

# 厚大断面球墨铸铁齿轮铸件的研制

瞿铁<sup>1, 2</sup>, 刁晓刚<sup>2, 3</sup>, 魏伟<sup>2, 3</sup>, 沈闯<sup>2, 3</sup>

(1. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471039; 2. 智能矿山重型装备全国重点实验室, 河南洛阳 471039;  
3. 中信重工洛阳重铸铁业有限责任公司, 河南洛阳471039)

**摘要:** 为获得厚大断面球墨铸铁齿轮铸件, 生产时进行分段制造。借助数值模拟软件模拟仿真优化, 采用优质生铁、纯净的废钢及强化孕育, 获得了合格铸件, 为生产同规格球墨铸铁齿轮积累了宝贵的经验。

**关键词:** 球墨铸铁; 厚大断面; 齿轮; 分段制造; 造型工艺; 熔炼浇注工艺

齿轮生产首先需获得齿坯, 齿坯主要有铸造齿坯、锻造坯和焊接齿坯。铸造坯成本低、生产设备简单, 齿坯形状不受限制。锻造坯工艺可改善坯料的铸态组织, 但因其工艺复杂而不能生产形状复杂、尺寸特别大的齿坯, 且成本高昂。焊接齿坯是近年发展的一种新工艺。焊接齿坯外观质量好、加工余量小, 内部质量接近于整锻齿坯。但焊接齿坯较铸锻齿坯生产成本低, 故其应用受到一定限制<sup>[1]</sup>。

球墨铸铁具有良好的减震性、耐磨性, 生产工艺简单且成本低廉。作为球墨铸铁一个重要分支, 厚大断面球墨铸铁在很多领域逐渐替代灰铸铁和铸钢, 目前广泛应用于端盖、磨盘、缸体等产品<sup>[2-5]</sup>。

笔者公司生产的球墨铸铁齿轮材质QT700-2A, 铸件最大壁厚145 mm, 属于厚大断面球墨铸铁。厚大断面球墨铸铁凝固时间长, 易出现球化衰退、石墨畸变等缺陷, 该类铸件制造难度大。为缩短铸件生产周期, 降低制造成本, 将整圆齿轮等分为十六段, 进行分段制造。单个齿轮段毛坯弦长1 340 mm、宽度460 mm、高度315 mm, 重量820 kg。在铸件相应位置设置附铸试块。铸件加工面要求100%超声波探伤和100%磁粉探伤, 分别依据GB/T 34904—2017和GB/T 9444—2019标准验收, 并达到2级要求。单个齿轮段零件图见图1。

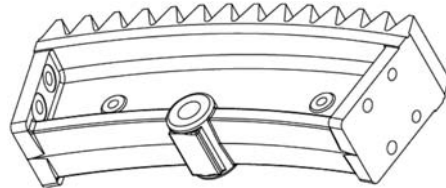


图1 齿轮段铸件  
Fig. 1 The gear section casting

## 1 齿轮化学成分设计

厚大断面球墨铸铁中碳当量选择要基于促进石墨化、避免石墨漂浮为前提。硅可通过固溶强化以提高球墨铸铁的强度; 硅含量过高, 易出现碎块状石墨。因此碳当量控制依据高碳、低硅原则, 选择在共晶点附近<sup>[6]</sup>。

锰促进碳化物和珠光体形成, 可提高强度。锰偏析于共晶团边界形成网状碳化物, 降低铸件塑性。在厚大断面球墨铸铁中, 锰偏析倾向尤其明显, 富集在晶界碳化物即使长时间保温退火也难以消除。对于珠光体基体的球墨铸铁, 锰含量也不宜超过0.6%<sup>[7]</sup>。

硫属于反石墨球化元素。硫含量过低, 不利于石墨形核; 硫含量过高, 球化效果下降, 易出现夹渣。一般硫含量应小于0.02%。

磷不影响球化, 却是有害元素。磷是随金属炉料进入铁液中。磷共晶易偏析

作者简介:

瞿铁(1963-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事矿山重型装备的研发和技术成果推广工作。E-mail: qutie@citic-hic.com.cn

