

关于高炉广喷与均喷技术优势的探讨

王宏强

长治市方圣喷吹技术有限公司

摘要：高炉喷煤技术作为现代高炉冶炼的核心节能降耗技术之一，其喷吹效果直接影响高炉生产的经济性、稳定性与环保性。广喷与均喷是高炉喷煤技术发展的重要方向，前者强调喷吹煤范围的拓展与喷煤量的合理提升，后者聚焦喷吹过程中各风口喷煤参数的均匀性、稳定性控制。本文基于高炉冶炼的基本原理，系统分析高炉喷煤广喷、均喷的技术内涵，从降本增效、优化炉况、减少污染等维度深入探讨其核心优势，并结合实际生产经验提出实现广喷、均喷的关键技术路径，为钢铁企业进一步优化高炉喷煤工艺、提升生产效益提供理论参考与实践指导。

关键词：高炉喷煤；广喷；均喷；冶炼效益；炉况稳定性

钢铁工业是国民经济的支柱产业，而高炉炼铁作为钢铁生产的核心环节，其能耗与成本占比均超过整个钢铁生产流程的60%。在“双碳”目标与钢铁行业转型升级的双重驱动下，降低高炉炼铁能耗、减少焦炭消耗、提升生产效率已成为行业发展的必然要求。高炉喷煤技术通过将煤粉喷入高炉炉缸参与燃烧与还原反应，可有效替代焦炭的发热剂与还原剂功能，是降低焦比、减少炼焦环节污染的关键技术。

传统高炉喷煤工艺多存在喷煤量偏低、各风口喷煤不均匀、煤种适应性差等问题，限制了喷煤技术优势的充分发挥。随着喷吹设备升级、控制技术进步与煤种优化配比研究的深入，广喷与均喷技术逐渐成为高炉喷煤的主流发展方向。广喷以“扩大喷吹范围、提升喷煤潜力”为核心，均喷以“均衡喷吹参数、稳定炉缸工况”为目标，二者相辅相成，共同推动高炉喷煤技术向高效、稳定、经济的方向发展。本文旨在系统探讨高炉喷煤广喷、均喷的优势，为其在钢铁企业的推广应用提供支撑。

1 广喷与均喷的概念界定

在探讨广喷与均喷的优势前，需明确二者的技术内涵，避免与传统喷煤工艺混淆。高炉喷煤系统的核心是通过喷吹罐、分配器、喷煤枪等设备，将磨制后的煤粉稳定输送至高炉各风口，使其在炉缸内充分燃烧。广喷与均喷并非相互独立的技术，而是从不同维度对喷煤工艺的优化升级。

广喷主要包含三层含义：一是喷煤量的“广”，即在保证高炉稳定运行的前提下，突破传统喷煤量限制，实现更高的喷煤比，充分发挥煤粉替代焦炭的潜力；二是喷吹煤种的“广”，即打破单一煤种喷吹的局限，通过配煤技术实现无烟煤、烟煤、褐煤等多种煤种的混合喷吹，拓宽煤种来源；三是喷吹范围的“广”，即通过优化喷煤枪布置与风口结构，使煤粉在炉缸内的分布范围更广，保证每个风口都喷煤，避免局部燃烧不均。

