

超声处理对球墨铸铁熔体凝固组织与性能的影响

亚斌¹, 蔡勇², 孟令刚¹, 刘恒乐², 周秉文¹, 孟宪军², 张兴国¹, 张国辉²

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116023; 2. 辽宁华岳精工股份有限公司, 辽宁本溪 117100)

摘要: 对球墨铸铁熔体施加超声处理, 从浇注的曲轴铸件取样研究了微观组织、力学性能和断口形貌, 分析超声处理的作用机理。结果表明, 超声处理可以提高球墨铸铁微观组织中的珠光体含量; 随着超声输出电流的提高, 球墨铸铁曲轴试样的强度和伸长率也随之提高, 最高可达892 MPa和6.6%, 与未施加超声的球墨铸铁曲轴试样相比分别提高了13.3%和40.4%。超声处理可以减小石墨球尺寸, 降低石墨球产生的应力集中现象, 缩小珠光体组织的片层间距, 进而提高球墨铸铁曲轴的力学性能。

关键词: 超声处理; 球墨铸铁; 曲轴; 力学性能

作者简介:

亚斌(1985-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为高性能球墨铸铁、固体浮力材料、聚合物基和金属基复合材料。E-mail: yabin@dlut.edu.cn

通讯作者:

张兴国, 男, 教授, 博士。E-mail: zxgwj@dlut.edu.cn

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

02-0111-07

基金项目:

中央高校基本科研业务费专项资金(DUT17RC(3)012); 球墨铸铁超声波处理与质量控制技术研究项目(HX20150329)。

收稿日期:

2018-03-21 收到初稿,

2018-06-20 收到修订稿。

曲轴是汽车发动机的核心部件。随着近年来人们对汽车使用性能要求的不断提高, 汽车动力不断增强, 需要曲轴承受更大的交变载荷, 因而对曲轴材料的强韧性提出了更高的要求。球墨铸铁凭借其低成本、高力学性能的特点, 在汽车、工程机械等领域得到了广泛的应用, 并具备了代替锻钢制备汽车发动机曲轴的能力^[1-3]。因此, 制备高强韧性的球墨铸铁曲轴对于我国汽车产业的发展有着重要的意义^[4-5]。

超声波熔体处理技术是一种在金属熔体中或凝固的铸型上, 施加高强度高频超声波振动, 以细化组织、改善偏析、去除缩松缩孔的新型凝固控制技术^[6-8]。超声波在金属熔体的传播过程中会产生空化效应、声流效应和机械效应等复合作用, 其中空化效应能够提高铸件的形核率, 声流及机械效应可通过增加对流、降低熔体内微小区域的温度梯度、消除偏析、抑制晶粒生长, 高频率的声波振动还可以减少铸件的缩松缩孔^[9]。超声波熔体处理技术效果显著、无污染、效率高、操作简便, 近年来受到了国内外学者和企业的高度重视, 被认为是细化组织、改善偏析、提高铸件综合性能的有效措施^[10]。

本文通过对球墨铸铁熔体施加超声处理, 研究了超声处理对球墨铸铁力学性能、石墨球尺寸, 珠光体片层间距以及断口形貌的影响, 分析超声处理的作用机理。

1 试验方法

炉料主要为废钢增碳的合成铸铁及低硫铸造生铁。采用感应电炉熔炼, 在炉内调整合金成分, 合金元素采用冲入法加入; 球化处理采用稀土镁复合球化剂, 孕育剂为75SiFe; 曲轴的铸造方法采用铁型覆砂工艺。表1列出了曲轴的化学成分。

试验所使用的超声设备为CYCS-1000TJ 全功能可调数字超声波处理系统, 如图1所示。探头是长度为340 mm, 直径为30 mm的石墨探头。铁液出炉温度为1 450 ℃, 球化包预热温度为800 ℃, 浇注温度为1 437 ℃。浇包内铁液为800 kg, 球化剂用量为1%, 以8 g/s的速度随流孕育。待铁液冲入球化包后, 将超声探头深入液面深度150 mm处, 按照表2所示的参数进行3组试验。待超声结束后, 撤去超声设备, 进行浇注。为了对比, 按照同一工艺方法制备了未施加超声的曲轴试样, 编号为0。

