

团 体 标 准

T/HBJN 0003—2022

蓄热式加热炉换向残留煤气
反吹扫系统技术规范

Technical specification for residual coal gas reflux system of
regenerative reheating furnace

2022-07-19 发布

2022-09-19 实施

河北省节能协会 发布

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。

本文件按照 GB/T 1.1—2020 给出的规则起草。

本文件由河北省节能协会提出并归口。

本文件涉及的专利(ZL201710474893.7; ZL201710474889.0; ZL201720728765.6; ZL202120099937.4)将进行公平、合理、无歧视收费。

本文件主要起草单位：华北理工大学、冶金工业经济发展研究中心、河北省金属学会、新兴铸管股份有限公司、首钢京唐钢铁联合有限责任公司、河北安丰钢铁有限公司、河北文丰钢铁有限公司、敬业集团有限公司、辛集市澳森钢铁集团有限公司、河北普阳钢铁有限公司、河北东海特钢集团有限公司、河北纵横集团丰南钢铁有限公司、沧州中铁装备制造材料有限公司、河北津西钢铁集团股份有限公司、迁安市九江线材有限责任公司、唐山市玉田金州实业有限公司、唐山东海钢铁集团有限公司、秦皇岛宏兴钢铁有限公司、河北永洋特钢集团有限公司、河北新金钢铁有限公司、德龙钢铁有限公司、河北鑫达钢铁集团有限公司、唐山松汀钢铁有限公司。

本文件参与起草单位：北京中冶蓝天科技有限公司、中普邯郸钢铁有限公司、烘焙钢铁有限公司、秦皇岛佰工钢铁有限公司、昌黎县兴国精密机件有限公司、唐山正丰钢铁有限公司、唐山东华钢铁企业集团有限公司、沧州临港三菱金属制品有限公司、唐山瑞丰钢铁（集团）有限公司、唐山国堂钢铁有限公司、唐山港陆钢铁有限公司、河北华西特种钢铁有限公司、河北太行钢铁集团有限公司、金鼎钢铁集团有限公司、邢台钢铁有限公司。

本文件主要起草人：刘超、史慧恩、李玉民、郭龙鑫、丁玉欣、刘义、张晓辉、王子兵、王波、李焕峰、陈江涛、吴立云、阮如金、刘文波、林响、贾俊龙、陈平刚、马翠晋、史国宪、张青、李军召、何红明、于利峰、胡显林、王杰文、马友林、关庆显、薛伟、曹文礼、李磊、王兰、吴建立、何亚冲、马露、王大勇、张云松。

本文件参与起草人：张玉柱、邢宏伟、赵楠、王朋、李霞、胡振云、张国东、侯林泽、石跃强、郑磊、聂少锋、吉伟、刘权利、王凯、赵小宇、闫福昭、刘金英、黄贺斌、赵玉东、杜辉、张昆、杨建强。

蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫系统技术规范

1 范围

本文件规定了蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫系统技术规范。

本文件适用于钢铁行业采用低热值煤气（高炉煤气、转炉煤气）为主要燃料，并使用蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫系统。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

GB 38449—2019 蓄热式轧钢加热炉能效限定值及能效等级

GB/T 32972—2016 钢铁企业轧钢加热炉节能设计技术规范

GB/T 32489—2016 轧钢加热炉节能运行技术要求

YB/T 4466—2014 轧钢加热炉节能运行技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适应于本文件。

