

ICS XXXXXX
CCS X XXX

团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

高炉绿色低碳冶炼关键技术规范

Technical specification for key technologies of green and low-carbon

blast furnace Ironmaking

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 标准术语和定义 2

4 原理与流程 2

 4.1 技术原理 2

 4.2 工艺流程 3

5 喷吹介质要求及安全性 3

6 原料燃料技术要求 3

7 煤气喷吹技术要求 4

8 煤气除尘技术要求 4

9 煤气净化系统技术要求 4

10 煤气调压系统技术要求 4

11 煤气脱碳提质系统技术要求 5

12 煤气加热系统技术要求 5

13 煤气安全喷吹系统技术要求 6

14 多介质喷吹智能调控系统技术要求 7

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

高炉绿色低碳冶炼关键技术规范

1 范围

本文件规定了高炉绿色低碳冶炼关键技术的原理与流程、喷吹介质要求及安全性、原料燃料技术要求、煤气喷吹技术要求、煤气除尘技术要求、煤气净化技术要求、煤气调压技术要求、富CO煤气脱碳技术要求、煤气加热技术要求、混合煤气安全喷吹技术要求、多介质喷吹智能调控技术要求等。

本文件适用于新建、改建和扩建的以H₂-CO耦合喷吹为核心的绿色低碳高炉炼铁技术，包括高炉富氢煤气喷吹（如焦炉煤气、天然气、煤层气、页岩气、石化富氢废气），高炉富CO煤气喷吹、高炉碳氢耦合煤气喷吹等工艺。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GBZ 1 工业企业设计卫生标准
- GBZ/T 189.8 工作场所物理因素测量 第8部分：噪声
- GBZ 230 职业性接触毒物危害程度分级
- GB/T 3634.1 氢气 第一部分 工业氢
- GB 3836.1 爆炸性环境第 1 部分：设备通用要求
- GB 4962 氢气使用安全技术规程
- GB 6222 工业企业煤气安全规程
- GB 12014 防护服装防静电服
- GB 12358 作业场所环境气体检测报警仪通用技术要求
- GB 16808 可燃气体报警控制器
- GB 16912 深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程
- GB 18218 危险化学品重大危险源辨识
- GB/T 29729 氢系统安全的基本要求
- GB/T 33969 高炉富氧喷煤技术规范
- GB 39800 个体防护装备配备规范
- GB/T 47039 氢冶金 高炉冶炼富氢系统技术要求
- GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范
- GB/T 50087 工业企业噪声控制设计规范
- GB 50414 钢铁冶金企业设计防火标准
- GB 50427 高炉炼铁工程设计规范
- GB/T 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计
- GB 50603 钢铁企业总图运输设计规范
- GB 50974 消防给水及消火栓系统技术规范
- GB 51128 钢铁企业煤气存储和输配系统设计规范
- GB 55037 建筑消防通用规范
- AQ 2002 炼铁安全规程
- AQ 2048 煤气隔断装置安全技术规范
- AQ 7012 煤气排水器安全技术规程
- TSG ZF001 安全阀安全技术监察规程

3 标准术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

富H₂气体 hydrogen-rich gas

一种富含H₂或CH₄等还原性成分较高的单种或多种混合的煤气，如氢气、焦炉煤气、天然气、煤层气、页岩气、石化废气等。

3.2

富CO气体 CO-rich gas

一种富含CO等还原性成分较高的单种或多种混合的煤气，如转炉煤气、高炉煤气等。

3.3

H₂-CO 耦合喷吹 hydrocarbon-coupled injection

以富H₂气体和富CO气体作为高炉的喷吹介质，经过煤气除尘系统、净化系统、调压系统，脱碳系统、加热系统和喷吹系统处理后按一定喷吹比例混合喷入高炉，实现煤气高效置换固体燃料，降低高炉固体碳素燃料消耗的工艺。

