

化工过程安全评估技术丛书

Risk management of  
coal gasification process

# 煤气化工艺 风险管理

张海峰 牟善军 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



化工过程安全评估技术丛书

# 煤气化工艺风险管理

张海峰 牟善军 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书系统介绍了煤气化工艺流程,详细描述了HAZOP、LOPA、安全仪表系统功能安全评估、Bow-tie、事故分析与模拟等风险辨识、评估与控制技术的相关概念和分析过程,并结合实际案例对相关技术在煤气化工艺风险管理中的应用进行了展示,有利于读者理解掌握这些技术的应用要点。

本书适用于高等院校、科研院所、政府部门和企业从事煤气化工艺设计、危害分析、风险评估及风险管理的人员。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤气化工艺风险管理 / 张海峰, 牟善军主编.  
—北京: 中国石化出版社, 2012. 6  
(化工过程安全评估技术丛书)  
ISBN 978-7-5114-1510-3

I. ①煤… II. ①张…②牟… III. ①煤气化-化工过程-风险管理 IV. ①TQ546.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第091014号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米16开本7.75印张194千字

2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷

定价:25.00元

# 编 委 会

主 编 张海峰 牟善军

编写人员 白永忠 万古军 党文义 汪泽强 李玉明 袁纪武

翟良云 于安峰 张广文 武志峰 赵文芳 赵祥迪

姜巍巍 庄腾宇

# 前 言

煤炭是中国的主要化石能源，也是许多重要化工产品的主要原料，随着社会经济持续高速发展，近年来中国能源、化工产品的需求也出现较高的增长速度，煤化工在中国能源、化工领域中已占有重要地位，特别是高油价时代的到来为煤化工项目创造了前所未有的发展机遇。煤气化技术是煤化工中的关键技术，煤气化装置具有高温、高压、易燃、易爆、有毒、有害、操作难度大及事故易发的特点，如何有效开展煤气化工艺风险管理，确保煤气化装置的安全运行是目前国内外的热点问题，是确保企业安全生产和提高经济效益的基本条件。

我国政府一直高度重视企业的安全生产工作，提出了科学发展、安全发展的理念，并强调运用系统的方法和技术来预防和控制安全事故的发生。鉴于此，中国石化青岛安全工程研究院组织编写了本书，本书以系统的工艺风险管理理念，按照工艺危险辨识、风险评估、风险控制与管理的思路，重点介绍了危险与可操作性分析(HAZOP分析)、保护层分析(LOPA)、安全仪表系统功能安全评估、Bow-tie分析和事故分析与模拟等工艺风险管理方法与工具的基本概念和分析过程，并结合煤气化工艺具体实例，详细描述了这些工具和方法的具体应用。

由于学识水平有限，书中错误与不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

# 目 录

<b>第一章 煤气化工艺简介</b> .....	( 1 )
<b>第一节 煤气化技术的现状和发展趋势</b> .....	( 1 )
一、煤气化技术现状 .....	( 1 )
二、煤气化技术分类 .....	( 2 )
三、煤气化技术发展趋势 .....	( 3 )
<b>第二节 水煤浆气化工艺介绍</b> .....	( 4 )
一、国内外水煤浆气化技术开发情况 .....	( 4 )
二、水煤浆气化装置工艺流程类型及主要设备介绍 .....	( 5 )
三、水煤浆气化工艺的危险性分析 .....	( 9 )
四、水煤浆气化工艺的危险物质 .....	( 14 )
<b>第三节 干粉煤加压气化工艺介绍</b> .....	( 15 )
一、国内外干粉煤加压气化工艺开发情况 .....	( 15 )
二、SCGP 工艺流程及主要设备 .....	( 16 )
三、SCGP 工艺的危险性分析 .....	( 17 )
四、干粉煤气化工艺的危险物质 .....	( 19 )
<b>第二章 煤气化工艺 HAZOP 分析</b> .....	( 21 )
<b>第一节 HAZOP 方法概述</b> .....	( 21 )
一、HAZOP 的起源和发展 .....	( 21 )
二、HAZOP 方法概述 .....	( 22 )
三、HAZOP 分析实施过程 .....	( 27 )
<b>第二节 水煤浆气化装置 HAZOP 分析</b> .....	( 33 )
一、HAZOP 分析对象工艺流程简介 .....	( 33 )
二、HAZOP 分析目标和范围 .....	( 35 )
三、HAZOP 分析准备 .....	( 35 )
四、HAZOP 分析过程 .....	( 36 )
五、HAZOP 分析结果 .....	( 36 )
<b>第三章 煤气化工艺保护层分析(LOPA)</b> .....	( 40 )
<b>第一节 LOPA 概述</b> .....	( 40 )
一、LOPA 基本原理 .....	( 40 )
二、LOPA 发展背景和应用 .....	( 42 )
<b>第二节 LOPA 的基本程序</b> .....	( 44 )
一、场景识别与筛选 .....	( 44 )
二、初始事件确认 .....	( 46 )
三、IPL 评估 .....	( 47 )