3.1

蓄热式加热炉 regenerative reheating furnace

一种利用蓄热体吸收烟气显热，然后利用吸热后蓄热体预热空气与煤气的加热炉。

3.2

残氧量 residual oxygen content

蓄热式加热炉燃料燃烧过程中，燃料与空气燃烧所产生烟气内剩余氧气的体积浓度值。

3.3

公共管道 public pipeline

蓄热式加热炉燃烧管路系统中，供煤气与烟气交替使用的管道。

3.4

换向装置 reversing arrangement

蓄热式加热炉用于控制燃烧进气状态与排烟排气状态交替切换的装置。

3.5

排烟温度 exhaust gas temperature

加热炉运行时，烟气于最末一级受热面出口处的平均温度。

3.6

反吹扫技术 reflux technology

蓄热式加热炉进气与排烟切换时，通过取一定量烟气将留存公共管道或装置内燃料吹扫至炉膛内，再开始进行排烟，减少 CO 的直接排放。

3.7

煤烟 soot

加热炉运行时，由煤气燃烧换向装置排出的烟气。

4 工艺路线

本文件的工艺路线如图 1 所示：利用一台反吹扫引风机，将燃烧过程产生的部分煤烟烟气抽出，煤烟烟气经过安全参数及工艺参数检测合格后，送入各燃烧段煤气换向装置下部共用管道入口，在煤气换向装置由燃烧状态切换至排烟状态过程的瞬间，将该煤气换向装置公用管道中的换向残留煤气吹进加热炉炉膛燃烧、燃尽，从而达到换向残留煤气减排的目的，既节约了大量优质煤气，又从根本上减少了有毒、有害气体 CO 对环境的污染。

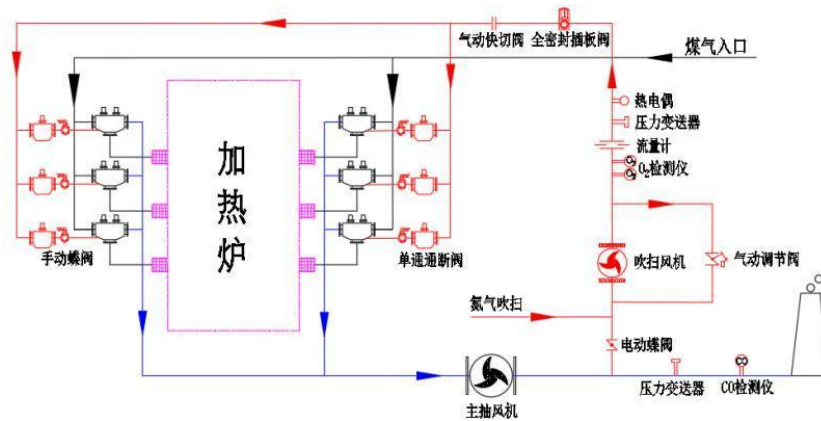


图 1 本文件方法工艺路线原理图

4.1 方法原理

本文件方法原理：采用相对 CO 而言的惰性气体作为吹扫介质气，将换向残留煤气由共用管道中吹扫进入加热炉炉膛进行燃烧、燃尽。

4.2 设备组成

本文件蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫管道设置氮气吹扫系统包含如下设备：

- 反吹介质加压设备：反吹风机；
- 检测仪表：氧气分析仪、一氧化碳分析仪、流量计、压力表、温度计；
- 阀门：两通或四通快速通断阀门、盲板阀、蝶阀、调节阀、快切阀；
- 电气控制系统；
- 蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫专用软件；
- 其他附件等。

5 设计要求

5.1 技术要求

- a) 吹扫时机：煤气换向装置由燃烧状态切换至排烟状态过程中，换向装置煤气阀板关闭后，将反吹风机加压后的合格煤烟烟气高速注入换向装置共用管道，将该煤气换向装置共用管道内的换向残留煤气反吹扫进入炉膛内燃烧、燃尽。在换向残留煤气吹扫进入炉膛过程中，继续向炉膛内供入空气，保证换向残留煤气进入炉膛燃烧所需的空气。换向残留煤气吹扫结束后，共用管道中的换向残留煤气被煤烟烟气置换完毕，此时，打开该煤气换向装置排烟阀板，使该煤气换向装置进入排烟状态；
- b) 吹扫动作控制方式：每个煤气换向装置的公共管道反吹扫动作均由一台独立的两通快速通断阀控制，吹扫期开始时两通快速通断阀打开，吹扫完毕两通快速通断阀关闭；
- c) 反吹烟气流量调节方式：在反吹风机进出口之间设置烟气流动旁路，烟气旁路上设置调节阀门，通过调节烟气旁路调节阀开度，增减旁路烟气流量，可以改变反吹扫过程实际用于共用管道反吹扫的气量，以适应不同换向装置对反吹扫气量的不同要求；
- d) 氮气吹扫系统：蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫管道设置氮气吹扫系统，消除反吹扫管道中有可能存在的煤气安全隐患。

