● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.017

# 500 kV 瓷柱式断路器开关传动机构拐臂断裂原因分析

张鸿武[1],冯楠楠[2],刘 蕊[1],陈 阳[1]

(1. 山东电力工业锅炉压力容器检验中心有限公司,山东 济南 250003; 2. 济南经纬电力工程咨询有限公司,山东 济南 250021)

**摘 要**:某换流站交流滤波器场 500 kV 瓷柱式断路器开关传动机构拐臂发生了断裂。通过对拐臂断裂部位进行宏观和微观形貌及能谱分析、并对拐臂进行了拉伸力学性能和布氏硬度检测,分析了断裂原因。结果表明,断裂原因是原生铁纯度低,杂质元素含量高,铸造工艺不良,存在大量铸造缺陷,且力学性能较差,不能满足长期运行的要求。为避免同类事故,建议加强监督,严把设备质量关。

**关键词**:换流站;传动机构拐臂;杂质元素含量高;铸造工艺不良;断裂;金属监督

**中图分类号**:TG111.91 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)10-0969-05

## Analysis on the Breaking Reason of Crank Arm of Switching Transmission Mechanism of 500 kV Porcelain Circuit Breaker

ZHANG Hongwu[1], FENG Nannan[2], LIU Rui[1], CHEN Yang[1]

(1.Shandong Electric Power Industry Boiler and Pressure Vessel Inspection Center Co., Ltd., Jinan 250003, China; 2. Jinan Jingwei Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Jinan 250021, China )

**Abstract**: The arm of the switching mechanism of 500 kV porcelain column circuit breaker in the AC filter field of a converter station was broken. The fracture reasons were analyzed by the macroscopic and microscopic morphology and energy spectrum analysis and the tensile mechanical properties and Brinell hardness test of the arm. The results show that the fracture is caused by low purity of raw pig iron, high content of impurity elements, poor casting process, large number of casting defects, and poor mechanical properties, which could not meet the requirements of long-term operation. In order to avoid similar accidents, it is suggested to strengthen supervision and strictly control the quality of equipment.

**Key words**: converter station; transmission mechanism crank arm; high content of impurity elements;poor casting process; fracture; metal supervision

近年来,随着电力建设的发展,电网铸件的用量日益增加,由于铸件结构相对简单,易于制造,生产厂家进入门槛低,且往往将其作为一种简易的电器进行粗放型生产,对产品的质量控制不够重视,在电网铸件的设计、材质和制造工艺等方面均存在问题,从而导致铸件带"病"进入电网,造成失效断裂事故,给电网的安全经济运行带来不利影响[1,2]。

QT500-7 是铁素体、珠光体混合基体的球墨铸铁,因其轻量化和经济性,被大量应用在支架、连杆、传动机构拐臂、曲轴等承受弯扭应力和摩擦力的部件上,这就要求球墨铸铁的部件需要有足够的强度、刚度、韧性、耐疲劳和抗冲击性。然而在实际生产的过程中,由于铸造工艺等种种原因,球墨铸铁可能会出现致命的孔洞类缺陷,这些缺陷的存在会大大降低部件的综合力学性能,缩短使用寿命[3-6]。

近日,某换流站交流滤波器场 500 kV 瓷柱式断路器某开关 C 相在合闸过程中母线侧灭弧室的传动机构拐臂断裂,导致合闸不到位,灭弧室内部拉弧,最终导致灭弧室瓷套破裂。该开关为瓷柱式断路器,产品型号为 LW15A-550/Y,额定气体压力(20 ℃)0.6 MPa,出厂于 2010 年,于 2015 年返厂大修,返修后该开关操作次数为 339 次,其传动机构拐臂的设计材料为球墨铸铁 QT500-7。全面分析断裂原因,对于指导事故处理工作,加强电网运行管理、提高电网运行安全可靠性,具有重要意义[7]。现对内、外两侧拐臂断裂面周围以及未断裂的拐臂取样,

收稿日期:2020-07-03

作者简介:张鸿武(1987-),山东济南人,工程师.主要从事电站锅炉和电网设备金属材料的理化检测、失效分析及寿命评估方面的工作.电话:0531-67983735,
E-mail:wu7067331@126.com