3.4

煤气净化系统 gas purification system

将粗煤气、半净化煤气进行净化处理，使其质量满足高炉工艺喷吹要求的系统，如煤气除尘、脱硫、脱焦油以及脱萘等。

3.5

煤气调压系统 gas pressure regulation system

设置在煤气净化系统后的对煤气进行升压、降压、稳压控制，保证煤气压力满足高炉喷吹工艺要求的相关设施的统称。

3.6

煤气脱碳提质系统 gas decarburization system

设置在煤气调压系统后的将煤气中的CO₂进行分离并脱除，满足高炉喷吹工艺要求的设施统称。

3.7

煤气加热系统 gas heating system

设置在煤气净化、调压、脱碳提质系统后的将调压、脱碳后的煤气进行加热升温，满足高炉工艺喷吹温度要求的设施统称。

3.8

煤气安全喷吹系统 mixed gas safety injection system

设置在高炉风口前端，将处理后的富H₂、富CO煤气安全喷入高炉的装置及设施的统称。

3.9

多介质喷吹智能调控系统 multi-media injection intelligent regulation system

将混合煤气经煤气安全喷吹系统喷吹入高炉后，通过大数据平台实现对高炉冶炼操作过程产生的数据的集中管理，并基于智能调控模型实现对高炉冶炼操作进行优化调控的系统。

3.10

置换比 replacement ratio

喷吹1 Nm³煤气所置换的高炉固体燃料量，kg/Nm³。

4 原理与流程

4.1 技术原理

基于 H_2 -CO耦合喷吹的绿色低碳高炉炼铁技术将富 H_2 气体和经脱碳提质处理的富CO煤气按一定比例混合后形成的碳氢混合煤气，经煤气喷吹系统喷吹进入高炉，充分利用煤气的化学还原作用，促进铁矿石还原，替代部分由焦炭和煤粉充当还原剂和燃料的功能，进而减少高炉固体碳素燃料消耗，从源头上减少碳排放。

4.2 工艺流程

碳氢高炉技术流程图见图1。以富 H_2 气体和富CO气体作为高炉的喷吹介质，其中富 H_2 气体经净化、调压处理，与经净化、调压及脱碳提质的富CO气体在混合站按一定喷吹比例混合，再经煤气加热系统升温后，通过煤气喷吹系统喷入高炉。

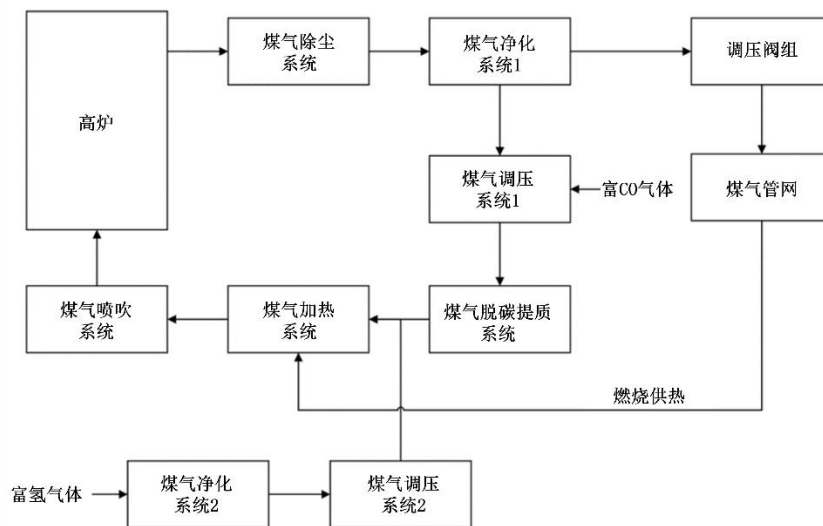


图1 碳氢高炉流程图

5 喷吹介质要求及安全性

- 5.1 高炉绿色低碳冶炼关键技术用煤气种类包括：富 H_2 气体、富CO气体以及碳氢混合煤气。
- 5.2 工业煤气相关危险因素识别及风险控制应按照GB 6222执行。
- 5.3 喷吹所用工业氢气的技术指标按照GB/T 3634.1执行。
- 5.4 氢气相关危险因素辨识及风险控制应按照GB/T 29729执行。
- 5.5 富CO煤气经脱碳提质系统脱碳后的煤气为无色、无味、有毒、密度轻、易燃易爆，应根据脱碳煤气的特点从计划、设计、过程、操作方面必须加强安全学习和管理。
- 5.6 喷吹焦炉煤气，应对 H_2S 、萘、焦油等杂质含量进行控制，对于洁净度不够的应采用净化措施。
- 5.7 绿色低碳冶炼高炉应配套提高富氧能力。
- 5.8 吹扫及保安用气宜采用氮气或氩气，其含氧量要求应参照GB/T3864、GB/T16945执行。

6 原料燃料技术要求

- 6.1 高炉原料燃料的技术指标按照GB 50427（高炉炼铁工程设计规范）执行。
- 6.2 入炉焦炭应采用反应性和反应后强度适宜的焦炭，其中，焦炭反应性指数（CRI）宜 $\leq 30\%$ ，焦炭反应后强度（CSR）宜 $\geq 63\%$ 。
- 6.3 入炉原料宜以烧结矿和球团矿为主，有条件的高炉宜提高球团矿比例，球团矿指标参照GB/T 27692执行。
- 6.4 高炉喷吹用煤，宜采用中-高挥发分煤粉。