5.2 吹扫介质要求

吹扫介质采用相对 CO 而言相对惰性的低氧煤烟烟气，用于吹扫介质气的煤烟烟气残氧浓度必须低于 CO 爆炸对应的氧浓度极限。

5.3 吹扫时间要求

吹扫时间设置过短，将导致加热炉炉温、炉压波动幅度加大，加热炉运行稳定性变差。吹扫时间设置过长，将导致加热炉炉温降低幅度加大，影响加热炉生产率，并导致钢坯氧化率升高。所以吹扫时间设置应该兼顾加热炉炉温、炉压波动幅度与加热炉生产率、钢坯氧化率等问题，既不能过短也不能过长。

5.4 吹扫风机参数要求

- a) 吹扫风机流量：须满足所有煤气换向装置均能实现换向残留煤气快速吹扫最短时间要求；
- b) 吹扫风机全压：须满足吹扫介质气克服吹扫管道阻力损失后，吹扫介质气炉膛入口处剩余压头与燃烧煤气初始压头相等的条件。

5.5 吹扫系统安全设置

- a) 反吹扫系统取气口处与炉区入口处设置安全切断阀组，确保反吹系统能够在必要时实现快速安全切入及切出，且反吹系统切出后不影响加热炉正常生产；
- b) 炉区入口安全切断阀组须采用包括快切阀组成的安全切断阀组；
- c) 反吹风机需采用防爆风机，阀门、仪表、电气元件需采用具有防爆性能的组件；
- d) 反吹扫系统在出现切出条件时需快速自动切出，反吹扫系统的投运恢复需人工确认恢复条件后人工恢复；
- e) 吹扫介质相对 CO 必须实时保证具有相对惰性，反吹风机出口位置设置吹扫介质气残氧浓度快速分析仪；
- f) 反吹扫系统管路须参考煤气管路安全要求，对所有接缝进行气密性试验，并设置氮气吹扫系统；
- g) 控制软件安全联锁条件设置：
 - 1) 吹扫介质气残氧浓度大于 8% 时，吹扫系统须快速切出；
 - 2) 加热炉主抽风机、反吹风机停电或故障时，吹扫系统须快速切出；

- 3) 吹扫介质残氧分析仪表故障或两通快速通断阀门故障时，吹扫系统须快速切出；
- 4) 为了防止煤气回流，吹扫介质压力低于 1.2 kPa时，吹扫系统须快速切出；
- 5) 为了避免炉膛爆燃，炉膛温度低于 800 ℃时，吹扫系统须快速切出。

5.6 反吹扫系统调节方式设置

- a) 采用煤烟 CO 浓度作为反馈参量，调节反吹介质气流量及吹扫时间；
- b) 反吹风机采用变频风机，采用变频调节方式粗调反吹介质工艺参数；
- c) 程序控制烟气旁路调节阀开度，烟气旁路调节阀动作与开度与各煤气换向装置反吹介质工艺参数要求智能协同匹配，实现反吹介质工艺参数的精确调节；
- d) 反吹系统管道直径需保证具有一定的缓冲气量容积，一般按比煤气换向装置煤气入口管道直径低一个等级选取；
- e) 为了实现换向残留煤气快速反吹，非反吹期须维持反吹系统具有一定的静压力，静压力一般不高于吹扫介质气压力峰值的 40%。

5.7 吹扫时序设置

- a) 吹扫时序必须与加热炉燃控时序合理融合：燃控程序将煤气换向装置煤气阀板关闭后，将加热炉燃烧控制权交给吹扫控制系统。吹扫控制系统打开两通快速通断阀对共用管道残留煤气进行吹扫，吹扫结束后，吹扫控制系统关闭两通快速通断阀，同时将加热炉燃烧控制权交还给加热炉燃控系统。加热炉燃控系统收回燃烧控制权，同时打开煤气换向装置排烟阀板；
- b) 吹扫过程必须与助燃空气供给过程科学协同：换向残留煤气进入量与助燃空气进入量，以及两者进入的时间段必须匹配，助燃空气既不能过量导致钢坯氧化加剧，也不能不足导致换向残留煤气不完全燃烧。

5.8 阀门、仪表选型

- a) 位于室内盲板阀采用全密闭式盲板阀；
- b) 为了降低一氧化碳分析仪及氧气分析仪的滞后性，采用原位激光分析原理的检测仪表；
- c) 为了延长两通快速通断阀使用寿命，密封结构采用受力与密封功能分置的长时效密封结构。

