

引用格式:盛晓明,刘守盎.有色冶金余热电站管道自动预热控制方案研究[J].有色设备,2025,39(6):68-74.

SHENG Xiaoming, LIU Shouang. Research on automatic preheating control scheme for pipelines in nonferrous metallurgical waste heat power plants[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 68-74.

# 有色冶金余热电站管道自动预热控制方案研究

盛晓明, 刘守盎

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 在有色冶金工业园区内,存在着大量的高温烟气。为防止大气污染,将高温烟气余热回收产生饱和蒸汽,送往汽轮发电站内进行余热利用。蒸汽在外送前对蒸汽管道的预热,称之为“暖管”。在汽轮机组启动前,需对汽机进汽阀至主汽门之间的管道进行预热。传统的管道预热方式为手动,由操作人员依靠经验手动操作阀门进行,工作量大且效率低,易出现误操作。为保证管道预热工序安全、有序的自动进行,本文提出一种管道自动预热的解决方案,在蒸汽管路中增设调节阀门、热电阻及压力变送器,通过厂区 DCS 控制系统采集数据并进行自动控制,以实现管道预热工序自动化。管道自动预热的实现,能够有效提高汽轮机组冷机启动的速率,减少人工操作,保护蒸汽管道免受热应力损伤。

**[关键词]** 汽轮发电站; 饱和蒸汽; 管道自动预热; 调节阀; DCS; 余热回收

**[中图分类号]** TF355 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)06-0068-07

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.009

## 0 引言

在有色冶金生产工艺流程中,会产生大量的高温烟气。尤其在窑炉工段中,产生的烟气所带走的热量在总热量中占比相当大,从而大幅降低了窑炉的热效率,增加了有色冶金生产中的能耗。此外,烟气中含有大量的粉尘以及一定量的有毒气体。若将烟气直接排放至大气中,不仅造成热量的浪费,还会污染周边空气并会影响人员健康。因此,应尽可能回收利用高温烟气,变废为宝<sup>[1-3]</sup>。

为高效节能地回收冶炼过程产生的高温烟气热量,通常在有色工业园区内建立余热锅炉房,通过吸收高温烟气的热量产出较高压力的饱和蒸汽,再将蒸汽送至余热发电站内做功产出电能。蒸汽在外送前对蒸汽管道的预热,称之为“暖管”。在汽轮机组启动前,需对汽轮机进汽阀至主汽门之间的管道进行预热。传统的预热方式为手动预热,由操作人员依靠经验手动操作阀门,工作量大且效率低,易出现误操作。为保障管道预热工序安全、有序的自动进

行,本文提出管道自动预热的解决方案:在蒸汽管路中增设调节阀门、热电阻及压力变送器,通过厂区 DCS 控制系统采集数据并自动控制,以实现管道预热工序自动化,为有色冶金工业园区电站汽轮机开工过程的“自动启停”创造条件。

## 1 余热回收工艺流程

国内有色工业园区内一般配备余热锅炉房及余热电站,以便于高温烟气的余热回收再利用。高温烟气与除盐除氧水在锅炉系统内发生热交换,除盐除氧水经高温烟气加热为较高压力的饱和蒸汽,蒸汽输送至余热电站内,经汽轮机内做功发电,做功后的低压蒸汽进入凝汽器中冷凝为凝结水,经凝结水泵送至除氧器,再经锅炉给水泵加压送回余热锅炉系统,形成闭合循环回路。图 1 为余热发电汽水系统流程图。