所制曲轴长度约为420 mm，直径约为140 mm。曲轴经过机械加工后，取3个标准拉伸试样和3个标准冲击试样，取样位置如图2所示。使用光学显微镜观察显微组织，腐蚀液采用4%硝酸酒精溶液，并使用ImageJ软件测量石墨球尺寸。拉伸实验在CSS-2205型电子万能力学试验机上进行，最大载荷为50 kN，拉伸试样直径为6 mm，标距长度为30 mm。冲击实验在JB-300B型落锤式冲击试验机上进行，试样为无缺口，尺寸为10 mm × 10 mm × 55 mm。

2 试验结果及分析

2.1 超声处理对曲轴力学性能的影响

球墨铸铁熔体经过超声处理后，曲轴的力学性能如表3所示。试验结果显示，未施加超声处理的曲轴试样强度为787 MPa，伸长率为4.7%。施加超声后，曲轴试样的强度均高于800 MPa，而且随着超声输出电流从0.5 A，1.5 A增加到2.5 A，曲轴的强度也随之提高，分别提高了10.4%，11.6%和13.3%，伸长率也分别提高了17.0%，23.4%和40.4%。分析其原因，主要是由于高功率超声产生的较高超声能量在传播过程中，使液体的局部微小区域产生负压区，当超声波的强度超过液体表面张力时，液体则被撕开产生大量的气泡。随着超声处理的进行，小气泡也随之生长，当气泡内压力达

到某临界点就会瞬间破裂，分裂后的气泡又不断的长大和破裂。小气泡迅速破裂时在气泡内产生了瞬时高压，并且气泡周围的液体瞬时高速冲入气泡，在气泡附近的液体产生了强烈的局部振动，从而产生循环的空化效应^[11]。气泡每次破碎产生的冲击力能够强烈的冲刷枝晶、增加了形核率，增加了等轴晶的形成，同时也降低了二次枝晶的间距，也使碳化物破碎，因此能对球铁组织产生细化作用。

表1 曲轴的化学成分

Table 1 Chemical composition of nodular cast iron crankshaft $w_B/\%$

C	Si	Mn	Cu	Mg	P	S
3.7	2.0	0.4	0.6	0.05	0.05	0.02

表2 超声波处理参数

Table 2 Ultrasonic processing parameters

试验序号	超声频率/kHz	输出电流/A	持续时间/min
1	19.59	0.5	3
2	20.12	1.5	3
3	20.3	2.5	3



图1 CYCS-1000TJ 全功能可调数字超声波处理系统

Fig. 1 CYCS-1000TJ Full function adjustable digital ultrasonic processing system

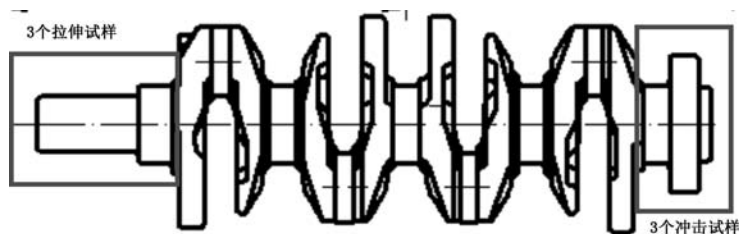


图2 取样部位示意图

Fig. 2 Sampling positions in crankshaft for measuring tensile strength and impact toughness

此外, 超声功率对材料的抗拉强度、伸长率的提高也有一定的影响。这主要是由于熔体离超声探头距离越远, 超声处理的效果越差; 随着超声功率的提高, 超声波的作用范围越来越大, 从而超声处理的效果得到提高, 材料性能也随之改善。

