● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.010

喂丝球化工艺相关问题及对策

莫俊超,李 帅,吕 鉴,田 辉,李晓军

(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:简述了喂丝球化工艺的基本原理及主要优势,重点介绍了喂丝球化工艺在铸件设计、生产过程中需要注意的问题及对策。

关键词:球铁;喂丝球化工艺;现场对策

中图分类号:TG255 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)02-0135-05

Related Problems and Countermeasures of Cored-wire Feeding Spheroidization Technology

MO Junchao, LI Shuai, LYU Jian, TIAN Hui, LI Xiaojun

(Zhongche Qishuyan Locomotive Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

Abstract: The basic principle and main advantages of cored-wire feeding spheroidization process were briefly introduced. The problems and countermeasures in the design and production of cored-wire feeding spheroidization technology are introduced.

Key words: ductile iron, cored-wire feeding nodualrizing process, on-site solutions

20 世纪 60、70 年代,钢厂采用喂丝工艺对钢液进行脱氧、脱硫和合金化处理,以提高铸钢综合性能。20 世纪 90 年代开始,喂丝技术被开发应用于球墨铸铁的球化处理,于 2000 年开始正式进入批量应用阶段。当前无论是高镁球化剂的制备、卷线机技术还是喂丝设备及喂丝工艺等技术均得到了长足的发展,目前喂丝球化工艺技术已处于成熟阶段。近几年来,由于国家对环保的重视,各企业承载环保压力不断加大,采用喂丝球化工艺的铸造企业也越来越多,尤其是 2018 年开始,应用该工艺的企业数量呈现爆发式增长态势。为了让已经投资喂丝工艺的企业能够顺利应用,同时也使还不了解或准备采用喂丝工艺的企业对该工艺有一个比较全面、客观的了解,作者将就喂丝球化工艺的基本原理、主要优势、需要注意的问题及相应对策做了深入的研究。

1 喂丝球化工艺的基本原理

所谓喂丝球化,是指将一定成分、一定粒度的球化剂,经卷线设备包裹在一定厚度、宽度的钢皮内,形成适当强度、填充率的电缆状包芯线卷。然后经喂丝设备,以一定速度喂入带有包盖的处理包中,实现球化处理的工艺。其实质是以喂丝的方式,以钢皮作为载体将球化剂送入处理包底部,实现球化剂的加入过程。包芯线卷线机设备如图 1。



图 1 包芯线卷线机

Fig.1 Core-covered wire coiler

目前市场上的包芯线由直径分类主要有 ϕ9 mm 和 ϕ13mm 两种,每卷芯线的长度在 2 500~3 000 m,重约 1~2 t;芯线内 w(Mg)量在 15%~35%,同时选择性地加入 Si、RE、Ca、Ba 等元素;芯线的喂入速度为 15~40 m/min。喂丝球化处理工艺过程主要包括高镁型球化剂的生产、包芯线卷生产、铁液熔炼、喂丝球化处理、铁液孕育等。

2 喂丝球化工艺的主要优势

(1)球化剂加入量少,产生的渣量少,相应的可减少夹渣、气孔等缺陷,提高铸件质量及综合性能。

收稿日期:2020-01-09

作者简介:莫俊超(1971-),江苏溧阳人,高级技师.主要从事铸造熔炼技术方面的工作.电话:13921096030,
E-mail:mjc6030@163.com

(2)充分利用镁元素的球化优势,更易于获得细小、圆整的石墨球。镁是球化能力最强的元素,但镁的沸点低于铁液温度,为 1 107 ℃,用冲入法工艺很难提高球化剂中的 w (Mg) 量,其值一般低于10%,而包芯线中的 w(Mg)量一般都在 25%~35%。

(3)由于球化剂加入量少,则铁液增 w(Si)量就少,配料时可多耗用回炉料,对于生产工艺出品率低的铸件极为有利。一般对于,w(S)<0.020%,球化处理温度在 1 480~1 530 ℃的条件下,用冲入法球化处理时球化剂加入量为 1.2%~1.4%,用包芯线生产时包芯线加入量为 0.6%~0.8%。

