

高频电磁场对灰铸铁凝固组织的影响

范金辉^{1,2}, 郭志红², 刘瑞玲², 高静娜², 陈 锋¹, 朱世根¹

(1. 东华大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要: 研究了在高频电磁场作用下凝固的灰铸铁试样不同位置的石墨形态、共晶团组织及其硬度。结果表明: 施加高频电磁场后灰铸铁石墨形态发生明显变化, 由试样底部向上, 石墨由长直粗大的片状变为分布在枝晶间的细小点状或片状, 试样顶部呈均匀细小弯曲的片状; 共晶团尺寸减小, 试样硬度明显提高。高频电磁场的洛伦兹力作用和焦耳热效应对灰铸铁熔体的流动形态和温度分布产生影响, 增加了结晶核心数量, 减小温度梯度, 使凝固组织更加均匀细小。

关键词: 高频电磁场; 铸铁; 凝固组织

中图分类号: TG143.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2014) 03-0261-04

Influence of High Frequency Electromagnetic Field on the Solidification Structure of Gray Cast Iron

FAN Jin-hui^{1,2}, GUO Zhi-hong², LIU Rui-ling², GAO Jing-na², CHEN Feng¹, ZHU Shi-gen¹

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Department of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China)

Abstract: The graphite morphology, eutectic cell structures and the hardness at different positions of the gray cast iron test samples that solidified in the high frequency electromagnetic field were studied. The results indicate that under the effects of the high frequency electromagnetic field, the graphite morphology of the gray cast iron changed obviously, from long straight thick sheets into tiny dot or flake distributed among the dendrites from the bottom of the sample to upper part, and tiny bending sheets are showed at the top of sample. The size of the eutectic cell structure reduced, hardness of the sample was improved obviously. The Lorentz force and Joule heating effect of the high frequency electromagnetic affect melt flow and temperature distribution so that make the solidification structure more even and small by improving the number of the crystallization nuclei and reducing temperature gradient.

Key words: high frequency electromagnetic field; cast iron; solidification structure

我国灰铸铁件数量巨大, 应用广泛, 但灰铸铁件质量相对较差^[1]。为获得合格优质的铸件, 除控制铁液的冶金质量外, 还可通过控制铸件凝固过程, 来改善铸铁的凝固组织。电磁场技术可实现对金属凝固过程的控制^[2]。近年来, 许多学者对电磁铸造进行了广泛研究, 取得了很多成果。Mingjun Li等人对电磁场的搅拌作用对镁合金、铝合金和灰铸铁的凝固过程和凝固组织以及力学性能的影响进行了研究, 认为电磁场可以细化晶粒, 减少合金元素偏析, 提高力学性能^[3-5]; 闫猛, YIN Zhen-xing等研究了脉冲电流和直流电流对定向凝固胞状树枝晶组织的影响及电极和保温剂对脉冲电流细化晶粒的影响^[6-7], 彭帅等研究了脉冲磁场下Al-5Fe合金凝固组织的细化^[8]。电磁场、脉冲电流、脉冲磁场、超声波和激光等在金属凝固中的研究已经非

常多, 但是高频电磁场对铸铁凝固组织影响的研究涉及很少。本研究以亚共晶灰铸铁为试验材料, 在其凝固过程中施加高频电磁场, 对比分析试样不同部位凝固组织及其产生机理。

1 试验方法

试验选用灰铸铁材料, 将其加工成 $\Phi 20$ mm的圆柱形试样。使用特定的高频感应电源和自行绕制的高频感应线圈。试验时将灰铸铁试样置于圆柱形铸型内, 试样连同铸型一起放入高频感应线圈中(图1), 开启高频电源使灰铸铁试样熔化, 铁液温度达到1 350 °C时, 调节输出电流参数使试样在高频电磁场作用下凝固。试样冷却后沿试样轴向纵截面剖开, 观察其石墨形态、基体组织和共晶团形貌, 同时测定试样不同位

基金项目: 河北省教育厅科研计划项目 (2006421)。

收稿日期: 2013-10-18收到初稿, 2013-11-04收到修订稿。

作者简介: 范金辉 (1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为金属凝固控制和铸件质量控制。E-mail: fanjhbox@126.com

