

蠕墨铸铁等温淬火工艺及性能的试验研究

喻光远, 肖恭林, 徐小辉, 钱坤才

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 以蠕墨铸铁为对象, 研究了等温淬火工艺对材料室温力学性能、高温力学性能、热稳定性及冷热疲劳性的影响。结果表明: 较佳的等温淬火工艺为: $(850 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}) \times 1.5 \text{ h} + 290 \text{ }^\circ\text{C} \times 1.5 \text{ h}$; 等温淬火蠕铁常温至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 抗拉强度提高1倍以上, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时材料抗拉强度下降较多; 等温淬火蠕铁在 $300 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下的金相组织与保温时间基本无关, 等温淬火蠕铁的冷热疲劳性能优于普通蠕铁。

关键词: 等温淬火蠕墨铸铁; 高温性能; 热稳定性; 冷热疲劳

1977年, 芬兰的Karkkila铸造厂开发了性能优良的等温淬火球铁, 该材料的优异性能引起了世界各国广泛的重视, 被誉为近几十年来铸铁冶金中的重大成就之一^[1]。而等温淬火蠕铁的研究比等温淬火球铁的研究要晚得多, 我国在2000年前后, 清华大学盛达等人对其进行了一定程度的研究^[2-5]。据测算, 到2016年, 我国等温淬火球铁(ADI包括CADI)年产量约15万t, 其中工程结构件和抗磨、耐磨件(包括CADI磨球和奥贝磨球等)大约各占一半, 工程结构件包括汽车悬挂件、支架、控制臂、转向节、铁路机械、农机和工程机械零件及齿轮、曲轴等^[6], 而等温淬火蠕墨铸铁的研究应用鲜有报道。

基于上述现状, 作者以蠕墨铸铁材料为研究对象, 试验研究了等温淬火蠕铁的工艺及各项性能, 为等温淬火蠕铁在轨道交通、汽车零部件、风电铸件、工程机械等领域的应用做技术储备。

1 试验方法

1.1 试验设备

熔炼设备为100 kg中频感应电炉, 浇注设备为100 kg蠕化铁液包, 称量设备为磅秤、电子天平, 等淬加热电炉选用德国进口THERMCONCEPT电炉, 盐浴炉采用50%亚硝酸钠和50%亚硝酸钾盐溶液的盐槽。

1.2 试验材料

Q10风电生铁、高纯生铁、管切头废钢、铁合金、孕育剂、蠕化剂、硅钢片, 主要炉料成分如表1、表2所示, 蠕墨铸铁材料成分见表3。

1.3 试块及试样

Y型试块(220 mm × 25 mm)尺寸如图1所示, 高温拉伸试样尺寸如图2所示, 冷热疲劳试样尺寸如图3所示。

1.4 试样制备过程

(1) 熔炼: 加料顺序为生铁、废钢、合金, 熔炼温度 $1\ 500 \sim 1\ 550 \text{ }^\circ\text{C}$, 出铁温度 $1\ 500 \sim 1\ 520 \text{ }^\circ\text{C}$, 浇注温度 $1\ 380 \sim 1\ 420 \text{ }^\circ\text{C}$;

作者简介:

喻光远(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事铸造技术工艺及新材料研究工作。E-mail: yuan10122003@163.com.

中图分类号: TG143.49

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)05-0435-08

收稿日期:

2018-12-24 收到初稿,
2019-02-01 收到修订稿。

表1 炉料的化学成分
Table 1 Chemical composition of furnace charges

炉料	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	$w_B/\%$
Q10生铁	4.39	0.54	0.06	0.022	0.013	0.01	0.03	
高纯生铁	4.21	0.09	0.04	0.031	0.005	0.01	0.01	
废钢	0.16	0.17	0.61	0.015	0.009			

表2 蠕化剂、孕育剂化学成分
Table 2 Chemical composition of vermicular and inoculant

项目	Si	Mg	RE	Ca	Ba	Al	MgO	$w_B/\%$
蠕化剂	44 ~ 47	1.0 ~ 4.0	6.5 ~ 9.5	0.8 ~ 1.2		1.0	0.4	
孕育剂	65 ~ 75			1 ~ 1.2	1.8 ~ 2.5	0.6 ~ 1.0		

表3 蠕墨铸铁化学成分
Table 3 Chemical composition of vermicular cast iron

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu	Mg	RE	$w_B/\%$
3.3 ~ 3.8	2.2 ~ 2.9	0.4 ~ 0.9	<0.03	<0.02	0.2 ~ 0.6	0.4 ~ 0.9	0.006 ~ 0.014	0.01 ~ 0.03	

