

短流程等温淬火初始温度对组织及性能的影响^{*}

曲迎东, 张震, 尤俊华, 苏睿明, 李荣德

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 为了研究短流程等温淬火的初始温度对铸件组织和性能的影响, 采用消失模铸造工艺制备铸件。当铸件分别冷却到 1 173 和 1 223 K 初始温度时, 放入 50% KNO_3 + 50% NaNO_2 淬火介质进行等温处理, 然后空冷至室温。结果表明, 铸件中出现了珠光体, ADI-1223 和 ADI-1173 的硬度分别为 381 和 366 HV。当载荷为 10 N 时, ADI-1223 的摩擦系数为 0.289, 磨损体积为 $71.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$; ADI-1173 的摩擦系数为 0.273, 磨损体积为 $83.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ 。当载荷为 12 N 时, ADI-1223 的摩擦系数为 0.242, 磨损体积为 $114.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$; ADI-1173 的摩擦系数为 0.213, 磨损体积为 $136.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ 。因此, ADI-1223 的硬度高于 ADI-1173, 摩擦系数大于 ADI-1173, 磨损量小于 ADI-1173。

关键词: 短流程等温淬火; 初始温度; 组织; 性能; 珠光体; 硬度; 摩擦系数; 磨损体积

中图分类号: TG 163

文献标志码: A

文章编号: 1000-1646(2020)02-0174-05

Effect of initial temperature of short-process austempering on microstructure and properties

QU Ying-dong, ZHANG Zhen, YOU Jun-hua, SU Rui-ming, LI Rong-de

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to study the effect of initial temperature of short-process austempering on the microstructure and properties of castings, the castings were prepared using lost foam casting technology. When the castings were cooled to the initial temperature of 1 173 and 1 223 K, the quenching medium of 50% KNO_3 + 50% NaNO_2 was adopted to perform isothermal treatment, and then the castings were cooled down to room temperature in the air. The results show that the pearlite appears in the castings, and the hardness of ADI-1223 and ADI-1173 are 381 and 366 HV, respectively. When the load is 10 N, the friction coefficient of ADI-1223 is 0.289, and the wear volume of it is $71.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$; the friction coefficient of ADI-1173 is 0.273, and the wear volume of it is $83.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$. When the load is 12 N, the friction coefficient of ADI-1223 is 0.242, and the wear volume of it is $114.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$; the friction coefficient of ADI-1173 is 0.213, and the wear volume of it is $136.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$. Therefore, the hardness of ADI-1223 is higher than that of ADI-1173, the friction coefficient of ADI-1223 is greater than that of ADI-1173, whereas the wear amount of ADI-1223 is lower than that of ADI-1173.

Key words: short-process austempering; initial temperature; microstructure; property; pearlite; hardness; friction coefficient; wear volume

等温淬火球墨铸铁(简称 ADI)是将特定成分的球墨铸铁加热到共析线以上的温度保温一段

时间,然后采用等温淬火热处理得到基体组织为奥铁体(针状铁素体和富碳奥氏体)的球墨铸

收稿日期: 2018-05-30.

基金项目: 辽宁省高校创新团队项目(LT2015020).

作者简介: 曲迎东(1975-),男,辽宁沈阳人,教授,博士,主要从事高性能球墨铸铁开发等方面的研究.

^{*} 本文已于 2020-03-18 15:33 在中国知网优先数字出版. 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20200317.1658.042.html>

铁^[1]. ADI 中独特的奥铁体基体结构能够达到常规球墨铸铁所不能达到的强度和韧性^[2], 因此, 在工程领域具有广泛认可度与潜在应用. ADI 被认为是较好的车轮替代材料, 并已成功应用于铁路车轮^[3]. 近几年, 提出了“供给侧结构性改革”, 强调了“三去一降一补”五大任务, 而五大改革任务之首就是去产能, 钢铁产业则是去产能的重中之重^[4]. 尤其在当今节能减排、低碳环保的大时代背景下, 加强钢铁行业技术改造, 生产高性能优质钢铁材料是提高钢铁行业整体水平的必经之路^[5]. 因此, 国内外很多专家学者研究了工艺参数对等温淬火球墨铸铁制备以及组织性能的影响. Filho 等^[6]对比研究了两步等温淬火与单步等温淬火球墨铸铁的组织 and 力学性能, 结果表明, 通过两步等温淬火得到的球墨铸铁硬度和冲击韧性均有明显提高, 但是在实际生产中利用该方法进行大型铸件制备或批量生产会增加生产难度且操作困难. 针对此类问题, 舒信福等^[7]率先提出了短流程等温淬火工艺方案, 但在球墨铸铁中加入了 Mn、Cu、Cr 合金元素. 本文通过对非合金球墨铸铁进行短流程等温淬火处理, 研究了铸件的不同初始淬火温度对等温淬火球墨铸铁组织及性能的影响.