四、场景频率计算 .....	( 51 )
五、风险决策 .....	( 56 )
六、LOPA 报告 .....	( 57 )
七、LOPA 执行中的其他要求 .....	( 59 )
第三节 煤加压气化装置 LOPA 分析 .....	( 63 )
一、基本分析过程 .....	( 63 )
二、风险决策 .....	( 65 )
三、LOPA 记录表 .....	( 66 )
第四章 煤气化工艺安全仪表系统(SIS)的功能安全 .....	( 67 )
第一节 功能安全简介 .....	( 67 )
一、安全仪表系统概述 .....	( 67 )
二、安全完整性水平(SIL)及其评估 .....	( 71 )
第二节 水煤浆装置 SIL 等级验证计算及符合性评价 .....	( 74 )
一、评价准则 .....	( 74 )
二、PFD 验证计算 .....	( 74 )
三、SIL 等级符合性评价结果 .....	( 74 )
第五章 煤气化工艺 Bow - tie 分析 .....	( 78 )
第一节 Bow - tie 分析简介 .....	( 79 )
一、Bow - tie 分析基本术语 .....	( 79 )
二、Bow - tie 分析程序 .....	( 80 )
三、HSE 关键任务/活动 .....	( 80 )
四、屏障 .....	( 82 )
五、Bow - tie 和 LOPA 的使用 .....	( 83 )
第二节 Bow - tie 分析在水煤浆气化工艺中的应用 .....	( 84 )
一、水煤浆气化工艺流程及重大危险 .....	( 84 )
二、重大工艺危险的 Bow - tie 分析 .....	( 84 )
第六章 煤气化工艺事故分析与模拟 .....	( 87 )
第一节 煤气化工艺事故分析 .....	( 87 )
一、方法介绍 .....	( 87 )
二、水煤浆气化装置事故统计 .....	( 87 )
三、水煤浆气化装置事故原因分析与预防对策 .....	( 88 )
第二节 煤气化装置工艺事故模拟 .....	( 90 )
一、事故模拟技术及发展现状 .....	( 90 )
二、工艺事故模拟 .....	( 92 )
附录 BPCS 多个回路作为 IPL 的评估方法 .....	( 112 )
参考文献 .....	( 115 )

# 第一章 煤气化工艺简介

## 第一节 煤气化技术的现状和发展趋势

### 一、煤气化技术现状

煤化工是以煤炭为原料经化学方法将煤炭转化为气体、液体和固体产品或半产品，而后再进一步加工成一系列化工产品或石油燃料的工业。与石油和天然气为原料生产化工产品相比较，煤化工存在煤炭加工技术复杂，建设投资大，容易造成污染，三废治理难度大等问题。20世纪50年代至70年代，由于廉价天然气和石油的大量开采，天然气化工和石油化工得到快速发展，在很多领域取代了煤化工。但是，中国有十分丰富的煤炭资源，而石油和天然气资源不足。中国能源结构以煤炭为主的状况，在今后一个相当长的时期内不会有大的改变。在石油和天然气资源日趋减少，价格不断升高的情况下，积极探索利用丰富廉价的煤炭资源发展煤化工，具有重要的意义。

为了解决煤化工存在的问题，20世纪90年代，工业化国家提出了发展洁净煤技术的概念。根据洁净煤技术现状和发展方向，洁净煤技术应包括以下六个领域：

- ① 煤炭的初步加工 选煤、型煤、配煤、水煤浆、油煤浆、化学提纯。
- ② 煤炭的燃烧及后处理 煤的高效燃料器、循环流化床锅炉、流化床燃烧联合循环发电、水煤浆燃料、煤燃烧中固态硫及烟道气除尘、脱硫技术。
- ③ 煤炭气化 煤高效加压气化、干馏焦(不完全气化)、清洁燃料气、洁净合成气( $\text{CO} + \text{H}_2$ )、煤气化联合循环发电技术、煤的地下气化。
- ④ 煤炭液化 煤加氢直接液化、间接液化(合成燃料油、醇醚燃料)、煤的拔头工艺生产液体燃料。
- ⑤ 燃料电池 氢燃料电池、甲醇燃料电池、磷酸盐燃料电池、碳酸盐型燃料电池、过氧化氢燃料电池、轻烃燃料电池。
- ⑥ 煤炭开发利用中的污染控制 废弃物的处理与利用、煤层气的开发利用、煤炭加工转化中污染治理及控制技术。

其中，煤炭气化是煤炭转化的主导途径之一。气化过程是煤炭的一个热化学加工过程。它是以煤或煤焦为原料，以氧气(空气、富氧或工业纯氧)、水蒸气或氢气等作气化剂(或称气化介质)，在高温条件下通过化学反应将煤或煤焦中的可燃部分转化为可燃性气体( $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 的混合物)的工艺过程。

煤炭气化可以生产工业燃料气、民用燃料煤气、化工合成原料气、合成燃料油原料气、氢燃料电池、煤气联合循环发电、合成天然气、火箭燃料等。煤气化技术广泛应用于化工、冶金、机械、建材等重要工业部门和城市煤气的生产。目前中国拥有各种类型的煤气炉约9000多台，其中化工行业煤气化炉约有4000余台，以固定床气化炉为主。多数中小型化肥厂和少数大型化肥厂以煤炭(或焦炭)为原料，通过煤气化生产合成氨和甲醇，年耗原料煤