中图分类号: TG143.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)03-0315-05

收稿日期:

2022-12-14 收到初稿,  
2023-02-09 收到修订稿。

于共晶团边界,使铸件的力学性能急剧降低。磷含量高,铸件易出现缩松、冷裂。球墨铸铁生产中不易脱磷,故必须限制其含量。

铜在共晶转变时,促进石墨化;在共析转变时,促进珠光体形成。铜可改善铸件断面组织与性能的均匀性,固溶强化基体。原铁液中干扰元素越多,铜含量允许量越低。

钼是形成碳化物能力较弱的元素。钼可细化共晶团,改善淬透性,防止回火脆性。与锰、铜相比,钼提高强度的作用更加明显。

铬与碳的亲和力远大于铬与铁,故易形成稳定的碳化物。加铬可得到全珠光体的基体组织,且使珠光体粒状化,改善淬透性。铬含量过高,断后伸长率和冲击韧度显著降低。

镁是球化能力最强的元素。镁含量过低,易出现球化不良;镁含量过高,易形成夹杂、石墨畸变等缺陷<sup>[8]</sup>。稀土可脱氧去硫、中和干扰元素。稀土残留量过高,石墨形态会恶化。通常残留镁控制在0.04%~0.06%、残留稀土控制在0.01%~0.03%。

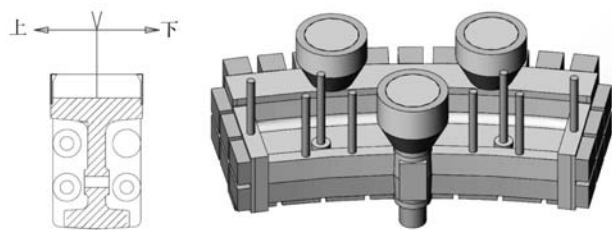
基于以上分析,化学成分设计如表1所示。

表1 齿轮段铸件的化学成分  
Table 1 Chemical composition of the gear section casting

C	Si	Mn	S	P	Cu	Mo	Cr	Mg	RE
3.5~3.8	1.9~2.3	0.4~0.6	≤0.02	≤0.05	0.4~0.6	0.1~0.3	<0.3	0.04~0.06	0.01~0.03

## 2 铸造工艺

齿轮外圆面为重要加工面,质量要求高,其壁厚达到145 mm。按照齿轮段立放制定铸造工艺方案。采用两箱砂型,中间设置分型分模线,上、下模型准确定位。加工孔不铸出,外圆开齿区域铸实。齿轮段周围合理设置足量冷铁,以平衡铸件厚度差,改善铸件局部凝固条件,充分利用石墨化膨胀作用实现自补缩。冷铁使用前须抛丸、烘烤,使用面平整,无气孔、锈蚀、裂纹等缺陷。铸件上端面设置3个保温冒口,对铸件实现充分补缩。同时设置8个 $\Phi 30$ 出气孔。工艺方案如图2所示。



(a) 分型分模示意图

(b) 铸造工艺简图

图2 工艺方案

Fig. 2 Process scheme

模型采用红松制作,保证其整体强度和刚度,避免在吊运、起模过程中出现变形。铸造圆角在模型中做出。

造型材料选用酚醛改性呋喃树脂自硬砂,涂料使用醇基涂料。因此在满足铸型强度的前提下,控制树脂加入量。上箱设置足量的出气孔,并保证孔道畅通。浇注系统设置为底注、开放式浇注系统。浇注系统使用陶瓷瓦筒。

## 3 球墨铸铁齿轮段的模拟仿真

大型铸件的数值模拟改变了传统铸造生产“合箱定论”的状况,可以在生产前预判铸件可能出现缺陷的大小及区域,采取有效措施改进铸造工艺,缩短生产试制周期,降低综合成本<sup>[9]</sup>。

借助数值模拟软件针对上述工艺方案进行模拟分析。根据铸件规格,模拟网格大小设定为10,铸件凝固步长设定为30。结合同材质生产经验和铁碳相图,模拟凝固时初始温度设定为1 350 ℃,结束温度设定为800 ℃。

