

超低温球墨铸铁件的生产过程控制及技术研究

朱正锋, 喻光远, 封雪平, 穆彦青, 邓 晗

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 介绍了2种-40℃超低温球墨铸铁QT400-18L和QT500-7L产品的铸造工艺、造型工艺、熔炼工艺及量产质量控制等生产过程的关键控制工序。-40℃超低温球铁铸件综合成品率可以稳定控制在92%以上。在-40℃超低温球铁基础上, 进一步研究了硅、锰、磷及硫对-60℃超低温球铁冲击韧性的影响, 并对影响规律进行了分析。

关键词: -60℃超低温; 铸造工艺; 低温球铁; 冲击韧性

近年来, 我国轨道交通产业取得了举世瞩目的成绩, 高铁、动车、机车、城轨等电力机车运行的地域辽阔, 纬度跨度大, 寒冷地区冬季的温度可达到-40℃以下, 基于机车运行速度及安全上的考虑, 对电力机车用球墨铸铁齿轮箱体等铸件的低温冲击韧性的要求也越来越高^[1-2], 促进了-60~-40℃超低温球墨铸铁的快速发展。中国铁路总公司发布的铁标TJ/JW 065—2015《交流传动机车球墨铸铁齿轮箱暂行技术条件》和中国铸造协会发布的团体标准T/CFA 02010103-1—2020《轨道交通用低温铁素体球墨铸铁件》, 规定了-40℃超低温球墨铸铁技术指标。本文主要介绍我公司在-40℃超低温球墨铸铁件的生产过程控制技术以及-60℃超低温球铁冲击韧性的技术研究。

1 -40℃超低温球铁件的生产过程控制

1.1 产品技术要求

1.1.1 城轨齿轮箱

材质EN-GJS-400-18LT, 材料力学性能要求见表1。齿轮箱体整体结构仿圆形设计, 铸件如图1所示, 主体壁厚为8~12 mm左右, 重量130~170 kg。铸件关键部位表面质量满足EN 1369: 1997规定1~2级, 内部质量满足ASTM E 446或ASTM E 186规定的2级。

表1 材料力学性能要求

Table 1 Mechanical properties requirements of materials

材料 牌号	抗拉强度 R_m /MPa	规定塑性延伸 强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长 率A/%	-40℃冲击吸收 能量KV ₂ /J
EN-GJS-400-18LT	400	240	18	≥12 (三个试样平均值) ≥9 (单独试样)
EN-GJS-500-7LT	≥500	≥320	≥8	≥4 (三个试样平均值) ≥3 (单独试样)

1.1.2 机车齿轮箱

材质EN-GJS-500-7LT, 材料力学性能要求见表1。铸件如图2所示, 主体壁厚10~16 mm, 最大壁厚88 mm, 铸件重量290~390 kg。铸件表面质量不低于EN 1369: 1997规定的2级要求。内部质量按ASTM E 446或ASTM E 186规定的3级质量等级进行

作者简介:

朱正锋(1978-), 男, 教授级高工, 硕士, 从事铸造技术工艺及新材料研究和管理的工作。E-mail: zhuzhengfeng@163.com

中图分类号: TG143.5

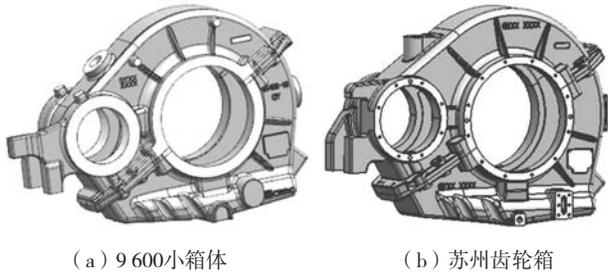
文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1636-06

收稿日期:

