

# 含铬等温淬火球墨铸铁组织性能研究

郭俊宝<sup>1</sup>,董晟全<sup>2</sup>,孔冰<sup>1</sup>

(1. 山西柴油机工业有限责任公司,山西 大同 037036;2. 西安工业大学,陕西 西安 710021)

**摘要:**针对含铬球墨铸铁厚壁件球化不良,等温温度对组织和性能影响不明确的问题,添加了0.2%的重稀土钇在球墨铸铁中,并设计了5种等温淬火温度用于研究等温转变温度对含铬球墨铸铁组织和性能的影响。结果表明,重稀土处理后,石墨球尺寸均一,分布均匀,常规处理后球墨铸铁中出现的大尺寸石墨球消失,钇的添加有效的解决了含铬球墨铸铁球化衰退的问题。低温等温淬火后,球墨铸铁中含有少量的马氏体,随着温度的升高,奥氏体的尺寸逐渐增加,冲击韧度逐渐升高,硬度逐渐减低。300℃等温淬火后,含铬球墨铸铁可获得最优的耐磨性。

**关键词:**球墨铸铁;重稀土;等温温度;微观组织;力学性能

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)04-0263-04

## Study on Microstructure and Properties of Austempered Ductile Iron Containing Cr

GUO Junbao<sup>1</sup>, DONG Shengquan<sup>2</sup>, KONG Bing<sup>1</sup>

(1. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037036, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of poor nodularity and microstructure and properties of thick section SG iron containing Cr, 0.2% Yttrium rare earth was added for nodulization treatment, and five different austempering temperature were selected to study the effect of austempering temperature. Results show that addition of yttrium improved nodularity and nodule count. Low austempering temperature results in a small amount of martensite. With increasing austempering temperature, elongation, impact value and strength are increased, hardness is decreased. Austempering at 300℃ can obtain optimized wear resistance.

**Key words:** austempered ductile iron; yttrium; austempering temperature; microstructure; mechanical properties

球墨铸铁凭借着流动性好、减震性好、耐磨性高、润滑性好、成本低等优点已成为耐磨材料中重要的一员<sup>[1-4]</sup>。为了进一步提高耐磨性,研究人员<sup>[5-7]</sup>经常将Cr元素加入球墨铸铁中。铬能促进球墨铸铁非平衡凝固,形成渗碳体( $M_3C$ )和奥氏体的共晶团。 $M_3C$ 是硬质相,凝固时结晶在晶界,有利于球墨铸铁的耐磨性,但也破坏了韧性和塑性。Cr元素引入后, $M_3C$ 通常以 $(Fe,Cr)_3C$ 的形式存在,铸态下相互连接呈网状。Sun<sup>[8-9]</sup>等人使用纳米氧化物处理了含铬球墨铸铁,结果表明,纳米氧化物加入球墨铸铁后,碳化物的数量降低,冲击韧度和抗拉强度明显升高。少量加入后,耐磨性有所提高。Yang<sup>[4]</sup>等人使用Ti元素调控了含碳化物等温淬火球墨铸铁的碳化物。结果发现,钛加入后,碳化物的网状结构消失,由点状和条状代替,球墨铸铁的硬度,冲击韧

度,耐磨性均有不同程度的提高。目前,对于厚壁耐磨件,含铬球墨铸铁存在球化衰退的问题,此外,基体组织的调控尚缺乏深入研究。

本文作者以含铬球墨铸铁为原材料,加入重稀土元素钇,提高球墨铸铁的球化效果,破坏碳化物网状结构。同时,调控等温淬火温度,研究等温温度对含铬球墨铸铁组织性能的影响,为含铬球墨铸铁在厚壁件的应用和推广中提供理论基础。

## 1 试验材料与方法

实验使用的球墨铸铁的化学成分 $w(\%)$ 为: 3.82 C、2.68 Si、0.49 Mn、1.15 Cr、P<0.03、S<0.02。使用20 kg中频感应炉融化铁液,升温至1510℃,加入纯铝脱氧。然后倒入底部放有球化剂和孕育剂的浇包中,静置后搅拌均匀,待温度到达1350℃时,浇入Y型铸锭中。球化剂的组成:1.5%的FeSiMg6RE2(6Mg-2RE-40%Si)+0.2%的重稀土钇。孕育剂的组成:1.2%的FeSi75(75%Si)。从Y型铸锭的底部切割出10 mm×10 mm×55 mm的试块用于组织观察和性能测试。热处理工艺为:900℃保温