铸件中间剖切面区域为典型厚大断面,以此为观察对象,铸件模拟凝固过程如图3所示。由图3可见,在冷铁辅助作用下,铸件厚大断面区域凝固过程由下部向上部逐步进行,最终缩孔、缩松集中于冒口,铸件整体实现了顺序凝固。

铸件缩松、缩孔分布图如图4所示。由图4可见,凝固结束时,缩孔、缩松总体积很小,且缩松呈散状分布,个别区域有点状显示且位于非关键部位。因此,该工艺方案合理可行。

## 4 球墨铸铁齿轮段的试制

### 4.1 熔炼浇注工艺

熔炼设备选用中频感应电炉。原料主要有生铁、废钢、回炉料、铁合金等。原料应清洁、少锈、无油污。生铁主要元素应符合“一高三低一少”的原则。一高即碳高,有益于石墨化,便于废钢调配;三低即锰、磷、硫低,有利于改善铸件力学性能;一少即硅少,有利于增大球铁回炉料及孕育剂的使用量,缩减生产成本、增强孕育效果。生铁选用优质生铁,严格控制杂质、微量元素的含量,尤其球化干扰元素的含

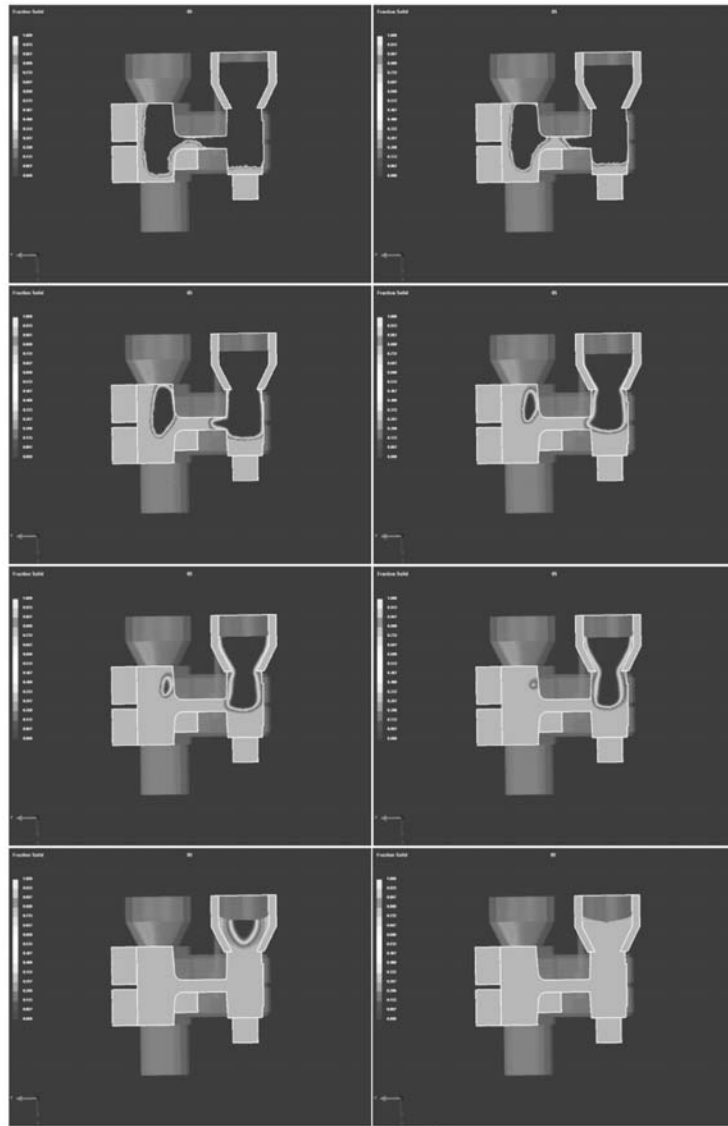


图3 铸件凝固过程

Fig. 3 Solidification process of the casting

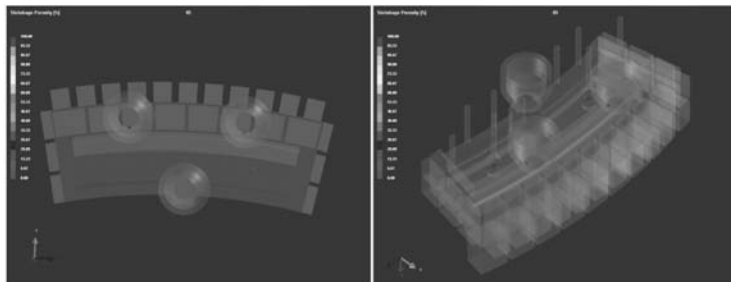


图4 铸件缩松、缩孔分布图

Fig. 4 Simulation result of the porosity

量<sup>[10]</sup>。废钢选用纯净的废钢。

浇包使用前要充分烘烤。球化处理采用冲入法处理。球化剂选择3-8球化剂，块度20~30 mm。孕育处理是球铁生产的关键，直接影响孕育效果和石墨球的直

径、球数和圆整度<sup>[11]</sup>。为了改善孕育效果，孕育处理采用“随流孕育+浮硅孕育”的强化孕育处理工艺。随流孕育选用硅钡孕育剂，出铁时随流加入。浮硅孕育选用硅铁，块度20~30 mm，球化处理后加入。

