

振动凝固对消失模铸造球墨铸铁组织的影响

洛阳轴研科技股份有限公司（河南 471039） 宗晓明 陈怀刚 梁兴江 刘致文

消失模铸造已广泛应用于球墨铸铁的中小件批量生产，但消失模铸造采用干砂造型，降低了铁液的凝固速度，存在石墨粗大、形核率低、力学性能差的问题，因此探索改善球墨铸铁消失模铸造组织特征的新工艺具有较大意义。

振动消失模铸造技术通过在浇注及凝固过程中施加一定频率和振幅的振动，使金属液在振动力的作用下凝固，这是一种操作简便，成本低廉，并且无环境污染的物理变质方法。目前，就国内而言，振动消失模技术的研究主要是针对有色合金，尤其是在铝镁合金方面。华中科技大学的赵忠等通过在Al-Si7-Mg合金消失模铸造凝固过程中加入Ti细化剂和机械振动，得到了近等轴晶组织。田学峰等研究了机械振动对消失模铸造镁合金组织及力学性能的影响，发现机械振动能显著细化消失模铸造AZ91合金组织。但对球墨铸铁来说，将振动应用于消失模铸造的研究暂时还没有报道，本研究将振动消失模铸造技术应用于球墨铸铁的制备中，研究振动凝固对球墨铸铁组织特征的影响。

一、试验

1. 试验材料

原料选用生铁，球化剂选用稀土镁硅铁合金，加入量为1.4%，孕育剂选用75SiFe，加入量为1.0%。球墨铸铁最终化学成分为 $w_C=4.50\%$ 、 $w_{Si}=0.69\%$ 、 $w_{Mn}=0.19\%$ 、 $w_S=0.022\%$ 、 $w_P=0.037\%$ ，余量Fe。

试验用模样材料为可发性聚苯乙烯泡沫塑料(即EPS)，其密度约为 0.02g/cm^3 。采用切削加工的方法，将泡沫塑料板料制作成长宽为

130mm×80mm，高度分别为5mm、10mm、20mm、40mm的模样，在试样的顶部安放尺寸为30mm×30mm×120mm的横浇道，直浇道的尺寸为30mm×30mm×20mm，采用雨淋式浇注，然后将模样的各部分用热熔胶粘结，如图1所示。在EPS模样表面涂刷自制的涂料，待涂料烘干后，将模样放入底抽式砂箱内，填入水洗石英砂，经振动紧实台紧实后在表面盖上一层塑料薄膜，通过抽真空使砂箱内松散的干砂变成坚硬的铸型。

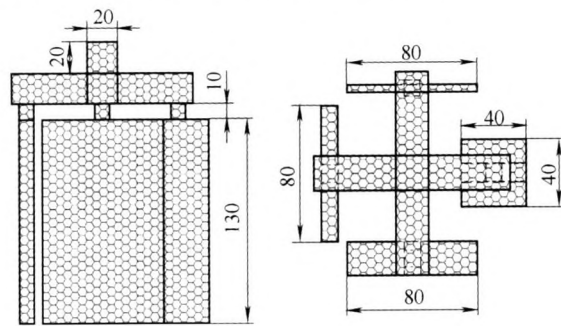


图1 EPS模样尺寸

2. 试验过程

将生铁置于中频感应电炉中熔炼，并用W300系列测温仪(内置铂-铑热电偶)测量其温度。铁液温度达到1500℃时转入浇包，在浇包内进行球化孕育，当铁液温度降至1460℃时进行浇注。

振动采用东莞贝尔试验设备有限公司研制的型号为BF-LD-TF的双向电磁振动台，在浇注前，即按设定好的50Hz频率及3mm振幅进行振动，从浇注后开始计时，振动时间60s。试验设备如图2所示。试验中，选用对铸件凝固过程中晶粒生长影响最为显著的垂直振动模式。浇注过程中真空度保持在0.65MPa，浇注完毕后继续保持该真空度5min。

