

UDC

团体标准

P

T/CMCA xxxx-2025

复合供热低碳烧结技术标准

Technical Standard for Compound Heating Low-Carbon Sintering

2025-xx-xx 发布

2025-xx-xx 实施

中国冶金建设协会 发布

团 体 标 准

复合供热低碳烧结技术标准

Technical Standard for Compound Heating Low-Carbon Sintering

T/CMCA xxxx-2025

主编单位：中冶长天国际工程有限责任公司

发布单位：中国冶金建设协会

施行日期：2025 年 x 月 x 日

冶金工业出版社

2025 北 京

中国冶金建设协会公告

第 xxx 号

关于发布中国冶金建设协会团体标准

《复合供热低碳烧结技术标准》的公告

现发布中国冶金建设协会团体标准《复合供热低碳烧结技术标准》，编号为 T/CMCA xxxx-2025，自 2025 年 xx 月 xx 日起实施。本标准由冶金工业出版社出版发行。

中国冶金建设协会

202x 年 xx 月 xx 日

前 言

本标准根据中国冶金建设协会《关于印发 2022 年上半年工程建设团体标准编制计划的通知》（冶建协[2022]38 号）要求，由中冶长天国际工程有限责任公司会同有关单位共同完成。

在标准制定过程中，标准编制组学习了有关国家法律、法规及标准，开展了深入的调查和试验研究，认真总结了多年来复合供热低碳烧结技术研发及应用的经验，在广泛征求意见的基础上，最后经审查定稿。

本标准共 6 章，主要内容包括：总则，术语，基本规定，工艺流程，主要设备，电气、仪表与自动化控制。

本标准由中国冶金建设协会负责管理，由中冶长天国际工程有限责任公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中冶长天国际工程有限责任公司（地址：湖南省长沙市岳麓区节庆路 7 号；邮编：410205）。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位： 中冶长天国际工程有限责任公司

参 编 单 位： xxxx

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	4
4 工艺流程	5
4.1 一般规定	5
4.2 混匀制粒系统	6
4.3 点火系统	6
4.4 保温系统	6
4.5 燃气喷吹系统	6
4.6 热风循环系统	7
4.7 蒸汽喷吹系统	8
4.8 料面煤粉/生物质粉喷洒系统	8
5 主要设备	9
5.1 混合、制粒设备	9
5.2 点火、保温设备	9
5.3 燃气喷吹设备	9
5.4 热风循环、蒸汽喷吹设备	9
6 电气、仪表与自动化控制	11
6.1 电气	11
6.2 仪表与自动化	11
本标准用词说明	13
引用标准名录	14
附：条文说明	15

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms	2
3	Basic requirements	4
4	Process Flow.....	5
4.1	General Requirements	5
4.2	Blending & Granulation System	6
4.3	Ignition System	6
4.4	Thermal Insulation System	6
4.5	Gas Injection System	6
4.6	Flue Gas Recirculation System	7
4.7	Steam Injection System	8
4.8	Surface Injection System (Coal/Biomass)	8
5	Major Equipment	9
5.1	Blending & Granulation Equipment.....	9
5.2	Ignition & Insulation Equipment.....	9
5.3	Gas Injection Equipment.....	9
5.4	Flue Gas/Steam Injection Equipment.....	9
6	Electrical, Instrumentation & Automation Control.....	11
6.1	Electrical Systems.....	11
6.2	Instrumentation & Automation	11
	Explanation of wording in this standard.....	13
	List of quoted standards.....	14
	Addition: explanation of provisions.....	15

1 总 则

1.0.1 为规范钢铁厂复合供热低碳烧结技术，实现技术先进、经济合理、安全适用、节能环保，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建、改建和扩建的钢铁厂铁矿烧结工程设计、建设及生产。

1.0.3 钢铁厂复合供热低碳烧结技术除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 复合供热

采用气、固两种或两种以上相态燃料为烧结过程进行能量供给的供热模式。

2.0.2 复合供热低碳烧结

综合采用富氧点火、热风点火、热风保温、燃气喷吹和固体燃料供热等复合供热方式，为烧结过程提供热量，以达到降低工序碳排放和综合能耗、提高产质量水平的烧结工艺。

2.0.3 富氧点火

通过向烧结机点火器供给氧气浓度高于环境空气氧气浓度的助燃气体，以实现提高点火温度、强化点火效果、节约燃气的技术。

2.0.4 热风保温

在烧结料层点火后，通过向表层持续供给约 200℃~400℃热风（通常为烧结循环烟气或环冷机废气），以达到降低表层矿冷却速度、改善表层矿强度的技术。

2.0.5 燃气喷吹

通过向烧结机料面喷吹富氢燃气，使其随烧结风被抽入料层燃烧，形成气固燃料复合供热，以实现均热烧结和降低工序碳排放的技术。

2.0.6 均热烧结

通过调控烧结料层热量分布，使燃烧带在烧结进程的不同高度料层时的温差减小，从而达到优化成矿过程、提升烧结矿产质量、降低烧结能耗的烧结技术。

2.0.7 富氢燃气

氢元素质量分数不低于 20%的燃气（包括单一气体或混合气体），具有低碳排放和高燃烧效率的特性。

2.0.8 气焦热置换比

喷吹气体燃料热值与替代的固体燃料热值之比。

2.0.9 强制混匀

采用机械强制搅拌对含铁原料、熔剂、燃料及返矿等进行高强度混合的预处理工序，以消除成分、粒度及水分差异，实现物料均匀分布，提升烧结矿质量及工艺稳定性。

2.0.10 蒸汽喷吹

在烧结料层点火后，通过喷吹一定压力的饱和或过热蒸汽，以改善料层透气性、优化烧

结矿矿物组成及结构，促进料层固体燃料燃烧的技术。

2.0.11 料面煤粉/生物质粉喷洒

在烧结点火前，通过布料装置在烧结料层表面均匀布洒煤粉或生物质粉的工艺，优化表层烧结矿配碳比例，改善燃烧带温度分布，以提升表层烧结矿质量，并降低固体燃料消耗与碳排放。

2.0.12 热风循环

将烧结工艺过程中产生的部分烟气重新引入烧结料层进行循环利用的技术。

3 基本规定

3.0.1 复合供热低碳烧结工程设计应具备设计依据和设计基础资料。

3.0.2 复合供热低碳烧结工程设计应考虑原有烧结机现状及高炉原料要求等，设计方案应与厂区现有生产实际相匹配。

3.0.3 水、电、燃气、氧气和蒸汽等能源介质宜由钢铁厂统一提供。

3.0.4 复合供热低碳烧结技术规格和性能应与烧结主系统匹配，并留有一定的富余。

4 工艺流程

4.1 一般规定

4.1.1 复合供热低碳烧结应以生产过程稳定、产品质量优良、综合利用、节约能源、环境友好及安全生产为原则，并根据规模、原燃料和熔剂条件、烧结料层透气性、烧结机布置、机上空间和烧结过程风流布置形式等确定。

4.1.2 复合供热低碳烧结系统（图 4.1.2）应采用强制混匀、富氧点火、热风点火、热风保温、燃气喷吹和蒸汽喷吹技术，并宜配套点火料面识别与点火炉联控技术和机尾断面识别与布料辅门联控技术；宜采用热风循环技术，可采用料面煤粉/生物质粉喷洒技术。

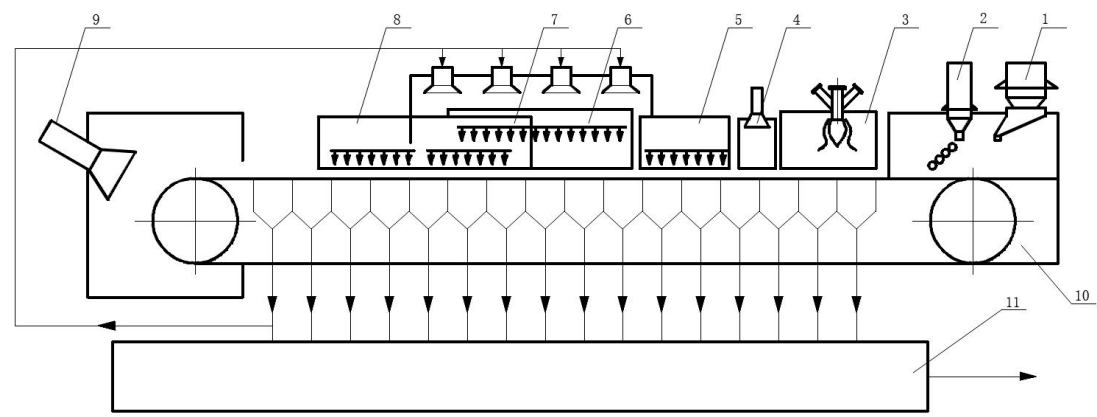


图 4.1.2 复合供热低碳烧结系统示意图

1--强制混匀；2--煤粉/生物质粉喷洒；3--富氧点火/热风点火；4--点火料面识别与点火炉联控技术；5--热风保温；6--燃气喷吹；7--热风循环；8--蒸汽喷吹；9--机尾断面识别与布料辅门联控技术。；10--烧结机；11 大烟道。