经过超声处理后, 曲轴试样的冲击韧性和硬度比未施加超声的试样均有所提高, 结果见表3。

2.2 超声处理对石墨球形貌的影响

图3是试样在不同超声输出电流下的显微组织。该组织为珠光体球墨铸铁, 由珠光体、铁素体和石墨球组成。未施加超声的0[#]试样组织为典型的“牛眼状”组织, 铁素体围绕在石墨球周围。而施加超声之后, 球墨铸铁组织中, 石墨球周围的铁素体量减少, 取而代之的是片层状的珠光体组织。珠光体的强度高于铁素体, 这有利于曲轴强度的提高。

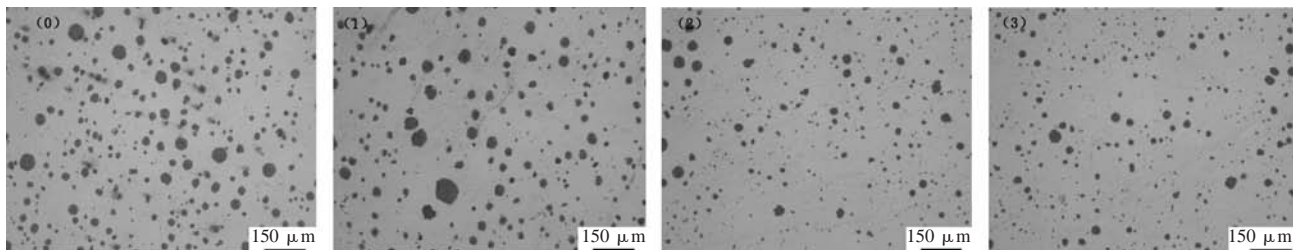
为了进一步分析超声处理对球墨铸铁曲轴性能提升的原因, 对冲击试样组织中石墨球的尺寸和数量进行了测量。如表4所示, 随着超声输出电流的增加, 石墨球数量 ($> 100 \mu\text{m}^2$) 和最大石墨球面积均呈现下降趋势, 而且, 较大石墨球的数量也明显减少 (如图3a)。如图4所示, 在不同的试验条件下冲击试样100倍金相照片范围内 ($1\ 050 \mu\text{m} \times 1\ 050 \mu\text{m}$) 石墨球数量和最大石墨球面积会对球墨铸铁的强度产生影响。

随着组织中石墨球 ($> 100 \mu\text{m}^2$) 数量的增加, 石墨球最大面积增大, 曲轴试样的强度呈下降趋势。因为试验中碳含量差别不大, 显微组织中大于 $100 \mu\text{m}^2$ 的石墨球数量越少意味着石墨球面积小于 $100 \mu\text{m}^2$ 的石墨球数量增加, 石墨球的尺寸得到了细化。朱龙的研究结果表明^[12]: 随着球墨铸铁中石墨直径的增大, 球墨铸铁的强度随之下降, 这是因为石墨的体积增大, 应力集中现象更加明显, 导致强度下降。

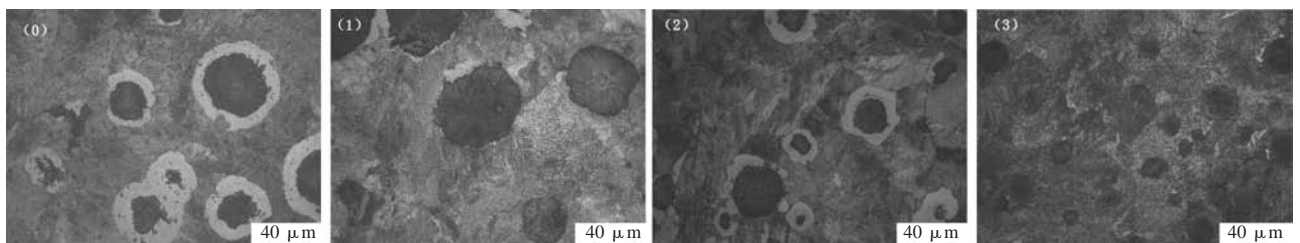
在球墨铸铁金属熔体中施加超声, 超声在金属熔体内会产生空化泡。在空化泡破裂时, 产生强烈冲击波, 加速金属熔体的流动, 从而使球化剂能够充分地分散在金属熔体中。有研究显示, 石墨球的核心是由球化剂中的稀土和镁元素所形成的硫化物和氧化物所构成^[13]。球化剂充分分散在金属熔体中能够使单位体积铁液中有有效石墨形核核心增多, 从而使石墨球的

