

等温淬火温度对 ADI 组织及性能的影响

于根杰¹, 孙玉福¹, 路王珂¹, 史志文², 叶玉娟¹

(1. 中原科技学院机电工程学院, 河南郑州 450000; 2. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州 450052)

摘要: 对ADI试样进行不同温度的等温淬火工艺, 等温淬火保温时长均为80 min。采用金相显微镜、扫描电子显微镜、布氏硬度计、拉伸试验机和冲击试验机等设备, 研究等温淬火温度对ADI组织及性能的影响, 并确定了ADI的最佳等温淬火温度。结果表明: 等温淬火后的基体由残余奥氏体和针状铁素体组成。随着等温淬火温度的升高, 基体中的针状铁素体晶粒尺寸逐渐增大, 残余奥氏体量逐渐增多。ADI的硬度、抗拉强度和屈服强度逐渐减小, 伸长率和冲击功逐渐增加。当等温淬火温度为250 °C时, ADI具有较高的强度、硬度以及良好的韧性。

关键词: 等温淬火温度; 等温淬火球墨铸铁; 显微组织; 力学性能

二十世纪六七十年代, 国内外学者几乎同时研发出等温淬火球墨铸铁, 且因其良好的综合性能, 迅速引起了国内外学者的广泛关注^[1-3]。等温淬火球墨铸铁 (Austempered Ductile Iron, 简称ADI) 是球墨铸铁经奥氏体化后在一定温度下等温淬火热处理, 从而获得由石墨球、残余奥氏体和针状铁素体所组成的新型材料^[4]。其综合力学性能可媲美锻钢, 生产成本比锻钢低20%, 具有良好的经济效益, 故在汽车动力、液压、机床和模具等领域得到了广泛应用^[5-7]。统计显示: 在ADI的铸件中, 抗磨、耐磨件和工程结构件约各占一半, 工程机械零件包括汽车悬挂件、支架、控制臂、转向节、铁路机械、农机和工程机械零部件, 但在齿轮及发动机曲轴等高精度及高性能要求的有技术含量的机械结构零部件占比却不足5%^[8-9]。为了进一步提高其性能, 目前研究者已从热处理工艺改进、合金化等方面对其组织和性能及强化机理进行了诸多研究^[10-12], 研究表明, 影响ADI性能的因素包含球铁毛坯的内在质量及化学成分、等温淬火工艺参数和回火工艺等, 其中等温淬火工艺参数对力学性能影响最大, 工艺参数中以奥氏体化温度及淬火等温温度影响最大。基于此, 本试验在既定奥氏体化条件下对球墨铸铁进行不同等温温度的等温淬火, 探究不同等温淬火温度对ADI显微组织及力学性能的影响, 分析影响机理, 优化出最佳的等温淬火温度, 以期保证ADI良好的综合力学性能。

1 试验过程及方法

1.1 试样制备及试验设计

本试验原材料包括生铁、废钢、回炉料、钼铁、电解铜和电解镍等, 采用0.5 t中频感应电炉进行合金熔炼, 在熔炼过程中根据检测结果及时调整各元素的含量, 保证熔炼ADI成分如表1所示。熔炼温度为1 520~1 525 °C, 出炉温度为1 490~1 510 °C。经过球化孕育处理之后的铁液进行浇注, 浇注温度为1 360~1 380 °C, 1箱6件, 浇注

作者简介:

于根杰 (1978-), 男, 高级技师, 研究方向为金属材料加工工艺。E-mail: 401830552@qq.com

通信作者:

孙玉福, 男, 教授。E-mail: yufusun@zzu.edu.cn

中图分类号: TG156.31

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

03-0304-06

基金项目:

中原科技学院校级科技培育重大项目 XL2020A001, 重点项目 XL2020B001。

收稿日期:

2024-01-18 收到初稿,

2024-03-11 收到修订稿。

表1 ADI的化学成分设计
Tab. 1 Chemical composition design of ADI

C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cu	Mg
3.70	2.37	0.29	0.01	0.023	0.47	0.17	0.69	0.044

