

# 矿用磨机大型铸钢齿轮制造技术

贾冠飞<sup>1,2,3</sup>, 田磊<sup>1,2</sup>, 梁敏<sup>1,2,3</sup>, 孙万通<sup>1,2</sup>, 王助龙<sup>1,2</sup>

(1. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南洛阳 471003; 2. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471003;  
3. 河南省大型铸锻件工程技术研究中心, 河南洛阳 471003)

**摘要:** 通过合理选材, 对铸造、熔炼、热处理等工艺长期优化, 形成了中信重工矿用磨机大型铸钢齿轮的核心制造技术。实践证明, 利用该技术生产的大型铸钢齿轮其内部质量和力学性能能够达到要求, 满足磨机在不同工况下的使用。

**关键词:** 大型齿轮; 铸钢; 制造技术

大齿轮是矿用磨机的核心传动零件, 其可靠性关系整台装备运行的安全和稳定。随着设备规格和传动功率的不断增大, 大齿轮也在向着大型化方向发展, 其直径已经超过10 m, 重量也接近百吨。目前矿用磨机大型齿轮主要有四种形式: 铸钢齿轮、焊接齿轮、球铁齿轮以及分段式齿轮。

铸钢齿轮生产制造工艺相对成熟, 国内外矿磨装备使用商对铸钢齿轮的认可度相对较高, 但铸钢件凝固补缩量, 需要设置较大的冒口, 钢液利用率低, 生产周期长, 且开齿后齿面的显微疏松缺陷难以完全消除。

焊接齿轮一般是将采用合金钢轮缘和低碳钢筋板、腹板焊接在一起, 由于轮缘为轧制钢板解决了轮缘致密性的问题, 但由于是异种钢焊接, 焊接技术难度较大<sup>[1]</sup>。焊接齿轮较铸钢大齿轮的刚性差, 容易变形, 安装调试难度大, 焊接结构齿轮一般用于直径在900~5 000 mm的中小齿轮上<sup>[2]</sup>。

球铁齿轮较铸钢齿轮成形性能好, 球铁比钢收缩量小, 可省掉铸钢齿轮的大冒口, 出品率高, 成本低<sup>[3]</sup>, 但壁厚大于200 mm、铁液量在百吨级的球铁大齿轮铸造技术难度大, 主要表现在大断面球墨铸铁件在生产过程中, 由于处理铁液量大、冷却时间长、凝固速度慢、球化衰退快, 易产生石墨漂浮和石墨变异。同时由于冷却速度慢, 会使基体组织在共析转变时易析出大量铁素体, 使得铸件的强度和硬度下降<sup>[4]</sup>, 另球铁铸件出现缺陷后焊补修复难度大, 这一系列难题是其在大型齿轮上推广应用的重要阻碍。

分段式齿轮很好解决了当齿轮局部出现失效后分区互换的问题, 同时也摆脱了制造过程对大型铸造、加工装备的依赖。但由于分段较多, 铸件结构的整体性和材料性能的均一性不如以上三种形式, 考虑到过多把合面产生的累计加工误差对齿轮传动的影响, 要求每段制造安装精度极高, 这使其在大型化应用上也受到了一定限制。

四种形式的大齿轮都有各自的优势, 但也有各自的短板, 选择何种形式取决于设计和制造商在该领域的技术成熟程度。通过多年研究, 中信重工在大型铸钢齿轮材料选择、铸造技术、熔炼技术、热处理技术等方面积累了丰厚的经验, 并建立了自身的生产、制造及检验规范。

## 1 材料选择及采用标准

中信重工大型铸钢齿轮根据不同的产品类型、规格及使用工况, 选用的材料也不同, 常用材料有ZG42CrMo、ZG45CrMo、ZG34Cr2Ni2Mo、ZG35CrNiMo。

### 作者简介:

贾冠飞(1983-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向是大型铸钢件铸造工艺和技术。电话: 18638369056, E-mail: jgf214@163.com

