

基于 ANSYS 的蓄热式熔铅炉供气管道升压过程仿真分析

王 沛

(中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

[摘 要] 熔铅炉是铅冶炼工艺中普遍使用的设备, 能耗大、排放高。蓄热式熔铅炉通过回收利用烟气热量降低能耗, 且使用能量高、碳排低、燃效好的天然气作为能源, 节能减排效果明显, 在近年来得到了广泛应用。由于天然气从输气干线输送至冶金企业需要经过多次调压计量, 因此天然气站场和燃气调压站的安全运行是保证下游铅冶炼平稳生产的前提。针对蓄热式铅熔炼炉供气管道及设备投产升压调试过程, 提出了基于三维流体仿真的分析方法, 模拟了 5.1 MPa 干线天然气向初始压力 2.0 MPa 的半封闭管段充压的过程, 得到全管段瞬时压力三维分布云图, 以达到从理论上排查隐患的目的, 同时对供气管道与设备的设计和布局优化有一定借鉴和参考作用。

[关键词] 蓄热式熔铅炉; 天然气; 管道; 升压过程; 流体仿真; 数值模拟

[中图分类号] TQ16 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0025-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.005

0 引言

铅是发展国民经济的重要基础原料之一。一方面, 我国是目前全球最大的精炼铅供应国以及消费国, 近年来国内铅产量持续增长, 2022 年产量为 781 万 t, 下游消费领域主要以铅酸蓄电池为主。另一方面, 铅冶炼的熔炼、加热过程中需要耗费大量能量, 在国内节能、降碳、减排的政策背景及对冶金产品质量要求提高的产业背景影响下, 迫切需要兼具节能、环境友好和资源高效利用的冶铅技术装备^[1]。

熔铅炉是炼铅工艺中的较为重要的设备。相较于电阻炉、感应炉和传统火焰炉, 蓄热式熔铅炉采用上世纪九十年代以来国际燃料利用和燃烧技术研究领域开发成功的蓄热式燃烧技术, 通过蓄热体这一媒介, 将出炉烟气的余热被转换成空气的物理热从而得到回收利用, 可以极大地降低能量消耗和生产成本^[2]。同时, 蓄热式熔铅炉一般采用天然气作为能

源, 其具有能量高、碳排低、燃效好等优良特性, 取得了较好的实际效果和经济效益, 应用前景广阔^[3]。

1 蓄热式熔铅炉原理及供气系统

1.1 蓄热式熔铅炉原理

蓄热式熔铅炉主要由熔铅炉体、两台带有蓄热体的烧嘴、烟气/空气四通换向阀、空气鼓风机、烟气引风机等组成, 如图 1 所示。常温空气通过鼓风机引入高温的蓄热式烧嘴中, 被加热至 1 200 °C 左右后, 与燃料混合点燃喷入熔铅炉体持续将铅液加热; 燃烧后的热烟气从炉体另一侧排出至另外一台蓄热式烧嘴, 烟气在经过蓄热体时将其加热, 经过换向阀、引风机排放至大气, 此时冷烟气温度低于 150 °C。之后循环切换换向阀通气方向, 使常温空气始终通过高温蓄热体, 热烟气始终通过低温蓄热体, 使热烟气的能量持续得以回收利用。

蓄热式熔铅炉的燃料多采用天然气, 其具有燃烧稳定、热值高、排放低等优点。

1.2 供气系统介绍

天然气常用的储存和运输方式一般有管道天然气、压缩天然气和船运液化天然气三种^[4]。压缩天然气压力较高(约 20 MPa), 但由于为气态, 能量密度不足, 容易受到储存空间和运力瓶颈的限制, 一般应用于小规模供气; 液化天然气是低温(一般低于

[收稿日期] 2023-01-26

[第一作者] 王沛(1987—), 男, 山东烟台人, 工程师, 硕士, 主要从事天然气和液化天然气工程项目管理和设计研发工作。

[引用格式] 王沛. 基于 ANSYS 的蓄热式熔铅炉供气管道升压过程仿真分析[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 25-30.

