

亚温奥氏体化等温淬火球墨铸铁的研究

姜利坤¹, 李银玲², 石海川², 刘金海³, 琚子来⁴

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院新材料研究所, 山东济南 250013;
2. 山东山水重工有限公司, 山东济南 250306; 3. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130;
4. 唐山工业职业技术学院机械工程系, 河北唐山 063020)

摘要: 研究了亚温奥氏体化等温淬火工艺对等温淬火球墨铸铁组织和力学性能的影响。在等温淬火工艺(等温淬火温度370 °C, 等温淬火时间120 min)一致前提下, 当奥氏体化温度在820~880 °C区间变化时, 随着奥氏体化温度的升高, 热处理后组织中针状铁素体的数量愈来愈少; 当奥氏体化温度为880 °C时, 组织已经全部奥氏体化。此外, 随着亚温奥氏体化温度的提高, ADI球铁的抗拉强度和硬度呈现逐渐增大的趋势, 而伸长率和冲击韧性则逐渐减小。

关键词: 等温淬火球墨铸铁; 亚温奥氏体化淬火工艺; 金相组织; 力学性能

作者简介:

姜利坤(1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新型耐磨、耐热金属材料研究与应用。E-mail: jianglikun919@qlu.edu.cn
通讯作者:

刘金海, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: jhliu57@126.com

中图分类号: TG151.1
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)04-0403-06

基金项目:
山东省自然科学基金(ZR2010EL012);
唐山市重点研发计划(17110233a)。

收稿日期:
2021-07-03 收到初稿,
2022-02-23 收到修订稿。

等温淬火球墨铸铁(Austempered Ductile Iron, 以下简称ADI)是近四十年来发展起来的一种新型工程材料, 这种材料是由普通的球墨铸铁或含有少量合金元素的球墨铸铁通过进行等温淬火热处理得到。由于该材料具有强度高、韧性好、优异的耐磨性等许多独特优点, 被誉为材料领域的新科技, 已经成为人们重点关注的热点材料之一^[1]。双相ADI(Dual Phase Austempered Ductile Iron, 简称Dual Phase ADI)是将一定成分的球墨铸铁加热到共析三相区保温一段时间, 然后进行等温淬火热处理, 最终得到基体组织为破碎状铁素体和奥氏体的球墨铸铁^[2]。

近年来, 国内外研究学者对双相ADI做了许多研究工作。曾维和等人^[3]研究了热处理工艺对双相等温淬火球墨铸铁组织与力学性能的影响, 发现奥氏体化温度在双相区($\alpha + \gamma$)范围内变化时, 组织中先共析铁素体呈现逐渐减少的趋势, 而奥氏体的含量逐渐增多, 所研究的材料韧性下降, 强度逐步提高。他还探讨了等温淬火温度和时间对双相ADI组织和性能的影响。张翔^[4]研究了成分与工艺对双相等温淬火球墨铸铁组织和性能的影响。随着球墨铸铁含硅量的增加, 共析三相区的区间发生相应的扩大, 组织中珠光体的含量逐渐减少。研究时加入了铜元素, 铜的加入, 使得球墨铸铁的球化率变好, 对双相ADI的力学性能影响不大, 但是提高了双相ADI淬透性和耐蚀性, 这种双相ADI组织中由于有共析铁素体的存在, 改善了双相ADI的切削加工性能。姜利坤等人^[5]研究了等温淬火工艺对双相等温淬火球墨铸铁力学性能的影响。研究表明: 等温温度在250~390 °C变化时, 随着等温淬火温度的升高, 双相ADI的塑韧性有提高的趋势, 强度有下降的趋势, 当等温淬火时间为60 min时, 材料的塑韧性达到良好的配合。

本文系统研究了亚温奥氏体化等温淬火工艺对等温淬火球墨铸铁(ADI)组织和性能的影响, 同时, 对其机理进行了探讨, 可以为ADI在更多领域的开发应用提供参考。

1 试验方法

1.1 熔炼与制样

该试验熔炼所需炉料采用优质Q10生铁、优质废钢(A3)、碳化硅、增碳剂、

球化剂、孕育剂、硅铁和锰铁等。试样的制备在300 kg的酸性中频炉中熔炼，出炉温度为1 480~1 520 ℃，球化温度为1 460~1 480 ℃。球化剂采用FeSiMg6Re2，采用包底堤坝式冲入法处理，孕育剂将球化剂覆盖，适量的薄铁片盖住孕育剂，防止过早进行球化反应，球化剂加入量为铁液的1.2%（质量分数）。球化完毕测试样的化学成分，试样实际化学成分如表1所示。球化完之后浇注25 mm厚Y型敲落式试块，加工冲击试样如图1所示、拉伸试样如图2所示。试验制备的材料在铸态条件下，试样原始组织为牛眼状铁素体和珠光体的混合组织，其形貌如图3所示，球化率95%^[2-7]。

