低铝低硫调控下球墨铸铁管气孔缺陷的抑制技术

胡二栋 张世超
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 455000

[摘要]针对 DN200～DN800 规格球墨铸铁管离心铸造生产中气孔缺陷率偏高的问题，系统研究了铁水中残余铝（[Al]）和硫（[S]）对皮下气孔与内壁针孔的冶金诱发机制，揭示了二者“协同放大”的交互作用规律，并提出以“铁水预处理深脱硫＋炉料铝源精准管控＋球化孕育工艺优化＋离心浇注协同调控”为核心的综合气孔抑制技术体系。五组定量对比试验表明，将铁水[Al]控制在 0.008%以下、[S]控制在 0.006%以下，气孔缺陷率由改进前的 0.38%降至 0.04%，降幅达 89.5%；铸管一次合格率由 91.2%提升至 98.6%，超声波探伤合格率达 99.2%，工艺过程能力 Cpk 由 0.78 提升至 1.45，综合吨管成本节约约 38 元。该方案已在工业生产线稳定落地，具备同类企业推广应用的工程价值。同时，文中指出当前研究在铝硫协同控制阈值精细化、不同壁厚规格管径的差异化窗口建立及实时在线检测手段等方面仍存在不足，有待进一步深入研究。

[关键词]球墨铸铁管；气孔缺陷；低铝控制；深脱硫；离心铸造；冶金质量
DOI：10.33142/ec.v9i11.20748 中图分类号：TG245 文献标识码：A

Suppression Technology of Porosity Defects in Ductile Iron Pipes under Low Aluminum and Low Sulfur Regulation

HU Erdong, ZHANG Shichao
Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He’nan Iron & Steel Group, Anyang, He’nan, 455000, China

Abstract: In response to the problem of high porosity defect rate in centrifugal casting production of DN200~DN800 ductile iron pipes, the metallurgical induction mechanism of residual aluminum ([Al]) and sulfur ([S]) in molten iron on subcutaneous pores and inner wall pinholes was systematically studied. The interaction law of "synergistic amplification" between the two was revealed, and a comprehensive porosity suppression technology system with "deep desulfurization of molten iron pretreatment+precise control of furnace material aluminum source + optimization of spheroidization inoculation process + synergistic control of centrifugal casting" as the core was proposed. Five sets of quantitative comparative experiments showed that controlling the molten iron [Al] below 0.008% and [S] below 0.006% reduced the porosity defect rate from 0.38% before improvement to 0.04%, a decrease of 89.5%; The first pass rate of cast pipes has increased from 91.2% to 98.6%, the pass rate of ultrasonic testing has reached 99.2%, the process capability Cpk has increased from 0.78 to 1.45, and the comprehensive cost savings per ton of pipes are about 38 Yuan. This plan has been stably implemented on industrial production lines and has engineering value for promotion and application in similar enterprises. At the same time, the article points out that there are still shortcomings in the current research on the refinement of aluminum sulfur synergistic control threshold, the establishment of differentiated windows for different wall thickness specifications and pipe diameters, and real-time online detection methods, which need further in-depth research.

Keywords: ductile iron pipe; pore defects; low aluminum control; deep desulfurization; centrifugal casting; metallurgical quality

球墨铸铁管兼具高强度、高韧性与优良耐腐蚀性，因而在市政给排水、燃气输送及工业流体管道领域成为主导性材料，离心铸造工艺所具有的特殊性，导致气孔缺陷这个问题长期困扰着生产企业，若气孔形成于管壁皮下或内壁，轻则导致水压试验不合格，重则引发管道服役期间渗漏甚至断管事故，对公共安全构成潜在的威胁。

气孔缺陷的形成原因涉及铁水的冶金质量、球化孕育工艺、浇注温度以及铸型条件等多个方面，铁水中残留的铝与硫这两类元素长期以来受到工业界的关注，不过目前还没有建立起精确的协同控制规范，现有的研究大多集中在单个元素对气孔产生的影响上，或者仅仅是根据生产经验提出一些定性的“低铝低硫”控制建议，缺少量化的协