汽轮机组在冲转时要求有压力和温度皆合格的清洁蒸汽,汽机在冷机启动时,应对主蒸汽进汽管道(汽轮机进汽阀至主汽门之间的蒸汽管道)进行

[收稿日期] 2025-07-15

[第一作者] 盛晓明(1996—),男,河南濮阳人,工程师,大学本科,主要从事仪表自动化工程设计、咨询及管理工作。

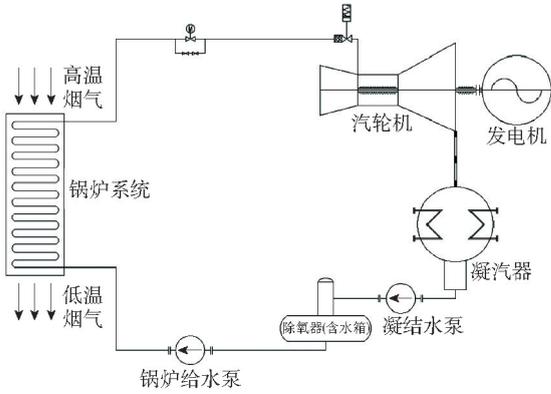


图1 余热发电汽水系统流程

Fig.1 Flow of waste heat power generation steam and water system

预热。

管道预热目的是使蒸汽管道及其回弯、阀门、法兰等部件缓慢地加热升温,使管道温度逐渐上升至接近蒸汽温度,为蒸汽外供做好准备。若不事先对管道进行预热就直接输送蒸汽,会使管道、回弯、阀门、法兰、支吊架等部件因升温不均匀而产生热应力受损,且高温蒸汽突然遇到低温管道会凝结成冷凝水,造成局部低压,高压蒸汽将携带冷凝水向低压区域冲击,发生“水锤”现象,可使管道变形、震坏、损坏保温层,严重时能使管道震裂。因此,蒸汽外送前须对管道进行预热<sup>[4-6]</sup>。

## 2 传统管道预热方式

按照汽轮机启动操作规程,通常管道需要预热至汽轮机主汽门前。由于主汽门存在漏气,即便处

于关闭状态,也会有少量蒸汽进入汽轮机内部,为防止汽轮机因主汽门漏汽而发生热应力损伤,需要连续且有序地进行后续的启机步骤。管道预热作为汽轮机冷机启动的首要步骤,管道预热开始,即汽轮机已开始冷机启动。因此,在管道预热前,汽轮机组应做好充足的启动准备。

在管道开始预热前,需要保证锅炉系统运行稳定,即锅炉系统可连续产出符合汽轮机冲转要求的蒸汽,蒸汽的温度、压力、流量均需满足汽轮机冲转的要求。在蒸汽管道安装焊接时,管道内部难免会积存焊渣等废料,因此,需要对蒸汽管道进行吹扫,在管道末端设置打靶检验,管道预热前需保证主蒸汽管道吹扫质量经打靶检验合格<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1 管道预热前准备

管道预热通常表示从汽轮机进汽阀至主汽门之间的管道。在管道预热开始前,蒸汽已送至汽轮机进汽阀门前。此时,应做以下准备工作。

1) 确定汽轮机进汽阀及其旁通阀处于“关过力矩”状态,防止因阀门漏汽使管道受到热应力损伤。

2) 打开防腐排汽阀,保证管道预热时蒸汽流通,使在管道预热过程中产生的冷凝水及时排出去,提高管道预热效率,避免“水锤”现象的发生。

3) 启动汽轮机盘车装置,汽轮机及发电机的大轴带动叶片低速转动。汽轮机主汽门为调节阀门,即便处于关闭状态也难免会存在漏汽现象,因此,汽轮机应开启连续盘车,以免汽轮机因主汽门漏汽而发生热应力损伤。