(2) 炉前处理工艺：冲入法蠕化，孕育采用包底覆盖和出铁4/5铁液后二次冲入孕育；

(3) 浇注：浇注过程采用随流孕育。

1.5 等温淬火工艺

为研究奥氏体化温度和奥氏体化时间对蠕铁抗拉强度的影响及选择最佳的等温淬火工艺，奥氏体化温度选择为850 ℃、880 ℃、900 ℃、920 ℃、950 ℃、980 ℃，保温时间分别为0.5 h、1.0 h、1.5 h、2.0 h；等温淬火温度分别采用250 ℃、270 ℃、290 ℃、310 ℃、330 ℃、350 ℃、370 ℃，保温时间分别采用0.5 h、1.0 h、1.5 h、2.0 h，并且盐槽状态不变。

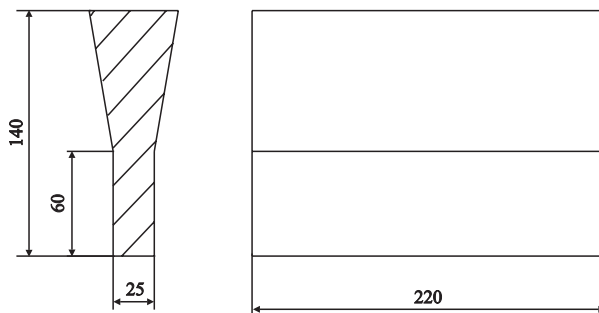
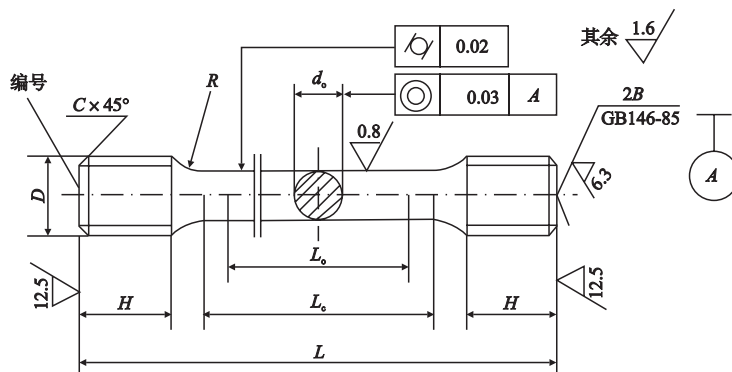


图1 Y型试块
Fig. 1 Y-type block size



d_0	D	C	R	L_0	L_C	H	L	B
$\Phi 5 \pm 0.03$	M12-6h	2	5	25	30	15	70	B1.6/5

图2 高温拉伸试样
Fig. 2 High temperature tensile specimen size

1.6 检测方法

按照ISO945的标准进行金相、硬度和冲击性能检测，试验设备为A1m型金相显微镜、HB-3000型布氏硬度计、JNB-300B摆锤式冲击试验机；按照GB/T 15824—1995进行冷热疲劳试验，设备选用中天高周波ZT感应淬火机床；按照GB/T 228.2—2015进行高温拉伸试验，设备选用美特斯工业系统（中国）有限公司的微机控制电子万能试验机。

2 试验结果及分析

上述试验方法浇注的25 mm厚Y型试块的蠕化率控制在70%及以上，珠光体含量30%~60%，作为后续试验材料研究的对象，其铸态金相组织如图4所示。

2.1 等温淬火对蠕墨铸铁性能的影响

图5-图6显示了奥氏体化温度和时间对蠕铁抗拉强

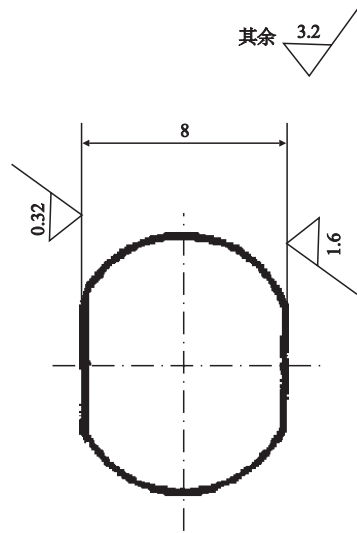


图3 冷热疲劳试样 ($\Phi 10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$)
Fig. 3 Thermal fatigue specimen size

