

QT700-10 风电主轴轴承 连接段铸造工艺试验

王 垒, 梁绍波, 李训佼, 徐水利, 黄连凯

(禹城宝利铸造有限公司, 山东禹城 251200)

摘要: 采用铁型外模、铁芯覆砂工艺, 制作了QT700-10球墨铸铁风电主轴轴承连接段铸件。检测了铸件本体金相组织、拉伸性能、疲劳性能和残余应力值。结果表明: 铸件球化等级达到2级, 石墨球大小为6~7级, 外表层抗拉强度为688.5 MPa, 断后伸长率为8.2%。铸件中值疲劳极限为271.6 MPa。铸态件内表层受拉应力, 应力值在112.3~210.8 MPa范围内; 铸态件外表层受压应力, 应力值在51~107.2 MPa范围内。经过550 °C × 12 h去应力退火后, 铸件残余应力值均低于40 MPa。

关键词: QT700-10; 金属型; 铸件应力; 疲劳强度

近年来, 随着风机设计向大型化、轻量化方向发展, 对铸件的力学性能要求越来越高, 在保证铸件拥有较高抗拉强度时, 还要有良好的塑性^[1-4]。风电主轴在使用中, 需要承受较大的扭转力矩, 前期主要选择锻钢材料, 近年来逐渐使用球铁来代替锻钢, 实现降本增效^[5-7]。铸件主轴材质主要有QT400-18AL、QT500-14, 两种材质均具有良好的塑性, QT400-18AL可同时满足零下30 °C的低温冲击; QT500-14通过硅固溶强化, 大大提高了基体的抗拉强度, 但由于硅量的增高, 使得韧脆转变温度大幅上升^[8-9], 经实测该材质零下20 °C的低温冲击均值在3 J左右。QT700-10材质通过控制基体组织, 细化晶粒, 使其具有一定的珠光体含量, 在显著提高抗拉强度的同时, 还能保持较高的延伸率, 实现了铸件的高强度和塑性指标^[10-13]。近年来, 已经开始在汽车平衡悬架总成铸件上应用, 但暂未应用于风电主轴类铸件。本研究希望通过制作QT700-10风电主轴轴承连接段关键铸件, 并测试铸件金相组织、力学性能、铸态残余应力, 探讨QT700-10风电主轴铸件的最佳生产工艺方案。

1 试验方案及过程

1.1 造型工艺

为节约成本, 同时能够试验出铸件实样材质情况, 选择主轴轴承连接段进行铸造工艺试验。该段为主轴受力关键区域, 壁厚超过290 mm, 对应模数为4.4 cm, 对力学性能、金相、疲劳性能都有较高的要求。造型选择树脂砂工艺, 其中外模选择铁型, 铁型厚度为铸件壁厚的70%~100%, 型芯采用铁型覆砂, 覆砂层厚度约为30~50 mm, 如图1所示。通过铁型的激冷作用, 来增加石墨球数, 细化晶粒, 提高力学性能指标。

1.2 熔炼工艺

生铁选用高纯生铁, 冷板压块废钢, 保证铁液微量元素在较低水平。炉料配比: 60%生铁+20%废钢+20%回炉料, 使用20 t中频电炉熔炼, 铁液重量10.5 t。铁液碳含量通过炉前热分析和红外碳硫分析仪控制, 其余成分使用直读光谱仪控制, 化

作者简介:

王 垒 (1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铸铁熔炼工艺及现场生产管理工作。E-mail: wsdnf008@126.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

07-0993-06

收稿日期:

2024-06-11 收到初稿,

2024-08-07 收到修订稿。

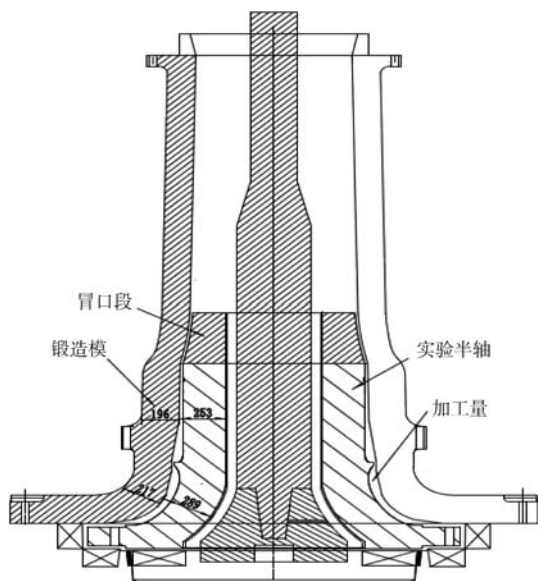


图1 主轴试件造型工艺方案

Fig.1 The molding process scheme for the test casting of the spindle

学成分设计如表1所示。

球化剂选用低稀土球化剂，稀土含量为0.4%~0.6%，镁含量为5.5%~6.5%，加入量1.0%~1.1%，粒度为4~32 mm。炉前孕育选用硅钡长效孕育剂，加入量0.2%~0.4%，粒度为3~8 mm，同时铁液中加入0.003%~0.005%的铈，以提高石墨球圆整度。使用堤坝式球化包，堤坝一侧凹坑依次放入球化剂、孕育剂、铈、孕育剂和铁屑，并适当紧实。球化处理采用冲入法，铁液高温静置完成后，降温到出炉温度1 420~1 460 ℃，一次出完所需铁液。待球化扒渣完成后，移至浇注位置进行浇注，浇注时同步进行瞬时孕育，瞬时孕育使用硫氧孕育剂，加入量为0.15%~0.2%，粒度为0.2~0.7 mm。球化孕育后铁液成分如表2所示。

1.3 拉伸性能和显微组织检验

对主轴试件进行解剖取样，解剖方案见图2，根据主轴受力特点，分别在位置2轴身外表层、位置3轴

表1 QT700-10化学成分设计
Tab. 1 Chemical composition design of QT700-10

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Fe	$w_B/\%$
3.5~3.7	2.4~2.6	≤0.3	≤0.03	≤0.012	0.03~0.05	0.2~0.3	0.2~0.3	余量	

表2 铁液化学成分
Tab. 2 Chemical composition of molten iron

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	RE	Fe	$w_B/\%$
3.625	2.53	0.3	0.021	0.007	0.049	0.3	0.3	0.005	余量	

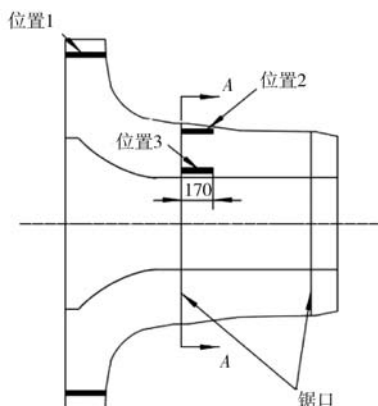


图2 主轴试件解剖取样方案

Fig. 2 Dissecting and sampling schemes for the test casting of the spindle

身内侧各套取6根试棒，试棒直径 $\Phi 25$ mm，长度为170 mm，每根试棒分别切取拉伸、金相试样，按照GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分：室温

试验方法》、GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》检验室温拉伸性能及金相。对比不同部位及冷却速度对铸件理化性能的影响，拉伸试棒的尺寸如图3所示。

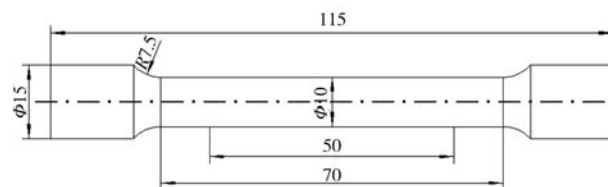


图3 拉伸试样

Fig. 3 Tensile sample

1.4 疲劳性能测试

在图2位置1法兰孔处套取13根疲劳试棒，按照GB/T 3075—2008《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》加工试样，形状如图4所示。根据风电主轴行业要求，采用升降法测试材料的疲劳极限，按照GB/T