成标准Y型试块。对试验材料进行等温淬火，加热奥氏体化条件设定900 ℃保温90 min，设定等温淬火温度分别为250 ℃、270 ℃、320 ℃、340 ℃、380 ℃和390 ℃，等温淬火时间均为80 min，探究不同等温淬火温度对ADI组织及性能的影响，分析影响机理，优化出最佳的等温淬火温度。

1.2 组织分析及力学性能测定

试验采用箱式电阻炉进行奥氏体化保温，采用盐浴池进行等温淬火处理，淬火介质为50% KNO_3 +50% NaNO_3 ，基于试验参数设计进行等温淬火，在合适位置切割试样进行成分检测、组织观察及性能测定。采用莱卡MD4000M金相显微镜观察铸态球墨铸铁球化效果以及等温淬火热处理后的基体组织，采用QUANTA200型扫描电子显微镜观察ADI等温淬火热处理后的拉伸断口形貌。采用TH600布氏硬度计测定不同等温淬火温度ADI的硬度，采用硬质合金压头，保持载荷时间为30 s，每个试样随机选取5个点，取平均值作为最终结果。在SHIMAD（岛津）ZUAG-I250KV电子拉伸试验机上进行室温拉伸试验，测定不同等温淬火温度ADI的抗拉强度、屈服强度和伸长率，每组试样进行五次拉伸试验，取平均值作为最终结果。在JB-30摆锤式冲击

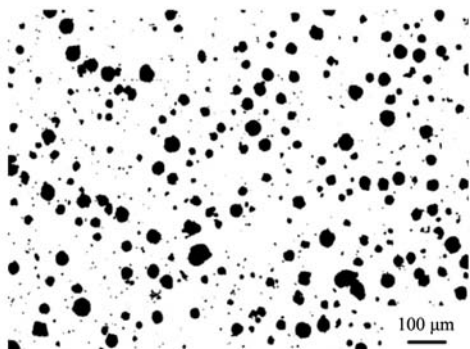
试验机上采用尺寸为10 mm×10 mm×55 mm的无缺口试样测定不同等温淬火温度下ADI的冲击功，每组试样进行五次冲击试验，取平均值作为最终结果。

2 试验结果及分析

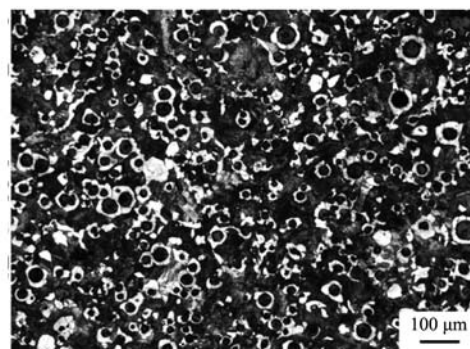
2.1 铸态组织分析

采用金相显微镜观察腐蚀前后的铸态试样，其金相组织如图1所示，其中图1（a）为未进行腐蚀的铸态试样石墨形貌，图1（b）为经4%的硝酸酒精腐蚀10 s的铸态试样组织形貌，依据GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》观察石墨大小、分布以及球化级别，分析其球化效果。

由图1（a）可知，铸态试样的石墨球大小等级为6级，球化级别为2级，球化率为90%，石墨球较为圆整，分布均匀，球化效果良好。细小均匀的石墨球对ADI中的针状铁素体形核有利，有助于提高材料的强度，并且石墨球的球化等级越高，等温淬火热处理过程中越不易开裂。由图1（b）可知，铸态试样的基体组织为珠光体和铁素体，未发现渗碳体和磷共晶，亮白色区域为铁素体，环绕在石墨球周围，共同呈现出“牛眼状”组织；灰色区域为珠光体，珠光体含量约为65%。



(a) 未腐蚀铸态试样石墨形貌



(b) 4%的硝酸酒精腐蚀10 s铸态试样形貌

图1 腐蚀前后铸态试样石墨及基体组织形貌

Fig. 1 The microstructure morphology of graphite and matrix of as-cast specimens before and after corrosion