6.5 高炉喷吹用煤要求参照GB/T18512的有关规定执行。

7 煤气喷吹技术要求

7.1 H_2 与CO耦合喷吹，喷吹煤气量宜控制在30-80Nm³/t，混合后的煤气中 H_2 /CO宜控制在20:80-60:40之间。

7.2 富 H_2 气体与经脱碳提质的富CO气体混合后，CO₂含量宜≤5%，N₂含量宜≤30%。

7.3 高炉富氧率应根据理论燃烧温度合理控制，宜控制在5%-10%的范围内，其富氧率的计算方法应符合GB/T 33969、GB/T 3863的规定。

7.4 理论燃烧温度应控制在2150℃-2350℃，其计算需参考混合煤气组分，理论燃烧温度按公式（1）计算：

$$T=1559+0.79*T_{\text{风}}+4972*\frac{V_{\text{氧}}}{60*V_{\text{风}}}-3250*\frac{1000*m_{\text{煤}}}{60*V_{\text{风}}}-6.033*m_{H_2O}-14.5*\frac{100*V_{H_2}}{60*V_{\text{风}}}-\left[10.843*\frac{V_{CO}}{V_{\text{风}}}-0.1074*\left(\frac{V_{CO}}{V_{\text{风}}}\right)^2\right] \dots (1)$$

式中：

$T_{\text{风}}$ ——鼓风温度，单位为摄氏度（℃）；

$V_{\text{风}}$ ——鼓风量，单位为立方米每分钟（Nm³/min）；

$V_{\text{氧}}$ ——鼓风中的O₂流量，单位为立方米每小时（Nm³/h）；

V_{H_2} ——富 H_2 气体的流量，单位为立方米每小时（Nm³/h）；

V_{CO} ——富CO气体的流量，单位为立方米每小时（Nm³/h）；

$m_{\text{煤}}$ ——喷煤量，单位为吨每小时（t/h）。

7.5 H_2 -CO耦合喷吹置换比宜按0.35 kg/Nm³-0.6 kg/Nm³进行控制。

7.6 H_2 -CO耦合喷吹宜采用风口喷吹方式。

7.7 高炉炉顶煤气温度宜≥120℃。

7.8 喷吹煤气压力宜控制在送风压力+（0.05-0.5 MPa），具体应根据高炉炉内实际压力进行调控。

8 煤气除尘技术要求

8.1 高炉炉顶煤气温度宜≤100℃。

8.2 粗煤气除尘器的出口煤气含尘量宜≤10g/Nm³。

8.3 净煤气含尘量宜≤5mg/Nm³。

8.4 若煤气脱碳提质系统采用湿法工艺，净煤气含尘量宜≤2mg/Nm³。

9 煤气净化系统技术要求

9.1 煤气净化、输配、储存和使用设施的设计、管理、运行、操作、检修、维护和应急等安全案例和技术要求应符合GB 6222、GB 51128等规范要求。

9.2 高炉喷吹富 H_2 气体，应根据其杂质含量，设置相应的煤气净化装置，净化后煤气中杂质含量应满足以下要求： H_2S ≤20mg/Nm³，萘≤50mg/Nm³，焦油物≤20mg/Nm³。