通过试验对断裂原因进行分析。

## 1 试验

### 1.1 宏观检验

根据现场检测，该开关C相传动机构拐臂，与动触头主轴连接的拐臂部分有两处(内侧拐臂部分和外侧拐臂部分)，均已发生断裂。与动触头连接的拐臂已脱销，并且内侧拐臂断裂部分已移动至机构其他位置。如图1所示，内、外侧拐臂均断裂于拐臂本体处，断裂面较粗糙，无可见塑性变形，呈脆性断裂形貌。内侧拐臂断裂面较平整，外侧拐臂断裂面有一定倾斜角度。

如图2，内侧拐臂断裂面存在一处直径约5 mm的缩孔缺陷，侧面存在大量气孔，断裂面已经磨损，并覆盖有腐蚀产物。

如图3，外侧拐臂侧面也存在大量气孔，并覆盖有腐蚀产物。现对内、外两侧拐臂断裂口周围取样，分别编号为#1、#2、#3、#4、#6，进行微观形貌检测、能谱检测、金相分析、力学性能拉伸检测以及布氏硬度检测，对未断裂的拐臂取样，编号为#5，进行力学性能拉伸检测。

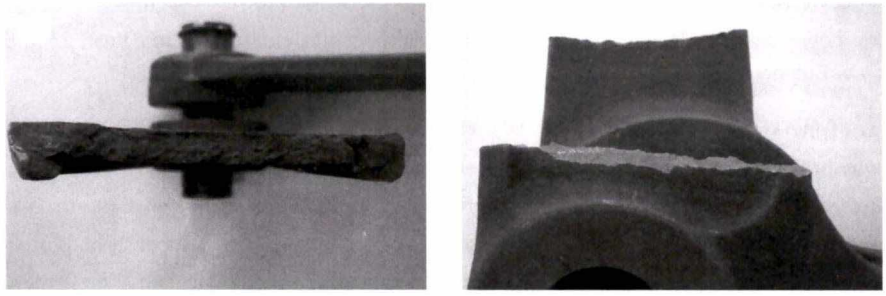
### 1.2 微观形貌检测

使用Supra55场发射扫描电子显微镜，对断裂面进行微观形貌检测，发现内侧拐臂断裂面取样位置#3和外侧拐臂断裂面取样位置#6的表面均附着有大量腐蚀产物，外侧拐臂断裂面取样位置#6的断裂面上存在气孔，检测结果如图4。

使用NORAN SYSTEM7能谱仪对内侧拐臂断裂面取样位置#3和外侧拐臂断裂面取样位置#6的断裂面进行能谱检测(测点位置见图4)，加速电压为20 kV，检测结果见表1。

### 1.3 金相分析

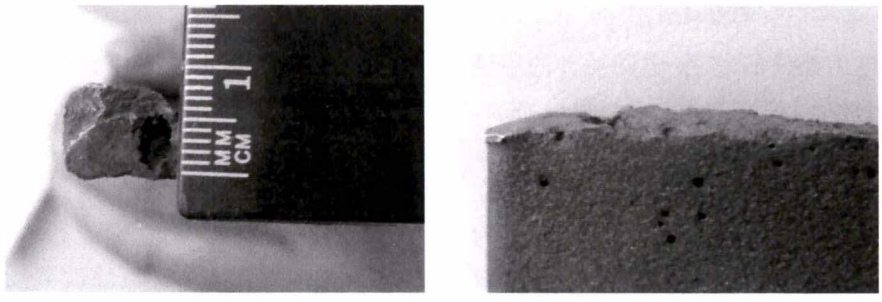
对取样位置#1、#2、#4(取样位置见图3)共计3个试样分别进行金相检测，将试样磨光至600#金相砂纸，然后采用金刚石抛光剂对试样进行机械抛光，抛光后根据GB/T9941-2009《球墨铸铁金相检验》4.1条的要求进行球化率评定，然后使用体积分数为4%的硝酸酒精溶液进行浸蚀，浸蚀后用无水乙醇清



(a)内侧拐臂断裂面形貌　(b)外侧拐臂断裂面形貌

图1 断裂面宏观形貌

Fig.1 Macro morphology of fracture surface




(a)内侧拐臂断裂面铸造缺陷　(b)内侧拐臂断裂面缺陷及侧面气孔

图2 断裂面宏观形貌

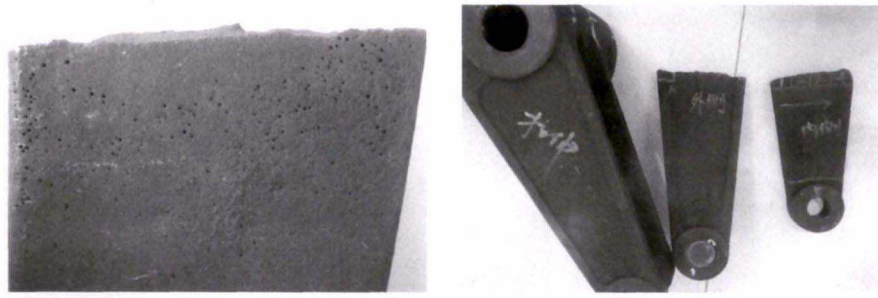
Fig.2 Macro morphology of fracture surface

