

超声驻波作用下 Al-20%Si 合金的微观组织演变

王红玲, 乐启炽, 张志强, 崔建忠, 张向文

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 采用超声驻波处理 Al-20%Si 合金熔体, 研究不同超声驻波处理功率下 Al-20%Si 合金的微观组织演变, 探讨超声驻波对 Al-20%Si 合金凝固过程的作用和组织细化的机理。结果表明: 超声驻波能抑制初晶硅的析出, 但声辐射力的作用使已析出的初晶硅偏聚长大; 超声驻波处理能实现共晶硅“片状-纤维状”明显的形态转变, 凝固后共晶硅转变为频繁分支细小的纤维状; 超声功率越大, 共晶硅“片状-纤维状”的形态转变越明显; 超声驻波可以用于亚共晶 Al-Si 合金的变质处理中。

关键词: Al-20%Si 合金; 超声驻波; 微观组织演变

中图分类号: TG146.2; TG292 文献标志码: A

Microstructure evolution of Al-20%Si alloy with ultrasonic standing wave treatment

WANG Hong-ling, LE Qi-chi, ZHANG Zhi-qiang, CUI Jian-zhong, ZHANG Xiang-wen

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A hypereutectic Al-20%Si alloy was treated by ultrasonic standing wave and the microstructure evolution of Al-20%Si alloy was studied under different ultrasonic powers. The course of crystallization and mechanism of microstructural refinement for the ultrasonic treated alloy were also discussed. The results show that the precipitation of primary silicon is inhibited while the segregation and growth of primary silicon are promoted because of acoustic radiation force under the ultrasonic standing waves treatment. The morphology of eutectic Si is obviously changed after ultrasonic standing wave treatment, varying from flake to fiber shape. Eutectic Si is changed into fine fiber shape with many branches. With the increase of ultrasonic power, the morphological change of eutectic Si from flake to fiber shape is more obvious. Ultrasonic standing wave can be used in the modification of hypoeutectic Al-Si alloy.

Key words: Al-20%Si alloy; ultrasonic standing wave; microstructure evolution

过共晶铝硅合金具有热膨胀系数低、热裂倾向小、铸造性能优良、耐磨损好和生产成本低等优点, 在工业上有广阔的发展前景^[1]。但在一般铸造条件下, 过共晶铝硅合金结晶温度区间宽、结晶潜热大, 组织中易出现粗大的块状或板条状初晶硅和长针状或片状的共晶硅, 导致合金的力学性能降低^[2-3]。因此, 近年来如何细化铝硅合金中的初晶硅与共晶硅尺寸, 从而改善铝硅合金的组织与性能成为国内外研究的热点^[4-8]。

超声波与介质相互作用可使介质的状态、组成、结构、功能和性质等发生变化, 即发生超声效应, 具体可分为热效应、机械力学效应和空化效应。基于以上效应, 超声波具有促进催化、分散、凝聚、细化、合成和雾化等多种效果, 广泛应用于冶金与材料等领域。通过向金属熔体中导入超声波, 利用高强超声波产生的空化效应, 能够改变合金凝固行为, 改善凝固组织和提高化学成分的均匀性, 同时还可实现金属液的除气、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB632203); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAE22B03; 2012BAF09B01)

收稿日期: 2014-04-27; 修订日期: 2014-07-14

通信作者: 乐启炽, 教授, 博士; 电话: 024-83683312; E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn

细化晶粒与防止偏析效果^[9-12]。液体介质在超声波驻波场或近似驻波场作用下,其中具有中性浮升力的微粒就会在声辐射力作用下聚集长大,这就是超声凝聚效应^[13],因此,超声驻波可以实现金属熔体中夹杂物的净化分离。目前利用超声处理熔体的研究有很多。但是,超声驻波对金属熔体凝固行为影响的研究尚未见报道。因此,本文作者以过共晶 Al-20%Si 合金为研究对象,研究超声功率等工艺参数对 Al-20%Si 合金凝固后初晶硅和共晶硅形貌的影响,进而探究超声驻波对金属熔体凝固行为的影响机理。