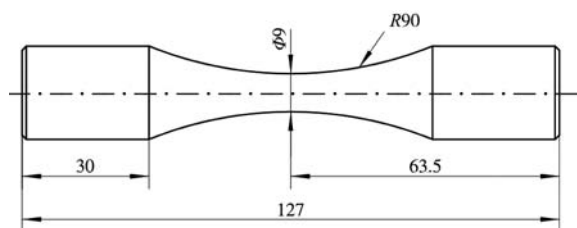


图4 高周疲劳试样
Fig. 4 High cycle fatigue sample

24176—2009《金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法》，计算出疲劳极限中值（50%存活率，置信度95%）。使用QBG-50型高频疲劳试验机，根据测试出的屈服强度，设置初始应力值为280 MPa，后续试棒的疲劳试验应力台阶为10 MPa，应力比 $R=-1$ ，试验频率为130~140 Hz，试样的疲劳循环次数达到 1×10^7 则试验通过，否则降低应力幅继续测试，直到全部13根试棒测试完成。

1.5 残余应力测试

采用盲孔法测试主轴试件残余应力，由于铸件内外冷却速度不一致，外表层冷却速度快，最终受压应力；内表层由于冷却速度慢，必定受拉应力。通常拉应力对铸件起到破坏作用，因此分别测试主轴试件内表层和外表层应力状况。

依据GB/T 3395—1992《残余应力测试方法-钻孔应变释放法》，在主轴试件内外表面各打磨10个测试点，测试点间距150 mm，打磨点粗糙度 $2.2 \mu\text{m}$ 。应力测试仪为HK21A，泊松比0.275，弹性模量176 GPa。在测试点贴应变花（电阻值120 Ω ，灵敏系数2.08），应变片一端钻取 $\Phi 1.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的小孔，使其应力释放，改变电桥平衡，测试出材料的应变值。依据应力计算公式（1）求出应力值。

$$\sigma_1 = \frac{E}{5A}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - \frac{E}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{4A}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \frac{E}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \quad (1)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \sigma_2 \quad (2)$$

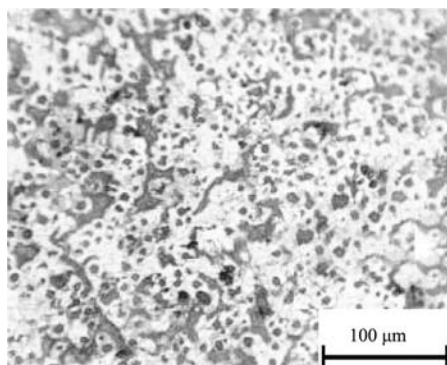
式中： E 为弹性模量， ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为三个方向上的应变， A 、 B 为释放系数， θ 表示 σ_1 与 ε_1 之间的夹角。由于铸铁件表面残余应力处于平面应力状态，应用第四强度理论计算出主轴试件内外表面各点的综合应力 σ_r 式（2），比较主轴试件残余应力大小^[14]。

2 试验结果及分析

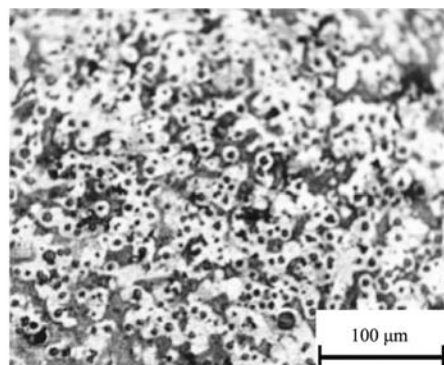
2.1 金相结果及分析

图5为主轴试件筒身的金相组织，从图中可以看出基体主要为铁素体（F）+珠光体（P）的混合组织，珠光体含量为30%~50%。其中主轴试件位置2（图5（b））的珠光体含量要高于主轴试件位置3（图5（a））的珠光体含量，铁型外模激冷条件要优于砂型，较快的冷却速度抑制了部分珠光体的分解，因此外表层的珠光体含量较高。

从图5可以看出球化等级为2级，并对多张金相照片中的石墨球直径及数量进行了统计，结果如图6所示。筒身位置2、3的组织中，石墨球大小主要集中在6~7级，其中，内层6~7级的石墨球占比能够达到81.3%，外层6~7级的石墨球占比则达到了95.4%。铁型外模明显提高了组织中6~7级石墨球的占比，降低了5级和8级大小差异较大的石墨球占比，这有利于促使石墨球尺寸更加均匀。