4.1.3 烧结料层宜按高度方向划分为点火供热层、保温供热层、富氢燃气耦合供热层和固体燃料供热层（图 5.1.3），并应符合下列规定：

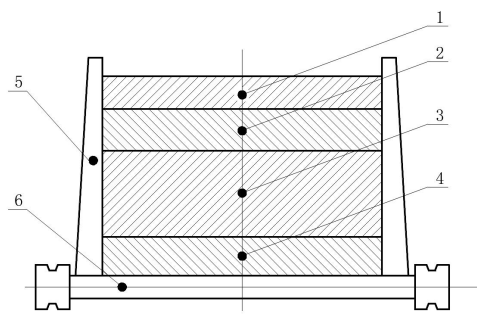


图 4.1.3 烧结料层划分示意图

1—点火供热层；2—保温供热层；3—富氢燃气耦合供热层；4—固体燃料供热层；5—台车挡板；6—台车底板。

1 点火供热层厚度宜为 20 mm ~30mm，应采用点火燃气和固体燃料供热；

2 保温供热层厚度宜占烧结料层厚度的 5%~8%，应以固体燃料供热为主，热风补热为辅；

3 富氢燃气耦合供热层厚度宜占烧结料层厚度的 60%~70%，应采用富氢燃气耦合固体燃料复合供热，富氢燃气应从料层上部喷入；

4 固体燃料供热层厚度宜占烧结料层厚度的 20%~30%。

4.2 混匀制粒系统

4.2.1 含铁原料宜采用强力混合机+圆筒制粒机+圆筒制粒机的三段混匀制粒工艺。

4.2.2 强力混合机出口原料混合均匀度不宜小于 90%。

4.2.3 混匀制粒宜采用分段雾化加水方式，混匀阶段加水量宜占总水量的 80%~90%，制粒阶段加水量宜占总水量的 10%~20%。

4.2.4 混合制粒水分宜小于 7%，混合阶段水分波动允许偏差宜为 $\pm 0.4\%$ ，制粒阶段水分波动允许偏差宜为 $\pm 0.2\%$ 。

4.2.5 混匀制粒后烧结混合料中 3mm~8mm 的粒径含量宜大于 70%。

4.2.6 添加水应采用自动检测与控制，混匀制粒后应配套粒度仪。

4.3 点火系统

4.3.1 烧结点火用燃气宜采用焦炉煤气、天然气和转炉煤气；可采用高炉煤气或高炉煤气与焦炉煤气、天然气、转炉煤气的混合煤气。

4.3.2 点火系统宜采用富氧点火技术，富氧后的点火助燃风氧含量宜为 24%~29%；宜配套采用微负压点火、热风点火和双预热点火等节能点火技术。

4.3.3 当配套采用微负压点火时，点火炉膛负压宜控制在 $\pm 10\text{Pa}$ ，点火烟气氧含量（体积分数）不宜低于 3%。

4.3.4 点火温度宜为 1050℃~1150℃，特殊原料点火温度应根据试验确定。点火时间宜为 1 min~1.5min，点火深度宜为 20 mm~30mm。

4.4 保温系统

4.4.1 点火段后宜设置保温段，保温段长度应与工艺设置的保温供热层厚度匹配。

4.4.2 保温段宜采用热风炉烟气供热或热风炉烟气联合循环热烟气供热。

4.4.3 保温烟气温度宜沿台车运行方向梯级递减，起始保温段烟气温度宜为 800℃~1000℃，终点保温段温度宜为 200℃~400℃。

4.5 燃气喷吹系统

4.5.1 燃气喷吹工艺应采用单独喷吹系统。

4.5.2 喷吹燃气可采用氢气、天然气、液化石油气和焦炉煤气等富氢燃气中的一种或多种混合气体，不宜采用高炉煤气和转炉煤气，并应符合下列规定：

- 1 烧结车间燃气接入点压力不应低于 8000Pa，燃气压力波动范围宜小于 10%；
- 2 水蒸气(H₂O)和二氧化碳(CO₂)的体积分数之和不宜大于 5%；
- 3 二氧化硫 (H₂S) 含量不应大于 100mg/Nm³；
- 4 燃气发热量和组分波动不宜大于 10%。

4.5.3 富氢燃气的设计用气量应根据烧结机产量规模和单位用气量确定，并预留 10%-20%的供气余量。

4.5.4 喷吹系统应配置燃气冗余供应及快速切换装置，供气系统设计应符合现行国家标准的相关规定。

4.5.5 燃气喷加浓度宜沿台车运行方向梯级递减。

4.5.6 起始喷吹段燃气浓度宜控制在燃气爆炸下限的 10%~15%，终点喷吹段燃气浓度宜控制在燃气爆炸下限的 5%~8%。

4.5.7 喷吹燃气宜在料面上方与空气混合，进入料层的混合气的混匀程度不应小于 90%。

4.5.8 烧结原料固体配碳量应考虑燃气喷吹补热量，气焦热置换比宜为 1：2.5~1：4.0

4.5.9 燃气进入喷吹装置前压力不应小于 5kPa。

4.5.10 燃气喷出速度宜为 50m/s~100m/s。

4.5.11 燃气输送管道工况流速应选取经济流速。

4.5.12 燃气喷吹量宜为 15MJ/t-s~45MJ/t-s。

4.6 热风循环系统

4.6.1 热风循环管道风速宜选用经济流速。

4.6.2 循环热风进入料面上方前宜整流，整流后的风速不宜大于 0.6Nm/s。

4.6.3 单位面积料面循环热风量不应大于 1400Nm³/h。

4.6.4 循环热风温度宜为 150℃~280℃，不应大于 300℃。

4.6.5 循环热风氧含量宜为 19%~21%（体积分数），不应低于 18%（体积分数）。

4.6.6 热风循环与燃气喷加重叠的区域，应符合以下规定：

- 1 热风与燃气应在料面上方混匀，进入料面的混合气的混匀程度不应小于 90%；
- 2 燃气喷加管排应设在循环热风入口下方，燃气喷加管排与循环热风入口间距不宜小于

300mm。

4.7 蒸汽喷吹系统

4.7.1 燃气喷吹的起点不宜早于烧结料层过湿层消失前。

4.7.2 喷吹蒸汽宜采用过热蒸汽，喷吹末端的蒸汽温度宜为 120℃~300℃。

5.7.3 蒸汽在料层上方的冷凝量不宜超过蒸汽喷吹总量的 10%。

4.7.4 蒸汽进入料层前应与空气混合，进入料面的混合气的混匀程度不应小于 60%。

4.7.5 蒸汽喷吹与燃气喷吹重叠的区域，蒸汽喷吹管排应设置在燃气喷吹管排上部，蒸汽喷吹管排与燃气喷吹管排间距不宜小于 200mm。

4.8 料面煤粉/生物质粉喷洒系统

4.8.1 采用煤粉作为料面喷洒介质时，宜采用低挥发性、高反应性的无烟煤或焦粉。

4.8.2 采用生物质粉作为料面喷洒介质时，宜采用改性后的生物质燃料产品，并宜符合下列规定：

- 1 挥发分含量应小于 25%；
- 2 热值应大于 16MJ/kg（干基）；
- 3 密度应大于 800kg/m³。

4.8.3 当采用煤粉时，粒径不应大于 1mm；当采用生物质粉时，粒径不应大于 5mm。

4.8.4 当采用料面煤粉/生物质粉喷洒时，烧节点火温度宜比本标准第 4.3.4 条规定的点火温度降低 100℃~150℃。

5 主要设备

5.1 混合、制粒设备

5.1.1 强力混合机可采用卧式强力混合机或立式强力混合机。

5.1.2 采用卧式强力混合机时，充填率不宜高于 20%，搅拌转速宜为 40r/min~60r/min；采用立式强力混合机时，充填率宜为 60%~80%，搅拌转速宜为 120r/min~180r/min。

