DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.003

铸造高锰钢平衡块断裂机理及改善分析

李子阳[1],朱伟恒[2]
(1. 美的集团机电事业部研发中心,广东 佛山 528333;2. 华南理工大学 材料科学与工程学院,广东 广州 510641)

摘　要:从组织、成分、硬度及断口形貌研究了铸造高锰钢平衡块断裂失效原因和机理,并对高锰钢平衡块质量提高的方向进行了探讨。结果表明,开裂平衡块材料的化学成分和表面硬度正常,心部硬度异常偏大且金相组织粗大,失效形式为韧性和脆性混合断裂机制,且断口处存在明显组织疏松和富锰组织偏析。降低冷却速度和有害氧化物含量,平衡块无铆接开裂现象。

关键词:高锰钢;平衡块;铸造缺陷;失效分析

中图分类号:TG115　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)01-0008-04

Analysis of Fracture Mechanism and Improvement of Cast High-manganese Steel Balance

LI Ziyang[1], ZHU Weiheng[2]
(1. R & D Center, Electromechanical Division of Midea Group, Foshan 528333, China; 2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The fracture failure causes and mechanisms of high manganese steel balance blocks casting were studied by analyzing the microstructure, composition, hardness and fracture morphology, and improve the quality of high manganese steel counterweight direction are discussed in this paper. The results show that the chemical composition and surface hardness of the cracked balance block are normal, the core hardness is abnormally large and the microstructure is coarse, the failure form is the mixed fracture mechanism of toughness and brittleness, and obvious shrinkage loose and manganese rich microstructure segregation are observed in the fracture surface. Reduce the cooling rate and harmful oxide content, no riveting cracking of the balance block

Key words: high manganese steel; balance; casting defects; failure analysis

高锰钢作为一种高碳高锰合金材料,具有良好的强度和塑性,高锰钢在受到冲击或接触应力后,表面可以迅速硬化,而心部组织仍保持良好韧性[1],高锰钢还可通过水韧处理在常温时获得无磁单相奥氏体组织,因而在机械、电机等领域得到广泛应用[2]。

空调旋转式压缩机工作过程中,需要在电机转子两端安装平衡块,来维持压缩机运转的动平衡。无磁高锰钢材料满足压缩机平衡块力学性能和电磁特性要求,并且成本相对较低,所以成为行业内普遍选用的材料[3]。在某批次电机转子生产过程中,铸造高锰钢平衡块在铆接后出现批量不良断裂,如图1所示。本文对平衡块的化学成分、硬度、显微组织和断口形貌进行分析,确认平衡块的断裂原因和机理,分析了改善措施和初步效果验证,以期为铸造高锰钢平衡块的设计和质量提高提供借鉴。

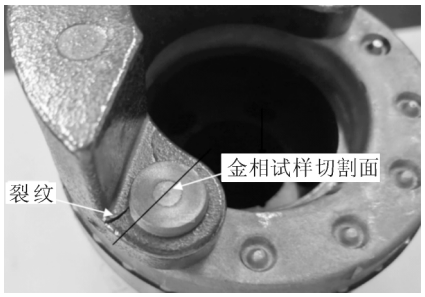


图1 断裂平衡块
Fig.1 Fractured balance block

1 试验分析与讨论

1.1 化学成分分析

采用光谱仪对开裂平衡块材料进行化学成分分析,材料化学成分试样的检测结果如表1所示。

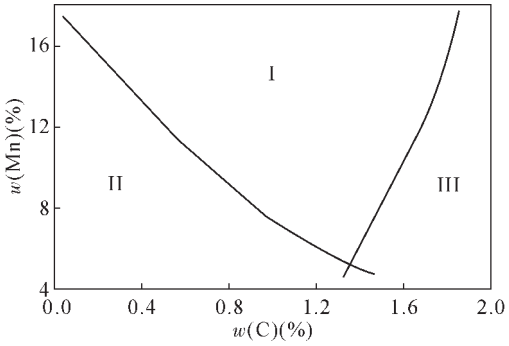
表1 化学元素测试结果 w(%)
Tab.1 Chemical composition test results

检测元素	C	Si	Mn	P	S
标准要求	0.5~1.0	≤0.9	13.0~16.0	≤0.08	≤0.09
断裂样品	0.63	0.28	14.20	0.003	0.007

