

农机具用等温淬火球墨铸铁耐磨件的组织和性能

程俊伟, 邵星海, 郭亚辉, 冯志明, 吕乐华, 许海铎, 张杰琼

(第一拖拉机股份有限公司质量工程中心, 河南洛阳 471004)

摘要: 根据市场对产品品质提升的需求, 自主开发了农机具用等温淬火球墨铸铁(ADI)和含碳化物等温淬火球墨铸铁(CADI)耐磨零件。本文主要阐述了这些耐磨件的组织和性能, 尤其对田间试验效果明显的两种CADI耐磨材料, 采用SEM和EDS分析了显微组织形貌与成分, 同时对比分析了高碳化物、低碳化物CADI不同基体组织的能谱成分和维氏硬度差异。试验结果表明, 农机具用等温淬火球墨铸铁的选择可以根据CADI中金属碳化物数量、冲击性能变化及不同的土壤条件而定。

关键词: 农机具; CADI; 组织; 性能

近几年, 我国农机装备制造业在国家政策支持下得到发展壮大, 尤其是农机具由小到大发展迅速。在国家农业机械十三五规划中, 明确指出要开发农机具新材料, 代替弹簧钢, 提高农机具零配件的耐磨性和使用寿命, 如犁铧、深松机铲头等零件。西北地区的砂石土壤对农机具零件耐磨性提出了更高的要求, 而具有裂浆石的土壤对零件的冲击韧性有要求, 这就要求农机具零件不仅要有更高的耐磨性, 也要有一定的冲击韧性。含碳化物等温淬火球墨铸铁(CADI)是一种新材料, 这种材料是在普通球铁中添加适量促进碳化物形成元素, 形成弥散的碳化物硬质相, 然后通过等温淬火处理, 获得优异的基体组织奥铁体, 使之具有高的耐磨性和一定的冲击韧性。

获得更多的高碳奥铁体组织和更高的淬火硬度是工艺重点, 所以我们在农机具零件上进行了尝试性试制工作。

1 等温淬火球铁ADI耐磨件的组织和性能

ADI具有高强度、高冲击韧性和优异的耐磨性。奥铁体复杂结构和富含的碳量, 使其不同于奥氏体钢中的组织而具有较高的耐磨性和良好的冲击韧性。国家标准《等温淬火球墨铸铁件(GB/T 24733—2009)》中推荐QTD HBW400、QTD HBW450两牌号ADI材料, 可用于农机具犁铧等耐磨件的材质。

一拖公司采用高纯生铁+废钢熔炼工艺和CO₂硬化的水玻璃砂造型, 小批量生产了农机具上壁厚10~20 mm的ADI犁铧尖零件, 如图1a所示。等温淬火工艺为: 奥氏体化温度900~950 °C, 保温时间60~120 min, 等温淬火温度260~300 °C, 等温时间60~120 min。经过对多个零件解剖测试, 在不同等温淬火条件下, 耐磨件本体硬度HRC 47.5~50.5, 无缺口10 mm×10 mm本体试样冲击韧度在14~36 J/cm²。对淬火前的铁素体和淬火后的奥铁体维氏硬度(50 g压力)进行了对比检测, 结果如表1所示。

从表1可以看出, 等温淬火后, 奥铁体的维氏硬度比铸态铁素体提高了近1倍, 等温淬火奥铁体硬度提高, 源于针状铁素体由大量薄铁素体片组成、其间或有更薄的富碳奥氏体分割开, 因此存在大量成为位错障碍的晶界, 使之强化; 同时针状铁素体内部存在尺寸更小的富碳奥氏体, 具有第二相强化作用。在文献[1]中也论述

作者简介:

程俊伟(1965-), 男, 高级工程师, 长期从事铸铁材料及工艺研究。
E-mail:lycjw@ytogroup.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2019)08-0848-06

收稿日期:

2019-02-14 收到初稿,
2019-03-31 收到修订稿。

了奥氏体存在于铁素体之间和铁素体内部。

低温淬火获得较多的高碳马氏体,虽然增加了铸件的硬度,但冲击韧性明显下降。提高淬火温度能够获得较粗的奥氏体,其中含较多的富碳奥氏体,增加零件的韧性。铸件热处理后没有或有较少的碳化物硬质相,对提高材料硬度、耐磨性不利。因此开发了低碳化物CADI和高碳化物CADI。

2 低碳化物等温淬火球铁CADI耐磨件的组织和性能

含碳化物等温淬火球墨铸铁(CADI)是比ADI耐磨性更好的一种材料,由于在奥氏体基体上有弥散分布的碳化物,使其基体的耐磨性增加。碳化物数量和形态决定了材料的耐磨性和冲击韧性。碳化物形态以短细条状、弥散分布最佳,而具有长板条状、网状碳化物形状的耐磨件冲击韧性差。由于加入合金的不同,形成碳化物的数量和形状也不同。铬铁价格较低,适合生产低成本耐磨件。铬是强烈稳定碳化物的元素,随着铬含量的增加,铸件中碳化物含量也会不断增加,从而使铸件的耐磨性进一步提高。铸件中碳化物增加到一定数量,铸件的收缩性增加、加工性和冲击韧性下降。

一拖公司采用高纯生铁+废钢和合成铸铁熔炼工艺两种方法,批量试制生产了犁铧尖(主要壁厚10~20 mm)和深松机铲头(主要壁厚5~35 mm)耐

磨件,试生产均在CO₂硬化的水玻璃砂型中铸造。等温淬火工艺为:奥氏体化温度900~930℃,保温时间90~120 min,等温淬火温度260~290℃,等温时间60~120 min。经过对多批次多个零件解剖测试,在不同等温淬火条件下,零件中碳化物5%~15%,硬度HRC48.0~52.5,无缺口10 mm×10 mm本体试样冲击韧性在12~18 J/cm²的耐磨铸件。深松机铲头原来由4个硼钢零件焊接而成,目前直接改成低碳化物CADI铸件,不仅减少焊接和加工工序,也降低了10%成本,显著提高了零件的耐磨性。

高纯生铁+废钢和合成铸铁熔炼工艺两种方法采用相同的化学成分、球化和孕育处理工艺,都可以保证磷含量不大于0.04%,但是合成铸铁工艺不仅降低了零件的铸造成本,而且零件的碳化物更均匀,更细小,其铸件硬度高于采用生铁+废钢的传统方法生产的同类铸件。

铸造过程中获得较多数量细小的石墨球,对提高CADI耐磨件的冲击韧性至关重要。孕育处理可以明显提高石墨球的数量和球化级别,但也会减少基体中碳化物的数量,从而降低耐磨件的硬度和耐磨性。因此必须考虑孕育处理的双重作用,兼顾石墨球和碳化物的数量,孕育剂加入量不易过多或过少。

为了进一步分析低碳化物CADI显微组织和性能,利用扫描电镜和能谱分析进行了深入研究。该零件为农机具上犁铧尖,壁厚10~20 mm,化学成分(质量分数):3.70% C、2.5% Si、0.48% Mn、0.009% S、



(a) 犁铧尖



(b) 深松机铲头

图1 零件外形图

Fig. 1 Cast parts for agricultural machinery

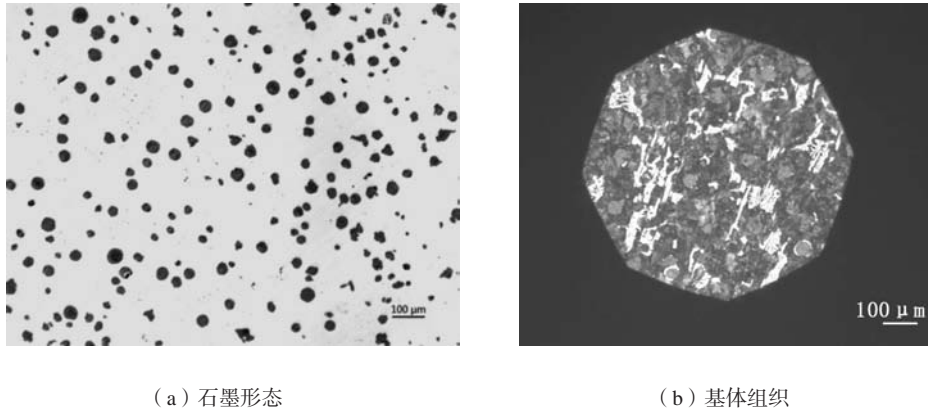
表1 ADI零件本体组织和性能
Table 1 Microstructure and properties of ADI parts