1 实验

所用合金材料是工业 Al-20% Si 合金。处理装置如图 1 所示,主要由电阻炉、超声发生系统、超声导入杆和石墨坩埚组成,超声驻波通过超声导入杆与石墨坩埚的形状与相对位置的合理设计来实现。超声发生系统频率为(20±2) kHz,功率为 0~2 kW。

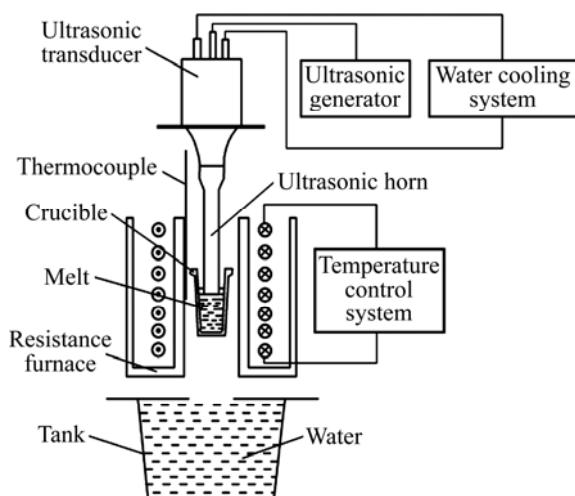


图 1 超声处理实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment facility of ultrasonic treatment

将预先准备好的 Al-20% Si 中间合金放入内部有氮化硼涂层的锥形不锈钢坩埚(上口内径 70 mm, 底部内径 50 mm)中后放入 5000 W 的电阻加热炉中进行熔炼。处理温度为 650 °C。同时将变幅杆放在电阻炉中加热,控制其温度与处理温度相同。当熔体温度达到 650 °C 时,揭开炉盖,用扒渣勺扒掉表面的炉渣,将变幅杆插入熔体中,超声头端部伸入熔体 2 cm 左右,然后施加不同功率(0、400、660 和 950 W)超声处理 60 s 后,升高变幅杆,立即将坩埚放入水中。在距离

超声源正下方 20 mm 的位置截取试样,采用标准金相试样制备方法制样,最后用 Lecia 金相显微镜进行金相观察。为了观察共晶组织的形貌,将试样用 10%(体积分数)的盐酸浸蚀 1 h,用酒精清洗并吹干后在扫描电子显微镜下观察。

2 结果与讨论

2.1 驻波超声功率对 Al-20%Si 合金微观组织的影响

本研究中 Al-20%Si 合金凝固组织由初晶硅相、 $(\alpha(\text{Al})+\text{Si})$ 共晶体和枝晶状 $\alpha(\text{Al})$ 相组成。图 2 所示为 650 °C 时 Al-20%Si 合金在不同功率(0、400、660 和 950 W)超声下处理 60 s 后得到的凝固组织。从图 2 可以看出,没有经过超声处理的样品中含有大量团絮状的初晶硅,加入 400 W 超声波时,团絮状初晶硅变成长宽比较大的板条状,并且有偏聚趋势。随着功率的继续增加,在 660 W 时,板条状初晶硅被击碎,且偏聚明显。而在 950 W 时,大颗粒初晶硅较多。可见,超声处理能使析出的初晶硅偏聚长大。

从 Al-Si 合金二元相图上可知,Al-20%Si 合金的液相线温度约为 690 °C^[14], 650 °C 时,合金处于液固相变过程中,首先析出的是初晶硅固溶相,由于硅含量很高,可将其认为是纯硅。其物理性质与硅接近,可将初晶硅粒子认为是粒状夹杂。熔体超声处理时,超声波在坩埚中形成驻波场,初晶硅在超声场作用下运动情况主要受声辐射力 F_{ac} 、Stokes 力 F_{d} 和有效浮升力 F_{b} 的影响,其运动方程如下所示^[15-16]:

$$\frac{4}{3}\pi R^3(\rho' + \frac{\rho}{2}) \frac{d^2x}{dt^2} = F_{\text{ac}} + F_{\text{d}} + F_{\text{b}} \quad (1)$$