5.1.3 强力混合机进料端宜设置除铁器和格网筛，搅拌工具应做耐磨处理。

5.1.4 圆筒制粒机宜采用尼龙衬板或陶瓷衬板，两段制粒总时长宜大于 5min，充填率宜为 9%~15%。

5.2 点火、保温设备

5.2.1 烧结料面点火设备宜采用双斜式点火炉。

5.2.2 当点火炉与保温炉分体设置时，点火炉末端应与保温炉前端紧贴。

5.2.3 点火炉炉膛应设置压力检测、温度检测及火焰检测。

5.2.4 点火炉应设置空、燃气比例调节，实现自动控制。

5.2.5 点火炉空、燃气应安装压力检测及低压报警装置，且与燃气快速切断阀连锁控制。

5.2.6 助燃空气管道上应设泄爆装置，末端应设置放散管。

5.3 燃气喷吹设备

5.3.1 烧结机台车上应设置燃气喷吹罩体，罩体应采用半封闭结构，其周侧应采用钢结构封闭。罩体内应设置火焰检测装置。

5.3.2 采用焦炉煤气作为喷吹介质时，喷吹管排宜采用管道伴热、可拆卸滤清结构及自清理设计等措施。

5.3.3 燃气管路上应设燃气可靠隔断装置和燃气快速切断阀。

5.3.4 燃气管路上应设稳压阀。

5.3.5 燃气管路上应设置吹扫管路，吹扫介质应为氮气，压力不应低于 0.3MPa。

5.3.6 燃气管路末端应设放散管路及燃气取样点，并应满足现行国家标准《工业企业煤气安全规程》GB 6222 相关要求。

5.4 热风循环、蒸汽喷吹设备

5.4.1 热风循环罩内应设置压力检测仪器。

5.4.2 热风循环罩与台车下部风箱间应设置短接管，短接管上应设置电动调节阀。调节阀开度应与压力检测值连锁，罩内应保持微负压工况。

5.4.2 热风循环罩内应设置氧气浓度检测仪器，罩体顶部应设置带有电动调节阀的新鲜空气入口。调节阀开度应与浓度检测值联锁，罩内氧气浓度（体积分数）值不应低于 18%。

5.4.3 热风循环主管道上应设置重力沉降室，管道拐弯、截面变化等流体冲击较大的部位应采用防磨材料或增加结构厚度。

5.4.4 热风循环罩与烧结台车侧壁之间应设置柔性密封装置。

5.4.5 热风循环罩上方应设置整流装置，宜采用多孔板式整流装置，整流板开孔率宜为 50%~85%。

5.4.6 蒸汽喷吹管排外部应设置保温层，管道最低端应设置冷凝水排水装置，管道上应设置蒸汽压力和温度在线检测仪表。

6 电气、仪表与自动化控制

6.1 电气

6.1.1 供配电及控制柜宜就近设置于配电室。按二级负荷供电时，应由两回路同级电压供电，当其中一回路发生故障时，另一回路应能承担全部二级负荷。

6.1.2 配电系统宜采用放射式配电型式，母线宜采用单母线或单母线分段结线方式。

6.1.3 当配电设计采用 220/380V 时，带电导体系统的形式宜采用单相二线制、三相三线制、三相四线制，系统接地的形式宜采用 TN-S 或 TN-C-S 系统。

6.1.4 电动机宜采用全压直接起动方式起动；当电机容量较大且所带负载适合软启动时，可采用软起动方式；当工艺有调速要求时，应采用变频调速装置。

6.1.5 主工艺流程设备宜采用可编程控制器（PLC）控制系统，且应采用集中控制、机旁单机操作方式。正常生产时应通过 PLC 系统的操作站（OS）进行全厂集中联锁控制和监视；非正常生产时可在机旁进行单机控制，机旁控制时可不依赖 PLC 系统。

6.1.6 喷吹系统宜在现场设置电缆转接箱，系统设备的配电及控制电缆宜通过航空插头转接。靠近点火炉段喷吹罩处设备的配电及控制电缆应采用耐高温电缆。

6.1.7 喷吹系统的爆炸危险的划分宜按不高于 2 区或 22 区考虑。敞开式厂房或通风良好的厂房，可适当降低爆炸危险区域等级。

6.2 仪表与自动化

6.2.1 煤气、蒸汽等管路上应设置自动调节阀，煤气、蒸汽等的流量应与烧结机大烟道负压、烧结机产量、台车运行速度、烧结终点位置和烧结终点温度等参数相关联，并自动调节。

6.2.2 流体介质为焦炉煤气时，宜选用具有自清扫功能的流量检测装置。

6.2.3 集中监控温度测量时，应根据温度分别采用热电阻或热电偶；温度仪表应配温度计套管，套管材质应根据介质温度、腐蚀性等确定。

6.2.4 集中监控压力测量时，应选用技术先进、精度高、稳定性好的智能压力变送器；变送器应采用 4mA~20mA 二线制输出，且带 HART 协议及液晶数字表头。当介质压力小于 1KPa 时，可采用智能式差压、微差压变送器。就地显示时，根据被测介质的特性，可选用不锈钢弹簧管压力表、不锈钢膜片压力表、不锈钢膜盒压力表或不锈钢隔膜压力表。变送器及就地显示压力表与工艺介质接触部分的材质应根据介质性质确定。

6.2.5 流量测量仪表应根据测量介质特性和工况参数（工作温度、压力）确定。

6.2.6 仪表与控制系统相连的信号电缆宜采用计算机屏蔽电缆。

- 6.2.7 信号线缆宜采用穿镀锌钢管或者镀锌槽式桥架的方式敷设，且应与动力电缆分层铺设。涉及高温区域、爆炸、火灾危险区域的电缆选型及敷设，应满足相应规范要求。
- 6.2.8 宜采用机器视觉识别点火料面全区域分析系统，并通过 PLC 系统将分析结果与点火炉相应分区烧嘴阀门开度连锁控制。
- 6.2.9 宜采用机器视觉识别机尾断面全区域分析系统，并通过 PLC 系统将分析结果与布料辅门相应分区阀门开度连锁控制。
- 6.2.10 现场应设置有毒气体及可燃气体浓度检测装置，并具备现场声光报警功能；检测值应能远传至 PLC 系统，并参与喷吹系统燃气切断阀的连锁。
- 6.2.11 喷吹罩内应设置火焰识别系统，火焰识别系统应能对料面的着火情况进行智能识别并分析，分析结果应参与各段对应执行器的连锁。
- 6.2.12 中央控制室内应设置操作员站。PLC 控制站与操作员站、远程站之间应采用工业以太网的通讯方式交换信息，并预留与主系统、L2 系统的通讯接口。

本标准用词说明

- 1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 本标准中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《工业企业煤气安全规程》 GB 6222

团 体 标 准

复合供热低碳烧结技术标准

T/CMCA xxxx-2025

条文说明

编制说明

本标准是根据中国冶金建设协会《关于印发 2022 年上半年工程建设团体标准制定计划的通知》（冶建协[2020]26 号）要求，由中冶长天国际工程有限责任公司会同有关单位共同完成。

一、制定所遵循的主要原则

1、贯彻执行国家的有关法律、法规和方针、政策，符合我国国情；密切结合自然条件，合理利用资源，充分考虑使用和维护的要求，做到安全适用、技术先进、经济合理、环境友好；积极采用新技术、新工艺、新设备、新材料，使标准具有科学性、先进性、前瞻性。