**表1 试样的能谱检测结果 $w$(%)**

**Tab.1 Energy spectrum test results of samples**

| 测点 | C | O | Al | Si | S | K | Ca | Fe | Cu | / |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| #3 | 27.00 | 25.83 | 0.99 | 0.57 | 1.64 | 0.49 | 0.59 | 39.53 | 3.36 | / |
| 测点 | C | O | Al | Si | P | S | Mn | Fe | Cu | Ba |
| #6-1 | 10.79 | 26.30 | 0.21 | 0.23 | 7.55 | 1.26 | 13.93 | 33.38 | 5.32 | 1.04 |
| #6-2 | 24.43 | 21.02 | / | / | / | / | / | 54.55 | / | / |

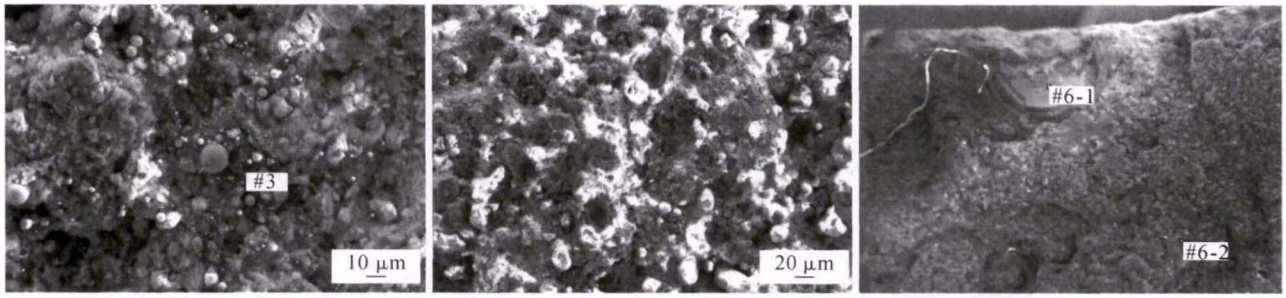
注：测点#6-1为#6取样位置断裂面的气孔部位，#6-2为#6取样位置断裂面的非气孔部位。



(a)外侧拐臂断裂面侧面气孔　　(b)取样位置示意

图 3 断裂处宏观形貌及取样位置示意

Fig.3 Macro morphology and sampling location at the fracture




(a)取样位置#3断裂面微观形貌及能谱检测位置　　(b)取样位置#6断裂面微观形貌　　(c)取样位置#6断裂面能谱检测位置

图 4 微观形貌及能谱检测位置示意

Fig.4 Microstructure and EDS detection location

洗，并用吹风机吹干。最后使用 Axio Vert A1 金相显微镜分别对 3 个试样的金相组织进行观察，并根据 GB/T9941-2009《球墨铸铁金相检验》表 1 的要求[8]对金相组织进行球化评级。检测结果如下。

如图 5 所示，#1 取样中石墨含量约占 13%，大部分呈球状和团状，球化率为 90%，球化级别为 2 级；金相组织为铁素体、石墨和少量珠光体。

如图 6，#2 取样中石墨含量约占 13%，大部分呈球状和团状，球化率为 89%，球化级别为 3 级；可见气孔缺陷，直径约 962 μm，金相组织为铁素体、石墨和少量珠光体。