$$F_{\text{d}} = -6\pi\mu R \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

$$F_{\text{b}} = \frac{4}{3}\pi R^3 g(\rho - \rho') \quad (3)$$

$$F_{\text{ac}} = -\frac{4\pi}{3} R^3 k E_{\text{ac}} A \sin(2\pi x) \quad (4)$$

$$E_{\text{ac}} = \frac{Q}{\omega} P = \frac{Q}{\omega} \cdot \frac{0.2W}{V} \quad (5)$$

$$A = \frac{5\rho' - 2\rho}{2\rho' + \rho} - \frac{\gamma'}{\gamma} \quad (6)$$

式中: R 为初晶硅粒径; ρ 和 ρ' 分别为熔体与初晶硅的密度; x 为初晶硅距离声压节(或腹)的距离; t 为时间; F_{ac} 为声辐射力; F_{b} 为有效浮力; F_{d} 为 Stokes 力; μ 和 c 分别表示熔体黏度和声波的传播速度; g 为重力加速度; k 为波数; E_{ac} 为时均声能密度; A 为悬浮的

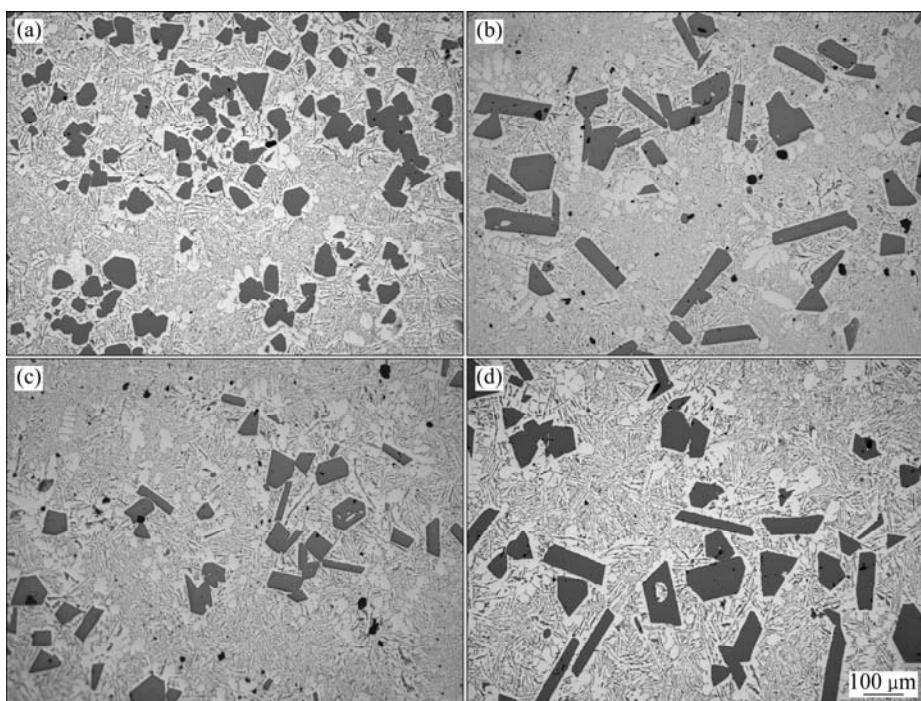


图 2 驻波超声功率对 Al-20%Si 凝固组织的影响

Fig. 2 Effect of ultrasonic powers solidification structures of Al-20%Si alloy: (a) Without ultrasonic treatment; (b) 400 W; (c) 660 W; (d) 950 W

声对比因数($A > 0$ 时, 初晶硅向最近的声压节运动; $A < 0$ 时, 初晶硅向最近的声压腹运动); Q 为机械品质因子; ω 为角速度; P 为声能密度; W 为声功率; V 为熔体体积。