汽轮机主蒸汽管道仪表流程见图2。

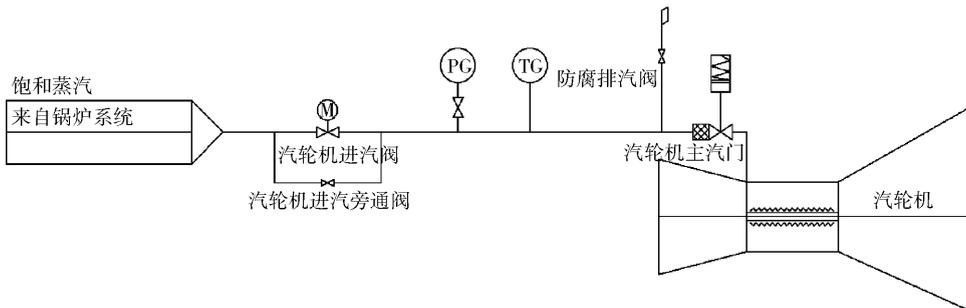


图2 汽轮机主蒸汽管道仪表流程

Fig.2 P&amp;ID of the turbine stream pipeline

### 2.2 传统管道预热步骤

蒸汽管道预热按照管道内介质温度可分为低压预热和升压预热2个阶段<sup>[9]</sup>。

1) 低压预热:将汽轮机进汽旁通阀门打开约5%开度位置,控制少量蒸汽进入待预热管道。通过手动控制汽轮机进汽旁通阀开度,管道升温速率按

照经验保持在 5 ~ 10 °C/min。高温蒸汽进入温度低的管道内,液化产生大量的冷凝水,冷凝水从防腐排汽阀排出管道,从而避免了管道内积水,防止出现“水锤”现象。

2) 升压预热:当管道内温度达到 120 ~ 130 °C 时,继续手动开大汽轮机进汽旁通阀,升温速率按照经验控制在 1 ~ 2 °C/min,使其达到汽轮机冲转规定的压力值及温度值。此时可开启汽轮机进汽阀,并关闭汽轮机进汽旁通阀。

随着管道预热的进行,管道内温度逐渐升高,冷凝水量逐渐减少,此时应逐渐关小防腐排汽阀。当管道内没有冷凝水排出时,应关闭防腐排汽阀,以提高管道预热效率。管道预热时,应保证盘车装置的连续运行,并时刻注意汽缸内的温度变化。

目前,汽轮发电站主蒸汽管道预热普遍采用现场操作人员根据温度、压力现场就地指示参数实时手动调节主蒸汽进汽旁通手阀开度的方法。该操作方式对操作人员技术水平和操作经验要求较高,且工作量大、效率低、效果不理想,若温度及压力上升太快,还会对管道造成热应力损伤。

### 3 管道自动预热控制方案

针对目前管道预热中存在的问题,结合实际操作经验,设计管道自动预热控制方案,以减少人工操作,提高电站自动化集成度,有效控制升温/升压速率,保护管道免受热应力损伤。

有色行业的余热电站由汽轮机进汽阀至主汽门之间的蒸汽管道较短(一般不超过 20 m),易于实现管道自动预热。

#### 3.1 硬件设计

为实现蒸汽管道自动预热控制,首先应在蒸汽管路上增加远传压力、温度测点(根据介质流向,压力测点在前,温度测点在后)。为提高管道预热效率,测点位置应尽可能地靠近主汽门。有色冶金余热锅炉产生的蒸汽一般为 250 °C、4.0 MPa 左右的饱和蒸汽,结合工况,一般选用智能型压力变送器及 Pt100 铂热电阻。

为满足管道自动预热需求,将蒸汽路上的阀门作出相应调整:汽机进汽阀设置为电动开关阀,其旁通阀设置为气动调节阀;疏水排汽管路的防腐排汽阀设置为电动开关阀,且其位置要介于温度测点与主汽门之间。为便于观察阀门开度,电动开关阀门均带开度指示。

由于调节阀安装在汽轮机进汽旁通管路上,在管道预热初始阶段,调节阀前为具有较高压力的饱和蒸汽,调节阀后为压力约等于 0 的汽水混合物。因此阀门前后压差很大(约 4.0 MPa),推荐采用高压差、高精度调节的 GLOBE 气动调节阀。按照以往设计经验,对调节阀的大致规格选型,阀门规格见表 1<sup>[10-12]</sup>。

硬件升级后的汽轮机主蒸汽管道仪表流程图见图 3。

表 1 调节阀门设计选型  
Table 1 Design and selection of regulating valves

型式	阀座数量	阀芯型式	填料材质	流量特性	泄漏等级	阀体材质	阀芯材质	阀座材质	阀杆材质
Globe	1	不平衡式	石墨	等百分比	V	WC9	S316 SST	S316 SST	S20910 SST