表3 曲轴试样力学性能
Table 3 Mechanical properties of nodular cast iron crankshaft samples

编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击韧度/(J·cm ⁻²)	硬度HBS
0	787	4.7	34	267
1	869	5.5	41	259
2	878	5.8	36	278
3	892	6.6	46	281



(a) 未腐蚀100倍显微组织



(b) 腐蚀后400倍显微组织

(0) 无电流 (1) 0.5 A (2) 1.5 A (3) 2.5 A

图3 不同超声输出电流对试样显微组织的影响

Fig. 3 Microstructures of specimens under different ultrasonic output currents

尺寸减小。此外，空化泡崩溃时产生的瞬间高压会使熔体内成团的石墨球被击散，超声波的声流搅拌作用会加速石墨球的运动。超声场中强大的空化效应和声流效应在微观和宏观两方面同时提高了熔体的压力水平，导致石墨的生长严重受到制约。因此，虽然熔液中石墨核心数增多，但其长大并不显著，故最终获得的石墨非常细小。石墨球尺寸的减小降低了由石墨球产生的应力集中，使得铸铁的强度得到提高。此外，从经过超声处理的样品显微组织照片可见，石墨球外围的铁素体较少，甚至呈破碎状分布于基体中，这是由于超声波会加速合金元素和石墨球的运动，使得Cu元素更加容易附着到石墨球上。Cu是非碳化物形成元素，它会降低Fe-C之间的结合力。Cu原子在基体与石墨之间的富集，会阻碍C原子的扩散，其扩散析出变得更加困难，将破坏牛眼状铁素体的生核基底和阻碍碳向石墨球的扩散，阻碍了铁素体形成，从而促进球铁基体珠光体化，进而使得球墨铸铁的伸长率也有所提高^[14-15]。

2.3 超声处理对珠光体形貌的影响

为了进一步分析熔体超声处理对球墨铸铁组织的细化作用，使用扫描电镜对冲击试样组织中的珠光体进行了分析，如图5所示。

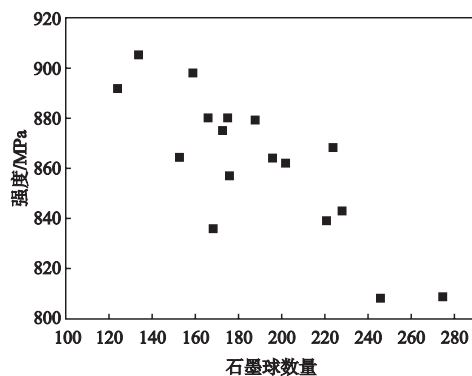
使用NanoMeasurer软件对图5扫描电镜图片进行了分析，分析过程为测量相邻10个渗碳体片层之间的距离，每张图片测量10次，取平均值。如图5a、c、e所示，珠光体片层距离在同一张图片中也是不均匀的，因此测量过程中选取了十个不同的位置以获得更加准确的数据。测量结果如图5b、d、f所示。结果显示，