4000 多万吨，合成氨产量占全国总产量的 60% 以上，为中国农业生产提供了充足的化肥。因此，煤气化在中国工农业生产和居民生活中，特别是在现代煤化工和洁净煤技术的发展中，占有十分重要的地位，是实现中国经济可持续发展的主要技术手段之一。

## 二、煤气化技术分类

煤气化技术分类方法很多，一般常按生产装置化学工程特征、气化炉中的流体力学条件以及气固相间相互接触的方式进行分类。气化技术可分为如下几种：

### （一）固定床气化

煤由气化炉顶加入，气化剂由炉底送入。煤自上而下经过干燥层、干馏层、还原层和氧化层，最后形成灰渣排出炉外；气化剂由气化炉底部自下而上经灰渣层预热后进入氧化层和还原层（两者合称气化层），煤与气化剂逆流接触，相对气体上升速度而言，煤料下降速度很慢，流动气体的上升力不至使固体颗粒的相对位置发生变化，即固体颗粒处于相对固定状态，床层高度亦基本上维持不变，因而称为固定床气化。另外，从宏观角度看，由于煤从炉顶加入，含有残炭的灰渣自炉底排出，气化过程中，煤粒在气化炉内逐渐并缓慢往下移动。因而又称为移动床气化。

固定床气化的特性是简单、可靠。同时由于气化剂与煤逆流接触，气化过程进行得比较完全，且使热量能得到合理利用，因而具有较高的热效率。代表炉型为常压 UGI 炉和加压 Lurgi 炉，以及经过改进的 BGL 液态排渣炉。

固定床气化的局限性是对床层均匀性和透气性要求较高，入炉煤要有一定的粒（块）度（约 6 ~ 50mm）及均匀性。煤的机械强度、热稳定性、黏结性和结渣性等指标都与透气性有关，因此固定床对入炉原料有很多限制。含硫量高、热稳定性差、机械强度差，容易黏结和灰分高的煤一般不太适合固定床气化。

### （二）流化床气化

流化床煤气化又称为沸腾床气化。气化剂以空气或氧气或富氧和蒸汽为气化剂，由炉底部吹入，以小颗粒煤（粒度 < 6mm）为气化原料，在气化炉内使其悬浮分散在垂直上升的气流中，煤粒在沸腾状态下，保持着连续不断和无秩序的沸腾和悬浮状态运动，迅速地进行着混合和热交换，气固两相充分混合接触，在部分燃烧产生的高温下进行气化反应。

流化床气化直接使用小颗粒碎煤为原料，适应采煤技术发展，避开了块煤供求矛盾。对煤种煤质的适应性强，可利用如褐煤等高灰劣质煤作原料。其缺点是对入炉煤的活性要求很高，炉温低、停留时间短，碳转化率低，飞灰多，残炭高，且灰渣分离困难。

流化床气化代表炉型为常压 Winkler（温克勒）炉和加压（高温温克勒）HTW 炉、山西煤化所灰熔聚技术及 U-Gas、KRW 等。

### （三）气流床气化

气流床气化是一种并流式气化。气化剂（氧与蒸汽）将煤粉（70% 以上的煤粉通过 200 目筛孔）夹带入气化炉，在 1300 ~ 1900℃ 高温下将煤一步转化成 CO、H<sub>2</sub>、COS 等气体，残渣以熔渣形式排出气化炉，或将煤粉制成煤浆，用煤浆泵送入气化炉。在气化炉内，煤浆颗粒与气化剂经特殊喷嘴进入反应室，进行剧烈的部分氧化还原反应。因此，其热解、燃烧以及吸热的气化反应，几乎是同时发生的。随气流的运动，未反应的气化剂、热解挥发物及燃烧产物裹挟着煤浆颗粒高速运动，运动过程中进行着煤颗粒的气化反应。这种运动形态，相当于流化技术领域里对固体颗粒的“气流输送”，习惯上称为气流床气化。

由于受反应空间的限制，气流床气化停留时间短，因此必须严格控制入炉煤的粒度以保

证有足够的接触面积。同时要求气化剂(氧气)纯度足够高,以确保快速反应和较高的碳转化率。气流床反应一般以提高反应温度来实现液态排渣。

代表炉型为水煤浆加压气化 GE(Texaco)炉、干粉煤加压气化炉如 SCGP、Prenflo 及国内同类技术等。

#### (四) 熔融床气化

熔融床气化也称熔浴床气化或熔融流态床气化。它的特点是具有温度较高(一般为 1600~1700℃)且高度稳定的熔池,粉煤和气化剂以切线方向高速喷入熔池内,池内熔融物保持高速旋转。在较高温度下进行燃烧和气化,溢流渣连续排出后用水激冷。由于工艺和设备的局限,气化效率低,工程设计难度大,此气化技术已不再发展。在现代煤气化技术开发中,熔融床技术并未完全商业化。此外,地下煤炭气化技术,虽研究开发历史较久远,但还未见可靠的实际应用。

在前三类气化技术中:

固定床气化相对简单和成熟,但固定床气化需要使用块煤,有效气( $\text{CO} + \text{H}_2$ )产率低,干灰排渣,环保问题较多,流化床气化采用碎煤进料,灰渣循环使用,对环保压力小,但仍存在气化温度较低,要求原料煤有较好的反应性。