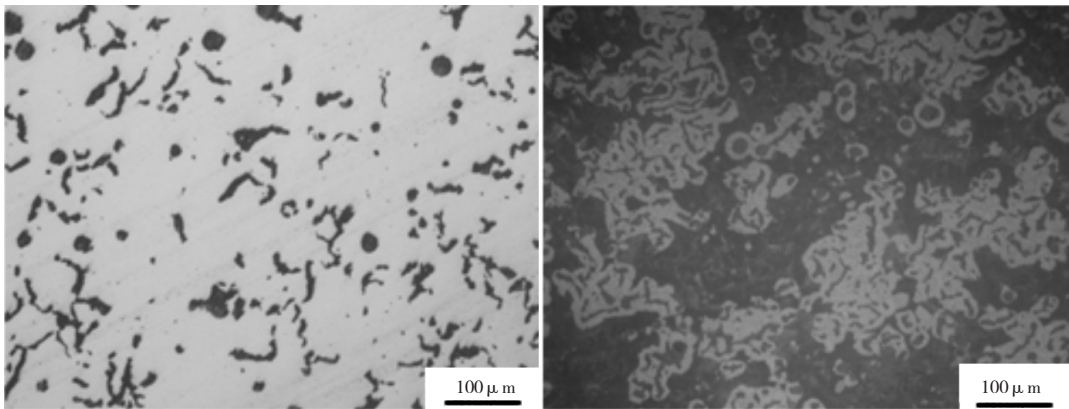


图4 蠕墨铸铁铸态金相组织
Fig. 4 As-cast metallographic structure of vermicular graphite cast iron

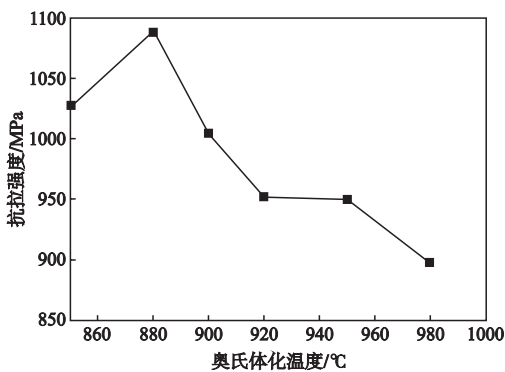


图5 奥氏体化温度对蠕铁抗拉强度的影响
($A_t=1.5 \text{ h}$, $D_T=290 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_t=1.5 \text{ h}$)

Fig. 5 Effect of austenitizing temperature on tensile strength of vermicular iron ($A_t=1.5 \text{ h}$, $D_T=290 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_t=1.5 \text{ h}$)

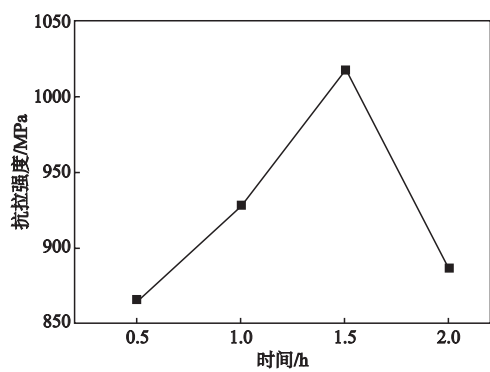


图6 奥氏体化时间对蠕铁抗拉强度的影响
($A_T=915 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_T=290 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_t=1.5 \text{ h}$)

Fig. 6 Effect of austenitizing time on tensile strength of vermicular iron ($A_T=915 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_T=290 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_t=1.5 \text{ h}$)

度的影响,图7和9显示了等温淬火温度和等温淬火时间对蠕铁力学性能的影响,图8是不同等淬温度下的金相组织。其中,奥氏体化温度及时间、等温淬火温度及时间分别用 AT 、 A_t 、 DT 、 D_t 表示。

由图5可知,880℃下抗拉强度最高。材料在880℃温度下已完全奥氏体化,随着温度的继续升高,抗拉强度逐渐降低,920~950℃时抗拉强度趋于稳定,到950℃之后,抗拉强度下降斜率继续增大,说明较佳的奥氏体化温度区间在950℃之下。温度越高,奥氏体晶粒越粗大,抗拉强度下降越厉害。因此,在满足完全奥氏体化的前提下,尽量选择相对低的奥氏体化温度,本试验结果显示,最佳奥氏体温度在850~900℃。

