

重型燃气轮机铸件的质量控制

吴铁明

(上海宏钢电站设备铸锻有限公司, 上海 200240)

摘要: 燃气轮机作为一种清洁能源发电设备, 其关键部件材质主要为球墨铸铁EN-GJS-400-18U-RT/LT及EN-GJS-400-15U, 铸件要求100%进行无损检测(MT, UT), 并以指定部位100 mm附铸试块作力学性能及金相检测。在生产实践中, 通过采用平稳的浇注系统、强化冒口补缩、加快冷却速度、精选炉料、对铁液进行增碳与预处理提高铁液冶金质量等工艺手段, 加强生产过程控制, 最终实现燃机铸件的国产化并形成批量化生产。

关键词: 球墨铸铁; 燃机铸件; 质量控制

中图分类号: TG255 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4977 (2018) 07-0626-04

Quality Control for Heavy-Duty Gas Turbine Castings

WU Tie-ming

(Shanghai Honggang Power Station Equipment Castings & Forings Co., Ltd., Shanghai200240, China)

Abstract: Gas turbine is clean energy power generation equipment, the key components of which are mainly made of ductile cast iron EN-GJS-400-18U-RT/LT and EN-GJS-400-15U, and the castings require 100% non-destructive testing (MT, UT), and 100 mm test lug is attached at the specified location for mechanical properties and metallographic examination. In the production practice, through using smooth gating system, enhancing feeding, accelerating cooling rate, selecting charge, improving the metallurgical quality of liquid iron by recarburizing treatment and pretreatment and other technical means, the production process control was enhanced to finally realize the domestic and mass production for the gas turbine castings.

Key words: ductile iron; gas turbine castings; quality control

由于全球能源消耗持续增长, 环保问题日益突出, 对能源工业提出了新的更高的要求, 尤其需要可靠性高、经济性好、环境污染少的动力设备来适应多方面的要求。因而在20世纪90年代, 世界燃气轮机产业进入了一个高速发展时期, 为了满足国内对燃气轮机电站建设的迫切需求、形成我国重型燃气轮机的制造产业, 上海电气明确了燃机新高地建设的目标, 提出了上海要建成一个综合性的能为用户全方位服务的燃机生产基地, 为实现上述目标, 笔者公司参与了F级重型燃气轮机关键铸件(以下简称燃机铸件)的国产化攻关。本文就燃机铸件的研制及生产质量控制作一简单论述。

1 燃机铸件的结构特点

燃机铸件共由6个部件组成(图1)。由图可见, 铸件结构复杂, 如压气机轴承下半在内圈轴承壁处有铸入油管, 透平轴承座五个支撑叶片为空心的, 出砂孔小。断面厚薄不匀, 如表1所示, 静叶持环最大壁厚为350 mm, 最小壁厚为72 mm, 壁厚差悬殊。



图1 F级燃机铸件

Fig. 1 F-class gas turbine casting

2 燃机铸件的技术验收要求

2.1 力学性能

F级燃机铸件的材质分别为EN-GJS-400-18U-LT(静叶持环、压气机轴承)、EN-GJS-400-18U-RT(透平轴承座)及EN-GJS-400-15U(径向轴承壳体), 属高强度、高韧性(或高塑性)球墨铸铁。性能要求分别

收稿日期: 2018-04-04收到初稿, 2018-06-08收到修订稿。

作者简介: 吴铁明(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造技术管理及其研发工作。E-mail: wutm2@shanghai-electric.com

表1 燃机铸件的主要尺寸及重量

Table 1 Main dimension of thickness and weight of the gas turbine castings

名称	外形尺寸/mm	最大壁厚/mm	最小壁厚/mm	浇注重量/kg	主要壁厚/mm
压气机轴承座上半/下半	4 008×2 004×1 267/1 891	170	36	18 700/20 600	90
静叶持环	3 114×1 557×3 040	350	72	31 600/31 600	150
透平轴承座	Φ4 296×1 254	126	35	19 300	126
径向轴承壳体	1 475×1 328×1 085	199	36	4 100	36

见表2及表3。对于EN-GJS-400-18U-LT以指定部位附铸100 mm试块检测力学性能并满足表2的要求。对于静叶持环、压气机轴承部件还需在上法兰处套料取样验证力学性能，力学性能满足表2中对应铸件壁厚大于200 mm的要求。

表2 EN-GJS-400-18U-RT/LT的力学性能要求

Table 2 Mechanical properties of EN-GJS-400-18U-RT/LT

材料性能	铸件壁厚/mm		
	T≤60	60<T≤200	T>200
屈服强度/MPa	≥250 (RT) ≥230 (LT)	≥240 (RT) ≥220 (LT)	≥220
抗拉强度/MPa	≥390	≥370	≥350
伸长率/%	≥15	≥12	≥10
室温冲击功/J	≥14*	≥12**	≥10***
低温冲击功/J	≥12(-20℃)**	≥10(-20℃)***	≥10(-20℃)***