5.9 仪器、仪表安装位置要求

- a) 烟气取气位置应位于加热炉煤烟主抽风机前面或后面的煤烟管道上，优先选择煤烟主抽风机后位置；
- b) 分析仪安装在吹扫风机出口位置，应尽可能安装在距离反吹风机 3 米以上的直管段上；
- c) 一氧化碳分析仪安装位置，位于煤烟主抽风机后的煤烟主管道上；
- d) 热工参数检测仪表安装位置符合仪表厂家相关规定。

6 操作要求

6.1 生产设备要求

- a) 在生产设备处于正常运行状态下进行，燃烧控制残余氧含量 1%~4%；
- b) 换向装置应定期进行检查，原则上连续使用不超一年；
- c) 应每年进行换向装置的打压试漏，防止泄露；
- d) 燃料（指煤气）压力波动 ± 0.5 kPa/min 以内。

6.2 吹扫设备要求

- a) 对氧分析仪、一氧化碳分析仪每年进行标定，要求偏离值小于 1%；
- b) 所有设备、管道设置低点排水装置；
- c) 吹扫设备投用、停用按煤气设备、设施要求操作。

6.3 反吹系统投运

6.3.1 吹扫管道试漏

吹扫系统全部软硬件安装完毕，且单机调试完毕后，吹扫系统首次投入使用前，或检修后投用前，需对管道系统进行打压试漏，具体步骤如下：

- a) 吹扫管道安装完毕后，关闭取气端手动蝶阀，打开取气端阀门与两通阀门之间的所有阀门；
- b) 两通阀接通动力介质气源，并处于关闭状态；
- c) 确认打开风机进、出口阀门（如有），风机后气动快切、电动蝶阀；
- d) 打开放散管阀门，关闭取样管阀门；
- e) 接通取气端阀门后吹扫氮气金属软管，先打开吹扫管道侧氮气阀门，再缓慢打开氮气侧阀门，给吹扫管道充入氮气，调整氮气阀门与放散阀门进行升压至 5 kPa~15 kPa；
- f) 提前准备好肥皂水，对管路焊口、法兰进行逐一试漏，对泄漏位置进行补焊或紧固处理；
- g) 处理漏点时关闭氮气，重复进行检查直至漏点处理完毕。

6.3.2 氮气扫线

吹扫系统每次起机投运前，均需对吹扫管道进行氮气扫线，扫线步骤如下：

- a) 关闭两通阀、取气端手动蝶阀，打开吹扫管道泄压调节阀、气动快切阀、电动蝶阀；
- b) 打开各段放散阀；
- c) 打开风机进出口阀门（如有）；
- d) 接通取气端阀门后吹扫氮气金属软管，先打开吹扫管道侧氮气阀门，再缓慢打开氮气侧阀门，给吹扫管道充入氮气吹扫，吹扫压力不高于 10 kPa；
- e) 氮气扫线 30 min 后，在管路末端取样管检测 O₂ 含量，当 O₂ 含量小于 0.8% 时为两通阀前管段扫线合格；
- f) 检测末端 O₂ 含量合格后，逐一轮换切断煤气（烟气）三通换向阀后，打开两通换向阀进行逐一吹扫 2 min 以上，两通阀后管段扫线合格；
- g) 关闭所有两通阀，打开取气位置手动蝶阀，进行吹扫 5 min；
- h) 检查在线安装的 O₂ 分析仪，检测数值与现场测量数值同为小于 0.8% 时吹扫结束，若二者存在较大偏差，需确定原因后重新吹扫。

6.3.3 吹扫动作顺序调试

系统首次投运，氮气扫线前需进行各两通阀动作顺序调试，两通阀动作顺序调试：确认所有两通阀动作与三通阀动作协同顺序正常，两通阀动作时序调试步骤如下：

- a) 吹扫系统切至手动非投运状态；
- b) 打开取气端手动，以及风机后气动快切阀、以及相关阀门，关闭两通阀；
- c) 打开气动调节阀门；
- d) 切断吹扫氮气气源，保持放散端放散阀门满开；
- e) 确认气动设备气源处于接通状态；

- f) 启动吹扫风机；
- g) 逐渐关闭泄放回路调节阀或调整风机频率，将吹扫风机出口压力升至 5 kPa~9 kPa；
- h) 两通阀前手阀关闭状态下，依次将各两通阀设置为吹扫状态，核对每个两通阀开、闭时间是否符合吹扫动作顺序要求，对于开、闭顺序不符合要求的两通阀，判断是程序问题还是两通阀问题，及时进行解决；
- i) 两通阀单阀顺序合格后，将所有两通阀切至投运状态，观确认循环投运时，界面显示与实际吹扫动作是否正常、一致。