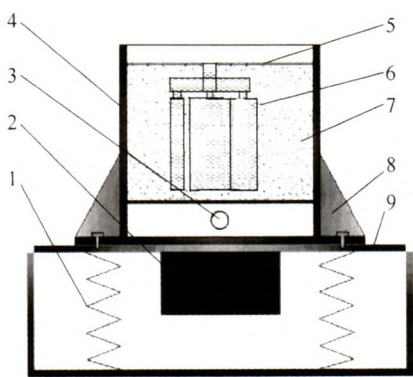


图2 振动台工作示意

1.弹簧 2.电磁振动台 3.抽真空 4.砂箱 5.薄膜 6.EPS模样
7.干砂 8.加强肋板 9.振动台面

二、试验结果及分析

1. 振动对石墨形态的影响

图3、图4所示为在静止与100Hz振动凝固条件下，5mm、10mm、20mm、40mm处的石墨形态。

(1) 试样厚度对石墨球数的影响 采用ImageJ软件对图3、图4中的石墨进行分析，得到静止凝固及100Hz振动凝固条件下石墨球数。图5所示为不同凝固条件下石墨球的个数。由图5可以看出，在厚度相同时，振动凝固条件下的石墨个数均多于静止凝固，在5mm、10mm、20mm、40mm处与静止凝固相比石墨个数分别增加了4.3%、12.3%、62.7%、79.2%，随着壁厚增加，振动的效果加强，石墨个数明显增加。静止凝固的试样，随着壁