在声辐射力作用下, 初晶硅将向声压节或声压腹运动, 当运动到声压节或声压腹时, 由于侧向初级声辐射力和次级声辐射力的作用而偏聚甚至合并长大, 其受力情况和作用机理分别如图 3 和 4 所示^[17], 所以 400 W 超声驻波处理时, 在超声驻波声辐射力作用下

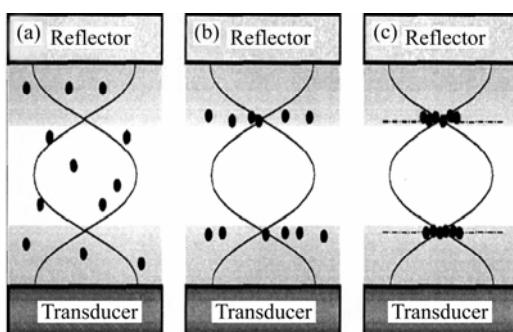


图 3 驻波超声场作用下粒子的运动

Fig. 3 Movement of particles within ultrasonic standing wave (USW): (a) Standing excited by standing wave; (b) Particles moving to wave; (c) Conglomeration of particles within wave

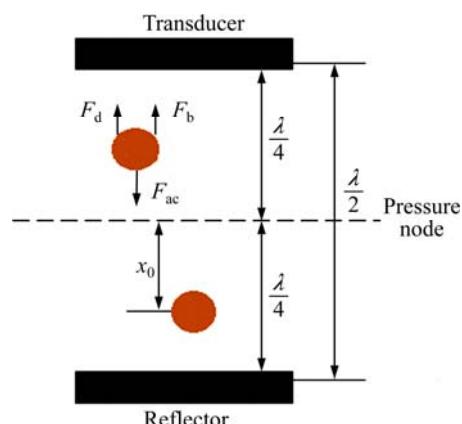


图 4 超声场作用下粒子的受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of inclusion particles force within acoustic field

初晶硅晶粒比未施加超声时大。继续增大超声功率至 660 W 时, 声空化效应增强, 强大的冲击波将初晶硅击碎, 同时声辐射力也增大, 导致偏聚明显。当超声功率为 950 W 时, 热效应增强, 熔体的体积粘滞系数降低, 空化效应降低, 对合金的细化能力下降。因而 950 W 超声处理时大颗粒初晶硅数量比 600 W 超声处理时的多。

图 5 所示为在 650 °C 时, 分别加 0, 400, 660 和 950 W 的超声功率处理 60 s 后得到的在不同功率下初

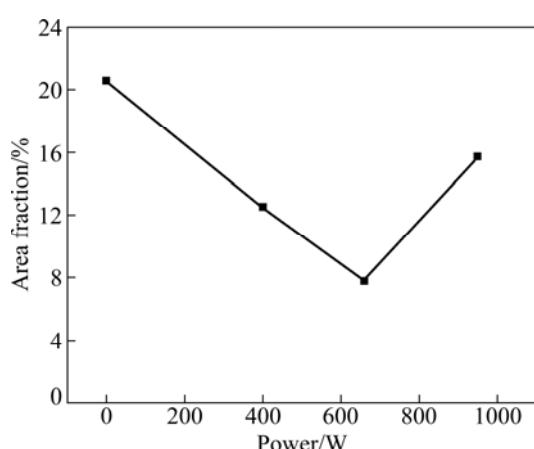


图 5 不同超声功率下初晶硅的面积分数

Fig. 5 Area fraction of primary silicon after treated by different ultrasonic powers

晶硅占整个面积的分数。由图 5 可以看出, 随着功率的增大, 初晶硅所占面积分数减小, 在没有进行超声处理时, 初晶硅所占面积分数达到 21%。在加 400 W

时, 初晶硅面积分数就降到了 12%, 在 660 W 时降到了 10%以下, 这说明超声处理能够阻止硅颗粒的析出, 这可能是因为超声处理对存在于铝硅合金的液态结构中的 Si—Si 共价键团簇有削弱作用, 超声作用下合金液中的 Si—Si 原子团簇的尺寸减小, 数目减少, 从而抑制了硅相的优先析出。但功率在 950 W 时初晶硅所占面积分数明显增大, 达到 15%, 这可能是大功率时超声波产生的热效应促使硅相析出并长大。