6.3.4 吹扫系统投入

系统投入前的准备工作完成后，进行吹扫系统投运操作，吹扫系统投运步骤如下：

- a) 吹扫系统扫线合格后，保持扫线放散系统阀门打开；
- b) 关闭取气端手动蝶阀，风机后气动快切、电动蝶阀打开，吹扫端两通阀自动，泄压调节阀门打开；
- c) 吹扫风机频率调为 10%，启动风机运转正常后打开取气端开关阀门，调整泄压调节阀直至管道压力达到 5 kPa~9 kPa；
- d) 如系统压力无法达到 5 kPa~9 kPa时，调节风机频率，每次调节 5%，直至吹扫系统压力达到要求；
- e) 吹扫系统压力调试正常后，检查在线 O₂ 分析仪示值，若 O₂ 浓度小于 6%，开始陆续投入吹扫两通阀，并观察系统压力变化；
- f) 如系统运行压力低于 5 kPa时，调节吹扫风机频率，直至风机满开；
- g) 所有两通阀正常投入后，进行正常吹扫运行。

6.3.5 吹扫参数调节

- a) 燃烧时序调整，为了维持风机运行稳定性及降低风机喘震，加热炉换向时序应尽可能保证吹扫动作具有较好的连续性，加热炉换向时序应做适当调整；
- b) 吹扫时间调节，吹扫时间根据排烟 CO 浓度进行调节，3 s~6 s（不计阀门动作延迟）时对生产的影响较小。首先默认吹扫时间 6 s，以 1 s为步长，依次成组（加热炉两侧对称一对为一组）增加吹扫时间，观察排烟 CO 浓度变化值，直至排烟 CO 浓度达降至规定范围。增加吹扫时间但排烟 CO 浓度变化不显著时，有可能该阀组存在较严重泄露，需进行密封结构检修；
- c) 压力调节，吹扫系统工作压力通过风机变频及旁路调节阀协同调节，在保证吹扫时间的前提下，实际吹扫压力以 6 kPa~8 kPa左右为宜，一般不应低于 3 kPa；
- d) 流量调节，吹扫介质流量根据排烟 CO 浓度及吹扫时间进行确定，吹扫介质流量、压力仅为参考量，用于故障判断。

6.4 反吹系统停运

- a) 切断所有两通阀，满开泄压调节阀；
- b) 接通反吹扫系统氮气吹扫金属软管管路，满开所有放散阀门；
- c) 打开吹扫氮气，关闭取气端电动蝶阀，并停吹扫风机，关闭取气电动蝶阀，保持管道压力不超 10 kPa，进行氮气吹扫 30 min；
- d) 对吹扫管道末端取样检测 CO 含量小于 24 ppm合格后，微开氮气保持管道微正压。

6.5 反吹系统应急处理

6.5.1 吹扫管道氧含量、CO 超标 ($O_2 \geq 8\%$, $CO \geq 10\%$)

- a) 系统应连锁切断所有两通阀（关闭状态），泄压调节阀自动切为满开状态，气动快切自动切断，系统形成自循环，并进行画面报警；
- b) 系统进行停用操作，按“吹扫系统停用”操作，查找原因并及时进行处理；
- c) 氧含量、CO 合格再次投入时，按“吹扫系统投入”操作；
- d) 如为加热炉燃烧控制造成氧含量超标，打开吹扫系统放散阀进行放散，直至氧含量小于 6% 后，重新投入两通阀；
- e) 如为 CO 超标，需查找原因，检查三通阀是否异常。直至 CO 含量降至 10% 以内时，重新进行投入。

6.5.2 两通换向阀故障

- a) 电磁阀故障。系统检测限位信号异常时，该两通阀切出，更换电磁阀恢复正常后，两通阀正常投入；
- b) 气缸故障。系统检测限位信号异常时，该两通阀切出，更换气缸恢复正常后，两通阀正常投入；
- c) 阀体内部阀板变形、脱落或密封损坏。关闭该两通阀。吹扫系统停用，待检修或生产间隙进行维修。维修时保持三通阀进气、排烟关闭，进行“吹扫系统停用”操作，吹扫合格后，停氮气进行检修处理。