未施加超声球墨铸铁组织中，珠光体的片层间距为0.242 μm ；对金属熔体施加超声处理，超声电流2.5 A（900 W），处理时间3 min以后，珠光体片层间距降低至0.218 μm 和0.163 μm ，分别降低了9.9%和32.6%。这主要是由于超声处理的效果越强，会使其他合金元素分散更加均匀，提高了C在奥氏体中的扩散激活能，减小了C的扩散速度，改变了连续冷却曲线，降低了珠光体开始相变的温度，从而缩小了珠光体的层间距。

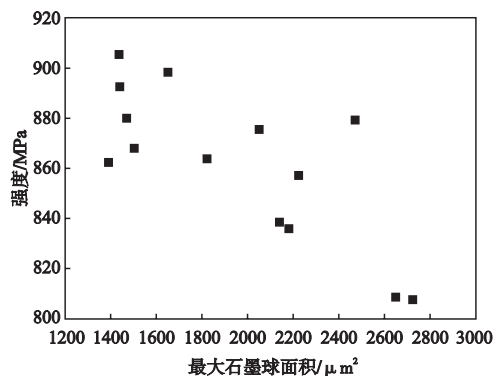
珠光体是铁素体和渗碳体片层相间的组织，刘硕的研究结果表明^[16]：影响珠光体力学性能的因素很多，其中一个重要因素是珠光体片层间距，即相邻渗碳体条之间的距离。珠光体片层间距的缩小可以使珠光体钢的强度提升，因为珠光体钢的屈服强度、流变应力、脆断应力等与珠光体片层间距的关系均可以用Hall-Petch公式来表示。珠光体片层间距同样会影响珠光体钢的塑性，当珠光体片层间距减小时，参与变形的片层数越多，变形越均匀，使得钢的塑性得到提高。

表4 超声输出电流对组织中石墨球的影响
Table 4 Effect of ultrasonic output current on graphite balls in microstructure

超声输出 电流/A	石墨球数量 ($>100 \mu\text{m}^2$)	单个石墨球最大 面积/ μm^2	$>100 \mu\text{m}^2$ 石墨球 总面积/ μm^2
0.5	196	2 333	84 084
1.5	174	2 041	61 422
2.5	153	1 822	51 225



(a) 石墨球数量对球墨铸铁强度的影响



(b) 最大石墨球面积对球墨铸铁强度的影响

图4 冲击试样中石墨球数量和最大石墨球面积对球墨铸铁强度的影响

Fig. 4 Influences of the number of graphite balls and maximum sphere area on strength of nodular cast iron

