

MW级风电机组轮毂用QT400与QT450球墨铸铁关键服役性能对比

吴韬^{1,4}, 姜依彤¹, 陈光¹, 帅栩¹, 杨晨¹, 龚潜海², 毛鹏展³, 桂万元⁴

(1. 浙江机电职业技术大学, 高性能金属材料研发及成型技术创新团队, 浙江杭州 310053;
2. 浙江佳力风能技术有限公司, 浙江杭州 311241; 3. 浙江省冶金研究院有限公司, 浙江杭州 310015;
4. 北京科技大学 国家材料服役安全科学中心, 北京 100083)

摘要: MW级风电机组球墨铸铁轮毂是连接其三根叶片和主轴的重要受力部件。由于其经常在恶劣的环境下工作, 并且需要承受高冲击力和低温环境的考验, 同时需要满足上百米的高空服役长达15~20年不更换, 所以研究其疲劳性能具有非常重要的意义。系统研究了风电机组球墨铸铁轮毂用QT400与QT450低温冲击韧性和高周疲劳性能, 同时结合断口分析来研究其疲劳现象, 找出疲劳失效的主要原因是球化的好坏, 是影响球墨铸铁拉-拉疲劳寿命的关键因素。通过对风电轮毂运行过程中应力分布进行数值模拟, 得出其应力分布规律, 以期为其安全服役提供数据支撑。

关键词: 球墨铸铁; 风电机组轮毂; 应力分布; 低温冲击韧性; 高周疲劳

作者简介:

吴韬(1989-), 男, 博士, 主要研究方向为金属材料成分开发与智能制造。
E-mail: wutao2@zime.edu.cn

通讯作者:

桂万元, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。电话: 010-62334644, E-mail: guiwy@ustb.edu.cn

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)12-1674-06

基金项目:

浙江省“尖兵、领雁”重点研发项目(2022C01147, 2023C01249, 2024C04051)。

收稿日期:

2024-08-19 收到初稿,
2024-10-30 收到修订稿。

在“双碳”目标政策与市场竞争推动下, 大型风电机组开发技术升级和国际化进程不断加快, 拥有我国自主知识产权的兆瓦(MW)海上风电机组与陆上风力发电机组均已经正式投入使用。随着风电机组的不断大型化和重型化, 给风电用球墨铸铁的生产带来了新的难题^[1]。对于风电机组结构件, 为了获得更多的发电量, 载荷越来越大, 安全系数越来越小^[2-3], 例如QT400的屈服强度为220 MPa, 取1.1的安全系数后, 许用屈服为200 MPa, 现在实际铸件的设计强度都已经达到190 MPa左右, 非常接近许用值。为了保证机组结构件的安全要求就必须增加材料的用量, 这给风电机组结构件的生产、装配、运输和吊装带来极大的压力, 严重制约了风电大容量机组技术的发展。此外, 大型风电设备上的球墨铸铁零部件主要壁厚在100 mm以上, 而高效风电用球墨铸铁件某些部位厚度甚至达到了300~500 mm, 由于厚大断面冷却速度慢、凝固时间长, 导致大断面上会出现石墨球数量偏少、尺寸粗大、圆整度低、基体中珠光体数量偏多, 甚至还会出现一些畸变石墨^[4-5]。这些组织特征都对球墨铸铁件的塑性和低温韧性不利, 严重影响风电设备的使用寿命。

基于我国风力发电行业对风电机组大型化、高效化、轻量化的迫切需求, 针对风电机组关键结构件(轮毂、底座和主轴类等), 有必要开发高屈强比的新型球墨铸铁材料。硅含量对风电球墨铸铁件低温性能影响较大, 硅元素可以促进石墨化, 增加硅含量有利于提高球墨铸铁中铁素体的含量, 但会降低球墨铸铁低温冲击韧性^[6-9]。由于风电机组服役环境恶劣(高空、低温和高冲击载荷), 因此维修极其困难, 且代价较高, 故对球墨铸铁材料的选择、铸件质量及铸件的力学性能都有极为严格的生产与检测要求。尤其随着MW级风能发电机组的应用, 还要求铸件具有高的耐疲劳寿命, 保证风电机组15~20年安全运行不维修。风电轮毂是风电机组的重要部件, 风力发电机的叶轮由三片叶片对称安装在风电轮毂上构成, 两片叶片间为120°的夹角。叶片与轮毂依靠轴承连接, 并用螺栓分别紧固在轴承的内外圈上。叶片产生的气动载荷以及机舱、风轮旋转引起的离心力、惯性力和重力通过叶片传递到轮毂

