

离心铸造-等温淬火球墨铸铁衬套的耐磨性能

宗爱玲^{1,2} 赵剑波² 陈大鹏² 孙平¹
(1.青岛华焜耐磨钢有限公司; 2.山东交通职业学院机电系)

摘要 为提高挖掘机衬套的使用寿命,采用离心铸造结合等温淬火制备了球墨铸铁(ADI)衬套,并对 ADI 衬套进行力学性能检测、金相组织分析和耐磨性能试验。结果表明,ADI 淬火组织细密,主要由下贝氏体、球状石墨、残余奥氏体组成。在干摩擦和油润滑条件下,ADI 衬套的摩擦因数和磨损量均远低于 45 钢,可以满足挖掘机衬套的性能要求,展现出良好的应用前景。

关键词 ADI;自润滑;耐磨性;挖掘机衬套;离心铸造

中图分类号 TG249.4;TG142.33 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Wear Resistance of Centrifugal Casting Excavator Sleeves with Austempered Ductile Iron

Zong Ailing^{1,2}, Zhao Jianbo², Chen Dapeng², Sun Ping¹
(1.Qingdao Huakun Wear-resistant Steel Co., Ltd.;
2.Machinery and Electrical Department, Shandong Transport Vocational College)

Abstract: Excavator sleeves with austempered ductile iron were prepared by centrifugal casting process combined with isothermal quenching in order to improve the service life. Microstructure, mechanical properties and wear resistance of the samples were analyzed. The results indicating that the quenching microstructure of ADI is fine, composed of ultrafine needle-shaped ferrites, spheroidal graphite and residual austenite. Under dry and oil friction conditions, the friction coefficient and wear loss of ADI are far lower than that of 45 steel. ADI meets the performance requirements of excavator sleeve, showing a good application prospect in construction machinery.

Key Words: ADI, Self-lubrication, Wear Resistance, Excavator Sleeves, Centrifugal Casting

挖掘机多在露天环境中作业,服役环境恶劣。挖掘机铲斗、斗杆、动臂连接,以及履带支重轮等工作机构,设计有多个铰点,通过销轴和衬套连接承载^[1]。销轴和衬套之间相对转动,传递较大载荷,承受着横向、侧向挤压,以及较大的冲击和磨损,要求具有较高的强度、耐磨性和抗疲劳性^[2]。目前,衬套材料常选用碳素结构钢,淬火后的衬套常出现异常磨损。表层剥落的磨屑可进入摩擦副,导致润滑油被污染,加剧衬套的磨损失效^[3]。由于耐磨性较差,挖掘机衬套的使用寿命较低,常在服役 3 个月后就需维护甚至更换。因此,传统材料已经无法满足挖掘机衬套的性能要求,采用新材料新工艺制备耐磨衬套,对提高挖掘机衬套工作的使用寿命、可靠性和工作效率,以及降低其维修成本具有积极意义^[4]。

等温淬火球墨铸铁(Austempered Ductile Iron, ADI)是一种性能优异的铸铁材料,是将特定成分的球

墨铸铁进行奥氏体化,再经等温淬火以形成贝氏体和少量奥氏体,从而获得优异的强度和耐磨性、良好的韧性以及抗疲劳性能^[5]。ADI 主要应用于生产汽车、火车和军工等产品的关键零部件的生产,以取代铸钢及锻件^[4],但关于 ADI 处理挖掘机衬套的研究报道较少。因此,本课题采用离心铸造工艺,制备了球墨铸铁衬套,采用 ADI 技术处理,对衬套的金相组织、力学性能和耐磨性能进行分析讨论,旨在为其应用提供参考。

1 试验过程及方法

1.1 试验材料

图 1 为挖掘机衬套磨损情况。可以发现,衬套已经磨穿,安装孔处并未产生明显磨损,这得益于衬套的保护作用。轴在服役 1 个月产生了局部磨损,见图 1c。

球墨铸铁的化学成分见表 1。材料中加入一定量

收稿日期:2021-01-06;修改稿收到日期:2021-02-07
基金项目:潍坊市 2020 年科学技术发展计划资助项目(2020GX073)
第一作者简介:宗爱玲,女,1974 年出生,工程师,山东青岛(266404),E-mail:zongailing1974@126.com
引用格式:宗爱玲,赵剑波,陈大鹏,等. 离心铸造-等温淬火球墨铸铁衬套的耐磨性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(6):790-792.
ZONG A L, ZHAO J B, CHEN D P, et al. Wear resistance of centrifugal casting excavator sleeves with austempered ductile iron[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):790-792.