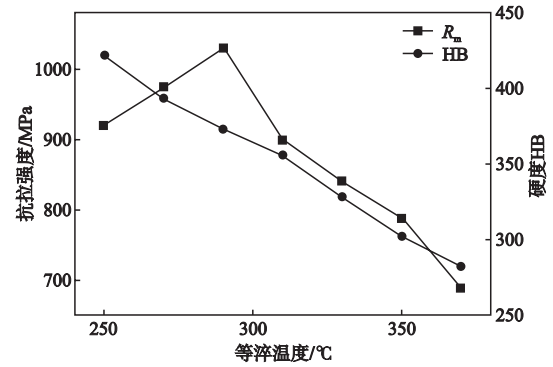


图7 等温淬火温度对蠕铁力学性能的影响
($AT=915$ ℃, $A_t=1.5$ h, $D_t=1.5$ h)

Fig. 7 Effect of austempering temperature on mechanical properties of vermicular iron ($AT=915$ ℃, $A_t=1.5$ h, $D_t=1.5$ h)

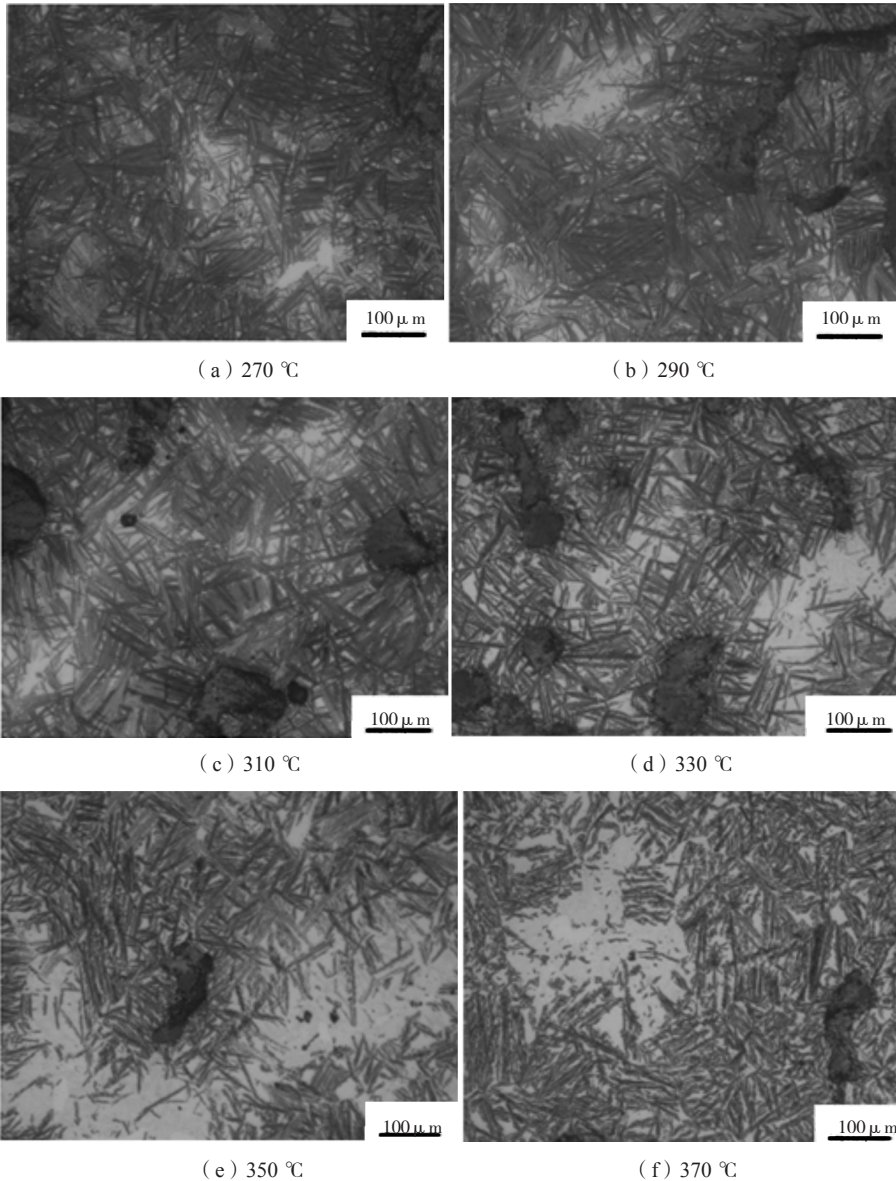


图8 不同等淬温度下的金相组织

Fig. 8 Metallographic structure at different austempering temperatures

由图6可知, 随着时间的增加, 抗拉强度先增加后降低, 说明1.5 h以内, 没有完全奥氏体化。随着奥氏体化时间延长, 奥氏体晶粒不断粗大, 抗拉强度降低。因此, 在满足完全奥氏体化的前提下, 根据铸件截面厚度尽量选择合适的奥氏体化时间, 试验结果显示, 试样的最佳奥氏体化时间是1.5 h。