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

同控制阈值和完整的工艺实施路径，这是研究领域存在的主要问题，针对不同管径和壁厚条件下的最优控制窗口的差异化建立，以及铝、硫含量在线快速检测技术的工程化应用，都是目前亟须解决的技术难题。

本文依托某大型球墨铸铁管生产企业（年产约 8 万 t）的工程实践，通过系统设计对比试验，定量厘清[Al]、[S]含量与气孔缺陷率的关系，并构建从铁水预处理到离心浇注的全流程气孔抑制技术体系，为行业提供可直接落地的工程参考。

1 工艺方案及结果

1.1 化学成分与工艺设计

试验以 DN300 球墨铸铁管为研究对象，生产线配置中频感应电炉（5t）与立式离心铸造机。铁水基础成分以满足 GB/T 13295—2019 中 QT450-10 牌号为目标设计，具体化学成分控制范围见表 1。

铁水熔炼采用废钢（60%）＋铸造生铁（40%）配料，球化处理采用三明治法，球化剂置于包底并覆盖硅铁孕育剂，上覆硅钢片（0.5%）压实。严格管控球化处理结束至浇注完成的间隔时长，确保其控制在 8min 以内。试验共设置 A～E 五组对比方案，各组铁水中[Al]的含量分布区间为 0.006%～0.025%，[S]的含量分布区间为 0.004%～0.020%；每组连续生产 50 支铸管，以此为样本开展统计分析。工艺参数见表 2。

1.2 试验结果

五组试验的气孔缺陷统计结果如表 3 所示。所有铸管进行 100%外观检测与超声波探伤，气孔缺陷率以缺陷管支数占总生产支数的百分比计算。

由表 3 可见，A 组为原基准工艺，其气孔缺陷率达 0.38%，已成为制约批量生产合格率提升的突出问题，当 B 组单独把[Al]降低时，气孔缺陷率下降到 0.21%，降幅达到44.7%；而C组单独降低[S]，气孔缺陷率则降到0.19%，降幅为 50.0%，D 组同时开展双控工作，气孔缺陷率骤降到 0.04%，降幅高达 89.5%，这远超单一元素控制效果之和，充分证实铝硫协同控制具有显著的叠加效应，尽管 E 组将[Al]与[S]控制至极限低值，气孔缺陷近乎消除，但该方案对原料管控及脱硫处理要求极为严苛，致使综合成本大幅攀升，基于工程可行性与经济效益的权衡，D 组的控制目标是最适宜的工业化方案。

2 讨论与分析

2.1 铝诱发气孔的机理分析

铁水中溶解铝（[Al]）是诱发球墨铸铁管皮下针孔的核心化学因素。在离心铸造条件下，铸型（金属模）内壁喷涂的耐火涂料即使经过烘干，仍不可避免地残存微量物理吸附水；大气湿度较高时，铁水与型壁接触瞬间的界面反应为：

$$2[Al]+3H20\rightarrow Al203+6[H];2[H]\rightarrow H2\uparrow$$

铁水液相里产生的原子态氢，其溶解度要比在固相里高得多，等到凝固前沿溶解度一下子降下来的时候，析出来的氢气在铸型内壁周围根本来不及跑出去，就会直接在管壁皮下 1～3mm 的位置形成圆形或者椭圆形的针孔，[Al]含量要是越高，上述界面反应的动力就越大，析氢量就会呈现出非线性的增长趋势，这次的试验数据表明，当[Al]从 0.022%降到 0.008%的时候，皮下气孔的数量能少掉差不多 44.7%；要是降到 0.005%，气孔数量就几乎变成零。

表 1 球墨铸铁管化学成分控制方案对比（wB/%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Mg	Al
原工艺	3.6～3.8	2.3～2.5	≤0.40	≤0.06	0.012～0.020	0.035～0.055	0.010～0.025
优化方案	3.6～3.8	2.3～2.5	≤0.40	≤0.06	≤0.006	0.035～0.055	≤0.008