上, 这些载荷和轮毂自身的重力构成了轮毂载荷^[10-12]。由于风电轮毂设计的好坏将对整个机组的稳定运行影响巨大^[13-15], 这就需要对风电轮毂构件服役过程应力分布进行数值模拟, 明确其复杂服役工况, 其次, 使用的球墨铸铁材料应达到低温冲击韧性、高周疲劳性能等设计指标要求。

综上所述, 风电轮毂作为风电机组的重要组成部分, 为保证其安全高效运行, 需要提前对风电轮毂的低温冲击冲击韧性, 高周疲劳寿命和疲劳寿命极限进行试验测试, 结合端口微观组织形貌分析其疲劳失效形式, 以满足设计指标要求。基于此, 本文选择了两种风电轮毂材料QT400与QT450球墨铸铁, 通过系统研究风机轮毂QT400与QT450球墨铸铁的低温冲击韧性和疲劳寿命, 为风机轮毂设计和安全运行提供试验依据和技术支撑。

1 试样制备与方法

本试验用球墨铸铁QT400与QT450均为本实验室铸造所得。立方体试块铸造工艺模型如图1所示, 改上部保温冒口为出气冒口, 从球化、孕育方面着手, 充分利用球墨铸铁石墨膨胀的补缩作用, 改善、解决球墨铸铁的缺陷。在浇注轮毂的同时, 浇注了两个边长300 mm的QT400与QT450立方体试块(模数为5 cm), 同样采用底注工艺。350 °C以下开箱, 在试块中间切取一片40 mm厚的试样, 测试其低温冲击韧性, 拉伸性能, 疲劳性能, 以及微观组织。试验用的原材料采用高纯生铁, 同时加入增碳剂增碳。运用热分析仪和光谱仪对C和Si进行控制, 将原铁液的成分控制在一定范围内, 铸造球墨铸铁QT400与QT450成分如表1所示。

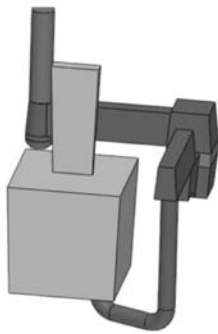


图1 球墨铸铁立方体试块铸造工艺模型

Fig. 1 The casting process model of specimens of wind power ductile iron cube test block

2 试验结果及分析

2.1 风电轮毂应力分布情况模拟

风电轮毂的失效形式主要分两类, 一类是在极限工况下, 在应力集中部位材料发生塑性变形和破坏;

表1 QT400与QT450球墨铸铁试样成分
Table 1 Nominal chemical composition of QT400 and QT450 specimens of wind power ductile iron

元素	QT400 (实测)	QT450	$w_B / \%$
C	3.71	3.65	
Si	2.09	2.36	
Mn	0.132	0.152	
P	0.023	0.022	
S	0.015 9	0.011 1	
Mg	0.051	0.058	
Cr	0.019	0.017	
Ni	0.008	0.584	
Mo	0.002	0.001	
Cu	0.015	0.007	
Al	0.009 7	0.013 3	
Ti	0.015	0.018	
V	0.004	0.004	
Nb	0.002	0.002	
B	0.000 4	0.000 5	
Ca	0.001 1	0.001 4	
Sb	0.007	0.006 1	
As	0.004	0.003	
Sn	0.003	0.003	
Pb	0.002	0.001	
Ce	0.005 3	0.004 5	
La	0.002 4	0.002 5	
Zn	0.001	0.001	
Bi	0.001	0.001	
Fe	93.884 7	93.608 2	

另一类是随机载荷作用下的疲劳破坏。对风电结构件的力学仿真及安全服役性能进行了系统研究评估。采用Hypermesh软件对风电结构件进行建模, 网格数量150 000+, 整体为空心球形, 3个法兰呈120°平均分布, 法兰盘中心有横梁, 有固定叶片的作用。另外两端则是需要连接主轴, 螺栓均呈环状分布, 如图2所示。

