感应电炉在高洁净钢铸件生产中的应用

徐致祥
北京机电研究所　北京　100083

摘要：阐述了中频感应电炉熔炼的特点、洁净钢铸件内在质量要求。中频感应电炉在洁净钢铸件生产中的应用是一个系统工程，对冶金质量和生产工艺过程提出了更高要求。阐述了国内铸钢件生产现状及存在的问题。

关键词：洁净铸钢件；中频感应电炉；铸件生产；工艺流程

1　序言

最新2035中国制造规划中材料被列为重中之重，其中所述先进钢铁材料需重点突破以下5点：高洁净度冶炼、夹杂物精确控制、均质化与组织精细化控制、精确成形与加工技术、构建绿色化与智能化钢铁流程。

2　感应电炉熔炼的优缺点

2.1　优点

1）熔炼工艺稳定。具有电磁搅拌功能，金属液温度和化学成分均匀，元素烧损小。

2）采用炉底吹惰性气体精炼，流槽出钢，气体保护浇注，可基本实现无氧化熔化浇注。

3）原料洁净时对钢液和环境污染小。

4）采用感应加热中间包浇注可准确控制浇注温度，无渣及浇注压力控制。

2.2　缺点

1）缺乏冶金功能，即各类元素成分调整困难，钢液元素含量只能增加，不能减少。

2）用于铸钢，要求入炉前严格控制原材料化学成分和原料洁净度。

3　铸钢件冶金质量

铸钢件冶金质量具有三项超高指标：超细组织（细晶化）、高纯净度、高均质度。

3.1　晶粒细化

晶粒细化是各种强化机制中唯一既能提高铸钢件的强度和韧性，又能降低韧脆转变温度的方法。微合金元素Nb、Ti、V等在钢中与C、N、O等有极强的亲和力，可形成稳定的强碳化物、氮化物，通过析出质点，铸件从冶炼凝固到冷却过程及其焊接加热中，通过影响成核和晶界迁移来影响晶粒尺寸，在实际生产中已能得到最小平均铁素体晶粒尺寸为5～10μm。同时所形成的碳化物沉淀强化铁素体，因而可有效提高铸钢件的强度。

微合金元素加入量对晶粒尺寸影响如图1所示，

生产成本，提高了经济效益。

在产品创新层面，铝合金轮毂产品重量轻、强度高、性能优异，其生产工艺先进，材料利用率高。本项目的产品市场面向国内、国外两个市场，以出口为导向，以国内为主要市场，市场需求空间巨大，产品市场竞争力优势显著。

参考文献：

[1] 李晓敏.我国汽车铝合金轮毂发展现状[J].轻合金加工技术，2003（9）：12-13.

[2] 陈冬颖，潘德江. 铝合金汽车轮毂的发展及应用前景：2011年安徽省科协年会——机械工程分年会论文集[C].合肥：合肥工业大学出版社，2011：390-393.

[3] 李婷.铝合金汽车车轮的性能特点及其应用[J].世界有色金属，2013（3）：54-56.