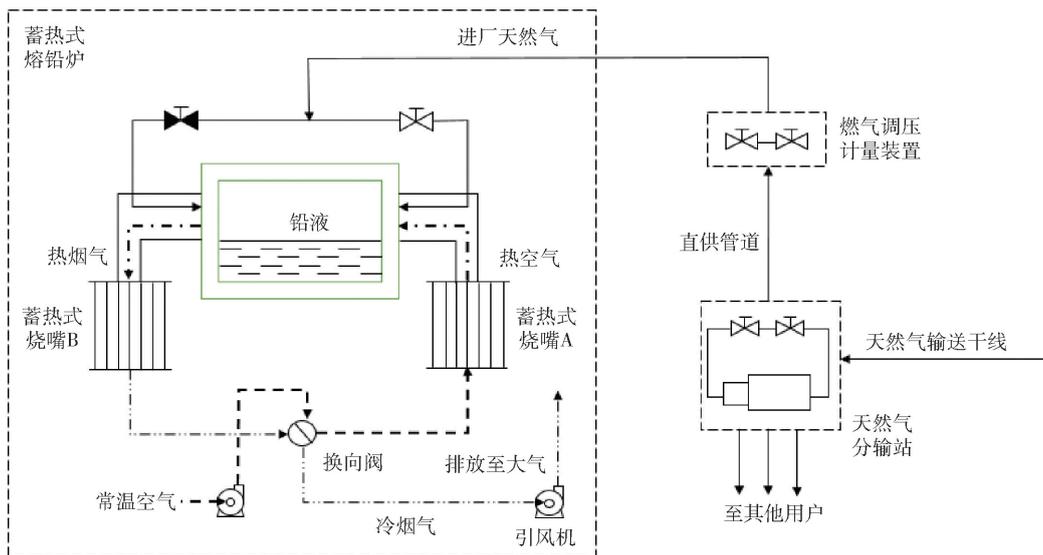


图1 蓄热式熔铅炉工作原理及供气流程图

-158℃)液体形态的天然气,适合远洋船运和陆上槽车运输,气液体积比约600:1,能量密度高,多用于大型能源储备和天然气调峰,也适合管道气无法到达的区域能源点供,但价格相对较高且波动较大,适合作为管道天然气的过渡和补充;管道天然气是全球应用最广泛的天然气储运方式,具有供应稳定、价格低廉的优势,近年来随着天然气大工业用户的增多,国内能源公司探索出规模介于长输管道和城市燃气之间的“工业用户直供”新模式,建设专供大用户的中压“管道专线”,使越来越多的高能耗企业(例如燃气发电、冶金、玻璃、造纸等)用上清洁、高效的能源。尤其是天然气管网一般距离冶金企业较近,冶炼用天然气通过降压设备和管道可直接送入厂区中,是冶金企业首选的备用能源^[5]。

目前天然气长输管道运行压力多为7 MPa以上,需经过天然气站场调压降压至4 MPa以下进入直供管道,经过燃气调压站再次降压至合适的压力进入冶金企业等工业用户,如图1所示。由于管道天然气运输距离长,受天然气气质和管内输送情况复杂影响,气体中不可避免存在杂质(例如水、硫、油污等),可能造成管道堵塞、或损坏站场中调压、计量设备,影响下游工业用户生产,因此需定期对天然气站场或调压站进行维护保养。但由于调压前天然气压力较高,检修完成后通气,高压天然气在短时间内涌入下游管道或设备,存在一定超压风险。通气操作多为凭现场操作经验确定,不能通过管道或设备内部瞬时压力分布得到应力集中区域,存在一

定的安全隐患。本文探索通过三维流体仿真分析的方法模拟蓄热式熔铅炉上游供气系统半封闭管段内的升压过程,得到全管段瞬时压力三维分布云图,以达到从理论上排查隐患的目的,同时对站场内管道与设备的设计和布局优化有一定借鉴和参考作用。