表 2 五组对比试验工艺参数设置

组别	[Al]/%	[S]/%	球化剂加入量/%	KR 脱硫	浇注温度/℃
A（原工艺基准）	0.020～0.025	0.015～0.020	1.6	否	1360～1380
B（单降 Al）	0.007～0.008	0.015～0.020	1.6	否	1360～1380
C（单降 S）	0.020～0.025	0.005～0.006	1.3	是	1360～1380
D（双控目标）	0.007～0.008	0.005～0.006	1.3	是	1350～1370
E（极限双控）	≤0.005	≤0.004	1.2	是	1350~1370

表 3 不同铝硫含量条件下气孔缺陷统计结果

组别	[Al]/%	[S]/%	气孔缺陷率/%	一次合格率/%	球化率/%	超声波探伤合格率/%
A	0.022	0.018	0.38	91.2	88.3	90.6
B	0.008	0.018	0.21	94.5	88.1	93.8
C	0.022	0.006	0.19	95.1	96.2	94.5
D	0.008	0.006	0.04	98.6	97.1	99.2

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

铝会跟溶解在铁水里的氮发生反应，生成 AlN 夹杂，AlN 作为非均质形核核心，在凝固收缩过程中，会为气泡提供附着位点，进而加剧内部气孔的聚集程度，这一点已通过扫描电镜分析得到证实：A 组缺陷气孔的能谱分析显示，气孔壁附近都检出 Al 和 N 富集的区域，而 D 组气孔附近的成分则趋于均匀，值得注意的是，对于 AlN 夹杂在球墨铸铁管气孔形成中的定量贡献，目前的研究还不够充分，这也是本领域未来有待深化的一个方向。

2.2 硫诱发气孔的机理分析

硫对气孔的影响机理不同于铝的直接析氢路径。主要体现在以下三个方面：

（1）阻碍镁发挥球化作用，间接为气孔创造萌生条件，硫跟镁之间的亲和力特别强（Mg+S→MgS），要是高硫铁水在进行球化处理时，就会消耗掉大量的活性镁，这就导致有效的残余镁量不够，让球化率降低，在这次试验当中，A、B 两组（也就是[S]＞0.015%）的球化率只有88%左右，这比 C、D 两组（也就是[S]≤0.006%）的 96%以上要低很多，那些球化不良区域的石墨呈现出片状或者蠕虫状的形态，其尖端所存在的应力集中区域，就成为气泡优先萌生以及拓展的路径，这就是高硫铁水当中的气孔会呈现出链状分布的微观缘由。

（2）FeS 在晶界处发生偏析，形成气体扩散的通道，FeS 的熔点是 1193℃，在铸铁进行凝固的过程当中，FeS 膜会于奥氏体晶界处发生偏析，这构成连续的低熔点液膜通道，溶解在基体中的气体沿着晶界优先进行扩散聚集，形成晶间气孔，这类气孔在金相分析当中呈现出不规则的多边形形状，它与铝析氢所产生的圆形针孔在形貌上有着明显的区别，本试验的金相检验也证实了这一形貌差异。

（3）把铁水表面的张力降下来，让气泡在铸型与铁水的交界处更容易聚集，高硫铁水的表面张力会明显降低，铸型内壁和铁水之间的润湿角也会变小，气体就更倾向于在界面处聚集而不是跑出去，从宏观上看，这会进一步加剧皮下气孔的密度。

2.3 铝硫协同作用：恶性循环的形成与打破

铝与硫的协同作用构成了一个典型的工艺恶性循环，这是当前行业普遍忽视的关键问题所在：高硫铁水在球化处理时需消耗更多镁，生产中为保证球化效果往往增加硅铁镁合金（FeSiMg）的加入量；而市场上常规硅铁镁球化剂的铝含量普遍在 1.0%～2.5%之间，增加球化剂用量的直接后果是铁水[Al]随之升高，从而形成“高硫→多加球化剂→铝含量升高→气孔加剧→进一步提高球化剂量”的恶性循环（图 1）。