如图 7，#4 取样中石墨含量约占 12%，大部分呈球状和团状，球化率为 83%，球化级别为 3 级；金相组织为铁素体、石墨和少量珠光体。

### 1.4 力学性能拉伸检测

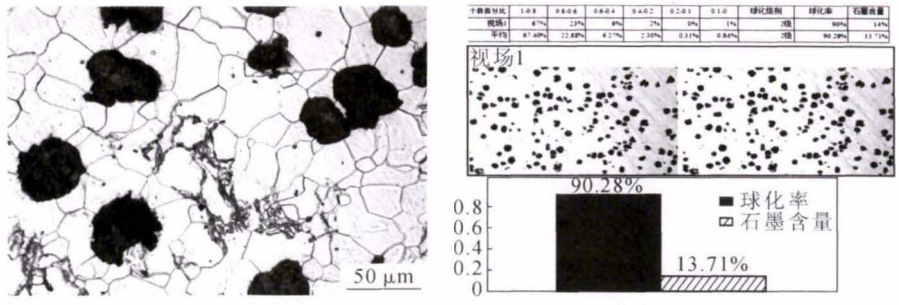
对未断拐臂纵向取样，编号为 #5（共计 2 件），使用 WDW-300E 试验机，进行力学性能拉伸试验，试验精度 1%，试验温度 23 ℃，检测结果见表 2。

**表2 力学性能拉伸检测结果**

**Tab.2 Test results of Mechanical properties tensile**

| | 屈服极限 /MPa | 抗拉强度 /MPa | 伸长率(%) |
|---|---|---|---|
| #5-1 | 327 | 422 | 7.0 |
| #5-2 | 316 | 424 | 8.0 |
| GB/T 1348-2009 | ≥320 | ≥500 | ≥7 |

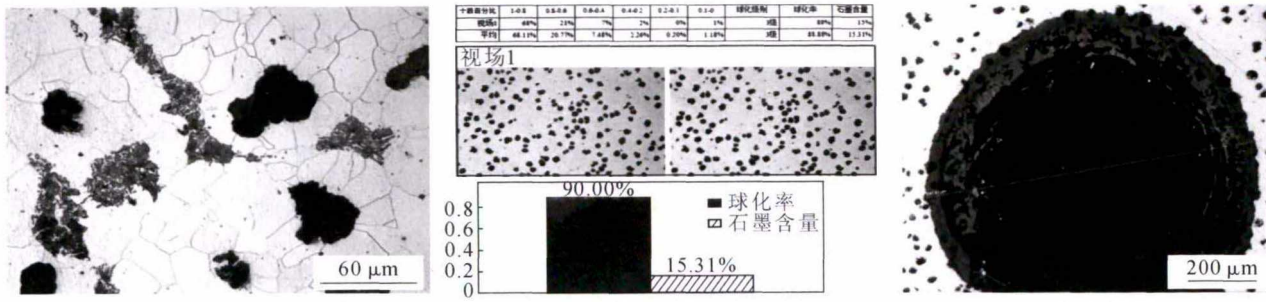
根据标准 GB/T 1348-2009《球墨铸铁件》表 3 的要求，单铸试件性能：QT500-7A，当铸件壁厚 ≤ 30 mm，抗拉强度为 ≥ 500 MPa，屈服强度 ≥ 320 MPa，伸长率 ≥ 7%；当铸件壁厚 > 30~60 mm，




(a)金相组织　　(b)球化率评定

图 5 取样位置 #1 金相组织及球化率评定

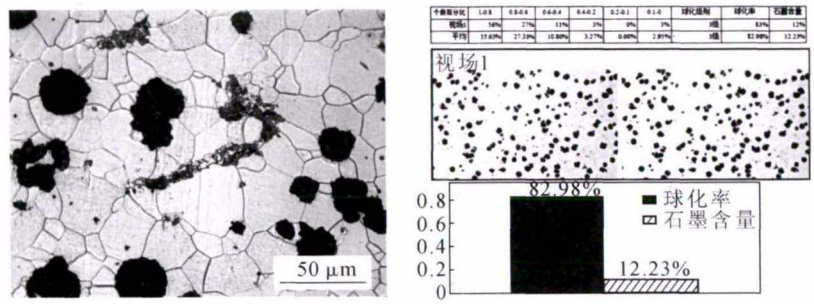
Fig.5 Metallographic structure and nodularity evaluation for Sampling location #1




(a)金相组织　(b)球化率评定　(c)气孔缺陷

图 6 取样位置 #2 金相组织及球化率评定

Fig.6 Metallographic structure and nodularity evaluation for Sampling location #2




(a)金相组织　(b)球化率评定

图 7 取样位置 #4 金相组织及球化率评定

Fig.7 Metallographic structure and nodularity evaluation for Sampling location #4

抗拉强度为≥450 MPa,屈服强度≥300 MPa,伸长率≥7%；当铸件壁厚＞60~200 mm，抗拉强度为≥420 MPa,屈服强度≥290 MPa,伸长率≥5%[9]。