试样	铸态铁素体硬度HV	淬火后奥氏体硬度HV	本体硬度HRC	冲击韧性/(J·cm ⁻²)
1	227	524	47.5	36
2	222	525	47.5	20
3	241	515	47.5	26
4	238	574	50.0	18
5	227	533	50.5	16
6	233	510	50.5	14

0.032% P、0.62% Cr，硅铁和钒硅铁复合孕育处理，其金相组织如图2。零件本体碳化物10%左右，硬度HRC51.5，平均冲击韧度14 J/cm²。图3、图4为低碳化物CADI中碳化物、奥铁体扫描电镜和微区能谱分析结果。

从CADI碳化物的能谱分析图上可以看出，碳化

物由Cr、Mn、V形成。钒含量较低是由于没有直接加入，仅由回炉料带入。奥铁体除了Fe、Si之外还有C和少量合金存在，这也进一步说明了富碳奥氏体不仅存在于针状铁素体之间，还有微小的富碳奥氏体存在于针状铁素体内部，从而提高了基体的强度和硬度。表2检测了一组铬合金强化CADI零件的组织 and 性能，尤其

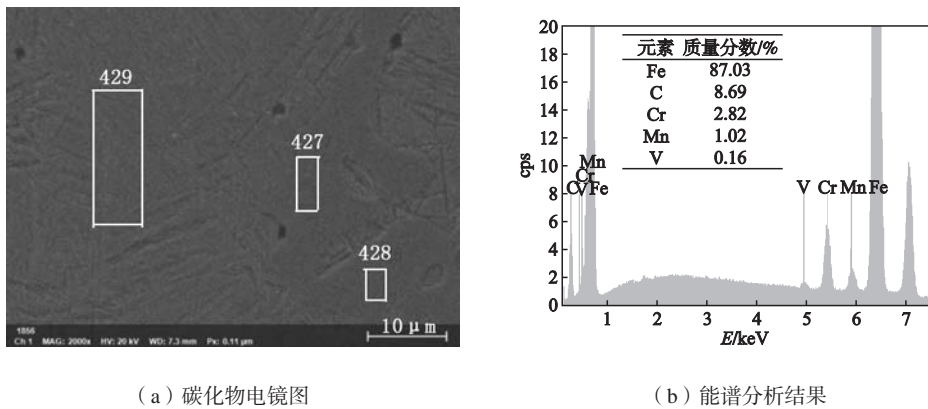


(a) 石墨形态

(b) 基体组织

图2 低碳化物CADI石墨形态和基体组织

Fig. 2 Morphology and matrix structure of low carbide CADI graphite

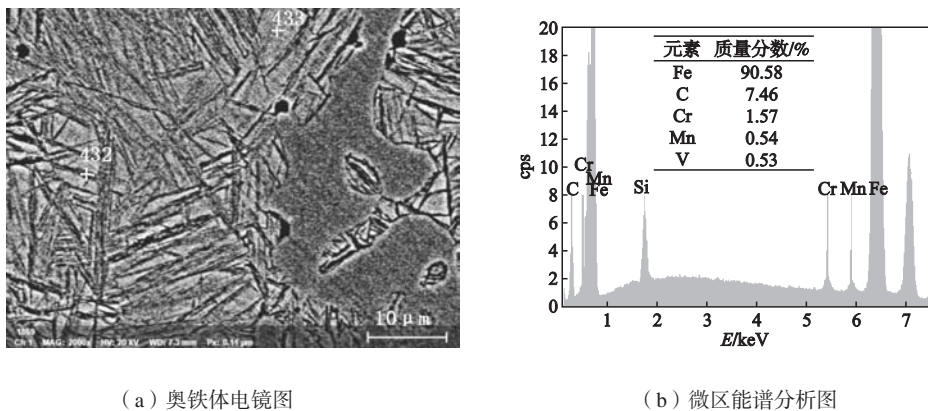


(a) 碳化物电镜图

(b) 能谱分析结果

图3 低碳化物CADI中碳化物的电镜和能谱分析图

Fig. 3 SEM and EDS analysis of carbide in low carbide CADI



(a) 奥铁体电镜图

(b) 微区能谱分析图

图4 低碳化物CADI奥铁体电镜和微区能谱分析图

Fig. 4 SEM and EDS analysis of ausferrite in low carbide CADI