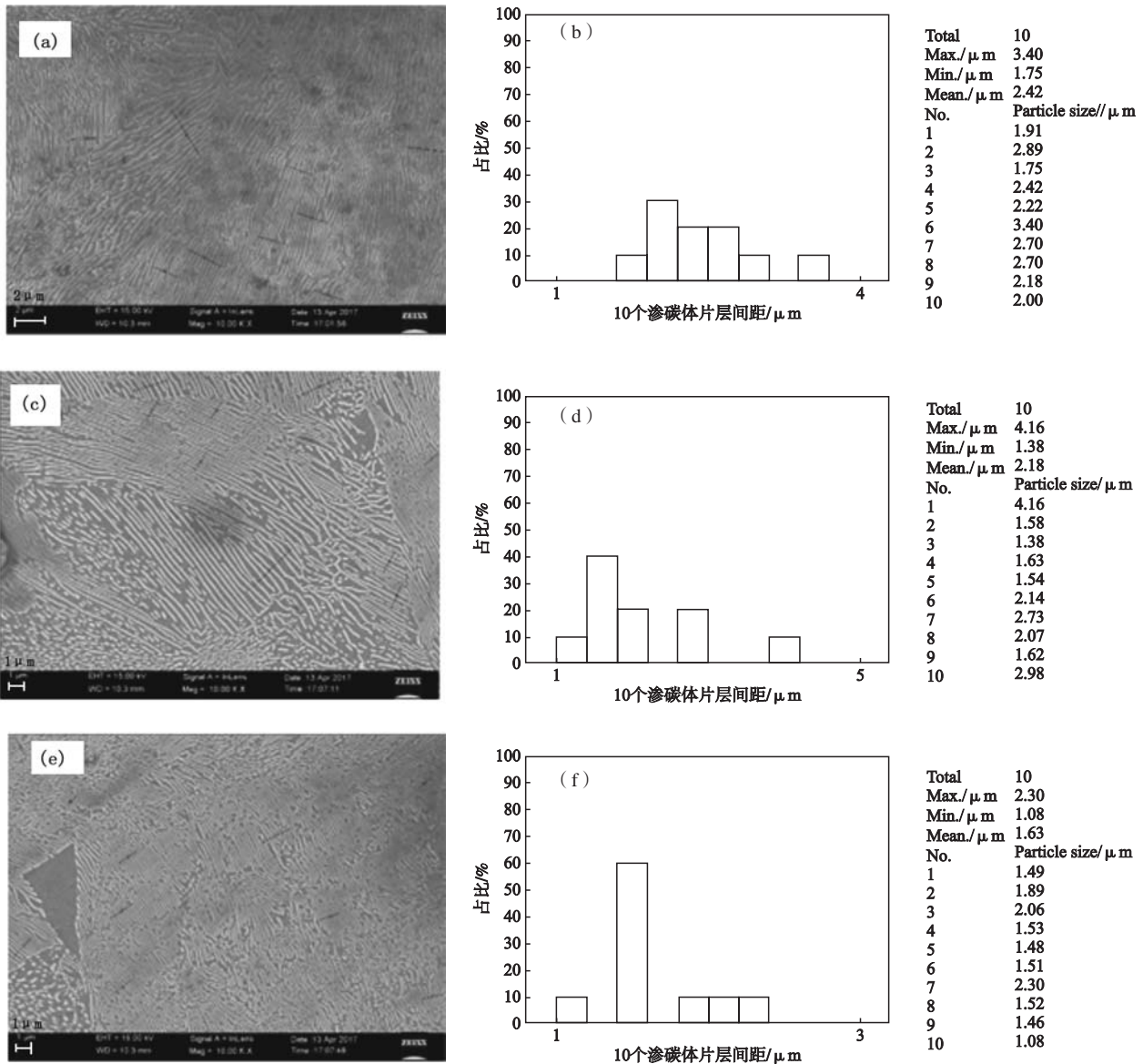
朱先勇^[15]研究了Cu和Sb的加入对珠光体球墨铸铁组织形态与性能的影响,结果表明:Cu和Sb会降低珠光体片层间距,提高球墨铸铁的力学性能。吴庆辉^[17]研究了奥氏体化温度对珠光体钢组织和性能的影响,结果表明:奥氏体化温度越高,珠光体片层间距越小,珠光体钢的力学性能也随之提高。

因此,超声处理金属熔体可以减小球墨铸铁珠光体组织的片层间距,提高球墨铸铁的强度。此外,当珠光体片层间距减小时,参与变形的片层数变多,而

且变形更均匀,促进了伸长率的提高。

2.4 断口分析

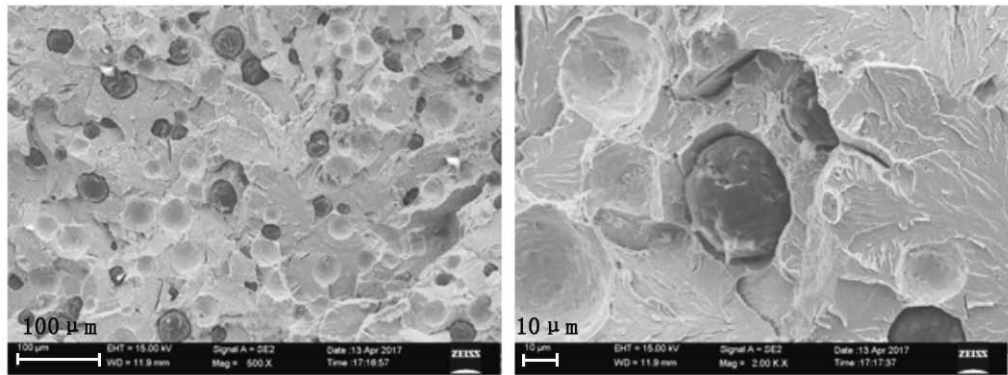
超声处理前后,拉伸试样断口形貌如图6、图7所示。超声处理前后,拉伸试样断口形貌均呈现河流花样的解理断裂机制。但未施加超声处理,拉伸试样断口较为平整(图6);而经过超声处理后(图7),断口平面较为粗糙,裂纹在扩展过程中不断的产生偏移,消耗了更多的能量,从而提高了试样的强度。