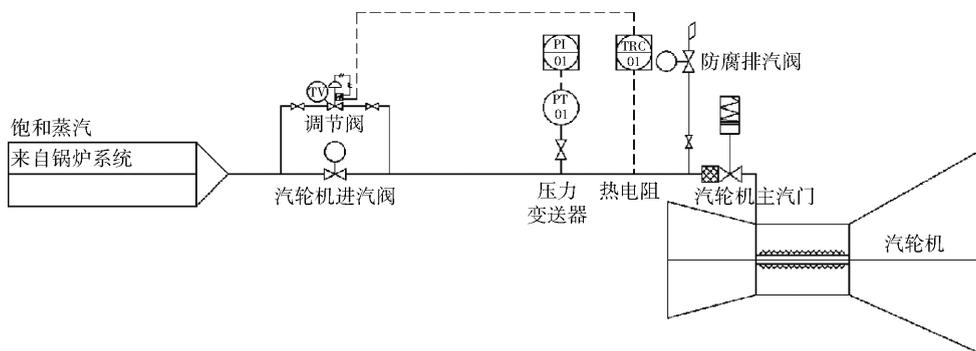


图 3 汽轮机主蒸汽管道仪表流程

Fig. 3 P&ID of the turbine steam pipeline

### 3.2 技术方案

汽轮机进汽阀前的蒸汽为饱和蒸汽,当旁通阀打开时,阀后的介质是变化的,刚开始饱和蒸汽进入管道会凝结为冷凝水,此时介质为携带冷凝水的饱和蒸汽;随着管道预热的进行,冷凝水不断外排,当达到一定温度时,不再产生冷凝水,管道内的介质只有饱和蒸汽。

饱和蒸汽的压力和温度一一对应。在管道预热自动控制中,可选择控制压升速率,也可选择温升速率。由于压力值在管道预热过程中波动较大且易于发生跳变,故而选择将温升速率作为调节阀的设定值来调节。

### 3.3 步序设计

该技术方案管道自动预热步序如下。

#### 1) 启动准备:

汽轮机主蒸汽管道已完成吹管,且吹扫质量经打靶检验合格;蒸汽已送至汽轮机进汽阀前,蒸汽温度值、压力值均满足汽轮机冷机启动条件。

#### 2) 启动条件:

① 汽轮机进汽电动阀、旁通调节阀、防腐排汽电动阀处于关闭状态;

② 汽轮机主汽门处于关闭状态,盘车装置正在运行;

③ 汽轮机进汽阀旁路手阀打开,疏水排汽管路手阀打开。

#### 3) 启动程序:

① 5 s 后开启疏水排汽管路的防腐排汽电动阀(开度 100%);

② 5 s 后开始低压预热,调节阀远程手动开至 5% 开度位置,管道升温速率保持在 5 ~ 10 °C/min,升温至 120 ~ 130 °C;

③ 5 s 后开始升压预热,调节阀投自动,通过调节进汽量,从而控制管道自动预热升温速率控制在 1 ~ 2 °C/min,使其达到汽轮机冲转规定的压力值及温度值;

④ 在管道预热过程中,随着管道内温度逐渐升高,排出的冷凝水量越来越少。为保证管道预热效率,应逐渐关小防腐排污电动阀,按照 100% - 75% - 50% - 25% 远程手动调整其开度值。当管道内没有冷凝水排出时,关闭防腐排汽电动阀。

#### 4) 完成条件:

主汽门前蒸汽温度、蒸汽压力达到汽轮机冲转

技术要求。

#### 5) 管道预热完成后续动作:

① 调节阀切至手动状态,调整其开度至 100%;

② 5 s 后开启汽轮机进汽阀(开度 100%);

③ 5 s 后关闭调节阀(开度 0%);

④ 关闭汽机进汽旁通手阀、疏水排汽管路手阀。

### 3.4 DCS 逻辑控制设计

本管道自动预热方案结合厂区控制系统来实现,数据采集及逻辑程序采用和利时 MACS6. 5. 4B 火电版 DCS。汽轮机进汽电动阀及防腐排汽电动阀选用智能带开度指示的电动阀门,其常规控制点位见表 2,电动阀门采用和利时 DCS 自带的顺控功能块 HSSCS6 来实现逻辑控制,如图 4 所示。