收稿日期: 2021-02-12

作者简介: 郭俊宝(1985—),山西定襄人,大学本科,高级工程师。主要从事铸钢铸铁及金属材料热处理原理与工艺研究。电话: 18335213131, Email: 18335213131@163.com

100 min 后迅速淬入含有 50%  $\text{KNO}_3$ -50%  $\text{NaNO}_3$  的硝酸盐中保温 120 min 后空冷至室温。为了研究不同等温温度对含铬球墨铸铁的影响,将硝酸盐的温度分别设置为 260、300、340、380、420  $^{\circ}\text{C}$ 。

使用 Olympusbx51 型光学显微镜观察球墨铸铁的金相组织,使用 JSM-6510 型扫描电镜(SEM)观察球墨铸铁的微观组织,并用 Image-pro 软件计算球墨铸铁中石墨和碳化物的面积分数。在性能测试之前,使用金相砂纸去除热处理后试样表面的氧化皮和脱碳层,测试温度均为  $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。洛氏硬度(HRC)测量使用 HR-150A 金属洛氏硬度计,试验载荷为 150 kg。使用 150 J 能量的 JBW-300 冲击试验机测量无缺口冲击试样的冲击韧度。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 重稀土对石墨球的影响

将重稀土球化处理后的含铬球墨铸铁抛光后,使用金相显微镜观察石墨的形态,并与常规球化处理的含铬球墨铸铁对比。常规球化处理后,球墨铸铁中常出现尺寸较大的石墨球,部分石墨呈现出片状,见图 1(a)。常规稀土镁处理后,由于结晶时间长,经常会出现球化衰退的现象,因此在图 1(a)中会观察到片状的石墨。重稀土处理后,石墨球尺寸均一,分布均匀,大尺寸石墨球消失,如图 1(b)。两种含铬球墨铸铁中石墨球的面积分数均在 5%~6%。由此可见,使用重稀土钪后,有效的解决了含铬球墨铸铁

球化衰退的问题,在不减低石墨面积分数的基础上提高了球化效果。

### 2.2 重稀土对碳化物的影响

利用 4%的硝酸酒精溶液腐蚀后,观察含铬球墨铸铁中的碳化物,如图 2,白亮色为碳化物。结果发现,未使用重稀土钪处理时,碳化物的形态为连续的网状,使用重稀土处理后,碳化物的网状结构断裂,由条状和点状代替。网状的碳化物容易引起应力集中,破坏基体的连续性,导致含铬球墨铸铁冲击韧度的降低。点状和条状的碳化物既能增加球墨铸铁的耐磨性,又能有效提高韧性和塑性。使用 Image pro 软件统计了两种球墨铸铁基体中碳化物的面积分数。常规球化处理后,碳化物的面积分数为 13.5%,重稀土球化处理后,面积分数为 10.9%。重稀土处理后,碳化物面积减少,这表明一部分 Cr 元素形成了碳化物,另一部分固溶在了基体中。

使用扫描电镜观察了含铬球墨铸铁的微观组织。加入重稀土钪后,珠光体中渗碳体的数量明显减少,片间距增大。常规处理后,珠光体的片间距离约为 150~200 nm,重稀土处理后,片间距离约为 250~350 nm。重稀土元素不仅改变了凝固过程中共晶团的结晶状态,而且改变了共析转变过程中奥氏体的分解。珠光体的尺寸可能关系到奥氏体化过程后,奥氏体的尺寸。形成的奥氏体晶粒尺寸越小,等温转变获得的奥氏体越细。

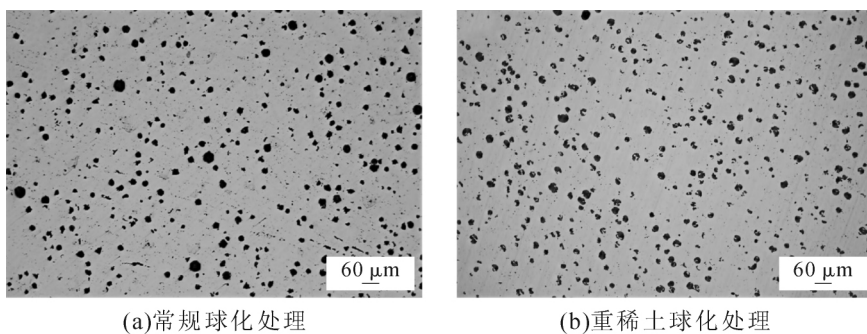


图 1 含铬球墨铸铁的金相图(未腐蚀)