2、条文规定严谨明确，文句简练，不模棱两可；标准内容深度、术语、符号、计量单位等前后一致。

二、编制概况

本标准在中国冶金建设协会的指导下，主编单位中冶长天于 2022 年 11 月在长沙组织召开了第一次编制工作会议，讨论确定了工作大纲。在标准制定过程中，标准编制组对已投运的复合供热低碳烧结项目进行了实地调研，并对项目建设过程中的经验进行了总结，搜集整理有关技术资料，编写标准初稿，并多次召开内部审查会，完成了标准初稿，于 2025 年 xx 月完成标准征求意见稿，发送到全国有代表性的设计、生产、科研等若干家单位定向征求意见，同时在中国冶金建设协会官网公开征求意见。编写组收集整理了相关单位的意见和建议后，通过认真分析和讨论，对标准征求意见稿进行了补充和修改完善，于 2025 年 xx 月完成标准送审稿。2025 年 x 月 x 日，由中国冶金建设协会主持召开了标准审查会，工作组根据审查会意见对标准送审稿作了进一步的修改、整理和完善，最终形成了标准报批稿。

本标准在编制过程中，在技术上体现了以下原则和特点：

1、适合我国经济发展的新形势和钢铁行业双碳政策的新要求，体现新形势下烧结工序的绿色、低碳发展新成果。

2、烧结工序多元燃料的协同供热，实现烧结工序能源利用水平的显著提升。

3、提倡从配料、强混、点火、保温到成矿的烧结全过程协同优化和烧结全流程智能监测与控制。

4、体现技术先进、安全适用、经济合理、环境友好，实现绿色生产和循环经济。

本标准共 6 章，主要内容包括总则，术语，基本规定，工艺流程，主要设备，电气、仪表与自动化控制。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时正确理解和执行条文规定，《复合供热低碳烧结技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	19
3	基本规定	20
4	工艺流程	21
4.1	一般规定	21
4.2	混匀制粒系统	22
4.3	点火系统	24
4.4	保温系统	24
4.5	燃气喷吹系统	25
4.6	热风循环系统	26
4.7	蒸汽喷吹系统	26
4.8	料面煤粉/生物质粉喷洒系统	27
5	主要设备	28
5.1	混合、制粒设备	28
5.2	点火、保温设备	28
5.3	燃气喷吹设备	29
5.4	热风循环、蒸汽喷吹设备	30
6	电气、仪表与自动化控制	31
6.1	电气	31
6.2	仪表与自动化	31

1 总 则

1.0.1 本条款阐述标准制定的背景及必要性。烧结工序占钢铁全流程碳排放的 12%~15%，系重点减排环节。针对传统单一固体燃料供热模式存在的热效率偏低、碳排放强度高等问题，复合供热低碳烧结技术通过气固燃料耦合燃烧及热源分层调控等手段，实现了显著改进。该技术已在宝钢韶钢、首钢京唐等企业规模化应用，实测数据表明其可降低烧结固体燃料消耗 8%~12%、碳排放强度 15%~25%，并同步提升烧结矿转鼓强度 1.5~2.0 个百分点。鉴于当前行业内缺乏该技术的系统性规范，亟需建立统一标准以指导工程设计与运行。同时，《钢铁行业碳达峰实施方案》《钢铁烧结工序能效标杆指南》及《工业能效提升行动计划》（提出到 2025 年重点工业行业能效全面提升、规模以上工业单位增加值能耗比 2020 年下降 13.5%、钢铁行业重点产品能效达国际先进水平等目标）均对提升能效和降低碳排放提出了明确要求。复合供热低碳烧结技术作为一项基础性节能降碳技术，在降低烧结过程碳排放、提高低碳能源利用比例方面效果显著。因此，本标准基于 5 项工程实证数据，结合 GB 50408《烧结厂设计规范》、GB 13456《钢铁工业水污染物排放标准》等现行标准，系统梳理铁矿烧结工艺相关复合供热低碳技术，旨在明确其工程设计的关键技术要求，实现技术先进性、经济性、安全性与环保性的统一，推动工艺流程的标准化、规范化，为烧结工艺极致能效提升和行业绿色低碳转型提供技术支撑。

1.0.2 本条款规定标准适用范围，涵盖采用燃气、煤粉等两种及以上燃料耦合的烧结系统，适用于新建、改建及扩建项目的工程设计、运行优化与设备维护，不适用于采用单一固体燃料供热（点火炉除外）的烧结工程。

1.0.3 本条款明确复合供热低碳烧结工程与其他相关标准的衔接关系。工程设计需遵循《烧结厂设计规范》GB 50408 的通用要求；燃气燃烧系统安全控制须符合《工业企业煤气安全规程》GB 6222；污染物排放执行《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》GB 28662 的限值要求；能源计量与碳排放核算参照《综合能耗计算通则》GB/T 2589 及《钢铁企业温室气体排放核查技术规范》RB/T 251。本标准与上述标准共同构成技术实施体系，未涵盖的特殊工况需专项论证。

3 基本规定

3.0.1 本条款规定复合供热低碳烧结工程设计通常以燃料工业分析、热平衡计算、设备性能曲线等为依据，涵盖原料特性、热源参数、环境条件等基础数据。设计资料包括可行性研究报告、热工测试报告、设备技术协议及环境影响评估文件，并参照 GB 50408《烧结厂设计规范》进行多方案比选，确保复合供热系统与主工艺兼容性、负荷变化适应性及碳排放核算完整性。

3.0.2 本条款规定复合供热低碳烧结工程设计需与厂区既有设备及生产体系协调。设计前核查原有烧结机规格（有效面积、漏风率、环冷机型式等）、高炉原料冶金性能（粒度组成、同化温度、液相生成能力等）及燃料结构现状，确保复合供热低碳烧结设计方案与原有烧结机匹配。未进行匹配性验证的设计方案可能导致系统热效率下降或烧结矿产质量下降。

3.0.3 本条款规定复合供热系统能源介质供应原则。钢铁厂集中供应水、电、燃气及蒸汽可避免重复建设能源设施，降低运营成本并提高能源综合利用效率。通过厂级能源管理中心统一调度，确保介质参数匹配烧结工艺需求。

3.0.4 本条款规定复合供热系统技术规格须与烧结机工艺参数严格匹配。如设计热容量需要满足最大热负荷需求并预留合理余量，系统结构配置需适应烧结机有效面积波动范围，燃料适应性涵盖燃气及生物质燃料。通过冗余配置保障长期运行稳定性，确保烧结矿质量满足生产要求。

4 工艺流程

4.1 一般规定

4.1.1 本条款规定复合供热低碳烧结工艺流程的设计原则及核心要素。工艺方案需统筹考虑烧结料层透气性、热源耦合效率与烟气循环系统匹配性，依据《烧结厂设计规范》GB 50408 要求，结合原料冶金性能（同化温度、液相生成能力）及燃料结构特点，优化供热梯度分布与风流系统配置。设计需集成余热梯级回用、多燃料智能配比（波动率 $\leq \pm 3\%$ ）及污染物协同控制等技术模块，参照宝钢韶钢、首钢等工程案例，确保固体燃耗降低 10%-15%的同时，烧结矿产质量指标稳定。安全设计需满足《工业企业煤气安全规程》GB 6222 要求，实现能源、环境、质量与安全的系统化平衡。

4.1.2 本条款规定复合供热低碳烧结工艺流程（见图 5.1.2）的核心技术体系。强制要求采用强制混匀（保障气固燃料均匀分布）、富氧/热风点火（强化点火强度并降低燃气和固体燃耗）、热风保温（利用烧结废气余热减缓表层矿冷却速度）、燃气喷吹（补充热量并优化燃烧氛围）及蒸汽喷吹（调控矿物相变提升烧结矿强度）五项基础技术；推荐配套点火料面识别与点火炉联控系统（动态优化点火参数）及机尾断面识别与布料辅门联控系统（精准调控料层透气性）；建议优先采用热风循环技术（回收废气余热实现节能降碳）；允许选择性采用料面煤粉/生物质粉喷洒技术（针对特殊原料补充局部热能）。全流程通过多技术协同实现燃料高效利用与过程精准控制，构建智能化低碳烧结工艺。

4.1.3 这几款条款规定烧结料层分层供热体系的工艺架构及技术规范。四层供热结构基于烧结过程热力学特性与低碳化需求设计，通过梯度补热优化温度场与能效，具体技术内涵如下：
点火供热层：采用分区富氧点火技术，动态调节氧浓度梯度（22%-28%），通过空氧混合装备提升空/氧气混匀速率，点火温度精准控制于 $1100 \pm 50^{\circ}\text{C}$ ，可使表层残碳率降至 0.06%。
配套机器视觉联控系统实时调整点火参数，保障点火质量和点火能耗。