2023-05-26 收到初稿,

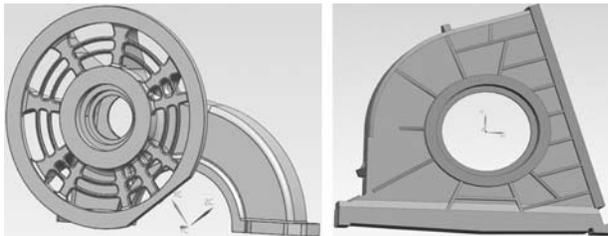
2023-08-14 收到修订稿。



(a) 9 600小箱体 (b) 苏州齿轮箱

图1 城轨齿轮箱体产品结构图

Fig. 1 Product structure diagram of rail gear box



(a) 威机30吨轴重上箱体 (b) 威机30吨轴重下箱体

图2 机车齿轮箱产品结构图

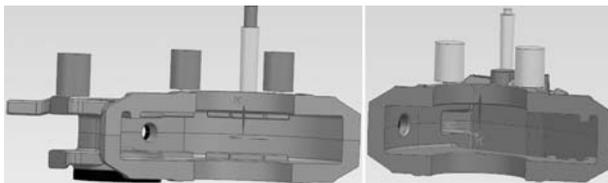
Fig. 2 Product structure diagram of locomotive gear box

评定。

1.2 铸造工艺

1.2.1 城轨齿轮箱

采用半封闭式浇注系统， $\sum A_{内} : \sum A_{横} : \sum A_{直} = 0.8 : (1.2 \sim 1.5) : 1^{[3]}$ 。阻流断面在内浇道上，横浇道断面最大。由于横浇道断面大，金属液在横浇道中流速减小，充型的平稳性及对型腔的冲刷力都优于封闭式。通过模拟计算，工艺静压头设置为200 mm较为合理，充型平稳，无喷射、飞溅和“铁豆”现象，有效避免了二次氧化和卷气问题；在上下法兰、上轴承孔等部位设置冒口，在合箱面和下轴承等部位设置冷铁，有效解决了缩孔缩松问题，铸造工艺如图3所示。



(a) 9 600小箱体上箱体 (b) 9 600小箱体下箱体

图3 上、下箱体铸造工艺图

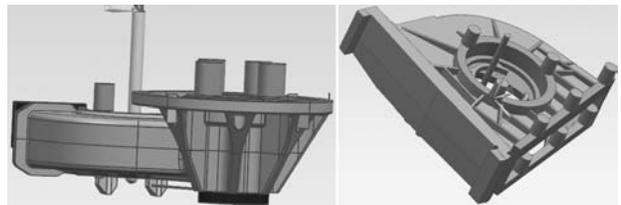
Fig. 3 Casting process diagram of upper and lower box

1.2.2 机车齿轮箱

采用合箱面双侧底注工艺，充型平稳，整个薄壁区域温度场更加均衡，铁液趋于同时充满电机法兰筋条，避免了浇道远侧产生冷隔的风险；同时通过合理的设计冒口、冷铁，实现了对电机法兰一侧轴承孔与

侧面加强筋局部交叉热节的补缩，解决了铸件关键部位的缩孔缩松缺陷，铸造工艺见图4所示。

在铸件上开设两层内浇道，上层4个，下层6个，内浇道薄而宽且分布均匀。金属液首先由最底层内浇道充型，随着型内液面上升，自下而上顺序流经各层内浇道。该种设计充型平稳，型腔内气体排出顺利。充型后，上部金属液温度高于下部，有利于顺序凝固和冒口的补缩，铸件组织致密。在试验开发过程中，避免缩孔、缩松、冷隔及浇不到等铸造缺陷。利用多内浇道，减轻内浇道附近的局部过热现象。厚大部位采用发热保温冒口，次厚部位使用外冷铁（图4）。



(a) 威机30 t轴重上箱体 (b) 威机30 t轴重下箱体

图4 大轴重机车齿轮箱体铸造工艺图

Fig. 4 Casting process diagram of gear box of large axle load locomotive

1.3 造型工艺

铸型采用无氮呋喃树脂砂手工造型，原砂选用SiO₂含量高的大林砂，粒度为集中率为95%的40~70目三筛砂，微粉含量为0，见表2。粘结剂为改性的呋喃树脂，即环保的木香树脂^[4]。固化剂为低硫型固化剂，树脂加入量为砂重的0.9%~1.1%，固化剂加入量为树脂的30%~40%，因为木香树脂砂在1~24 h内强度随固化剂含量的增加强度波动小，在低固化剂含量下即可达到较高的强度，降低了固化剂的用量，减少硫化物排放，木香树脂基本性能参数见表3，低硫固化剂技术指标见表4。铸型刷2层涂料，底层为刚玉粉涂