2 供气管段升压过程三维仿真

2.1 仿真工况

本文对某冶金企业蓄热式熔铅炉供气上游天然气站场DN1200的收发球筒及临近管段在投产前升压过程进行三维流体仿真分析,包含DN50收发球筒旁通管线, DN350、DN600、DN800管道等。其中DN50管道连接输气干线和上述管段,输气干线压力为5.1 MPa,半封闭管段内部初始压力为2.0 MPa,输气干线的天然气经过DN50管道进入封闭管道,研究整个管段内气体压力、速度随时间变化的规律,计算升压完成时间,检查管内压力波动情况。

2.2 仿真流程

由于以上工况属于非稳态工况,管段内流动参数随时间变化明显,本文采用ANSYS软件的流体仿真分析功能对以上工况进行三维仿真模拟分析。

三维流场仿真具有以下优点:

(1)全三维模拟通过接近真实的几何建模,能够考虑实际情况下三维边界的影响,并且能够包含全部的流体域,一般来说,全三维模拟的精确度最高。

(2)采用全三维模拟,管道和设备的几何细节

能够充分考虑。比如管道细节(弯管、三通、变径等),这些三维几何细节可能对流动传热产生重要影响,直接关系到模拟的精确度。

ANSYS 是目前业内领先的仿真模拟软件,自带物理建模、网格划分、流体仿真、结构分析、电磁分析等模块,在石油、化工、冶金、能源、航空、建筑领域有着广泛的应用。本文采用 ANSYS Fluent 流体分析模块,利用有限体积法求解管道内瞬态天然气流场的压力、速度等参数。

基于 ANSYS 软件的半封闭管段升压过程三维数值模拟按图 2 流程开展,大致分为几何建模、网格划分、流体求解、结果分析等步骤。

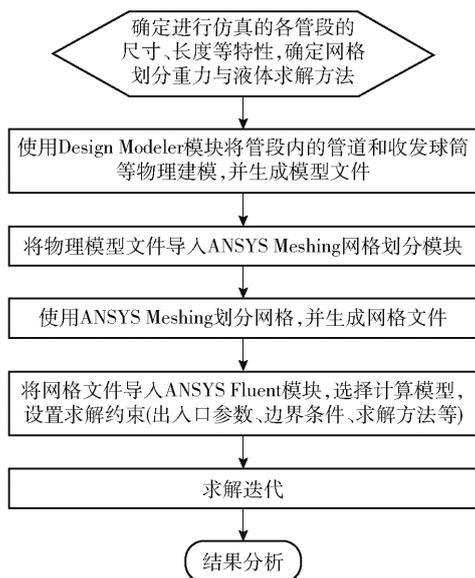


图 2 天然气站场半封闭管段升压过程仿真分析流程图

2.3 管段几何建模

2.3.1 升压管段几何尺寸

在天然气站场投产时,需要充压的各管道(含弯头)的几何尺寸如表 1 所示:

表 1 升压管段几何尺寸表

名称	规格	长度/m
主管线 1	DN800	110
主管线 2	DN800	38.3
放空管线	DN350	12
收球筒入口旁通管线	DN50	4.7
收球筒	DN1200	11
	DN1000	

注:(1)收球筒入口旁通管线为进气入口。(2)收球筒为 DN1200 变径至 DN1000。

2.3.2 几何建模

利用 ANSYS 自带的 Design Modeler 模块,通过站场布置图坐标建立三维流体域模型,模型包含表 1 中的所有管道和设备,以及 DN50 管道上开度为 50% 的闸阀及 DN350 管道上开度为 33% 的球阀。图 3 为管段几何模型全景图。