1.2 热处理设计原理与工艺方案

热处理原理：球墨铸铁的化学组成，除了铁和碳以外，还含有很高的硅，硅的加入使原来铁碳相图中的共析转变线（PSK）变成一个温度区间（图4）。在这个转变区内是三相共存，对于稳定系这三相是铁素体（ α ）、奥氏体（A）和石墨（G），而对于介稳定系这三相是铁素体（ α ）、奥氏体（A）和渗碳体（C）。本试验中热处理工艺是将一定成分的球墨铸铁加热到共析三相区保温一段时间，然后进行等温淬火

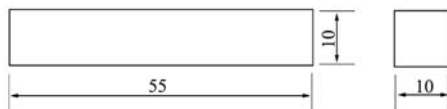


图1 冲击试块

Fig. 1 Dimension of impact specimen

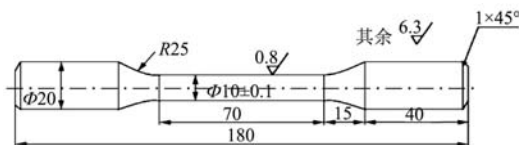


图2 拉伸试棒

Fig. 2 Dimension of tensile test specimen

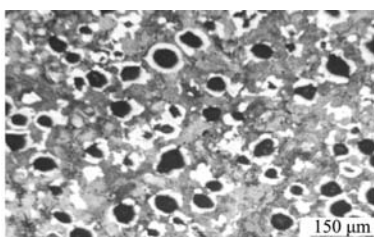


图3 试样的铸态组织（4%硝酸酒精腐蚀）

Fig. 3 Microstructure of as-cast ductile cast iron (polished and etched by 4% nital)

表1 试样化学成分

Table 1 Chemical composition of specimen w_B /%

C	Si	Mn	S	P	Mo	Cu	Mg	RE
3.55	2.53	0.17	0.02	0.03	0.33	0.55	0.041	0.035

热处理，最终基体组织为破碎状铁素体和奥氏体两相共存。即奥氏体化温度控制在 AC_1^S 与 AC_1^Z 之间，不是完全奥氏体化，而是部分奥氏体化，由于部分奥氏体化温度低于全部奥氏体化温度，所以这种处理称为亚温奥氏体化等温处理，又可称为部分奥氏体化等温热处理^[8-10]。

奥氏体化温度是双相ADI热处理工艺最重要的一个参数。在确定热处理方案前，需要先确定热处理三相区的起始温度。作者事先对奥氏体化温度进行了试探性试验，采用奥氏体化后，保温一段时间，然后空冷的方法，确定本试验材料三相区。设计的热处理方案如表2所示，对应的金相组织和铁素体含量如图5所示。

从图5和表2得出结论，为了确保在三相区进行奥氏体化，奥氏体化温度设定为820~880 ℃，奥氏体的均匀化除了要有适当的温度外，还要有足够的时间，可以根据炉型、铸件种类、批量，此次试验样品奥氏体化时间60 min，可以实现完全均匀化。根据前期大量试验数据，等温淬火温度设定为370 ℃和等温淬火时间为120 min。热处理方案如表3所示。

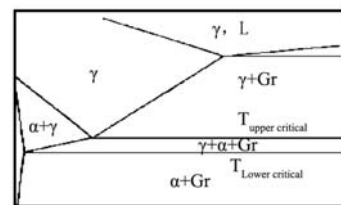


图4 含有一定量Si的Fe-C合金相图

Fig. 4 Pseudo Fe-C binary phase diagram (for a constant content of Si)

表2 奥氏体化处理工艺方案

Table 2 Austenitizing heat treatment process

序号	奥氏体化温度/℃	奥氏体化时间/min	冷却方式
1	820	60	空冷
2	840	60	空冷
3	850	60	空冷
4	860	60	空冷

表3 热处理方案

Table 3 Austenitizing and isothermal quenching heat treatment process

序号	奥氏体化温度/℃	奥氏体化时间/min	等温淬火温度/℃	等温淬火时间/min
1	820	60	370	120
2	840	60	370	120
3	860	60	370	120
4	880	60	370	120