图 1 挖掘机衬套的轴、套磨损状况

Fig.1 The wear condition of the shafts and sleeves in the excavator

的 Cu,有助于提升材料的致密度,使得石墨球分布更加均匀,从而提高材料的整体力学性能。

表 1 球墨铸铁的化学成分

Tab.1 Chemical composition of austempered ductile iron %						
wt%						
C	Si	Mn	Cu	S	P	Fe
3.5	1.9	0.9	0.5	<0.04	<0.04	余量

1.2 试验方案

衬套的外径、内径和高度分别为 $\phi 95$ 、 $\phi 80$ 、70 mm,按 4 件确定铸件毛坯尺寸为 $\phi 105\text{ mm}\times\phi 70\text{ mm}\times 350\text{ mm}$,质量为 13 kg。在 500 kg 中频感应炉中熔炼,出炉温度为 1 540~1 560 $^{\circ}\text{C}$,将铁水倒入预热至 500 $^{\circ}\text{C}$ 以上的定量保温浇包中。保温浇包转入球化站,同时进行孕育和球化处理,孕育剂采用 Si-25Fe,球化剂采用稀土镁。待包内球化反应结束后,将定量浇包中的铁水浇入离心铸型内;铸型旋转速度为 1 000 r/min,浇注温度为 1 400~1 420 $^{\circ}\text{C}$ 。为了防止球化衰退,浇注过程控制在 2.5 min 以内。浇注后喷水 4~6 min。水冷后,铸型继续旋转 30 s,离心铸造机停转并自动顶出铸件。

重新加热衬套,进行奥氏体化处理,加热温度为 900 $^{\circ}\text{C}$,保温 1.5 h 后淬入 100 $^{\circ}\text{C}$ 的油中,待工件冷至 230~280 $^{\circ}\text{C}$ 时,转入 260 $^{\circ}\text{C}$ 的等温炉中,等温处理 100 min 后出炉空冷,切割后获得的衬套见图 2。分别在不同衬套上切取 6 组试样,试样尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm,通过 MCK-50MC 金相显微镜观察金相组织,采用 HR150 硬度计进行硬度测定。切取试样尺寸为 50 mm $\times$ 50 mm,采用 Rtec 磨损试验机进行摩擦磨损试验,对比试样为 45 号钢。采用球盘式摩擦副,其中上试样为 $\phi 10\text{ mm}$ 钢球,材料为 GCr15 合金钢;下试样为 ADI 试块或 45 钢。钢球在试块表面做往复直线运行,试验载荷为 30 N,滑动速度为 10 mm/s,滑动行程为 10