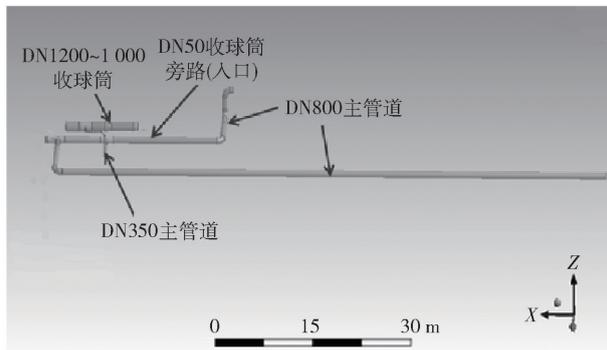


图 3 管段几何模型全景图

图 4 为收球筒, DN350 管道、阀门及 DN50 管道模型细节图。

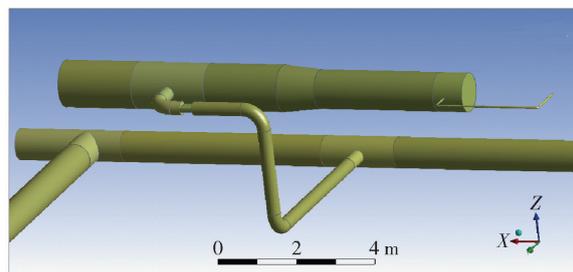


图 4 收球筒及部分管线模型细节

2.4 计算网格划分

由于天然气站场管道较长、管径较大,管道轴向尺寸远大于径向尺寸,且管径跨度较大(DN50 ~ DN1200),对三维网格划分要求较高。根据高压气体在管道内的扩散规律,利用 ANSYS Meshing 网格划分模块,优先使用结构化网格,在三通、变径处使用非结构化网格,控制网格数量约 300 ~ 400 个/m,以达到计算精度与计算速度的最优匹配效果。图 5 是收球筒及附近管道局部网格。

2.5 模型求解

由于干线天然气压力基本恒定为 5.1 MPa,因此可在 ANSYS Fluent 模块中设置入口边界条件为恒压 5.1 MPa,半封闭管段压力为 2.0 MPa,采用瞬态 $k-\varepsilon$ 模型求解管内流体的三维流场。在仿真过程中,在管道中建立了一组监控点,分别记录半封闭