1 实 验

本文对两种不同短流程等温淬火工艺进行对比研究, 制备的球墨铸铁铸件为非合金球墨铸铁, 试样的化学成分如表 1 所示.

表 1 试样化学成分(w)

Tab. 1 Chemical composition of sample (w) %

C	Si	Mn	P	S
3.5 ~ 3.7	2.4 ~ 2.5	<0.1	<0.04	<0.02

利用消失模铸造技术制备铸件, 采用 TXR3000 无纸记录仪测量温度. 在消失模铸造工艺浇铸铸件的过程中, 将测温热电偶插入主浇道中, 当温度分别达到 1 323 和 1 273 K 时开箱取件, 并进行铸件表面清理. 当铸件温度冷却到 1 223 K (简称 ADI-1223) 和 1 173 K (简称 ADI-1173) 时, 将铸件直接放入 50% KNO₃ + 50% NaNO₂ 淬火介质中进行等温处理, 等温处理温度为 300 ℃, 保温时间为 1 h.

利用 OLYMPS OLS4100 3D 测量激光共聚焦显微镜对两种不同短流程等温淬火球墨铸铁的微观组织进行观察. 利用 MFT-4000 多功能材料表面性能实验仪对试样进行摩擦磨损实验, 选用

直径为 6 mm 的 Si₃N₄ 球体作为配副, 施加载荷为 10 和 12 N, 运动速度为 120 mm/min, 摩擦路径长度为 8 mm, 摩擦时间为 60 min. 采用激光共聚焦显微镜对磨损路径的宽度进行测量, 每个铸件测量三次, 取其平均值作为最终测量结果.

2 结果与分析

2.1 微观组织

将分别冷却到 1 223 和 1 173 K 进行等温淬火处理的球墨铸铁试样进行微观组织对比分析, 结果如图 1 所示.

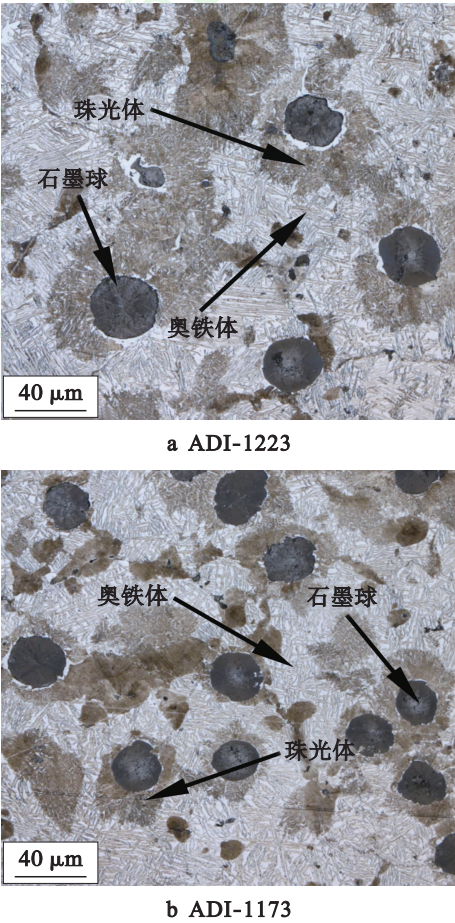


图 1 ADI-1223 和 ADI-1173 的微观组织
Fig. 1 Microstructures of ADI-1223 and ADI-1173

由图 1 可见, ADI-1223 和 ADI-1173 微观组织中含有珠光体和奥铁体(残余奥氏体 + 针状铁素体). 由于铸件为非合金球墨铸铁, 在铸件中未添加有利于提高淬透性的合金元素, 因此, 在 ADI-1223 和 ADI-1173 中出现了珠光体. 但 ADI-1223 中的珠光体相对较少, 而 ADI-1173 中的珠光体相对较多, 且 ADI-1223 中分布在石墨球周围的珠光体数量少于其在 ADI-1173 中的情况. 这是由于在石墨球周围的奥氏体中, 容易出现贫碳区

和富碳区. 在容易形成贫碳区和富碳区的地方存在结构涨落和能量涨落,一旦满足形核条件,则可在贫碳区构建铁素体,同时在紧邻的富碳区构建渗碳体,两者是同时同步进行的,从而能够形成珠光体的晶核^[8]. ADI-1223 是在 1 223 K 时淬入淬火介质进行等温处理的,在进行等温处理之前,ADI-1223 中奥氏体的碳原子溶解度高于 ADI-1173,从而减少了石墨球周围的贫碳区和富碳区,因此,ADI-1223 在石墨球周围的珠光体数量少于 ADI-1173 中的情况. 在 ADI-1223 中奥铁体中的针状铁素体比 ADI-1173 中的更加细小.