MW 20210715

不同强化机制对降低钢韧脆转变温度的影响如图2所示。

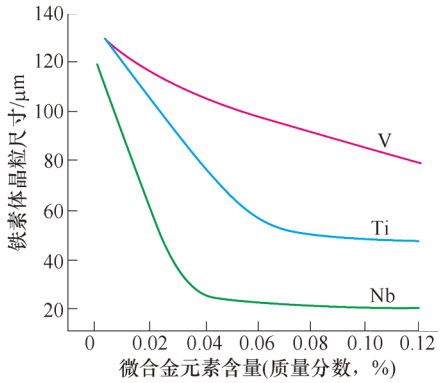


图1　微合金元素及含量与铁素体晶粒尺寸的关系

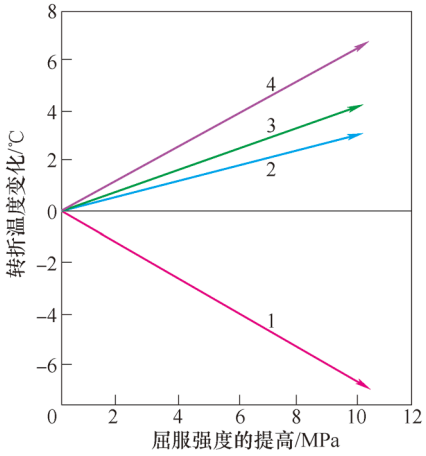


图2　不同强化机制对钢韧脆转变温度的影响

1—晶粒细化强化　2—沉淀强化
3—位错强化　4—碳含量强化

3.2　高纯净度

洁净钢（Clean Steel）的含义包含：钢中非金属夹杂物含量少、尺寸小、形状分布均匀，钢中S、P、O、N、H等杂质元素含量低。

有害气体O、N、H和夹杂物的来源：钢液直接与炉气接触，钢液与坩埚之间的反应，以及炉料的锈蚀、油污或水分等3个方面。

国内外生产的洁净钢中：C、S、P、O、N、H含量之和＜100×10^{-6} (0.01%)；国内外生产的超洁净钢中：C、S、P、O、N、H含量之和＜40×10^{-6} (0.004%)。

“零夹杂钢”即“零氧化物钢”或“超洁净钢”，但并非是钢中无夹杂物，而是指钢液在凝固以前不析出任何非金属夹杂物，是含亚微米夹杂物的钢。

固态下析出的非金属夹杂物是高度弥散分布，尺寸＜5μm，在光学显微镜下难以观察。

一般情况下钢在液相中不析出硫化物和氮化物，实际上就是“零氧化物”钢，控制钢中氧含量和脱氧元素含量及其偏析，防止固相线温度前析出氧化物夹杂。

3.3　高均质度

实现铸钢件结晶组织等轴晶化是高均质度主要关键。通过控制浇注温度过热度及浇注压力达到组织等轴晶化。以Cr12铁素体不锈钢铸件为例，浇注温度过热度对结晶度影响如图3所示。

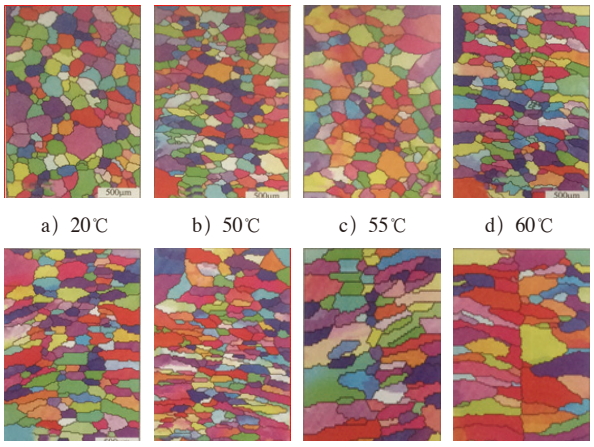


图3　不同过热度条件下Cr12铁素体不锈钢铸件的晶体取向

图3中，8个不同浇注过热度温度下，对结晶组织的影响：随着浇铸过热度的升高，细小等轴晶组织逐渐减少，粗大柱状晶组织逐渐增多。当过热度为20℃时，组织全部为等轴晶；当过热度为50℃时，表层开始出现细小的柱状晶；当过热度分别为55℃、60℃、70℃和80℃时，表层的柱状晶逐渐向中部延伸，柱状晶尺寸逐渐增大，中部等轴晶逐渐减少；当过热度为90℃时，表层的柱状晶更加发达；当过热度为140℃时，柱状晶组织异常发达，铸态坯由贯穿的柱状晶组成。