中图分类号: TG24  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2020)09-0986-05

### 收稿日期:

2020-01-06 收到初稿,  
2020-05-20 收到修订稿。

针对大型矿用磨机齿轮,为满足齿轮高强度、高硬度及高速重载的使用要求,中信重工研发出独有的ZG40CrNi2Mo铸钢齿轮新材料。

中信重工铸钢齿轮的设计和制造遵守AGMA、ISO、ASTM、AWS、DIN等国际标准。其中超声波无损检测按照ASTM A609执行,区域划分如图1所示<sup>[5]</sup>。

A区:齿轮外圆面到齿根以下25.4 mm区域,按照ASTM A609 1级验收。

B区:除A区外轮缘部位(图1B1区)和内法兰面(图1B2区),按照ASTM A609 2级验收。

精加工后表面磁粉检测执行ASTM E709标准,按照线性、非线性 $\leq 5$  mm验收。目前,中信重工生产的铸钢大齿轮均可以达到以上要求,达到国际先进水平。

## 2 铸造技术

铸钢齿轮根据齿轮规格大小,设计结构分为整圆结构、1/2结构,1/4结构,铸造时可根据造型坑位大小、熔炼能力及现场起重等设备能力采用整圆铸造和分瓣铸造。

### 2.1 冒口设计

铸钢件冒口的设计必须满足两个要求:一是冒口凝固必须晚于铸件凝固;二是要有足够的补缩钢液。众所周知,钢铸件冒口重量约为铸件重量的50%~100%,也就是说,铸钢车间所生产的钢液有1/3~1/2消耗于冒口。为满足大齿轮的使用要求,冒口设计必须保证齿轮齿区及内园连接法兰质量,粗加工后满足探伤要求。大齿轮冒口主要布置在外轮缘及内园法兰处,根据热节圆及模数确定冒口尺寸,采用MAGMA软件进行凝固过程数值模拟,对冒口进行调整优化。中信重工通过多年来生产研究,冒口的设计形式也在不断优化,为保证齿区质量外轮缘冒口由早期的分散冒口优化为环形冒口;同时由于分散冒口的

