# 硫含量对球墨铸铁球化处理效果的影响与控制

常方甫 李 鑫
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]硫在球墨铸铁中会消耗掉球化元素中的镁、稀土等，生成硫化物夹杂，从而影响球化率和球化衰退。原铁液硫含量的控制并不是越低越好，过低的硫会削弱石墨形核，增加白口倾向，生产中应将原铁液硫含量控制在0.005%～0.030%之间，球化后的残余硫稳定在 0.01%以下。硫的控制要依靠熔炼炉料的选择、炉外脱硫、球化剂用量的匹配、孕育浇注环节的配合来完成，任何一个工序的改变都不能弥补由于硫含量的波动而造成的球化元素消耗量的变化。用残余硫和残余镁联合判断代替单一的残余镁指标，可以更准确地找出硫导致的球化不良和硫化物夹渣的原因。

[关键词]球墨铸铁；硫含量；球化处理；残余镁
DOI：10.33142/ect.v4i10.20661 中图分类号：TQ174.1 文献标识码：A

# The Influence and Control of Sulfur Content on the Spheroidization Treatment Effect of Ductile Iron

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

**Abstract:** Sulfur in ductile iron consumes magnesium, rare earths, and other spheroidizing elements, generating sulfide inclusions that affect spheroidization rate and spheroidization decay. The control of sulfur content in the original molten iron is not necessarily better if it is lower. Too low sulfur will weaken graphite nucleation and increase the tendency for white casting. In production, the sulfur content in the original molten iron should be controlled between 0.005% and 0.030%, and the residual sulfur after spheroidization should be stable below 0.01%. The control of sulfur relies on the selection of smelting furnace materials, external desulfurization, matching of spheroidizing agent dosage, and coordination of inoculation and casting processes. Any change in one process cannot compensate for the changes in spheroidizing element consumption caused by fluctuations in sulfur content. Using a combination of residual sulfur and residual magnesium instead of a single residual magnesium indicator can more accurately identify the causes of poor spheroidization and sulfide slag inclusion caused by sulfur.

**Keywords:** ductile iron; sulfur content; spheroidization treatment; residual magnesium

## 引言

球墨铸铁的球化处理以镁或者镁稀土合金为主，硫是铁液中对球化元素消耗最直接的干扰元素。镁与硫的亲和力比镁与氧的亲和力要大得多，铁液中的溶解硫在球化反应初期就和镁结合成硫化镁，这部分镁不再参加石墨球化，而且硫化物颗粒如果不能充分上浮，就会以夹杂的形式残留在铸件里。生产过程中球化不良和球化衰退的案例，大部分可以归因于原铁液硫含量过高或者硫波动没有在球化剂加入量上得到补偿。另一方面，近几年超低硫铁液球化实践也证明，硫含量并不是越低越好，太低的硫会减少异质形核的位置，增大白口倾向和石墨球数不足的风险。硫含量控制不是单一的“越低越好”，而是在一定的范围内寻找稳定、可预测。

## 1 硫对球墨铸铁球化效果的影响机理

### 1.1 硫在铁液中的存在形式及其与球化元素的反应

铁液中的硫主要是溶解硫，在球化处理前，随着炉料、熔炼条件的变化，在 0.01%～0.1%之间变化。镁加入铁液之后，溶解硫先和镁反应生成硫化镁，反应产物在铁液温度下以液态或者固态颗粒的形式存在于铁液中，部分上浮到渣层里，部分滞留在铁液里成为非金属夹杂物[1]。该消耗路径的化学计量关系表明，原铁液硫每增加 0.01%，就必须要额外增加大量的镁来保持残余镁含量。稀土元素也会参与到脱硫反应当中，生成稀土硫化物，它的密度以及形态和硫化镁有差异，在含有稀土球化剂的体系里，稀土

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

对于硫的固定作用能够在某种程度上抵消掉镁的消耗波动，但是稀土硫化物也成了夹杂物的来源。草川隆次早期工作已经表明，在镁处理前铁液硫含量大于 0.1%时，加入的镁要同时满足脱硫和残留球化的要求，球化剂的有效利用率随着原硫的升高而明显降低。