(4)喂丝球化处理站可建成密闭空间并连接除尘系统,球化处理时可做到无烟尘外溢,改善车间作业环境。

(5)铁液处理的温降小。用喂丝法的铁液温降相比冲入法工艺平均减少 10~20 ℃,即可降低动能成本,而且铁液的冶金质量及球化质量也会随之提高。

(6)喂丝球化包无需设置堤坝,使得包子维护方便且维护成本低。

(7)整个运转过程可实现一键启动自动化操作,定量准确,减少人为操作风险。

(8)不需要加入覆盖剂,可减少因覆盖剂成分因素带来的材质影响。

(9)取消了球化剂称量和炉前压包作业,可减少用工成本。

(10) 普通球铁吨铁液球化处理成本较冲入法有一定程度的降低。

3 喂丝球化工艺需要注意的问题及对策

(1)喂丝方式的选择 喂丝方式目前存在卧式喂丝、立式喂丝和倾向式 3 种方式,卧式喂丝方式由于包芯线进线角度呈弧形,包芯线不在处理包的中心;对喂丝速度的变化比较敏感;占用场地相对较大。而立式或倾向式喂丝方式的包芯线基本垂直进入铁液,基本可以做到对准处理包的中心,故其对喂丝速度的变化不敏感,且占地面积小,故目前一般都选用立式或倾向式喂丝方式。

如果结合包盖的话还有两种:一种是包盖不动,包子往上提升的方式,这种方式适用于采用行车或支撑平车进行喂丝处理;另一种是包子不动,包盖进行升降的方式,这种方式一般采用机动辊道将铁液转运至包盖下方,然后由包盖下降进行喂丝处理,这是目前流水线生产企业采用较为普遍的一种方式。

(2) 喂丝站的位置选择 有些企业将喂丝球化站设置在熔炼炉旁,这样设置带来的问题是球化处理后的铁液在转运过程中停留时间长,会造成一定程度的球化和孕育衰退。也不利于球化和孕育合金成本的降低,所以喂丝处理站应尽可能就近建于浇注工位附近,尤其是熔炼炉远离浇注工位的企业更要注意此问题。

(3)除尘口开设位置选择 目前喂丝除尘口开设位置有两种方式:一种是直接开在包盖上;另一种是开在喂丝房的侧上面或顶部。只要风量和风速满足要求,两种方式除尘效果均没问题。但从温降及镁吸收率等方面考虑,建议采用第 2 种方式,这种方式由于吸风口不直接对着包内,它是抽吸球化反应后从包盖溢出的烟尘,故其对铁液的降温作用小;另外由于其吸风口不直接对着包内,在球化反应后产生的巨大镁蒸气压作用于包内液面,且很好地隔绝空气,使得镁的吸收率得以提升。

(4)卡断线问题 在喂丝过程中,包芯线突然停止不动或芯线在喂线过程中出现断线故障。其对策主要有:①穿线前要搞清是内抽式还是外抽式,目前以内抽式为主,搞错容易产生卡线现象;②提高包芯线的质量,确保包芯线不开裂、不漏粉且每米粉重均匀稳定,防止出现所谓由于芯线不密实造成的“空管”问题;③两卷包芯线的接头必须接牢靠、且接头直径应小于喂丝机进线处的导向管直径。接线操作如图 2、图 3 所示;④包芯线卷要尽可能靠近喂丝机,使其抽线时尽量不要倾斜抽线,以减轻抽线时的



图 2 接线过程
Fig.2 Wiring process



图 3 结头外观
Fig.3 Appearance of junction head

阻力。如图 4、图 5 所示；⑤包芯线在卷线时两根钢带对接时的焊接一定要牢固，否则容易产生断线现象；⑥包芯线卷外需要加装导线框以防包芯线散乱；⑦需要安装包芯线导向管。包芯线从线卷拉出后，需要采用导向管使其导入到处理包内。如果是卧式喂丝方式，安装时应保证喂丝机出口的导向管弯曲部分的弯曲半径不小于 1 m，垂直部分在 1 m 左右，如图 6、图 7 所示；如果是立式喂丝方式则导管是直的，其长度应不低于 1 m，如图 7 所示。因包芯线直径 9~13 mm，故导管内径在 35～50 mm。如果管子有接口的部分，则要保证接口部分过渡的圆滑性，不能有台阶，以防喂线过程中芯线在接口部分出现卡线故障；⑧辅助设备的安装，当包芯线从线盘中被拉出来时，芯线呈螺旋盘状。可在喂丝机的输入口装上喇叭口状的部件，将芯线的螺旋弯曲消除，有效减少包芯线在喂丝过程中的阻力。对