置的硬度。

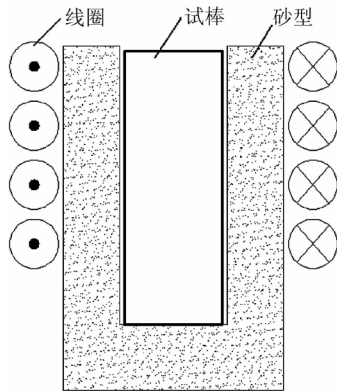


图1 试验示意图

Fig. 1 Sketch of experiment

2 试验结果

试样外观如图2所示，在高度方向上把试样分成三个区域，图中A点以下区域为试样底部，是没熔化，未经高频电磁场处理的区域；A和B之间为试样中部，外表面明显向内凹陷。B点以上为试样顶部，向上凸起，上表面呈球冠形。

2.1 石墨形态

对试样的整个纵剖面进行金相观察，图3为试样不

同位置的石墨形态。图3a为试样底部没有熔化未经高频电磁场处理的石墨形态，可见大部分石墨为粗大长直的片状，较长的约为 $250\ \mu\text{m}$ ，部分呈点状和块片状，石墨大小差别大。图3b为试样中部经过高频电磁场处理的石墨形态，可以看到石墨为典型的细小点状或片状石墨在枝晶间分布，由于在共晶凝固前先形成奥氏体初次晶，余下铁液在枝晶间发生共晶反应，石墨分布均匀。图3c为试样顶部经过高频电磁场处理的石墨形态，石墨片变为细小的短片状，端部弯曲，最长的约 $80\ \mu\text{m}$ ，石墨大小差别小，分布比较均匀。

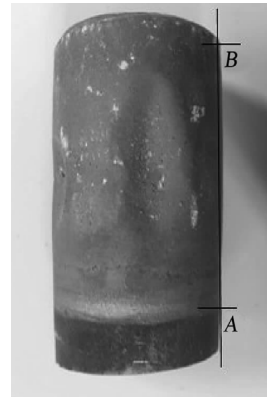


图2 实际试样照片

Fig. 2 The photo of the actual sample



(a) 试样底部

(b) 试样中部

(c) 试样顶部

图3 试样不同位置的石墨形态

Fig. 3 Graphite morphologies of the sample at different positions

2.2 共晶团尺寸

图4为试样不同位置的共晶团形貌。其中图4a为试样底部未经高频电磁场处理的共晶团，视域中团球外轮廓不连续，测量可得共晶团的平均直径为 $284\ \mu\text{m}$ 。而经高频电磁场处理的试样中部和试样顶部的共晶团组织分别如图4b、图4c所示，试样中部共晶团的平均直径为 $118\ \mu\text{m}$ ，为试样底部共晶团直径的41.5%，共晶团外轮廓清晰，保持团球状，呈白色连续网状，固液界面比较平滑。试样顶部共晶团的平均直径为 $150\ \mu\text{m}$ ，为试样底部共晶团直径的52.8%，外轮廓呈连续网状或不连续网状。可见经过高频电磁场处理之后的灰铸铁铁液，其凝固组织中的共晶团尺寸明显减小，共晶团数量明显增加。

2.3 硬度

分别在试样的底部、中部和顶部进行硬度测量，各个位置的布氏硬度数值分别为HB 209、255、236。可见经过高频电磁场处理，试样中部硬度提高了HB 46，顶部硬度提高了HB 27。这和石墨形态及共晶团尺寸变化一致，细小的凝固组织使灰铸铁硬度提高。

3 试验分析

3.1 电磁场作用下的熔体流动

试样在高频电磁场作用下熔体流动示意图如图5所示。流动形态主要和熔体在电磁场作用下的受力状态有关。向螺旋线圈通入交流电后，其内部将会产生频率与交流电相同的感应交变磁场 B ，此时若有导体处于