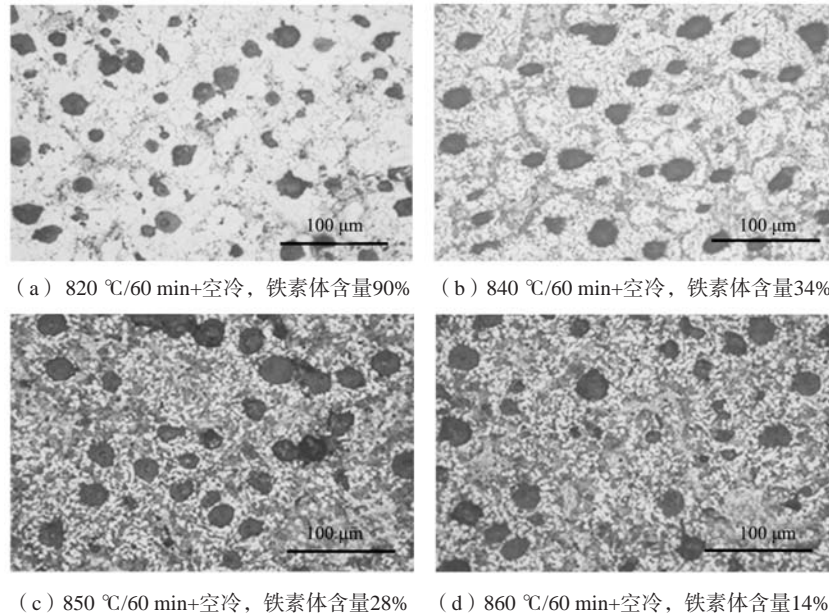


图5 在不同的奥氏体化温度下ADI的微观组织和铁素体含量(4%硝酸酒精腐蚀)

Fig. 5 Microstructure and ferrite content of ADI under different austenitizing treatment temperatures (etched in 4% Nital)

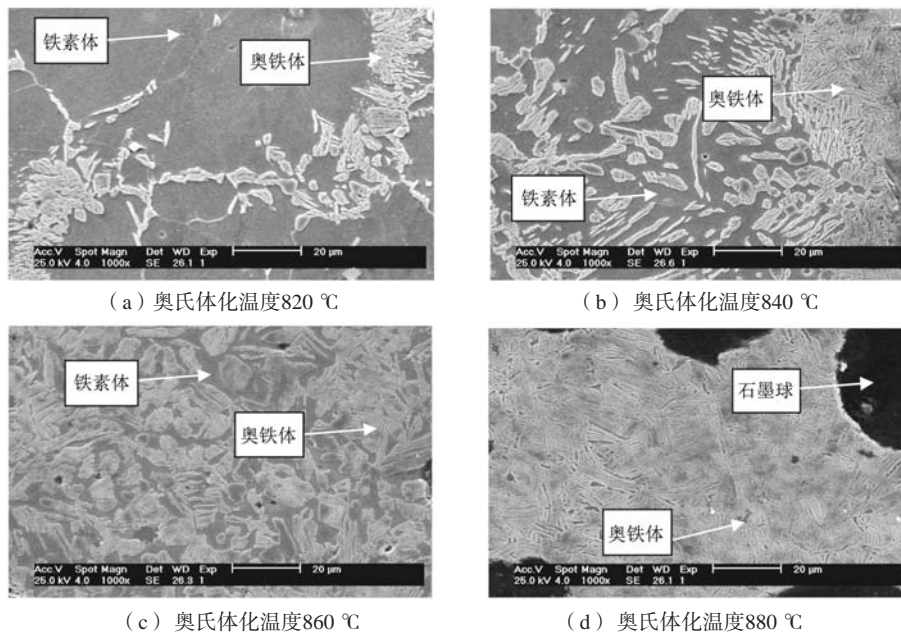
2 试验结果分析与讨论

2.1 亚温奥氏体化温度对 ADI 组织的影响

亚温奥氏体化温度对ADI组织的影响如图6所示。

从图6中可以看出,当奥氏体化温度较低时,在820 °C的奥氏体化温度下,组织处于奥氏体化的三相区的开始阶段即奥氏体+铁素体+石墨球,其中铁素体占多数,只有少量奥氏体,经过等温淬火处理后,完全奥氏体化的那部分奥氏体转变成为奥铁体(针状铁素