2.2 等温淬火温度对ADI基体组织的影响

对ADI进行不同等温温度的等温淬火，采用金相显微镜放大500倍观察不同等温淬火温度ADI的组织，如图2所示。由图2可知，ADI的基体组织为针状铁素体和残余奥氏体，黑色区域是针状铁素体，白色区域是残余奥氏体，分布较为均匀，随着等温淬火温度的升高，针状铁素体的尺寸逐渐增大。

当等温淬火温度为250 ℃、270 ℃时，针状铁素体呈现细小针状，分布比较密集，如图2（a）和图2（b）所示。这是由于等温淬火过程中，针状铁素体主

要通过形核和晶粒长大从过冷奥氏体中形成。当等温淬火温度较低时，过冷度较大，成核率较高，因此，更多的铁素体在较低的温度下形核，针状铁素体晶粒尺寸较小，呈现出细针状。

当等温淬火温度由320 ℃经340 ℃、380 ℃升高到390 ℃时，针状铁素体由类似于羽毛状逐渐转变成短粗柱状，如图2（c）到图2（f）。这是因为当针状铁素体形核时，碳必须扩散出来，才能通过晶粒长大过程生成更多的针状铁素体。随着等温淬火温度的升高，碳由针状铁素体的区域扩散至周围奥氏体的速度逐渐增