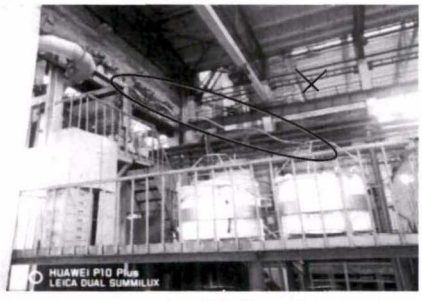


图 4 芯线卷远离喂丝机平台

Fig.4 Core wire coil far away from the feeding machine platform



图 5 芯线卷接近喂丝平台

Fig.5 Core wire coil close to the feeding platform

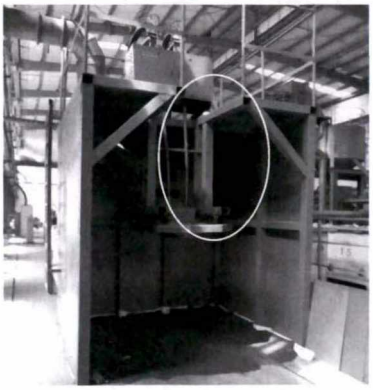


图 6 芯线导向管的安装位置

Fig.6 Installation position of core guide tube



图 7 芯线导向管

Fig.7 Cored-wire guide tube

于喂丝机和包芯线卷在相对高度落差较大的情况下，可以在喂丝机的进口增加弧形排列的导向轮组结构，以释缓芯线螺旋扭曲。

(5)堵线问题　在生产过程中有时会出现堵线问题，即在喂丝机下方与包盖之间产生堵线故障，如图 8 所示，其对策主要有：①喂丝机出口导管与下方导向管之间的距离应尽可能小，且尽量保持中心对正；②提高包芯线进入处理包的垂直度，一般要保证在 5°~10°左右，以免包芯线触及包壁后力量迅速传递至上方导致线打弯；③若处理包是在辊道上方放置，则须在处理包底部设置定位机构，防止球化包在处理过程中的晃动或移动，造成包芯线偏及包壁后出现堵线问题；④应根据现场残镁问题适当降低喂线速度，以免包芯线触及包底后力量迅速传递至上方导致绕堵线；⑤经常清理导管及包盖内侧的干渣，以防堵塞引起堵线。如图 9 所示。



图 8 堵线故障

Fig.8 Line clogging failure

(6)温降问题　温降问题各企业反映不一，其降低温降对策主要有：①喂丝处理包在筑包前需要加保温材料，如纳米石棉板等，且需要保证一定的包壁厚度；②出铁后在处理包上撒一层除渣剂，并及时加上包盖或陶瓷纤维毯覆盖保温；③使用前必须对球化包进行烘烤或烫包处理；④如果熔化炉离浇注



图 9 导管内壁结渣
Fig.9 Pipe inner wall slagging

位较远，建议采用叉车出铁，效率高，温降小，不建议采用辊道转运铁液；⑤如前所述，喂丝除尘吸风口不开在包盖上，开在房顶或侧上面。

(7)包盖相关问题　由于包盖在铁液的上方，温度较高，易产生变形，导致包盖盖不严，喂丝时铁液喷溅。加之包芯线镁含量高，喂丝过程中产生的粘渣容易喷溅至包盖内壁形成渣壁，造成包盖上面的喂丝孔逐步变小，最终导致导管抵住包盖，导致包盖提不上去；如果渣溅至导管内，容易造成导管的堵塞；包盖如图 10 所示。其对策主要有：①包盖钢板厚度不低于 10 mm，且里面的耐火材料厚度应不低于 100 mm 或直接浇注壁厚 50 mm 以上的铸铁包盖（使用前需要刷石墨涂料）包盖重应适当偏重点，利用包盖重紧密贴合包口，保证反应的镁蒸汽，提高镁的吸收率；②包盖内腔直径应与包子内壁直径一直，其中喂丝包口边缘不建议圆角过度，包盖内腔高度应不低于 300 mm，使用前内壁应涂刷石墨涂料；③合理设计喂丝包尺寸，确保液面离包子上口不低于 400 mm；④加强对包盖及导管清理工作。