体+富碳奥氏体),而未完全奥氏体化的块状铁素体保留了下来,即破碎状铁素体,等温淬火后的组织为奥铁体(针状铁素体+富碳奥氏体)、破碎状铁素体、石墨球所组成的混合组织。随着奥氏体化温度的升高,铁素体的含量逐渐减少,奥氏体的含量逐渐增加,等温淬火后,最终组织中奥铁体的量逐渐增多,破碎状铁素体的量逐渐减少。当奥氏体化温度达到880 °C时,基本全部奥氏体化,等温淬火后,最终组织中基本没



(奥氏体化时间60 min, 等温淬火温度370 °C, 等温淬火时间120 min)

图6 亚温奥氏体化温度对ADI组织的影响(4%硝酸酒精腐蚀)

Fig. 6 Effect of austenitizing temperature on microstructure of ADI (etched in 4% nital)

有破碎状铁素体，只有奥铁体、石墨球所组成的混合组织^[7-9]。

2.2 亚温奥氏体化温度对ADI力学性能的影响

亚温奥氏体化温度对ADI力学性能的影响如表4所示。

奥氏体化温度对ADI抗拉强度、硬度的影响如图7、图8所示。

从图7中可以看出，随着奥氏体化温度的升高，ADI的抗拉强度逐渐提高。ADI的奥氏体化过程是扩散相变的过程。当奥氏体化温度较低时，处于三相区的开始阶段，基体中铁素体的含量高，合金元素的扩散能力低，淬透性差。基体中只有少量的奥氏体。经过等温淬火后，组织中针状铁素体和残余奥氏体较少，所以强度低。随着奥氏体化温度的升高，基体中铁素体的量逐渐减少，奥氏体的量逐渐增多。同时，由于温度的升高，合金元素的扩散能力增强，淬透性提高，等温淬火后获得较多的奥铁体。从图8中可以看出，随着奥氏体化温度的升高，ADI的硬度逐渐提高。

当奥氏体化温度较低时，奥氏体化温度处于奥氏体化三相区的开始阶段，等温淬火后，组织中存在较多碎块状铁素体，导致硬度较低。随着奥氏体化温度的升高，基体中铁素体的量逐渐减少，奥氏体的量逐渐增多，合金元素的扩散能力增强，合金元素逐渐

固溶到奥氏体中，基体的淬透性提高，等温淬火后，容易获得较多的奥铁体（针状铁素体+富碳奥氏体），硬度提高。

奥氏体化温度对ADI冲击性能和伸长率的影响如图9、图10所示。

从图9中可以看出，随着奥氏体化温度的升高，ADI的冲击性能逐渐减小。从图10中可以看出，随着奥氏体化温度的升高，ADI的伸长率减小。

ADI的伸长率依赖于破碎状铁素体所占组织的比例，奥氏体化温度在820℃时，处于三相区的开始阶段，基体中铁素体量较多，奥氏体相对较少，等温淬火后，这些破碎状铁素体被保留下来，奥铁体相对少

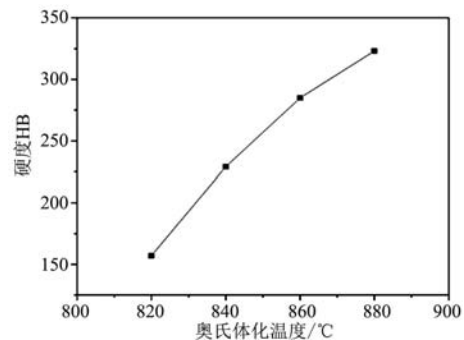


图8 奥氏体化温度对ADI硬度的影响

Fig. 8 Effect of austenitizing temperature on hardness of ADI

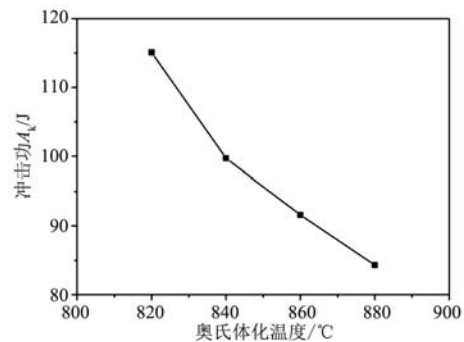


图9 奥氏体化温度对ADI冲击性能的影响

Fig. 9 Effect of austenitizing temperature on impact absorbing energy of ADI

表4 亚温奥氏体化温度对ADI力学性能的影响
Table 4 Effect of austenitizing temperature on mechanical properties of ADI