保温供热层：采用热风保温，实现表层矿在 $800\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内的梯级温度控制，废气余热回用率 $\geq 65\%$ ，可使表层返矿率由 45%降至约 27%。

富氢燃气耦合供热层：通过燃气喷加装备实现喷吹燃气浓度梯度分布（0.83%-0.08%），料面燃气均匀性超过 90%。燃气、循环烟气与水蒸气等多介质气体耦合喷吹，与料层内固体燃料协同供热，达到降低烧结过程固体燃耗和工序能耗的目的，同时改善烧结矿质量。

固体燃料供热层：基于自蓄热量化模型，底部物料烧结过程热量需求全部由该层料层内固体燃料和上部料层蓄热提供。

该体系在中天钢铁、首钢京唐、首钢矿业等烧结现场应用，固体燃料降低 10%-15%、碳排放减少约 15%，转鼓强度稳定于 78%-80%。

其中，点火供热层厚度范围是基于工程实践，确保表层混合料在 1.5 分钟内完成引燃并形成稳定的初始燃烧带。初始燃烧带过薄，表层残碳过多，且燃烧带下行速度慢，不利于烧结过程的进行；初始燃烧带过厚，会导致表层过融，同时增加点火能耗，且会增加烧结料层阻力。

同时，本条款明确保温供热层占烧结料层总高度范围，以及供热方式。保温供热层的厚度，依据烧结热工计算模型设定。在保温供热层内通过固体燃料（配碳量 3%-5%，粒度 0.5-3mm）维持温度梯度，辅以循环热风补热，可以降低表层返矿率至 25%以下。设计兼顾热力学平衡与余热回用效率，同时符合 GB 28662 排放限值要求，保障工艺稳定性与能效优化。

同时，本条款规定的耦合供层厚度，依据烧结热工计算模型设定。采用富氢燃气与固体燃料协同燃烧，燃气通过顶部多孔管排均匀布入料层，实现热场深度渗透及 CO₂减排。

同时，本条款规定的固体燃料供热层厚度，依据烧结热工计算模型设定。采用固体燃料通过料层蓄热实现底部温度梯度稳定（峰值温度 1250-1300℃），降低燃气消耗并减少碳排放。

4.2 混匀制粒系统

4.2.1 混匀制粒是烧结的关键工序，其为烧结提供成分均匀、粒度组成良好的混合料。传统混合制粒采用的是圆筒+圆筒的工艺，一次圆筒主要用于混匀，二次圆筒用于制粒。由于圆筒混合效果差，使混合料组分不均匀，不易于制粒，加上二次圆筒制粒时间短，从而使原料整体制粒效果不佳，导致料层透气性变差，烧结能耗高。第一段采用强力混合可提高原料混匀效果，第二段和第三段采用圆筒制粒，可延长混合制粒时间，改善混合料制粒效果。本钢 566m² 和宝钢 600m² 等烧结工程均采用了强力混合机+圆筒+圆筒的三段混匀制粒工艺，使用后，混合料中+3mm 以上的粒度均明显提高，料层透气性得到改善，从而为复合供热低碳烧结提供先决条件。

4.2.2 原料各成分均匀可提高制粒效果，如表 1 所示。为了保证制粒效果，混合料应足够均匀，混合均匀度不宜小于 90%。本钢和宝钢采用强力混合机的三段混合制粒工艺后，经检测混合均匀度达到 90%以上，+3mm 的粒度达到 70%以上。

表 1 不同混合均匀度下原料的制粒效果

序号	混合均匀度	粒级含量（mm）		
		3~8	1~3	0-1
1	80%	52.3%	18.6%	26.8%
2	83%	56.2%	19.3%	20.8%
3	90%	71.2%	10.8%	12.3%
4	92%	72.7%	12.4%	11%

4.2.3 混匀制粒过程采用雾化形式加水，均匀地喷洒到物料表面，从而实现精准湿润，而不是一股水流冲散或局部过湿。另外水分的混合均匀度直接影响制粒效果，因此，在混匀阶段大量加水（占总水量的 80%~90%），可以确保水分和所有原料（尤其是粘合剂）分布得更加均匀，为下一阶段的制粒打下坚实基础。混匀后的湿润物料在圆筒的滚动作用下，通过毛细力和塑性变形，使小颗粒层层包裹长大，形成粒度均匀、强度适宜的理想小球，此阶段加水量过大，会导致小球过度长大、互相粘连结成大块，或者表面过湿变得泥泞，反而破坏已形成的颗粒结构，导致“过湿”现象，使制粒失败，因此制粒阶段加水量一般控制在总水量的 10%~20%。

4.2.4 根据原料的不同，混合料的最佳水分存在一定差异，如混合料中磁铁矿较多时可适当增加水分，而褐铁矿较多时可降低水分，但总水分量过大，会加重烧结过程过湿层的厚度，导致生产过程透气性变差，影响富氢气体的喷吹量，根据实验，混合制粒水分宜小于 7%，可保证复合供热烧结中富氢气体的供应。即使总水量控制在 7%，但如果波动太大，生产过程也会极不稳定，混合阶段原料实现宏观上的均匀混合和初步润湿，此阶段是加水的主力阶段，水分波动允许范围相对稍宽一些（ $\pm 0.4\%$ ）。制粒过程对水分极其敏感，微小的水分变化就会显著影响小球的成长速度和最终强度，必须保持在极窄（ $\pm 0.2\%$ ）的波动范围内，才能生产出合格且稳定的混合料。

4.2.5 烧结过程混合料粒径 $<3\text{mm}$ 的过多，使料层变得致密，透气性变差，影响富氢气体的喷吹量；若 $>8\text{mm}$ 的颗粒过多，烧结过程透气性太好，使氢气体来不及燃烧或者燃烧的热量被主抽风机抽走，使能耗增高。因此，根据复合供热低碳烧结生产实践，混匀制粒后烧结混合料中满足 $3\text{mm}—8\text{mm}$ 的粒径含量宜大于 70%。

4.2.6 混合和制粒各阶段水分的添加量和稳定性直接影响后续制粒效果，因此混合制粒工序

添加水应实行自动检测与控制，以确保各阶段水分的需求和稳定。另外为确保混合制粒后的粒径要求，设备后端需配置粒度检测仪，对粒级进行实时检测，并调控。

4.3 点火系统

4.3.1 本条款规定烧结点火燃气优选高热值、易调控、燃烧稳定的燃气。推荐采用：焦炉煤气（热值高、易调控）、天然气（热值最高、清洁）或转炉煤气（可利用，但含高浓度 CO、H₂，有毒易爆，须严格安全防护）。也可采用：热值较低的高炉煤气（通常需预热或特殊燃烧器），或高炉煤气与前述优质煤气的混合煤气（以提升热值、改善燃烧；混合比例须稳定可控）。选择需综合考虑热源性能、煤气资源、成本效益及本质安全（尤其转炉煤气），在保障点火质量、安全达标前提下实现经济高效运行。

4.3.2 本条款规定点火系统需采用富氧点火技术，助燃风氧含量宜控制在 24%~29%（降低点火能耗的同时，防止料面过熔）；推荐组合应用微负压点火（以减少漏风和点火烟气热损）、热风点火（回收余热预热料面）及预热点火（提高低热值燃料的点火稳定性和点火质量）等节能技术；。通过富氧与节能技术协同，在提升点火质量前提下显著降低固体燃料消耗，实现高效低碳点火目标。

4.3.3 本条款规定烧结微负压点火关键工艺参数是依据烧结理论、烧结杯试验和现行烧结微负压点火现场实践。该工艺参数组下，可以保证稳定的点火质量，同时大幅降低点火烟气量，从而降低烧结点火燃料消耗

4.3.4 本条款规定烧结点火关键工艺参数是依据烧结理论、烧结杯试验和现行烧结现场实践，该参数组下可避免表面过熔（液相生成量 $\leq 8\%$ ）或未充分燃烧（残碳率 $\leq 0.15\%$ ）。