风电轮毂在运行过程中会受到来自三个叶片变桨轴的轴向力, 还需承受由低速轴施加的扭矩以及齿轮箱的重量和部分主轴的重量, 这些载荷对轮毂的结构强度均存在一定的影响。基于上述分析, 我们进一步采用Abaqus软件对其运行过程中应力分布进行数值模拟, 中心转轴半径800/1 020 mm, 扇叶根部半径1 040 mm, 载荷添加: 角速度0.3 rad/s, 如图3所示。

在扇叶带动的旋转中, 应力主要分布在根部施加剪切的位置, 以及中心孔附近, 且这些地方由于网格

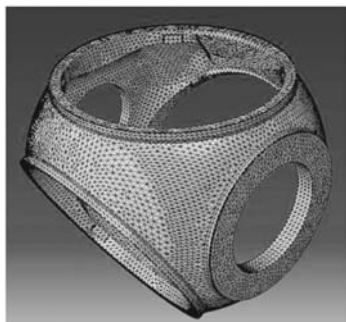
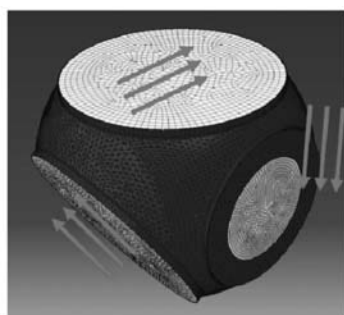
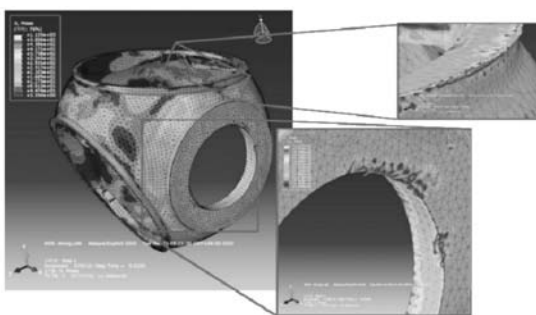


图2 风电轮毂结构件模型

Fig. 2 The structure model of wind turbine wheel hub



(a) 受力作用模拟仿真



(b) 运行过程中应力分布模拟仿真

图3 风电轮毂结构件模型运行过程中受力作用及应力分布模拟仿真

Fig. 3 Simulation of force action and stress distribution of wind turbine hub structural parts during model operation

度区间工作，所以对其在低温条件下工作时的性能研究非常有必要。风能发电机组球墨铸铁轮毂的低温冲击韧性是在使用中一个非常重要的性能指标，几乎每个风电球墨铸铁件生产厂商在产品出厂前均要求对其产品进行低温夏比缺口冲击试验，只不过不同的产品被测试的温度不同而已。本文采用GJB 150.5A—2009国标对Q400与Q450球墨铸铁样品进行低温冲击试验。球墨铸铁的低温性能指标主要取决于其低温冲击韧性，以风能发电机组球墨铸铁轮毂为例，合格的产品一般要求其-20℃的低温冲击韧性要在12 J/cm²以上。

本文开展的低温冲击试验所用球墨铸铁试样尺寸为：长5.5 cm，宽1 cm，高1 cm，表2与表3分别给出了QT400与QT450在-20℃与20℃下冲击试验结果，

表2 QT400球墨铸铁试样在-20℃与20℃温度下冲击试验结果
Table 2 The experimental results of impact test of cast ductile iron QT400 alloys at -20℃ and 20℃

试样序号	试验温度/℃	冲击功/J	冲击韧性/(J·cm ²)
1	-20	16	16
2	-20	16	16
3	-20	14	14
1	20	18	18
2	20	16	16
3	20	16	16

质量问题，出现网格畸变（此处应力云图上限为500 MPa）。可以看出应力主要集中在法兰盘处和主轴连接处。主要应力分布在350 MPa上下，畸变处应力最大，达到1 155 MPa。MW级风能发电机组球墨铸铁轮毂是连接其三根叶片和主轴的重要受力部件，因此对高力学性能的球墨铸铁材料需求迫切，尤其具有长高周疲劳寿命的球墨铸铁材料成为行业进一步发展的关键所在。