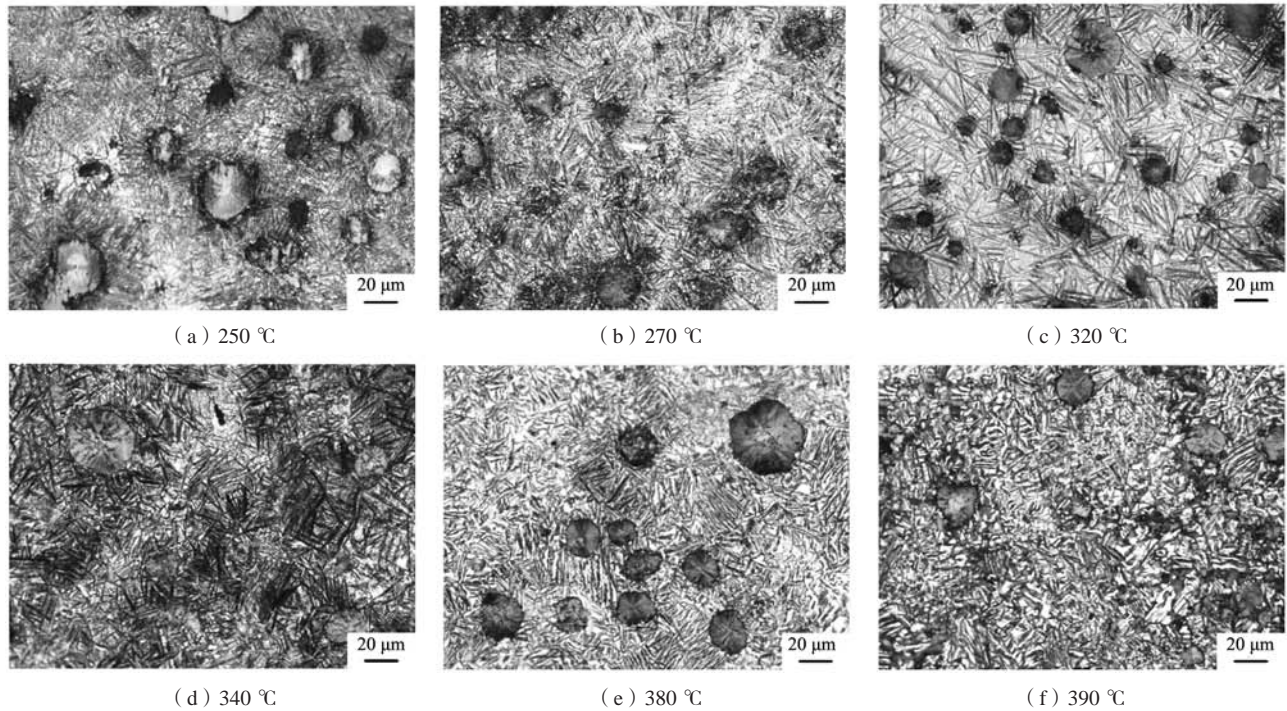


图2 不同等温淬火温度ADI的显微组织

Fig. 2 Microstructure of ADI at different isothermal quenching temperatures

加, 使得针状铁素体生长速度加快, 晶粒逐渐长大。

2.3 等温淬火温度对 ADI 力学性能的影响

2.3.1 等温淬火温度对硬度的影响

采用布氏硬度计测定不同等温淬火温度ADI的硬度, 等温淬火温度对ADI硬度的影响如图3所示。由图3可知, 随着等温淬火温度的升高, ADI的硬度逐渐减小。这是因为当等温淬火温度较低时, 针状铁素体尺寸较小, 呈现细针状, 如图2(a)和图2(b)所示, 且碳原子从针状铁素体中扩散到周围奥氏体因温

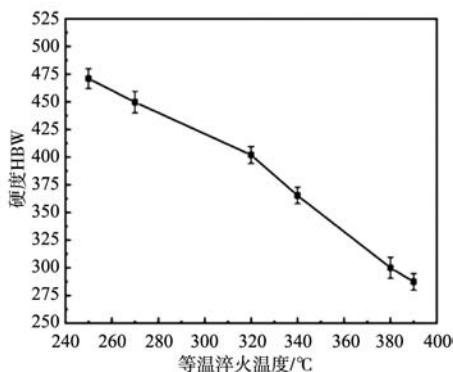


图3 等温淬火温度对ADI硬度的影响

Fig. 3 The influence of isothermal quenching temperature on the hardness of ADI

度较低不能充分进行, 使得奥氏体中固溶的碳原子量较少, 稳定性较差, 导致冷却至室温时基体中残余奥氏体含量减少, 从而表现为ADI的硬度较高。随着等温淬火温度的升高, 针状铁素体内的碳原子扩散能力强, 促进了针状铁素体的晶粒长大, 如图2(c)到图2(f)所示, 同时残余奥氏体中固溶的碳原子数量逐渐增多, 其稳定性增强, 基体中残余奥氏体含量较多, 表现为ADI的硬度较低。

2.3.2 等温淬火温度对拉伸性能的影响

采用拉伸试验机对不同等温淬火温度的ADI试样进行拉伸试验, 试验结果如图4所示。

由图4可知, 随着等温淬火温度的升高, ADI的抗拉强度和屈服强度均呈现降低的趋势, 伸长率逐渐增加。这是因为当等温淬火温度较低时, 过冷奥氏体转变形成的针状铁素体尺寸细小, 如图2(a)、图2(b)所示, 位错密度较高, 晶界数量较多, 位错发生滑移时遇到的阻力较大^[13], 细晶强化作用明显, 从而使得ADI的抗拉强度和屈服强度较高, 同时基体中残余奥氏体含量较少, 导致伸长率较小。

随着等温淬火温度的升高, 针状铁素体的生长速度加快, 晶粒尺寸逐渐增大, 如图2(c)到图2(f)所示, 细晶强化作用减弱, 导致ADI的抗拉强度和屈服强度减小, 且残余奥氏体含量逐渐增多, 当冷却至室