(a) 位置3筒身内层



(b) 位置2筒身外层

图5 主轴试件筒身金相组织

Fig. 5 Metallographic microstructures of the test casting barrel of spindle

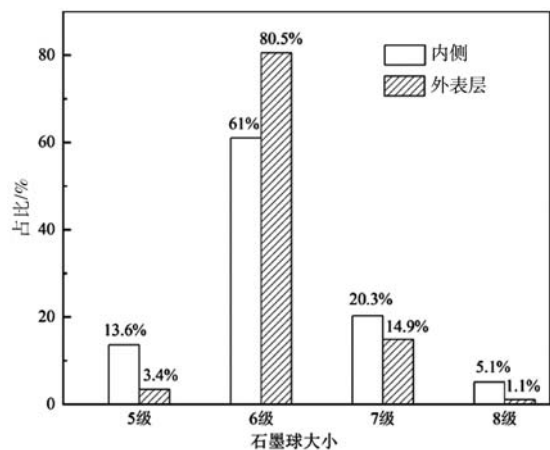


图6 石墨球大小等级及占比统计图

Fig. 6 Statistical diagram of graphite sphere size grades and their proportions

2.2 拉伸试验结果及分析

采用如图3所示尺寸的拉伸试棒进行拉伸测试，结果如图7所示。位置2的抗拉强度和屈服强度分别为688.5 MPa、426.2 MPa，断后伸长率为8.2%，位置3的抗拉强度和屈服强度分别为671.0 MPa、418.3 MPa，断后伸长率为7.5%。相对于铁芯覆砂，铁型外模具有更快的冷却速度，细化晶粒以及减少珠光体片层间距的效果更加明显。为提高主轴试件内表层的力学性能，可适当减少铁芯覆砂层的厚度，优化内侧的冷却条件，缩小内侧与外表层的性能差异。

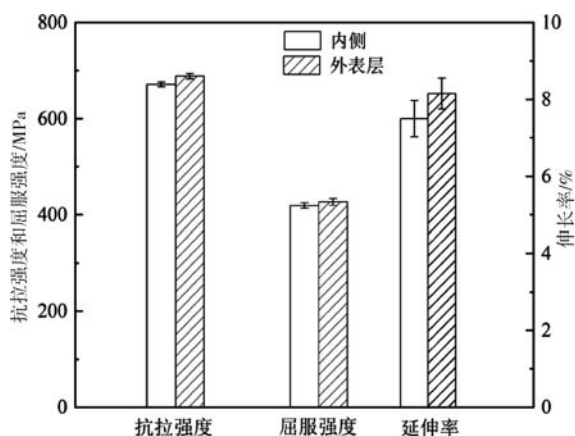


图7 主轴试件筒身不同位置拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties of different positions of the test casting barrel of spindle

2.3 疲劳试验结果及分析

具体疲劳试验数据见表3，根据公式（3）计算出中值疲劳强度：

$$\sigma_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3)$$

式中： n 为配成的对子总数； σ_i 为配成对子的两级应力水平的平均值。

表3 主轴试件疲劳试验数据
Tab. 3 Fatigue data of the test casting of spindle

序号	直径	应力	万次数
1	9.99	280	通过
2	10.01	290	155.9
3	10	280	629.8
4	9.85	270	通过
5	9.97	280	514.72
6	10	270	712.99
7	9.95	260	通过
8	9.98	270	614.35
9	9.99	260	通过
10	9.96	270	通过
11	9.95	280	137.28
12	10	270	118
13	9.96	260	通过

经计算，主轴试件50%存活率的疲劳极限为271.6 MPa，铸件的疲劳强度主要受石墨形态和大小、基体组织、内部缺陷、表面粗糙度影响。试验通过铁型激冷加快铸件凝固，减小临界形核尺寸，使得石墨球增多，晶粒细化，从而降低晶界偏析，提高断后伸长率和疲劳极限。同时混合基体组织，尤其是细化的珠光体片层间距，使得抗拉强度提高，裂纹不易萌生及扩展，同样提高了铸件的疲劳极限。

2.4 残余应力测试结果及分析

铸件热应力主要受材料本身的弹性模量、线收缩系数、材料的导热性及铸型的蓄热系数、铸件的壁厚差等因素影响。考虑主轴试件筒身结构，内腔热量不易散发，相比砂型铸造，铁型散热更快，引起的内外壁温差会更明显，导致主轴试件热应力的增加。图8为主轴试件应力测试点位置，测试数据如表4，根据数据显示，主轴试件内表层受到较大的拉应力，应力值在112.3~210.8 MPa范围内，超过抗拉强度的16%。外表层受压应力，应力值在51~107.2 MPa范围内。经过550℃×12h退火后，残余应力大幅下降，内外侧应力均低于40 MPa，降低了主轴试件变形和开裂的风险。