由图7可知, 随着等温淬火温度的升高, 抗拉强度呈现先增大后降低的趋势, 290 °C温度下抗拉强度最高, 而硬度随等温淬火温度的升高逐渐降低, 这是残余奥氏体含量和针状组织粗细双重影响的结果^[5]。随着等温淬火温度升高, 针状组织由细变粗, 奥氏体含量由少增多, 如图8所示。试验结果显示, 最佳奥氏体温度为290 °C。

由图9可知, 随着等温淬火时间的增加, 抗拉强度先增加后降低, 而硬度总体呈现降低趋势。等温淬火时间短, 奥氏体化不完全, 组织中白亮区较多; 当奥氏体转变的充分时, 残余奥氏体含碳量和残余奥氏体量增加, 材料强度和硬度降低。本试验结果显示, 试样的最佳等温淬火时间是1.5 h。

2.2 等温淬火蠕铁高温力学性能的试验研究

等温淬火蠕墨铸铁材料的高温拉伸试验分别在300 °C、400 °C、500 °C、600 °C下进行, 试验结果见表4。

由表4可知, 等温淬火蠕铁在300 °C, 抗拉强度基本无明显变化, 强度值是相同成分普通蠕墨铸铁抗拉强度的2倍以上; 在300~500 °C温度区间, 随着温度提高, 抗拉强度降低, 500 °C下抗拉强度达到500 MPa以上; 600 °C时, 材料抗拉强度下降较多, 但抗拉强度也达到250 MPa以上, 超过HT250的强度性能。这说明随着温度的升高, 奥氏体分解回复的铁素体量增大, 导致了材料抗拉强度下降。

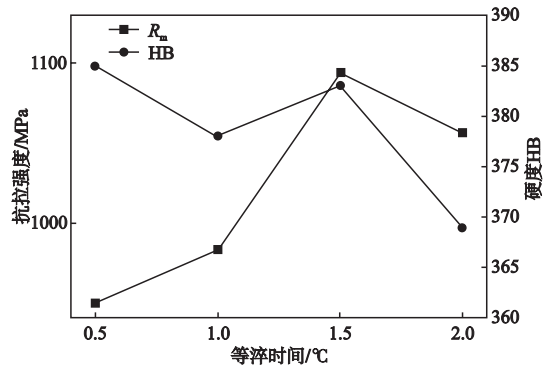
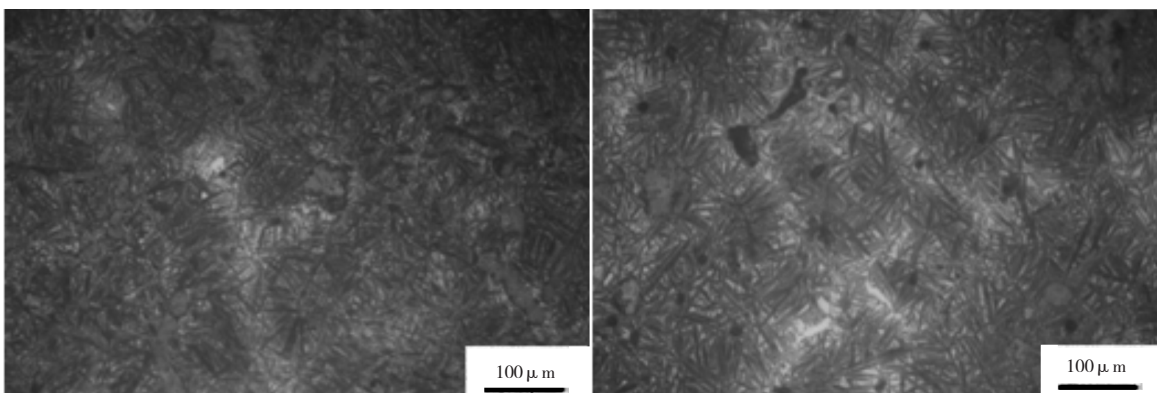


