低频脉冲磁场对 60Si2CrVA 弹簧钢凝固组织的影响

朱成,李应举,罗天骄,郑策,冯小辉,杨院生

(中国科学院金属研究所,辽宁沈阳 110016)

摘要:研究了浇注前与浇注后施加脉冲磁场对60Si2CrVA弹簧钢凝固组织的影响。结果表明,浇注前与浇注后施加脉冲磁场对铸锭边部柱状晶生长均有明显的抑制作用,对铸锭心部 晶粒有明显的细化作用,但二者之间差别不大。与常规浇注铸锭相比,浇注40 s后施加脉冲 磁场柱状晶区仅为(4.9±0.3)mm,降低了53.7%,心部晶粒尺寸细化至(407±30)µm,降 低了47%。脉冲磁场引入的强制对流可使中心熔体的平均冷却速率由常规时的1.45℃/s提高至 2.36℃/s左右。脉冲磁场调控凝固组织的作用机制主要是促进了晶核增殖和漂移,对柱状晶 生长的阻碍效果更明显。

关键词:脉冲磁场;弹簧钢;凝固组织;晶粒细化

弹簧钢是汽车、精密仪器等装备上应用的重要弹性材料, 晶粒细小均匀的锭坯 是制备高质量弹簧钢的基础。电磁搅拌是一种比较常用的晶粒细化手段, 但是其存 在集肤效应。由于低频电磁场的渗透性更强, 脉冲磁场兼具了搅拌和振荡的效果, 因而低频脉冲磁场技术得到了众多学者的关注。

脉冲磁场作用可以提高等轴晶区的占比并细化晶粒,其对铝和镁等轻质合金的 影响十分显著,杨院生等人^[1]发现脉冲磁场使镁合金铸锭的柱状晶区消失并转变为细 小的等轴晶。但是,在钢的凝固过程中施加脉冲磁场有时难以消除柱状晶。Gao等人^[2] 发现施加脉冲磁场后不锈钢铸锭内依然全部由柱状晶组成,但是柱状晶宽度比未施 加磁场时细小。李莉娟等人^[3]研究发现脉冲磁致振荡作用可以使特殊钢铸锭的等轴晶 区占比增加,但依然存在较宽的柱状晶区。为了提高脉冲磁场的作用效果,其手段 主要为调整施加方式、脉冲电压和磁场频率等^[4],而对脉冲磁场施加时机的研究较 少。研究者们大多在浇注过程开始前施加磁场,在凝壳形成后施加脉冲磁场对铸锭 的凝固组织影响如何有待进一步研究。

本文以60Si2CrVA弹簧钢为研究对象,通过组织表征及温度测量等手段,研究浇注前及浇注一段时间后施加低频脉冲磁场对弹簧钢凝固组织的影响,并分析脉冲磁场调控凝固组织的作用机制。

1 试验过程

试验材料为从杭州钢铁有限公司采购的60Si2CrVA弹簧钢,试验装置包括中频感 应炉、脉冲磁场装置和石墨模具等,其中电磁线圈位于石墨模具外侧,如图1所示。 将总重7 kg的60Si2CrVA钢块置入到中频感应炉中重熔,熔炼过程中通入氩气保护; 待熔体温度升高至1 600 ℃时加入精炼剂,然后扒去表面浮渣并控制熔体温度 为1 500 ℃;静置5 min后进行浇注。本试验共浇注5个尺寸为Φ100 mm×100 mm的 合金铸锭。其中,1号试样为常规模铸铸锭;2~5号铸锭施加频率5 Hz、电压200 V的 低频脉冲磁场,2号试样浇注前施加磁场至完全凝固,3~5号试样为熔体浇注40 s后开

作者简介:

朱成(1994-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为金属凝固技术。E-mail:zhucheng0214@163.com通讯作者:
李应举,男,博士,研究员。E-mail:yjli@imr.ac.cn

中图分类号:TG261 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2024) 10-1374-04

基金项目:

国家重点研发计划 (2018YFA0702900);国 家科技重大专项(J2019-VII-0002-0142);国家自 然科学基金(51831007)。 收稿日期: 2024-01-23收到初稿, 2024-07-19收到修订稿。





图1 脉冲磁场铸造过程示意图 Fig. 1 Schematic diagram of the casting process with low voltage pulsed magnetic field