### 1.2 硫含量对石墨形核与球化衰退的作用

硫对石墨球化的影响有一个经常被忽略的中间区间。当原铁液硫含量极低的时候，硫化物颗粒数量少，石墨球化所需要的异质形核基底减少，球墨数量降低，薄壁件白口倾向增大。有研究认为，镁处理前原始铁液中的硫含量不能太低，一般要控制在 0.006%以上，否则会造成球化反应变差、碳化物增多。而硫含量偏高的方向，后果更加直接，残余硫偏高说明球化处理后还有一部分硫残留在铁液里，这部分硫在浇注到凝固的间隙里继续和残余镁发生反应，使有效残余镁随着时间的推移逐渐减少，这就是球化衰退。喷吹球化工艺的试验数据显示，球化后残余硫稳定降低到 0.01%以下的时候，残余镁含量保持在 0.05%以上就可以防止衰退现象发生。硫致衰退的本质就是残余镁被硫不断“抽走”，衰退速率和残余硫含量成正比，这也是低硫原铁液下球化衰退时间得以延长的原因。

## 2 硫含量的适宜范围与波动影响

### 2.1 原铁液硫含量的控制上限与下限

根据目前的生产数据以及文献资料，原铁液硫含量的合理范围可以归纳为 0.005%～0.030%，常规球墨铸铁生产时以 0.02%以下为控制目标，冲天炉熔炼时可放宽到 0.03%，但需要相应增加球化剂的用量。上限根据情况确定，当原铁液硫含量大于 0.06%时，铸件夹渣缺陷严重，0.09%到 0.135%区间内夹渣缺陷急剧增加；硫含量大于 0.1%时，单纯增加球化剂的加入量已经不能保证完全球化，石墨形态向层片状转变的风险明显增大。下限由球化反应本身对硫化物形核的依赖、白口倾向的抑制要求决定，0.005%以下的超低硫铁液在薄壁铸件中容易出现石墨球数不足、碳化物析出[2]。中频感应电炉熔炼不与焦炭接触，没有熔炼增硫环节，原铁液硫含量一般在区间下限附近，需要关注的是炉料带入的硫而不是熔炼过程本身。

### 2.2 硫含量波动对球化处理稳定性的影响

硫含量对球化处理的有害作用，不是由其绝对含量决定的，而是由批次间变化的大小来决定的。冲入法球化处理的稳定性分析表明，硫含量低时其波动的绝对值小，球化元素消耗量的波动相应减小，铁液回硫速率降低，球化衰退时间延长。以球化剂加入量 0.8%～1.2%的常规范围为例，原铁液硫由 0.015%提高到 0.040%，为了保持同样的残余镁含量，球化剂加入量要从 1.2%的上限调低。如果操作人员仍然按照上一炉次的加入量进行操作，那么残余镁就会因为额外的脱硫消耗而进入不足区间。波动造成的又一后果就是残余镁的判断失去了基准，同一个残余镁读数在低硫环境下可以对应充分球化，在硫突然升高的炉次中却可能已经处在衰退边缘。将原铁液硫作为每炉次球化剂加入量的修正依据，比只根据残余镁的反馈调整具有更强的预防性。

## 3 硫含量的控制途径

### 3.1 熔炼环节的硫控制

熔炼环节硫的控制首先看炉料结构和熔炼方式。冲天炉熔炼过程中焦炭和高温铁液的接触形成连续的增硫通道，焦炭硫含量和焦比直接决定原铁液硫的基线水平；中频感应电炉不使用焦炭，熔炼过程本身不增硫，硫的来源主要来自生铁、废钢和回炉料。生铁硫含量应控制在 0.03%以下，废钢要关注含硫易切削钢的混入，回炉料中若含有球化处理后的返回料，其残余镁和残余稀土会对硫产生一定的固定作用，但是不能把回炉料作为硫控制的依赖手段。冲天炉和感应炉双联熔炼时，冲天炉出铁后立即进行炉外脱硫，再转入感应炉升温、成分微调，是获得低硫高温原铁液的一种有效途径。

表 1　原铁液硫含量与球化处理参数匹配调整参考

| 原铁液硫含量范围/% | 硫水平判断 | 脱硫措施 | 球化剂加入量调整方向 | 重点关注风险 |
|---|---|---|---|---|
| ≤0.005 | 超低硫 | 一般不需炉外脱硫 | 取常规范围下限，避免过量 | 石墨球数不足、白口倾向 |
| 0.005～0.020 | 适宜区间 | 感应炉熔炼通常可直接满足 | 按 0.8%～1.0%基准执行 | 关注批次间波动幅度 |
| 0.020～0.030 | 可控偏高水平 | 建议多孔塞吹氮或脱硫剂处理 | 向 1.0%～1.2%方向调整 | 残余硫需稳定压至 0.015%以下 |
| 0.030～0.060 | 偏高，需主动干预 | 必须炉外脱硫，处理后复检 | 脱硫后按复检硫值重新匹配 | 硫化物夹渣与球化衰退叠加 |
| ＞0.060 | 不可直接球化 | 强脱硫，必要时换用低硫炉料 | 脱硫合格前不宜以增大球化剂替代 | 夹渣缺陷急剧增加、球化率失控 |