2.2 硬度

硬度对 ADI 耐磨性具有重要影响,硬度越高,耐磨性越好^[9]. 对 ADI-1223 和 ADI-1173 的硬度进行检测,结果如表 2 所示.

表 2 铸件的硬度
Tab. 2 Hardness of castings HV

铸件	维氏硬度	平均值
ADI-1223	374	381
	377	
	392	
ADI-1173	357	366
	369	
	372	

ADI-1223 的平均硬度为 381 HV, ADI-1173 的平均硬度为 366 HV, ADI-1223 的硬度相比 ADI-1173 提高了 4.1%. Balos 等^[10]研究表明,珠光体组织的硬度低于奥铁体组织,且针状铁素体越细小,硬度越高. ADI-1223 中的珠光体含量少于 ADI-1173,且 ADI-1223 中的针状铁素体更加细小,因此,ADI-1223 比 ADI-1173 的硬度高. 硬度提升对球墨铸铁的摩擦磨损性能具有重要影响.

2.3 摩擦系数

对 ADI-1223 和 ADI-1173 的摩擦系数进行了检测与对比分析,结果如表 3 所示.

表 3 不同载荷下铸件的摩擦系数
Tab. 3 Friction coefficient of castings under different loads

铸件	10 N 载荷	12 N 载荷
ADI-1223	0.289	0.242
ADI-1173	0.273	0.213

由表 3 可见,当载荷为 10 N 时,ADI-1223 的摩擦系数高于 ADI-1173,当载荷为 12 N 时,ADI-1223 的摩擦系数同样高于 ADI-1173, ADI-1223

在载荷为 10 N 时的摩擦系数高于载荷为 12 N 时的情况,ADI-1173 在载荷为 10 N 时的摩擦系数同样高于载荷为 12 N 时的情况.

在摩擦磨损实验中,石墨的润滑效果对铸件的摩擦系数具有一定影响. 文献[11]认为磨损表面上的石墨有两个来源:一个是在磨损过程中石墨球表面的石墨脱落直接进入磨损表面,对铸件起到润滑效果;另一个则是次表面的石墨球和基体组织在切向力作用下发生塑性流动,石墨渗透到磨损表面并增强润滑效果. 当铸件硬度较低时,表层组织的塑性流动程度较高,次表面的石墨易于通过表层组织的塑性流动渗透到铸件的磨损表面,从而增加石墨的润滑效果;当铸件的硬度较高时,表层组织的塑性流动程度较低,从而降低了石墨的润滑效果.

ADI-1223 的硬度比 ADI-1173 高,因此,在相同载荷下 ADI-1173 表层组织的塑性流动程度较高,次表面的石墨易于渗透到磨损表面,从而增加石墨的润滑效果. 在同一种等温淬火球墨铸铁中,当载荷从 10 N 增加到 12 N 时,摩擦系数会有所降低,这是由于随着载荷的增加,表层组织的流动程度增加,从而促使次表面的石墨渗透到磨损表面上,增强了石墨润滑效果,因而降低了等温淬火球墨铸铁在摩擦磨损过程中的摩擦系数.

2.4 磨损量

通过检测磨损轨迹的宽度来对比 ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损性能. 在摩擦磨损过程中 Si₃N₄ 球体会逐渐进入铸件基体中,从而造成铸件磨损, Si₃N₄ 球体进入铸件基体的深度越深,造成磨损轨迹的宽度越大,磨损体积越大,铸件磨损量也越大. 因此,可以通过检测磨损轨迹的宽度来计算磨损体积,从而对比两种短流程等温淬火球墨铸铁的耐磨性. ADI-1223 和 ADI-1173 在不同载荷下的磨损轨迹宽度如表 4 所示.

表 4 不同载荷下铸件的磨损轨迹宽度
Tab. 4 Width of wear track on castings under different loads μm

铸件	10 N 载荷	平均值	12 N 载荷	平均值
ADI-1223	148.1	147.5	173.3	172.5
	147.3		172.4	
	147.1		171.9	
ADI-1173	155.9	155.6	183.6	183.1
	155.6		183.1	
	155.4		182.6	

利用磨损宽度来计算不同载荷下 ADI-1223

和 ADI-1173 的磨损体积,结果如表 5 所示.

