

三包熔炼合浇大型不锈钢叶片中碳含量的控制

■ 肇晋, 陶韬, 谷云岭, 段振伟, 戴艳涛, 高润贺, 顾福岐

摘要: 单工位三包冶炼合浇过程中钢液的C含量容易超标, 针对C含量的来源和增加进行了分析, 针对不同分包的C含量控制分别提出了解决方案。

关键词: 不锈钢; 多包冶炼; C含量; 控制

04Cr13Ni5Mo不锈钢以其良好的力学性能及耐蚀性被广泛地应用在水轮机叶片领域。20世纪70年代出现的LF炉以其良好的保温提温功能使得多包合炉熔炼大型或超大型铸件成为可能。真空吹氧脱碳 (Vacuum Oxygen Decarburization, VOD) 工艺是采用真空设备提高脱碳效率的不锈钢炉外精炼工艺, 该工艺能够将钢液中的C含量降到非常低, 所以在超低碳不锈钢的熔炼中得到广泛应用。因此04Cr13Ni5Mo (化学成分见表1) 葛洲坝超低碳不锈钢叶片在冶炼中需要用到LF+VOD精炼设备, 同时在单工位三包熔炼过程中, 因为熔炼的特殊性, 使得第一炉及第三炉钢液中的C含量非常容易超标, 从而导致整炉钢液熔炼失败。为了避免这种情况的发生, 针对不同炉次的钢液C含量超标的问题, 进行了详细的分析, 制订了合理的熔炼工艺安排, 经过连续生产后的成分检测, 葛洲坝大型不锈钢叶片的C含量达到了厂家的要

求。

1. 三包熔炼C含量控制工艺及难点

根据现行精炼生产工艺与以往04Cr13Ni5Mo不锈钢生产经验, 第一炉钢液在精炼后的保温需要较高温度, 第一炉钢液出钢温度为1680~1750℃, 因此精炼后的升温过程需要对钢液进行长时间送电, 这必然导致钢液中C含量升高, 一般 w_c 可达0.038%~0.052%。在三包熔炼不锈钢叶片过程中, 第一包钢液需要较高的出钢温度进行保温并且需要最长的保温时间, 这会大大增加第一包钢液中的C含量, 因此如何避免第一炉的C含量超标成为急需解决的问题。第二炉钢液精炼后出钢温度为1600~1650℃, 所需要的升温时间短于第一炉, 若第一包的C含量得以控制, 第二包钢液的C含

量也能够得到保证。第三炉钢液不锈钢熔炼中C含量升高的原因来自于合金的加入、电极剥落, 以及耐火材料中的C被冲刷进入钢液等。合金投入引起的C含量增加是可以通过前期计算而能够控制的, 从以往的熔炼经验可知, 在三炉熔炼过程中, 最容易引发C含量超标的原因是升温过程中的电极剥落引发的增碳。为了熔炼出合格的不锈钢铸件必须采取工艺手段尽量降C且有效防止电极增C。

2. 解决方案

表2为统计不同炉次不锈钢熔炼后C含量的变化。

第一炉钢液液中C含量控制措施:

为了更好地应用精炼炉脱碳能力, 缩短熔炼时间, 在电炉熔炼过程中C含量为0.3%~0.5%即可出钢进行精炼。

表1 04Cr13Ni5Mo不锈钢化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
≤0.045	≤0.8	≤1.5	0.030	≤0.010	11.5~13.5	4.5~6.0	0.40~1.0

吹氧脱碳和一次VD降低钢液中C含量的措施有:

- (1) 提高入罐温度。
- (2) 增加氧化程度。
- (3) 适当延长真空吹氧脱碳时间。
- (4) 适当降低氧枪高度。
- (5) 增加氩气量。

单包生产04Cr13Ni5Mo不锈钢铸件时,电弧炉出钢后立即进行扒渣,随后钢包进入LF+VOD精炼炉工位升温吹氧。吹氧温度在1550~1610℃。现改为电弧炉出钢后先在LF工位升温,升温至1650℃以上后扒渣,进VOD精炼炉吹氧,吹氧温度可提至1610~1650℃。此方法能加深脱C程度,提高精炼后钢液温度。按现行精炼工艺,判断吹氧终点的主要判据是氧浓度为零后的反弹,辅以真空度、烟气温度等参数。为深度降C,特增加吹氧时间。不锈钢叶片三次熔炼试验数据见表3,延长吹氧时间对碳含量、氧浓度的影响如图1、图2所示。