气流床技术是当今先进煤气化技术符合大型化、环保型和原料多样化要求发展较快并被广泛应用的技术。比较典型的是 GE 水煤浆气化和 SHELL 干粉煤加压气化技术。

### 三、煤气化技术发展趋势

目前国内外煤气化技术发展趋向于大型化、清洁化、多样化和安全节能型。

#### (一) 发展高效、经济和清洁的煤处理技术将是我国能源战略的重点

我国的煤炭资源丰富,油气匮乏。在未来几十年内,煤炭在我国能源结构中仍将占主导地位,它是我国战略上最安全和最可靠的能源。但是,作为煤能源生产与消费大国,我国的煤炭利用技术总体上是落后的:效率低,造成能源浪费;污染严重,导致环境质量恶化。

针对我国富煤、缺油、少气的能源资源特色,合理利用我国的煤炭资源,开发新型的清洁能源已经迫在眉睫。国家“十二五”发展规划将洁净煤技术作为今后能源建设的战略重点。

#### (二) 环保、社会友好型是煤气化技术发展的基本要求

中国是世界第一大煤炭生产与消费国,煤炭在为国民经济作出巨大贡献的同时,其开发利用过程也产生了很严重的污染。现阶段我国煤炭资源消费中的 80% 用于直接燃烧,约 10% 用于炼焦,6%~7% 用于化工原料。

煤化工最大的优势是成本低,但环境污染大,生产过程中不仅要排放大量的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ ,对水资源的破坏更大。煤炭燃烧成为大气主要污染源,烟尘和二氧化硫的排放量分别占 73% 和 90%。

由于中国落后的燃煤技术及装备,导致中国主要工业产品能耗比先进国家高出 20%~60%,能源效率为 34%,比先进国家低 10 个百分点。因此,发展洁净煤技术是提高中国能源效率、减少环境污染的重要途径。

近年来,任何煤气化技术的飞速发展,核心技术都是为了适应环境保护的基本要求,社会友好型的煤气化技术是国家开发和推广的重点。

#### (三) 气流床煤气化日益成为煤化工的主流技术之一

在固定床气化炉方面,常压 UGI 炉属淘汰炉型,加压 Lurgi 炉虽然冷煤气效率较高,氧耗较低,但低温焦油污染严重,环境治理较困难,入炉煤基本是 13mm 以上的小块

煤，若用 Lurgi 炉生产合成气，因分离和转化煤气中甲烷生产流程较长，操作可靠性和稳定性降低。

煤炭气化技术，尤其是高压、大容量气流床气化技术，显示了良好的经济和社会效益，代表着发展趋势，是现在最清洁的煤利用技术，是洁净煤技术的龙头和关键。气流床煤气化的优点并不仅仅在于减少空气排放物，它也生成许多具有商业价值的副产品，如高纯度的硫、CO<sub>2</sub> 和无毒的炉渣。随着环境标准的日趋严格，气流床气化的优势越来越突出。

加压气流床和流化床目前是煤气化首选工艺。近年来，GE 水煤浆气化炉和 SHELL 粉煤炉是大型化气流床煤气化技术的代表。

#### (四) 清洁、节能、大型化和安全环保是气流床煤气化技术的基本发展方向

无论是 GE 水煤浆气化炉还是 SHELL 粉煤炉，各种各样的气流床煤气化技术的发展都以清洁、节能、大型化和安全环保为煤气化技术的基本发展方向，具体体现在：

- (1) 适当提高气化压力有利于提高单炉生产能力、提高效率、降低成本；
- (2) 煤种适应性广的气化技术具有无可比拟的竞争力；
- (3) 扩大单炉生产能力才能实现生产大型化；
- (4) 气化效率(含碳转化率、有效气含量、冷煤气效率)要高，氧煤单耗要低；
- (5) 合理生产，综合利用。把煤气化技术与发电(如 IGCC)、联产化工产品联系起来，以提高总热效率，降低产品成本；
- (6) 满足环保要求，稳定性、安全可靠要高。

## 第二节 水煤浆气化工艺介绍

### 一、国内外水煤浆气化技术开发情况

近年来，采用水煤浆气化工艺，甲醇合成装置大型化、甲醇制烯烃(MTO/MTP)、IGCC 汽电联产、羰基化工产品生产、煤制油和煤制天然气等技术逐渐成功投入商业运行，水煤浆气化工艺成为应用最广泛的煤制气工艺之一。其共同特点是煤种适应广、气化温度高、气化压力高、生产能力大、气化效率高、气体容易净化。

国外水煤气化发展和应用广泛的主要有美国 GE(原 Texaco)公司的水煤浆气化技术、E-Gas(水煤浆/石油焦)气化技术。

在消化吸收引进国外技术的同时，国内自主创新的新型水煤浆气化技术也得到良性发展，20 世纪 70 年代起西北化工研究院研究开发水煤浆气化技术并建设了中试装置，为此后 4 家工厂引进 Texaco 水煤浆气化技术提供了丰富的经验；“九五”期间就“整体煤气化联合循环(IGCC)关键技术(含高温净化)”立项，有十余个单位参加攻关；2004 年科技部立项“大规模高效气流床煤气化技术的基础研究”取得成功。“九五”期间华东理工大学、兖矿鲁南化肥厂、中国天辰化学工程公司承担了国家重点科技攻关项目“新型(多喷嘴对置)水煤浆气化炉开发”，“十五”期间多喷嘴对置式水煤浆气化技术已投入商业应用。