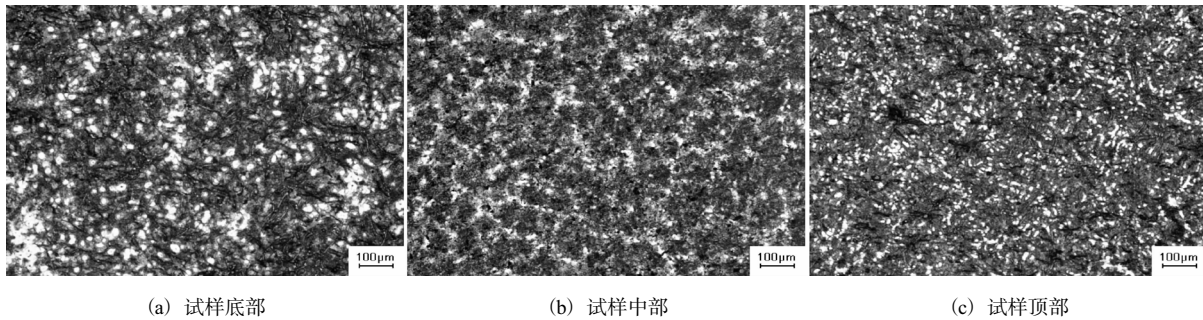


图4 试样不同位置的共晶团形貌

Fig. 4 Graphite eutectic cell of the sample at different positions

螺旋线圈中，则在导体内部同时将产生一个与线圈电流频率一致、方向相反的感应电流 J ，感应电 J 与线圈磁场 B 相互作用产生指向导体中心的洛伦兹力 F 。由于集肤效应，高频感应线圈中的感应电流及磁场在金属熔体内部分布不均匀，金属熔体表面至心部呈指数衰减，使得金属熔体受到的洛伦兹力不均匀，随着距表面的距离增大而减小，在集肤区域以外的区域洛伦兹力迅速降低，金属熔体中部最小，金属熔体中受力不均必将导致压力差从而引起熔体由边缘向中心流动。对于理想长直螺线管，其感应磁场是均匀的，均匀的磁场呈中心对称分布，但在试验过程中，感应线圈的长度有限，内部磁场在轴向上呈抛物线形状分布，线圈中部感应强度大，两端感应强度小，使熔体由中心向顶部和底部流动。在洛伦兹力和感应磁场共同作用下，形成如图5所示的流动形态。

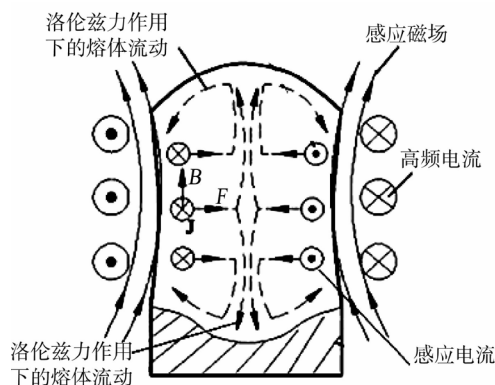


图5 高频电磁场作用下某一时刻的熔体流动示意图

Fig. 5 Schematic drawing of melt flow at some point in the high frequency electromagnetic field

3.2 电磁场作用下的温度分布

图6所示为试样凝固过程中某一时刻内部温度分布示意图。感应电流通过熔体时会产生焦耳热效应。由于电磁场存在集肤效应，焦耳热集中在试样边缘部分，随着距边缘距离增大而减小，也就是说焦耳热会形成自边缘向中心递减的温度梯度。而凝固过程是一个降温散热过程，熔体本身是散热体，试样自然冷却时边缘比中心降温快，这样会形成自中心向边缘递减的温

度梯度，温度梯度的方向与焦耳热作用的方向相反。凝固中期某一时刻试样自然冷却温度分布和焦耳热形成的温度分布耦合，形成如图6中所示的温度分布曲线，即试样的实际凝固温度分布。试样此时自边缘到中心的温度梯度趋于平缓，即存在集肤效应的焦耳热和自然冷却散热的共同作用，使试样在整个凝固过程中的熔体温度梯度很小，整个熔体的温度分布均匀。

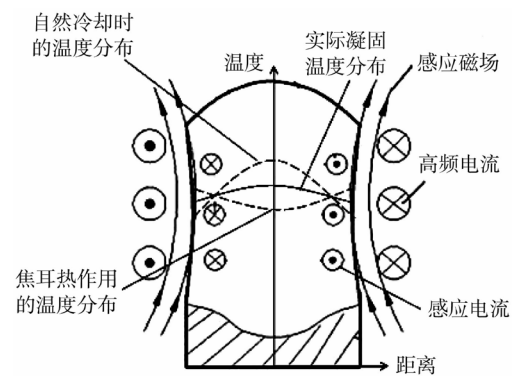


图6 凝固过程中某一时刻试样内部温度分布示意图

Fig. 6 The sample diagram of temperature distribution at some point in the process of solidification

3.3 电磁场作用下的试样形貌与组织分析

试样底部是未熔区域，抛光后能明显观察到弧形的分界面。试验过程中能够清楚地观察到电磁场对灰铸铁熔体的搅拌现象，熔体从轴向中间涌出流向边缘，试样顶部形成一弧形区域，凝固后的试样顶部为呈球冠状。试样向内凹陷和洛伦兹力及凝固过程有关。在试样中部，洛伦兹力由边缘指向中心，边缘金属受到向内的压力。由于试样温度分布驱使试样边缘和中心同时凝固，而非由外向内逐层凝固，从而使外层凝固收缩表现为向内的凹坑。