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

### 3.2 炉外脱硫操作

炉外脱硫是否必要，要根据熔炼方式和原铁液硫的实测值来定。感应炉熔炼时，硫含量小于 0.02%时可以直接进行球化处理，大于 0.025%时需要在球化之前进行脱硫。多孔塞吹氮脱硫属于简便易行、成本较低的方法，脱硫剂主要采用石灰基粉剂，载气搅拌加快硫从铁液到渣相的转移。脱硫处理过的扒渣必须彻底，否则含硫化物的脱硫渣在后续的球化反应中会卷入铁液，成为夹杂缺陷的来源。喷吹脱硫工艺参数中，铁液温度、处理深度都会影响到脱硫效率以及镁的吸收率，低温大深度会促进镁在铁液中溶解和保持。需要指出的是，炉外脱硫不能代替球化剂过量加入，脱硫的目的不是使硫降到不需要球化剂“超量补偿”的水平，而是使硫降低到可以由脱硫反应自行完成球化的效果。

### 3.3 球化处理环节的匹配调整

球化处理环节对于硫的应对，主要的原则就是把球化剂的“脱硫消耗份额”和“残余球化份额”区分开来，并且可以计算。稀土镁硅铁合金中镁含量一般为 5%～8%，稀土含量为 1%～3%，稀土元素对于硫的固定可以在一定程度上分担镁的脱硫负担，因此含稀土球化剂的高硫条件下适应性比纯镁体系要好一些。球化剂加入量的调整应以原铁液硫实测值为依据，不能沿用固定的加入量。一个可行的办法是在常规的 0.8%～1.2%加入量内，把原铁液硫每增加 0.01%所对应的附加球化剂量作为经验系数固定在作业指导书中，然后按照本厂炉料和熔炼条件定期对这个系数进行复核。球化处理温度对硫的脱除效率和镁的吸收率有相反的作用，高温度有利于脱硫反应动力学，但是会增大镁的蒸发损失，盖包法在 1450～1500℃之间可以将镁吸收率的波动控制在较小的范围内[3]。硫含量过高时不能简单地提高处理温度来“强化脱硫”，而应该在炉外脱硫环节上进行解决。

### 3.4 孕育与浇注环节的补充控制

球化处理后硫的控制任务由原来的脱除变为防止回硫。回硫来源有铁液与大气接触产生的氧化回硫、型砂或者涂料中含硫物质和铁液反应、覆盖不良时渣层中的硫重新进入铁液。球化后扒渣并覆盖保温集渣剂属于基本的阻断手段，覆盖层还能减缓铁液表面的氧化和硫的返溶。含钙或者含稀土的孕育剂在孕育的同时也可以对残余硫起到一定的固定作用，将不稳定的硫化镁中的硫转化成更稳定、更难被消耗的硫化物，从而减少硫在浇注前的短时间窗口内重新参与消耗残余镁。浇注系统设计要保证充型稳定，防止铁液飞溅卷入含硫型砂或者涂料分解产物中，对于硫含量处于控制区间上限的炉次，适当提高浇注温度有利于硫化物颗粒上浮排除，但是温度调整的幅度不能超过不加剧镁蒸发的程度。

## 4 硫含量控制效果的现场判断与调整

### 4.1 原铁液硫含量的检测与取样

原铁液硫取样时点直接决定数据是否可用。熔炼炉内取样应在炉料完全熔化、成分初步均匀后进行，防止在炉料加入过程中取样造成硫读数偏高或偏低。脱硫处理前后分别取一个样品，一个是证明脱硫效果的样品，另一个是球化剂加入量调整的依据。感应炉熔炼的炉次间硫含量变化一般小于冲天炉，但是回炉料比例改变或者更换生铁批次的时候仍然需要增加取样频率。定硫传感器的离线检测已经可以满足生产现场的精度要求，关键在于把硫的检测频次和球化剂调整动作绑定起来，使数据产生操作后果而不是停留在记录层面。