表2 大林砂物性参数

Table 2 Physical property parameters of Dalin sand

SiO ₂ 含量/%	角形系数	微粉含量/%
> 95	1~1.2	0

表3 木香树脂基本性能参数

Table 3 Basic performance parameters of wood-flavored resin

密度 (g·cm ⁻³)	粘度 (mPa·s)	游离 甲醛/%	含氮 量/%	pH 值	含水 量/%
1.15~1.221 82	38~42	≤0.03	≤0.07	6.0	1.50

表4 低硫固化剂(XYGD-09)技术指标

Table 4 Technical index of low sulfur curing agent (XYGD-09)

密度/(g·cm ⁻³)	粘度/(mPa·s)	总酸度/(以H ₂ SO ₄ 计)	游离酸/%
1.3~1.6	≤40		40~44
			≤18

料, 表面为石墨酒精涂料。

1.4 熔炼工艺

1.4.1 化学成分

-40 °C超低温球铁材料主要化学成分见表5。

表5 -40 °C超低温球铁材料主要化学成分

Table 5 Main chemical composition of -40 °C ultra-low temperature ductile iron material

球铁种类	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni
QT400-18L	3.3~3.9	1.7~2.3	<0.2	<0.035	<0.02	0.02~0.05		0.3~1.2
QT500-7L	3.3~3.9	1.7~2.3	<0.2	<0.035	<0.02	0.02~0.05	0~0.3	0.5~1.5

表6 炉料的化学成分

Table 6 Chemical composition of the charge $w_B/\%$

炉料种类	C	Si	Mn	P	S	V	Ti
Q10生铁	4.39	0.54	0.06	0.022	0.013	0.01	0.03
高纯生铁	4.21	0.09	0.04	0.031	0.005	0.01	0.01
废钢	0.16	0.17	0.61	0.015	0.009		

入量0~50%。

(2) 熔炼, 先将废钢与增碳剂加入中频炉内, 然后加入生铁、回炉料、纯镍板, 待全部炉料熔化后撤除渣剂进行铁液扒渣, 当熔炼温度达到1 530~1 560 °C时进行高温静置、除渣, 再加入纯铜及硅铁, 待铁液温度达到1 500~1 530 °C待出炉球化;

(3) 球化及孕育处理, 球化剂、孕育剂(表7)和覆盖剂依次加入球化包坑内并春实压平, 加入比例分别为1.1wt%~1.3wt%, 0.5wt%~0.7wt%, 0.4wt%~1.0wt%, 采用冲入法盖包球化孕育工艺。铁液分2次出铁, 先出部分铁液直接冲入铁液包, 然后用包盖将铁液包盖住进行球化和包底孕育, 待包内球化反应结束后拿开包盖, 将包内孕育剂加入铁液包内, 包内孕育剂的加入量为铁液总量的0.7wt%~0.9wt%, 然后出完剩下的铁液; 出完铁液后, 对包内铁液进行搅拌、扒渣, 当铁液温度达到1 390~1 420 °C时进行浇注。

表7 球化剂、孕育剂化学成分

Table 7 Chemical composition of nodulizer and inoculant

项目	Si	Mg	RE	Ca	Ba	Al	MgO
球化剂	44~47	4.5~5.5	0.6~1.0	0.8~1.2		1.0	0.4
孕育剂	65~75		1~1.2	1.8~2.5	0.6~1.0		

(4) 浇注和保温处理, 球化孕育处理后, 铁液表面覆盖石棉挡渣进行浇注, 浇注过程中随流孕育, 加入量为0.1%~0.2%, 浇注结束后, 待铸型自然冷却至温度 ≤ 300 °C, 開箱落砂清理。