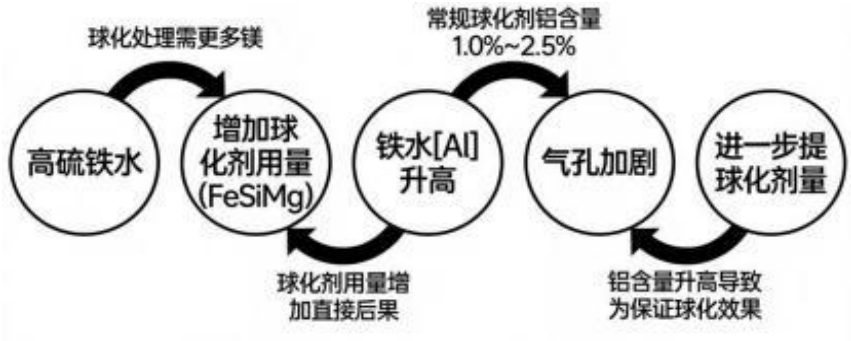


图 1 “高硫→多加球化剂→铝含量升高→气孔加剧→进一步提高球化剂量”的恶性循环

本次试验数据对循环危害进行定量验证：A 组在高硫铁水条件下，加入球化剂的比例高达 1.6%，实测铁水当中的[Al]为 0.022%；而 D 组在深脱硫的基础上，将球化剂加入量降至 1.3%，且将[Al]稳定控制在 0.008%以下，想要打破这个恶性循环，根本出路在于“先降硫，后控铝”，将这两项措施统筹推进，就是本方案相比单一控铝或单一控硫方案能够产生叠加效应的内在逻辑。

在行业内，部分企业仅将废钢中含铝镇静钢的占比作为控铝手段，但在铁水硫含量的控制方面，还停留在0.010%～0.015%这个水平，做法属于“治标不治本”，导致气孔问题很难从根本上得到解决，这恰恰是现有工艺研究与行业实践存在的主要局限。

2.4 脱硫工艺与球化工艺的匹配优化

KR 机械搅拌脱硫是实现[S]≤0.006%这一目标的可靠工业手段，不过其在球墨铸铁管生产当中的推广应用，长期滞后于炼钢行业，其主要缘由在于铸铁铁水温度（1300～1380℃） 比炼钢转炉铁水要低，脱硫动力学条件相对来讲不足，这就需要对搅拌转速、时间以及脱硫剂粒度进行针对性的优化工作，本试验所确定的最优 KR 脱硫参数包括：铁水温度 1320～1360℃、脱硫剂（CaO≥90%，粒径＜150μm）加入量 4～6kg/t、搅拌时间 10～12min、转速 90～110r/min，扒渣之后的残余渣层厚度必须控制在＜20mm（扒渣率≥95%），否则回硫风险将大幅降低处理效果。

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

在进行球化孕育工艺的匹配优化工作时，一旦深脱硫完成，铁水球化所需的镁消耗量就会大幅度减少，球化剂的加入量能够从原工艺的 1.5%～1.8%降低到 1.2%～1.5%，这样做既减少球化剂所带入的铝，同时也降低因镁蒸气剧烈反应而引发的卷气风险，在开展孕育处理工作的过程中，选用铝含量低于 0.2%的低铝硅铁孕育剂来进行包内孕育，把随流孕育量控制在 0.08%～0.12%，以此来细化石墨球的数量、改善石墨球径的均匀性，提高石墨球数来抑制凝固收缩气孔，这一点与刘旭等人在高强度球墨铸铁件研究当中关于孕育剂熔化特性对夹渣/气孔倾向影响的结论是相契合的。

值得关注的是，目前关于随流孕育剂铝含量与铁水铝元素精确贡献量的定量模型研究仍较为匮乏，工业现场多依赖经验估算，精准建立二者的定量关系是未来研究需填补的关键空白。

2.5 离心浇注工艺对气孔形成的影响

化学成分的精准控制为气孔抑制奠定了冶金基础，而离心浇注工艺参数才是把控气孔生成的核心“防线”。下面这三个参数会直接对气孔的形态造成影响：

铸型里面的含水量多少，是直接影响到氢气析出来多少的一个物理因素，这次试验要求把铸型涂料烘干之后的含水量控制在 3%以内，且每个班次都要做一次检测；而在实际生产的过程当中，往往是因为生产节拍压力比较大，导致涂料没彻底烘干，这可是气孔零星出现的一个常见缘由，所以必须用严格的工艺纪律管控来加以规避。