2.2 风电球墨铸铁低温冲击韧性评估

通常情况下风能发电设备一般都在-20~20℃的温

表3 QT450球墨铸铁试样在-20℃与20℃温度下冲击试验结果
Table 3 The experimental results of impact test of cast ductile iron QT450 alloys at -20℃ and 20℃

试样序号	试验温度/℃	冲击功/J	冲击韧性/(J·cm ²)
1	-20	16	16
2	-20	16	16
3	-20	18	18
1	20	18	18
2	20	18	18
3	20	16	16

QT400与QT450在-20~20℃区间低温冲击韧性非常稳定，QT400与QT450在-20~20℃区间的低温冲击韧性均高于14 J以上，可以满足其在低温条件下的工作需要。

2.3 风电轮毂试验件的高周疲劳性能评价

风电轮毂的受力十分复杂，表现在风力是时刻变化的，时大时小。这样就使风电轮毂所受的力不是恒定力，这使风电轮毂产生疲劳现象，出现裂纹缺陷，造成疲劳失效。风电风电轮毂工作的载荷多在屈服强度以下，风电轮毂运行过程中重复受到应力的作用，发生疲劳破坏，因此开展风电轮毂的高周疲劳试验是十分必要的。所得出的试验数据结果可以估算出材料是否适合在这种复杂条件下制成风电球墨铸铁件。为

保证风电球墨铸铁 QT400与QT450能够完全满足风机安全工作15~20年的要求。根据风电球墨铸铁件实际的工作情况，分析出风电球墨铸铁件的实际受拉力以及扭转力等的影响。因此疲劳试验主要以风电球墨铸铁件受拉拉单一作用力下的疲劳情况，进行了拉-拉高周疲劳。

本文采用拉-拉高周疲劳试验是在PW3-10程序控制高频万能疲劳试验机上进行的。采用轴向拉-拉不对称应力改变的高周疲劳试验，应力比 $R=0.1$ 。风电球墨铸铁拉伸与高周疲劳试验试样形状与尺寸如图4所示，试验环境为静态空气介质，试验温度为室温。

QT400（图5a）与QT450（图5b）的应力-应变曲线显示QT400的屈服强度为220 MPa，抗拉强度为368 MPa，最大应变量为30%；而QT450的屈服强度为386 MPa，抗拉强度为495 MPa，最大应变量为34%，

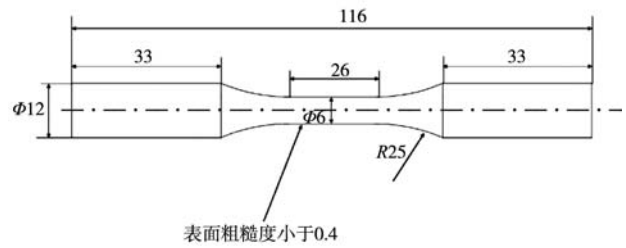
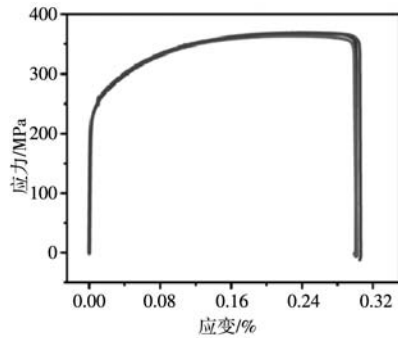
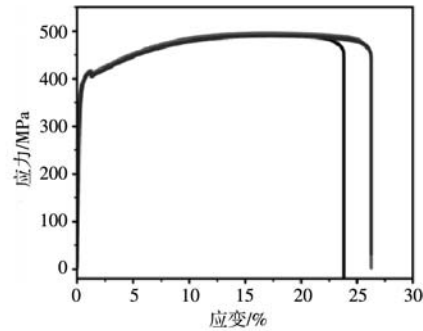


图4 风电球墨铸铁拉伸与高周疲劳试验试样形状与尺寸示意图
Fig. 4 Schematic diagram of shape and size of tensile and high cycle fatigue specimens of wind power ductile iron

两种材料均符合球墨铸铁国标要求。QT400（图6a, b）与QT450（图6c, d）的拉伸断口形貌SEM结果显示两种材料断口均为韧性断裂，断口处发现球墨铸铁内部孕育了大量球形石墨颗粒，与QT400合金相比，