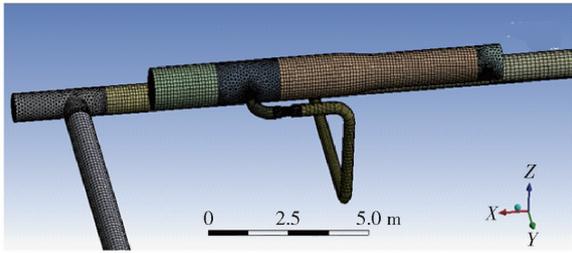


图 5 模拟管段网格

管段内不同区域的压力及速度变化,监控点位置如图 6 所示。

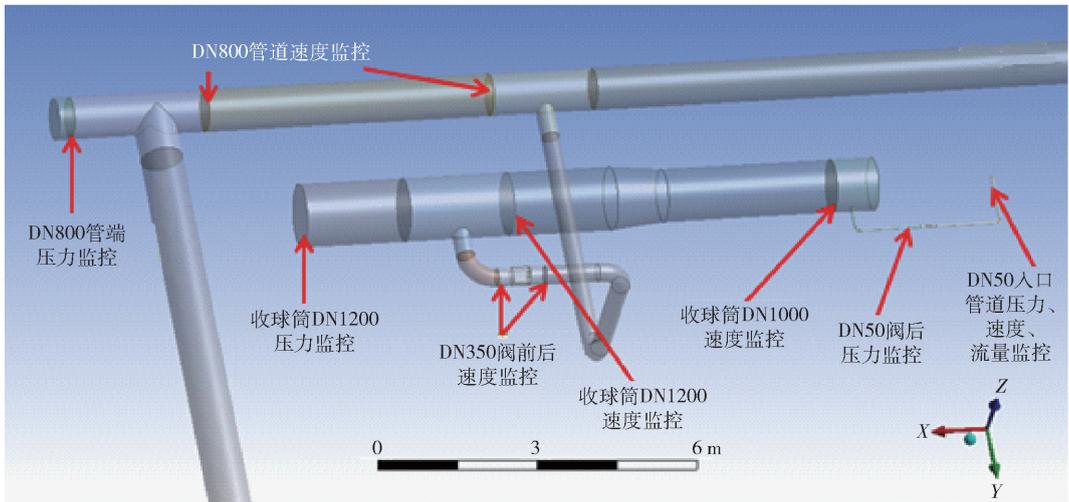


图 6 数值模拟监控点位置图

从图 7a 中可以看出除入口处压力和 DN50 管道闸阀后压力两条曲线外,其他压力曲线基本重合。整个半封闭管段压力在约 230 s 时压力升高至极大值 5.17 MPa,而后压力小幅波动衰减,至 420 s 后压力已基本稳定在 5.10 MPa。整个升压过程中 DN1200 收球筒盲端压力与 DN800 管道压力有不超过约 1.1 kPa 的压差,与管段内的高压相比可以忽略不计。

此外,本文还对 DN50 管道闸阀全开及 DN350 球阀全开条件进行重新建模仿真模拟,压力监控结果如图 7b 所示,显示半封闭管段压力在 155 s 时达到极大值,约为 5.31 MPa,至 360 s 时压力基本稳定在 5.10 MPa。

由图 7a 和图 7b 对比,可得到如下结论:管道入口阀门开度对半封闭管段系统的压力平衡时间和压力极大值有直接影响,阀门开度越小,管道阻力越大,系统达到压力平衡的时间越长,压力极值越小;反之,则系统平衡时间短,天然气干线高压对半封闭

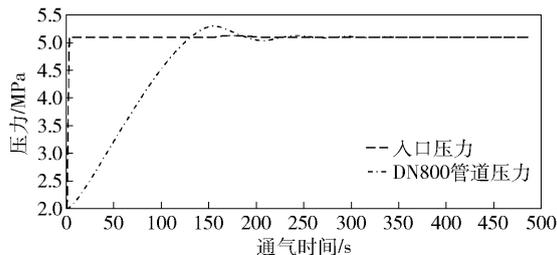
本文仿真重点模拟管段从进气开始至升压后 11 分钟这段时间内, DN50 管道入口压力及质量流量、收发球筒内 DN1200 端面压力、DN800 管道端面压力等情况。

3 结果分析

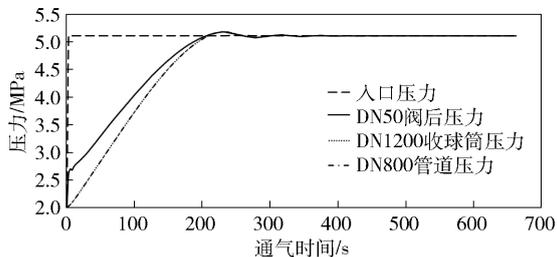
3.1 压力场分析

图 7 为半封闭管段在升压时各监控点压力变化曲线,包含了 DN50 管道入口压力、DN50 管道阀门后压力、DN800 管道压力、DN1200 收球筒端面压力。

管段系统的压力冲击就越大。



(a) DN50 闸阀开度 50%、DN350 球阀开度 33%



(b) DN50 闸阀和 DN350 球阀全开

图 7 管段内各压力监控点压力变化曲线图

图 8 为半封闭管段升压过程压力云图,其中 a 为初始状态, b 为充气 120 s 状态, c 为充气 230 s 状

态,d 为充气后 420 s 状态。可以看到管段初始压力(图 8a)为 2.0 MPa,充气 120 s(图 8b)管段压力为 4.07 MPa,230 s(图 8c)时管段压力已达到极大值

