

分接开关主驱动轴组织和低温力学特性研究

黄耀¹, 刘海锋¹, 程永锋¹, 韩军科¹, 赵子华²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 以进口分接开关主驱动轴EN-GJS-700-2球墨铸铁件为研究对象, 采用化学成分分析、金相试验、硬度试验、低温拉伸试验、低温冲击试验和断口微观表征技术对其组织和低温力学性能进行了分析测试, 研究了低温对分接开关主驱动轴的力学性能的影响。结果表明: 随着温度的降低, 分接开关的屈服强度和抗拉强度小幅度升高, 断后伸长率逐渐降低, 其冲击功小幅度降低。不同温度对分接开关主驱动轴拉伸和冲击断口无显著影响, 断口呈脆性断裂特征。

关键词: 分接开关; 球磨铸铁; 低温拉伸; 低温冲击; 断口特征

直流输电工程是以直流电的方式实现电能传输的工程。直流输电与交流输电相互配合构成现代电力传输系统^[1-2]。直流输电换流站比交流变电站的设备多、结构复杂、造价高, 有换流变压器、平波电抗器、交流滤波器、直流滤波器、直流断路器等设备。换流变压器装有有载分接开关, 它是换流变压器重要的部件。相对普通的交流电力变压器而言, 换流变压器的有载分接开关调压分接范围要大的多, 一般可以达到-5%~+30%, 挡距较小, 通常为1%~2%, 以达到分接调节和换流器触发角控制联合工作时无调节死区和避免频繁往返动作的目的^[3-8]。由此带来的调压频率也要高得多, 可见有载分接开关作为变压器中唯一经常动作的部件, 其可靠性直接决定换流变压器的运行可靠性, 甚至影响电网安全稳定。开关中主驱动轴是开关闭合过程的传动轴, 需要带动齿轮驱动分接开关进行转动。在正常运转时, 分接开关在转动的过程中会受到较大的摩擦力, 为了克服该摩擦力, 主驱动轴与一个重达7.5 kg的飞轮相连接, 飞轮峰值转动速度为0.2秒/转。在Bypass上的卡槽与触头接触时, 飞轮可提供强大的惯性力以克服摩擦力, 保证Bypass顺利切换。同时, 飞轮在旋转过程中需要通过牵引真空泡上下运动, 真空泡的牵引力在驱动轴上也会产生弯矩及正应力^[5, 9-10]。

分接开关主驱动轴材质牌号为EN-GJS-700-2的球墨铸铁, 材料的屈服强度不小于420 MPa, 密度为7 850 kg/m³, 其材料的组织和力学性能稳定性对于特高压输变电工程具有重要作用^[11-15], 本文对进口的分接开关主驱动轴的组织、低温拉伸性能及断口、低温冲击性能及断口进行了详细分析与测试。

1 试验材料及方法

分析用的主驱动轴实物以及取样位置示意如图1, 其化学成分分析依据EN 1563: 2012-03 Founding-Spheroidal Graphite Cast Iron、GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》和GB/T 20123—2006《钢铁 总碳硫含量的测定 高频感应炉燃烧后红外吸收法(常规方法)》的方法测试, 测试结果如表1所示。

金相组织分析依据EN ISO945-1: 2008 Microstructure of Cast Irons—Part 1: Graphite Classification by Visual Analysis和GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》。

拉伸性能测试依据EN 1563: 2012-03 Founding-Spheroidal Graphite Cast Iron、

作者简介:

黄耀(1985-), 男, 博士, 高工, 长期从事于电网金属材料研发、应用及腐蚀与防护工作。E-mail: taohua-daozhu@163.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)01-0033-05

基金项目:

国网公司科技项目(SGZB0000TGJS2100354)。

收稿日期:

2022-03-17 收到初稿,

2022-05-16 收到修订稿。

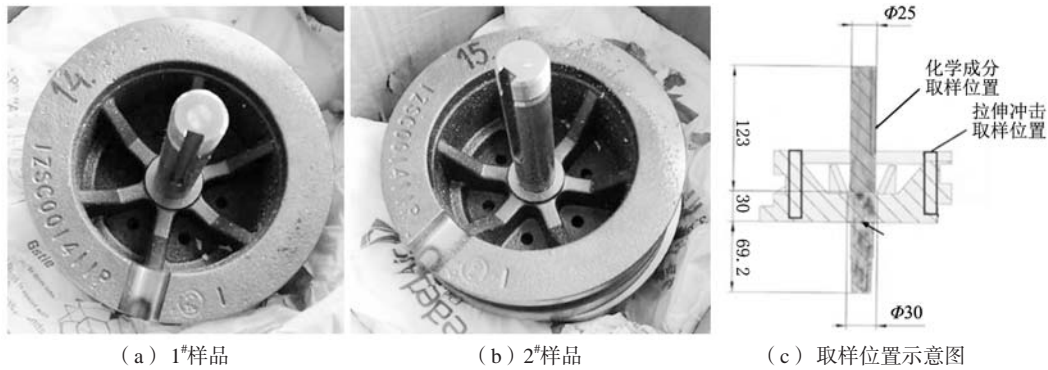


图1 主驱动轴实物图

Fig. 1 Physical drawing of the main drive shaft

表1 分接开关主驱动轴的化学成分

Table 1 Chemical composition of main drive shaft of the tap changer

编号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mg	Cu	Fe	$w_B / \%$
1#	3.23	1.97	0.42	0.013	0.008 2	0.032	0.032	0.032	1.05	余量	
2#	2.92	2.03	0.41	0.015	0.007 7	0.032	0.033	0.043	1.10	余量	

GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》、GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》、GB/T 228.3—2010《金属材料 拉伸试验 第3部分：低温试验方法》。

冲击性能测试依据EN 1563: 2012-03 Founding-Spheroidal Graphite Cast Iron、GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》、GB/T 229—2007《金属夏比缺口冲击试验方法》。在低温冲击试验中，通过用液氮和无水乙醇相互的配比作为低温的液体介质，试验采用“直冲法”，把试样放在液体介质中保温5 min，在将试样从液体介质中拿出后2 s内快速放到试验机上冲击。在保温时温度比试验温度低一点，根据GB/T 229—1994中对温度补偿要求， $-60\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内温度补偿 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；本试验中的温度范围为 $-30\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围，温度补偿 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

硬度分析采用HBE-3000型布氏硬度计测量材料的布氏硬度，选用10 mm压头，载荷14 710 N，载荷加载时间15 s。

2 试验结果及讨论

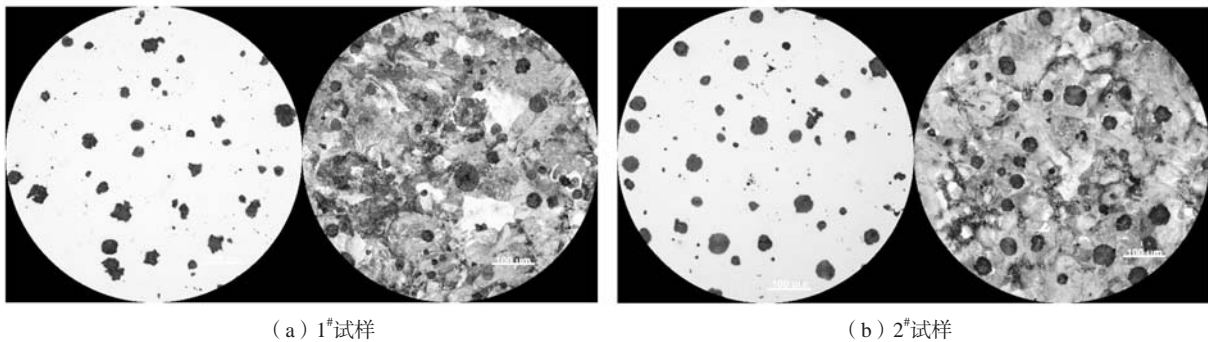
2.1 金相组织

驱动轴样品的金相组织如图2所示，金相组织主要由球状的石墨、片层状的珠光体组成，局部区域含有少量的铁素体和磷共晶组织。金相组织基本满足标准要求：球化形态为VI级（标准要求V~VI级），石墨球化分级为2级，石墨大小分级为6级（5~6级），基体内铁素体含量很低，没有分散的渗碳体。根据图像法统计，珠光体和铁素体的比例分别为95%和5%，对两试样进行硬度分析，平均硬度均为HBW 261，满足EN 1563: 2012-03标准要求的HBW 225~305，两样品硬度均满足要求。

2.2 力学性能

2.2.1 主驱动轴低温拉伸性能

我国幅员辽阔，直流输变电工程会经过北方寒冷地区，东北地区冬季气温在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，极限气温



