

碟环式换热器壳程阻力 CFD 模拟及改造

魏敏, 黄金豪, 朱智颖, 欧阳灿

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410019)

[摘要] 某铜冶炼厂制酸系统转化工段阻力过大, 导致二氧化硫浓度难以提升, 风机逼近额定最大功率, 增加了运行成本, 严重制约了系统的产能提升。通过对转化工段转化器及换热器进出口压力进行测量, 发现五台碟环式换热器壳程运行阻力均大大超过了设计值。针对该问题, 采用 CFD 流体模拟软件 Fluent 对 I ~ V 号换热器建立了壳程流体域模型, 计算其阻力分布, 并在原始结构的基础上, 通过改造进气口结构, 一定程度上减小了换热器壳程的压力损失。

[关键词] 转化工段; 换热器; CFD; 压力损失; 结构改造

[中图分类号] TQ051.5 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0074-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.014

0 引言

换热器是一种在化工、炼油、冶金、动力、食品、机械、制药及其他许多工业领域广泛使用的主要通用设备之一^[1-2]。在冶炼烟气制酸和化工行业硫酸生产中, 其转化工段用于高温三氧化硫气体与低温二氧化硫气体的换热器, 一般采用管壳式热交换器, 按其挡板形式可分为: 双圆缺型换热器、碟环式换热器、空心环管壳式换热器以及折流杆式换热器^[3]。随着近年来能源供给问题的突出, 如何提高换热器的综合性能逐渐成为了全行业的热点问题^[4]。在硫酸行业中, 由于碟环式换热器特殊的结构设计, 使其与圆缺式换热器相比, 传热效率提高约 30% ~ 50%, 传热面积减小 20% ~ 38%, 壳程压力降低 30% ~ 50%^[5]。

某铜冶炼厂自 2018 年 9 月正式投产后, 由于铜精矿原料成分波动较大, 造成冶炼系统长期运行负荷低于设计值, 为配套 400 kt/a 金属铜的生产要求, 需要硫酸系统配合冶炼系统提升生产能力^[6]。经分析, 硫酸系统提产过程中, 发现转化系统阻力过

大, 导致风机风量无法达到最大设计值。转化系统总阻力降以换热器阻力降占比最大, 二氧化硫主风机运行中, 阻力降每增加 1 kPa, 则吨酸电耗会增加 2 ~ 3 kW·h^[7]。硫酸转化工段加一吸塔总阻力降: 一系列为 41.85 kPa, 二系列为 46.16 kPa, 均高于设计阻力 32.4 kPa。现场经过对各设备气体进出口压力值读数和统计, 发现系统阻力主要分布在硫酸转化工段的 I ~ V 号热交换器气体流道处。现场压力表显示, 单个热交换器的管程阻力达到了 2 kPa 以上, 壳程阻力甚至达到了 4 ~ 5 kPa, 导致整个转化系统总阻力比设计阻力增加了将近 10 kPa。造成的不利后果是, 同样气体流量情况下, 二氧化硫主风机的压力升比设计值高了 8 ~ 12 kPa。一方面使二氧化硫主风机流量无法达到最大设计值, 另一方面使风机能耗增加了 500 kW 左右, 使二氧化硫风机更逼近额定最大功率运行。这两个因素成为了制约硫酸提产的主要瓶颈。

近年来应用计算流体力学(CFD)软件在分析实际的工程问题中得到了越来越广泛的应用。CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术是计算流体力学的简称, 是以流体力学为基础、数值计算为工具, 通过求解三大控制方程(连续方程、动量方程和能量方程), 对流体问题进行分析。在众多 CFD 软件中, Fluent 软件从用户的需求角度出发, 针对各种复杂流体的特点, 采用适当的离散格式和数值解法, 可以模拟自然对流传热、热传导的传热计算, 具有稳定

[收稿日期] 2023-01-20

[第一作者] 魏敏(1989—), 男, 湖北天门人, 工程师, 硕士, 主要从事冶炼烟气制酸、脱硫、湿法冶金等领域非标设备设计工作。

[引用格式] 魏敏, 黄金豪, 朱智颖, 等. 碟环式换热器壳程阻力 CFD 模拟及改造[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 74-78.