mm,试验测试时间为 1 800 s。在干摩擦和油润滑两种条件下进行,以模拟衬套在实际工况下的润滑状况。

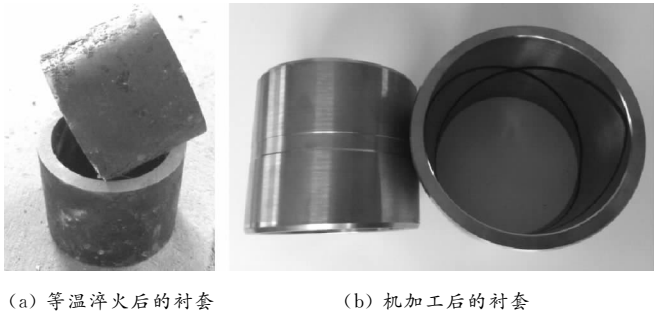


图 2 ADI 处理的衬套
Fig.2 ADI treated sleeves

2 试验结果与讨论

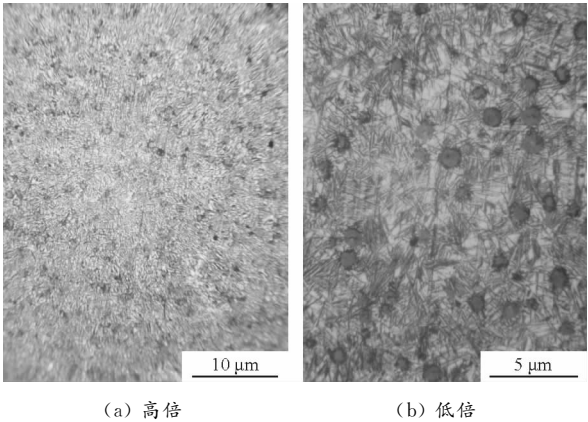
2.1 试验结果

选择 6 组试样,采用 WAV-600A 万能试验机进行力学性能测试,结果见表 2。可以看出,抗拉强度平均值为 1 099 MPa,断面收缩率平均值为 0.5%,硬度(HRC)平均值为 52.8。

表 2 ADI 试样的力学性能测量结果

Tab.2 Measurement results of mechanical properties of austempered ductile iron			
试样	抗拉强度/MPa	断面收缩率/%	硬度(HRC)
1	1 150	0.61	52
2	1 068	0.44	54
3	1 123	0.58	57
4	1 053	0.38	49
5	1 169	0.55	55
6	1 034	0.47	50

ADI 处理衬套的金相组织见图 3。结合硬度测试结果可知,ADI 组织主要由针状下贝氏体、球状石墨、残余奥氏体以及少量马氏体组成。其中,球状石墨数量较多,形状较为圆整,且大小均匀。残余奥氏体分布均匀,相互连接形成基体。



(a) 高倍 (b) 低倍

图 3 ADI 处理衬套的微观组织

Fig.3 Microstructure of ADI treated sleeve

ADI 处理试样和 45 号钢试样在干摩擦、油润滑条件下的摩擦因数见图 4。可以看出,试样在磨损初期迅速增大,与 45 号钢相比,ADI 试样的摩擦因数更为平缓。其中,45 号钢在干摩擦条件下的摩擦因数最高,为 0.58 左右;ADI 试样在油润滑下的摩擦因数最低,约为 0.12。可以发现,ADI 试样在干摩擦条件下的摩擦因数约为 45 号钢的 2/3,而在油润滑条件下,ADI 试样的摩擦因数仅为 45 钢的 1/4。

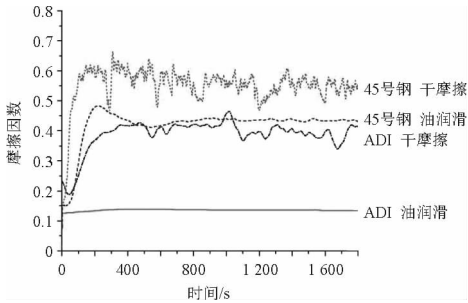


图 4 不同条件下的摩擦因数测量结果

Fig.4 Measurement results of friction coefficient under different conditions

测量各试样在磨损前后的质量,计算试样的磨损质量损失,结果见表 3。可以看出,ADI 试样在两种条件下的磨损量都远小于 45 号钢。在干摩擦条件下,ADI 的磨损率为 3.59%,磨损量约为 45 号钢的 1/6,而在油润滑条件下,ADI 的磨损率仅为 0.82%,磨损量仅为 45 钢的 1/10。由此可见,润滑条件可以降低两种工作条件的摩擦因数和磨损量,但润滑对 ADI 试样的减摩作用更加明显。

表 3 不同条件下 ADI 与 45 号钢的磨损量测量结果

Tab.3 Measurement results of mass loss under different conditions

工况条件	材质	时间/h	载荷/N	磨损前质量/mg	磨损后质量/mg	磨损率/%
干摩擦	ADI 试样	0.5	20	3 235	3 119	3.59
	45 号钢	0.5	20	3 218	2 516	21.8
油润滑	ADI 试样	0.5	20	3 223	3 141	0.82
	45 号钢	0.5	20	3 241	2 951	8.95