在50 g压力下检测了碳化物和奥氏体的维氏硬度。碳化物维氏硬度之所以没有理论上铬碳化物高，主要是因为球铁中有大量石墨空隙影响了碳化物的检测精度。因为随着检测压力的增加如500 g，检测到维氏硬度会更低。但这些碳化物给零件增加了耐磨性，较少的合金产生相对较低的金属碳化物，但却改善了CADI零件的冲击韧度和加工性，田间试验也证明了这一点。CADI零件在使用初期，由于基体中奥氏体的存在，磨损量相对较大，随着冲击强化作用，奥氏体会形成位错结构而强化^[2]，使零件在同样的单位时间内磨损量明显下降。

3 高碳化物等温淬火球铁CADI耐磨件的组织和性能

含碳化物等温淬火球墨铸铁（CADI）材料中具有被美国人称为纳米复杂结构的针状铁素体和富碳奥氏体组成的奥氏体，以及弥散分布着大量维氏硬度极高的碳化物，耐磨性优于一些同样硬度，又不具有碳化物组织的马氏体或奥氏体钢，同时也具有一定耐冲击性能。低碳化物CADI适合裂浆石土壤，高碳化物CADI更适合砂土作业环境。

采用多元合金铬、钼、钒、镍等生产的农机具CADI耐磨件，虽然成本相对较高，但碳化物含量高，碳化物形态细小均匀。不同合金搭配在一起，有利于发挥不同合金的特点，克服一些合金的不良影响，最终获得碳化物弥散分布的基体组织和良好的石墨形态，保证了耐磨件具有一定的冲击韧性。

一拖公司采用高纯生铁+废钢工艺和合金铸铁熔炼工艺两种方法，批量生产了犁铧尖铸件，试生产均在CO₂硬化的水玻璃砂型中铸造。等温淬火工艺为：奥氏体化温度900~930℃，保温90~120 min，等温淬火温度260~280℃，等温时间90~120 min。经过多批次多零件本体检测：在不同等温淬火条件下，零件中碳化物15%~30%，硬度HRC 50~55，无缺口10 mm ×

10 mm本体试样冲击韧度在6.0~11.0 J/cm²。

高纯生铁+废钢和合成铸铁熔炼工艺两种方法，采用相同的化学成分、球化、孕育工艺，但合成铸铁方法成本低，零件中碳化物均匀分布，偏析减少，硬度有一定数量的提高，加工难度变大。

CADI铸造过程中的孕育处理必须恰当，强化孕育处理，提高了冲击韧性，也会降低基体中碳化物数量，这就需要更多的合金来保证碳化物数量，无疑增加了CADI的生产成本。CADI关键在于通过加入形成碳化物的合金，在基体中获得较多弥散分布的金属碳化物，避免碳化物偏析和形状不良，同时获得较多数量的富碳奥氏体，增加其耐磨性；其次选择较高的淬火温度，消除或减少淬火后马氏体数量，因为高碳马氏体虽然提高了CADI硬度，却降低了高碳化物等温淬火球铁CADI的耐磨性和冲击韧性。