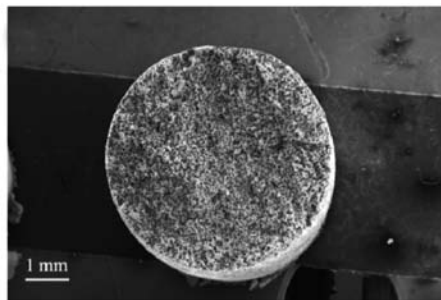
(a) QT400



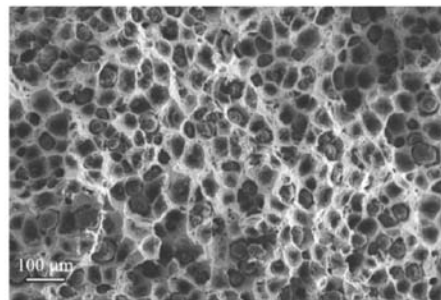
(b) QT450

图5 QT400与QT450球墨铸铁试样的常温力学性能

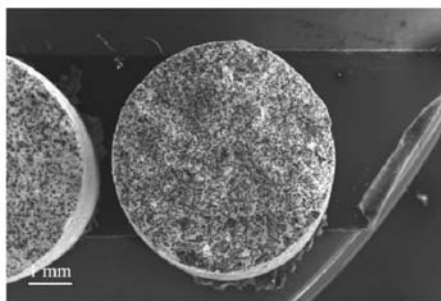
Fig. 5 The mechanical properties of the QT400 and QT450 specimens of wind power ductile iron at room temperature



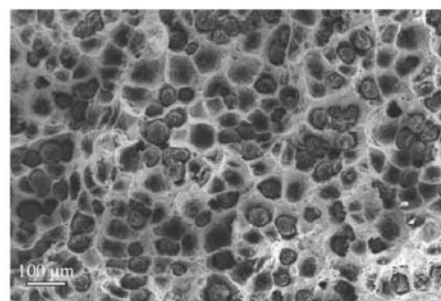
(a) QT400低倍



(b) QT400高倍



(c) QT450低倍



(d) QT450高倍

图6 QT400与QT450球墨铸铁试样的拉伸断口SEM照片

Fig. 6 The scanning electron microscope photos of tensile fracture surfaces of QT 400 and QT 450 specimens of wind power ductile iron

QT450合金所孕育的石墨更规则，球形度更好，这也是其拉伸性能提高的主要原因。

S-N曲线是根据材料的疲劳强度试验数据得出的应力 S 和疲劳寿命 N 的关系曲线。图7是风电QT400与QT450球墨铸铁件的S-N曲线，曲线反映了风电球墨铸铁件在不同应力下的高周疲劳寿命。对于QT400来说，载荷在320~240 MPa范围内疲劳寿命(S-N)曲线呈现连续下降的变化趋势。此区域内随着施加在试样上的载荷的减少，疲劳寿命逐渐增加，证明在此区域内材料的寿命受到外力的影响较大。载荷在240 MPa时，相对应的疲劳寿命为 10^7 。由于此点在平直区间，即使再增加很小的力寿命也会急剧减小到 10^7 以下。因此，可以认为240 MPa已经为QT400的疲劳极限。然而对于QT450来说，载荷在420~320 MPa范围内疲劳寿命(S-N)曲线为一条连续下降的趋势。载荷在320 MPa时，相对应的疲劳寿命为 10^7 。因此，可以认为320 MPa已经为QT450的疲劳极限。与QT400球墨铸铁试样相比，QT450具有更长的高周疲劳寿命，进一步满足我国风力发电行业对风电轮毂用高屈强比、长高周疲劳寿命球墨铸铁的迫切需求。

图8给出了QT400与QT450两种试样高周疲劳断口形貌，从断口形貌结果来看两种试样高周疲劳断裂形式相似，裂纹萌生主要发生在球墨铸铁缺陷较多的地方。疲劳源区是疲劳开始阶段试样中的位错在循环应力进行中吸收能量位错堆积形成微观裂纹，微观裂纹长大合并，形成宏观裂纹。在此区域可以看到明显的