均喷则聚焦于喷吹过程的“均衡性”，核心是保证高炉各风口的喷煤量、煤粉浓度、喷吹速度等参数保持一致，具体体现为：一是时间维度的均一，即喷煤量在连续生产过程

中波动小，避免因喷煤量突变导致炉况波动；二是空间维度的均一，即各风口喷煤量偏差控制在较小范围内（通常要求偏差小于3%~5%），确保炉缸圆周方向的燃烧与反应均衡。

2 广喷与均喷的核心优势

2.1 显著降低生产成本，提升经济效益

成本控制是钢铁企业提升竞争力的核心，广喷与均喷通过优化喷煤工艺，从多个层面降低高炉炼铁成本。

一方面，广喷通过提升喷煤比实现焦炭的大量替代，显著降低焦炭消耗成本。焦炭是高炉炼铁的关键原料，但炼焦过程能耗高、成本高，且受焦煤资源限制，价格波动较大。而喷吹煤来源广泛，价格远低于焦炭（通常煤粉价格仅为焦炭的1/2）。数据显示，高炉喷煤比每提升10kg/t铁，可降低焦比8—10kg/t铁，按吨焦成本2000元、吨煤成本1000元计算，每吨铁可降低成本约8-10元。广喷技术可将喷煤比从传统的150kg/t铁提升至180kg/t铁以上，部分大型高炉甚至可达到200kg/t铁，其成本节约效果极为显著。同时，广喷带来的煤种多元化优势，可使企业充分利用低价煤种（如褐煤、次烟煤），通过配煤技术平衡煤种的热值与反应性，进一步降低原料采购成本。

另一方面，均喷通过保证各风口喷煤均匀，减少因局部喷煤过量或不足导致的物料浪费与能耗增加。若部分风口喷煤量过大，煤粉无法充分燃烧，会造成煤粉浪费，同时未燃尽的煤粉会在回旋区末端死焦堆聚集，降低炉缸死焦堆透气透液性，而飞出回旋区的未燃煤粉部分会进入炉渣，会增加炉渣的黏度，降低渣铁分离效果；若部分风口喷煤量过小，则该区域焦炭消耗增加，该区域风口上方下料速度加快，料面出现低渣带，导致煤气流初始分布与二次分布紊乱，高炉内局部易出现管道或周期性塌料，而且该区域产量增加，区域温度向凉，导致炉缸圆周方向温度分布不均衡。极端情况就是个别风口长时间停喷煤，停喷煤期间，该风口的产量将是正常喷煤风口产量的2.3倍，详细计算引用马丁·戈德斯《现代高炉炼铁》：

所有风口喷煤		一个风口停煤	
焦比	300kg/t	风口燃烧量（全部是焦炭）	3000kg/h
煤比：200（ 置换比=0.85）	170kg/t		
合计	470kg/t		
产量	10t/h	该无喷煤风口的产量增加为：	
碳平衡		3000/1300=230%	
焦炭	3000kg/h		
煤（折算后）	1700kg/h		
合计	4700kg/h		
铁渗碳	-500kg/h		
直接还原	-1200kg/h		
风口燃烧	3000kg/h		
其中煤	1700kg/h		
焦炭	1300kg/h		

如果有两个相邻的风口停止喷煤，对高炉生产的稳定性影响更大，尤其是高煤比高炉，笔者通过调查国内多数高炉发现，许多高炉操作者对广喷、均喷重要性意识淡薄，尤其是均喷，许多企业的高炉因个别风口漏水就停止该风口喷煤，直至该风口更换都一直停煤，这极易形成局部料面周期性塌陷，严重时管道形成，煤气流分布失常。这也许是近年来许多高炉在高煤比操作后影响高炉稳定运行的最大因素。近年来高炉工作者花费大量的精力来研究优化高炉布料矩阵，解决了高炉上部布料的合理性问题，优化了煤气流的二次分布，但往往忽视了高炉广喷、均喷这一有效的高炉调剂手段。广喷、均喷可以从高炉的下部优化炉缸温度分布、均衡炉缸圆周方向反应速度，通过精准控制各风口喷煤参数，使煤粉燃烧效率提升 5%—10%，进一步降低燃料消耗成本。此外，均喷带来的炉况稳定，减少高炉塌料、小管道、憋风及优化煤气流初始分布等优势不可估量。