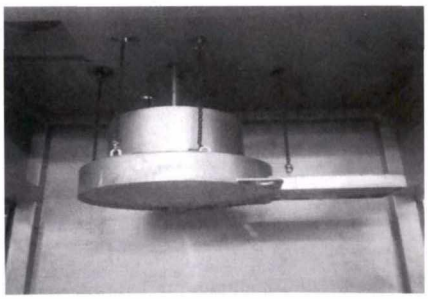


图 10 喂丝包盖图
Fig.10 Feeding cored-wire cover

(8)残余镁不稳定问题　在使用过程中有时会出现残余镁不太稳定的问题，其对策主要有：①选用质量好、运行稳定的喂丝机，不要过分压低设备采购价格；②做好设备的点检、维保并定期校核喂丝速度；③选择自产的球化剂且管理规范、质量稳定的球化剂供应商；④依据每批次成分来料分析结果来微调喂丝加入的长度；⑤严格控制处理包的烘烤温度、出铁温度、喂丝处理温度、浇注时间等参数；⑥确定合理的喂丝速度。喂丝速度的确定应考虑到铁液液面高度、铁液处理量、铁液温度、铁液成分等因素。速度的调节理论上应掌握在芯线插入包底位置时刚好熔化，边熔化，边喂入，连续不断地供给，保证芯线始终在包底附近位置反应。确定喂丝速度的经验做法是：先量出包芯线末端（需固定位置）至处理包底部的长度，然后启动手动喂丝机进行喂丝，听到球化起爆的反应声时，立即查看喂入长度，如果这个长度和刚才所量长度数值基本接近时，这个速度应是合适的；⑦喂丝长度的确定，喂丝长度应与包芯线成分、铁液温度、铁液 w(S)量、铸件大小、铸型种类、浇注时间等多方面因素综合起来考虑，有人得出的计算公式为：

$$L=0.76\Delta S+w(\mathrm{Mg}_{残})\eta\times q\times Q$$

式中，L 包芯线长度 /m；Q 铁液重量 /g；η Mg 的收得率（%）；w（$\mathrm{Mg}_{残}$）球化处理后铁液中的残余镁量（%）；ΔS 处理前后铁液 w(S)量变化（%）；q 包芯线单位长度的 w(Mg)量 /g·m^{-1}。

此公式只能作为参考，具体还是要通过检测铸件的球化率、力学性能、铸件中的 $w(\mathrm{Mg}_{残})$、$w(\mathrm{RE}_{残})$、w(S)量，综合考虑合适的加入量。当然在已经确定喂丝长度的情况下，还要根据实际出铁量及时调整喂丝长度；对于大批量生产的单一产品，必须严格控制出铁量；⑧多出铁重铸件的生产，对于多品种铸件生产且每包处理铁液相差较大的企业，则可能需要采用多种规格的处理包，以满足最低高径比的需要。

(9)高径比问题　所谓高径比，即球化处理时球化包铁液实际高度 H 与包子内径 D 之比。一般情况下，我们希望高径比 H/D 大一点为好，镁的吸收率与高径比之间并不是我们想象的线性关系，实际是开始镁的吸收率呈上升趋势，但当高径比到达一定的数值后呈现不增反降的趋势，所以高径比过大过小均不好，一般情况下以 1.1~1.2 较为合适。可能的原因是高径比过大，喂丝速度必须加快，单位时间内喂入铁液的包芯线量势必增多，相应带来镁起爆造成的铁液翻滚也严重，镁的烧损相应增加，造成镁的吸收率下降；高径比过小，喂丝速度慢，包芯线的起爆基本在铁液的中上方，同样的也会造成镁的烧损增加，导致镁的吸收率下降。实际生产过程中，高径比也不太可能做得过大，因为我们设计包子高度时还要同时考虑两个因素：一是铁液面离包口的最小