性好、精度高等特点^[8-9]。本文使用 CFD 流体模拟软件 Fluent, 建立了 I ~ V 号换热器壳程流体域模型, 根据压力分布情况, 对换热器结构进行了针对性改造, 降低设备运行过程中的阻力损失, 进而提高硫酸生产能力。

1 I 号换热器壳程原始结构分析

1.1 几何模型

本文研究的 I ~ V 号换热器均为气气换热的碟环式换热器, 低温二氧化硫气体从壳程通过, 与管程通过的高温三氧化硫气体进行换热。换热器主要由壳体、管板、换热管、环板、碟板以及支撑板等组成^[4], I 号换热器几何模型如图 1 所示, 结构参数如表 1 所示。管口 c 为壳程二氧化硫气体进口, 管口 d 为二氧化硫气体出口, 管口 a 为管程三氧化硫气体进口, 管口 b 为管程三氧化硫气体出口。

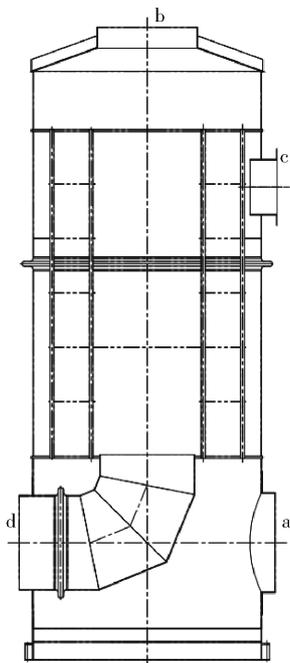


图 1 I 号换热器几何模型

1.2 基本参数

本文研究对象为某铜冶炼厂制酸系统转化工段中换热器壳程的压力分布情况, 壳程内流体使用空气简化替代, 其物性如表 2 所示。

1.3 CFD 模型

根据换热器的几何模型, 建立换热器壳程流体域, 换热管、管板、碟板、环板以及支撑板为流体域壁面。进气口由于结构复杂使用非结构网格划分, 其

表 1 换热器结构参数

换热器结构	几何尺寸及计算工况
长度/mm	6 000
换热面积/m ²	1 060
壳体	Φ4 146 × 8
换热管	Φ68 × 2.5
换热管数	818
排列方式	正三角形排列
管间距/mm	90
折流板厚度/mm	8
折流板间距/mm	990
换热管材料	S30408
壳体流体	二氧化硫气体
壳程入口温度/℃	325
壳程出口温度/℃	427
壳程入口压力/kPa	18.0
壳程出口压力/kPa	16.3

表 2 流体物性表

流体名称	密度/(kg·m ⁻³)	黏度/(kg·m·s)
空气	1.225	1.79 × 10 ⁻⁵

余所有区域均采用结构网格进行划分。图 2 所示为 I 号换热器壳程流体域 CFD 模型, 图 3 所示为 I 号换热器壳程流体域网格模型, 雅克比数值保证在 0.9 左右, 网格数量约为 1 600 万, 节点数量约为 1 150 万。

1.4 边界条件

求解中采用基于压力求解器, 定常流动, 湍流模型采用 k-e 模型, 壁面函数采用标准壁面函数, 压力和速度解耦采用 SIMPLE 算法。动量、能量和湍流参数的求解采用二阶迎风算法。气体入口使用速度边界, 气体出口使用压力边界, 湍流度用湍流强度与水力直径表示, 边界条件如表 3 所示。

表 3 进出口边界条件表

气体入口	流速/(m·s ⁻¹)	湍流强度/%	水力直径/m
	26.7	3	1.33
气体出口	出口压力/kPa	湍流强度/%	水力直径/m
	16.3	3	1.704

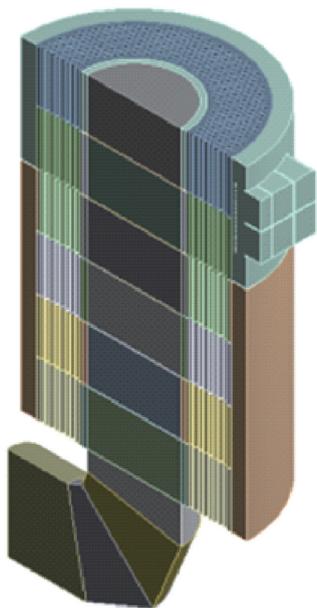


图 2 I 号换热器壳程流体域 CFD 模型

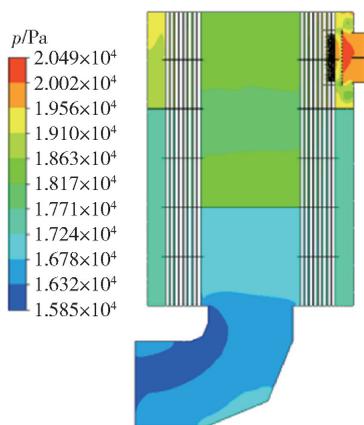


图 3 I 号换热器壳程流体域网格模型

1.5 分析结果

对 I 号换热器壳程流体域进行分析, 对称面压力分布结果如图 4 所示。图 3 为换热器壳程的压力场分布图, 图的左侧表示压力的大小, 颜色越深表示压降越高。通过 Fluent 软件计算, 壳程进气口平均压力为 19 627 Pa, 出口平均压力为 16 300 Pa, 壳程阻力损失为 3 327 Pa, 远远超过了壳程阻力的设计值 1 700 Pa, 与系统实际运行时换热器壳程阻力过大的情况相符。