### 4.2 球化后残余硫与残余镁的联合判断

残余镁单一指标在实践中有误判的情况发生，原因是残余镁的读数不能区分出“用于球化的有效镁”和“已经被硫、氧固定的化合镁”。将残余硫和残余镁一起观察，可以得到四种判断结果：残余镁充足、残余硫低，球化状态好；残余镁充足、残余硫偏高，说明球化剂加入量足够，但是脱硫不足或者有回硫现象，衰退风险随浇注时间增加而累积；残余镁偏低、残余硫偏高，属于典型的硫致球化不良，需要同时查找原铁液硫和球化剂实际加入量；残余镁偏低、残余硫也低，则应该转向氧、温度或者球化剂质量等其他因素的排查。更细致的判断可以用游离镁来衡量，即从残余镁总量中减去硫化镁和氧化镁中结合的镁，得到游离镁来表示实际起球化作用的镁量。生产过程中虽然不能每次都能完全实现所有的物相分离，但是残余硫和残余镁的交叉趋势可以将硫相关问题的范围缩小。

### 4.3 硫相关球化不良与夹渣的排查方向

硫致球化不良和硫化物夹渣的缺陷形态可以很容易地加以区别，但是它们的排查路径常常会相互混淆。球化不良是指石墨球化率偏低，石墨呈蠕虫状或者片状，硫相关成因首先考虑原铁液硫是否超过炉球化剂加入量的匹配范围，其次考虑球化处理后到浇注的停留时间是否过长，造成残余镁被残余硫不断消耗。硫化物夹渣是铸件中硫化物颗粒的聚集，金相中可以看到沿晶界或者枝晶间分布的硫化物相，排查的重点不在于残余镁的高低，而在于脱硫渣和球化反应产物是否获得了充分的上浮时间和扒渣条

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

件。高硫、低温、氧化严重的铁液经过球化处理后形成的硫化物和氧化物混合夹渣，如果不能充分上浮就进入型腔，夹渣缺陷几乎不会受到球化剂加入量的影响。将球化不良和夹渣分开检查，可以避免因为夹渣问题而错误地增大球化剂的加入量，反而由于残余镁升高而加重夹渣的程度。

### 4.4 不同熔炼条件下的硫控制要点

感应电炉熔炼中硫控制的重点在炉料而不是熔炼过程。生铁和废钢的硫含量在入炉前要掌握，回炉料中如果有含硫高的灰铸铁件或者机加工碎屑，必须经过分选控制。感应炉熔炼的硫波动一般不大，但超低硫情况下石墨形核困难，所以球化剂加入量不能随意降低。冲天炉熔炼的硫控制重心在于焦炭和脱硫，焦炭硫含量和焦比的稳定是原铁液硫稳定的前提，炉外脱硫应作为常规工序而不是应急措施。双联熔炼具有两者的优点，冲天炉侧的增硫由脱硫工序拦截，感应炉侧承担升温、均质功能，硫的控制点在脱硫后到球化前的转运环节，防止已脱除的硫在转运过程中由于覆盖不良或者渣层卷入而回升。不同的熔炼条件下硫的问题表现形式不同，不能直接套用。

## 5 结束语

硫在球墨铸铁球化处理中起到的是有明显两面性的角色。偏高或者波动的硫会消耗球化元素、产生硫化物夹杂来削弱球化效果，过低的硫会从形核层面抑制石墨球的充分析出。生产控制的合理取向是把原铁液硫稳定在0.005%～0.030%之间，用残余硫小于 0.01%、残余镁大于0.05%来作为球化后的状态的联合参照。达到该状态需要熔炼炉料和方式的硫输入控制、炉外脱硫有效实施、球化剂加入量与硫匹配调整、浇注前回硫阻止等环节相互配合，缺一不可。现场判断上，残余镁和残余硫的交叉分析比单一残余镁读数更能确定硫致问题的方向，球化不良和硫化物夹渣的分途排查可以避免调整动作的相互干扰。硫控制的可操作性不是追求某个极限数值，而是要求每一个炉次的硫输入和球化处理参数之间存在可以追溯、可以修正的对应关系。

[参考文献]

[1]陈祥,夏万芝.高强韧球墨铸铁曲轴铁型覆砂工艺与性能研究[J].中国新技术新产品,2026,20(17):61-63.
[2]戚鹏超,杨淑欣,许景峰,等.高牌号球铁曲轴表面夹渣问题分析解决[J].铸造设备与工艺,2024,15(2):39-42.
[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.

作者简介：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；李鑫（1994—），男，河南安阳人，助理工程师，黄河科技学院电子信息工程专业毕业，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。


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