力学性能	温度/℃			
	820	840	860	880
抗拉强度/MPa	647.0	800.0	1 001.0	1 115.0
冲击功/J	115.1	99.7	91.6	84.3
硬度HB	157	229	285	323
伸长率/%	13.5	9	7.5	5.5

注：奥氏体化时间60 min，等温淬火温度370℃，等温淬火时间120 min。（表中所测数据均为五个数据的平均值）

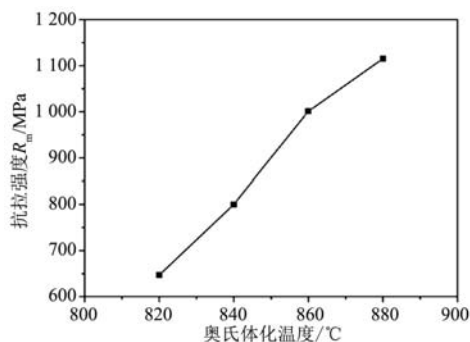


图7 奥氏体化温度对ADI抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of austenitizing temperature on tensile strength of ADI

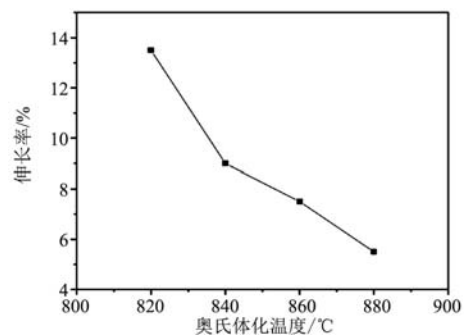


图10 奥氏体化温度对ADI伸长率的影响

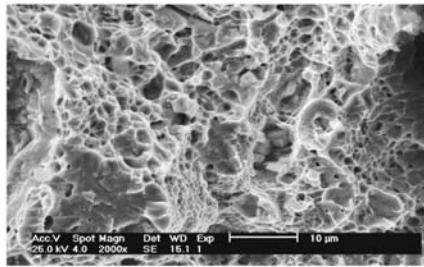
Fig. 10 Effect of austenitizing temperature on elongation of ADI

一些,所以伸长率高。奥氏体化温度越高,基体中铁素体的含量越少,等温淬火后组织转化越完全,破碎状铁素体数量越少,则伸长率越低^[10-12]。

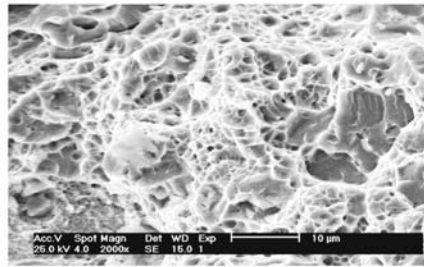
不同奥氏体化温度的ADI冲击试样的断口扫描图片如图11所示。

从图11中可以看出,当奥氏体化温度较低时,

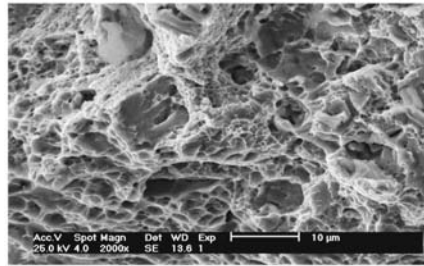
韧窝的数量很多。随着奥氏体化温度的升高,断口形貌中韧窝的数量逐渐减少。当断口中韧窝的数量较多时,试样的冲击性能较高。韧窝的数量较少时试样的冲击性能较低。从上面的断口分析可以得出,随着奥氏体化温度的升高,冲击性能降低,因为奥氏体化温度低时,试样基体中破碎状铁素体较多,其韧性高;