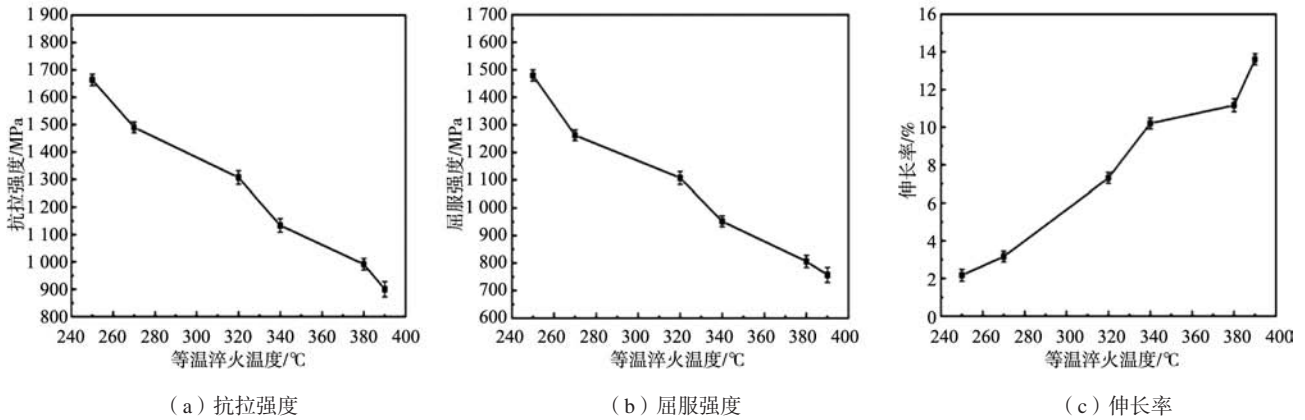


图4 等温淬火温度对ADI拉伸性能的影响
Fig. 4 The influence of isothermal quenching temperature on the tensile properties of ADI

温时残余奥氏体能够稳定存在，基体中的残余奥氏体含量增多，使得ADI的伸长率逐渐增加，材料的塑性得到提高。

采用扫描电镜观察不同等温淬火温度的ADI拉伸断口形貌如图5所示。由图5可知，随着等温淬火温度的升高，拉伸断口中的韧窝数量逐渐增多，断裂方式逐渐倾向于韧性断裂。

当等温淬火温度为250 °C和270 °C时，拉伸断口中韧窝数量较少，断面呈现出解理面和解理台阶的特征，并含有“河流状”花样，断裂方式倾向于脆性断

裂，如图5 (a)、图5 (b) 所示。原因是当等温淬火温度较低时，等温淬火后组织呈现细针状铁素体，如图2 (a)、图2 (b) 所示，晶粒尺寸较小，因此，ADI的抗拉强度和屈服强度增加；并且当在较低的等温淬火温度下时，碳原子的扩散能力降低，则残余奥氏体中固溶的碳原子减少，使得残余奥氏体含碳量降低，稳定性较差，残余奥氏体含量较少，ADI的伸长率较低，材料的塑性较低。