注：RT=室温（EN-GJS-400-18U-RT）；2）LT=低温（EN-GJS-400-18U-LT）。*三个试样的平均值，其中单个最低值至少为9 J；**三个试样的平均值，其中单个最低值至少为9 J；***三个试样的平均值，其中单个最低值至少为7 J。

表3 EN-GJS-400-15U的力学性能要求

Table 3 Mechanical properties of EN-GJS-400-15U

材料性能指标	铸件壁厚/mm		
	T≤60	60<T≤200	T>200
屈服强度/MPa	≥250	≥240	≥220
抗拉强度/MPa	≥390	≥370	≥350
伸长率/%	≥14	≥12	≥10

2.2 金相组织及无损检测

石墨VI或V+VI，石墨大小5~8级。珠光体含量小于等于10%，铸件需100%超声波（UT）、磁粉检测（MT）及外观检测（VT），热处理后的声速 $v \geq 5\,500$ m/s；铸件浮渣层厚度控制在壁厚的5%以内。检测结果需满足TLV411106及TLV802880的要求，尤其在检测图中网格位置所示的法兰、吊轴、内腔等部位不能存在超过标准的浮渣、夹杂、缩松等缺陷。

3 燃机铸件的生产难度

力学性能以指定部位100 mm附铸试块验收，试块尺寸超出标准规范，相当于提高了材料的性能标准，并要在铸件指定部位套料验证；铸件壁厚不均匀，补缩困难，容易产生缩松缺陷；要保证铁液的纯净度及充型平稳性确保铸件中的浮渣不超过铸件壁厚的5%。铸件热处理后的声速不低于5 500 s/m。

4 生产控制

4.1 铸造工艺控制

浇注系统。有资料显示，球墨铸铁宜采用大流量低流速的浇注方法。分析燃机铸件的结构特点及技术的要求，铸件宜采用充型相对较平稳的底注式浇注系统，降低充型紊流程度，有利于型腔排气。同时采用过滤网，避免一次渣和夹杂物进入铸件型腔，降低充型紊流程度，减少二次渣，从而降低铸件的浮渣。浇注系统各截面比为 $\Sigma F_{内}:\Sigma F_{横}:\Sigma F_{直}=1.3\sim 1.5:1.1\sim 1.2:1$ ，需要注意的是设置过滤网位置的浇道截面可适当放大，一般为原截面的4~6倍。内浇道应均匀分布，避免局部过热。

冒口补缩。厚断面球墨铸铁的凝固方式由经典糊状凝固向以网状为主的海绵状凝固方式过渡，容易产生缩孔（松）缺陷。燃机铸件的平均模数都大于2.5 cm，根据卡塞理论^[1]可以采用无冒口工艺方案，利用石墨化膨胀消除缩孔（松）。考虑到无冒口铸造工艺对铁液的熔炼质量、砂型强度和刚度、浇注温度等有严格的要求及生产中出现的某些工艺偏差，为保证质量，在工艺设计时设置安全冒口，并采用发热保温冒口提高液态补缩能力。

冷铁。厚断面球墨铸铁共晶凝固时间长，因“断面效应”导致石墨变态，性能恶化；同时在热节等部位容易产生收缩性缺陷，所以选择铸件热节等重要部位安放冷铁，增加铸件凝固时的温度梯度，人为的变阶梯凝固为方向性的逐层凝固。根据凝固顺序要求，结合铸件模数体积份额图和实际冒口分布位置，通过冷铁调整铸件的温度场，以满足凝固顺序的要求，冷铁布置时注意冷铁的间距和排列方式。

经过对实际铸件试制中所产生的铸件凝固过程发生铸造收缩性缺陷，通过浇注大量不同壁厚铸件试样与模拟样件进行研究与试验，总结出冷铁的尺寸按下式确定：

$$W_c = 1.39 \times [(M_0 - M_1) / M_1] \times G \quad (1)$$

式中： W_c 为冷铁重量，kg； M_0 为铸件原模数，cm； M_1 为使用冷铁后铸件的等效模数，cm； G 为安放冷铁位置的铸件重量，kg。

图2为压气机轴承的工艺简图。

4.2 熔炼质量的控制

精选生铁及废钢原料,减少铁液杂质元素和有害元素的含量,降低其对材料组织和性能的影响。国内外的生产实践表明,生产厚壁高韧性的球墨铸铁,特别是要求低温(-20℃以下)冲击性能的铁素体球墨铸铁,必须使用高纯度的原材料,即选择干扰球化元素(如Ti、Pb、Bi、Sb、As、Zn)、稳定基体珠光体元素(如Mn、Cu、Sn)及形成碳化物元素(如V、Cr、Mo)含量低的材料,这些元素的总和 $\Sigma T < 0.10\%$ 。表4为不同杂质元素含量对力学性能的影响,由表4可见,当杂质元素的含量大于0.1%,虽然强度及塑性满足表2的技术要求,但韧性受到很大的影响,即使通过二次热处理后,冲击性能仍然满足不了表2的技术要求,平均在7~8 J。当杂质元素的含量小于0.1%时,冲击性