由于本次检测为本体取样,受条件限制,试样加工为宽 15 mm,长 190.06 mm,拉伸部分长 60.06 mm 的试样,数据仅供参考。

### 1.5 布氏硬度检测

对内侧拐臂断裂面附近取样位置 #2 进行布氏硬度检测,使用 HB-3000B 布氏硬度计,压头规格 5 mm,载荷 750 kg,加载时间 12 s,共对试样进行 5 次布氏硬度检测,取算术平均值,得到的试样的布氏硬度平均值为 142.2 HB。

## 2 试验结果及讨论

(1)通过该开关 C 相传动机构拐臂现场检查及宏观形貌可见,内、外侧拐臂断裂面均呈脆性断裂形貌,内侧拐臂断裂面较平整,外侧拐臂断裂面存在一定剪切角，且内侧拐臂断面可见一处长约 5 mm 的缩孔缺陷,拐臂侧表面均存在大量的气孔。根据标准 GB/T2314-2008《电力金具通用技术条件》第 3.7.1 条:黑色金属铸件的外观质量要求,铸件表面应光洁、平整,不允许有裂纹等缺陷;铸件的重要部位(指不允许降低机械载荷的部位,以产品图样标注为准)不允许有气孔、砂眼、缩松、渣眼及飞边等缺陷[10]。以及根据标准 GB/T 1348-2009《球墨铸铁件》7.9 条:铸件的缺陷及修补要求,不允许有影响铸件使用性能的铸造缺陷(如裂纹、冷隔、缩孔、夹渣等)存在[9]。可见拐臂的外观质量不符合标准要求。

(2)通过微观形貌检测及能谱检测,可见断裂面表面均已氧化腐蚀,存在大量腐蚀产物,原生铁纯度较低,杂质元素含量较高,尤其是 #6 试样的气孔区域的 S、P、Al 等杂质元素的含量远高于其无缺陷的区域。S 元素属于消耗性反球化元素,在铸造的过程中，与 Mn、Mg 等元素亲和力强，生成稳定的碳化物,阻碍石墨化,易形成夹渣、皮下气孔等缺陷;P 元素也是有害元素,可增大缩孔、缩松产生的倾向;Al 元素也会引起皮下气孔的产生，很多国外知名的生产企业将 Al 元素的质量分数控制在 0.2%以下,若要得到高质量的球墨铸铁，部分国外知名的生产企业甚至将 Al 元素的质量分数控制在 0.05%以下;然而 Si 元素作为有益元素,可以促进石墨化,一般在球墨铸铁中 Si 的质量分数应在 2.0%~3.0%,以此提高铸件的强度和韧性;另外在铸造的过程中,型砂的含水率、透气性和紧实性也与气孔的形成有关[11-18]。

(3)通过金相分析,观察到金相组织为铁素体、石墨和珠光体,根据标准 GB/T 1348-2009《球墨铸铁件》7.5 条：石墨以球状为主，球化级别不低于 GB/T9941-2009《球墨铸铁金相检验》规定的球化级

别 4 级[9]，所检 3 个试样的球化率平均值为 87.3%，一般情况下，要得到综合力学性能良好的球墨铸铁，球化率要控制在 90%以上[19]，如果球数减少，石墨尺寸增大，疏松等缺陷会增多[20]。可见所检 3 个试样球化级别均符合标准要求，但球化率略低，截面处可见气孔缺陷。

(4)根据标准 GB/T 1348-2009《球墨铸铁件》表 3 的要求，QT500-7 的布氏硬度参考为：170~230 HB[7]，内侧拐臂的布氏硬度平均值(142.2 HB)远低于标准要求的下限。

(5)参考力学性能拉伸检测，抗拉强度远低于单铸试件(铸件壁厚≤30 mm 的附铸试件)标准要求下限，屈服强度也低于标准要求，伸长率刚好处于标准要求下限。

通过对以上试验结果的分析，可见由于原生铁纯度较低，杂质元素含量较高，且铸造工艺不良，导致交流滤波器场 500 kV 瓷柱式断路器开关 C 相传动机构拐臂存在缩孔、气孔等大量铸造缺陷，外观质量、力学性能、布氏硬度均不符合标准要求，而该开关 C 相传动机构拐臂内侧拐臂处约 5 mm 大的缩孔缺陷是整个拐臂上最大的薄弱环节，存在较大应力集中，在多次开关分合操作的交变应力下，极易萌生裂纹，且拐臂硬度等性能指标均远低于标准要求，不足以承受开关长期分合操作下大的应力，导致裂纹扩展，最终形成断裂。