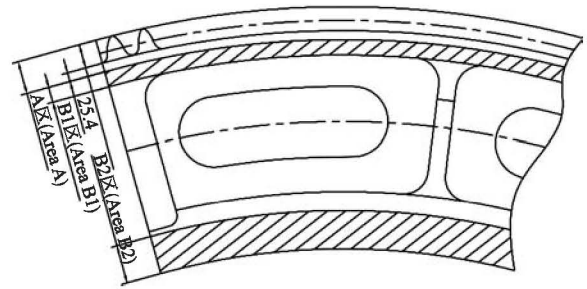


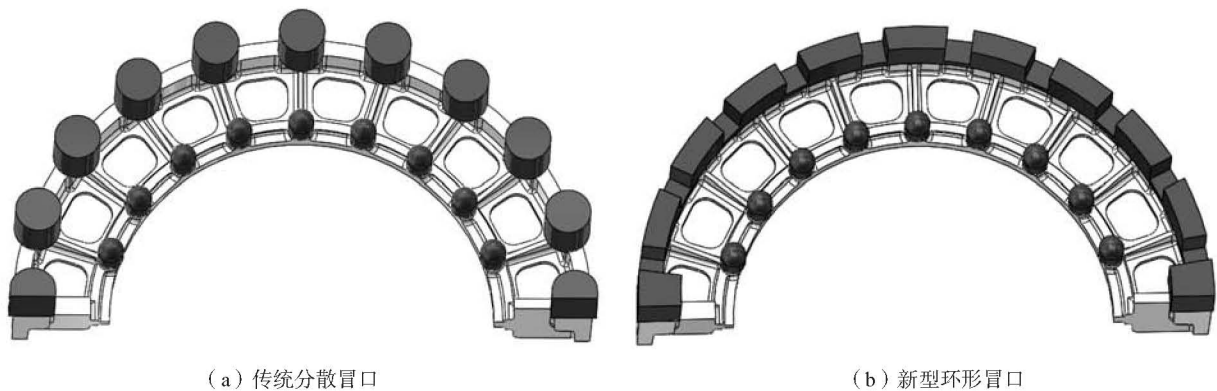
图1 铸钢齿轮超声检测分区

Fig. 1 Ultrasonic detection zone of cast steel gear

直径较大且浇高比较高,当工艺优化为整圈环形冒口后铸造工艺出品率并没有降低,但环形冒口对铸件的补缩效率却得到较大提高。铸造工艺冒口形式优化前后示意图见图2。

### 2.2 补贴及冷铁设计

铸钢件铸造工艺中经常会设计铸造补贴。补贴的作用通常有两种:①铸件结构复杂多样往往不能实现顺序凝固,为了达到顺序凝固要求,铸件局部形状需进行改变,通过在冒口处增加厚度,离冒口近处壁厚,离冒口远处壁薄,这样可以达到靠近冒口处凝固时间延长;②钢铸件中设置补贴可使补缩通道扩张角增大,增大冒口补缩通道,有利于冒口中补缩钢液顺利流向铸件补缩处,提高冒口补缩效率<sup>[6]</sup>。大齿轮铸造补贴一般设计在外轮缘部位,补贴形式分为外补贴和内补贴两种。外补贴后期可通过热割、加工去除,但设计在外圆增加了外圆厚度,开齿后齿区位于铸件中心部位,组织不致密,质量难以保证,同时外补贴也不利于工艺冷铁的布置。中信重工大齿轮铸造补贴现在多采用内补贴,大齿轮有无内补贴MAGMA温度场凝固模拟对比见图3、4所示,对比可见设置合理的补贴使铸件凝固补缩更充分,温度场更加合理。



(a) 传统分散冒口

(b) 新型环形冒口

图2 冒口设计方案

Fig. 2 Design and layout of risers

冷铁具有激冷作用，冷铁设置可提高铸件表面致密层厚度。铸件冷铁经常设置在零件使用关键区域，大齿轮外圆齿区使用过程中为关键啮合区域同时也是疲劳失效容易发生区域，为保证开齿后齿区组织致密性，齿轮铸造工艺外圆常设置挂砂冷铁，大齿轮铸造冷铁布置如图5所示。

### 2.3 浇注方案设计

根据齿轮高度选择一层或两层浇注系统，下层浇注系统采用底返形式，这样可保证浇注钢液平稳上升，减轻紊流现象，有利于铸件内部质量的保证。为实现快速浇注，减少型腔受高温钢液热辐射时间，同时保证钢液充型平稳，要求浇注系统设置必须为开放式浇注系统。

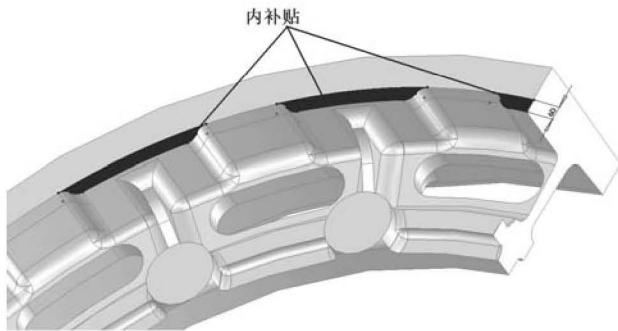
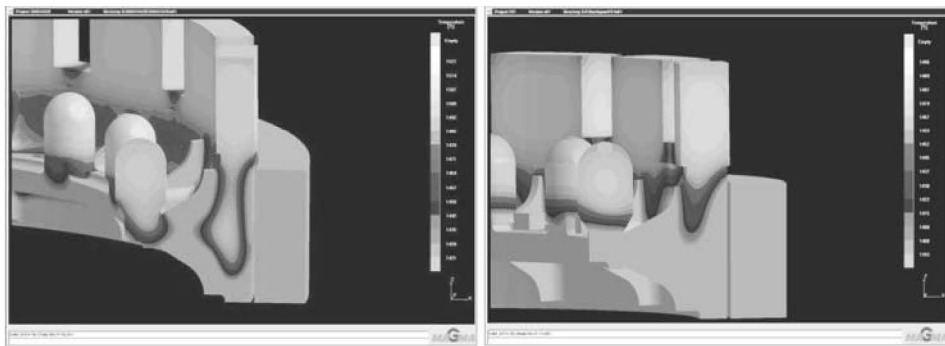