4.4 保温系统

4.4.1 烧结料层离开点火炉后，高温表层直接与常温空气接触，导致表层矿急冷，不利于表层矿的成矿过程，导致表层烧结矿强度差，返矿率高。通过点火炉后无缝衔接保温段，可以有效避免表层矿急冷，改善表层矿质量。实践表明，保温段通过温度梯度控制（600~800℃）延缓表层冷却速率，可以减少返矿率至 25%以下，余热回收率提升至 $\geq 65\%$ ，同步降低固体燃耗 8%~12%。

4.4.2 采用热风炉烟气，可以实现保温过程的精准控温，循环热烟气则可以作为低温段热源（350℃以下）补充，以利用烟气余热，降低工序能耗。

4.4.3 依据烧结热工计算模型和表层矿冷却烧结杯试验设定，保温段烟气温度沿台车运行方向采用梯级递减，匹配了烧结过程热释放规律，实现了烧结表层矿的梯级缓冷，保证表层矿

熔融和结晶过程充分发展。

4.5 燃气喷吹系统

4.5.1 本条款规定喷吹燃气选用原则及质量控制要求。允许采用氢气、天然气、液化石油气、焦炉煤气或其混合气体（确保燃烧性能），禁用高炉/转炉煤气（热值低、燃烧稳定性差且存在安全风险）。关键控制参数：1) 燃气接入点压力 $\geq 0.1\text{MPa}$ 且波动 $<10\%$ ，保障喷射动能稳定；2) H_2 $\text{O}+\text{CO}_2$ 体积分数 $\leq 5\%$ ，防止燃烧温度衰减；3) H_2 S 含量 $\leq 100\text{mg/Nm}^3$ ，避免硫腐蚀及污染；4) 发热量与组分波动 $<10\%$ 并设 $10\%\sim 15\%$ 热负荷冗余，应对工况波动确保烧结均匀性。本质是通过清洁、稳定、高热值燃气支撑低碳烧结工艺安全运行。

4.5.2 由于氢气与常规燃气物化特性差异显著（如爆炸极限、扩散系数等），混合喷吹易引发回火及爆燃风险。单独喷吹系统可确保喷吹结构设计材料与燃气燃烧特性相匹配，同时满足燃气浓度监测、快速切断阀组联动等安全控制要求。独立系统还可以避免燃料切换时热流场扰动，保障烧结带温度场均匀性。

4.5.3 本条款规定富氢燃气设计用气量的确定原则。核心计算依据为烧结机设计产量规模（吨/小时或吨/年）与经技术论证确定的单位产品富氢燃气消耗量（ $\text{Nm}^3/\text{吨烧结矿}$ ）。二者乘积即为基本设计用气量。在此基础上需额外预留 $10\%\sim 20\%$ 的供气余量。此余量用于：1) 应对原料波动、操作调整等引起的实际用气量短期波动；2) 为生产优化提供必要的调节裕度；3) 确保在供气系统部分检修时仍能满足基本生产需求。预留余量是保障烧结过程稳定、适应富氢燃气特性（如燃烧速度差异）的必要设计措施。

4.5.4 气源波动将导致燃烧效率下降及烧结矿冶金性能波动，工程应用中需结合焦炉煤气、富氢气体制备等气源特性，配置压力缓冲装置、成分在线监测系统及热值调节设施，确保燃气压力、流量及物化参数稳定，保障系统连续稳定运行。

4.5.5 由于烧结料层蓄热作用，料层自上而下，蓄热作用逐渐增加，料层所需的补热量也逐渐增加。为适应料层的这一理论需热量规律，沿台车运行方向燃气喷加浓度需要逐渐降低，以提供梯级递减的补热量。

4.5.6 起始段和终点段喷吹浓度上限，分别取燃气爆炸下限的 $10\%\sim 15\%$ 和 $5\%\sim 8\%$ ，以避免由于燃气分布不均导致局部浓度超过燃气爆炸限值，最大限度保证安全生产。

4.5.7 燃气在烧结料层内部的分布均匀性和供热均匀性，主要取决于燃气在料层上方的混合均匀性，因此应强化燃气与空气在料面上方的混合。

4.5.8 由于烧结料层蓄热效应，气体燃料对固体燃料的替代作用需综合评估燃气补热量与上

层烧结矿蓄热贡献，气焦置换比要求大于 1。实践证明，置换比控制在 1:2.5~1:4.0 区间时，固体燃耗降低与烧结矿产质量指标可达成最优平衡。

4.5.9 压力低于 5kPa，难以保证喷吹流量，同时会引发管路末端回火危险。

4.5.10 本条款规定燃气喷出速度适宜范围。速度高于此范围，出口处压力损失大，需要的管道压力增加，同时燃气在料面的扩散时间过短，影响燃气与空气的混合；速度低于此范围，燃气出口动压过小，不利于燃气混合，同时影响管排的喷吹能力。

4.5.12 燃气喷吹量 $<15\text{MJ/t}_s$ 时，气体燃料对固体燃料的替代作用和优化料面热量分布的作用不明显。喷吹量 $>45\text{MJ/t}_s$ 时，气体燃料形成的燃烧带过宽，影响减碳效果。

4.6 热风循环系统

4.6.1、4.6.2 本条款规定热风管道流速选用经济流速，整流后风速 $\leq 1\text{m/s}$ ，是为了防止循环热风气流对烧结料层上方流场冲击过大，影响料层上方的流场稳定性。

4.6.3 根据 Ergun 方程，气流通过料层的阻力是流速的 1~2 次方关系，循环热风量过大，会急剧增加料层阻力，使大烟道负压大幅增加。

4.6.4 由于料层阻力的限值，循环热风的最大流量（工况）通常不超过 $1400\text{ m}^3/\text{h}$ 。工况流量一定时，温度越高，气流中氧原子的密度越低，不利于燃烧带内的固体燃料燃烧和烧结矿熔融结晶过程。工业实践表明，循环热风温度超过 300°C 后，烧结机数有明显下降。

4.6.5 烧结料层内的氧分压对固体燃料的燃烧和混合料的成矿过程有明显影响。工业实践表明，循环热风氧浓度低于 18%，烧结矿产质量水平会有明显下降。

4.6.6 燃气在料层内的混合均匀性，直接影响燃气替代固体燃料和优化料层供热的效果。燃气在料层上方混合越充分，在料层内的分布则越均匀，减碳效果越好。热风与燃气重叠的区域，热风流场占主导，因此需要增加导流板及蜂窝格栅等措施，强化热风与燃气在料面上方的混合均匀性。而且，为确保热风与燃气相遇前有足够的整流空间，同时避免燃气向烟气循环管路内的倒灌，燃气喷吹管排需要设置在循环热风的下游，且燃气管排与循环热风入口间距不宜小于 300mm。

4.7 蒸汽喷吹系统

4.7.1 本条款规定了蒸汽喷吹的起点和覆盖范围。蒸汽喷吹覆盖范围应该与烧结工艺进程相匹配，特别的喷吹起点应在烧结料层过湿层消失后，防止蒸汽冷凝导致透气性恶化。

4.7.3 喷吹蒸汽应该主要以蒸汽形式穿过成品矿带直达燃烧带，以达到加湿燃烧的目的。蒸汽在烧结料层表层冷凝会严重恶化表层矿的透气性，因此应严格控制蒸汽在料层上方的冷凝

量。

4.7.2 宜采用过热蒸汽，可以有效降低蒸汽的冷凝，。

4.7.4 蒸汽接触冷的料面后，会产生部分冷凝，影响烧结料层的透气性，实践表明，冷凝量超过 10%后，料层透气性有显著恶化，烧结主抽功率有明显上升，因此冷凝量不宜超过 10%。

4.7.5 本条款规定蒸汽喷吹前必须与空气充分混合，混合均匀度应 $\geq 60\%$ （基于气固传热效率阈值）。均匀度不足将导致：1) 蒸汽局部富集引发料层结露，阻碍燃烧带迁移；2) 混合不均形成热斑/冷区，恶化烧结矿均匀性；3) 降低蒸汽显热利用率。

4.7.6 本条款规定蒸汽与燃气喷吹重叠区的安全布置原则：蒸汽喷管必须置于燃气喷管上部（在燃烧喷洒点上方形成阻止燃气逃逸的隔离层）；管排垂直间距应 $\geq 200\text{mm}$ （工程安全阈值）。该间距要求基于：1) 预留足够的燃气射流扩散距离；2) 预留检修操作空间；确保双介质喷吹系统安全运行。。