3.4　钢液浇注温度的计算方法

钢液进入型腔时的温度即浇铸温度。

浇注温度由两部分组成：一是钢液的凝固温度即液相线温度，由钢的化学成分决定；二是钢液的过热度即超过凝固温度的值。

计算公式为

$$T_c = T + \Delta T$$

式中 T_c——浇注温度（℃）；

T——液相线温度（℃）；

ΔT——钢液的过热度（℃）。

4 优质洁净铸钢件的生产系统

以型壳及覆膜砂型生产线为例，在提供合格原料的条件下，中小型洁净铸钢件从感应电炉熔化至浇注的生产工艺过程如图4所示。

该感应电炉熔炼及浇注生产工艺优点如下：

1）最大可能地避免钢液二次氧化形成夹杂物。

2）避免了由于使用钢液包造成钢液温度下降和波动，以及浇注二次氧化及包衬污染。

3）每个铸型钢液浇注温度过热度可控制在<±10℃；提高铸钢件组织细晶化程度；提高铸钢件组织等轴晶化；降低了铸件各部位化学成分偏析。

4）该工艺同时可应用于高强度低合金钢（HSLA）、高强度低碳钢（HSLC）和高合金钢铸件熔铸系统。

需注意的是，感应电炉生产高洁净钢铸件需解决纯净钢液原料入炉前的洁净化处理。

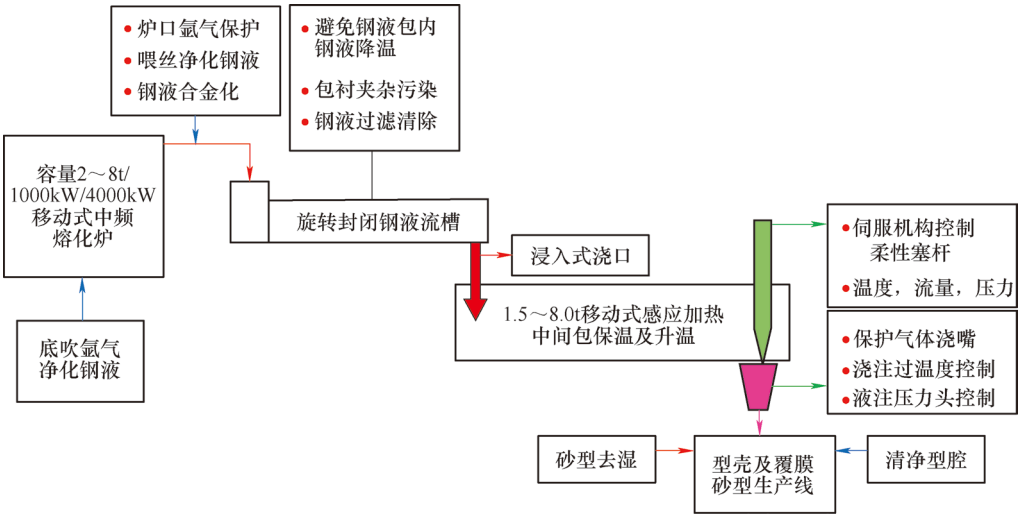


图4 生产工艺过程

5 铸钢件市场状况

5.1 国内铸钢件生产状况及存在问题

我国是铸钢件生产大国，产量约占世界总产量50%以上，但是铸钢件销售价格仅为国际市场价的1/4 ~ 1/3。很多单位仅用感应电炉熔化废钢浇注铸钢件，无任何精炼手段。我国铸钢件的内在质量，与欧美等先进工业国家相比还有很大差距。

5.2 洁净钢生产工艺在高强度低合金钢（HSLA）铸件生产中的应用

1）高强度低合金采用Nb、Ti、V等元素进行微合金化（微量合金元素加入量< 0.20%），在低碳或超低碳含量下，通过采取防止钢液二次氧化，正确控制夹杂物及浇注温度，以及从熔炼至浇注整个生产过程中因钢液都处在惰性气体保护中等措施而获得良好的强度、韧性、耐蚀性，获得成形性与焊接性相结合的铸钢件优良综合性能。

2）以细化晶粒和析出强化效应，获得了高达600 ~800MPa的屈服强度和良好的韧性。

3）高强度低合金钢由于生产高效，节约合金元素，向大气释放CO_2量少，因此被广泛应用于桥梁、建筑、船舶、车辆、石油及输油管道等各种工程用结构铸件。

4）超洁净钢的性能：超纯铁的耐腐蚀能力与金（Au）、铂（Pt）相当。

5）18Cr2NiMo不锈钢的w_P从0.026%降至0.002%，使耐硝酸腐蚀能力有极大提高。

6 结束语

1）要实现铸造生产优质、高效、节能和环保的目标，应从优化整个熔炼直至浇注系统设计着手。

2）高纯净钢铸件的生产，是中国铸造行业赢得铸造市场高端产品的必经之路。

MW 20210318