目前，比较成熟的水煤浆气化技术主要有华东理工大学的多喷嘴水煤浆气化技术、西北化工研究院开发的多元料浆气化技术及清华大学的非熔渣-熔渣分级气化技术工艺。

截至 2009 年初，采用水煤浆气化技术：GE 煤气化 27 套(投产 16 套)、四喷嘴 13 套(投产 5 套)，分级气化 6 套(投产 1 套)、多元料浆气化多套。国内外典型的水煤浆气候加压机化技术见表 1-1。

表 1-1 国内外典型的水煤浆加压气化技术

技术名称	国外技术	国内技术		
	GE	四喷嘴	分级气化	多元料浆
技术来源	美国 GE 公司	华东理工, 兖矿集团	清华大学, 达立科科技公司	西北化工院
工艺技术	气流床	气流床	气流床	气流床
排渣	熔融态排渣	熔融态排渣	熔融态排渣	熔融态排渣
进料形式	1 台气化炉配置 1 台高压煤浆泵, 1 条氧线	1 台气化炉配置 2 台高压煤浆泵, 4 条氧线	1 台气化炉配置 1 台高压煤浆泵, 分级给氧, 3 条氧线	水煤浆 + 焦油, 进料泵, 1 条氧线
烧嘴数量	单喷嘴	四喷嘴	1 主烧嘴 + 2 氧喷嘴	单喷嘴
炉壁内衬	耐火砖	耐火砖	耐火砖	耐火砖
热回收	激冷室(废锅)	激冷室	激冷室	激冷室
黑水闪蒸	多级闪蒸罐	饱和热水塔	多级闪蒸罐	多级闪蒸罐
合成气冷却	水激冷(废锅)	水激冷	水激冷	水激冷
单炉规模 (投煤 t/d)	600 ~ 1800	1000 ~ 1800	600 ~ 1300	1000
气化压力/MPa	2.0 ~ 8.7	2.0 ~ 6.5	2.0 ~ 4.0	2.0 ~ 6.5
气化温度/°C	1350	1350	1350	1350
煤种范围	煤种有局限性, 常用的是烟煤。要求煤活性较好, 灰熔点低, 灰分少	同 GE	同 GE	同 GE, 同时混配其他含碳物质(如焦油、沥青等)
煤质要求	可磨指数 > 60; 灰熔点 < 1400°C; 灰分 < 16%; 含水 < 20% 等	同 GE	同 GE	同 GE
技术优势	单炉投资少, 可采用 2 开 1 备等稳定的生产模式; 流程简单, 压力可做到 8.7MPa	单炉能力大, 消耗低	可减缓主烧嘴磨蚀, 降低头部温度, 延长烧嘴寿命	同 GE
技术不足	C 转化率难以达到 98%	单炉投资大, 流程复杂, 小型工厂不适宜	氧气控制复杂, 开停车程序比 GE 繁琐	同 GE

## 二、水煤浆气化装置工艺流程类型及主要设备介绍

### (一) 工艺流程类型

水煤浆气化工艺一般属于气流床气化技术, 是将煤加水磨成浓度为 60% ~ 65% 的水煤浆, 用纯氧作气化剂, 在高温高压下进行气化反应, 生成富含 CO + H<sub>2</sub> 的有效气, 然后经炭

洗塔洗涤炭黑后送往后工序。气化压力为 2.0 ~ 8.7MPa，气化温度约 1350℃，液态排渣，煤气中 CO 与 H<sub>2</sub> 之和占组分的 80% 左右，不含焦油、酚等有机物质，对环境无污染，碳转化率 96% ~ 99%，气化强度大，炉子结构简单，能耗低，运转率高，而且煤适应范围较宽。目前水煤浆气化运行规模最大商业装置是 Tampa 电站，1989 年立项，1996 年 7 月投运。该装置为单炉，日处理煤 2000 ~ 2400t，气化压力为 2.8MPa，氧纯度为 95%。

气化装置一般分为 5 个单元：煤的输送和储存、煤浆制备、气化、闪蒸、炭黑处理和火炬等。图 1-1 为水煤浆气化工艺流程图。

## (二) 主要设备

水煤浆气化装置主要设备有气化炉、破渣机、锁斗阀、锁头、炭洗塔、高压煤浆泵、棒磨机、烧嘴等。

### 1. 气化炉

气化炉是水煤浆气化装置的核心设备，其主体为承压壳体，包括耐火衬里、破渣机、表面温度计及锁渣阀等附属部分。图 2-1 为 GE 气化炉示意图。

(1) 承压壳体 分上下两部分，上部为燃烧室，下部为激冷室。操作压力可达 8.7MPa，操作温度燃烧室为 1350℃。壳体材料一般选用 1.25Cr-0.5Mo 高温合金钢；激冷室壳体一般采用 1.25Cr-0.5Mo+304L。