(a) 1#试样

(b) 2#试样

图2 样品金相组织

Fig. 2 Metallographic microstructures of the samples

达-30 ℃以下,因此,对分接开关主驱动轴的低温拉伸性能进行了分析测试研究。表2为试样拉伸试验数据,从表中可以看出,1#样品和2#样品在室温下的屈服强

表2 拉伸性能数据
Table 2 Tensile properties data

试样	试验温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1#	室温	465.88	790.21	4.76
	0	487.17	809.95	4.61
	-15	485.91	794.62	3.73
	-30	504.46	820.18	3.98
2#	室温	579.16	916.07	4.30
	0	616.34	941.63	3.66
	-15	606.80	910.55	3.39
	-30	612.62	930.17	3.27

度均高于420 MPa、抗拉强度均高于700 MPa、伸长率均高于2%,满足表面要求。1#样品和2#样品在低温下(-30 ℃、-15 ℃、0 ℃)的屈服强度均高于480 MPa、抗拉强度均高于790 MPa、伸长率均高于2%。由表2可知,随着温度的降低,1#和2#样品的屈服强度和抗拉强度逐渐升高,但其涨幅不高,断后伸长率逐渐降低。由于铸造控制差异,2#试样整体强度更高,但伸长率更低。

2.2.2 拉伸断口

1#样品在不同温度下的拉伸断口微观形貌如图3所示,四个温度下的拉伸断口微观形貌并没有显著区别,典型微观形貌为解理(脆性特征),部分区域有与珠光体相关的形貌(脆性组织特征),局部区域有韧窝形貌(塑性特征),个别位置显示铸造缺陷。

2#样品在不同温度下的拉伸断口微观形貌如图4

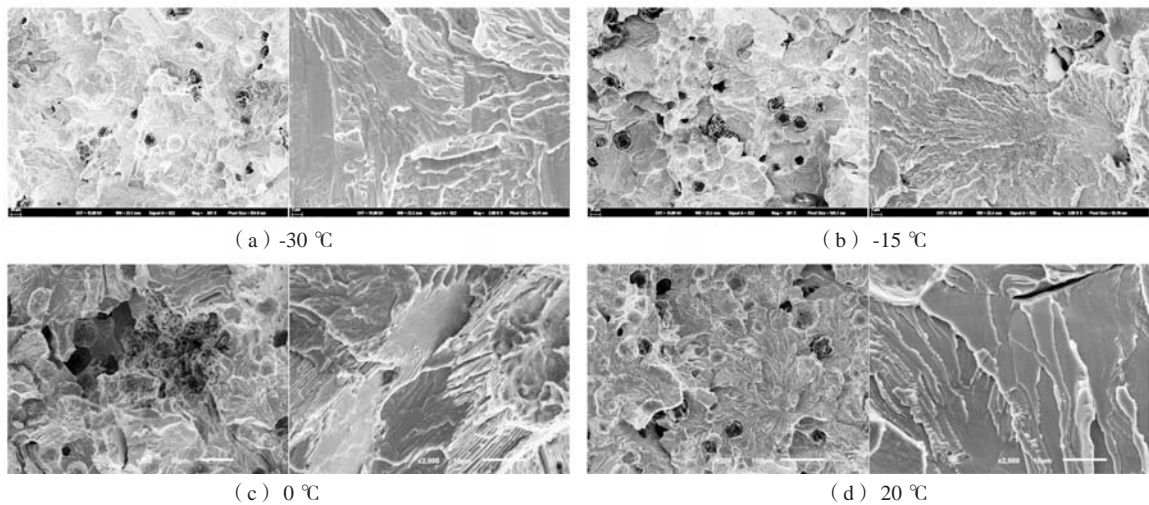


图3 1#样品在不同温度下拉伸断口SEM微观形貌

Fig. 3 SEM microstructures of tensile fracture of the 1# sample at different temperatures