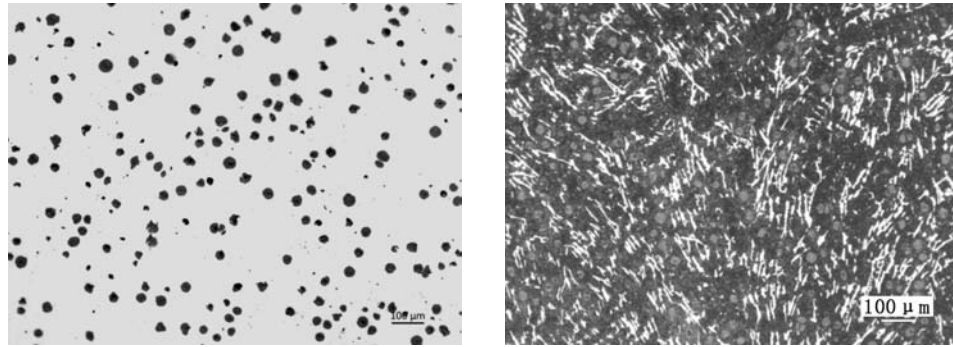
为了进一步分析高碳化物CADI显微组织和性能，利用扫描电镜和能谱分析进行了深入研究。该零件为农机具上犁铧尖，壁厚10~20 mm，化学成分：3.76%C、2.51%Si、0.48%Mn、0.009%S、0.032%P、0.61%Cr、0.51%V、0.36%N、0.42%Mo，硅铁和钼硅铁复合孕育处理，其碳化物在20%左右，其金相组织如图5所示。零件平均硬度HRC53.5，冲击韧度7 J/cm²。图6、图7为高碳化物CADI中碳化物、奥氏体扫描电镜和微区能谱分析结果。

表3为高碳化物CADI零件本体组织和性能。铬、钒、钼等的金属碳化物理论上有很高的维氏硬度，这里之所以相对较低，是由于更细小的碳化物形状和大量石墨空隙的存在，影响了其维氏硬度的检测精度。

不同碳化物等温淬火球铁CADI作为整体耐磨材料，耐磨性远优于未进行表面强化的马氏体钢，但并不适合壁厚5 mm以下的零件。因为壁厚很薄的零件冷却速度极快，铸造过程中难以控制碳化物数量在合适的水平。很多形态不好的碳化物，会严重影响零件的耐冲击性能。

表2 低碳化物CADI零件本体组织和性能
Table 2 Microstructure and properties of low carbide CADI parts

试样	碳化物硬度HV	基体奥氏体硬度HV	本体硬度HRC	冲击韧度/(J·cm ⁻²)
1	1 086	553	51.5	12
2	1 168	524	50.5	14
3	1 053	516	51.5	16
4	1 108	533		
5	1 081	543		
6	977	553		

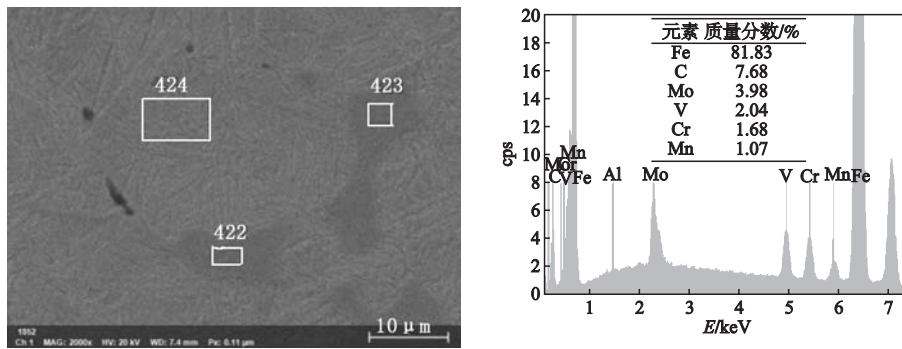


(a) 石墨形态

(b) 基体组织

图5 高碳化物CADI石墨形态和基体组织(碳化物20%)

Fig. 5 Morphology and matrix structure of high carbide CADI graphite (carbide 20%)