9.3 应根据煤气操作工况选择除尘系统型式。如选用湿法除尘，应配置水处理设施，达到环保排放要求。

9.4 煤气净化系统宜露天或半露天布置，避免煤气集聚。

9.5 煤气净化系统处理能力应具有一定冗余量。

10 煤气调压系统技术要求

- 10.1 煤气调压系统应布置在宽敞区域，且设备间应通风良好，调压设备厂房宜优先采用半敞开式结构，气候条件较差的地区可采用封闭式结构，应按照GB 6222、GB 3836.1和GB 55037执行。
- 10.2 煤气调压系统的噪音值应控制在97 dB(A)以内，工作场所噪声等效声级参考接触限值按照GBZ/T 189.8附录B日接触时间0.5 h执行，其他系统应按照GB/T 50087执行。
- 10.3 煤气调压系统应设置气液分离设施，气液分离设施大小应根据煤气流量和压力大小确定，设施内气体流速宜 $\leq 1.0\text{m/s}$ 。
- 10.4 高炉应根据喷吹煤气介质种类、流量、杂质及高炉使用介质压力要求，综合选择调压设施类型，按照GB51128要求执行。
- 10.5 进入调压系统的煤气，主机前端宜设置过滤设施。
- 10.6 煤气调压系统，应根据高炉喷吹煤气介质种类及流量要求，设置循环回流旁路调节设施，用于调节气量和保证机组处于正常流量工况运行范围之内。
- 10.7 煤气调压系统应采用软水冷却，调压设备主机出口排气温度应 $\leq 85^{\circ}\text{C}$ 。
- 10.8 煤气调压系统周围应设置防爆手动报警按钮和防爆声光报警装置，且宜设置在气液分离装置和压缩机区域。
- 10.9 煤气调压系统电动阀门等设备的控制箱应与PLC分别单独控制，当PLC出现故障时，可就地控制箱控制。
- 10.10 煤气调压系统应在关键设备和阀门管路上设置温度、压力和流量检测，并进行安全联锁。

11 煤气脱碳提质系统技术要求

- 11.1 煤气脱碳提质系统，应根据煤气介质种类、煤气成分、杂质含量、厂区占地、全厂蒸汽情况及解吸气利用方式等综合因素选择适合的煤气脱碳工艺。
- 11.2 煤气脱碳提质过程的毒性气体为CO，按GBZ230执行。
- 11.3 煤气脱碳提质系统为满足高炉低碳冶炼需要，CO回收率宜 $\geq 90\%$ 。
- 11.4 煤气脱碳提质系统压力损失宜 $\leq 50\text{ kPa}$ 。
- 11.5 煤气脱碳提质系统应考虑煤气成分和压力波动对脱碳效果的影响，应设置一定冗余量；装置操作弹性区间30%~110%。
- 11.6 若解吸气无明确的利用方式，且厂内蒸汽资源不足，则应优先选择干法脱碳，解吸气不可直接对空排放。
- 11.7 若解吸气有高纯利用方式，且厂内有十分廉价蒸汽资源，则应优先选择湿法脱碳。
- 11.8 为保障脱碳高炉技术的稳定运行，煤气脱碳系统设备宜设置备用设备。
- 11.9 煤气脱碳提质系统宜采用PLC控制系统与计算机操作界面相结合，集中显示、控制和现场检测为辅。
- 11.10 煤气脱碳提质系统应在关键设备和阀门管路上设置温度、压力、成分和流量检测，并进行安全联锁。
- 11.11 为保障脱碳提质系统的稳定高效运行，宜设计压力自动调节回路、手动操作优化回路、流量计量控制系统和煤气成分在线分析调控回路等。
- 11.12 煤气脱碳提质系统应对关键设备、仪器和控制阀门进行报警及联锁控制。

12 煤气加热系统技术要求

- 12.1 煤气加热方式包括蓄热式加热、列管式加热、等离子加热，可根据厂区绿电供应情况、煤气富余情况、总图情况等选择合适加热方式，宜设置备用装置。
- 12.2 若煤气加热温度 $\geq 900^{\circ}\text{C}$ ，宜采用蓄热式加热装置；若煤气加热温度 $\geq 1300^{\circ}\text{C}$ ，宜采用等离子加热装置。
- 12.3 煤气加热系统应考虑防析碳设计；宜采用氧化、高温蒸汽冲洗等方式消除碳沉积物。

- 12.4 蓄热式煤气加热装置，蓄热体耐材宜采用低铁耐火材料，在高温区宜采用抗氢蚀耐火材料。
- 12.5 煤气加热炉炉壳或炉壳保温层外表面壳体温度宜 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ 。
- 12.6 加热后的高温煤气管道温度宜 $\leq 120^{\circ}\text{C}$ 。
- 12.7 煤气加热系统宜设置整体旁路系统，当采用旁路系统时，应与煤气加热主系统可靠切断。
- 12.8 煤气加热系统应设置配套放散及吹扫装置，保证生产、检修时煤气置换达到相应要求。系统保安煤气介质宜采用氮气。
- 12.9 煤气加热系统应在关键设备和阀门管路上相应设置温度、压力、成分、湿度和流量检测，并进行安全联锁。