熔炼浇注过程采用“高温熔炼，适温浇注”的原则。浇注前要充分扒渣。浇注温度 $1\ 310\sim 1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从球化结束至浇注结束的时间控制在 $20\text{ min}$ 内。浇注速度过快，易卷入气体、夹杂物。浇注速度过慢，冷隔或浇不足的倾向增大。

## 4.2 热处理工艺

根据公司实际生产经验，齿轮段的热处理采用调质处理。热处理工艺曲线见图5。淬火工艺设定 $860\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、保温 $6\text{ h}$ 后油冷，一定时间后进炉回火；回火工艺设定 $520\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、保温 $6\text{ h}$ 后，炉冷至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下出炉自然冷却。

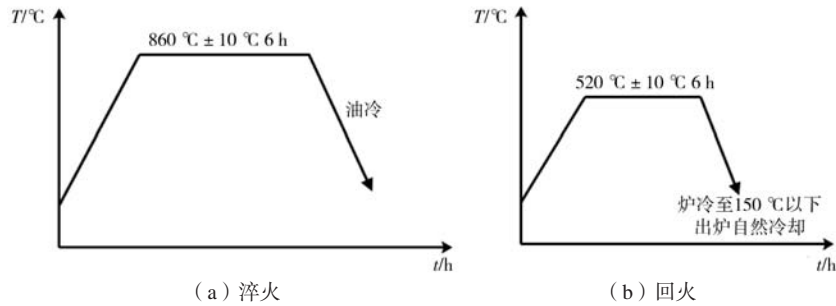


图5 热处理工艺曲线

Fig. 5 The process curves of the heat treatment

## 4.3 铸件检验

依据设定的工艺方案生产， $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下落砂后去除浇注系统、冒口，清整，抛丸。铸件如图6所示。从铸件附铸试样上取样，进行金相组织分析和力学性能测试。附铸试样尺寸按照GB/T 1348—2019《球墨铸铁件》标准设计。附铸试块球化率达到90%以上，石墨大小6级；组织由珠光体、铁素体、石墨和少量碳化物组成。附铸试块微观组织见图7。附铸试块力学性能完全满足技术要求，见表2。