(a) 未施加超声, (c、e) 施加超声处理, 超声电流2.5 A, 施加时间3 min, 不同部位组织

图5 超声处理金属熔体对球墨铸铁组织中珠光体片层间距的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic treatment of melt on lamellae spacing of pearlite in ductile iron

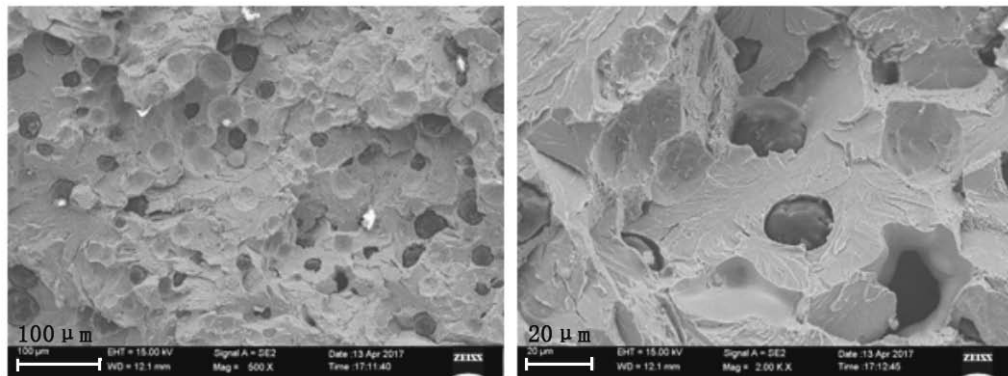


(a) 低倍

(b) 高倍

图6 未施加超声处理曲轴拉伸试样断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of tensile specimen without ultrasonic treatment



(a) 低倍

(b) 高倍

图7 超声处理金属熔体曲轴拉伸试样断口形貌

Fig. 7 Fracture morphology of tensile specimen with ultrasonic treatment

3 结论

(1) 超声处理球墨铸铁熔体制备曲轴, 组织中 ferrite 含量降低, 珠光体含量提高。随着超声输出电流的提高, 球墨铸铁曲轴试样的强度和伸长率也随之提高。

(2) 超声处理可以使显微组织中最大石墨球面积以及面积大于 $100 \mu\text{m}^2$ 的石墨球数量减少, 因此石墨球得到细化, 削弱了石墨球的应力集中作用。

(3) 超声处理金属熔体可以缩小球墨铸铁珠光体组织的片层间距, 从而提高了球墨铸铁曲轴的力学性能。当珠光体片层间距减小时, 参与变形的片层数越多, 变形越均匀, 因此伸长率也得到改善。经过 2.5 A 超声处理 3 min 后, 球墨铸铁的强度和伸长率可达 892 MPa 和 6.6%, 较未施加超声的球墨铸铁曲轴试样相比, 分别提高了 13.3% 和 40.4%, 综合性能优异。

参考文献:

- [1] 麻子科. 高品质球墨铸铁的熔炼技术 [J]. 技术与市场, 2014 (8): 61-61.
- [2] 刘光华, 张永秀, 尹晓舜, 等. 球墨铸铁曲轴应用前景的评估 [J]. 现代铸铁, 2005, 25 (1): 1-7.
- [3] 郜永志. 球墨铸铁曲轴的铸造与发展 [J]. 知识经济, 2008 (6): 119-119.
- [4] Bayrakceken H, Uzun I, Tasgetiren S. Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron [J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13 (8): 1240-1245.