当等温淬火温度为320 °C和340 °C时，拉伸断口中韧窝数量减少，出现部分撕裂棱，断裂方式倾向于

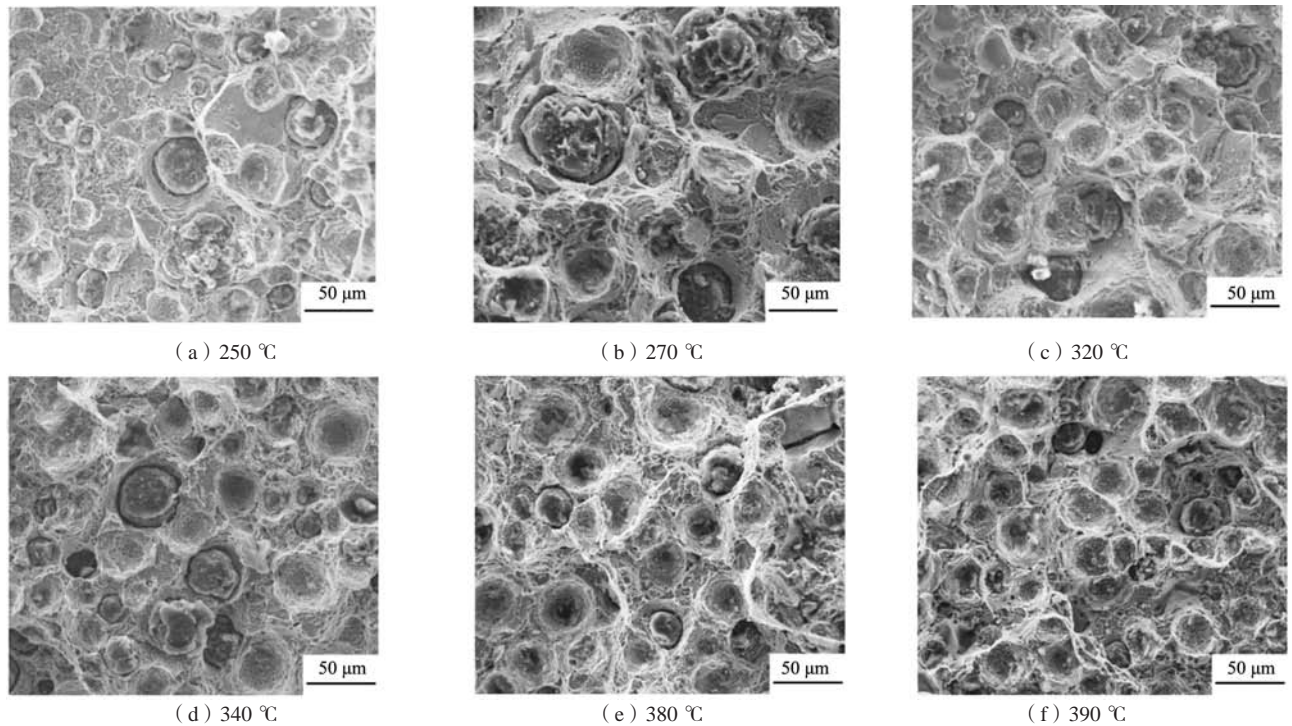


图5 不同等温淬火温度ADI的拉伸断口形貌
Fig. 5 Tensile fracture morphology of ADI at different isothermal quenching temperatures

准解理断裂,如图5(c)、图5(d)所示。当等温淬火温度为380℃和390℃时拉伸断口形貌呈现出较多韧窝,断裂方式倾向于韧性断裂,如图5(e)、图5(f)所示。原因为随着等温淬火温度的升高,针状铁素体晶粒尺寸逐渐增大,如图2(c)到图2(f)所示,表现为ADI的抗拉强度和屈服强度减小,且基体中残余奥氏体含量逐渐增多,使得ADI伸长率逐渐增加,材料的塑性得到提高。

2.3.3 等温淬火温度对冲击功的影响

对不同等温温度淬火ADI进行冲击试验,等温淬火温度对冲击功的影响如图6所示。由图6可知,随着等温淬火温度的升高,ADI的冲击功逐渐增加。这是因为ADI基体中的残余奥氏体相能够很好地吸收冲击,并且

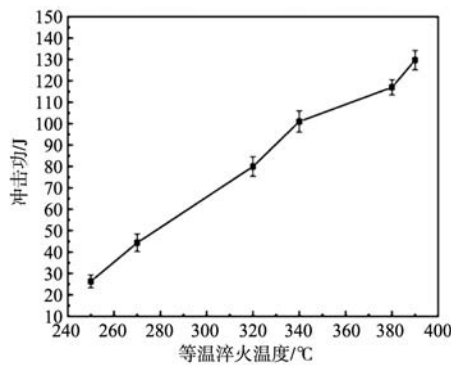


图6 等温淬火温度对ADI冲击功的影响

Fig. 6 The influence of isothermal quenching temperature on the impact energy of ADI

提供较高的吸收能量,因此,残余奥氏体的含量决定着ADI材料的冲击功^[14]。当等温淬火温度较低时,奥氏体含碳量较低,其稳定性较低,致使基体中残余奥氏体含量较少,针状铁素体晶粒尺寸细小,位错滑移受到限制,导致ADI的冲击功较低,韧性较差。

随着等温淬火温度的升高,等温转变C曲线可知孕育期更短,过冷奥氏体的等温转变过程更容易进行,转变形成的针状铁素体晶粒尺寸较大,如图2(c)到图2(f)所示,且固溶到残余奥氏体中的碳原子逐渐增多,形成了更加稳定的富碳奥氏体,残余奥氏体含量增多,使得ADI的冲击功升高,韧性提高。

