球墨铸铁球化处理能耗的冶炼过程及控制研究

杜 坤 常方甫
河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，河南 安阳 455133

[摘要]球化处理属于球墨铸铁生产过程中能量二次投入和温度损失叠加的部分，它的能耗水平由原铁液冶金条件以及工序间温度衔接状况决定。从原铁液硫氧含量对球化剂无效消耗的驱动作用出发，分析球化处理温度偏差对镁吸收率和温降的连锁影响，比较冲入法和喂丝法单位处理能耗的差别，讨论包衬结构和周转节奏对等待温降的影响。控制措施的重点不是增加保温设备，而是把球化处理温度波动限制在可以预测的窄带之内，使球化剂用量、给线参数和铁液吨位形成对应关系。用吨铁球化剂消耗、球化温降、吨铁电耗等可以量化的指标，配合铁液称量、温度检测装置，可以将球化处理能耗由经验调节转变为参数控制。

[关键词]球墨铸铁；球化处理；能耗控制；镁吸收率
DOI：10.33142/ect.v4i10.20660 中图分类号：TQ174.1 文献标识码：A

Research on the Smelting Process and Control of Energy Consumption in Spheroidizing Treatment of Ductile Iron

DU Kun, CHANG Fangfu
Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: Spheroidization treatment is a part of the secondary energy input and temperature loss in the production process of ductile iron. Its energy consumption level is determined by the metallurgical conditions of the original molten iron and the temperature connection between processes. Starting from the driving effect of the original iron liquid sulfur and oxygen content on the ineffective consumption of spheroidizing agents, this paper analyzes the chain effect of spheroidizing treatment temperature deviation on magnesium absorption rate and temperature drop, compares the difference in unit processing energy consumption between the flushing method and the wire feeding method, and discusses the influence of the lining structure and turnover rhythm on waiting temperature drop. The focus of control measures is not to increase insulation equipment, but to limit the temperature fluctuations of spheroidization treatment within a predictable narrow band, so that the amount of spheroidizing agent, feed line parameters, and iron liquid tonnage form a corresponding relationship. By using quantifiable indicators such as ton iron spheroidizing agent consumption, spheroidizing temperature drop, and ton iron electricity consumption, combined with iron liquid weighing and temperature detection devices, the energy consumption of spheroidizing treatment can be transformed from empirical adjustment to parameter control.

Keywords: ductile iron; spheroidization treatment; energy consumption control; magnesium absorption rate

引言

球化处理一般被当作质量控制工序，其能耗属性在讨论中常常被忽略，而把球化率和残留镁的达标要求放在第一位。球化处理就是熔炼后铁液出现的第一次明显温度损失和合金无效消耗的集中地方。原铁液中硫、氧在球化剂加入后先与镁反应，消耗的镁不能产生球化效果，反而会直接转化为球化剂成本增加和渣量上升。球化反应本身具有沸腾搅拌加速包内铁液向包衬、环境散热的作用，从而压缩了后面的浇注温度窗口。两项效应叠加，使部分车间为了补偿而提高出炉温度，更高的出炉温度又加重了镁的挥发和烧损，造成能耗上升的循环。

1 球墨铸铁球化处理的冶炼过程

1.1 原铁液熔炼与出炉条件对球化处理能耗的直接影响

原铁液出炉温度和成分决定球化处理开始时的能耗状态。中频感应电炉熔炼时，熔炼环节能耗占整个工艺的六成以上，出炉温度每升高一档，熔炼时间和电耗都会随之增加。出炉温度过高会导致球化反应阶段出现铁液温度

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

过高、镁沸腾挥发过快、反应不稳定等问题，导致进入铁液的镁量减少[1]。为了补偿后续温降，特意提高的出炉温度在球化处理时部分变成镁的烧损而不是有效的温度储备。原铁液硫含量决定球化剂的消耗。硫含量在 0.015%以下时球化效果比较稳定，硫的波动绝对值小，球化元素消耗量也小；硫含量大于 0.025%时，球化前脱硫是必要的，否则球化剂的加入量要增大。活性氧的作用和硫相似，氧含量过高时加入的镁先被氧所消耗，剩余的有效镁量不能稳定地控制石墨的形态。出炉温度和原铁液洁净度一起构成球化处理能耗的输入端边界条件。