(2) 耐火衬里 主要作用是隔热、保温和抵御高温熔渣的冲刷和侵蚀。国产耐火材料已经达到国际同类产品先进水平，热面砖的寿命已达 1.5 年，损蚀率小于 0.01mm/h，且耐火衬层施工质量经过多年的实践，已达到较好的技术。国内供货。

(3) 激冷环 安装在气化炉燃烧室和激冷室相连接的喉部。该部件操作条件极为苛刻，是气化炉中关键的易损部件，材料一般为 incolloy825。

### 2. 破渣机

破渣机是一台置于气化炉下部出口的炉渣破碎机械，其作用是防止大块炉渣堵塞系统。该设备结构复杂设计制造难度大。

### 3. 锁斗阀

锁斗随炉渣的定时排放在 0 气化操作压力之间循环受压，锁斗阀起到密封和排渣的双重作用。由于锁斗阀频繁启闭操作又必须严密不漏的特殊要求，因而成为 GE 水煤浆气化装置安全稳定操作的关键部件之一。因系统压力高，阀门大，炉渣有腐蚀和磨蚀性，锁斗阀的设计制造和维修要求很高。

### 4. 锁斗

锁斗是 GE 水煤浆气化装置重要设备之一，主要起储存和排放炉渣作用，是一台承受循环载荷的压力容器。按其载荷性质，该设备须遵循压力容器应力分析设计规范进行设计、制造和检验。该设备材料一般采用 16MnR。

### 5. 炭洗塔

炭洗塔是 GE 水煤浆气化装置中关键设备之一，其主要作用是将气化炉送出的经文丘里管洗涤的粗合成气，进一步洗涤净化和气水分离，塔的结构一般采用板式塔。壳体材料宜采用 16MnR+316L 复合钢板，塔盘和内件宜采用 316L。