2.2 讨论

球墨铸铁除了含 Si、Mn 和 C 元素之外,还加入了一定量的 Cu。Cu 可以稳定奥氏体,促进贝氏体的形成,并在一定程度上细化贝氏体的针状组织^[6]。Cu 还可提高 ADI 的奥氏体化速度,降低奥氏体化时间和热处理成本^[7]。合理的铸造、球化和等温淬火工艺,可以保证 ADI 具有良好的球化率、数量较多的球状石墨。贝氏体优先在石墨球周围形成和长大,因此可提供更多的贝氏体形核位置,以形成大量均匀分布的贝氏体^[8]。而贝氏体的内应力、微裂纹、组织均匀性以及热稳定性都优于马氏体,使 ADI 具有更加优异的力学性能和耐

磨性。

摩擦磨损试验中,ADI 试样展现出了优异的抗磨和减摩性能。ADI 试样组织中大量的细针状下贝氏体,以及马氏体,提高了 ADI 试样的硬度和耐磨性^[9]。摩擦过程中的摩擦挤压,导致 ADI 试样表层的残余奥氏体转变为马氏体,从而在材料表面形成高硬度“壳”,提高了基体的耐磨性^[10]。在应力作用下,内部残余奥氏体发生塑性变形,对应力集中产生松弛作用,阻止了裂纹的产生和扩展。磨损过程中,ADI 试样中的石墨会产生剥落而脱离,并进入摩擦界面内。石墨是一种常用的固体润滑剂,这些石墨球处于游离态,在摩擦副之间起到隔离作用,减小了摩擦因数并降低了磨损量,使 ADI 表现出良好的自润滑性能。在油润滑条件下,石墨球脱落后形成的孔洞可存储润滑油,与润滑油共同发挥润滑作用,进一步提高了材料的耐磨性。

3 结论

采用离心铸造工艺制备了挖掘机球墨铸铁衬套,经 ADI 处理后组织细密,主要由针状下贝氏体、球状石墨、残余奥氏体组成。在干摩擦条件下,ADI 试样的摩擦因数约为 45 号钢的 2/3,磨损量为 45 号钢的 1/6;油润滑条件下,ADI 试样的摩擦因数仅为 45 号钢的 1/4,磨损量仅为 45 号钢的 1/10,具有优异的耐磨抗磨性能和自润滑性能,满足挖掘机衬套的性能要求。

参考文献

[1] 李峰,梁存真,覃寿同. EC450 型挖掘机动臂销孔的现场修复技术浅析[J]. 矿山机械, 2015(4):130-132.

[2] 高怀曾. 20t 挖掘机动臂斗杆连接销轴安全率提高的研究[D]. 济南:山东大学, 2014.

[3] 侯晓霞,张维友,赵岩. 热处理冷却方式对铁素体基体球墨铸铁组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(9): 2 078-2 081.

[4] 孙中林,刘浩,甘新贵. 浅析挖掘机工作装置衬套配合量设计[J]. 工程机械, 2013, 44(5): 18-20.

[5] 蒋业华,周荣,胡国忠. 控制冷却获得贝氏体/马氏体球墨铸铁的组织转变及耐磨性[J]. 铸造, 1999(3): 20-23.

[6] 侯宁,戴秋莲,骆灿彬,等. 消失模铸造制备奥-贝球铁 CBN 砂轮胎体[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 290-293.

[7] 周腊生,孟寿康,周庆德. 等温淬火工艺对球铁组织和硬度的影响[J]. 金属热处理学报, 1993(4): 53-56.

[8] 高辉武,龚文邦,黄彪,等. 等温淬火球铁滑动摩擦磨损实验研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 1 011-1 014.

[9] 周腊生,孟寿康. 等温淬火工艺对球铁组织和硬度的影响[J]. 材料热处理学报, 1993, 14(4): 51-54.

[10] 李玲芳. 奥贝低碳球铁的组织与性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2006.

(编辑:刘卫)