图3 铸钢齿轮轮缘内补贴示意图

Fig. 3 Schematic diagram of internal padding placement on the rim of cast steel gear



(a) 无补贴温度场

(b) 有补贴温度场

图4 铸钢齿轮有无补贴温度场对比

Fig. 4 Comparison of temperature field with and without padding

### 2.4 模型制作及造型

矿用磨机大齿轮直径较大，为保证型腔尺寸及铸件质量，大齿轮造型方法采用实样+组芯的形式，造型时砂芯表面选用耐火度较高的铬铁矿砂，砂型表面刷醇基锆英粉涂料。

## 3 熔炼

钢液冶炼采用电弧炉初炼+LF精炼的方法。为提高钢液纯净度，减少有害夹杂物，同时达到细化晶粒的目的，在钢液冶炼过程主要采取以下措施：①内控化学成分+微合金化保证铸件性能均匀稳定；②严控S、P等有害元素（ $S \leq 0.010\%$ ， $P \leq 0.015\%$ ）的含量，最大限度降低S、P元素对铸件质量的影响；③钢液经过真空脱气（VD）处理，提高钢液纯净度；④浇注前型腔吹氩，浇注过程采用氩气环境保护浇口杯，浇注过程进行吹氩保护，减少浇注过程钢液的二次氧化。

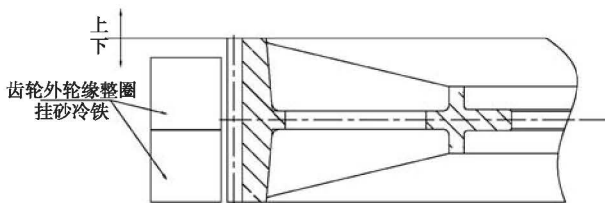


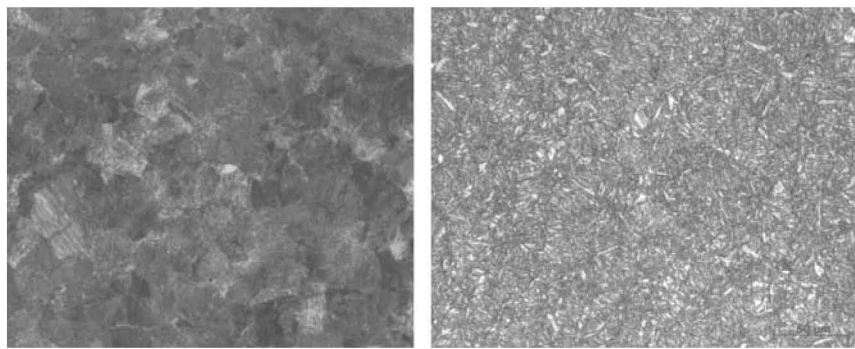
图5 铸钢大齿轮外轮缘冷铁布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of chill layout on outer rim of cast steel gear

## 4 热处理

铸钢大齿轮热处理主要分为铸后热处理（即预备热处理）和性能热处理，铸后热处理是铸件毛坯清理阶段进行的高温退火或正火+回火的热处理工艺。铸后热处理主要目的为：细化晶粒、均匀组织、消除铸造应力、调整硬度、改善切削加工性能，同时为后期的