2.2 优化炉缸工况，提升高炉操作稳定性

炉缸工况的稳定性是高炉高效生产的前提，广喷与均喷通过改善炉缸内的燃烧、传热与传质过程，显著提升高炉操作稳定性。

从均喷的角度来看，其核心优势在于实现炉缸圆周方向的“均衡燃烧”。传统喷煤工艺中，由于分配器精度不足、喷煤枪磨损不均等问题，各风口喷煤量偏差常超过 10%，导致炉缸局部区域温度过高（喷煤过量区域）或过低（喷煤不足区域）。局部高温会加速炉衬侵蚀，缩短高炉寿命；局部低温则会导致焦炭燃烧不充分，出现“凉缸”风险，甚至引发炉缸冻结事故。均喷技术可将各风口小时喷煤量偏差控制在 3% 以内，使炉缸温度场分布均匀，热点温度波动范围缩小至 50℃ 以下，有效避免局部异常工况。同时，均匀的喷煤可使各风口的鼓风动能与煤气流量保持均衡，优化炉内气流分布，减少“管道”“塌料”“悬料”等常见炉况事故。

2020 年鲅鱼圈 1 号高炉上线了进口装备的智能均匀喷吹系统，单个煤粉支管日喷煤量波动控制在日均值 4.408t·/d，各煤粉支管间相比，煤粉流量波动精度控制在 -9.676~8.898%，该系统使用有效改善炉内热流环境，使高炉煤气流的初始分布更加均匀，风温用到 1211℃，喷煤比由 156kg/t 提高至 170kg/t 左右，

广喷技术则通过提升喷煤比与拓宽喷吹煤的范围，优化炉缸内的还原反应过程。较高的喷煤比可增加炉缸内的还原性煤气（CO、H₂）浓度，加速铁矿石的间接还原反应，减少直接还原反应带来的热量消耗，降低高炉热负荷。同时，广喷带来的煤粉在炉缸内的广泛分布，可使还原反应在更大区域内进行，避免局部还原不足导致的炉料下降不畅。此外，多元煤种的混合喷吹可通过不同煤种的优势互补（如无烟煤的高热值与烟煤的高反应性），进一步优化炉内反应条件，提升高炉对原料波动的适应性。

2.3 提升高炉产量，挖掘生产潜力

广喷与均喷通过优化高炉冶炼效率，为提升高炉产量提供有力支撑。一方面，广喷带来的高喷煤比可显著降低焦炭消耗，而焦炭在高炉内的堆积密度低于炉料，减少焦炭用量可增加高炉有效容积的利用率，提升矿石的装入比例（提升焦炭负荷 25%）。同

时，煤粉燃烧速度快于焦炭，高喷煤比可缩短炉缸内的燃烧周期，加快炉料下降速度，提升高炉冶炼强度。数据显示，喷煤比从 150kg/t 铁提升至 200kg/t 铁，高炉利用系数可提升 0.1-0.2t/(m³·d)，按 1000m³高炉计算，每年可增加产量 3 万—7 万吨。

另一方面，均喷带来的炉况稳定优势，可使高炉长期保持高冶炼强度运行。传统喷煤工艺中，因炉况波动频繁，高炉需通过降低风温、减风等方式调整工况，导致冶炼效率下降。均喷技术可使高炉在高喷煤比下保持稳定运行，避免频繁调整操作参数，有效提升高炉作业率。此外，均匀的喷煤的气流分布可改善煤气利用率，使高炉内的热量与还原剂得到充分利用，进一步提升冶炼效率，为产量提升提供保障。

2.4 减少污染物排放，助力绿色生产

在“双碳”目标背景下，钢铁企业的环保压力日益增大，广喷与均喷技术在减少污染物排放方面具有显著优势。首先，广喷通过大量替代焦炭，可减少炼焦环节的污染物排放。炼焦过程会产生大量的焦炉煤气（含苯、酚、氰化物等有害物质）、烟尘与二氧化硫，每减少 1 吨焦炭消耗，可减少约 0.3 吨二氧化碳排放、0.05 吨二氧化硫排放。按一座 1000m³高炉每年减少焦炭消耗 3 万吨计算，每年可减少二氧化碳排放 9000 吨，二氧化硫排放 1500 吨，环保效益极为显著。