表 2 电动阀门常规控制点位

Table 2 Conventional control points of electric valves

序号	点代码	点描述	I/O 类型
1	OPEN	开指令	DO
2	OFF	关指令	DO
3	STOP	中停指令	DO
4	KDW	开到位	DI
5	GDW	关到位	DI
6	BD	故障	DI
7	QAC	中央备妥	DI
8	KGZ	开过转矩	DI
9	GGZ	关过转矩	DI
10	KD	开度指示	AI

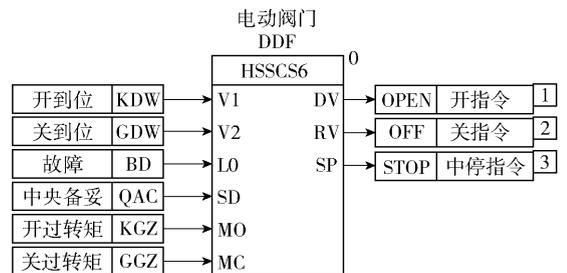


图 4 电动阀门控制逻辑

Fig. 4 Control logic of electric valves

本管道自动预热方案中的调节阀,以管道介质温升速率作为设定值,具体如下:蒸汽管道设置的热电阻,其实测温度值为  $T_1$ ,升温速率即为  $\Delta T_1$ 。为了

防止数据跳变、失真等小概率事件影响调节阀调节功能,将  $\Delta T_1$  经过品质判断和一阶惯性处理再作为调节阀的设定值。该调节阀控制回路点位见表 3,控制逻辑搭建如图 5 所示。

### 3.5 实施效果分析

国内某余热电站在开工调试阶段试运行该方案,在汽轮机进汽阀至主汽门之间进行管道自动预

表 3 调节阀控制回路点位

Table 3 Control circuit points of the control valve

序号	点代码	点描述	I/O 类型
1	TI	暖管温度	RTD
2	TV	调节阀控制	AO
3	TVI	调节阀反馈	AI

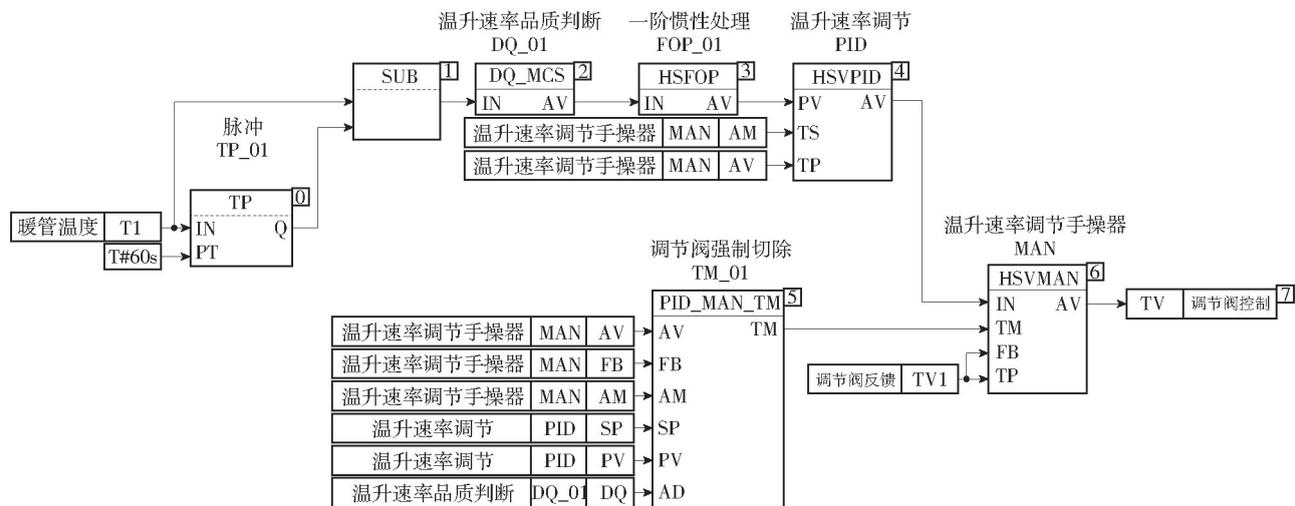


图 5 调节阀控制逻辑

Fig. 5 Control logic of the control valve

热控制。经实际调试验证,阀门及仪表总体布置合理,管道预热流程顺畅,无“水锤”现象发生;在极少量人工干预下,自动预热该段管道,各项技术指标满足设计要求。管道预热技术参数见表 4。相较于传统手动操作,可节省约 1/3 时间。