3 结论

(1) ADI的铸态组织由珠光体和铁素体组成,石墨球大小为6级,球化级别为2级,球化率为90%,无渗碳体和磷共晶,等温淬火热处理后的基体组织主要是针状铁素体和残余奥氏体。

(2) 随着等温淬火温度的升高,基体中的针状铁素体形态由细小针状转变成类似羽毛状,最后呈现短粗柱状。

(3) 随着等温淬火温度的升高,ADI的硬度、抗拉强度和屈服强度逐渐降低,伸长率逐渐增加,拉伸断口断裂方式依次由脆性断裂倾向转变为解理断裂倾向,最后呈现韧性断裂倾向,冲击功逐渐增加,韧性逐渐提高。

(4) 当等温淬火温度为250℃,ADI具有较高的强度、硬度以及良好的韧性。

参考文献:

- [1] 曾艺成. 等温淬火球墨铸铁生产技术的最新进展 [J]. 现代铸铁, 2015 (5): 19-25.
- [2] MURTHY K N, SAMPATHKUMARAN P, SEETHARAMU S. Abrasion and erosion behavior of manganese alloyed permanent moulded austempered ductile iron [J]. Wear, 2009, 267 (10): 1393-1398.
- [3] 刘金城, 时胜利. 等温淬火球铁 (ADI) 优越的耐磨性 [J]. 铸造技术, 200 (3): 316-320.
- [4] 闫启栋, 韩非, 徐锦锋, 等. 等温淬火球墨铸铁件 [J]. 铸造工程, 2020, 44 (1): 20-23.
- [5] 刘艳彩, 张云鹏, 王晓雪, 等. 两步法等温淬火球墨铸铁型材的组织与性能 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 783-785.
- [6] 吴秋敏, 袁延彬, 李广路, 等. 等温淬火温度和时间对奥贝球铁组织性能的影响 [J]. 现代制造技术与装备, 2012 (6): 40-41.
- [7] 曾艺成. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 研究现状及发展前景 [J]. 中国铸造装备与技术, 2007 (3): 60-66.
- [8] 高萌. 不同处理工艺对等温淬火球墨铸铁组织和性能的影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [9] 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, 66 (9): 940-942.
- [10] 周明, 杨贵生. 等温淬火温度对ADI组织和力学性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2017 (2): 24-27.
- [11] 刘岩, 郭二军, 冯义成, 等. 一步等温淬火温度对高强韧ADI组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (6): 97-100.
- [12] SHELTON P W, BONNER A A. The effect of cooper additions to the mechanical properties of austempered ductile iron (ADI) [J]. Journal

of Materials Processing Technology, 2006, 173 (3) : 269-274.

[13] 边泊乾, 刘金海, 李国禄, 等. 等温淬火温度对ADI中残余奥氏体及其力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2007 (8) : 58-61.

[14] ELMASRY N, MAHDY A, KANDIL A. Influence of austempering temperature on microstructure and properties of ductile irons [J]. Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, 2013, 8 (26) : 122-128.

Effect of Isothermal Quenching Temperature on the Structure and Properties of ADI

YU Gen-jie¹, SUN Yu-fu¹, LU Wang-ke¹, SHI Zhi-wen², YE Yu-juan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongyuan Institute of Science and Technology, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract:

Isothermal quenching processes are performed on ADI specimens at different isothermal temperatures for 80 min holding time. The influence of isothermal quenching temperature on the microstructure and properties of ADI was studied by using metallographic microscope, scanning electron microscope, Brinell hardness tester, tensile testing machine, impact testing machine and other equipment, and the optimal isothermal quenching temperature of ADI was determined. The results show that the matrix after isothermal quenching is composed of residual austenite and acicular ferrite. With the increase of isothermal quenching temperature, the size of acicular ferrite grains in the matrix gradually increased, and the amount of residual austenite gradually increased. The hardness, tensile strength and yield strength of ADI gradually decreased, while the elongation and impact work gradually increased. At the isothermal quenching temperature of 250 °C, ADI has high strength, hardness and good toughness.

Key words:

isothermal quenching temperature; ADI; microstructure; mechanical properties