1.4.2 熔炼工艺

(1) 炉料配制, 按照产品对应的超低温球铁的化学成分称取所需量的专用Q10生铁、低温球铁用废钢(Q/QYSJ-386-2019)、晶体型石墨增碳剂、低温球铁回炉料、纯铜、纯镍、硅铁(表6), 其中回炉料的加

1.5 过程质量控制

1.5.1 标准化作业

将整个铸造过程细化为29个工序, 首件鉴定FAI、编制控制计划、PFEMA、工艺流程卡、作业指导书等标准作业文件, 受控下发严格记录执行。

1.5.2 制度化管

管理制度化: 从原辅材料、模具管理、批次管理、异常管理等多方面建立健全质量管理体系(图5)。

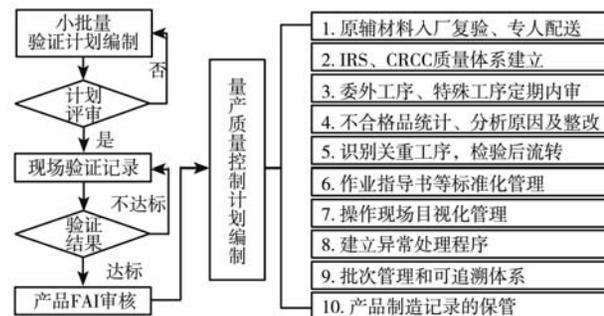


图5 量产质量控制计划图

Fig. 5 Mass production quality control plan

1.6 生产质量

通过对2018—2021年间生产的-40 °C低温球铁齿轮箱的生产质量进行统计。从表8可知, 对生产的43 789件-40 °C低温球铁齿轮箱进行磁粉探伤, 合格率100%; 射线探伤合格率97%以上, 材质合格率99%以上, 综合成品率92%以上。

表8 -40 °C低温球铁齿轮箱的生产质量统计
Table 8 Production quality statistics of -40 °C low temperature ductile iron gearbox

生产数量/件	CT合格率/%	RT合格率/%	材质合格率/%	综合成品率/%
43 789	100	97.87	99.85	92.75

2 -60 °C超低温球铁冲击韧性的技术研究

2.1 硅、锰、磷及硫对冲击韧性的影响

分别以QT400-18LT (-40 °C) 和QT500-7LT (-40 °C) 为基础, 关注温度进一步降低后, 在-60 °C条件下, 重点研究硅、锰、磷及硫4元素对材料低温冲击韧性的影响。3种试验材料的化学成分范围见表9, 基体组织分

别为大于95%以上的铁素体和以铁素体+珠光体的混合基体^[5], 见表10。使用100 kg的中频电阻炉熔炼, 试块均为25 mm壁厚标准Y型试块, 砂型采用呋喃树脂砂进行制作, 为了避免型砂中带入的杂质影响实验结果, 均采用新砂造型, 且刷涂防渗硫涂料。试块基体组织为球化率在95%以上, 球径大小在5级以上, 石墨球数量在100~300个/mm²。研究结果见图6-9。

表9 3种超低温冲击韧性试验材料主要化学成分范围
Table 9 Main chemical composition range of three ultra-low temperature impact toughness test materials $w_B/\%$

材料	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni
QT400-18L	3.3~3.9	1.6~2.3	0.05~0.25	0.03~0.18	0.003~0.02	0.02~0.05		
QT500-7L	3.3~3.9	1.6~2.3	<0.2	<0.03	0.003~0.02	0.02~0.05	0~0.3	0.5~1.5
QT600-7L	3.3~3.9	1.6~2.3	<0.2	<0.03	0.003~0.02	0.02~0.05	0~0.5	0.5~1.5

表10 3种超低温冲击韧性试验材质状态
Table 10 Material states of three ultra-low temperature impact toughness test