表 5 不同载荷下铸件的磨损体积

Tab. 5 Wear volume of castings under different loads

铸件	10 ⁻⁵ mm ³	
	10 N 载荷	12 N 载荷
ADI-1223	71.3	114.1
ADI-1173	83.7	136.5

由表 5 可见,在摩擦磨损实验中当载荷为 10 和 12 N 时,ADI-1223 的磨损体积均小于 ADI-1173. 在同一种等温淬火球墨铸铁中,当载荷从 10 N 增加到 12 N 时,ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损体积均有所增加,因此,在载荷为 10 和 12 N 的摩擦磨损实验中,ADI-1223 的耐磨性大于 ADI-1173. 具有珠光体组织的球墨铸铁磨损量大于具有奥铁体组织的球墨铸铁,且具有细小针状铁素体的球墨铸铁的耐磨性高于具有粗大针状铁素体的球墨铸铁^[10]. ADI-1223 中的珠光体含量明显少于 ADI-1173,且针状铁素体更加细小,因而其耐磨性较高.

对 ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损形貌进行对比. 当载荷为 10 N 时,ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损形貌如图 2 所示. 由图 2 可见,ADI-1223 的磨损表面较为平整,而 ADI-1173 的磨损表面较为粗糙,且 ADI-1223 磨损表面上的少量石墨球被表层组织覆盖,而 ADI-1173 磨损表面上的大多数石墨球被表层组织覆盖. 在摩擦磨损实验过程中,ADI-1223 和 ADI-1173 的表层组织受到 Si₃N₄ 球体的正应力和切应力作用,造成表层组织发生剥落,剥落的表层组织会进入磨损表面,在 Si₃N₄ 球体进行往复运动的过程中会在磨损表面产生犁沟. 由于 ADI-1223 的硬度高于 ADI-1173,因而产生的磨屑相对较少,减小了磨损量,从而提高了 ADI-1223 的耐磨性. 当载荷为 12 N 时,ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损形貌如图 3 所示. 由图 3 可见,ADI-1223 和 ADI-1173 的石墨球均被表层组织所覆盖,这是由于随着载荷的增大,两种等温淬火球墨铸铁表层组织的塑性流动程度均增大,从而将石墨球覆盖,且覆盖在石墨球上面的表层组织边缘出现了起皮现象. Si₃N₄ 球体进行往复运动的过程中会发生剥落并成为磨屑,在磨损表面产生犁沟,增加磨损量,同时 Si₃N₄ 球体的正应力和切应力作用也会造成磨损表面的表层组织发生剥落,同样会产生一定的磨屑并增加磨损量. 由于 ADI-1223 的硬度高于 ADI-1173,因此,ADI-1223 磨损表面上的表层组织剥落程度明显小于 ADI-

1173,减少了磨损表面上出现的磨屑,从而降低了 ADI-1223 的磨损量,因而提高了其耐磨性.

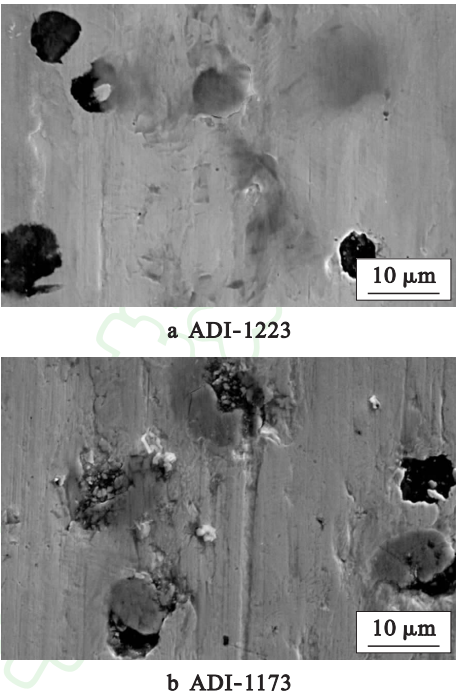


图 2 当载荷为 10 N 时 ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损形貌
Fig. 2 Wear morphologies of ADI-1223 and ADI-1173 under load of 10 N