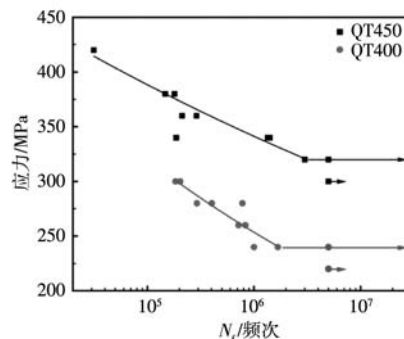


图7 QT400与QT450球墨铸铁试样高周疲劳S-N曲线
Fig. 7 The high cycle fatigue S-N curves of QT400 and QT450 specimens of wind power ductile iron

疲劳源区(图8b与图8d)。这主要是疲劳源区光亮程度最大，这是因为疲劳源区属于裂纹亚稳扩展过程，在此阶段断面在应力作用下不断摩擦挤压，相互咬合，因此比较光亮平滑。扩展区主要是在疲劳源区结束后，疲劳裂纹不断扩展所留下的痕迹。在近瞬断区域内裂纹不断积累，则会形成台阶，并且台阶面积比较大。根据断口的观察，可以看到在断口上存在着多个疲劳源区。但是疲劳源区的面积不同，先后顺序也不同。可以根据疲劳源区的面积判断疲劳源出现的先后顺序。在疲劳扩展的最后阶段，由于承载面积的减少，最后由于试样无法再承受载荷而发生瞬间断裂，在瞬断区域由于MW级风电轮毂球墨铸铁中存在着大量的石墨球，因此瞬断区多为韧窝，而且韧窝多存在于石墨球集中或畸变石墨周围。

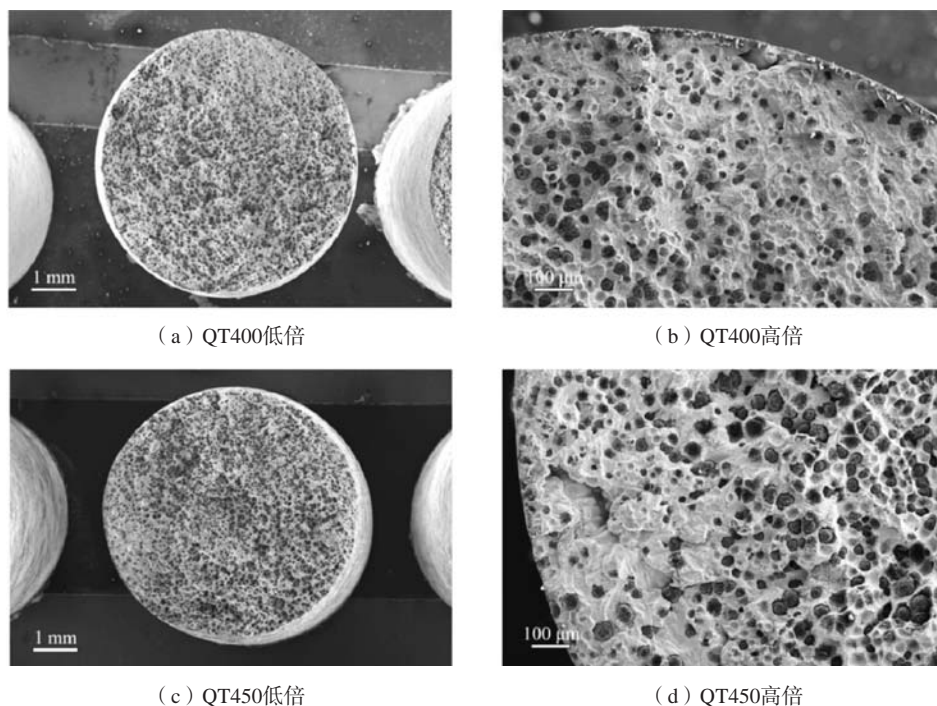


图8 QT400与QT450球墨铸铁试样高周疲劳断口形貌

Fig. 8 The scanning electron microscope photos of high cycle fatigue fracture surfaces of QT400 and QT450 specimens of wind power ductile iron