表 4 管道预热技术参数

Table 4 Pipeline preheating technical parameters

名称	压力/ MPa	温度/ ℃	升温速率/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )	时间/ min
低压预热	0 ~ 0.3	0 ~ 130	5	30
升压预热	0.3 ~ 0.6	130 ~ 160	1	30
升压预热	0.6 ~ 1.5	160 ~ 200	1	40
升压预热	1.5 ~ 4.0	200 ~ 250	1	40

## 4 方案实施及相关延伸

### 4.1 调节阀开度问题

国际通用的调节阀的调节开度范围多为 20% ~ 70%,若调节阀长时间小开度调节,会造成调

节失误且影响调节阀使用寿命。在管道自动预热过程中,由于需要控制后段管道缓慢升温,需要调节阀长时间小开度调节来控制进汽量。为了使调节阀正常工作,可适当减小调节阀前后手阀的开度,使调节阀的调节开度控制在正常范围。

### 4.2 进汽量及排汽量的选择

本方案通过控制进汽量来实现管道自动预热,也可尝试通过控制排汽量来实现管道自动预热:在疏水排汽管路上设置调节阀,管道预热时,将汽机进汽旁通阀打开一定开度,即进汽量一定,通过调节阀来控制排汽量,从而实现管道自动预热。可在此基础上同时控制进汽量和排汽量,使阀门控制更加精细,温升曲线更加可控,从而提升预热速率。

### 4.3 长距离管道分段预热

该管道自动预热方案是针对有色行业余热电站提出的,同样适用于其他相近工况的蒸汽管道暖管,如其他高温高压过热蒸汽的主蒸汽管道。可在此基础上进行扩展,例如锅炉出口至汽轮机进汽阀之间的外部管廊主蒸汽管道,若外部管廊主蒸汽管道过

长,可设置为管道分段预热,即在长距离管道中设置隔离阀门,将长距离管道分隔为若干个短距离管道,依此进行蒸汽预热。

## 5 结论

1) 本文提出的管道自动预热方案,具备蒸汽管道预热效果好、管道升温及升压速率控制稳定、阀门及仪表布置简单、投资成本较低、适用范围较广,具有重要的工程实践价值,是理想的蒸汽管道自动预热方案。

2) 各汽轮机厂家型号种类繁多,不同的汽轮机组需要配备的工艺流程存在差异,但蒸汽管道预热操作需求相近。本文提出的管道自动预热方案可拓展应用于其他汽轮机组,在实施时,具体参数需满足汽轮机组的要求。

3) 随着现代化工业的发展,自动化系统不断地大型化和复杂化,从过去以生产过程运行的稳定性为目的转变为如今大规模集中和最佳化控制,汽轮电站将逐步实现更高集成度的自动化,进而实现智能化、无人化。蒸汽管道自动预热的实现,能够有效提高汽轮机组冷机启动的速率,减少人工操作,保护蒸汽管道免受热应力损伤。蒸汽管道自动预热也可应用于其他类似管道中,进而提高其工业自动化集成度,减少人工操作,提高工业生产效率。