1.2 球化处理工序的能耗环节构成

球化处理工序能耗可以分为三个可以单独测量的分量。第一种情况就是球化剂无效消耗，即加入的镁中由于和硫、氧反应以及与包内气氛接触而被氧化、挥发掉，没有参与石墨球化的部分。冲入法每吨铁液球化剂用量一般为 15～18kg，喂丝法包芯线用量约为 25m，折合球化剂约 10kg，两者之间有很大一部分是由于加入方式对镁的有效利用率不同造成的。第二是球化反应过程温降，即镁沸腾搅拌引起对流散热增强、包内液面裸露造成辐射损失、反应结束后扒渣操作打开散热窗口等。第三是球化之后到浇注前的温降，受包衬蓄热状况、液面是否被覆盖以及转运速度影响。三项分开考察，才能判断某一项节能措施实际作用于哪个分量，避免把降低球化剂消耗和降低温降混为一谈。

1.3 球化后至浇注前的温降损失与等待能耗

球化处理结束到浇注开始之间的时间间隔在许多车间以分钟计算，其温度代价并不比球化反应本身低。中频电炉熔炼的间歇性同浇注节拍不完全相适应，致使球化后的铁液在包内等待成了常事。电炉熔炼间隔时间过长时，球化处理后的包内铁液温度下降达 80℃左右，冬季更明显。这部分温降的补偿方式一般是熔炼时提高出炉温度，即把等待期间的散热损失转移到电炉上，用电耗的形式支付。液面覆盖状态对于等待温降的影响比较明显，单独使用集渣剂时铁液表面降温速度约为每分钟 8～10℃，采用保温覆盖剂和集渣剂混合覆盖之后，降温速度降低到每分钟 4～6℃。覆盖方式的改变会改变表面散热系数，但是累积到整个等待时段，对于是否需要提高出炉温度起着决定性的作用。

2 球化处理能耗的主要影响因素

2.1 原铁液硫氧含量与球化剂实际消耗量的关系

硫是决定球化剂消耗倍数的主要因素。原铁液硫含量增大时，要相应数量的镁与之结合形成硫化镁进入渣中，这部分镁不会产生球化作用。硫含量低时，球化剂基础加入量减少，硫波动收窄使残留镁控制区间变宽，操作不需要过分地加大加入量来覆盖波动的风险。原铁液经过脱硫去氧处理之后，球化元素的残留量会下降，夹杂物变少，铁液的纯净度得到改善。氧的影响更隐蔽，活性氧先于硫和镁反应，氧含量的波动使得同样的加入量下有效镁量难以预估，现场常常为了保险而多加球化剂。炉料净化的能耗意义是减少球化剂无效消耗的基数，而不是消耗自身的能量。

2.2 球化处理温度控制偏差对镁吸收率与温降的连锁影响

镁吸收率和球化处理温度成反比。喷吹球化试验结果表明，铁液温度越低，镁的吸收率越高，球化深度越大；1460℃时球化深度为 1.32m，镁的吸收率为 50%以上[2]。球化处理温度下限由浇注温度倒推而来，在这个下限之上继续提高温度，得到的不是球化效果的改善，而是镁挥发损失增大、温降负担加重。温度越高，镁沸腾越剧烈，对流散热、液面喷溅热损失越大，球化处理自身温降也越大，反过来又要求更高的起始温度。将球化处理温度偏差控制在±7℃以内可以得到比较稳定的球化效果，该精度要求指向出炉温度、转运时间、包衬状态三者匹配，而不是只依靠温度检测。温度控制窄带化对球化剂消耗和温降两个分量都有影响。

2.3 球化工艺方法的单位处理能耗差异

冲入法和喂丝法单位处理能耗不同，不是由于设备本身的电耗引起的，而是因为镁进入铁液的方式不同。喂丝法将包芯线以一定的速度送入包底，镁在铁液深处释放，蒸气上升路程中与铁液接触时间、接触面积都大于冲入法液面附近反应，镁吸收率高且稳定。喂丝处理铁液温降比冲入法平均低 10℃～20℃左右，不需要增加保温措施就能达到目的。工艺选择不能只根据单吨能耗来决定。冲入法对铁液量适应范围广，设备简单，在小批量、多牌号生产中仍有不可替代性；喂丝法则要求包芯线供应、喂丝机维护和给线参数匹配形成日常管理制度，其节能效果以稳定生产节拍为前提。能耗比较要放在具体的产量规模和产品结构上进行。

2.4 铁液包保温结构与包衬状态对温降的贡献

包衬蓄热和导热是球化处理温降中容易被忽视的通道。耐火材料盛运铁液时不断吸热，包衬导热系数越大、包壁越薄，铁液向包壳传热越快。包衬加入低导热材料可

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

以降低导热系数，复合空心球包衬可以使导热系数降低15%～35%，从而减少钢水温降 3～15℃。球化包加盖可以减小沸腾过程中热量的损失以及烟尘的逸散，从而提高镁的吸收率。包衬状况也会影响周转速度。冷包启用时包衬从铁液吸热明显大于热包，如果不经过充分烘烤预热就投入球化处理，温降增量就会抵消出炉温度控制所作的压缩。包衬保温结构和周转节奏互相制约，单独改善包衬材料而不改变包次衔接，温降改善效果不大。从表 1 中可以看出不同的球化工艺方法对于球化剂消耗、温降及适用条件等各方面的差异，可以作为工艺选择以及能耗判断的参考。