材料	状态	金相组织
QT400-18LT	退火态	>95F+少量P (主要为铁素体组织)
QT500-7LT	铸态	>60F+P (主要以铁素体为主, 铁素体+珠光体混合组织)
QT600-7LT	铸态	>60P+F (主要以珠光体为主, 珠光体+铁素体混合组织)

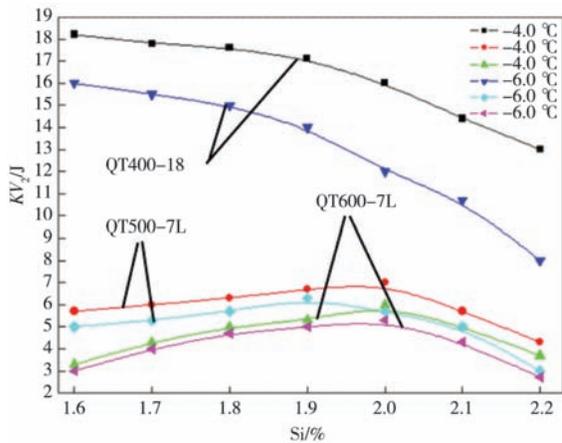


图6 Si与材料低温冲击性能的关系
Fig. 6 Relationship between Si and low temperature impact properties of materials

2.2 分析与讨论

如图6所示, 铁素体球铁QT400-18L的冲击韧性随着硅含量增加而降低, 当硅含量>1.9%时, 随着硅含量的增加, 其低温冲击韧性急剧下降, 且温度越低, 下

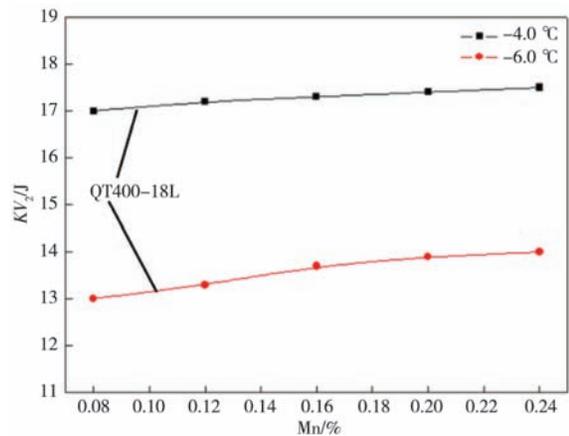


图7 Mn与材料低温冲击性能的关系
Fig. 7 Relationship between Mn and low temperature impact properties of materials

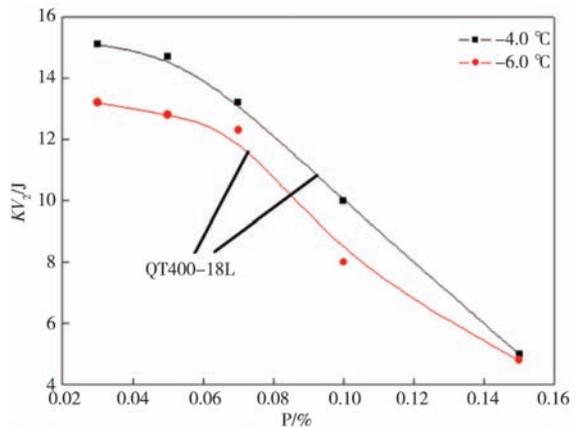


图8 P与材料低温冲击性能的关系
Fig. 8 Relationship between P and low temperature impact properties of materials