- [5] 杨思一, 丛建臣, 孙海涛, 等. 高强度高韧性球墨铸铁曲轴铸造技术 [J]. 现代铸铁, 2011, 31 (6): 39-43.
- [6] Abramov O V. Solidification of metals in an ultrasonic field [J]. Metallurgiya Moscow, 1972.
- [7] Abramov O V. Action of high Intensity Ultrasound on solidifying Metals [J]. Ultrasonics, 1987, 25 (3): 73-84.
- [8] Junwen L, Momono T. Effect of ultrasonic output power on refining the crystal structures of ingots and its experimental simulation [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2005, 21: 47-52.
- [9] Kudryashova O, Vorozhtsov S, Khrustalyov A, et al. Ultrasonic dispersion of agglomerated particles in metal melt [C]// Prospects of Fundamental Sciences Development, 2016: 020013.
- [10] 刘欢, 龚文邦, 高辉武, 等. 金属熔体超声细化处理技术及其应用 [J]. 铸造, 2015, 64 (10): 1013-1016.
- [11] Skorb E V, Möhwald H, Andreeva D V. Effect of cavitation bubble collapse on modification of solids: crystallization aspects [J]. Langmuir, 2016, 32 (43): 11072-11085.
- [12] 朱龙, 徐人平. 球墨铸铁中石墨大小对其断裂韧性的影响 [C] //全国疲劳与断裂学术会议. 1998.
- [13] 申志清, 田学雷, 郑洪亮, 等. 球墨铸铁石墨球核心组成及形核机制的研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 357-361.
- [14] Mitelea I, Bordeasu I, Pelle M, et al. Ultrasonic cavitation erosion of nodular cast iron with ferrite-pearlite microstructure [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 23: 385.
- [15] 朱先勇, 刘耀辉, 张英波, 等. 铸态珠光体球墨铸铁组织形态与性能 [J]. 农业机械学报, 2007. 38 (2): 179-182.
- [16] 刘硕. 高碳纳米珠光体钢轨组织与性能的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [17] 吴庆辉, 杨忠民, 陈颖, 等. 奥氏体化温度对珠光体钢轨组织和性能的影响 [J]. 材料热处理技术, 2012, 41 (14): 111-114.

Effect of Ultrasonic Treatment on Solidification Structure and Mechanical Properties of Nodular Cast Iron Crankshaft

YA Bin¹, CAI Yong², MENG Ling-gang¹, LIU Heng-le², ZHOU Bing-wen¹, MENG Xian-jun², ZHANG Xing-guo¹, ZHANG Guo-hui²

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Liaoning Huayue Precision Processing Co., Ltd., Benxi 117100, Liaoning, China)

Abstract:

The crankshaft castings were produced by nodular iron melts with and without ultrasonic treatment to investigate the effect of ultrasonic treatment on the microstructure and mechanical properties of nodular cast iron crankshaft. The results showed that ultrasonic treatment increased pearlite content in microstructure; and with enhancing the ultrasonic output current, the strength and elongation of nodular cast iron specimens also increased, up to 892 MPa and 6.6%, with an increase of 13.3% and 40.4%, respectively, as compared with those of nodular cast iron specimens without ultrasonic treatment. In addition, ultrasonic treatment decreased the size of graphite balls, reduced the phenomenon of stress concentration caused by graphite balls, shorten the lamellar spacings of pearlite, and therefore, improved the mechanical properties of nodular cast iron crankshaft.

Key words:

ultrasonic treatment; nodular cast iron; crankshaft; mechanical properties