图9 等温淬火时间对蠕铁力学性能的影响 (AT=915 °C, At=1.5 h, DT=290 °C)

Fig. 9 Effect of austempering time on tensile strength of vermicular graphite cast iron (AT=915 °C, At=1.5 h, DT=290 °C)

表4 等温淬火蠕铁高温力学性能
Table 4 High temperature mechanical properties of austempered vermicular graphite cast iron

试样	加热温度/°C	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1 [#]	300	956	1
	400	786	1.5
	500	601	3
	600	263	4
2 [#]	300	1 015	2
	400	857	2.5
	500	582	3
	600	278	4
3 [#]	300	959	1.5
	400	828	3
	500	538	4
	600	281	5



(a) 300 °C × 3 h保温前

(b) 300 °C × 3 h保温后

图10 1[#]等温淬火蠕铁试样金相组织

Fig. 10 Metallographic structures of austempered vermicular iron samples at 300 °C

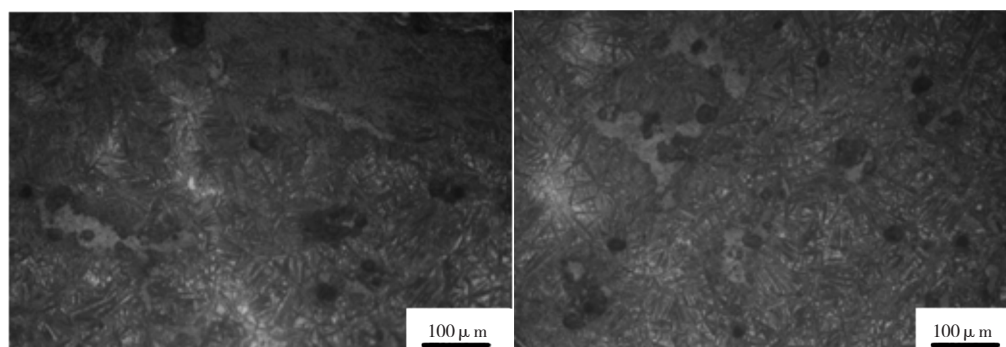
2.3 等温淬火蠕铁热稳定性试验研究

为了研究温度对等温淬火蠕铁性能的影响，将等温淬火蠕铁试样分别在300 ℃、400 ℃的温度下保温3 h，然后观察金相组织的变化，并测量试样的硬度变化，试验结果如图10、图11、表5。

由图10、图11、表5可知，试样在300 ℃、400 ℃保温3 h后，金相组织没有变化，主要为奥铁体，试样加热至400 ℃硬度略有降低，同温度下保持硬度基本不变。说明等温淬火蠕铁在300~400 ℃温度下的热稳定性较好，不会随着该温度下的时间持续长短而发生明显变化。

2.4 等温淬火蠕铁冷热疲劳性试验研究

冷热疲劳试验方法：冷热疲劳试样快速加热到700 ℃，然后直接水冷，600次循环后分析裂纹情况。选用普通蠕铁和等温淬火蠕铁进行冷热疲劳对比试验，试验结果见图12-图15。



(a) 400 ℃ × 3 h保温前

(b) 400 ℃ × 3 h保温后

图11 2#等温淬火蠕铁试样金相组织

Fig. 11 Metallographic structures of austempered vermicular graphite cast iron samples at 400 ℃

表5 加热温度及时间对等温淬火蠕铁硬度 (HBW) 的影响

Table 5 Effects of heating temperature and time on hardness of austempered vermicular graphite cast iron (HBW)

状态	1#	2#	3#
室温	361	362	369
300 ℃ × 1 h	360	360	358
300 ℃ × 3 h	358	356	354
400 ℃ × 1 h	341	342	343
400 ℃ × 3 h	342	341	342