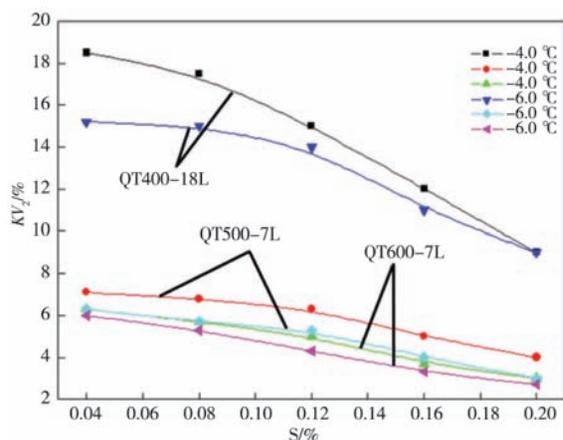


图9 S与材料低温冲击性能的关系

Fig. 9 Relationship between S and low temperature impact properties of materials

降的幅度越大。试验数据显示在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冲击功 $>12\text{ J}$ ，需硅含量控制在2%以下。混合基的QT500-7L的冲击韧性随着硅含量先增加而降低，试验数据显示 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击韧性较优的硅含量为1.9%~2%。Si在铸铁中存在两种偏析^[6]，一种是凝固过程中因溶质硅的分配系数的变化所造成的先凝固区域与后凝固区域的溶质差别（晶内偏析）。它是不稳定的偏析，是非平衡凝固的结果，可以通过高温扩散退火来消除，这种偏析对韧性影响不大。另外一种偏析是硅在晶界的偏析。这种偏析是由于硅能使晶界能降低，即由于能量的原因而自发导致的硅在晶界的偏析，且这种偏析是一个稳定的偏析状态，不能通过高温扩散消除。因此，严格控制硅的含量，防止过多的硅在晶界处偏析。

如图7所示，铁素体基的QT400-18L的冲击性能与其含量关联并不大且随着Mn含量的增加其冲击韧性缓慢提高。这与一些文献资料和以往的认识有较大差别，通常认为Mn会使低温球铁的韧性降低^[7-8]，但根据试验结果来看并非如此。Mn在铸态下具有促进珠光体形成的作用，但Mn并非是强碳化物形成元素，因此高温石墨化退火可将Mn的碳化物完全分解，使其对力学性能的作用消除。而Mn可与S结合形成高熔点的MnS颗粒，分布在基体组织中，在一定围内增加Mn含量可使S在组织中形成FeS的倾向减弱，从而降低S对性能的危害。由于试验温度越低，S对冲击韧性的影响越显著，因此当试验温度处于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，Mn对低温冲击性能的有益影响才较为明显的显现出来。在超低温球铁生产中，可适当提高Mn含量，可提高其冲击韧性的稳定性。

如图8所示，当P含量在0~0.15%的范围内变化时，QT400-18L铁素体基球铁的冲击性能随着磷含量增加而降低。当 $P<0.07$ 时，材料冲击韧性处于较高的水平，

试验材料在 $-60\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下均达到了12 J以上，当 $P>0.07$ 时，材料的冲击韧性快速下降。P在固态 $\alpha\text{-Fe}$ 中的最大溶解度为2.6%；随着温度降低，其溶解度也随之降低，在室温下约为 $w(P)=1.2\%$ 。并且P在Fe中的溶解度会随着碳含量的增加而降低，文献[6]介绍，当 $w(C)=3.5\%$ 时，P的溶解度只有 $w(P)=0.3\%$ 。而按照目前的成分体系，材料中的C、Si、Ni等元素均会降低P的溶解度。因此，当P含量超过其溶解度，就会出现新相 Fe_3P ($w(P)=15.6\%$ ， $w(\text{Fe})=84.4\%$ ，熔点 $1\ 166\text{ }^{\circ}\text{C}$)。 Fe_3P 可以和 Fe_3C 以及含C、P的 $\gamma\text{-Fe}$ 共同结晶组成一种低熔点的三元磷共晶（ $953\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。这是一种硬脆的组织，可在材料内部形成强障碍，阻止位错滑移，造成不均匀塑性变形，从而导致高应力集中并诱发微裂纹形核，形成局部解理断裂。由此推断，在低温球铁中的含量只要不超过临界点的情况下，不会形成P共晶组织，就不会对材料冲击韧性造成较大影响，结合实验结果，这一临界值约为0.07%。