### 6. 高压煤浆泵

该泵通常采用活塞式隔膜泵，使介质脉动减少，稳定煤浆流量。高压煤浆泵主要是将煤浆加压送入气化炉，无备用泵。目前高压煤浆泵已初步采用国产化。

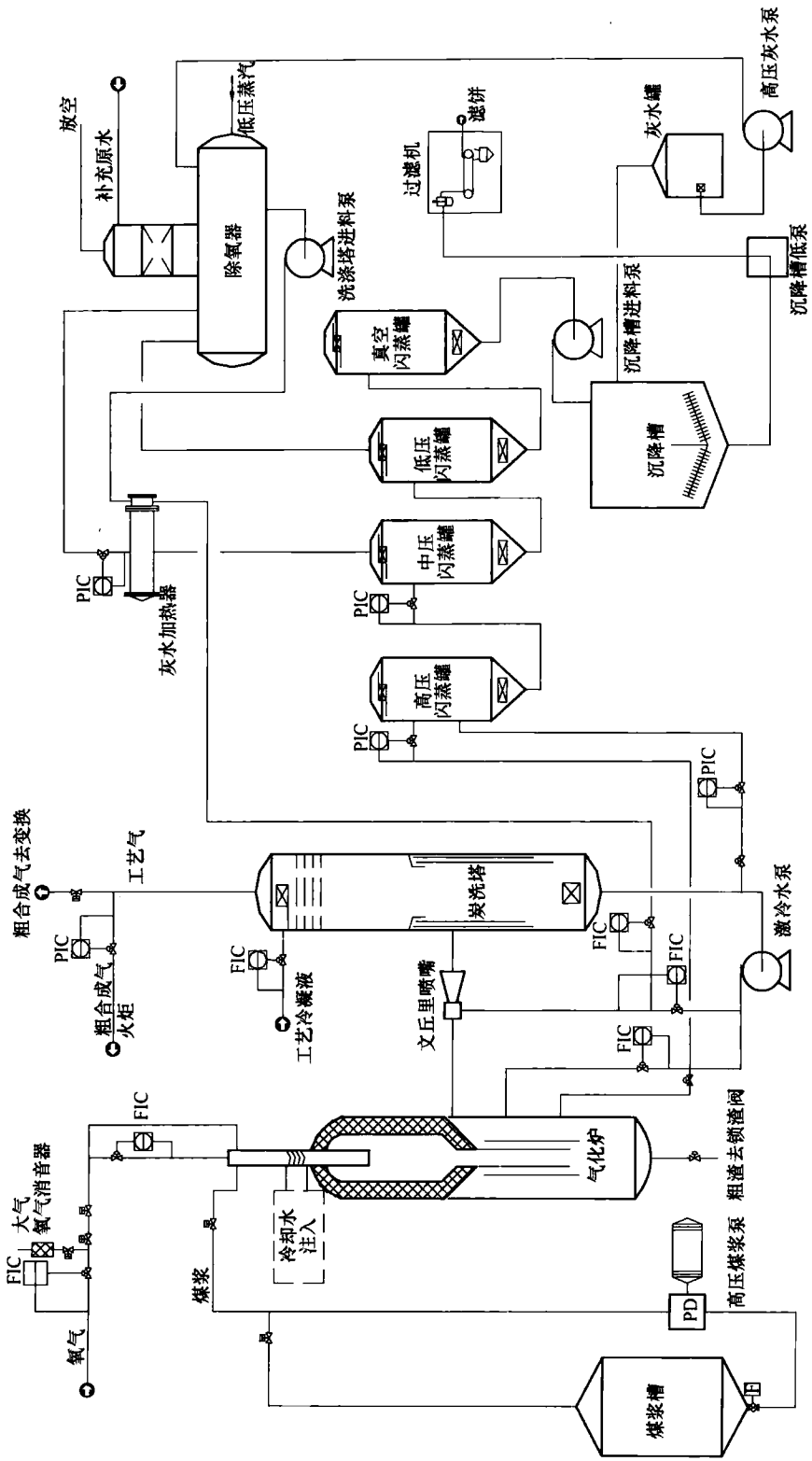


图 1-1 GE 水煤浆气化工流程图

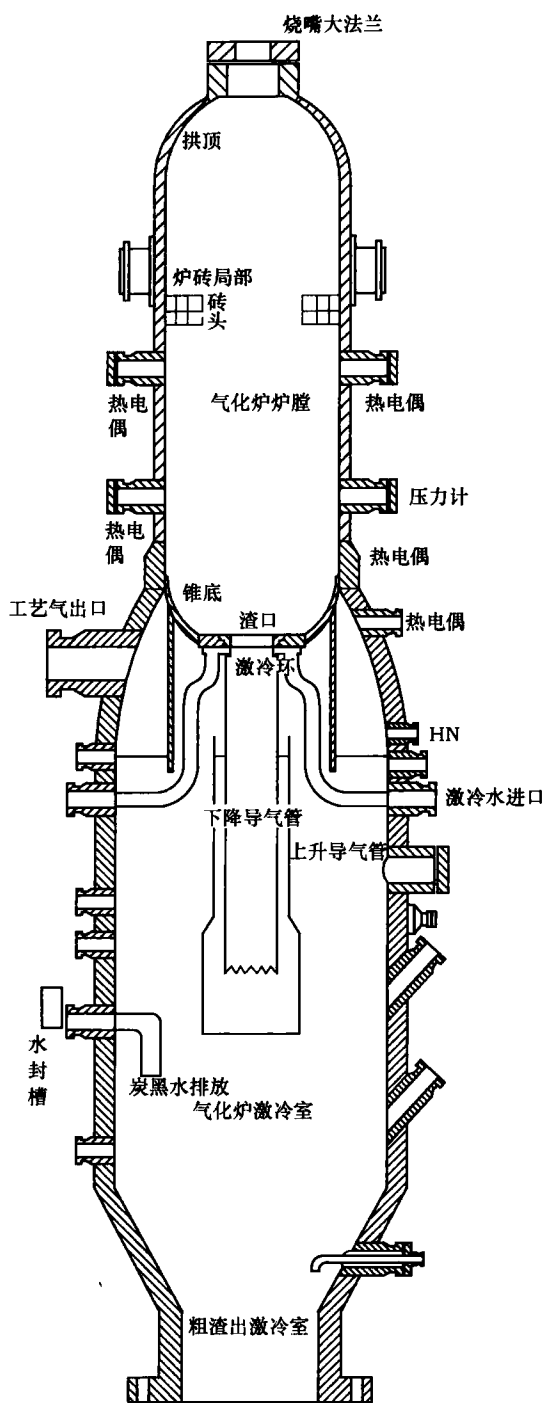


图 1-2 GE 气化炉示意图

## 7. 烧嘴

气化炉烧嘴是气化的关键设备之一，一般气化炉烧嘴连续使用时间决定了气化炉的连续运行时间。烧嘴一般有 3 个流道，中心和外环流道走氧气，中心环隙流道走煤浆。烧嘴损坏主要是头部磨损导致煤浆雾化不好；烧嘴泄漏，高温工艺气泄漏到烧嘴冷却水导致烧嘴冷却水超温超压甚至爆炸。烧嘴材料一般为 incolloy625，头部材料一般为 Co50 或 H188 等合金材料。

### (三) 水煤浆气化工艺的技术特点

水煤浆气化工艺的基础技术是 GE 水煤浆技术。GE 水煤浆气化法是借鉴 GE 重油气化技术发展而来的，其特点是可用廉价的烟煤为原料，磨成 60% ~ 65% 的水煤浆，与氧气在炉内发生不完全燃烧反应制取高温合成气，经冷激或废热锅炉冷却，激冷流程适合于制取氢气、羰基合成气及合成甲醇和氨，废锅流程适用于发电及制羰基合成气。其特点是：固态煤变成水煤浆后，流动性好，易于输送和计量，气化时煤浆中水成为蒸汽，不用再加蒸汽，气化炉出口气激冷后使粗煤气饱和。直接进变换，因此变换工段不用再加蒸汽。此工艺流程简单，设备少，能量利用合理。

GE 气化反应的优点：

(1) GE 气化反应在国内外应用广泛，工程设计比较成熟。我国山东鲁南化肥厂于 1993 年建成 2 台 GE 水煤浆气化炉，1994 年通过专家考核投入正常生产，1994 年上海焦化厂有四套 GE 水煤浆气化炉生产线投入生产甲醇及 CO，1996 年渭河化肥厂 30 万吨合成氨装置三台 GE 气化炉投入生产，2001 年淮南化肥厂 18 万吨/年合成氨投产。2005 年 9 月金陵石化化肥原料技改工程投入运营，目前运行良好。2006 年 1 月南化