Fig.1 Graphite of Ductile Iron Containing Cr (no etching)

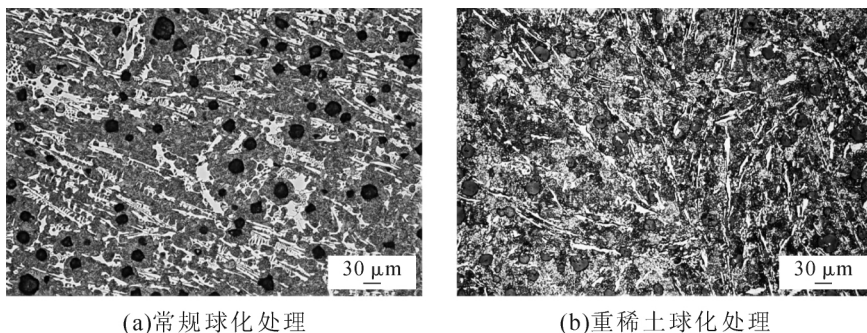


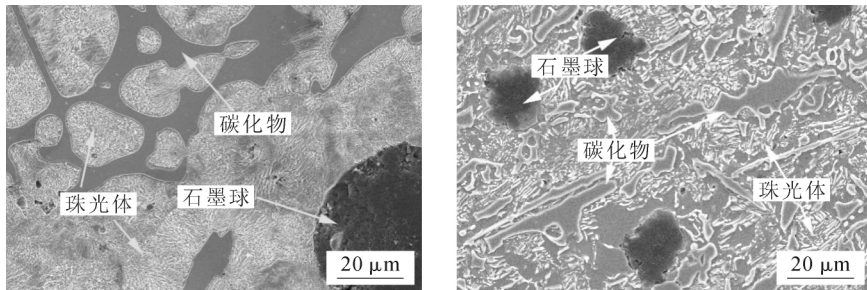
图 2 含铬球墨铸铁的金相图

Fig.2 Microstructure of Ductile Iron Containing Cr (etched)

### 2.3 等温温度对含铬球墨铸铁的影响

图4是不同等温转变温度下,含铬球墨铸铁的SEM图。图中黑色球形的组织为石墨,突出的条状组织为碳化物,其余的组织是基体。等温转变温度较低时,晶粒细小,奥铁体组织中伴有少许的马氏体,如图4(a)、4(b)。随着等温温度的升高,奥铁体逐渐粗大。根据奥氏体分解热力学,等温温度较低时,贝氏体铁素体形核驱动力大,获得的晶粒尺寸小。

同时,温度较低时,元素扩散能力较弱,贝氏体铁素体不能将更多的碳元素排出,部分奥氏体残留下来,随着温度的进一步降低,这部分残余奥氏体容易转变为马氏体,形成马氏体+贝氏体铁素体+残余奥氏体的复相组织。当等温温度升高,元素的扩散能力增加,基体中的碳元素从贝氏体铁素体转移到残余奥氏体中,形成尺寸较大的奥铁体组织(残余奥氏体+贝氏体铁素体)。