距离（因为高镁包芯线反应比较激烈，根据经验一般推荐为不低于 400 mm）；二是炉台的高度。一般的处理包高径比如图 11 所示。

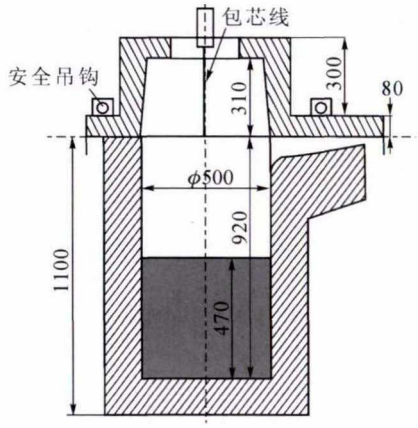


图 11 喂丝包高径比示意图

Fig.11 Schematic diagram of height to diameter ratio of feeding cored-wire ladle

（10）大件生产问题　大件除以上一些共性问题外，还需要注意以下问题：①根据铁液量可采用多根包芯线同时进行喂丝；②喂丝处理后，更要进行在线金相和成分的快速检测，如未达到检测规范要求，可补加芯线来进行挽救；③包芯线的成分设计，除了 Mg 元素之外，应适当添加重稀土或降低稀土含量，适当添加 Ca、Ba、Sb 等元素，克服因壁厚厚大造成的凝固时间长而带来的一系列金相问题；④加强孕育处理，可采用浇注时随流孕育、浇口杯中加孕育块、型内孕育等方法。

4　结语

据不完全统计，截止 2019 年 10 月，全国采用喂丝工艺的企业数大约在 3 000 家左右，约占我国铸铁企业数量的 20%左右，而且还在呈不断增长的趋势。而喂丝球化工艺及其相应技术在经过 20 多年的发展后，目前已经基本成熟，其应用的成功与否主要是一些细节处理的问题，希望本文出的问题及对策能够对喂丝工艺的应用及发展起到一定的促进作用，并希望通过大家的使用和不断总结，能够尽快形成喂丝技术方面的相关标准，更好地来推动我国喂丝工艺技术的发展。

参考文献：

[1] 殷作虎. 喂丝球化处理技术进展及问题对策 [J]. 现代铸铁，2012 (2):22-27.

[2] 殷作虎，王长坤. 喂丝法处理球墨铸铁技术的开发与应用[J]. 现代铸铁，2005(5)：37-41.

[3] 冯永成，谢拥军. 喂丝球化在离心球墨铸铁管生产中的应用[J]. 工艺与装备，2008(1)：37-41.

[4] 赵鹤平，朱德兵. 喂丝法球化处理工艺在铸造生产中的应用[J]. 铸造，2002，51(7)：446-449 .

[5] 王顺序. 降低喂丝球化高镁包芯线加入量的工艺实践 // 中国铸造活动周论文集[C]，北京：中国铸造协会，2015：1-5.

(上接第 134 页)

3　结束语

（1）使用单炉床的等离子冷床炉去除了绝大部分的高密度夹杂物，但仍有 1 颗高密度夹杂物带入铸锭，说明等离子冷床炉中等离子焰矩引起的液体涡流、液体在冷床停留时间短、单炉床短流程炉床设计都会对高密度夹杂物的消除有不利影响。如果为双炉床（“C 型”冷床）设备，延长熔体流动的时间和距离，则在合适的熔炼工艺下去除全部高密度夹杂物完全有可能。

（2）高密度夹杂物（即使 5 mm 大的颗粒）进入炉床熔池中后，并不是立即沉淀，而是受液流的影响产生移动。在横向、纵向两个方向都有移动，实际上，横向的移动并不影响去除效果。由于液体的流动，使纵向移动占主导作用，这种移动距离对夹杂物的去除效果起到关键作用。熔炼后在铸锭中未发现低密度夹杂物 TiN，表明较长的熔体暴露时间和较长的流动距离对低密度夹杂物的去除十分有利。

（3）等离子冷床炉熔炼实现了对合金熔化、精炼、铸造过程的单独处理和调控，在消除各种冶金缺陷方面表现优异。其开放式的熔炼模式，对夹杂物从合金熔池中的分离、去除效果明显，并且使得对熔炼过程的介入与调整变得更加灵活。

参考文献：

[1] 马济明，贺金宇，庞克昌，等. 钛铸锭和锻造[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.

[2] Bakish R. Electron beam melting and refining [C]. UK:State of the art, 1990:119.

[3] Froes F H, Caplan I. Ti‘92: Science and Technology[C]. USA:The Minerals, Metals & Materials Society, 1993:2867.

[4] 张英明，周廉，孙军，等. 钛合金中的硬 α 夹杂缺陷及其等离子体冷床炉熔炼控制技术[J]. 钛工业进展，2007，24(4)：27.

[5] 马济明，蔡建明，郝孟一，等. 钛合金等离子冷炉床熔炼技术的发展[J]. 稀有金属材料与工程，2005，34(s3)：7-12.