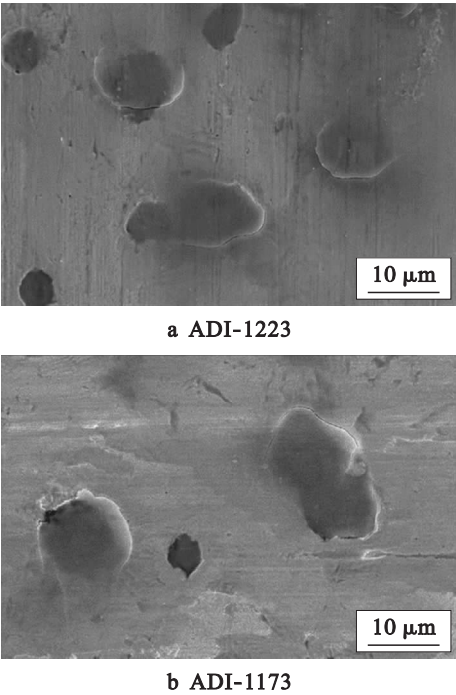


图 3 当载荷为 12 N 时 ADI-1223 和 ADI-1173 的磨损形貌
Fig. 3 Wear morphologies of ADI-1223 and ADI-1173 under load of 12 N

3 结 论

短流程等温淬火的不同初始温度对铸件的组

织、硬度、摩擦系数和磨损体积都会产生一定程度的影响,具体结论如下:

1) 在 ADI-1223 和 ADI-1173 的组织中出现了珠光体。较高的短流程等温淬火初始温度有利于碳原子在基体中的溶解以及均匀分布,从而有利于降低珠光体形核率。

2) 由于 ADI-1223 的组织中珠光体含量少于 ADI-1173,因此,ADI-1223 的硬度高于 ADI-1173,摩擦系数大于 ADI-1173,磨损体积小于 ADI-1173。

参考文献(References):

- [1] 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.
(ZHANG Xiang. Influence of composition and process on the microstructure and properties of dual phase austempered ductile iron [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.)
- [2] Sinlah A, Handayani D, Voigt R C, et al. Effects of microstructure and strength on wear performance in rough milling of austempered ductile iron [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2016, 29(1/2): 62 – 67.
- [3] Zhang J, Zhang N, Zhang M, et al. Rolling-sliding wear of austempered ductile iron with different strength grades [J]. Wear, 2014, 318(1/2): 62 – 67.
- [4] 滕永平, 吴迪, 郑阳. 供给侧结构性改革背景下辽宁省钢铁行业去产能问题研究 [J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2017, 10(2): 125 – 128.
(TENG Yong-ping, WU Di, ZHENG Yang. Research on reducing capacity of steel industry in Liaoning province under background of supply side structural reform [J]. Journal of Shenyang University of Technology (Social Science Edition), 2017, 10(2): 125 – 128.)
- [5] 杨瑞广, 张立. 钢铁行业节能降耗对全社会用电量的影响 [J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2013, 6(2): 146 – 150.
(YANG Rui-guang, ZHANG Li. Impact of energy saving and consumption reduction of iron and steel industry on total electricity consumption [J]. Journal of Shenyang University of Technology (Social Science Edition), 2013, 6(2): 146 – 150.)
- [6] Filho A W, Souza B V D, Santos C A D. Effect of heat treatments on austempered ductile iron [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(11): 1317 – 1323.
- [7] 舒信福, 廖丕博, 丁恒敏, 等. 准铸态工艺对贝氏体铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 1999(1): 15 – 19.
(SHU Xin-fu, LIAO Pi-bo, DING Heng-min, et al. The effects of quasi-casting technology on the microstructure and properties of bainitic cast iron [J]. Foundry, 1999(1): 15 – 19.)
- [8] 刘宗昌, 计云萍, 任慧平. 珠光体、贝氏体、马氏体相变的形核 [J]. 材料科学, 2013, 3(2): 193 – 208.
(LIU Zong-chang, JI Yun-ping, REN Hui-ping. Nucleation mechanism of pearlite, bainite and martensite [J]. Material Sciences, 2013, 3(2): 193 – 208.)
- [9] Zhang N, Zhang J, Lu L, et al. Wear and friction behavior of austempered ductile iron as railway wheel material [J]. Materials & Design, 2016, 89: 815 – 822.
- [10] Balos S, Rajnovic D, Dramicanin M, et al. Abrasive wear behaviour of ADI material with various retained austenite content [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2016, 29(4): 187 – 193.
- [11] 曾东方, 鲁连涛, 张继旺, 等. 等温淬火球墨铸铁的滚动接触磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 171 – 175.
(ZENG Dong-fang, LU Lian-tao, ZHANG Ji-wang, et al. Rolling contact wear property of austempered ductile iron [J]. Tribology, 2012, 32(2): 171 – 175.)
(责任编辑:尹淑英 英文审校:尹淑英)