3 结论

(1) MW级风电轮毂球墨铸铁QT450拉-拉高周疲劳极限为320 MPa,是目前此类球墨铸铁件已报道拉-拉高周疲劳极限最高值。

(2) 根据球墨铸铁铸件疲劳断口结果可以发现在瞬断区域由于MW级风电轮毂球墨铸铁中存在着大量的石墨球,因此瞬断区多为韧窝,而且韧窝多存在于石

墨球集中或畸变石墨周围,因此球化的好坏是影响球墨铸铁拉-拉疲劳寿命的关键因素。

(3) 风电轮毂运行过程中应力分布模拟发现其应力主要集中在法兰盘处和主轴连接处。主要应力分布在350 MPa上下,畸变处应力最大,达到1 155 MPa,为MW级风电轮毂设计提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 龚文邦,白新社,刘金城.球墨铸铁的发展[J].现代铸铁,2019,39(4):22-27.
- [2] 王同光,秦海岩.2014—2023年中国风电产业发展成就及未来展望[J].太阳能,2024(7):31-39.
- [3] 温长浩.预疲劳对QT400球墨铸铁力学性能和微观组织的影响[D].烟台:烟台大学,2023.
- [4] 冯肥兴.铁素体球墨铸铁中石墨形态对力学性能的影响[J].中国铸造装备与技术,1999(1):46-48.
- [5] 车焕文,静婧.大型风电轮毂铸件用球墨铸铁的力学性能研究[J].铸造技术,2015,36(12):2937-2939.
- [6] 赵竞,王丽萍,冯义成,等.硅含量对耐热球墨铸铁显微组织和力学性能的影响[J].金属热处理,2022,47(9):227-333.
- [7] 焦晓渝.硅含量对连续铸造球墨铸铁显微组织和性能的影响[J].钢铁研究学报,2001(5):59.
- [8] DE LA TORRE U, LACAIZE J, SERTUCHA J. Chunky graphite formation in ductile cast irons: effect of silicon, carbon and rare earths [J]. International Journal of Materials Research, 2016, 107(11): 1041-105.
- [9] 李荣德,姜柯,曲迎东,等.Si、Ni元素对兆瓦级风电球墨铸铁件低温性能的影响[J].沈阳工业大学学报,2010,33(5):491-495.
- [10] 岳明,罗超.风电轮毂铸造技术研究[J].东方电气评论,2010,24(1):36-40.
- [11] 彭建中,刘玲霞,杨忠贤.大型风电球墨铸铁轮毂的质量控制[J].铸造,2010,59(9):969-972.
- [12] 赵悦光,田逢甲,郭敏,等.风电轮毂铸件铸造工艺设计研究[J].铸造技术,2022,43(3):229-232.
- [13] 王星,闫兴义,陈玉芳,等.大断面风电球墨铸铁铸件的技术控制[J].现代铸铁,2015(1):23-27.
- [14] 边辉,白洁,张瑞,等.风电机组关键零部件的寿命预估研究[J].环境技术,2024,42(7):177-183.
- [15] 张志春.双馈风力发电机组运行可靠性建模及若干相关问题研究[D].天津:天津大学,2017.

Comparison of High-Cycle Fatigue Properties of QT400 and QT450 Ductile Iron for MW Wind Turbine Wheel Hub

WU Tao^{1,4}, JIANG Yi-tong¹, CHEN Guang¹, SHUAI Xu¹, YANG Chen¹, GONG Qian-hai², MAO Peng-zhan³, GUI Wan-yuan⁴

(1. Department of Additive Manufacturing, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Jiali wind technology Co., Ltd., Hangzhou 311241, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310015, Zhejiang, China; 4. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract:

The ductile iron wheel of the MW wind turbine is an important stress component connecting its three blades and the main shaft. Because it often works in harsh environment, it needs to withstand the test of high impact force and low temperature environment, and it needs to serve for 15-20 years at an altitude of hundreds of meters without replacement, so it is of great significance to study its fatigue performance. In this paper, the low-temperature impact properties and high-cycle fatigue properties of QT400 and QT450 used for ductile iron blades of wind turbines are systematically studied, and the fatigue phenomenon is studied by combining fracture analysis to find out the main reasons for fatigue failure. Through the simulation of stress distribution in the operation of fan hub, the stress distribution law is obtained, which provides data support for its safe service.

Key words:

ductile iron; wind turbine hub; stress distribution; low temperature shock; high cycle fatigue