L, et al. Effect of multi-source ultrasonic on the microstructure and mechanical properties of a large scale 2219 Al alloy ingot during casting[J].Frontiers in Materials, 2022, 9: 796 730.
- [8] 赵浩东,张志峰,白月龙,等.内置电磁熔体处理对大规格 2219 铝合金铸锭组织的影响[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 826-830.
- [9] 钟贞涛,李瑞卿,李晓谦,等.超声处理对 2219 大规格铝锭微观组织与宏观偏析的影响[J].工程科学学报, 2017, 39(9): 1 347-1 354.
- [10] 文嘉利,高志华,高明伟,等.电磁搅拌对 2219 铝合金铸锭组织及环轧性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 861-864.
- [11] 邱阳.内置电磁搅拌制备大规格高强韧铝合金铸锭研究[D].北京:北京有色金属研究总院, 2019.
- [12] ZHAO H D, ZHANG Z F, QIU Y, et al. Effect of combined electromagnetic fields on microstructure and properties of large-sized ingot of 2219 aluminum alloy[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 287-293.
- [13] 胡德友,李继光,张杰刚,等.航天贮箱用典型规格 2219 铝合金板材不同热处理状态下的性能研究[J].锻压技术, 2020, 45(10): 53-58.
- [14] WANG J, LU Y L, ZHOU D S, et al. Influence of homogenization on microstructural response and mechanical property of Al-Cu-Mn alloy[J]. Materials, 2018, 11(6): 914-920.
- [15] 黄元春,杨楚戈,刘宇,等.2219 铝合金铸锭均匀化热处理工艺[J].金属热处理, 2016, 41(12): 92-97.
- [16] 谢姣,李晓谦,李瑞卿,等.超声铸造 2219 铝合金均匀化工艺及第二相演变[J].中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(9): 2 288-2 293.
- [17] 邢清源. 5356 铝合金电磁连铸、净化和微合金化工艺研究[D].辽宁大连:大连理工大学, 2015.
- [18] 周刚.2219 铝合金轧制及热处理工艺研究[D].江苏常州:江苏理工学院, 2018.

(编辑:栗万仲)