经高频电磁场处理后，凝固组织非常均匀，这和熔体凝固过程中的温度分布有关。试样底部石墨呈长直片状（图3a），这样的石墨形态对灰铸铁性能产生不利影响。试样的底部受热传导的作用温度升高但仍低于灰铁熔体温度，因此相当于在凝固过程中提高了熔体的冷却速度，特别是对试样中部，同时下端部熔体流受到较大的阻碍作用，液面的波动幅度小，有利于

初生奥氏体枝晶生长,最终在试样的中部形成细小石墨(图3b)。金属熔体顶部上表面为自由表面,波动剧烈,快速循环的熔体流抑制了初生奥氏体枝晶的生长,使最先结晶析出的奥氏体枝晶碎断,在洛伦兹力作用下,又使其弥散地分布于熔体中,形成更多的结晶核心,以此为基在共晶过程中石墨与奥氏体协同生长,同时由于受到感应热效应的作用,石墨生长速率延缓,石墨片端部变钝,形成细小弯曲的片状石墨。

灰铸铁的共晶团数量取决于共晶转变时的形核和长大条件。随着共晶团数增加,白口倾向减小,力学性能提高。冷却速度和过冷度越大、非均质晶粒越多、生长速度越慢形成的共晶团数越多。共晶过程和熔体的流动形态和温度分布有关。试样中部和底部相比,共晶团数量增加,直径减小。原因是洛伦兹力的搅拌作用使液体金属中流动非常强烈,这种激烈的强迫对流打碎初生的奥氏体枝晶,从而结晶核心数量增加,细化了共晶团组织。凝固前沿附近悬浮的晶核很容易被带走,并重新分布于过热的熔体中。最终整个熔体中因大量悬浮晶核的存在,几乎同时结晶。另外,电磁场焦耳热作用的温度分布和自然冷却时的温度分布使熔体的温度梯度减小,再加上熔体流动可以加快过热驱散使温度更加均匀,从而使凝固过程趋近于同时凝固和均匀生长,这样形成的晶粒尺寸从边缘到试样中心分布均匀,边缘激冷白口倾向也得到大幅度减小。细小均匀的凝固组织硬度明显提高。试样顶部比中部共晶团直径略大,相差32 μm 。试样顶部与中部相比较,顶部没有砂型覆盖,散热快再加上和空气强烈对流使液体凝固速度加快,凝固时间减短,这就使顶部接受高频电磁场的处理时间变短,共晶团尺寸比中部略大。

4 结论

(1) 经过高频电磁场处理之后,石墨由长直粗大的片状变成细小点状或弯曲的片状;共晶团尺寸显著减小;材料硬度明显提高。

(2) 施加高频电磁场,由于洛伦兹力的作用在试样熔体内部形成了径向由边缘向中心。轴向由中部向两端的流动形态;焦耳热效应作用下的温度分布和自然冷却的温度分布耦合使试样熔体温度梯度减小,洛伦兹力的剪切和搅拌作用使结晶核心增多,分布均匀,从而使凝固组织更加均匀细小。

参考文献:

- [1] 张宁. 灰铸铁组织模拟及其疏松缩孔的预测[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [2] 马敬仲. 灰铸铁质量概念及国内外差距[J]. 现代铸铁, 2009 (1): 15-20.
- [3] Li Mingjun, Tamura Takuya, Omura Naoki, et al. Effects of magn-

etic field and electric current on the solidification of AZ91D magnesium alloys using an electromagnetic vibration technique [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487: 187-193.

- [4] Gerald Tennyson P, Kumar P, Lakshmi H, et al. Experimental studies and phase field modeling of microstructure evolution during solidification with electromagnetic stirring[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, 20: 774-780.
- [5] 高浩. 电磁场搅拌对离心铸造汽缸套合金元素偏析与性能的影响[J]. 铸造技术, 2013, 34 (3): 330-333.
- [6] 闫猛, 宋长江, 张云虎, 等. 电流频率对Al-4.5%Cu合金定向凝固组织的影响[J]. 铸造, 2010, 59 (1): 22-25.
- [7] Yin Zhenxing, Liang Dong, Chen Yu-e, et al. Effect of electrodes and thermal insulators on grain refinement by electric current pulse[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2013, 23: 92-97.
- [8] 彭帅, 陈乐平, 周全. 脉冲磁场下Al-5Fe合金凝固组织的细化[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (4): 384-387.

(编辑: 潘继勇, pjy@foundryworld.com)

(选自《铸造》2014年第3期)