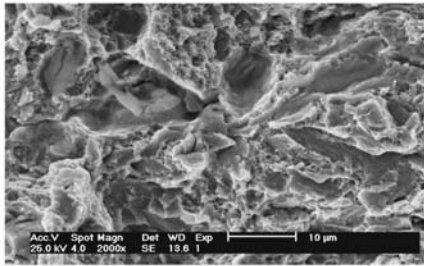
(a) 奥氏体化温度820 °C



(b) 奥氏体化温度840 °C



(c) 奥氏体化温度860 °C



(d) 奥氏体化温度880 °C

(奥氏体化时间60 min, 等温淬火温度370 °C, 等温淬火时间120 min)

图11 奥氏体化温度对ADI断口形貌的影响

Fig. 11 Effect of austenitizing temperature on fracture morphology of ADI

而奥氏体化温度越高,最终组织中破碎状铁素体越少,所以冲击性能下降^[7-9]。

3 结论

当热处理条件为等温淬火温度370 °C,保温120 min时,亚温奥氏体化温度在820~880 °C区间变化,保温时间60 min,不同的亚温奥氏体化温度对ADI组织和力学性能的影响如下。

(1) 随着亚温奥氏体化温度的提高,ADI的金相组织中奥铁体(针状铁素体+富碳奥氏体)的数量愈来愈多,先共析铁素体数量愈来愈少。当奥氏体化温度为880 °C时,铸态组织已经全部奥氏体化,淬火后的基体组织已经全部是奥铁体。

(2) 随着亚温奥氏体化温度的提高,ADI的抗拉强度和硬度呈现逐渐增大的趋势,而伸长率和冲击性能则逐渐降低。

参考文献:

- [1] 曾艺成,张忠仇,李克锐.等温淬火球墨铸铁(ADI)生产和技术的新进展[C]//第九届全国铸铁及熔炼学术会议暨机床铸件技术研讨会论文集.玉林:中国机械工程学会铸造分会铸铁及熔炼技术委员会,2014:22-29.
- [2] 姜利坤,刘金海,李国禄,等.等温淬火工艺对双相等淬球墨铸铁力学性能的研究[J].铸造,2009(4):368-372.
- [3] 曾维和,田迎新,李德江,等.热处理工艺对双相等温淬火球墨铸铁组织与力学性能的影响[J].金属热处理,2016(12):86-91.
- [4] 张翔.成分与工艺对双相等温淬火球墨铸铁组织和性能的影响[D].天津:河北工业大学,2014.
- [5] 姜利坤,张新恩,田长文,等.热处理工艺对双相等温淬火球墨铸铁组织的影响[J].铸造,2013,62(6):534-540.
- [6] 刘金海,叶学贤,张会友,等.ADI和CADI在冶金矿山等行业中的应用及前景[J].现代铸铁,2008(4):26-30.
- [7] 周继扬.ADI材料近年的进展与深化[C]//第四届全国等温淬火球铁(ADI)技术研讨会论文集.苏州:中国机械工程学会铸造学会,2006:25-29.
- [8] 张云,龚文邦,刘欢.ADI的研究应用前景探讨[J].铸造,2014,63(5):439-443.

- [9] 张景超. 硼对等温淬火球墨铸铁组织和性能的影响 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [10] 刘金城, 时胜利. 等温淬火球铁优越的耐磨性 [J]. 铸造技术, 2005, 26 (4): 316-320.
- [11] 魏秉庆, 梁吉, 吴德海. 贝氏体球墨铸铁 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [12] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

Study on Austempered Ductile Iron Treated by Intercritical Quenching Process

JIANG Li-kun¹, LI Yin-ling², SHI Hai-chuan², LIU Jin-hai³, JU Zi-lai⁴

(1. Qilu University of Technology, Advanced Materials Institute, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, Shandong, China; 2. Shandong Shanshui Heavy Industry Co., Ltd., Jinan 250306, Shandong, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 4. Department of Mechanical Engineering of Tangshan Polytechnic College, Tangshan 063020, Hebei, China)

Abstract:

The effect of intercritical quenching process on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron was studied. The results show that under the condition of isothermal quenching process (isothermal quenching temperature 370 °C, isothermal quenching time 120 min), the increase of austenitizing temperature in the range of 820-880 °C will decrease the amount of acicular ferrite in the microstructure; when the austenitizing temperature is 880 °C, the microstructure has been austenitized completely. Furthermore, with increasing the austenitizing temperature, the tensile strength and hardness have an ascending trend gradually, while the elongation and impact absorbing energy have a descending trend gradually.

Key words:

austempered ductile iron; intercritical quenching process; microstructure; mechanical properties