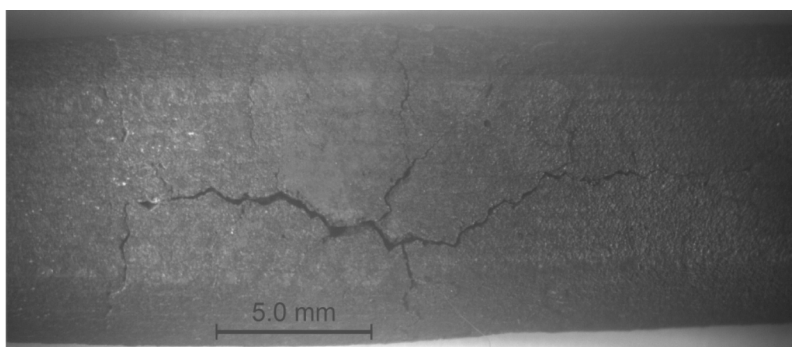
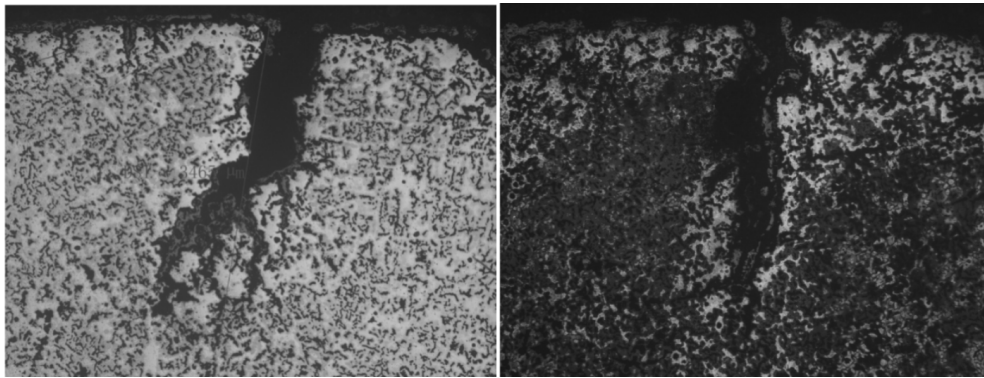


图12 普通蠕铁表面裂纹低倍宏观形貌

Fig. 12 Macroscopic morphology of cracks at the surface of vermicular graphite cast iron sample

由图12-图15可知，普通蠕铁表面裂纹比等温淬火蠕铁表面裂纹开口大。从开口裂纹处解剖观察裂纹深度及金相组织，结果显示，普通蠕铁裂纹深度比等温淬火蠕铁裂纹深度深，裂纹处金相组织基本一致，主要为白色铁素体、黑色回火组织和氧化皮组成，说明冷热疲劳试验中最高温度超过700℃或达到更高温度，查看设备记录发现设备运行的最高温度超过了设定的试验温度造成的。



(a) 裂纹深度

(b) 金相组织

图13 普通蠕铁裂纹截面微观形貌

Fig. 13 Micromorphology of crack at the cross section of vermicular graphite cast iron sample

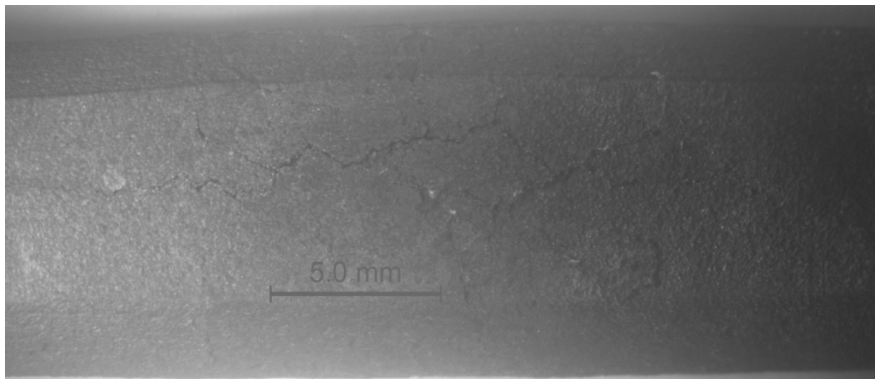
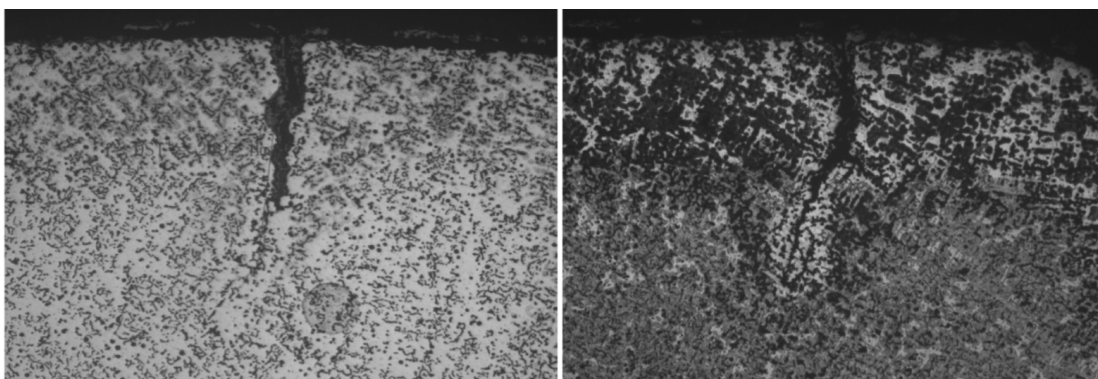