表 1　冲入法与喂丝法球化处理能耗相关指标对比

指标	冲入法	喂丝法
吨铁球化剂用量	15～18kg	约 10kg，折合包芯线 25m
镁吸收率典型水平	受覆盖与操作影响，波动较大	1460℃条件下可达 50%以上
球化处理温降	基准水平	较冲入法低 10 至 20℃
对原铁液硫含量适应	硫高时球化剂用量上调明显	脱硫脱氧效果较好，放宽原铁液要求
设备与运行条件	设备简单，铁液量灵活	需包芯线供应与给线参数管理

3 球化处理能耗的控制措施

3.1 原铁液脱硫与炉料净化降低球化剂无效消耗

脱硫措施的选择应该根据原铁液硫含量的日常分布来定，而不是按照上限值全部配置。硫含量长期在 0.02%以下的铁液，球化剂消耗主要受氧和炉料带入的不稳定反应物影响；此时将精力放在炉料净化、防锈防潮上，比增设脱硫工序更经济。硫含量在 0.025%以上且波动大的铁液，多孔塞吹氮脱硫在球化前可以将硫降至较低水平，但能耗代价和球化剂节约量之间需要进行吨铁核算。炉料净化主要是控制废钢、回炉料表面氧化层和夹杂，降低入炉氧含量，使球化剂加入量从补偿氧消耗的被动逻辑中摆脱出来。脱硫和净化共同的目标并不是要达到最低的硫含量，而是在保持硫氧含量波动范围小的基础上，使球化剂的使用量可以以相对稳定的基数来确定，而不是随每包球的增减而随意增减。

3.2 球化处理温度窗口的窄带控制与出炉温度、球化温度与浇注温度的衔接

温度窗口窄带控制要从浇注温度倒推，不能从出炉温度顺推。根据铸件壁厚及浇注时间确定浇注温度区间，再加球化处理温降和转运温降实测值，得到球化处理温度允许区间，再加球化反应至出炉之间温降，得到出炉温度目标值[3]。倒推链条中的每一个环节的温降都不应该用经验估值来代替，而应该根据本车间最近连续测量的包次数据来进行。当球化处理温度的偏差能控制在一个比较小的范围内时，球化剂的加入量就不需要为温度的波动留有较大的余量，镁的吸收率也会因为反应的平稳程度得到改善而趋于稳定。出炉温度、球化温度和浇注温度之间的衔接质量，最后都会反映到是否需要通过增加电耗来弥补某一段温度的不足上。

3.3 喂丝法给线量与给线速度的按温度与吨位匹配控制

喂丝法的节能效果不是由包芯线本身决定的，而是看给线参数是否根据铁液条件做出反应。给线量由铁液吨位、原铁液硫含量和目标残留镁共同决定，给线速度要和铁液深度和球化温度相匹配。有生产数据显示，在 30 镁球化线条件下，球化温度 1480℃时每吨送线 24m、送线速度 27m/min，而球化温度 1470℃时每吨送线可降低到 18～19m，送线速度保持在 26～27m/min。送线速度过高会造成镁蒸气在铁液中停留时间缩短、吸收率降低；速度过低会造成反应时间延长、温降增大。将给线量和给线速度由固定的数值改为根据吨位、温度区间来设定的对照表，是喂丝法车间可以立即实施的措施，不需要增加新的硬件，只需要把现有的铁液称量数据和温度检测数据输入到喂丝机参数选择环节即可。

3.4 球化包保温覆盖与周转节奏减少重复加热能耗

液面覆盖改善应当先于包衬结构改造，因为覆盖措施投入少、见效快。集渣剂和保温覆盖剂按一定比例混合使用，在铁液表面形成烧结层，使铁液降温速度由每分钟 8℃～10℃降低到每分钟 4℃～6℃，减少铁液表面氧化、回硫。包盖作用和它一起存在，加盖减少沸腾时的辐射散热以及镁光逸出，对镁的吸收率稳定起到正向作用。周转节奏调整是针对冷包问题，把球化包连续使用的包次列入浇注计划排序，保证包衬在两次处理之间有较高的初始温度，防止冷包从铁液中大量吸热。对于不可避免的冷包启用，充分烘烤预热应作为球化处理准备工序而不是辅助工序来执行，其燃料或者电耗应该计入球化处理能耗账中，不能笼统地归入熔炼。