淬火做组织准备<sup>[7]</sup>；另外还可改善铸件超声波探伤过程的透声性，提高铸件内部质量检测精度。粗加工后进行性能热处理，即淬火+高温回火，性能热处理可使材料性能得以充分发挥，淬火使铸件各部位冷速均匀，淬硬层深，硬度梯度小，高温回火可充分消除内应力，保证尺寸稳定性。我公司铸钢大齿轮经过调质后获得均匀的力学性能，同时铸件硬度差可保持在HB 30以内，热处理变形可控制在10 mm以内。铸后热处理及性能热处理后金相组织如图6所示。



(a) 铸后热处理（珠光体组织）

(b) 调质热处理（回火屈氏体）

图6 铸后及性能热处理后金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of annealing and quenched-tempered gear samples



图7 中信重工生产的最大直径半自磨机大齿轮

Fig. 7 The largest diameter semi-self-grinder gear produced by CITIC Heavy Industry

## 6 结论

(1) 铸造工艺通过优化冒口形式、合理设置补贴及挂砂冷铁，为齿轮凝固营造合理的温度梯度，使铸件内部质量得到有效保证。

(2) 严格控制钢液中有害元素含量，通过内控化学成分及减小各钢包间化学成分差异性，浇注前型腔吹氩，浇注过程氩气保护可提高钢液质量保证铸件性能均匀稳定。

(3) 通过铸后热处理和粗加工后性能热处理，更有利于材料综合性能提升，是矿用磨机铸钢大齿轮满足使用性能的有效保证。

## 5 技术实施效果

在近年设备升级、技术进步的同时，我公司也在不断进行着总结和创新，产品质量也不断提升。图7是中信重工生产的材质为ZG40CrNi2Mo、直径13 609 mm的大型铸钢齿轮，用于国内最大的 $\Phi 11\text{ m} \times 6.4\text{ m}$ 半自磨机。

截止2018年底，中信重工铸钢大齿轮已经服役矿用磨机超过1 500套，以铸钢大齿轮为支撑的大型矿用磨机国内市场占有率超过85%，并出口全球34个国家和地区，全球占有率达23%。

**参考文献:**

- [1] 浦耀奋, 郭明达, 张耀榜. 大型焊接齿轮的研制 [J]. 机械工人 (热加工), 1994 (6): 2-3.
- [2] 刘闰年. 焊接齿轮的制造 [J]. 重型机械, 1988 (7): 13-18.
- [3] 张应传. 球铁齿轮的材料特性及应用 [J]. 石油机械, 1993 (5): 40-43.
- [4] 王敬华. 厚大断面球墨铸铁齿圈的材质与工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [5] 王英峰, 杨绍辉. 大型铸钢齿轮的超声波无损检测技术 [J]. 金属加工 (热加工), 2013 (9): 45-46.
- [6] 关润浩. 钢铸件凝固控制及冒口设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 54-56.
- [7] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 290-294.

---

## Manufacturing Technology of Large Cast Steel Gears for Mining Mill

JIA Guan-fei<sup>1,2,3</sup>, TIAN Lei<sup>1,2</sup>, LIANG Min<sup>1,2,3</sup>, SUN Wan-tong<sup>1,2</sup>, WANG Zhu-long<sup>1,2</sup>

(1. Luoyang CITIC HIC Casting and Forging Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 2. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 3. Henan Province Heavy Casting & Forging Technology Center, Luoyang 471003, Henan, China)

**Abstract:**

Through reasonable material selection and long-term optimization for casting method, smelting and heat treatment processes, the core manufacturing technology of large cast steel gear for mining mill of CITIC Heavy Industry is developed. The practice proved that using this technology producing the large cast steel gears can ensure that the internal quality and mechanical properties of gears meet the use of the mill under different working conditions.

**Key words:**

large gear; cast steel; manufacturing technology

---