收稿日期:2020-04-19
作者简介:李子阳(1989-),江西上饶人,硕士,工程师.主要从事金属材料分析与应用方面的工作.
电话:13798018109,E-mail:liziyang365@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据化学成分检测结果，开裂平衡块材料的合金元素含量均符合材料标准，属于 Mn14 钢。图 2 为 Mn、C 含量对高锰钢组织的影响，可以看出，实测材料 Mn、C 含量满足 Ⅰ 区成分要求，为单一的奥氏体组织。当 C 含量降低进入 Ⅱ 区，可能会出现马氏体组织，会使钢种韧性下降而变脆。当 C 含量升高进入Ⅲ区时，固溶处理后的铸态碳化物不能全部消除，会使钢种变脆[4]。



Ⅰ－奥氏体；Ⅱ－奥氏体+马氏体；Ⅲ－奥氏体+碳化物

图 2　Mn、C 含量对高锰钢组织的影响

Fig.2　Effect of Mn and C contents on microstructure of high manganese steel

1.2　硬度检测分析

对开裂品和未开裂平衡块进行硬度对比测试，材料表面硬度检测采用洛氏硬度测试，测试位置为断裂平衡块样品安装孔边缘表面。

表2 表面硬度测试结果

Tab.2 Surface hardness of test results

样品	洛氏硬度(HRB)				
开裂品	83.5	81.0	84.5	82.0	81.0
正常品	84	82	83	79.5	83

从表面硬度测试结果可见，开裂品和正常品安装孔表面硬度差异不大，满足标准规格 HRB 大于 70 的要求，说明材料表层组织性能正常。此外，对安装孔切面镶嵌样品，经过砂纸打磨和抛光后测试心部的硬度值。

由于取样截面积较小，截面硬度组织硬度采用维氏硬度检测，维氏硬度值可以通过查表转换为洛氏硬度。测试结果表明，开裂品和正常品截面硬度值差异较大，正常品平均硬度值为 HV 202.8，转换为洛氏硬度 HRB 93 左右，与表面硬度值测试较接近，而开裂品心部维氏硬度均值达到 HV 343.2，超过 HRB 转换范围，相当于 HRC 36 左右，远高于正常硬度值，说明心部组织存在异常。硬度越高，材料脆性倾向越大，受应力作用下断裂可能性越高。

表 3 截面硬度测试结果

Tab.3 Section hardness test results

样品	维氏硬度(HV)				
开裂品	338.9	340.9	364.1	355.3	317.0
正常品	197.7	204.9	195.9	211.1	204.5

1.3　组织分析

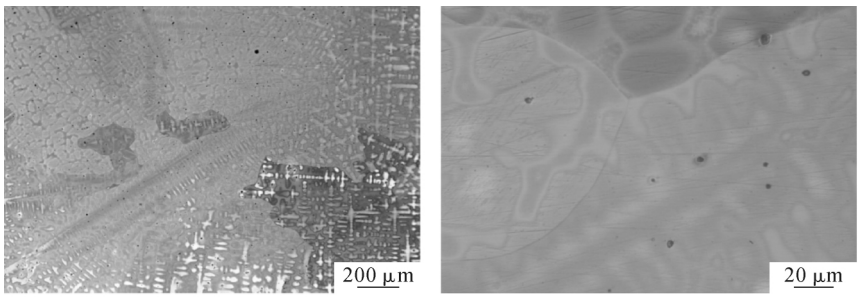
对平衡块两侧铆接孔部位分别切取金相试样，并进行组织分析，取样位置如图 1 所示。金相观察磨面侵蚀剂采用苦味酸+盐酸+乙醇溶液，以便对晶粒大小进行判定，金相组织如图 3 所示。

从金相组织可以看出，材料组织均为奥氏体，组织中存在明显的柱状树枝晶，材料组织粗大，对比奥氏体晶粒度评级标准，其晶粒度等级约为 0~1 级。从平衡块结构上分析，铆接孔位置属于深孔薄壁，铸造过程中冷却速度相对较快，而且高锰钢的导热系数小，铸件在冷却或加热过程中铸件的不同部位之间的冷却速度相差较大。因此，高锰钢组织容易形成粗晶粒及树枝晶[5]。

1.4　断口分析

采用扫描电镜对平衡块的断口进行形貌观察和分析，并且通过 EDS 能谱研究不同断裂区域材料的化学成分差异。

图 4 为断口 SEM 微观形貌，可以看出，断口的中心区域存在明显的疏松区，并且疏松区域的尺寸超过了 0.5 mm，如图 4(a)所示。高锰钢体收缩较大，补缩不够很容易造成缩松缩孔缺陷[6]。此外，从图 4(b)中可以看出，断口上存在亮区和暗区，其中亮区呈孤岛状，而暗区则相对比较连续，断口上亮区主要为韧窝，如图 4(c)所示，属于正常的韧性断裂断口，