2.2 超声功率对 Al-20%Si 合金共晶硅形貌的影响

图 6 所示分别为在无超声处理、400 和 950 W 超声处理后凝固组织经过盐酸深度蚀刻的 SEM 像。由图 6 可以看出, 在无超声波作用时, 正常情况下共晶硅凝固得到针状或十字状的片层组织(从金相磨面上看似针状或条状); 加入一定功率的超声波后, 在针状组织的特定部位发生缩紧和熔断, 针状共晶硅尖端的曲率变大, 排列方向也发生混乱。超声功率 400 W 时, 共晶硅组织已不再规则, 这主要是由于超声的空化和振动作用使共晶硅断裂形成的。在超声功率 950 W 时

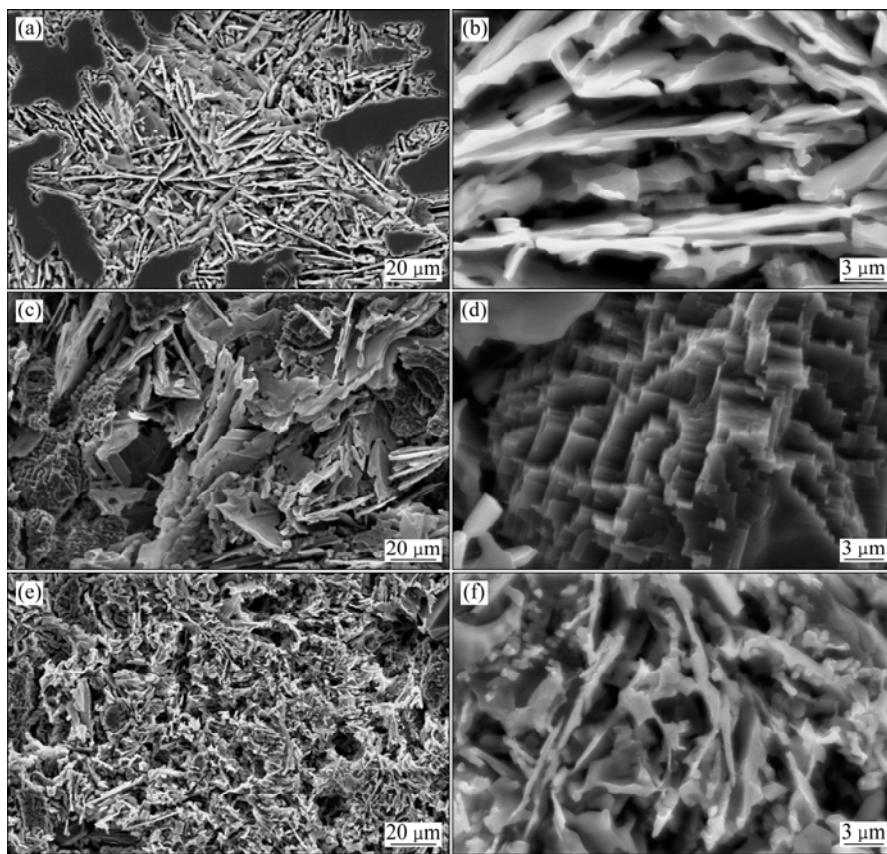


图 6 不同超声功率下共晶硅的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of eutectic silicon treated by different ultrasonic powers: (a) Without ultrasonic treatment; (b) 400 W, higher magnification; (c) 950 W, higher magnification; (d) Without ultrasonic treatment; (e) 400 W, lower magnification; (f) 950 W, lower magnification