其次，均喷通过提升煤粉燃烧效率，可减少高炉烟气中的污染物排放。若煤粉燃烧不充分，未燃尽的煤粉会随高炉煤气排出，增加烟尘排放量；同时，局部燃烧不均可能导致炉内出现还原性过强的区域，增加硫化氢等有害气体的生成。均喷技术可使煤粉燃烧效率提升至 95% 以上，显著降低高炉烟气中的烟尘与有害气体含量，减少环保治理成本。此外，多元煤种的混合喷吹可通过配加低硫煤种，进一步降低高炉烟气中的硫含量，为后续烟气处理减轻压力。

3 实现高炉喷煤广喷、均喷的关键技术路径

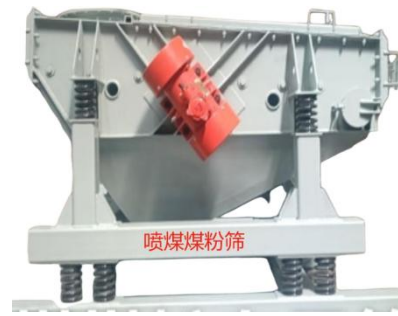
广喷与均喷的优势实现需要依托完善的技术体系支撑，结合现有生产实践，关键技术路径主要包括以下几个方面。

3.1 优化制粉系统设备配置

①改变传统的锁气器+木屑分离器（圆滚筛）这一老式结构（目前国内尚有 40% 以上的喷煤制粉系统还在用），更换为叶轮给料机+煤粉振动筛结构，保证煤粉杂质清除干净；



传统木屑分离器



专用煤粉筛

②完善煤粉仓上部吸潮管路设施，在正常制粉时可以停用仓顶除尘，以吸潮管替代仓顶除尘，处理倒罐时的排风，这不仅可以及时排出煤粉仓的潮气，减少仓顶盖煤粉结块及腐蚀，而且可以控制制粉系统的含氧量，对喷吹高挥发分烟煤有很大的优势；保留仓顶除尘设施可在停止制粉检查磨机或者倒粉入仓时使用，

③采用 AI 智能软件，实现一键智能制粉。提高制粉产量的同时确保煤粉的粒度与水分达标且稳定。

④操作上严格控制煤粉的粒度与水分，同时要控制好配煤比例，控制好挥发分。

3.2 优化喷吹系统设备配置

①采用多管路等压分配器替代传统分配器，通过精准控制各支管路阻力与流量，确保煤粉均匀分配；

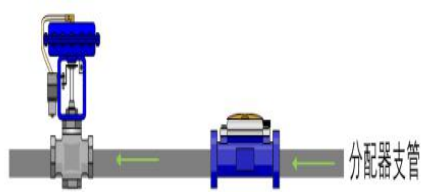
②选用耐磨、耐高温的合金整段陶瓷喷煤枪，减少喷煤枪磨损导致的喷煤量偏差；

③安装在线煤粉浓度检测仪及防堵疏通仪器，确保支管不堵；



煤粉浓度在线检测防堵仪器

④加装总管与支管流量计+陶瓷调节阀，实时采集总管与各支管的喷煤参数，协同调节喷吹总量与分支管分量的稳定与均匀；气固两相流流量计进口的比较昂贵，国内以青岛科联为代表的厂家生产的产品正以高性价比推动工业应用。