4.8 料面煤粉/生物质粉喷洒系统

4.8.1 低挥发性燃料可减少挥发分逸出导致的 CO 排放超标；高反应性燃料能快速释放热量，缩短料面点火时间，并减少未燃碳残留。兼顾工艺安全与烧结效率。

4.8.2 议采用改性生物质燃料（如热解炭化生物质或压缩成型颗粒）作为料面喷洒介质，通过改性可显著降低生物质粉挥发份含量，同时调整生物质粉反应性，使其更加匹配烧结工艺供热需求，并降低直接燃烧产生的焦油结焦风险。

4.8.3 固体燃料的燃尽速率与燃料粒径成强的负相关性，粒径越大，比表面积越小，燃料燃尽时间越长。在料面煤粉/生物质粉喷洒中，燃料在点火炉中停留时间一般不超过 3 分钟。为使煤粉/生物质粉在出点火炉后完全燃尽，需要严格控制喷洒燃料的粒径，对于煤粉，粒径不超过 1mm，对于生物质粉，由于其燃烧速率较煤粉快，可以放宽至 5mm。

4.8.4 采用料面煤粉/生物质粉喷洒时，表层燃料含量较常规烧结时高，且燃料裸露在料层上方，更容易着火和燃烧，适当调低烧结点火温度，可以降低烧结点火能耗。

5 主要设备

5.1 混合、制粒设备

5.1.1 在烧结生产中，常见的混合设备有圆筒混合机、卧式强力混合机以及立式强混合机。圆筒混合机是以旋转筒壁的摩擦力将物料提升至一定高度再分层滑落来实现原料的混合，属于被动混合，混匀均匀度不会超过 80%。卧式强力混合机或立式强力混合机其借助高速旋转的搅拌装置，使物料在强迫扰动下产生剧烈的混合，混合均匀度在 90%以上，满足原料对混合均匀的要求。

5.1.2 卧式强力混合机工作过程中筒体固定，通过搅拌装置推动物料前进，同时使筒体内物料最大范围翻转，填充率过大，物料翻转不动，混合均匀度小，因此桶筒内填充率不宜超过 20%，目前投产的卧式强力混合机填充率均在这范围内。同时由于搅拌装置卧着安装，其旋转速度受混匀机理的限制，转速一般小于 60r/min，另一方面为保证混合均匀度搅拌装置转速要大于 40r/min。立式强力混合机工作过程中桶体和搅拌工具一起转动 并相互配合，从而实现桶体内全范围物料的翻转搅拌，充填率控制在 60%~80%。由于搅拌工具立着安装，转速可达 500r/min,综合考虑混合均匀度的要求，搅拌转速宜为 120r/min~180r/min。

5.1.3 强力混合机搅拌工具高速旋转，铁块、大颗粒物料等进入设备后容易打坏搅拌工具，导致设备失效，因此在进料端宜设置除铁器和格网筛，防止铁块和大颗粒物料进入设备。混合过程中，物料与搅拌工具接触发生磨损使其失效，因普通合金材料耐磨性能较差使用寿命短，因此，为减少运行维护成本应对搅拌工具做耐磨处理，提高使用寿命。

5.1.4 圆筒制粒机生产过程中内壁面会粘结物料而结块，影响制粒效果，采用尼龙衬板或陶瓷衬板后，可显著降低壁面物料的粘结，钢铁企业制粒设备基本都采用了尼龙衬板或陶瓷衬板。为了保证制粒效果，应保证足够的制粒时间，过去国内铁矿原料制粒时间为 2.5min~3min，多年生产实践证明，制粒时间明显不足。现在国内烧结厂制粒时间增加至 5min~9min，如日本君津厂为 8.1min，前釜石厂为 9min。我国近年投产的制粒时间基本在这一范围内。国内外烧结厂制粒机的填充率在 9%~15%，已保证物料处于良好的滚动状态，提高制粒效果。

5.2 点火、保温设备

5.2.1 双斜式点火炉的炉体结构通过双角度倾斜设计优化火焰分布，实现料面均匀点火。该设备可精准控制点火深度与热流密度，减少燃气消耗并抑制局部过烧或欠烧现象，同步降低烟气中 CO 与 NO_x 生成量。设计兼顾点火效率与热能回收，有效提升表层矿相结构稳定性，符合烧结工艺节能降耗与清洁生产的运行要求。

5.2.2 点火炉与保温炉分体设置时,通过消除炉间空隙设计,可以维持料面温度场连续稳定,避免因局部散热导致表层烧结矿因急冷产生裂纹或强度衰减,同时减少气流扰动引起的粉尘逸散及热量损失。结构布局优化后,料层高温带完整性得以保障,烧结矿成品率及矿物结晶均匀性显著提升,符合高效低耗的工艺控制原则。

5.3 燃气喷吹设备

5.3.1 烧结机台车上方设置半封闭钢结构燃气喷吹罩体,通过四周封闭设计实现燃气喷吹空间的有效密封。半封闭结构可防止喷吹过程中燃气外溢及气流干扰,保障燃气与烧结料的均匀接触,同时便于操作维护及设备散热。钢结构设计兼顾耐高温与抗变形性能,避免高温工况下罩体变形失效,确保喷吹过程稳定可控,降低燃气损耗及安全风险,符合烧结工艺安全高效运行要求。

5.3.2 焦炉煤气喷吹管排通过采用管道伴热、可拆卸滤清结构及自清理设计等措施,避免了焦油冷凝积聚导致堵塞。该设计可维持喷吹流量稳定,减少设备故障频次,确保燃气与烧结料均匀接触,保障喷吹系统长期可靠运行,兼顾生产安全性与维护便捷性。

5.3.3 燃气管路配置安全切断阀可以确保在系统事故、故障或长时间停机时自动切断燃气供应。该阀门通过快速响应机制与双重密封结构,可有效阻断燃气流动,防止泄漏引发燃爆风险,同时避免停机期间燃气残留。设计兼顾可靠性维护需求,确保紧急状态下切断动作精准执行,保障设备与人员安全,符合燃气系统本质安全防护要求。

燃气管路设置快速切断阀可以确保在系统事故或故障时立即切断燃气供应。该阀门通过快速响应机制与多重密封结构,有效阻断燃气流动,防止泄漏引发的燃爆风险,并消除停机期间燃气残留隐患。设计兼顾可靠性维护要求,确保紧急状态下切断动作精准可靠,保障设备与人员安全,符合燃气系统本质安全防护原则。

5.3.4 燃气管路调压装置通过稳压结构或自动调节功能动态平衡燃气压力,避免压力波动导致燃烧不稳定、效率下降或设备异常磨损。该装置可精准调控压力波动范围,防止因压力异常引发的熄火、回火等安全风险,同时维持喷吹过程稳定可控,确保燃气与烧结料均匀接触,减少工艺波动及能源损耗,符合安全生产与高效运行的工艺要求。

5.3.5 氮气惰性特性可避免与残留燃气反应,确保吹扫过程安全。设定压力下限保障吹扫气流强度,有效清除管路内残余燃气,防止停机或维护时燃气积聚引发燃爆风险,同时为检修作业提供安全环境,符合燃气系统安全防护要求。

5.3.6 放散点用于安全排放管路残余燃气,取样点便于实时检测燃气组分。放散管路应布置

于开阔区域且远离火源，取样点需位于放散管段上游，确保检测准确性。设计兼顾排放安全性及检测便利性，避免燃气残留或检测干扰，维护时可通过放散彻底排空管路，符合燃气系统安全防护与运行监测要求。

5.4 热风循环、蒸汽喷吹设备

5.4.1 热风循环罩内设置压力检测仪器通过短接管与风箱连接，短接管配置电动调节阀实现压力连锁控制。当罩内压力为正值时，调节阀自动开启，及时平衡内外压差，维持罩内微负压状态，避免高温气体外溢或粉尘逸散。该设计可以稳定气流分布，减少热风循环系统能耗，防止正压工况导致的设备密封失效或人员烫伤风险，符合工艺安全与能效优化要求。

5.4.2 当检测到氧浓度低于 18%时，调节阀自动开启补入空气。该设计通过动态调控罩内氧含量，避免燃烧不充分导致 CO 浓度超标或结焦风险，同时防止低氧环境引发燃料不完全燃烧及安全隐患。连锁控制机制可实时平衡燃烧气氛，稳定热风循环工艺，兼顾生产安全与能效优化。