这种现象更为明显, 此时共晶组织呈现迷宫状, 使共晶硅分布得更加均匀, 完全和基体中其他组织熔在一起, 形成了紧密的组织结构。

由高倍时的共晶形貌能更清晰地看出片层组织在功率超声作用下的断裂情况。随着超声功率的增大, 共晶硅从平行的片层组织变成频繁分支纤维状组织或者是混乱无序的小颗粒。在无超声波作用时, 片间距比较大, 片层较厚, 而且呈平行形态; 加入 400 W 超声波处理后, 片间距降低, 平行片层组织消失; 加入 950 W 超声波处理后, 共晶组织变为细小纤维状, 且方向混乱, 分布也比较分散。功率超声处理能实现共晶硅“片状-纤维状”的形态转变, 且抑制了初晶硅的析出, 凝固后共晶硅转变为频繁分支细小的纤维状。这与锶变质对 Al-Si 合金共晶硅的作用效果类似^[18]。

Al-Si 共晶团生长过程中, Si 晶体作为领先相, 而 α (Al)依附共晶硅进行形核与生长。而且, 共晶团发展过程中, α (Al)会随着共晶硅的生长不断形成^[19]。当高强超声浸入到熔融金属熔体中时, 出现有声空化和声流两种现象, 并且这 2 个现象对过共晶 Al-Si 合金凝固行为有重大的影响^[20-21]。在空化区域, 空化泡长大将从空化泡周围熔体吸收能量, 导致在空化泡表面产生过冷, 在这一区域有利于大量晶核的形成。空化泡膨胀崩塌后产生大量细小的空化泡并产生强大的冲击波, 在凝固期间产生的共晶片层一部分生长方向被改变, 另一部分被击碎成为新的形核质点。在声流的作用下, 形成的晶核均匀地分布到整个熔体中, 熔体的混乱度增加。同时大量空化泡的崩塌使局部区域产生瞬时的高温、高压和强烈的冲击波, 冲击波击碎共晶片层或改变片层取向, 高温熔断共晶片层, 使原本平滑的生长变得凹凸不平, 改变了原来的结晶方式, 实现共晶 Si“片状-纤维状”的形态转变。超声处理也使得熔体中温度更加均匀, 这样利于熔体均匀凝固, 使 Al-20%Si 合金在超声作用下凝固时, 共晶组织片层数增多, 片层变细, 片层间距变小。且超声功率为 950 W 时的作用效果比 400 W 时的作用效果明显。

本研究中超声驻波能使 Al-Si 合金中共晶硅实现明显的“片状-纤维状”形态转变, 起到良好的变质效果, 而对初晶硅作用效果却不佳。因此, 可以认为超声驻波可以用于无初晶硅析出的亚共晶 Al-Si 合金变质处理中。

3 结论

1) 超声驻波能抑制初晶硅的析出, 但能使已析出

的初晶硅偏聚长大。

- 2) 超声驻波处理能实现共晶硅“片状-纤维状”的形态转变, 凝固后共晶硅转变为频繁分支细小的纤维状。
- 3) 超声功率越大, 共晶硅“片状-纤维状”的形态转变越明显。
- 4) 超声驻波可以用于亚共晶 Al-Si 合金变质处理中。

REFERENCES

- [1] 张金山, 许春香, 韩富银. 复合变质对过共晶高硅铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 107-109.
ZHANG Jin-shan, XU Chun-xiang, HAN Fu-yin. Effect of composite codifier on structures and properties of hypereutectic Al-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 107-109.
- [2] 卢绍龙. 工艺条件对过共晶铝硅合金凝固组织的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009: 1-51.
LU Shao-long. Influences of technological conditions on hypereutectic Al-Si alloy solidification structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009: 1-51.
- [3] 张承甫, 龚建林, 黄杏蓉. 液态金属的净化与变质[M]. 上海: 上海科技大学出版社, 1992: 300-305.
ZHANG Cheng-fu, GONG Jian-lin, HUANG Xing-rong. The purification and modification of liquid metal[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology University Press, 1992: 300-305.
- [4] WU Shu-sen, ZHONG Gu, WAN Li, AN Ping, MAO You-wu. Microstructure and properties of rheo-diecast Al-20Si-2Cu-1Ni-0.4Mg alloy with direct ultrasonic vibration process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(s3): s763-s767.
- [5] 晋芳伟, 任忠鸣, 任维丽, 邓康, 钟云波, 余建波. 强磁场下过共晶铝硅合金凝固过程中初晶硅的迁移行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 313-319.
JIN Fang-wei, REN Zhong-ming, REN Wei-li, DENG Kang, ZHONG Yun-bo, YU Jian-bo. Migratory behaviors of primary crystal silicon in hypereutectic Al-Si alloy under high magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(2): 313-319.
- [6] HEDGE S, PRABHU K N. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys[J]. Journal of Material Science, 2008, 43: 3009-3027.
- [7] 毛卫民, 李树索, 赵爱民, 崔成林, 王德仁, 钟雪友. 电磁搅拌 Al-24%Si 合金的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 819-823.
MAO Wei-min, LI Shu-suo, ZHAO Ai-min, CUI Cheng-lin,