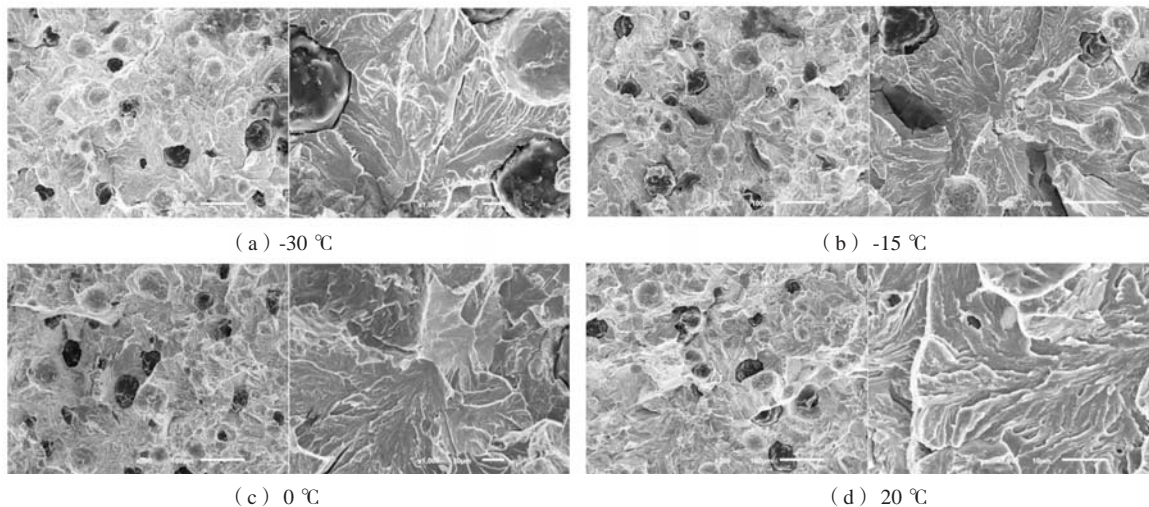


图4 2#样品在不同温度下拉伸断口SEM微观形貌

Fig. 4 SEM microstructures of tensile fracture of the 2# sample at different temperatures

所示,四个温度下的拉伸断口微观形貌并没有显著区别。与1#样品相同,典型微观形貌为解理断裂特征(脆性特征),部分区域有与珠光体相关的形貌(脆性组织特征),局部区域有韧窝形貌(塑性特征),个别位置显示铸造缺陷。

2.3 冲击性能

分别测试了1#样品和2#样品在-30℃、-15℃、0℃和室温(23℃±2℃)下的冲击性能,冲击试验数据如表3所示,两试样4个温度下的冲击功均小于3J,而由于2#试样的强度较1#试样更高,反应在冲击韧性上表现也更低。

表3 两样品夏比V型缺口冲击性能
Table 3 Charpy V-notch impact properties
of the samples

试样	20℃	0℃	-15℃	-30℃	J
1#	2.68	2.21	2.16	1.87	
2#	2.46	1.92	1.67	1.43	

两组试样样品在不同温度下的拉伸断口微观形貌如图5、图6所示,可以看出,4个温度下的冲击断口微观形貌并没有显著区别,典型微观形貌为解理断裂特征(脆性特征),部分区域有与珠光体相关的形貌(脆性组织特征),个别位置显示铸造缺陷。

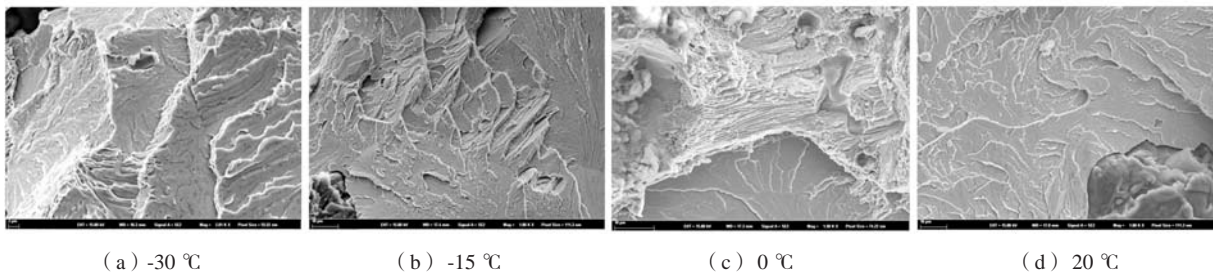


图5 1#样品冲击断口的SEM微观形貌

Fig. 5 SEM morphologies of impact fracture of the sample 1#

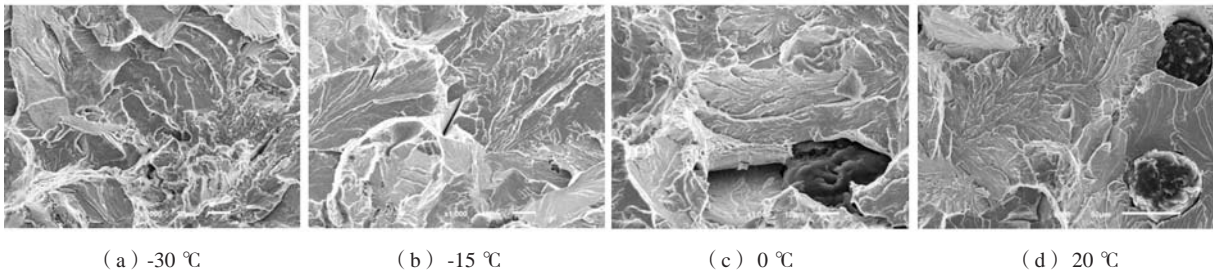


图6 2#样品冲击断口的SEM微观形貌

Fig. 6 SEM morphologies of impact fracture of the 2# sample

3 结论

(1) 分接开关主驱动轴的金相组织由球状的石墨、片层状的珠光体组成,局部区域含有少量的铁素体和磷共晶组织。球化形态为VI级(标准要求V~VI级),石墨球化分级为4级,石墨大小分级为6级(标准要求为5~6级),大部分区域铁素体很少,没有分散的渗碳体。