3.5 球化处理环节余热与包体散热的就近回收利用

球化处理环节余热回收不能追求跨工序大范围利用，而应该注重就近、短路径的热量回用。吊包在球化处理前的余热可用于预热即将加入的球化剂和孕育剂，但是预热时间要控制好，防止合金氧化反而影响吸收。包体散热在连续生产条件下表现为包衬蓄热保持，通过周转节奏优化使包衬热量服务于下一包铁液，本质上是不需要换热设备

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

的余热利用。液面覆盖层在球化之后到浇注之前保持不变，减少的散热损失直接降低后续对浇注温度不够的担心，进而减轻熔炼环节的升温压力。余热回收措施评价标准应该反映的是它减少了哪个环节的二次加热需求，而不是回收装置本身输出功率。

4 控制措施的实施条件与效果判断

4.1 铁液称量、温度检测与球化剂计量装置的配置要求

上述控制措施的可操作性要依靠三项基本的数据，即铁液重量、铁液温度以及球化剂实际加入量。铁液重量通过电子吊钩秤或者包车称重装置获得，精度要达到吨位分级的要求，保证给线量或者冲入量可以按重量档位选择而不是按包估量。温度检测要覆盖出炉、球化前、浇注前这三个节点，球化前温度测量的位置及响应时间要固定，否则窄带控制偏差的判断就没有了参照标准[4]。球化剂计量在冲入法环节为球化剂称量，在喂丝法环节为给线长度计数和校验；喂丝机设定的送线速度与实际速度有偏差时，给线量按吨位匹配就失效了。三项装置不需要使用高精度的传感器，但是需要形成每包记录、定期校核制度，使温度窗口和给线参数控制建立在可追溯的数据上。

4.2 以吨铁球化剂消耗、球化温降和吨铁电耗为指标的效果判断

效果判断不能只看节能率，还要看三个指标的方向是否一致。吨铁球化剂消耗是硫氧条件改善、温度控制收窄后无效消耗减少的反映，吨铁球化剂消耗下降一般会早于电耗下降。球化温降收窄体现的是包衬状态、覆盖措施以及转运节奏三者共同作用的结果，温降稳定比温降绝对值更具有操作意义，因为只有稳定的温降才能使出炉温度目标值降低。吨铁电耗是前两项指标改善后产生的结果，球化剂消耗减少减轻渣量和扒渣热损失，温降减小降低对出炉温度的补偿要求，两者叠加才能在电耗上体现出来。如果球化剂消耗减少但是温降没有改善，说明脱硫或者净化措施起作用了，但是包衬和节奏没有改变；如果温降收窄但是球化剂消耗没有减少，那么温度控制的收益就被原铁液硫氧波动所抵消。三项指标一起使用，可以判断出控制措施落在哪个环节，下一轮改进应该指向哪里。

5 结束语

球化处理能耗的可控性主要体现在大部分损失不是由于热力学极限造成的，而是由于温度波动、计量粗放和节奏失配所造成的无效消耗和过度补偿。将球化剂消耗由经验加量改为按硫氧条件来定基数，把球化温度由宽区间运行变为倒推得到的窄带，把喂丝给线参数由固定值改为按吨位和温度匹配，把包衬和覆盖由辅助手段纳入温降预算，这些措施的共性是不需要大规模设备更换，而是以计量、记录、参数对照表为基础。其实施效果要以吨铁球化剂消耗、球化温降和吨铁电耗三个指标一起判断，不能把某一项指标的改善当作整个能耗的下降。熔炼能耗占球墨铸铁生产总能耗的大部分，在球墨铸铁生产过程中，球化处理环节的节能空间较小，但是有限空间的确定性获取，比宽泛的节能号召更贴近车间可执行层面。

[参考文献]

[1]任现伟.转运过程对铁液浇注温度影响的试验研究[J].铸造,2024,73(9):1323-1328.
[2]齐朋展,徐锦锋,闫启栋,等.包芯线种类及芯料镁含量对球墨铸铁组织及性能的影响[J].铸造,2020,69(8):822-827.
[3]沈永涛,刘仕法,赵生存,等.铜-铬合金化生产球墨铸铁机床铸件的研究应用[J].铸造,2026,75(9):1033-1038.
[4]郑晓华,马占江,王睿,等.退火对 QT400-18L 球墨铸铁组织与低温韧性的影响[J].金属热处理,2026,51(5):268-275.

作者简介：杜坤（1992—），男，河南安阳人，助理工程师，山东协和学院工程造价专业毕业，现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，从事球墨铸铁管工作；常方甫（1993—），男，河南安阳人，助理工程师，安阳工学院毕业，现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，从事球磨铸铁管工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.