由于内侧拐臂的断裂面较为平整，且断裂面已磨损，而外侧拐臂断裂面存在一定剪切角度，所以认为内侧拐臂首先断裂，内侧拐臂断裂处相互摩擦，并且导致内侧拐臂断裂部分与动触头主轴连接部分脱销，被甩至传动机构其他部分。内侧拐臂断裂后，外侧拐臂一方面承受传动机构的所有作用力，另一方面由于其与动触头主轴不在同一作用平面上而受到横向剪切力，综合两者原因，外侧拐臂在该开关合闸时发生断裂。

## 3　结论

(1)造成交流滤波器场 500 kV 瓷柱式断路器开关传动机构拐臂断裂的原因为原生铁纯度较低，杂质元素含量较高，铸造工艺不良，存在大量缺陷，且力学性能较差，不能满足长期运行的要求。

(2)建议加强电网金属监督，通过对设备进行入网前的检验，严把入网设备质量关，消除安全隐患，减少同类事故发生，保障电网的安全运行。

**参考文献：**


[1] 王斐斐，刘爽，马永泉，等. 220 kV 管母线水平线夹断裂原因分析[J]. 山东电力技术，2015，42(8)：51-53.

[2] 谢亿，陈军君，牟申周，等. 电网铸铝件典型失效形式[J]. 铸造技术，2012，33(4)：423-425.

[3] 《火力发电厂金属材料手册》编委会编. 火力发电厂金属材料手册[M]. 北京：中国电力出版社，2000.

[4] 胡波，余宁，李德江，等. 球墨铸铁曲轴铸造孔洞缺陷成因分析[J]. 铸造技术，2019，40(11)：1174-1177，1182.

[5] 马冬威，张元好，赵齐，等. 球墨铸铁曲轴铸造缺陷分析[J]. 热加工工艺，2020，49(7)：160-162.

[6] 张磊，廉根宽编著. 电站锅炉四管泄漏分析与治理[M]. 北京：中国水利水电出版社，2009.

[7] 盛达. 球墨铸铁工业生产 60 年的发展 [J]. 现代铸铁，2009(2)：56-60.

[8] 球墨铸铁金相检验：GB/T9941-2009[S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[9] 球墨铸铁件：GB/T1348-2009[S]. 北京：中国标准出版社，2010.

[10] 电力金具通用技术条件：GB/T2314-2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[11] 白新社，白佳鑫，刘武成. 高质量球墨铸铁微量元素和合金元素的选择与控制[J]. 铸造工程，2020(3)：13-22.

[12] 赵彩琦. 浅谈五大元素对铸件的影响 [J]. 中小企业管理与科技(下旬刊)，2011(8)：296.

[13] 王姗姗，程凯，靳宝，等. 铸铁件缩松、缩孔、凹陷缺陷的原因分析与防止方法[J]. 金属加工(热加工)，2019(2)：79-81.

[14] L. Magnusson Åberg, C. Hartung and J. Lacaze. Trace elements and the control limits in ductile iron, 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron-SPCI10[C]. Mar Del Plata Argentina, 2014.

[15] James D. Mullins. Controlling the tramp (harmful) element content will make your life easier, Sorelmetal: Suggestions for Ductile Iron Production [M]. Montreal: RTZ Iron & Titanium Inc., 2006.

[16] Kathy L. Hayrynen. The production of austempered ductile iron (ADI), 2002 World Conference on ADI [C]. Louisville Kentucky, USA, 2012.

[17] White D S. Rare earths in ductile cast iron: minimizing usage of these metals for cost reductions and to prepare for reduced supply [C]. The SG iron Society Spring 2012 Annual Meeting, Muskegon Harbor Muskegon, Michigan on, 2012.

[18] Rick Gundlach. Summary of element effects in ductile iron: the SG iron Society Spring 2012 Annual Meeting [C]. Muskegon Harbor Muskegon, Michigan on, 2012.

[19] 屈红宇，靳存文，徐清军，等. 球墨铸铁球化不良的预防及改进措施[J]. 金属加工(热加工)，2020(6)：83-84.

[20] 周继扬. 球墨铸铁的凝固形貌-球墨铸铁基础理论的最新发展(四)[J]. 现代铸铁，2003(2)：4-9.