始分别施加10 s、30 s以及施加磁场至完全凝固。1、 2、5号试样凝固过程中,用W型热电偶测量熔体心部 位置(图1)的温度变化,然后求温度-时间曲线的一阶 导数,从而获得中心熔体的冷却速率;其中脉冲磁场 作用下熔体温度曲线存在轻微波动,对曲线进行了润 滑。完成凝固后,在距底部50 mm处沿铸锭横截面切取 边部和心部试样,样品经机械抛光和腐蚀后,用Axio Observer Z1金相显微镜观察其微观组织。通过截距法 测量晶粒平均尺寸,每个合金三组结果,取平均值。

2 试验结果

常规及不同脉冲磁场条件时铸锭边部的微观组 织如图2所示。常规浇注铸锭边部的柱状晶区宽度为 (10.6±0.5)mm(图2a);浇注前施加脉冲磁场至凝 固时,柱状晶区变窄,减小至(7.1±0.4)mm、降低 了33%;浇注完成40 s后施加10~30 s脉冲磁场时,铸 锭边部的柱状晶区宽度同样在7 mm左右,与浇注前施 加脉冲磁场铸锭的柱状晶区宽度相差不大;当浇注40 s 后施加脉冲磁场至凝固时,铸锭边部柱状晶区显著变 窄,仅为(4.9±0.3)mm,降低了53.7%。可见,在初 始凝壳形成后长时间施加脉冲磁场对柱状晶生长的抑 制作用优于浇注前施加磁场,但相差不大。

图3所示为常规浇注及不同脉冲磁场条件时铸锭心 部的微观组织,图4为不同铸锭心部区域的平均晶粒尺 寸统计结果。结果表明,常规浇注时铸锭心部等轴晶 粗大,平均尺寸(763±68)µm;浇注前施加脉冲磁场 时,铸锭心部晶粒显著细化至(439±36)µm,降低 约42%;浇注完成40s后施加10~30s脉冲磁场时,铸锭 心部晶粒有所细化,平均晶粒尺寸在540µm左右,降 低约30%;当浇注完成40s后施加脉冲磁场至完全凝固 时,铸锭心部晶粒尺寸与浇注前施加脉冲磁场铸锭晶 粒尺寸相近,其平均晶粒尺寸为(407±30)µm,降低 约47%。





图5所示常规浇注和浇注前及浇注40 s后施加脉冲 磁场铸锭中心的温度及冷却速率结果。可以看出,在 接近液相线温度区域以及两相区温度区域,浇注前与 浇注后施加脉冲磁场时中心熔体的瞬时冷却速率皆明 显高于未施加脉冲磁场时,但浇注前与浇注后施加脉 冲磁场时中心熔体的冷却速率相差不大。计算两相区 平均冷却速率结果表明,常规铸造时熔体心部区域的 平均冷却速率为1.45 ℃/s,浇注前施加脉冲磁场时熔体 的平均冷却速率显著提升至2.76 ℃/s,浇注后施加脉冲 磁场时熔体的平均冷却速率为2.36 ℃/s。

3 讨论

脉冲磁场对合金凝固组织的影响主要为两方面: 一方面是使铸锭柱状晶区变窄,另一方面是内部等轴 晶的细化。柱状晶向等轴晶的转变过程与温度梯度、 熔体流动和晶粒的阻碍等因素有关^[5-6]。浇注前施加脉 冲磁场时,浇注熔体中无晶核分布,晶核主要来源于 型壁区域。这些晶核在磁场搅拌作用下向熔体内部漂 移从而阻碍柱状晶的生长;此外,脉冲磁场引入强制 对流使熔体的温度分布更加均匀,温度梯度减小^[7],有 利于柱状晶向等轴晶的转变。浇注40 s后施加脉冲磁场 1376 **结**估 FOUNDRY 试验研究







时, 晶核一方面来源于凝壳处的凝固前沿区域的晶核 增殖; 另一方面, 根据Ohno的"separation"理论^[8], 在凝壳形成之前, 型壁上结晶的晶核或晶粒在外力或 对流的作用下漂移至熔体内部, 这些晶核在脉冲磁场 强制对流作用下阻碍柱状晶的生长。此外, 浇注40 s后 施加磁场时, 边部熔体温度更低且熔体侧面表层形成 凝壳, 这表明边部熔体区域的温度梯度相较于浇注前 施加磁场时的温度梯度更低, 从而导致浇注40 s后施加 脉冲磁场时铸锭边部柱状晶区的宽度小于浇注前施加 脉冲磁场的宽度, 但二者整体差异不大。