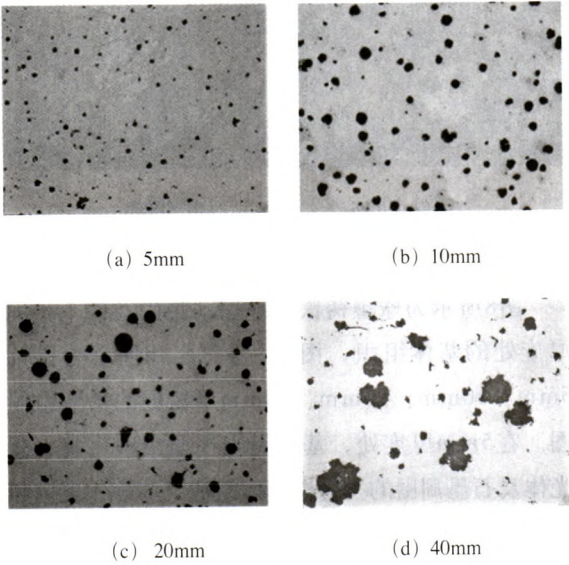


图3 静止凝固条件下不同厚度处石墨形态

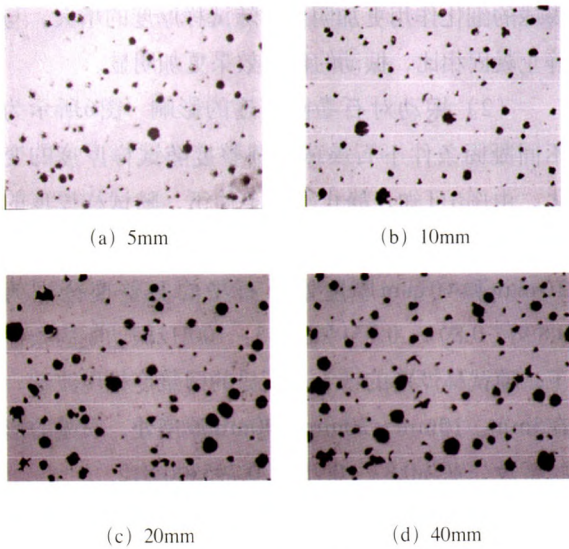


图4 100Hz振动凝固条件下石墨形态

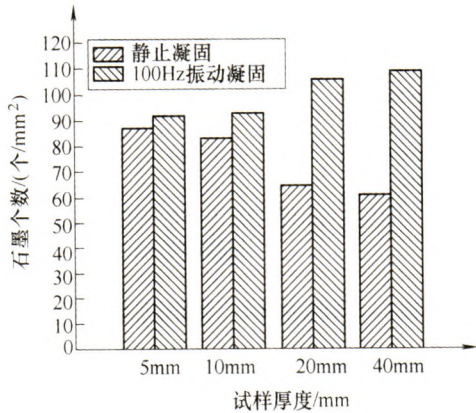


图5 不同凝固条件下石墨球的个数

厚的增加，石墨球的个数呈下降趋势，而振动凝固试样中石墨球个数的变化与静止凝固条件下相反。

由石墨的生长过程可知，在石墨按球形晶方式生长的过程中，受石墨晶体缺陷、过冷度及石墨旁生长的奥氏体等因素的影响，将生成大量的分枝。在振动场作用下，型内液相与初生固相间将产生相对运动而形成“粘性剪切”，石墨生长过程中生成的分枝受此“剪切”作用将被折断、破碎。由于石墨的失配度为零，是石墨结晶最理想的基底材料，因而这些破碎的石墨分枝将作为石墨析出的新衬底，使石墨核心数增多。此外，由于振动引起型内金属液产生剧烈运动，显著提高了系统的热传导能力，加快了金属液的凝固速度，增大了过冷度，促进石墨的生核。振动凝固条件下，随试样厚度的增大，石墨的个数呈上升趋势，这是由于随试样厚度的增加，凝固时间增长，振动的作用时间长，对石

墨球的细化作用更加明显,随试样厚度的增大,与静止凝固相比,振动的作用效果更加明显。

(2) 振动对石墨圆整度的影响 图6所示为不同凝固条件下石墨球的圆整度随试样厚度的变化。由图6可知,静止凝固条件下,随试样厚度的增大,石墨圆整度呈下降趋势,在5mm、10mm、20mm和40mm厚度处,石墨的圆整度分别为0.898、0.801、0.751和0.613;100Hz振动凝固条件下,随试样厚度的增大,石墨的圆整度呈现波动,在5mm、10mm、20mm和40mm厚度处,石墨的形状系数分别为0.83、0.735、0.795和0.812。

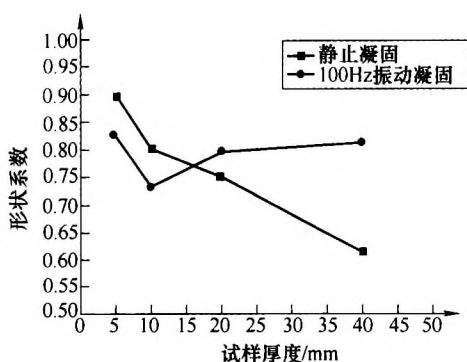


图6 不同凝固条件下石墨球形状系数

振动凝固条件下,一方面,振动引起型内金属液剧烈的扰动,破坏了石墨按球形生长的条件。由球形晶生长理论可知,石墨晶体按球状生长的必要条件之一是形成大量辐射对称的小角分枝。在振动条件下,由于振动引起熔液内部形成“粘性剪切”,使得部分生长的石墨分枝发生折断、破碎,这将破坏石墨晶体呈球状生长的条件,导致早期石墨生长不均匀而产生畸变,使石墨最终形态不圆整。此外,考虑到破碎的石墨或石墨分枝形态不规整,这也导致以其为基底生长成的石墨球的最终形态也不规整,圆整度下降。另一方面,随试样厚度的增大,振动的作用效果加强,石墨的形核率增加,振动在熔液内造成的增大过冷度效果,促进石墨周围奥氏体生核,这将促使凝固过程中,奥氏体能够迅速包围石墨,形成封闭的晕圈。快速封闭的奥氏体晕圈可保护熔液中早期生成的细小石墨,均匀地阻碍碳元素向石墨的扩散,故石墨生长缓慢且匀称,最终形态小而圆整。振动凝固时,随壁厚的增加,石墨个数增多,最终形成的石墨比较细小,