- WANG De-ren, ZHONG Xue-you. Microstructures of hypereutectic Al-24%Si alloy stirred by electromagnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 819-823.
- [8] 赵爱民, 毛卫民, 甄子胜, 姜春梅, 钟雪友. 冷却速度对过共晶铝硅合金凝固组织和耐磨性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 827-833.
- ZHAO Ai-min, MAO Wei-min, ZHEN Zi-sheng, JIANG Chun-mei, ZHONG Xue-you. Effects of cooling rate on solidification microstructures and wear resistance of hypereutectic Al-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 827-833.
- [9] 贾征, 张志强, 乐启炽, 王雪, 张海峰, 崔建忠. 超声场对AZ80镁合金熔体净化的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(10): 1780-1784.
- JIA Zheng, ZHANG Zhi-qiang, LE Qi-chi, WANG Xue, ZHANG Hai-feng, CUI Jian-zhong. Effect of ultrasonic field on AZ80 magnesium alloy melt purification[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(10): 1780-1784.
- [10] ABRAMA O V. High-intensity ultrasonics[M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998: 48-67.
- [11] ZHANG Zhi-qiang, LE Qi-chi, CUI Jian-zhong. Ultrasonic treatment of magnesium alloy melts and its effects on solidification microstructures[J]. Materials Science Forum, 2007, 546/549: 129-132.
- [12] 赵君文, 吴树森, 毛有武, 安萍. 超声振动对过共晶Al-Si合金半固态浆料凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(9): 1628-1633.
- ZHAO Jun-wen, WU Shu-sen, MAO You-wu, AN Ping. Effect of ultrasonic vibration on microstructure of semi-solid hypereutectic Al-Si alloy slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(9): 1528-1633.
- [13] SHAO Zhi-wen, LE Qi-chi, CUI Jian-zhong, ZHANG Zhi-qiang. Numerical simulation of standing waves for ultrasonic purification of magnesium alloy melt[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(s2): s382-s387.
- [14] 陆文华, 李隆盛, 黄良余. 铸造合金及其熔炼[M]. 北京:机械工业出版社, 2002: 262-263.
- LU Wen-hua, LI Long-sheng, HUANG Liang-yu. Alloy casting and smelting[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 262-263.
- [15] TOWNSEND R J, HILL M, HARRIS N R, WHITE N M. Modeling of particle paths passing through an ultrasonic standing wave[J]. Ultrasonics, 2004, 42: 319-324.
- [16] GORKOV L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid[J]. Soviet Physics Dokl, 1962, 6: 773-775.
- [17] HILL M. Microfluidic technologies for miniaturized analysis systems[M]. Springer, 2007.
- [18] MILENKOVIC S. Selective matrix dissolution in an Al-Si eutectic[J]. Corrosion Science, 2009, 51: 1490-1495.
- [19] SHANKAR S, RIDDLE Y, MAKHLOUF M M. Eutectic solidification of aluminum-silicon alloys[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2004, 35: 3038-3043.
- [20] ESKIN G I. Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys[J]. Ultrason Sonochem, 2001, 8: 319-325.
- [21] ABRAMOV O V. Non-linear effects of acoustic generation in solids[J]. Ultrasonics, 1987, 25: 73-82.

(编辑 龙怀中)