

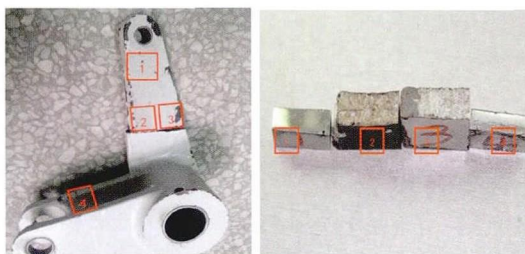
[开关设备]

GIS用球墨铸铁拐臂断裂分析

文/西安西电高压开关有限责任公司 王建伟

某公司GIS用球墨铸铁拐臂在试验过程中发生断裂，对断裂拐臂进行宏观检验、化学分析、金相组织、硬度检验，并对其进行扫描电镜与能谱分析，得出了拐臂断裂原因，并提出了预防措施。

某企业GIS用球墨铸铁拐臂在试验过程中发生断裂失效，该拐臂材质为QT450-10，宏观形貌如图1a所示，分别在其完好部位1、断裂部位2和3、裂纹部位4取样，编号分别为试样1~4，如图1b所示。对此次事故的铸态拐臂进行宏观断口、化学成分、金相组织和能谱分析。



(a) 断裂拐臂图

(b) 断口宏观形貌

图1 断裂拐臂与断口宏观形貌

理化检验

1. 化学成分分析

分别将试样1~4铣平打磨后，在ARL 3460光谱仪上进行成分分析，结果如表1所示。可见，试样1~4的化学成分相近，说明拐臂原材料成分均匀，符合球墨铸铁QT450-10的技术要求。

表1 试样的化学成分（质量分数，%）

条件	C	Mn	Si	P	S	Mg	RE
试样1	3.61	0.47	2.64	0.030	0.015	0.06	0.05
试样2	3.60	0.46	2.62	0.030	0.015	0.04	0.05
试样3	3.60	0.46	2.62	0.030	0.015	0.04	0.03
试样4	3.51	0.50	2.57	0.020	0.009	0.07	0.06

2. 硬度测试

分别对进行过成分测试的试样1~4测试其布

氏硬度，结果如表2所示。可见，试样1~4的硬度平均值接近，且都符合GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》的要求。

表2 拐臂的布氏硬度

条件	测试值HBW							平均值 HBW
试样1	186	180	184	179	181	184		182.3
试样2	185	178	178	184	182	181		181.3
试样3	180	183	180	184	179	184		181.6
试样4	188	181	181	191	187	179		184.5
GB/T 1348—2009	160~210							

3. 断口宏观分析

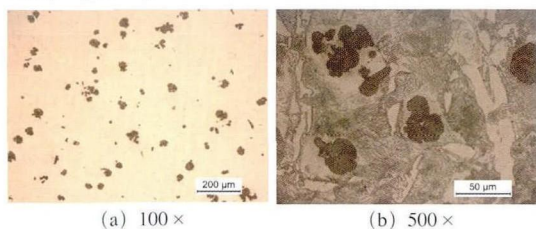
由图1b可见，断臂断裂部位试样3的宏观断口的左端存在明显的非金属夹杂，与氧化现象，试样2和3的上下端面都存在连续的0.5~2.0 mm气孔。断口包含裂纹源区、扩展区和瞬断区，属于解理断口，非金属夹杂部位是裂纹的萌生源区。

4. 显微分析

对试样1~4重新打磨并抛光后，在Leica DMI3000M金相显微镜下观察球化级别与石墨大小。4个试样的金相照片相同，如图2a所示，可见，石墨的分布呈球状、蠕虫状和团絮状，石墨大小为8级，球化级别为4级，球化级别不符合技术要求（要求≤3级）。

在试样1~4上切割金相样块，经镶嵌、研磨抛光后用4%硝酸酒精腐蚀，在Leica DMI3000M金相显微镜下观察显微组织，如图2b所示。参照标准GB/T9441—2009，可见，基体组织为铁素体+珠