## [参考文献]

- [1] 张健敏,于海. 有色冶金烟气余热回收利用[J]. 冶金能源,2011,30(2):59-61,64.
- [2] 宋冬根. 铅锌冶炼厂炉窑的余热回收及利用[J]. 有色冶金设计与研究,2005(3):1-4.
- [3] 李伟达,袁爱武. 铜冶炼烟气制酸低温位热回收产汽量探讨[J]. 硫酸工业,2020(5):1-4.
- [4] 赵静一,邢一东,毛炜,等. 汽轮机主蒸汽管道的多工况应力分析[J]. 化工设备与管道,2014,51(6):62-67.
- [5] 卞建忠,夏临明,徐连荣,等. 蒸汽管道倒塌事故分析[J]. 化工设备与管道,2012,49(2):62-64.
- [6] 王玉玄,高百争,刘德平. 蒸汽管道暖管过程管道对固定支座的冲击[J]. 煤气与热力,2010,30(5):14-16.
- [7] 王林. 5MW超临界二氧化碳机组锅炉闭式循环吹管工艺研究[J]. 发电技术,2023,44(5):731-737.
- [8] 付龙龙,王红雨,雷兆团,等. 锅炉吹管验收标准确认条件研究[J]. 热力发电,2020,49(6):118-121.
- [9] 仲广玉. 浅析汽轮机蒸汽管线暖管[J]. 中国石油和化工标准与质量,2019,39(7):162-163.
- [10] 管桉琦,于龙杰,金志江,等. 套筒式蒸汽调节阀开孔优化与流动特性分析[J]. 自动化仪表,2022,43(10):8-13.
- [11] 陆冰. 高差压蒸汽调节阀阀杆断裂的修复研究[J]. 化工管理,2022(35):121-123.
- [12] 侯翠侠,王宏祥,王标. 智能型电动高压蒸汽调节阀[J]. 化工设备与管道,2013,50(3):82-84.

# Research on automatic preheating control scheme for pipelines in nonferrous metallurgical waste heat power plants

SHENG Xiaoming, LIU Shouang

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Within nonferrous metallurgical industrial parks, substantial amounts of high-temperature flue gas exist. To prevent atmospheric pollution, the waste heat from these flue gases is recovered to generate saturated steam, which is then sent to turbine power stations for energy utilization. The preheating of steam pipelines before steam delivery is termed as “pipeline warming”. Prior to turbine unit startup, the pipelines between the turbine inlet valve and main steam valve require warming. Traditional manual warming operations rely on operators’ experience to manually adjust valves, resulting in heavy workloads, low efficiency, and potential operational errors. To ensure safe and systematic automated pipeline warming, the paper proposes an automatic solution: installing control valves, thermal resistors and pressure transmitters in steam pipelines. These components connect to the plant’s Distributed Control

System (DCS) for data acquisition and automated control. The automation implementation can effectively enhance cold-start efficiency of turbine units, reduce manual operations, and protect steam pipelines from thermal stress damage.

**Keywords:** steam turbine power station; saturated steam; automatic heating pipes; control valves; DCS (Distributed Control System); waste heat recycling ▲

## 我国铝行业提前 6 年实现碳达峰

铝行业在“十四五”期间提前了 6 年实现碳达峰,电解铝供给侧结构性改革是先决条件和关键支撑;在此基础上,铝行业加快推进降能耗、提升绿电比例,增加再生铝产量,愈发重视原生、再生、加工融合发展。根据国家统计局最新数据,2021—2024 年,我国电解铝产量分别为 3 849 万 t、4 017 万 t、4 163 万 t、4 382 万 t,预计 2025 年产量为 4 420 万 t,受益于电解铝行业供给侧结构性改革影响,产量增速明显回落,已经接近“天花板”;电解铝吨铝综合交流电耗,2021—2024 年分别为 13 519 千瓦时、13 443 千瓦时、13 336 千瓦时、13 262 千瓦时,预计 2025 年低于 13 236 千瓦时,在科技创新的推动下,我国电解铝综合交流电耗不断降低,已比世界平均水平低 800 千瓦时;2021 年到 2024 年绿电铝占比分别为 19.5%、23.2%、24.4%、26.2%,预计 2025 年绿电铝占比 27.7%,较“十三五”末增加 7.9 个百分点;2021—2024 年再生铝产量分别为 800 万 t、865 万 t、950 万 t、1 055 万 t,2025 年预计产量达 1 160 万 t,产量逐年递增,再生铝在铝产量中占比达到 20.8%。

综上初步计算,2024 年,我国铝行业已经实现碳达峰,峰值为 5.55 亿吨左右(二氧化碳当量),2025 年将有所回落。

资料来源:中国有色网