5.17 MPa,420 s 时(图 8d)压力已较 230 s 时有所降低,为 5.10 MPa。在管道压差方面,除 DN50 管道及其毗连管段外,其他管段压力相差不大。

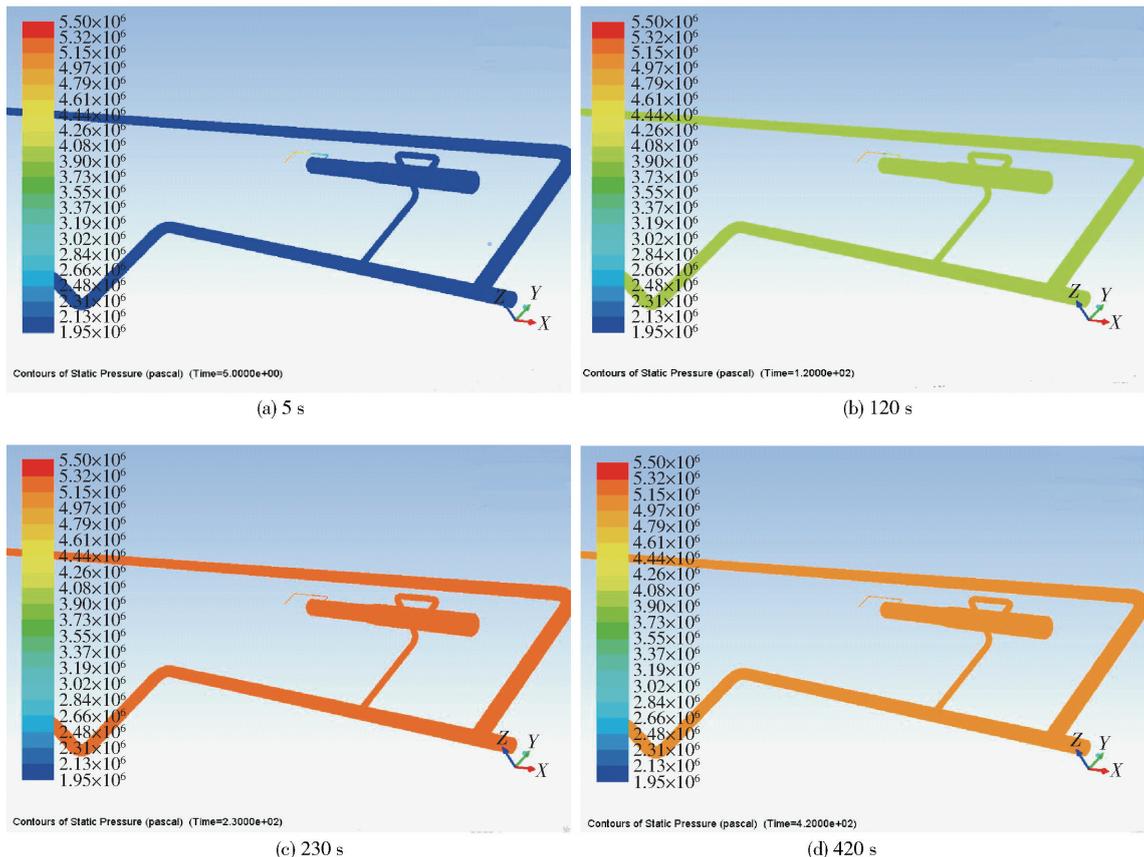


图 8 不同时刻封闭管段三维压力云图

3.2 入口流量分析

图 9 为 DN50 管道入口天然气质量流量曲线。由于干线与半封闭管段在初始状态时存在一定压差,当半封闭管段进气时,天然气瞬间涌入管段,其流量稳定在 7.3 kg/s 左右,半封闭管段内的压力持续升高;当内外压差减少为 0 时,天然气流入的加速度为 0,此后气体流入的流量开始降低,但半封闭管段内压力依然持续升高,此时管段系统内部压力高于干线;当气体流入的流量降低为 0 后,管内高压气