3 结论

通过QT700-10风电主轴轴承连接段铸造工艺试验及试件基体组织和各项性能检测和分析，得到以下

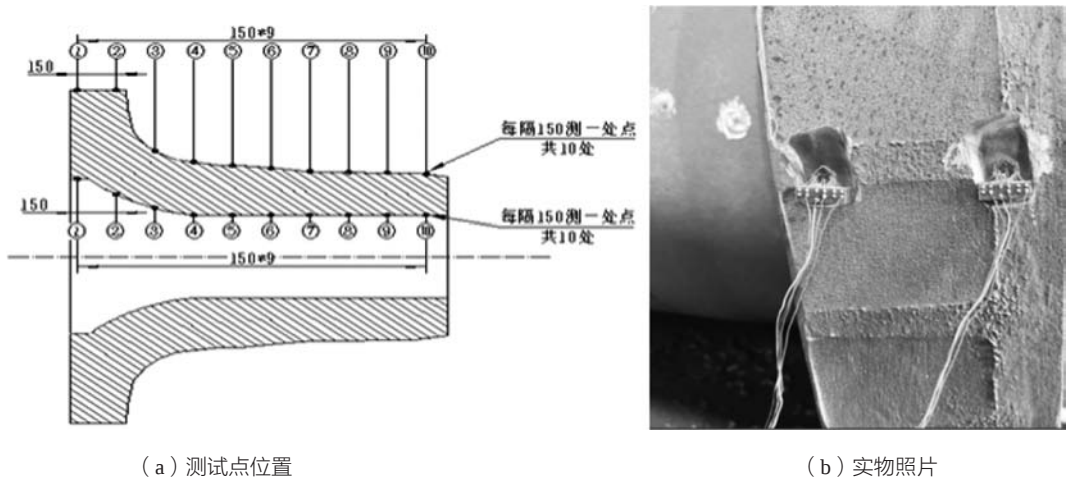


图8 主轴试件残余应力测试点
Fig. 8 Residual stress test points of the test casting of spindle

表4 主轴试件残余应力测试数据
Tab. 4 Residual stress test data of the test casting of spindle

w_B /%

序号	位置	铸态残余应力/MPa			退火态残余应力/MPa		
		σ_1	σ_2	σ_r	σ_1	σ_2	σ_r
1	内侧	217.89	102.99	188.8	38.2	33.04	35.9
	外侧	-20.5	-93.9	84.9	-20.5	-38.6	33.5
2	内侧	241.18	121.84	208.9	36.6	31.7	34.4
	外侧	-14.02	-93.87	87.7	-29.7	-39.89	35.9
3	内侧	134.22	37.99	119.8	38.5	25.4	33.9
	外侧	-78.93	-100.13	91.4	-25.6	-39.2	34.5
4	内侧	233.86	160.06	210.8	39.2	37.33	38.3
	外侧	-56.03	-63.53	60.1	-31.3	-39.9	36.4
5	内侧	127.4	38.76	113.1	36.7	28.9	33.5
	外侧	-48.55	-53.14	51	-26.5	-37.41	32.4
6	内侧	129.3	73.68	112.3	35.3	34.3	34.8
	外侧	-96.57	-115.33	107.2	-23.3	-40	34.8
7	内侧	171.5	102.53	149.5	37.9	28.2	34.1
	外侧	-70.68	-95.27	85.7	-18.4	-37.4	32.4
8	内侧	131.85	119.52	126.1	33.4	31.5	32.5
	外侧	-34.76	-74.95	65	-25.6	-38.8	34.2
9	内侧	134.22	37.99	119.8	36.1	29.8	33.4
	外侧	-48.45	-78.09	68.3	-22.7	-34.67	30.5
10	内侧	145.6	80.04	126.3	34.4	30.2	32.5
	外侧	9.4	-61.83	67	-29.2	-36.4	33.4