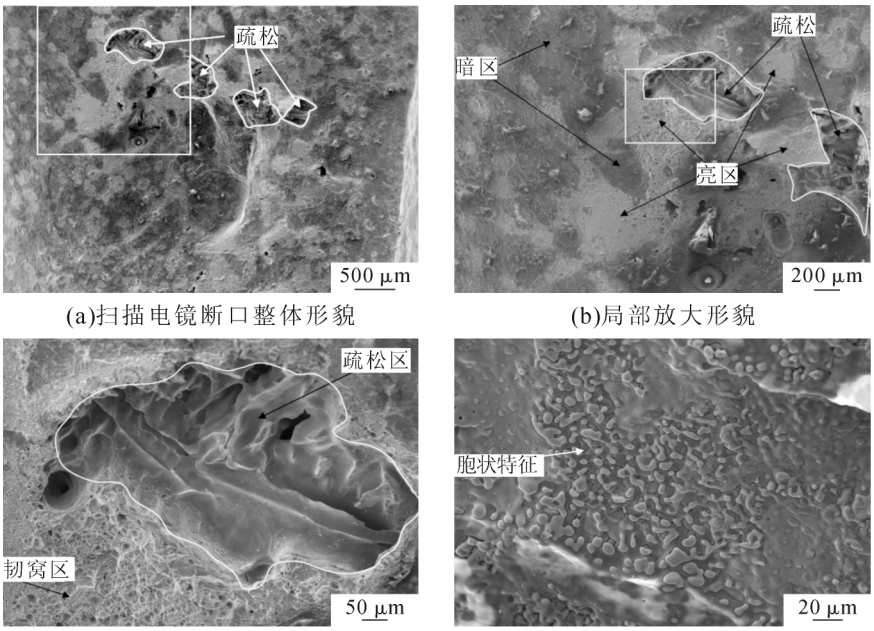


(a)低倍　　(b)高倍

图 3　不同放大倍数金相组织形貌

Fig.3　Microstructure of the sample at different magnifications

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)扫描电镜断口整体形貌　(b)局部放大形貌

(c)亮区放大形貌　(d)暗区放大形貌

图 4 断口的扫描电镜图像

Fig.4 SEM images of the fracture

是在铆接受力过程中正常组织拉伸产生的断口形貌;暗区则存在胞状特征,属于铸造微裂纹特征,是在铸造的冷却过程中形成的。断口上暗区所占的面积越大,材料的脆性倾向也越大。平衡块在受外力作用下,首先在疏松区域产生应力集中,当应力超过材料极限,裂纹开始扩展,微裂纹经过亮区时扩展受阻,消耗大量塑性变形功而形成韧窝,扩展至暗区即脆性区域则快速撕裂,形成图 4(d)所示的胞状结构。

图 5 为亮区和暗区的 EDS 能谱分析结果,由能谱图可以看出,平衡块断口中亮区成分与平衡块材料正常成分基本相符,属于正常组织,而暗区中锰元素含量明显较高,而且氧元素含量也高。能谱亮区和暗区的成分差异表明断口上暗区属于富锰偏析区,即硬度异常高的区域。此外,暗区的氧元素含量也比亮区高,表明暗区可能在退火热处理中受到氧化,或者是铸造过程中脱氧不充分,导致活跃元素 Mn 与 O 发生反应,生成 MnO 或者其他氧化夹杂物。由于高锰钢钢液非常容易氧化,形成大量的 MnO 夹杂[7],一般偏聚于晶界上,会导致高锰钢铸件热裂,韧性降低。即使没有产生热裂,偏聚在晶界的夹杂也会降低性能,可能成为裂纹起源。

2 质量提高措施及分析

综合以上理化分析结果,平衡块内部裂纹的形成主要与组织疏松和枝晶粗大偏析相关。铸造疏松缺陷通常是由于铸造温度偏低,金属流动性差,金属凝固过程中内部收缩得不到金属液的填充而形成内部的孔洞。枝晶偏析是因为铸件冷却速度较快,其中高熔点成分的区域先凝固,富锰区为低熔点区域,属于后凝固区域,也是材料的薄弱区域。如果冷却速度进一步加快,一方面成分均匀化不足,另一方面铸造内应力增大,容易导致在富锰区形成分离的状态,从而形成断口上的胞状特征,该特征与材料的枝晶偏析区的形貌特征相符。结合铸造高锰钢实际制造工艺,建议改善措施主要从两方面着手:

(1)降低铸造冷却速度　浇铸后采用盖桶保温,使浇铸后的钢液缓慢冷却,改善骤冷产生的疏松及冷隔裂纹,禁止采用二次浇铸或冲水强冷。

(2)降低有害氧化物产生　增加 Si 脱氧剂元素的添加量,并采用一次脱氧作业改为两次脱氧作业,使 Si 元素均匀溶解在钢液中,降低钢液中氧含量,进一步降低 MnO 等有害氧化物的产生。

经过对工艺和成分改善后,高锰钢平衡块铆接开裂不良情况得到了有效控制。后续针对平衡块的改进还需从设计出发,铆接孔等受力区域尽量避免薄壁、深孔等结构,结合铸造工艺的不断优化改进,才能更有效的防止铸件开裂。

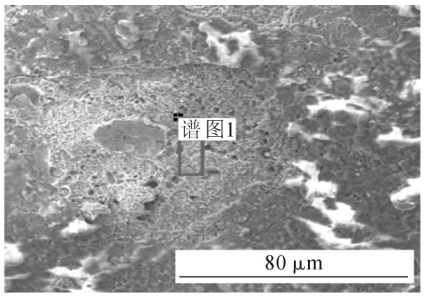
3 结论

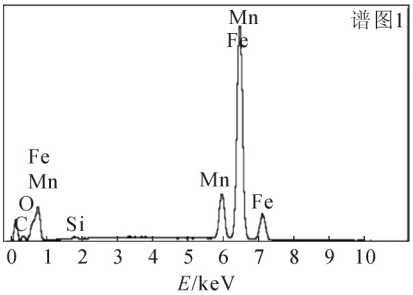
(1)平衡块断裂为韧性断裂和脆性断裂混合断裂机制,断口呈现正常韧窝状和胞状脆断形貌。

(2)平衡块内部组织存在明显的疏松和铸造偏析缺陷,这是导致开裂的主要原因。同时,组织中存在的夹杂和氧化物加剧裂纹的扩展。

(3)通过调整铸造工艺,降低铸造冷却速度,增

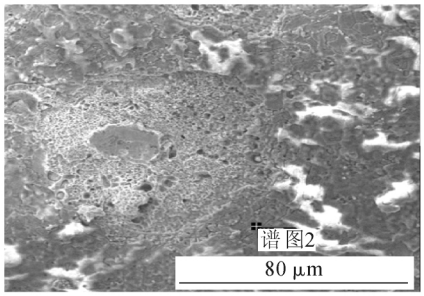
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

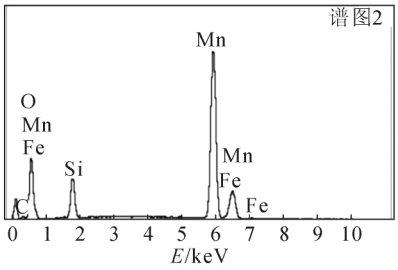




元素	重量百分比	原子百分比
C	5.82	20.74
O	3.54	9.46
Si	0.28	0.42
Mn	14.08	10.96
Fe	76.28	58.42
总量	100.00	

(a)断口亮区能谱分析





元素	重量百分比	原子百分比
C	4.12	11.20
O	19.56	39.94
Si	6.22	7.24
Mn	65.69	39.05
Fe	4.40	2.58
总量	10.00	

(b)断口暗区能谱分析

图 5 断口能谱分析

Fig.5 EDS analysis results of fracture

加脱氧量，可以减少有害物质产生，提高组织均匀性，从而有效降低高锰钢平衡块的铸造缺陷。

参考文献：

[1] 张军强，张文斌，王红旗. 高锰钢铸件裂纹产生的原因及预防措施[J]. 铸造技术，2006, 27(4): 310-313.

[2] 干勇，田志凌，董瀚，等. 钢铁材料手册(下)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[3] 柯美元，陈学锋. 高锰钢平衡块的熔模铸造工艺 [J]. 热加工工艺，2015, 44(11): 310-315.

[4] 邵飞杰. 高锰钢热处理工艺及其冲击磨料磨损研究[D]. 长沙：湖南大学, 2014: 3-4.

[5] 傅排先，张文宁，厚大高锰钢铸件微裂纹形成机理研究[J]. 铸造, 2007, 56(04):409-411.

[6] 袁军平. 高锰钢圆锥失效实例分析 [J]. 铸造技术，2016, 37(12): 2610-2614.

[7] 范勇斐，张恒. 热轧高锰钢晶间氧化的研究[J]. 热处理，2017, 32(3): 32-35.

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

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net