受奥氏体晕圈保护的石墨数目增多,减小了石墨的畸变。因此,在振动条件下,出现了随厚度的增加,石墨圆整度上升的现象。

2. 振动对基体组织的影响

图7所示为球墨铸铁试样静止凝固条件下不同厚度处的基体组织图,图7a、b、c、d所示分别为5mm、10mm、20mm、40mm厚度处的基体组织。可以看出,随试样厚度的增加,基体组织中碳化物比例下降,珠光体比例上升,5mm厚度处,碳化物呈长板条状分布,数量较多,石墨的数目多,但尺寸很小,显微组织中“牛眼状”组织数量较多,尺寸较小,随着试样厚度的增加,基体组织主要由珠光体、碳化物及石墨周围的铁素体晕圈组成,珠光体的比例大幅上升,碳化物的形态也变为蜂房状莱氏体,随着厚度的进一步增加,“牛眼状”组织的面积增大,数目更少,石墨周围铁素体晕圈的厚度减小,异型石墨的数目增多,出现未被铁素体晕圈包围的大块状石墨。

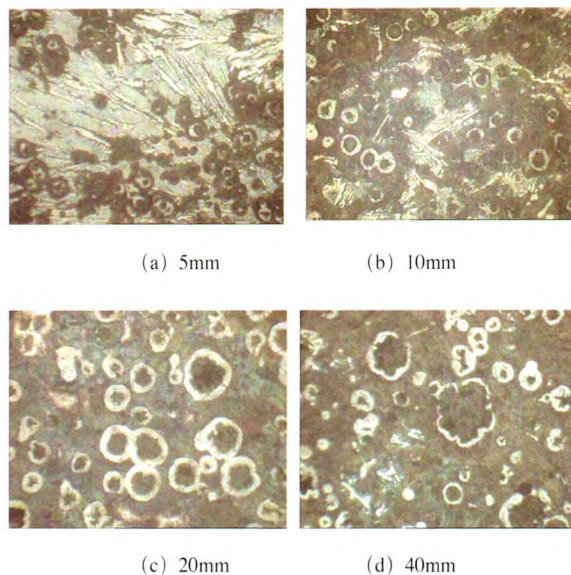


图7 静止凝固条件下不同厚度组织

图8所示为球墨铸铁试样振动凝固条件下不同厚度处的基体组织,图8a、b、c、d所示分别为5mm、10mm、20mm、40mm厚度处的基体组织图。在5mm厚度处,基体组织主要由碳化物、珠光体及石墨周围的少量铁素体组成,与静止凝固相比,基体组织中的碳化物数量减少,石墨的数目增多,尺寸较小,显微组织中“牛眼状”组织数量较

多，尺寸多偏小，随着试样厚度的增加，基体组织主要由珠光体、碳化物及石墨周围的铁素体晕圈组成，珠光体的比例大幅上升，碳化物的形态也变化为蜂房状莱氏体，随着厚度的进一步增加，基体组织变化不明显。