能稳定满足表2技术要求,平均在13~15 J。与此同时,为降低浮渣及氧化夹杂,在熔炼前需对原材料进行除锈处理。

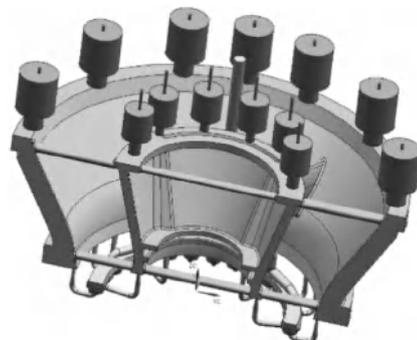


图2 压气机轴承的工艺简图

Fig. 2 Casting process for compressor bearing

表4 不同杂质元素含量对力学性能的影响

Table 4 Effect of different content of impurity elements on mechanical properties

炉号	力学性能				备注
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击功(-20℃)/J	
20-10-129	259	421	24.0	7, 7, 8	杂质元素量0.28%、二次热处理
20-1-28	287	419	25.0	6, 8, 9	杂质元素量0.28%、一次热处理
20-5-7	238	378	25.8	12, 14, 14	杂质元素量0.082%
20-6-37	255	394	20.0	14, 15, 15	杂质元素量0.068%

采用增碳及铁液预处理技术。厚断面球铁因断面厚大,结晶过程中释放大量能量,散热慢,使冷却速度降低,共晶凝固时间延长,致使石墨球数减少,球径增大,石墨形态恶化。利用晶体型石墨增碳剂对铁

液进行预处理可以使铁液中的石墨以“C的微小集合体”^[9]的状态存在,形成强烈的浓度起伏,提高形核率,增加石墨球数,改善球化率。表5为经过增碳及预处理工艺后燃机铸件的性能与组织。

表5 经过增碳及预处理工艺后燃机铸件的性能与组织

Table 5 Properties and microstructure of casting after recarburization and pretreatment

炉号	力学性能				金相组织			
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击功(-20℃)/J	球化率等级	石墨等级	珠光体/%	磷共晶/%
10-2-91	240	395	26.2	15/16/15.2	VI	7	<5	<1
20-1-3	260	415	23.4	12/12/13	VI	7	<5	<1
20-1-10	255	405	23.4	13/13/14.5	VI	7	<5	<1
20-1-60	257	393	27.0	14/14/15	VI	7	<5	<1
20-1-68	225	371	29.2	18/18/18	VI	7	<5	<1

过热处理。铁液的高温处理和均匀化,是获得优质铸件的重要前提。对铁液适当的高温过热处理,能消除炉料不利的“遗传”影响,细化石墨;清除铁液中的非金属夹杂物和气体,净化铁液。但过热处理应避免过热过度,造成碳量的降低,铁液晶核减少,过冷度增加。一般情况下过热温度在1 480~1 500℃之间,过热时间小于10 min。

4.3 生产过程控制

燃机铸件验收标准严格,验收时需要与西门子公司一起联检。按照燃机铸件技术采购规范的要求,在开始铸造生产之前,应向用户提供制造与检验程序计划(MIP),即制定操作过程的质量保证程序,它包括

每个生产步骤的工艺程序、所应用的技术文件及质量控制要求。依据MIP,制定每一道工序的操作及检验控制细则。在实际生产过程中,制造与检验程序计划(MIP)的贯彻执行,对燃机铸件的质量控制起到了很好的作用。

5 结束语

经过二年多的生产试制,上述燃机铸件的力学性能及金相组织满足材料EN-GJS-400-18U-LT/RT及EN-GJS-400-15U的要求。无损检测及尺寸检测结果基本满足TLV411106及TLV802880的要求。铸件的声速均 $\geq 5\,500$ m/s的要求。

对于高品质球墨铸铁件的生产不仅要注重铸造工艺及铁液的熔炼质量，同时也要编制严密的制造与检验程序计划，并辅以分解落实细化，做好每一工序的铸造工艺操作记录卡，确保每一工序精益求精，才能保证高品质球墨铸铁件的质量。

参考文献：

- [1] S.I.卡赛.球墨铸铁的浇口与冒口 [M]. 白天申等译, 北京: 清华大学出版社, 1983.
- [2] 星山康洋, 林尤栋, 三宅秀和.增碳铸铁熔液的特性与凝固行为 [J]. 铸造技术, 2007, 28 (7): 895-898.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2018年第7期)