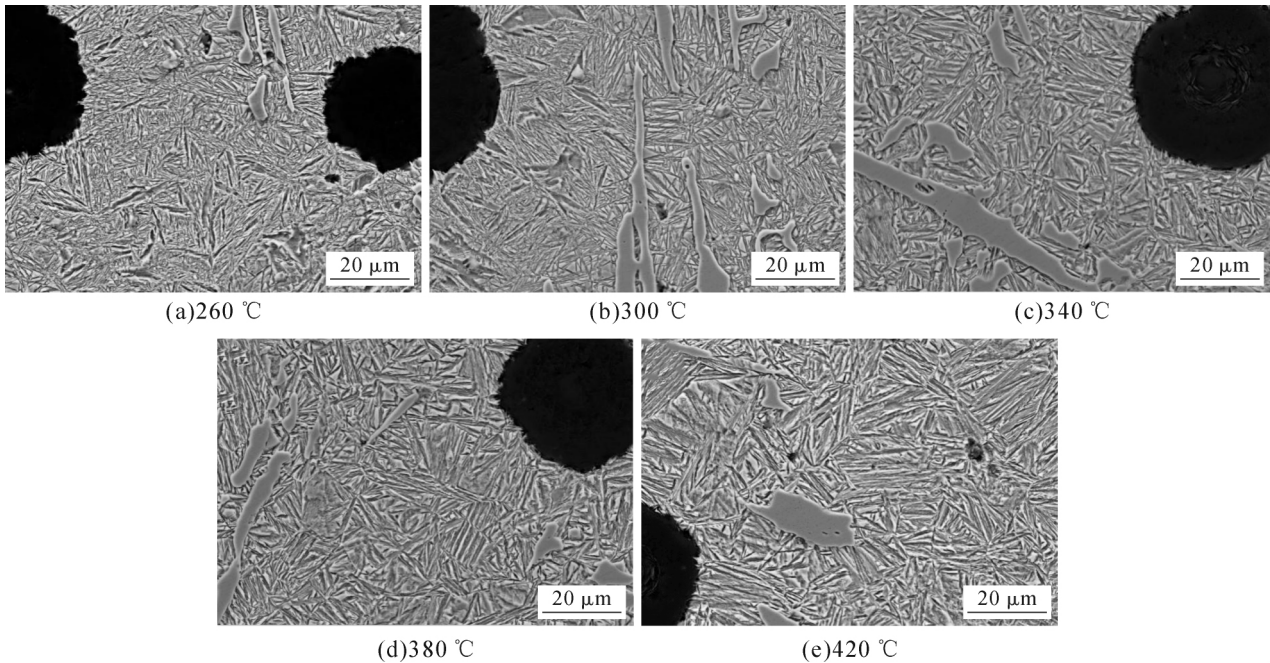


(a)常规球化处理

(b)重稀土球化处理

图3 含铬球墨铸铁的SEM图(4%硝酸酒精腐蚀)

Fig.3 SEM images of ductile Iron containing Cr (etched with 4% nital)



(a)260 °C

(b)300 °C

(c)340 °C

(d)380 °C

(e)420 °C

图4 不同等温温度处理后含铬球墨铸铁的微观组织

Fig.4 Microstructure of ADI containing Cr austempered at different temperature (etched with 4% nital)

使用摆锤式冲击试验机和洛氏硬度计测量了不同等温温度下含铬球墨铸铁的硬度和冲击韧度,并绘制变化曲线,如图5。等温温度为260 °C时,含铬球墨铸铁硬度和冲击韧度分别为54 HRC和8 J/cm<sup>2</sup>。随着等温温度的升高,冲击韧度呈现上升的趋势,硬度呈现下降的趋势。等温温度较低时,组织中含有少量的马氏体。马氏体强度硬度较高,提高了含铬球墨铸铁基体的硬度。然而马氏体韧性塑性较低,降低了基体的韧性。因此,260 °C时,洛氏硬度最低,冲击韧度最高,然而随着等温温度的升高,贝氏体铁素体尺寸增加,硬度降低,韧性升高。

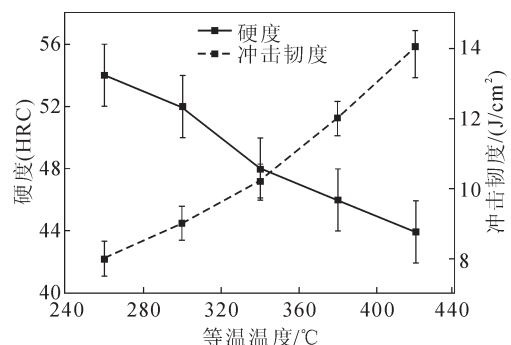


图5 等温温度对含铬球墨铸铁硬度和冲击韧度的影响

Fig.5 Effect of austempering temperature on hardness and impact value of ADI containing Cr

采用 MM-200 滑动磨损试验机测量不同等温温度下含铬球墨铸铁的耐磨性,见图 6,结果显示,随着等温温度的升高,耐磨性呈现先升高再降低的趋势。当温度较低时,虽然基体的硬度较高,但马氏体韧性低,伸长性差,遇到反复滑动磨损后,容易脱落。因此,260 °C 时,含铬球墨铸铁的较低,随着等温温度的升高,马氏体逐渐消失,奥铁体抗疲劳性能好,耐磨性有所提升。然而随着温度的进一步升高,含铬球墨铸铁硬度降低,耐磨性下降。