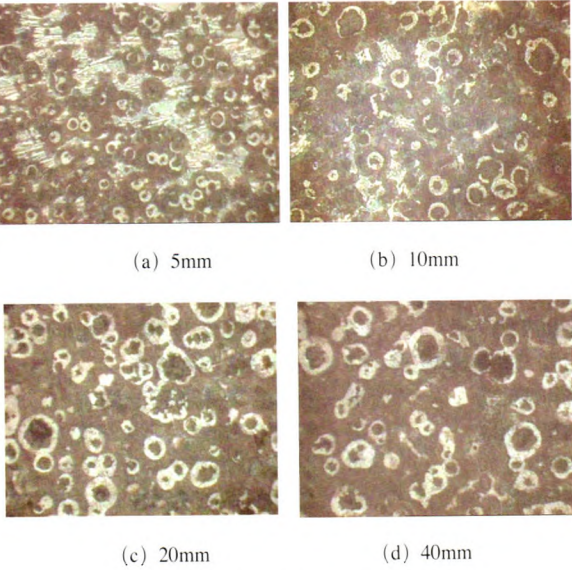


图8 100Hz振动凝固条件下不同厚度组织

静止凝固条件下，当壁厚较小时，冷速快，凝固时间短，铁液容易沿着介稳定状态进行凝固，碳元素更多地以碳化物的形式存在，随着壁厚的增大，凝固时间延长，碳原子的扩散时间延长，因此，碳更容易以石墨的形式析出，基体组织中的碳化物含量也大幅减小，碳化物形式也由片状转变为蜂房状莱氏体，石墨球周围的铁素体晕圈与石墨是以离异共晶方式析出的。随着壁厚的进一步增大，凝固时间延长，石墨球心失效严重，球数减少，因此，牛眼状组织也相应地减少，随球数减少，石墨尺寸逐渐变大，形状也变得不规整，石墨周围铁素体晕圈的形状也逐渐变得不规整。振动凝固条件下，基体组织的变化规律与静止凝固相似，随着试样厚度的增大，基体组织中的碳化物含量下降，但由于振动促进了薄壁处石墨的形核，有利于碳以石墨的形态析出，因此降低了基体组织中碳化物的含量，在厚壁处振动的粘性剪切，增大了过冷度的作用，有效地促进了形核，消除了静止凝固条件下出现的异型石墨，改善了基体组织。

3. 试样厚度对硬度的影响

图9所示为静止凝固及振动凝固条件下，硬度

随试样厚度的变化曲线。

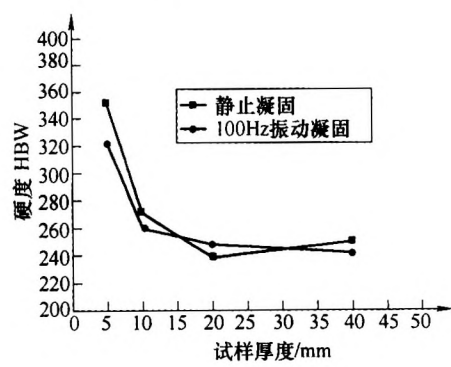


图9 试样厚度-布氏硬度曲线

对于静止凝固的试样，随着试样厚度的增加，试样的硬度呈减小趋势。这主要是由于试样厚度较小时，在5mm处，基体组织中含有大量的针片状碳化物，珠光体的比例很小，因此硬度比较大；而随试样厚度增大，在10mm厚度处，基体组织中的碳化物逐渐减少，珠光体的比例上升，硬度呈下降趋势；随着试样厚度的进一步增加，在20mm与40mm厚度处，硬度相差不大，这是因为基体组织都基本为珠光体。对于振动凝固的试样，随着试样厚度的增大，硬度呈下降趋势，原因与静止凝固的变化趋势相似，但在5mm与10mm处，硬度低于静止凝固条件下，这是由于振动凝固有效地减少了基体组织中的碳化物含量。

三、结语

- (1) 振动凝固增加了石墨球的数量，随着试样厚度的增加，振动的作用增大，在40mm处，效果最明显，与不振动相比，石墨球个数增加了79.2%。
- (2) 振动凝固有利于缩小不同厚度之间石墨圆整度的差别。静止凝固时，随试样厚度的增加，石墨的圆整度呈下降趋势，100Hz振动凝固条件下，随试样厚度的增大，石墨圆整度下降趋势减缓，在40mm处，与静止凝固相比，石墨球的圆整度提高了32.5%。
- (3) 振动凝固有利于提高不同厚度之间基体组织的均匀性，降低了薄壁试样中碳化物的含量，同时消除了静止凝固下壁厚较大时的异型石墨缺陷。MW (20131020)