要是离心转速、铁水的铺展速度以及气体逸出的条件配合得不好，就会有缺陷，要是转速太低，铁水没法均匀地铺在型壁上，气体就会滞留在液态铁水里，等凝固后就形成大气孔；转速要是太高，铁水激冷速率就会加剧，气体来不及跑出来，同样会形成针孔，这次试验经过优化，把 DN200 到 DN400 管的转速定在 900 到 1100r/min，DN500 到 DN800 管的转速定在 800 到 950r/min，这算是最优区间，这些参数跟管径、铁水黏度也就是温度，还有涂料状态密切相关，不同企业的设备参数会有差异，得结合实际情况来进行独立的优化标定，目前这个领域还没法体现出通用的定量化模型。

浇注时的温度以及铁水在浇包内停留的时间，会对铁水中溶解气体的过饱和程度以及镁的挥发损耗产生影响，在本试验中，我们将浇注温度控制在 1350~1370℃之间，同时严格把控铁水在浇包内的停留时长，使其不超过 8 分钟，这一点同刘旭等人针对高强度球墨铸铁件研究所得出的关于球化时效控制的经验是高度契合的，这也说明对镁的有效作用时间进行控制，是球墨铸铁生产当中的一个共性关键工艺要素。

3 结论

（1）铁水中的铝[Al]和硫[S]所呈现出的不同冶金机制，会共同引发球墨铸铁管出现气孔缺陷，这二者之间有着明显的“协同放大”效应，其作用机制构成“高硫导致多加球化剂、使得铝含量升高、最终导致气孔加剧”的恶性循环，需要进行同步控制，不可偏废。根据相关研究，湿型铸造球墨铸铁中，残留铝量在 0.03%～0.05%时会产生皮下气孔，硫含量超过 0.094%则容易引发皮下气孔且含量越高缺陷越严重，而将[Al]控制在 0.008%以下、把[S]控制在 0.006%以下，气孔缺陷率就能降低 89.5%以上。

（2）以 KR 机械搅拌深脱硫（目标是将硫含量控制在 0.006%以下）作为先导，同时配合对低铝炉料进行管控（把含铝废钢的比例限制在一定范围内，选用低铝球化剂），对球化孕育工艺进行精细化优化（把球化剂的用量降低 10%～20%，同时采用低铝孕育剂），以及对离心浇注工艺进行协同控制（系统性地调控铸型的含水量、转速以及浇注温度），就能够构建出一套既完整又可落地的全流程气孔抑制技术体系，这三个控制层级之间是相互支撑的，缺一不可。

（3）为期 12 个月的工业化连续验证结果显示：该方案可将铸管一次合格率提升至 98.6%，超声波探伤合格率更是达到 99.2%，工艺过程能力 Cpk 也从 0.78 提高到 1.45，每吨管综合成本大约节约 38 元，可在同类企业中推广应用。

（4）当前研究仍存在若干不足，需在后续工作中进一步完善：①关于随流孕育剂铝含量对铁液[Al]的定量贡献，尚未建立对应模型；②针对不同管径、壁厚的铸管，铝硫控制最佳窗口的差异化标定尚未形成系统性研究；③铁液铝、硫含量在线快速检测手段的工程化应用程度较低，暂无法实现实时闭环控制；④AlN 夹杂对气孔形成的独立定量贡献，仍需开展进一步研究。

[参考文献]

[1]余治科,冯光弼,刘菲.球墨铸铁管气孔的缺陷分析及预防措施[J].铸造,2008,57(4):20-25.

[2]王爽,郑万,季军.水冷离心球墨铸铁管气孔缺陷形成原因分析[J].特种铸造及有色合金,2025,18(7):5-10.

[3]龚瀚涛,刘广超.浅谈球墨铸铁管气孔的缺陷分析及预防措施[J].工程技术,2016,20(7):587-587.

作者简介：胡二栋（1979—），男，河南安阳人，大专学历，工程师，1998 年参加工作，任职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司。扎根铸管生产一线多年，专注离心球墨铸铁管生产工艺改进、装备管理与现场生产组织，拥有丰富工程实践经验，已取得多项铸管相关授权专利，致力于解决生产现场技术难题。

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