图14 等温淬火蠕铁表面裂纹低倍宏观形貌

Fig. 14 Macroscopic morphology of crack at the surface of austempered vermicular graphite cast iron sample



(a) 裂纹深度

(b) 金相组织

图15 等温淬火蠕铁裂纹截面微观形貌

Fig. 15 Micromorphology of cracks at the cross section of austempered vermicular graphite cast iron sample

3 结论

(1) 等温淬火工艺对蠕墨铸铁材料的金相组织力学性能影响较大, 在满足完全奥氏体化的前提下, 尽量选择低的奥氏体化温度和时间, 并考虑等温淬火蠕铁奥铁体针状组织粗细及奥氏体含量等综合影响因素, 本试验对25 mm厚Y型试块较佳的等温淬火工艺为: $(850 \sim 880 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times 1.5 \text{ h} + 290 \text{ }^{\circ}\text{C} \times 1.5 \text{ h}$ 。

(2) 同成分的等温淬火蠕铁常温至300 $^{\circ}\text{C}$ 力学性能比普通蠕铁抗拉强度提高1倍以上, 600 $^{\circ}\text{C}$ 时, 材料抗拉强度下降较多, 但抗拉强度也达到250 MPa以上, 超过HT250的强度性能。

(3) 等温淬火蠕铁在300~400 $^{\circ}\text{C}$ 温度下的金相组织和硬度基本无变化, 和保温时间关系不大, 说明在400 $^{\circ}\text{C}$ 及以下具有较好的高温稳定性; 试验结果表明, 等温淬火蠕铁加热700 $^{\circ}\text{C}$, 水冷循环的冷热疲劳性能优于普通蠕铁。

参考文献:

- [1] 邓宏运, 王春景, 章舟, 等. 等温淬火球墨铸铁的生产及应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1-3.
- [2] 盛达, 颜丙祥. 奥贝蠕铁及其高温性能的研究 [J]. 现代铸铁, 1999 (3): 23-27.
- [3] 盛达, 颜丙祥, 贾志杰. 高温下奥贝蠕铁的组织与性能 [J]. 钢铁研究学报, 1997 (1): 37-41.
- [4] 颜丙祥, 盛达, 阮殿波, 等. 稀土奥贝蠕铁性能随温度的变化 [J]. 稀土, 1999 (5): 36-40.
- [5] 严有为, 赵伯璠, 张武. 等温淬火对蠕墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 武汉工学院学报, 1994 (4): 46-50.
- [6] 曾艺成, 李克锐, 张忠仇, 等. 等温淬火球墨铸铁研发工作的进展与发展趋势 [J]. 铸造, 2017 (9): 940-947.

Experimental Study on Austempering Process and Properties of Vermicular Graphite Cast Iron

YU Guang-yuan, XIAO Gong-lin, XU Xiao-hui, Qian Kun-cai
(CRRIC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

Taking vermicular graphite cast iron as the research object, the effects of austempering process on room temperature mechanical properties, high temperature mechanical properties, thermal stability and thermal fatigue properties of vermicular graphite cast iron were studied. The results show that the optimum austempering process is: $(850-880 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times 1.5 \text{ h} + 290 \text{ }^{\circ}\text{C} \times 1.5 \text{ h}$; the tensile strength of austempering vermicular graphite cast iron increases by more than one fold from room temperature to 300 $^{\circ}\text{C}$ and decreases more at 600 $^{\circ}\text{C}$; the metallographic structure of austempering vermicular graphite cast iron at 300-400 $^{\circ}\text{C}$ is basically independent of holding time, and the thermal fatigue property of austempering vermicular graphite cast iron is better than that of ordinary one.

Key words:

austempering vermicular graphite cast iron; high-temperature properties; thermal stability; thermal fatigue