光体+渗碳体，珠光体含量为“珠25”，渗碳体含量为“渗5”。



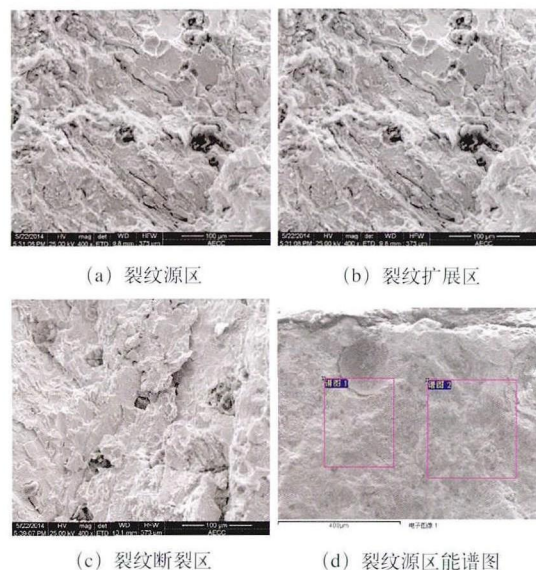
(a) 100× (b) 500×

图2 试样的显微组织

5. 扫描电镜分析

(1) 断口分析

试样2和3经超声波10 min清洗后，在FEI Quanta 600扫描电镜下观察其裂纹形貌。裂纹源区和扩展区如图3a、3b所示，可以看出，断口存在明显的河流花样和解理台阶，裂纹在夹杂处生成，并沿晶界扩展成二次裂纹。裂纹的瞬断区分别如图3c所示，裂纹源区的能谱分析如图3d和表3所示，可知裂纹源区含有较高含量的碳化物与氧化铁非金属夹杂。断口存在明显的河流状花样，即解理台阶，为解理断裂。所以，拐臂的断裂机制为解理+沿晶界的混合断裂。



(a) 裂纹源区

(b) 裂纹扩展区

(c) 裂纹断区

(d) 裂纹源区能谱图

图3 断裂部位的断口及其能谱图

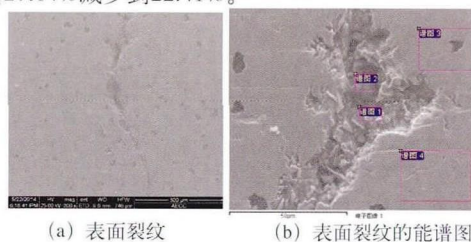
表3 裂纹源区元素含量（质量分数，%）

谱图	C	O	Mn	Si	Ca	Fe
谱图1	17.91	27.64	0.20	5.09	—	49.16
谱图2	18.15	27.54	—	4.92	0.21	49.18

(2) 表面裂纹分析

试样4的裂纹如图4a所示，相应的能谱如图4b所示，由能谱分析知，在裂纹源区的1和2处存在脱碳和氧化现象，造成非金属夹杂。与试样3

的断口源区相比，碳元素含量（质量分数）由17.91%增加到51.64%，氧元素含量（质量分数）由27.64%减少到22.41%。



(a) 表面裂纹

(b) 表面裂纹的能谱图

图4 表面微裂纹及其能谱图

表4 表面裂纹中的元素含量（质量分数，%）

谱图	C	O	Al	Si	Ca	Fe
谱图1	41.63	26.01	4.72	6.31	0.42	20.92
谱图2	51.64	22.41	0.68	2.86	0.26	22.15
谱图3	—	—	—	3.64	—	96.36
谱图4	—	—	—	4.43	—	95.57

分析与讨论

材料的裂纹源一般形成于表面，如果材料内部存在脆性夹杂、空洞、成分偏析等缺陷，裂纹源也可能形成与皮下气孔。皮下气孔是铸件表皮下2~3 mm处均匀或蜂窝状分布的球形、椭圆形的直径为0.5~3 mm的孔洞，原因可能是铁液表面形成的氧化膜阻碍气体析出、碳化反应中形成的气体、镁残留量多形成的镁蒸气、炉料潮湿锈蚀等。

研究表明，球铁的微裂纹首先在石墨-基体界面萌生后形成石墨孔洞，造成应力集中，并沿界面扩展，然后向基体中扩展，最终导致断裂失效。

试样1~4化学成分、球化级别、金相组织、布氏硬度均符合技术要求，但由图1b的断口，可见明显的铸造缺陷，断面的两边存在孔径为0.5~2.0 mm连续分布的皮下气孔，试样3的左端部存在约10 mm²的非金属夹杂，此处是裂纹源萌生的地方，随后裂纹不断扩展，最终导致球墨铸铁拐臂断裂失效，拐臂的断裂机制为解理+沿晶界的混合型断裂。

结论及建议

球墨铸铁生产过程中，提高铁液的出炉温度，并进行适当静置处理，以使非金属夹杂上浮，防止夹杂缺陷。在保证球化级别的条件下降低镁残留量，铁液平稳浇注，控制炉料干燥少锈，采用少氮或无氮树脂。将拐臂表面涂漆工艺改为表面磷化处理，以防在油漆剥落部位发生氧化。尽可能消除零件表面可能发生的初始裂纹，重要零部件应规定严格的检验方法及要求。EA

（收稿日期：2015.06.19）

（编辑：刘群）