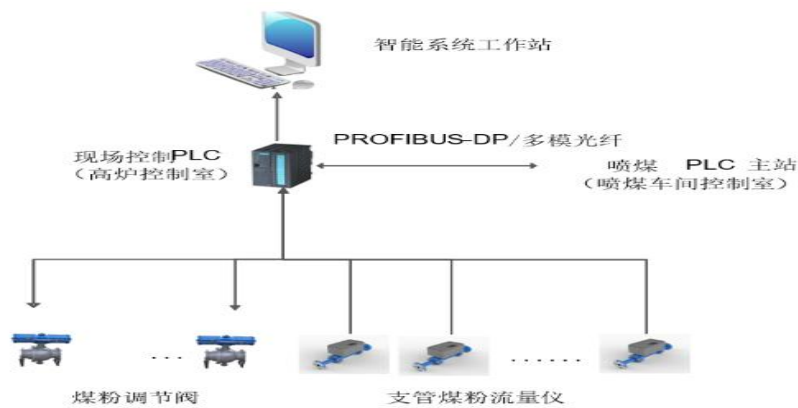


气固两相流流量计+陶瓷调节阀



气固两相流流量计（国产）

⑤构建精准的 AI 喷吹系统。依托高炉智能控制系统，将喷煤参数与高炉炉况参数（如炉温、料速、风压、风口前理论燃烧温度、煤气成分等）协同联动，实现喷煤量的动态调控与优化。而非目前许多高炉改造的“一键喷吹”，仅仅实现手动改自动而已。只有耦合高炉控制与喷吹监控为一体的人工智能喷吹系统，才能减少人工判断与操作的失误，增加喷吹的稳定性和可靠性；



智能系统工作站

⑥采用煤粉预热技术，最大限度地利用余热资源将煤粉在高炉外预热到 300℃左右，接近煤粉的着火点，不仅可以改善煤粉的喷流性，有利于均喷，而且可大幅度提高煤粉在风口前的燃尽率，促进广喷的实现。以长治方圣喷吹为代表的企业已将成熟的煤粉预热技术投入工业应用。



煤粉预热系统现场

3.3 规范喷煤工序操作

①完善配煤技术与煤种管理。广喷的核心是煤种多元化，需通过配煤试验确定不同煤种的最佳配比，平衡煤粉的热值、反应性、灰分与硫分等指标，确保混合煤粉符合高

炉喷吹要求。同时，建立严格的煤种采购与储存管理制度，避免不同煤种混合污染，保证煤粉质量稳定。

②加强操作管理与人员培训。建立完善的喷煤工艺操作规程，明确广喷、均喷的操作标准与异常处理流程；定期对喷煤系统设备进行维护检修，及时更换磨损部件；加强对操作人员的技术培训，提升其对喷煤参数的调控能力与炉况判断能力，确保技术优势充分发挥；

③在喷吹设备优化的前提下，要大胆地采用浓相喷吹技术，这对均喷和广喷非常重要。

4 结论与展望

高炉喷煤广喷与均喷技术通过“扩量”与“均衡”的双重优化，在降低生产成本、提升炉况稳定性、增加产量、减少污染物排放等方面展现出显著优势，是现代高炉炼铁技术升级的重要方向。广喷技术通过提升喷煤比与拓宽煤种来源，最大化发挥煤粉替代焦炭的潜力，实现经济与环保效益的双重提升；均喷技术通过保证各风口喷煤参数的均匀性、稳定性，优化炉缸工况，为广喷技术的实施提供稳定保障，二者相辅相成，共同推动高炉炼铁向高效、经济、绿色的方向发展。

未来，随着智能化技术与新材料技术的发展，高炉喷煤广喷、均喷技术将迎来进一步升级。一方面，人工智能与大数据技术的应用将实现喷煤工艺的精准预测与智能调控，进一步提升喷煤均匀性与喷煤比；另一方面，新型喷煤设备与材料的研发将突破现有喷煤技术的限制，实现更高效率的煤粉输送与燃烧。钢铁企业应充分认识广喷、均喷技术的核心价值，结合自身生产实际加快技术升级，为企业高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王维兴. 高炉喷煤技术的发展与创新[J]. 钢铁, 2020, 55(3):1-8.
- [2] 刘云彩. 高炉炼铁工艺理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [3] 张寿荣. 现代高炉炼铁技术进展[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(7):513-520.
- [4] 李建新. 高炉喷煤均喷技术的应用与优化[J]. 炼铁, 2021, 40(2):23-26.
- [5] 王宏强. 煤粉均匀喷吹对高炉冶炼的影响[J]. 炼铁交流, 2024.8.
- [6] 周明灿, 吴关印等. 鞍钢鲅鱼圈 1 号高炉高效低耗生产实践[J]. 炼铁交流 2025.4.
- [7] 马丁·戈德斯. 现代高炉炼铁[M]. 冶金工业出版社, 2016.