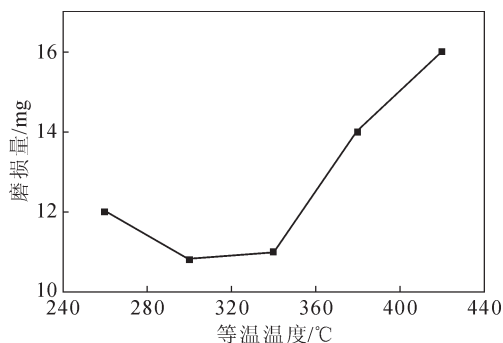


图 6 等温温度对含铬球磨铸铁耐磨性的影响

Fig.6 Effect of austempering temperature on wear resistance of grinding ball of ADI containing Cr

为了进一步研究含铬球墨铸铁的磨损机理,使用扫描电子显微镜观察了含铬球墨铸铁磨损后横截面的显微组织,如图 7。图中可以清楚的观察到变形的石墨球和奥铁体。当磨损应力施加在试样表面时,由于石墨球较软,在应力的作用下发生变形塌陷,石墨球周围的奥铁体基体向石墨球塌陷处聚集。离石墨球较远的部位,基体组织顺着摩擦力的方向变形。碳化物未观察到明显的变形现象,这表明在本实验

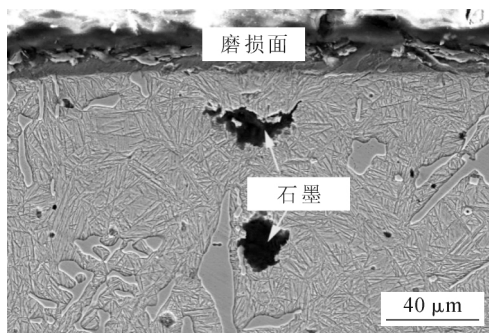


图 7 含铬球墨铸铁磨损后横截面的显微组织

Fig.7 Microstructure of cross section of grinding ball of ADI containing Cr after wear

的载荷下,较软的组织石墨球和奥铁体基体容易被磨损,而较硬的相碳化物则不容易被磨损。由此可见,铬添加后形成的碳化物可有效增加球墨铸铁的耐磨性。

### 3 结论

(1)重稀土钇添加后,有效的解决了含铬球墨铸铁球化衰退的问题,在不减低石墨面积分数的基础上提高了球化效果。

(2)随着等温温度的升高,含铬球墨铸铁冲击韧度逐渐升高,洛氏硬度逐渐下降。

(3)含铬球墨铸铁的耐磨性随等温温度的增加先升高后降低,300 °C 等温淬火后,含铬球墨铸铁的耐磨性最优。

### 参考文献:

- [1] HAYRYNEN K L, BRANDENBERG K R. Carbide austempered ductile iron (CADI) -the new wear material [J]. AFS Transactions, 2003, 111: 845-850.
- [2] LIU J H, LI G L, ZHANG H Y, et al. Study on microstructure and properties of carbide austempered ductile iron (CADI) [J]. Proceedings of 69th World Foundry Congress (WFC 2010), 2010, 2: 423-426.
- [3] 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.
- [4] YANG P H, FU H G, NAN R, et al. Effect of Ti modification on microstructures and properties of carbide austempered ductile iron [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 2335-2347.
- [5] LAINO S, SIKORA J A, DOMMARCO R C. Development of wear resistant carbide austempered ductile iron (CADI) [J]. Wear, 2008, 265(1-2): 1-7.
- [6] 张婷. 铬对 CADI 组织和性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [7] CHENG H Q, FU H G, LIN J, et al. Effect of Cr content on microstructure and mechanical properties of carbide austempered ductile iron [J]. Materials Testing, 2018, 60: 31-39.
- [8] SUN X G, WANG Y, LI D Y, et al. Modification of carbide austempered ductile iron with nano ceria for improved mechanical properties and abrasive wear resistance [J]. Wear, 2013, 301: 116-121.
- [9] SUN X G, WANG Y, LI D Y, et al. Solid particle erosion behavior of carbide austempered ductile iron modified by nanoscale ceria particles [J]. Materials and Design, 2014, 62: 367-374.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64

国外发行号:M855

国内定价:25 元/本

海外定价:25 美元/本