脉冲磁场主要通过提高固/液界面处的形核率、破



图5 常规与不同条件施加脉冲磁场浇注时铸锭中心的温度及冷却 速率曲线



碎枝晶和增加熔体的过冷度等细化晶粒^[1,9-10]。此外, 浇注前或浇注40 s后施加脉冲磁场引入的强制对流使 熔体与固相间的传热效率提高,从而提高中心熔体的 冷却速率(图5),有利于细化晶粒。由于中心熔体过 热,浇注后40 s时熔体心部区域依然在液相线温度以 上,熔体心部可能没有或有很少量晶核存在。因而, 浇注前与浇注后施加脉冲磁场对熔体心部晶粒尺寸的 细化程度相差不大。

试验研究 FOUNDRY 1377

4 结论

(1)浇注前与浇注40 s后的脉冲磁场作用均可以 显著减小铸锭边部的柱状晶区宽度,并且浇注40 s后施 加脉冲磁场时铸锭边部柱状晶区宽度仅为4.9 mm,与 常规浇注铸锭相比降低了50%。 (2)脉冲磁场作用使铸锭心部熔体的平均冷却速率由1.45℃/s提升至2.36℃/s左右;晶粒尺寸由常规浇注时的763 µm细化至407 µm左右,降低了47%,但浇注前与浇注后施加脉冲磁场对铸锭心部晶粒尺寸的影响相差不大。

参考文献:

- [1] 杨院生,付俊伟,罗天骄,等.镁合金低压脉冲磁场晶粒细化[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2639-2649.
- [2] GAO Y L, LI Q S, GONG Y Y, et al. Comparative study on structural transformation of low-melting pure Al and high-melting stainless steel under external pulsed magnetic field [J]. Materials Letters, 2007, 61 (18): 4011–4014.
- [3] 李莉娟,王郢,翟启杰.脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术在特殊钢中的应用 [J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1018-1030.
- [4] 李喜阔,程广奎,孙明,等. 外加能量场在镁合金铸造过程中的晶粒细化行为研究进展 [J]. 铸造,2023,72(6): 629–640.
- [5] TURCHIN A N, ZUIJDERWIJK M, POOL J, et al. Feathery grain growth during solidification under forced flow conditions [J]. Acta Materialia, 2007, 55 (11): 3795–3801.
- [6] ZHU C, ZHAO Z H, ZHU Q F, et al. Structures and macrosegregation of a 2024 aluminum alloy fabricated by direct chill casting with double cooling field [J]. China Foundry, 2022, 19 (1): 1–8.
- [7] 冀焕明,罗天骄,杨院生.AZ80镁合金低压脉冲磁场半连续铸造过程的数值模拟和试验研究 [J].中国有色金属学报,2017,27 (3):468-476.
- [8] OHNO A, MOTEGI T, SODA H. Origin of the equiaxed crystals in castings [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1971, 11 (1): 18–23.
- [9] 赵爱民,毛卫民,崔成林,等.电磁搅拌对弹簧钢60Si2Mn凝固组织的影响 [J].北京科技大学学报,2000,22(2):134-137.
- [10] 来昊民,白庆伟,田迎春,等.脉冲磁场对稀土AZ91D镁合金凝固组织及性能的影响 [J].铸造,2024,73 (1):68-75.

Effect of Low Frequency Pulsed Magnetic Field on the Solidification Structure of 60Si2CrVA Spring Steel

ZHU Cheng, LI Ying-ju, LUO Tian-jiao, ZHENG Ce, FENG Xiao-hui, YANG Yuan-sheng (Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract:

Effect of applying a pulse magnetic field before and after pouring on the solidification structure of 60Si2CrVA spring steel was studied. The results show that both the application of pulsed magnetic field before and after pouring significantly inhibits the growth of columnar crystals at the edge of the ingot and refines the grains in the center of the ingot. However, there is little difference between the two cases. Compared to conventionally casting, the application of pulsed magnetic field after 40 seconds of pouring results in a reduction of the columnar grain zone to (4.9 ± 0.3) mm, a decrease of 53.7%, and a refinement of the grain size in the center to (407 ± 30) µm, representing a 47% reduction. In addition, the application of low voltage pulsed magnetic field increased the average cooling rate at the center region of the melt from 1.45 °C /s (without applying the magnetic field) to 2.36 °C /s. The mechanism of pulsed magnetic field regulating solidification microstructure primarily lies in promoting the proliferation and drifting of crystal nuclei, with a more pronounced inhibiting effect on the growth of columnar crystals.

Key words:

pulsed magnetic field; spring steel; solidification structure; grain refinement