由表3、图1、图2可知,延长吹氧时间可以使钢液C含量进一步降低,同时增加吹氧量使O浓度大幅升高,增加后期钢液还原压力,所以需要确定合适的吹氧时间,避免吹氧过多增加还原压力,增加电耗及延长熔炼时间。经试验验证后,确定的调整后工艺参数为:氧浓度为零并开始上升后的8~10min;氧浓度为5%~6%。

当钢液O含量合适时,延长真空吹氧脱碳时间能够使终点C进一步降低。吹氧后的钢液含足够的氧,可以通过延长真空吹氧

脱碳时间使钢液中C含量降低。同时考虑到真空吹氧脱碳是降温过程,为避免钢液温度过低,经统计后可得出真空碳脱氧工艺为100Pa以下保持30~35min。

精炼过程中氧枪距钢液越近,吹氧脱碳的效果越好,但容易造成氧枪的损坏。依照以往熔炼04Cr13Ni5Mo不锈钢生产经验,精炼吹氧的氧枪高度定为900~1100mm。

增加氩气流量也可使脱碳有更好的动力学条件,但吹氧过程增加氩气流量容易引发钢液和熔渣的剧烈翻滚,增加损伤氧枪的风险,因此吹氧过程中不增加氩气流量。经试验后确定在一次VD的最后5~10min将氩气流量由1.5m³/h调至2.1m³/h,同时为保证安全,将氩气压力由3MPa降至2MPa。

精炼过程中C含量增加的因素:

(1) 吹氧脱碳后,钢液温度很高。但为了能够尽快化渣,也需要进行短时送电。选用干燥的无核石灰、AD粉及少量脱硫剂快速造渣,可将送电时间控制在5min以内,缩短送电时间的同时也有效抑制了电极剥落产生的

增C现象。

(2) 进入LF+VOD工位前,将钢液中成分调至恰当范围,可保证精炼过程中不用进行钢液成分的微调,避免了铬铁等合金加入产生增C。

(3) 精炼完成后还有送电升温过程,此时容易发生电极剥落或钢液和熔渣冲刷电极,都会导致钢液中C含量增加。

为了减少电极剥落或钢液冲刷电极引起的增C,熔炼第一炉钢液时,三根电极必须是全新的,并按规定墩齐。炉渣涌起时必须抬起电极,待炉渣较平静时

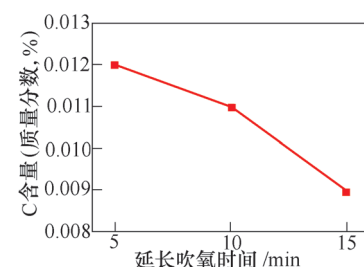


图1 含C量与延长吹氧时间关系

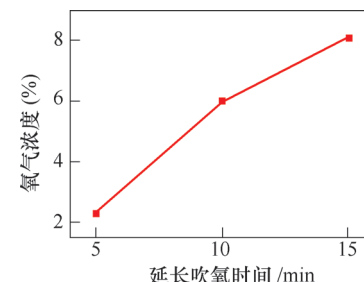


图2 氧浓度与延长吹氧时间关系

表2 若干合炉熔炼中不同阶段钢液中C含量增加的统计分析

时间	钢液中平均C含量 (质量分数, %)
一次VD结束后	0.009~0.020
二次VD结束后	0.015~0.034
二次VD结束后的升温过程	0.030~0.052

表3 葛洲坝不锈钢叶片三次熔炼试验数据

延长吹氧时间/min	C含量 (质量分数, %)	氧浓度 (%)
5	0.012	2.3
10	0.011	6.0
15	0.009	8.1

(下转第87页)