如图中所示, 壳程内的压力损失主要集中在进气口、环板以及碟板处, 考虑到换热器已安装就位, 对内部结构的改造难度较大, 对进气口的结构改造成为主要方向。

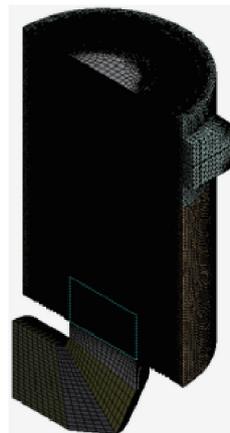


图 4 I 号换热器壳程压力分布

2 I 号换热器改造方案及分析

2.1 改造方案

针对 I 号换热器壳程进口阻力过大的情况, 在壳程进口管口方位不变的情况下, 将原始的矩形进气口改为喇叭口, 具体结构如图 5 所示。该结构通过方变圆, 使低温气体从尽可能大的范围进入壳程, 一方面减小气体直接冲击挡板造成的压力损失, 起到了导流和疏散作用, 另一方面使气体在设备内的分布更加均匀, 从而使该处的压降大大降低。

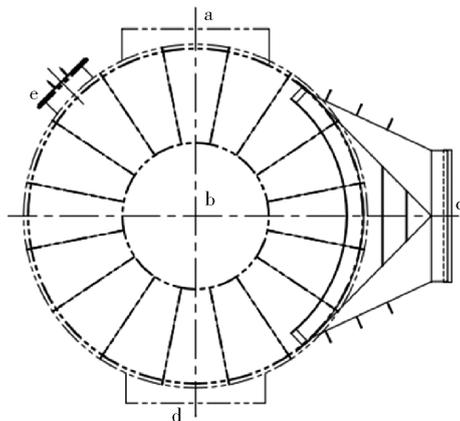


图 5 I 号换热器壳程进气口改进结构

2.2 分析结果

对改造后的 I 号换热器壳程流体域进行分析, 对称面压力分布结果如图 6 所示。通过软件计算, 改进后结构壳程进气口平均压力为 18 955 Pa, 出口平均压力为 16 300 Pa, 得到壳程的阻力损失为 2 655 Pa, 相比于原始结构壳程阻力减小了 672 Pa。