结论。

(1) 主轴试件基体为铁素铁(F)+珠光体(P)的混合组织,珠光体含量30%~50%,石墨球化率为2级,石墨球6~7级,外表层珠光体含量高于内表层,且石墨球径更细小。主轴试件外表层抗拉强度和屈服强

度分别为688.5 MPa、426.2 MPa,断后伸长率8.2%,内表层抗拉强度和屈服强度分别为671.0 MPa、418.3 MPa,断后伸长率为7.5%。经计算,主轴试件50%存活率的疲劳极限为271.6 MPa。

(2) 铁型外模和覆砂铁芯对铸件冷却速度影响不

同,导致主轴试件内外层温差增大,铸件残余应力增加。主轴试件外层受压应力,应力值在51~107.2 MPa范围内,内表层受拉应力,应力值在112.3~210.8 MPa范

围内。经过550 ℃×12 h退火后,试件残余应力大幅下降,内外表层残余应力均低于40 MPa,降低了主轴试件变形和开裂的风险。

参考文献:

- [1] 钟杰,吕杏梅,巫发明,等.大型风电机组主轴轴承座轻量化设计与研究[J].风能,2020(3):80-83.
- [2] 刘金增,韩佳,江鹏,等.风电机组轴承座轻量化设计[J].计算机辅助工程,2022,31(1):45-49.
- [3] 唐斌,阳雪兵.风电铸件用高强高韧球墨铸铁材料的研发与应用[J].铸造工程,2023,47(3):30-33.
- [4] 俞旭如,李川度,蔡佳佳.风电球墨铸铁件生产技术及最新发展[J].现代铸铁,2011,31(3):21-26.
- [5] 郭亮,王永锋,秦斌,等.一种高性能42CrMo4风电轴承锻件的制造开发[J].锻造与冲压,2023(13):59-64.
- [6] 张年玉,陶元亮,叶青,等.风电低温球铁铸件铸造工艺综述[J].铸造技术,2012,33(2):195-199.
- [7] 苏俊齐,张伟,马金哲,等.风电铸件球墨铸铁材料的发展现状与趋势[J].铸造技术,2023,44(12):1144-1151.
- [8] 葛春丽,黄连凯,宋培龙,等.QT500-14风电主轴的铸造工艺开发[J].铸造,2023,72(11):1467-1471.
- [9] 孙玉福,于广文,崔金鹤,等.硅对铸态厚断面高韧性球墨铸铁组织及性能的影响[J].铸造,2008(2):114-116.
- [10] 柳建国,曾大新.铸态QT700-10技术初探[J].铸造,2014,63(5):507-509.
- [11] 张军,文宏,郑言彪,等.铸态QT700-10球墨铸铁的研制[J].现代铸铁,2020,40(6):11-13.
- [12] 张欠欠,陈礼年.铸态QT700-10球墨铸铁的研制[J].现代铸铁,2021,41(5):1-3.
- [13] 国林钊.高强度高伸长率球墨铸铁材质(QT700-10)研究[D].济南:山东大学,2016.
- [14] 卢献忠,吴润,陆芳芳,等.球墨铸铁件残余应力的测量和消除[J].铸造,2012,61(4):431-433.

Casting Process Test of QT700-10 Bearing Join Segment for Wind Power Spindle

WANG Lei, LIANG Shao-bo, LI Xun-jiao, XU Shui-li, HUANG Lian-kai
(Yucheng Baoli Casting Co., Ltd., Yucheng 251200, Shandong, China)

Abstract:

The QT700-10 nodular cast iron wind power spindle bearing join segment casting was manufactured by process of metal mold and sand coated iron core. The metallographic structures, tensile properties, fatigue properties and residual stress values of the casting were examined. The results show that the spheroidization grade of the casting reaches level 2, the graphite sphere sizes are level 6-7, the tensile strength of the outer surface is 688.5 MPa, and the elongation after fracture is 8.2%. The mid-value fatigue limit of the casting is 271.6 MPa. The inner surface layer of the as-cast casting withstands tensile stress, and the stress values being within range of 112.3-210.8 MPa; the outer surface layer withstands compressive stress, and the stress values being within range of 51-107.2 MPa. After stress relief annealing at 550 ℃ for 12 h, all of the residual stress values of the casting are less than 40 MPa.

Key words:

QT700-10; metal mold; casting stress; fatigue strength