6.5.3 煤气引风机故障停机

煤气引风机故障时，应连锁切断所有两通阀，关闭取气端电动蝶阀，并打开泄压调节阀，随后按照“吹扫系统停用”进行操作停用。

6.5.4 吹扫管道发生泄漏

- a) 吹扫管道发生泄漏时，按“吹扫系统停用”处理；
- b) 扫线合格后，对泄漏处进行焊接处理，处理完成后重新按“投入前吹扫系统氮气吹扫”、“吹扫系统投入”操作。

6.5.5 加热炉停电

- a) 加热炉停电后，吹扫风机无法运行，应连锁关闭吹扫管道上两通阀，手动关闭取气端电动蝶阀，打开泄压回路调节阀；
- b) 进行接通氮气进行管线吹扫，按“吹扫系统停用”处理；
- c) 待加热炉来电后按“投入前吹扫系统氮气扫线”、“吹扫系统投入”操作。

6.5.6 停动力介质氮气（压空）

- a) 动力介质氮气（压空）压力低于 0.3 MPa 时，系统报警；
- b) 两通阀设置动力介质压力不足 0.25 MPa 时，连锁两通阀关闭（长期处于关闭状态），泄压调节阀打开，并按照“吹扫系统停用”进行操作；
- c) 吹扫介质低压停用；
- d) 吹扫烟气压力低于 1000 Pa 以下时，系统报警，连锁关闭吹扫管道上两通阀、打开泄压调节阀，并按照“吹扫系统停用”进行操作。

6.6 动力介质

6.6.1 氮气

用量：~30 m³/h·座，气源工作压力：0.3 MPa~0.6 MPa。

6.6.2 压缩空气

用量：~10 m³/h·座，气源工作压力：0.3 MPa~0.6 MPa。

6.6.3 其它方面

- a) 吹扫时间对燃料燃烧周期的减少不超 5 s，并确保吹扫干净，影响产能不超 3%；
- b) 吹扫不能造成炉内氧含量增加，不增加加热工件的氧化速率；
- c) 吹扫不能造成加热炉炉压力增大，影响炉外设备使用。

6.7 排放要求

蓄热式加热炉正常工作条件下，煤烟排烟 CO 浓度平均值不超 3 000 ppm。

7 结果计算与表示

7.1 排烟一氧化碳平均浓度

排烟一氧化碳平均浓度：单位时间内，加热炉煤烟排烟中所含 CO 体积，与煤烟排烟总体积之比，其单位为 ppm。

排烟一氧化碳平均浓度按式（1）计算：

$$Q_s = N_{CO} / N \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- Q_s ——排烟一氧化碳平均浓度，ppm；
- N_{CO} ——单位时间内，加热炉煤烟排烟中所含 CO 体积；
- N ——单位时间内，加热炉煤烟排烟总体积。

7.2 对加热炉生产率的影响程度

反吹过程对加热炉生产率的影响程度，按一个换向周期反吹时间占满负荷状态供给燃料时间的比例进行表征。

反吹过程对加热炉生产率的影响程度式（2）计算：

$$S_y = (B_n - T) / 2B_n \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- S_y ——反吹过程对加热炉生产率的影响程度，%；
- B_n ——一个换向周期满负荷状态供给燃料时间，s；
- T ——一个换向周期反吹时间，s。

7.3 效果认定

原蓄热式加热炉系统换向装置密封完好、燃料在炉内内燃烧充分前提下，蓄热式加热炉换向残留煤气反吹扫系统正产投运期间，连续 6 天、每天 12 小时对煤烟排烟一氧化碳平均浓度进行测定，求取煤

烟排烟在全部测定时段内的一氧化碳平均浓度值。

认定排放浓度按式（3）计算：

$$P_f = (B_{11} + B_{12} + \dots + B_{112} + B_{21} + B_{22} + \dots + B_{612}) / 72 \quad \dots \dots \dots (3)$$

式中：

P_f ——认定排放浓度，ppm；

B_{11} ——吹扫投入后第一天第 1 h 测量浓度平均值，ppm；

B_{12} ——吹扫投入后第一天第 2 h 测量浓度平均值，ppm；

B_{112} ——吹扫投入后第一天第 12 h 测量浓度平均值，ppm；

B_{21} ——吹扫投入后第二天第 1 h 测量浓度平均值，ppm；

B_{612} ——吹扫投入后第六天第 12 h 测量浓度平均值，ppm。