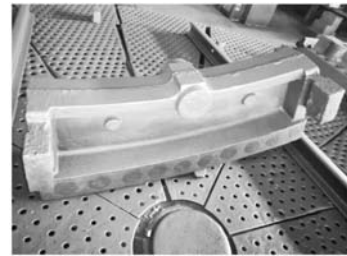
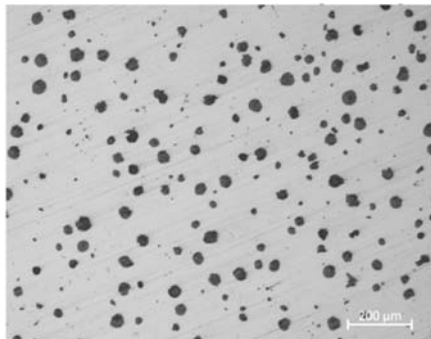
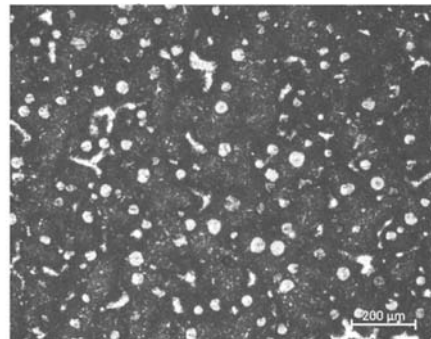


图6 齿轮段铸件

Fig. 6 The gear section casting



(a) 未腐蚀



(b) 经腐蚀

图7 齿轮段铸件金相组织

Fig. 7 Microstructures of the gear section casting

表2 齿轮段铸件的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the gear section casting

数值	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	布氏硬度HBW
标准值	700	420	2	240~305
实测值	815	670	5	275

注：所有数据均为3个试样的平均值。

铸件经外观检验和尺寸检验，各项技术指标均完全满足预期要求。铸件粗加工后，依据GB/T 34904—2017和GB/T 9444—2019标准进行超声波探伤及磁粉探伤，无超标缺陷，铸件质量完全符合球铁齿轮的技术指标要求。

## 5 结束语

球铁齿轮段检验结果证明,该工艺方案是合理的,为笔者公司今后生产同规格球墨铸铁齿轮铸件积

累了宝贵的经验。该方案的试验表明,大型铸件分段制造是可行的,它是缩短生产周期和降低综合成本的重要途径。

### 参考文献:

- [1] 《齿轮制造手册》编辑委员会. 齿轮制造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 刁晓刚, 魏伟, 沈闯, 等. 厚大断面球墨铸铁端盖的生产实践 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 71-74.
- [3] 尤明. 喂线法球化处理大型球墨铸铁磨盘铸件 [J]. 铸造, 2014, 63 (5): 504-506.
- [4] 柯志敏. 厚大断面球墨铸铁油缸缸体的生产 [J]. 现代铸铁, 2015 (6): 46-49.
- [5] 王强, 吴铁明, 蒋毓良. 1 000 MW二次再热汽轮机特大型球墨铸铁件中压外缸的铸造 [J]. 铸造, 2016, 65 (5): 424-427.
- [6] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册: 第一卷 铸铁 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [7] 吴德海. 球墨铸铁 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [8] 周洪宇. Si含量对厚大断面球铁组织和性能的影响 [D]. 黑龙江: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [9] 柳百成. 铸件凝固过程的宏观及微观模拟仿真研究进展 [J]. 中国工程科学, 2000, 2 (9): 29-37.
- [10] 王会群. 生产厚大断面球墨铸铁熔炼要素控制 [C]//2006中国铸造活动周论文集. 沈阳: 中国机械工程学会铸造分会, 2006: 230-235.
- [11] 苏文生, 孙鑫志, 姜士平. 高强度厚大断面球铁模具的铸造 [J]. 大型铸锻件, 2010 (4): 35-37.

---

## Study on the Heavy Section Ductile Iron Gear Casting

QU Tie<sup>1,2</sup>, DIAO Xiao-gang<sup>2,3</sup>, WEI Wei<sup>2,3</sup>, SHEN Chuang<sup>2,3</sup>

(1. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Mining Heavy Equipment, Luoyang 471039, Henan, China; 3. Foundry Branch, CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China)

### Abstract:

In order to get the heavy section ductile iron gear casting, segmented manufacturing was carried out during production. With the help of the numerical simulation software, high-quality pig iron, pure scrap steel and strengthen inoculation were used to obtain qualified castings, which has accumulated valuable experience for the production of ductile iron gears of the same specification.

### Key words:

ductile iron; heavy section; gear; segmented manufacturing; molding process; smelting and pouring processes

---