其二，锻造成形。根据模拟分析结果，辊锻两道次，预、终锻打击次数均为一次，避免多次打击情况下出现锻造缺陷。由于双耳为非加工，每次锻造完成后需先用风管对模膛进行彻底清理，然后再用石墨进行模具润滑冷却，防止因氧化物堆积造成双耳充模不完全。

其三，切边。锻件在160MN主机终锻后，由4号机械手进行转移到切边机上，切边机采用20MN压力机，直接完成切边过程。

其四，校正冲孔。锻件切边完后，落在1号小车上，小车运行后，将锻件转移到精整工序，6号机械手将锻件由小车转移带校正冲孔模内进行校正冲孔工序，工序完成后，6号机械手将锻件转移到传送链上。

(3) 热处理 锻件内在质量的好次主要决定于金相组织及力学性能，项目组依据原材料复

验报告单中的合金元素含量，确定锻件热处理工艺加热及保温参数，从而保证热处理质量。

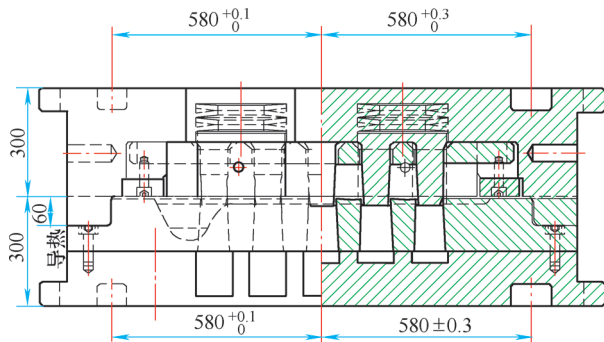


图7 校正冲孔模具结构

4. 结语

通过工艺试制及生产验证，煤机销轨的工艺方案及锻造工艺参数正确、合理，能够切实指导生产。试制所用的生产设备、工艺装备、检测仪器及检测方法能够保证产品的质量要求。生产的销轨锻件外观质量、尺寸精度、

力学性能等指标均满足设计标准。

作者简介：潘海江、韩海河、宫显宇、王志国、秦伟，内蒙古一机集团富成锻造有限责任公司。

MW 20161025

(上接第56页)

再继续送电。为了降低炉渣引入的C含量增加，需要增加渣量和渣密度。调整渣中 Al_2O_3 的含量可以增加渣密度，经试验分析渣中 Al_2O_3 为14%~28%时，炉渣的活性适合熔炼要求，此时炉渣也有一定的黏度，可阻碍炉渣中的C颗粒进入钢液。加厚炉渣可以减少增C量，但过厚的炉渣不利于钢液的熔炼。经工艺试验确定：脱S达标前，炉渣厚度应为90~150mm；脱S达标后，炉渣厚度应为130~190mm。

通过实施上述方案，第一炉钢液中的C含量稳定在0.038%以下。

第二炉控碳的注意事项与第

一炉一致。

第三炉钢液增C分析：第三炉钢液在精炼炉中调整成分，其最终C含量取决于废钢脱碳后的C含量；加入材料带入的C含量；电极和渣线的增C量。

第三炉钢液控C措施：通常电炉熔炼中吹氧压力 $<1.0MPa$ ，开吹温度为 $1550^{\circ}C$ ，为保证目标C含量，必须进行精炼处理。电炉熔炼完成后钢液中C含量为0.3%~0.5%。VOD+VD精炼后钢液中C含量为0.025%~0.040%，符合铸件化学成分要求。

按照以上工艺参数进行熔炼，葛洲坝叶片铸件C含量全部达标，满足厂家要求。

3. 结语

通过分析钢液中C含量增加的来源，制订出合适的工艺措施来降低钢液中的C含量，使之符合厂家的要求，合理优化工艺流程，针对不同炉次采取不同的控C措施，工艺流程达到最优，最终熔炼出C含量合格的超低碳不锈钢叶片。单工位三包熔炼超低碳不锈钢叶片钢液，不仅完成了葛洲坝项目的任务，还为以后单工位多包熔炼提供了宝贵的经验。

作者简介：肇晋、陶韬、谷云岭、段振伟、戴艳涛、高润贺、顾福岐，哈尔滨电机厂有限责任公司。

MW 20160820