(2) 随着温度的降低,分接开关的屈服强度和抗

拉强度小幅度升高,断后伸长率逐渐降低。

(3) 分接开关主驱动轴在-30℃、-15℃、0℃和室温(23℃±2℃)下的夏比V型缺口冲击功均小于3J,随着温度的降低,其冲击功小幅度降低。

(4) 不同温度对分接开关主驱动轴拉伸和冲击断口无显著影响,断口宏观形貌均呈现脆性特征,断口微观形貌为解理断裂,局部区域有与珠光体组织相关的形貌。

参考文献:

- [1] 马冯挺. 探讨特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电力设备管理, 2021 (1): 43-44.
- [2] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电变装备最新技术发展 [J]. 高电压技术, 2016, 42 (4): 1068-1078.
- [3] 高锡明, 谢志成, 邓军, 等. 换流变压器有载分接开关电场分布特性研究 [J]. 变压器, 2021, 58 (12): 42-45.
- [4] 张志恒. 一起220 kV变压器有载分接开关故障的分析及处理 [J]. 黑龙江电力, 2021, 43 (6): 522-525.
- [5] 李小娣, 柴斌, 雷战斐. 一起换流变压器分接开关档位不一致原因分析及改进措施 [J]. 电气技术, 2021, 22 (8): 69-72.
- [6] 高桂英, 董锐, 夏小晴, 等. 电力电子技术在有载分接开关中应用研究 [J]. 电气传动, 2021, 51 (6): 73-80.
- [7] 刘泽洪. $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电工程创新实践 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (23): 7782-7792.
- [8] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统技术经济分析 [J]. 电网技术, 2015, 39 (2): 341-348.
- [9] 胡鹏伟, 李豪, 刘洋, 等. 真空有载分接开关的应用及可靠性提升措施分析 [J]. 电力设备管理, 2021 (4): 183-184.
- [10] 赵延文, 尚蕃祥, 张英杰. 主变有载分接开关缺陷分析与处理 [J]. 农村电工, 2021, 29 (3): 50.
- [11] 赵岩, 侯晓霞. 低温热处理对铁素体球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (12): 124-127.
- [12] 丁建中, 马敬仲, 曾艺成, 等. 低温铁素体球墨铸铁的特性及质量稳定性研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (3): 193-201.
- [13] 张新宁, 曲迎东, 李荣德, 等. 铁素体球墨铸铁低温冲击断裂裂纹形核及扩展机理 [J]. 金属学报, 2015, 51 (11): 1333-1340.
- [14] 陈江, 黄兴民, 高杰维, 等. 低镍球墨铸铁低温冲击性能及断裂机理研究 [J]. 材料工程, 2012 (12): 33-38.
- [15] 吴金寿, 席赞, 祖方道. 低温高韧性球墨铸铁特点及韧性控制因素 [J]. 中国铸造装备与技术, 2009 (6): 1-5.

Study on Microstructure and Low Temperature Mechanical Properties of Main Drive Shaft of Tap Changer

HUANG Yao¹, LIU Hai-feng¹, CHENG Yong-feng¹, HAN Jun-ke¹, ZHAO Zi-hua²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract:

The microstructure and low-temperature mechanical properties of imported tap changer main drive shaft EN-GJS-700-2 ductile iron were analyzed and tested by chemical composition analysis, metallographic test, hardness test, low-temperature tensile test, low-temperature impact test and fracture micro characterization technology, and the effect of low temperature on the mechanical properties of the tap changer main drive shaft was studied. The results showed that with the decrease of the temperature, the yield strength and tensile strength of the tap changer increased slightly, the elongation after fracture decreased gradually, and the impact energy decreased slightly. Different temperatures had no significant effect on the tensile and impact fracture of the main drive shaft of the tap changer, and the fracture exhibited a brittle fracture characteristic.

Key words: tap changer; ductile iron; low temperature stretching; low temperature impact; fracture characteristics