图 7 为换热器改造前后进气口位置水平截面的

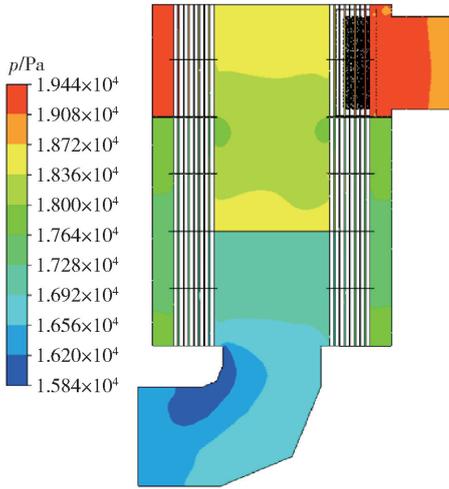


图 6 I 号换热器改进结构壳程压力分布

速度分布对比图,左侧为原始结构气速分布,右侧为改造结构气速分布。从图中可以看出,改造后结构

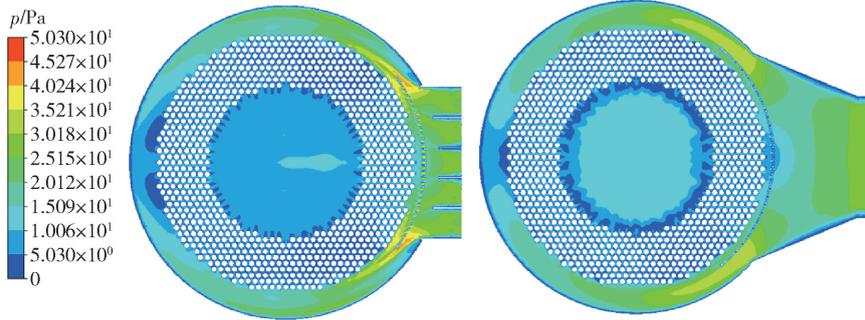


图 7 I 号换热器改进前后壳程速度分布

表 4 I ~ V 号换热器改造前后结果统计表

换热器	进口压力/Pa		出口压力/ Pa	阻力/Pa		阻力减小/ Pa	系统阻力 减小/Pa
	原始结构	改造结构		原始结构	改造结构		
I 号换热器	19 627	18 955	16 300	3 327	2 655	672	
II 号换热器	43 117	40 811	38 300	4 817	2 511	2 306	
III 号换热器	24 852	23 038	18 400	6 452	4 638	1 814	5 861
IV 号换热器	43 660	42 998	40 300	3 360	2 698	662	
V 号换热器	21 550	21 143	19 300	2 250	1 843	407	

4 总结

1) 本文针对某铜冶炼厂制酸系统转化工段 I ~ V 号换热器阻力过大,生产能力受限的问题,使用 CFD 流体模拟软件 Fluent,对转化工段五台换热器壳程进行模拟,分析了导致设备阻力过大的原因,提出了有针对性的解决方案和改造措施,通过将进气

气体进入换热器分布情况较原始结构更加均匀,消除了进口与挡板间的速度极大区域。并且改造后的结构气体穿过换热管进入管束中心区域的气体速度大于原始结构,更有利于对流换热,获得较大的换热系数,进一步提高了设备的热交换能力。

3 II ~ V 号换热器改进前后分析结果

II ~ V 号换热器尺寸大小与 I 号换热器尺寸有所不同,但基本结构一致,与 I 号换热器采用相同分析方法与改造方案。对 II ~ V 号换热器的原始结构与改造后结构进行分析,分析结果统计见表 4。如表所示,通过将五台换热器的进气口由矩形进气口改为喇叭口进气结构,使系统总阻力降低 5 861 Pa,能够有效降低风机负荷,降低运行成本,提高硫酸产能。

口改为喇叭口结构,有效减小了壳程阻力,优化了气体分布情况。

2) 目前,该改造方案已被业主采用,现场仪表显示,转化工段总阻力降低了约 6 kPa,与分析结果相符,改造解决了转化工段二氧化硫烟气提浓、风机风量提升的问题,同时节约了能源,使得全厂的硫酸产能配合冶炼系统的提产稳步提升。

[参考文献]

- [1] 孟晋安,邱彦林. 换热器在石油化工中的应用及维护[J]. 化工管理,2015(07):153.
- [2] 杜文静,赵浚哲,张立新,等. 换热器结构发展综述及展望[J]. 山东大学学报:工学版,2021,51(5):76-83.
- [3] 张如庆,吴敬山,周锦东. 大孔板波形管碟环式换热器在 120 kt/a 硫磺制酸装置中的应用[J]. 硫磷设计与粉体工程,2007(02):37-41+50.
- [4] 莫春萍,王万林,李治民等. 硫酸转化工段高温大直径换热器设计思路研究[J]. 化工管理,2015(23):15-16.
- [5] 徐志强. 蝶环式高效换热器的开发应用[J]. 有色设备,1999(6):11-13.
- [6] 朱智颖,金生龙,杨晓武. 某铜冶炼厂硫酸系统提产方案分析[J]. 硫酸工业,2021(6):16-21.
- [7] 高庆华. 硫酸装置转化工序气体换热器改进措施[J]. 硫酸工业,2022(7):21-24.
- [8] 曹钰,耿世伟,李沪萍,等. Fluent 软件在化工设备模拟中的应用[J]. 化学工业与工程,2019,36(4):51-57.
- [9] 刘霞,葛新锋. FLUENT 软件及其在我国的应用[J]. 能源研究与利用,2003(2):36-38.

CFD Simulation and Modification of Shell Side Resistance of Disc-ring Type Heat Exchange

WEI Min, HUANG Jin-hao, ZHU Zhi-ying, OU Yang-can

Abstract: The resistance of the conversion section of the acid production system in a smelter is too large, result the SO_2 concentration difficult to increase, and the fan approaches the rated maximum power, which increases the operation cost and seriously restricts the capacity improvement of the system. By measuring the inlet and outlet pressure of the converter and heat exchanger in the conversion section, it is found that the shell side resistance of the five dish ring heat exchangers greatly exceeds the design value. To solve this problem, the CFD fluid simulation software Fluent was used to establish the shell side fluid domain model of No. I ~ V heat exchanger, and the resistance distribution was calculated. Based on the original structure, the pressure loss of the shell side of heat exchanger was reduced to a certain extent by modifying the inlet structure.

Key words: Conversion section; Heat exchanger; CFD; Pressure loss; Structure transformation ▲