如图9所示，当S含量在0.004%~0.02%的范围内变化时，铁素体基的QT400-18L低温冲击性能随着S含量的增加而下降。当 $S\leq 0.012\%$ 时，材料冲击韧性处于较高的水平，试验材料在 $-60\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下其冲击吸收功在12 J以上，当 $S\geq 0.012\%$ 时，材料的冲击韧性迅速降低，到0.015%时降至12 J以下。从试验结果来看，铁素体超低温球铁的硫含量应控制在0.015%及以下。混合基QT500-7L球铁的超低温冲击性能随着S含量的增加而下降，较佳的硫含量应控制在0.015%及以下才能使冲击功达到4 J及以上。球化剂除了少部分脱硫产物成渣去除外，留在铁液中的硫主要以FeS的形态存在于铁中，且FeS和Fe可形成低熔点的共晶体，并以薄膜状分布在奥氏体晶界上^[9]。由于FeS的塑性极差，铁基材料中含有较多的S时，其韧性会显著降低。使材料性能对晶界的偏析更加敏感。由于低温条件下S对材料的冲击韧性极为敏感，生产 $-60\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温球铁应严格限制原铁液中的S含量，且对原材料、熔炼设备、造型材料等可能使材料中混入S元素的环节均需进行严格的控制。

3 结论

(1) 通过对铸造工艺、造型工艺和熔炼工艺等严格控制对标准化作业及管理制度化等全过程实施，使近三年生产的 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温球墨铸铁（QT400-18L/QT500-7L）产品综合成品率均超过92%，铸件磁粉探伤合格率100%，射线合格率保持在97%以上。

(2) 硅、锰、磷和硫对 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温球铁冲击韧性有较大影响，试验数据显示， $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温铁素体球铁的硅含量应控制在1.9%以下，混合基超低温球铁

为1.9%~2%；磷、硫均存在临界点，当磷超过0.07%及硫超过0.012%材料韧性快速下降；充分石墨化退火的QT400-18LT材料冲击韧性随着Mn含量的提高而呈现上升的趋势。

(3) 在-40℃超低温铁素体基球铁和混合基球

铁的稳定生产的基础上，通过进一步优化材料化学成分，可获得在-60℃温度条件下QT400-18L冲击功KV₂单个大于9 J且平均大于12 J，QT500-7L冲击功KV₂单个大于3 J且平均大于4 J的技术条件。

参考文献:

- [1] 俞旭如, 李小青. 《风力发电机组球墨铸铁件》国家标准介绍 [J]. 现代铸铁, 2009, 29 (4): 29-34.
- [2] 相海锋, 刘金海. 耐低温冲击风电球铁铸件生产工艺要点 [J]. 现代铸铁, 2010, 30 (3): 51-55.
- [3] 李新亚. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 董鹏, 朱正锋, 封雪平, 等. 木质素改性呋喃树脂性能研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 512-515.
- [5] 喻光远, 肖恭林, 陈琳, 等. 高强高韧超低温球墨铸铁的研究与开发 [J]. 铸造, 2019, 68 (3): 258-263.
- [6] 张伯明. 铸造手册: 铸铁卷 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 马敬仲, 丁建中, 尤其光, 等. 超低温高韧性球墨铸铁QT400-18AL的研究及应用 [J]. 铸造, 2012, 61 (8): 856-861.
- [8] 李振江, 肖纳敏, 李殿中, 等. 球铁EN-GJS-400-18U-LT低温冲击韧度研究及改进措施 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (11): 1509-1511.
- [9] 崔中圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.

Study on Production Process Control and Technology of Ultra-Low Temperature Ductile Iron Casting

ZHU Zhang-feng, YU Guang-yuan, FENG Xue-ping, MU Yan-qing, DENG Han
(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China)

Abstract:

The key control processes of two kinds of -40℃ ultra-low temperature ductile iron QT400-18L and QT500-7L products, such as casting process, molding process, melting process and mass production quality control, are introduced. The comprehensive yield of -40℃ ultra-low temperature ductile iron castings can be stably controlled above 92%. On the basis of -40℃ ultra-low temperature ductile iron, the effects of Si, Mn, P and S on the impact toughness of -60℃ ultra-low temperature ductile iron were further studied, and the influence rules were analyzed.

Key words:

-60℃ ultra-low temperature; casting process; low temperature ductile iron; impact toughness