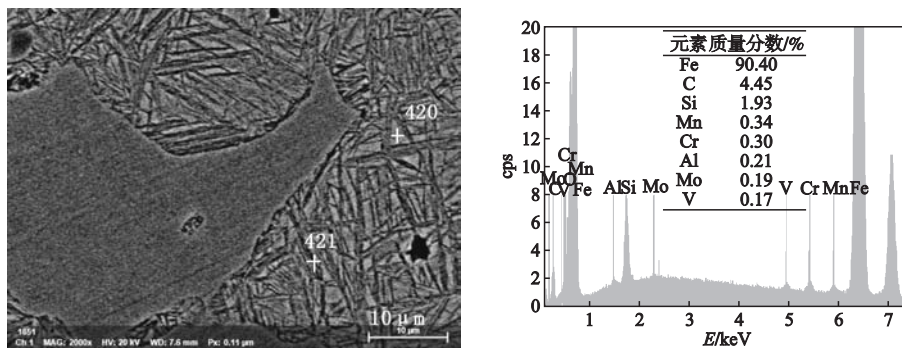


(a) 碳化物电镜图

(b) 能谱分析图

图6 高碳化物CADI中的碳化物电镜和能谱分析图

Fig. 6 SEM and EDS analysis of carbide in high carbide CADI



(a) 奥铁体的电镜图

(b) 能谱分析图

图7 高碳化物CADI奥铁体的电镜和能谱分析图

Fig. 7 SEM and EDS analysis of susferrite in high carbide CADI

表3 高碳化物CADI零件本体组织和性能
Table 3 Microstructure and properties of high carbide CADI parts

试样	碳化物硬度 HV	基体奥铁体硬度 HV	本体硬度 HRC	冲击韧度/($J \cdot cm^{-2}$)
1	1 027	576	53.0	7
2	1 011	526	54.5	7
3	976	561	53.0	6
4	927	547		
5	953	537		

4 结论

(1) 作为整体耐磨材料, 低碳化物CADI的耐磨性优于ADI, 高碳化物CADI的耐磨性优于低碳化物CADI, 但高碳化物CADI的冲击韧性相对较低。

(2) 多元合金强化的高碳化物CADI与铬强化低碳化物CADI相比, 基体维氏硬度相差无几, 但碳化物更细小, 弥散分布更均匀, 因而具有更高的洛氏硬度。CADI随着硬度升高, 其冲击韧度会降低。

(3) 根据材料的组织和性能的不同, 可选择高碳化物CADI农机具零件用于砂石土壤, 而低碳化物CADI零件因耐冲击性能较好, 更适合用于裂浆石土壤。

参考文献:

- [1] 刘金城. 等温淬火球铁的微观组织与力学性能 [J]. 铸造技术, 2006 (12): 52.
- [2] 曾艺成, 李克锐, 张忠仇, 等. 等温淬火球铁研发工作的进展与发展趋势 [J]. 铸造, 2017 (9): 940-917.

Microstructure and Properties of Austempered Ductile Iron Wear Resistant Parts for Agricultural Machinery

CHENG Jun-wei, SHAO Xing-hai, GUO Ya-hui, FENG Zhi-ming, LÜ Le-hua, XU Hai-duo, ZHANG Jie-qiong
(Quality Engineering Center of First Tractor Company Limited, Luoyang 471004, Henan, China)

Abstract:

According to the demand of market quality improvement, ADI and CADI wear-resistant parts for agricultural machinery and tools were developed. This paper mainly expounds the microstructure and properties of these wear-resistant parts, especially for two kinds of CADI wear-resistant materials with obvious field test effect, SEM and energy spectrum microanalysis were carried out. At the same time, the differences of energy spectrum composition and Vickers hardness of matrix structures between high and low carbide CADI were compared and analyzed. The results show that selection of austempered ductile iron wear-resistant materials for agricultural machinery and tools should be conducted according to the changes of the amount of metal carbides and impact properties in CADI as well as different soil types.

Key words:

agricultural machinery and tools; CADI; microstructure ; properties