体推动气体向外排出,导致入口质量流量为负值。如此循环往复,至 420 s 后半封闭管段与干线压力达到平衡。

4 结论

1) 利用三维流体仿真软件对蓄热式熔铅炉供气站场管段升压过程进行数值模拟,可以精确得到管内不同区域瞬时压力分布和速度分布,对于科学制定供气投产方案,从理论上排查操作安全隐患,是一种准确、高效的方法。

2) 本次仿真分析得到半封闭管段内,除 DN50 天然气入口管道外,其他区域压力分布基本均匀。

3) 由于气体可压缩性强,向半封闭管段通气时会导致内部压力冲击,管段承受的最大压力大于干线压力,其压力极值与压力达到平衡的时间有关。当天然气入口相关管道的阀门开度越小,半封闭管

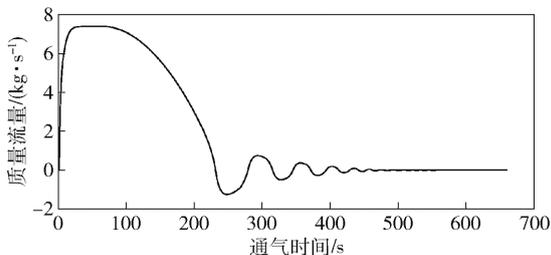


图 9 DN50 管道入口质量流量曲线

段内达到压力平衡的时间就越长,系统压力极大值就越小。因此在天然气站场实际操作时控制阀门开度可以减轻投产进气的压力冲击,有利于供气系统安全投产。

4) 同样,半封闭管段通气时管道内压力波动会导致入口处气体“返流”,整个管道系统可能会产生振动,在管道、设备机械设计时应关注此特点。

[参考文献]

[1] 汪金良,吴艳新,张文海. 铅冶炼技术的发展现状及旋流闪速炼铅工艺[J]. 有色金属科学与工程,2011,2(1):

14 - 18.

[2] 王计敏. 蓄热式铝熔炼炉熔炼过程多场耦合的数值模拟及优化研究[D]. 长沙:中南大学,2012.

[3] 王真,盛建军. 天然气在冶金行业的应用现状及前景[C]. 2011年全国冶金燃气专业年会论文集,银川:全国冶金动力信息网,2011:65 - 66.

[4] 张琳,李长俊,陈宁,等. 天然气储运技术[J]. 油气储运,2006,25(6):1 - 4.

[5] 马志. 天然气在钢铁企业中的应用[J]. 冶金动力,2019(3):31 - 33.

Numerical Simulation for Regenerative Lead Melting Furnace Gas Supply Pipeline System Pressure Rising Process Based on ANSYS

WANG Pei

Abstract: The lead melting furnace is commonly used in lead smelting process with a high energy demand and carbon emission. The regenerative lead melting furnace is widely used in recent years, which uses flue gas heat recovery to reduce energy consumption, and also uses the natural gas as energy which has advantages such as high heat-value, low carbon emissions, high combustion effect. From the natural gas trunk line to the down-stream metallurgical factories, the pressure of natural gas must be dropped down to adjust to the need of down-stream factories. So it is important to keep the up-stream natural gas stations and gas pressure regulating stations operating safely to ensure the down-stream lead smelting in the normal status. The 3D fluid simulation is an effective analysis method for the regenerative lead melting furnace gas supply pipeline system pressure rising operation of the gas station. With a numerical simulation of the semi-enclosed pipeline system pressure rising from 2.0 MPa to 5.1 MPa, the transient 3D pressure contours can be generated, which is used to analyze safety weakness theoretically. Also the simulation conclusions is useful for the design and layout of the pipelines and facilities of the natural gas stations.

Key words: Regenerative lead melting furnace; Natural gas; Pipeline; Pressure rising; Fluid simulation; Numerical simulation