5.4.3 循环热风的粉尘含量较高，在热风循环主管道上设置重力沉降室，有利于降低循环管路中的粉尘含量。在弯头、变径等易受冲击部位增设耐磨或导流装置，可以降低流体冲刷强度，减少管壁磨损。该设计可提升管道运行稳定性与耐久性，保障热风循环系统长期安全高效运行。

5.4.4 柔性材质可自适应热膨胀与机械振动，动态补偿位移偏差，阻断气体泄漏及粉尘外溢。该设计通过弹性密封与耐高温材料结合，显著提升密封可靠性，降低漏风热损，延长维护周期，兼顾工艺效率优化与生产环境改善。

5.4.5 本条款规定热风循环罩必须设置整流装置（消除气流涡旋与偏流），优先选用多孔板式（结构可靠、流场易控），其开孔率宜为 50%~85%（工程最优区间）。该设计基于：1) 开孔率<50%时阻力过大（增加风机能耗 15%以上）；2) 开孔率>85%时整流失效（速度不均度>30%）；3) 50%-85%范围可平衡阻力损失（压降 $\leq 200\text{Pa}$ ）与气流均布（速度偏差<15%）。整流装置是保障热风均匀穿透料层、提升余热回收效率的核心构件，直接关联烧结矿冷却质量与系统能效。

5.4.6 本条款规定蒸汽喷吹管排需设置外保温层以减少热损失，管道最低端配置冷凝水排水装置以消除积液风险，并在适宜位置安装压力及温度在线检测仪表。保温层可维持蒸汽干度及热能效率，排水装置避免水击及管道腐蚀，检测仪表实时监控运行参数，保障喷吹稳定性与安全性，防止过压或低温导致的工艺异常，符合系统节能与安全运行要求。

6 电气、仪表与自动化控制

6.1 电气

6.1.1 本条款规定根据工艺设备重要程度，设置供电电源的等级。对于重要负荷，可采用 2 路电源进行供电。

6.1.2 本条款规定设备的配电采用放射式，相互间独立，配电级数少，可靠性高。

6.1.3 本条文明确了根据不同用电需求应选择的标准化系统形式，旨在实现系统的简单、规范、高效和灵活。同时从安全角度出发，推荐采用技术成熟、安全性高、兼顾经济性的接地形式，最大限度地防范触电事故。

6.1.4 本条款规定低压电动机优先采用全压直接起动方式，其结构简单且运行成本低，适用于无调速需求的常规负载。对于需调速的工艺设备（如风机、泵类），采用变频调速装置以实现能效优化；大容量电动机或需限制启动电流的负载，则选用软起动方式，降低电网冲击并延长设备寿命。设计依据负载特性与工艺需求，确保起动安全可靠，兼顾节能与经济性。

6.1.5 本条款规定主工艺设备需配置集中控制与机旁操作双模式。正常生产时，通过 PLC 系统实现全厂连锁控制与实时监视，确保工艺协同高效运行；非正常工况下，机旁控制独立于 PLC，支持单机启停及调试检修，避免系统故障导致全线停机。设计兼顾生产连续性与应急灵活性，降低控制依赖性风险，保障设备安全可靠运行及维护便捷性。

6.1.6 本条款规定喷吹系统的动力电缆及控制电缆至现场设备需采用航空插头的形式经中间端子转接箱进行转接。因为喷吹罩上设备属于移动设备，方便罩体进行位移时电缆的解除与恢复。

6.1.7 本条款规定涉及到爆炸危险区域，如煤气、煤粉等区域的爆炸危险区域划分。上述工艺区域涉及煤气或煤粉的区域均可视为二级释放源，危险区域划分不高于 2 区或 22 区，在敞开式或通风良好厂房，可以视为非爆炸危险区域。

6.2 仪表与自动化

6.2.1 通过实时采集大烟道负压、烧结终点温度等数据，建立多变量耦合控制模型，实现燃料供给与燃烧状态的精准匹配。该设计可抑制负压波动导致的透气性恶化，同步优化烧结终点热状态，避免因人工调节滞后引发的过烧或欠烧现象，降低燃气消耗并提升烧结矿强度与成分稳定性。

6.2.2 焦炉煤气流量检测装置自清扫功能是通过内置反吹结构或机械刮扫机构，周期性清除测量管路内积聚的焦油及杂质。该设计可避免焦油冷凝黏附导致的测量误差或堵塞故障，维

持流量信号稳定性，确保燃气配比调节精度。自清扫功能与耐腐蚀材质结合，可以延长检测装置使用寿命，减少人工清理频次，保障燃气系统安全连续运行。

6.2.3 热电阻适用于中低温环境的高精度检测，热电偶则适配高温工况。套管材质需综合考虑耐腐蚀性、耐温性及机械强度，确保长期稳定接触介质。套管与仪表间通过优化热传导设计提升响应效率，整体结构兼顾测量精度、设备可靠性及工况适应性，满足工业检测的通用性要求。

6.2.4 设计通过传感器选型与材质优化，保障压力检测精度及长期稳定性，避免介质侵蚀导致的测量失真或设备损坏，满足工业过程控制可靠性需求。此部分工艺流程的介质一般均无腐蚀性，介质接触部分的材质一般选用不锈钢即可。

6.2.5 设计的基本原则如下:测量导电液体介质优先考虑电磁流量计，测量低压蒸汽、清洁气体、普通空气时，采用一体化节流装置；测量小管径的洁净气体或液体时，采用金属管转子流量计。

6.2.6 仪表信号电缆选用屏蔽型计算机电缆，可以有效抑制电磁干扰确保信号传输稳定。

6.2.7 电缆敷设采用保护钢管与热镀锌桥架结合方式，分层铺设动力电缆、仪表及通讯电缆以避免相互干扰。高温与危险区域敷设的电缆需适配环境特性，选用耐高温或防爆防火型电缆，并强化防护措施阻断外部损害。设计通过屏蔽结构、物理隔离及材质适配，保障信号完整性、设备安全性及系统抗风险能力。

6.2.8 本条款建议采用机器视觉识别系统对点火料面进行全域实时分析，通过图像处理技术动态识别燃烧状态、温度分布及料层均匀性，并将分析数据反馈至 PLC 控制系统。系统根据检测结果精准调节各分区烧嘴阀门开度，实现燃气供给与料面燃烧需求的动态匹配，消除局部过烧或欠烧现象。该技术通过智能闭环控制提升点火均匀性，减少燃气浪费，同步优化烧结矿表层结构稳定性与矿物结晶质量，符合高效低碳的工艺升级目标。

6.2.9 本条款建议采用机器视觉系统对机尾断面进行全域实时分析，通过图像识别技术动态监测料层厚度、颗粒分布及孔隙结构，并将分析数据反馈至 PLC 控制系统。系统依据检测结果精准调节布料辅门各分区阀门开度，优化布料密度与粒度分布，消除局部过密或松散现象。该设计通过闭环控制实现料层透气性均匀化，减少气流分布不均导致的烧结效率波动，同步提升烧结矿成品率与能源利用率，符合工艺精细化控制与绿色生产要求。

6.2.10 本条款规定现场设置环境有毒气体及可燃气体浓度检测装置，能现场声光报警，确保人员安全。同时把检测值远传至控制系统 PLC，根据检测值，连锁管道上执行器，从源头

切断有毒、可燃气体的输入。

6.2.11 本条款建议在现场喷吹罩体分段设置高速摄像机，对料面的着火情况进行观察。高速摄像机通过图像识别技术，判断料面是否起火，从而连锁可燃气体的执行器，对可燃气体的供给进行控制，保证料面的非着火正常状态。

6.2.12 本条款规定全厂工艺设备由中央控制室操作站集中监控，操作员以键盘或鼠标远程操作方式在画面对全厂主工艺系统设备进行操作、监视、控制及管理。主控室控制站与远程站点通过工业以太网网络互联，实时交互指令与状态信息，并预留与上级 L2、L3 系统的通讯接口，实现全系统协同控制。该设计确保生产指令高效传递与设备运行精准同步，兼顾集中管理效率与操作灵活性，保障工艺系统稳定运行及应急响应能力，符合自动化控制与安全管理要求。