13 煤气安全喷吹系统技术要求

13.1 煤气安全喷吹系统应符合下列要求：

- 煤气安全喷吹系统应设有保安用气，可使用氮气、氩气等惰性气体，氧气含量应小于0.5%（体积分数）。
- 保安用气气源压力应高于高炉热风/煤气总管气流压力，一般应在0.8-1.8 MPa，设计应采取措施保障保安过程中气流压力始终高于热风/煤气压力。
- 喷吹富氢、混合煤气时，煤气安全喷吹系统应设有蒸汽吹扫设施。
- 喷吹富氢、混合煤气时，煤气安全喷吹系统煤气管段宜设置蒸汽伴热。
- 煤气安全喷吹系统应设计防回火设施。
- 煤气安全喷吹系统应在关键管道上设置温度、压力、流量检测，具备远传功能，并进行安全联锁。
- 关键的联锁参数宜设置两个及其以上的参数取样点，防止检测设备损坏影响喷吹安全。
- 喷吹系统应设有流量调节功能，保证混合煤气成分比例可调。
- 喷吹系统宜设置成分分析仪，可实时在线分析混合煤气成分。
- 喷吹系统管道应防止煤气泄露，连接形式宜采用法兰连接形式。

13.2 煤气安全喷吹系统安全防护措施应符合下列规范要求：

- 吹扫和置换煤气管道内部的煤气，应用蒸汽、氮气或烟气为置换介质。吹扫或引气过程中，不应在煤气设施上栓、拉电焊线，煤气设施周围40 m内严禁火源；
- 送煤气后，应检查所有连接部位和隔断装置是否泄漏煤气；
- 煤气专用喷枪或风口内煤气管道应采用抗高温氧化材质；
- 高炉风口窥视孔区域宜安装风口在线风温检测及成像设备，实时监测风口状态，防止风口小套及大套烧穿漏水等事故。

13.3 混合煤气在风口前端出口流速应大于煤气回火速度的1.15-1.5倍。回火速度应符合GB/T 47039规定，即公式（2）计算：

$$V = (\sum V_i X_i / C_i) / (\sum X_i / C_i) \left(1 + \frac{t}{273}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式（2）中：

V—混合燃气回火速度（m/s）；

V_i —单一燃气的最大法向火焰传播速度（m/s）；

X_i —无惰性气体时某单一燃气的体积分数（%）；

C_i —该燃气最大传播速度下的体积分数（%）；

t—大温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

若混合燃气中含有惰性气体 N_2 和 CO_2 ，回火速度应修正为：

$$V' = V(1.0 - 0.01Y_{\text{N}_2} - 0.012Y_{\text{CO}_2}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式（3）中：

V' —修正的混合燃气回火速度 (m/s)；

Y_{N_2} — N_2 的体积分数 (%)；

Y_{CO_2} — CO_2 的体积分数 (%)。

13.4 混合煤气喷吹压力应根据混合气体比例、喷枪数量以及高炉热风压力进行综合确认，一般要求喷吹压力宜高于热风压力0.1 MPa以上。

14 多介质喷吹智能调控系统技术要求

14.1 高炉煤气期间，宜搭建大数据平台用于采集、储存喷吹操作期间原燃料成分及性能指标、工艺各系统参数、高炉操作制度（配料、送风、炉渣等）及技术与经济指标等。

14.2 大数据平台上宜配置智能调控系统，实现对煤气安全喷吹系统与煤气调压系统、煤气脱碳提质系统、煤气净化系统、煤气加热系统等在同一数据平台的智能优化调控。

14.3 智能调控系统应设置压力报警、煤气回火报警、调压系统与脱碳系统故障报警、其他突发事件报警功能模块，出现报警反馈信号时应应在中控室操作界面明显位置显示。操作界面一旦出现下列情况之一，采用煤气输送管路气体的喷吹管路应停止喷吹并排空管路中的煤气，改为氮气输送：

- a) 煤气调压系统输出煤气压力低于煤气安全喷吹系统的煤气喷吹压力，存在压力报警时；
- b) 检测到煤气安全喷吹系统有煤气回火报警及煤气泄露报警时；
- c) 调压系统与脱碳系统出现故障报警时；
- d) 高炉进入维修状态需要停止喷吹煤气时。

14.4 智能调控系统宜设置原燃料质量跟踪与评价模块，实时分析入炉炉料质量以及对冶炼状态的影响，给予操作工长操作建议。

14.5 智能调控系统宜包含高炉能质平衡模型，实时预测煤气喷吹对高炉操作的影响，能质平衡模型准确率宜高于95%。

14.6 喷吹期间，智能调控系统应实时追踪炉顶温度、炉顶煤气量、压差、热负荷、冷却壁温度分布、铁水温度、铁水Si含量等特征参数，宜采用智能模型实时预测炉温、煤气流分布等状态，实施反馈调节。