公司大化肥原料改造项目一次投料成功。

(2) GE 水煤浆气化工艺技术成熟，生产经验丰富，设备和材料已基本实现国产化，建设周期短。

(3) GE 激冷气化炉产生的工艺气被水蒸气直接饱和，在后续的变换单元，不需要大量

补充蒸汽。

(4) 气化反应在较高压力下进行，不需要压缩机，产品气体就能达到较高压力，降低能耗。

### 三、水煤浆气化工艺的危险性分析

水煤浆气化装置主要危险部位及危险危害因素分布如表 1-2 所示。

表 1-2 水煤浆气化装置主要危险部位及危险危害因素分布

危险部位	主要危险物质	主要危险危害因素
输煤、制浆厂房	煤粉尘	机械伤害、噪音、火灾、爆炸
GE 煤气化炉	水煤气(CO、H <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S)、O <sub>2</sub> 、烘炉燃料气、N <sub>2</sub>	高温、火灾、爆炸、中毒
闪蒸系统	CO、H <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、N <sub>2</sub>	烫伤、火灾、爆炸、中毒
火炬	水煤气、H <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> S、CH <sub>4</sub> 、燃料气、N <sub>2</sub> 以及其他单元排出的气体	火灾、爆炸、中毒

#### (一) 原煤输送和储存

煤(焦)为乙类固体火灾危险性物质，煤(焦)在一定的条件下可着火燃烧而造成火灾。煤储存时间过长，还可发生自燃，而引发火灾。煤自燃可能导致附近电缆、电线短路，引起火灾。

煤(焦)在卸料、运输、破碎、筛分过程中产生粉尘。其产生的粉尘可造成粉尘危害。如果粉尘在料斗、储斗内部积聚，未及时清除，积聚的煤粉遇明火或其他点火源，有可能引起粉尘燃烧，甚至引起局部空间发生粉尘爆炸。

皮带、破碎机、振动筛以及翻车机等装卸设备在运行中，如发生故障，或者作业人员违章操作、麻痹大意、安全防护不当都可能造成机械伤害。作业人员在清理料仓、皮带、车皮以及检修设备等作业过程中，如安全措施不落实，粗心大意也可发生机械伤害、高空坠落等人身伤害事故。

输煤单元存在火灾、爆炸、粉尘、噪声、机械伤害等多种危险有害因素。

#### (二) 煤浆制备单元

煤浆的制取对气化反应有直接的安全影响。制浆过程中，大量水进入高压煤浆泵进、出口管线，造成进气化炉煤浆浓度突然降低，可能导致气化炉过氧爆炸的严重后果。因此，煤浆管线的冲洗水管线必须确认关闭，必要时上盲板，大煤浆槽底部煤浆分析取样冲洗时，必须操作人员进行执行、确认。

大煤浆槽底部煤浆管线堵塞，冲洗处理必须小心谨慎。如南京惠生公司在 2007 年曾发生操作人员误将高压煤浆泵进口冲洗水打开，导致炭洗塔严重爆炸，整个炭洗塔出口大盖被掀开。

煤浆的黏度、粒度是煤浆稳定性表观参数。黏度低时，煤浆稳定性差，容易分层、析水、堵塞管线。导致高压煤浆泵堵转，入气化炉煤浆流量波动，入炉煤浆浓度波动，严重时气化炉超温、过氧爆炸的危险。黏度高时，容易堵塞、磨损煤浆管线，高压煤浆泵吸入困难，造成打量下降，导致气化炉入炉煤浆波动。黏度过高，煤浆管线、烧嘴磨损加剧加大泄漏的风险。

煤浆粒度过大，会降低煤浆稳定性。



高压煤浆泵在运行过程中，打开进口、出口导淋，或导致煤浆管线卸压的行为，是极度危险的行为。因为煤浆管线一般没有设计单向阀，气化炉内工艺气和氧气可能倒回煤浆管线，造成煤浆管线严重的爆炸。因此，煤浆管线泄漏、煤浆泵隔膜进、出口单向阀泄漏、手动打开高压煤浆泵出口导淋、高压煤浆泵出口煤浆回流阀泄漏都是高风险因素。

进入棒磨机、环锤破碎机、料仓等设备内检修时，必须按照进入受限空间作业环节办理相应的设备交出、进入受限空间作业票。

设备的交出包含断电、固定转动部件、通风、清理、隔断工艺物料、和前后单元的设备之间的联系、挂作业警示牌、告知、风险识别等有关内容。

1996年，原南化氮肥厂动力车间球磨机就发生过人员擅自进入设备内，操作人员不知情，启动设备时造成人员死亡的重大安全事故。

### （三）炭黑单元

炭黑装置是一套重要的环保装置。

炭黑或炭黑水中的氨-氮化合物能导致江水富营养。炭黑或炭黑水 COD 较高，严重破坏水系的氧气环境，使动植物缺氧窒息。炭黑或炭黑水的钙镁离子容易在植物表面析出，固化在植物表面，导致水生植物死亡。炭黑或炭黑水中的微量重金属对人体有害，直接饮用造成人体中毒。炭黑分散剂是 pH 值 2~6 的酸性物质，具有常有的酸性特性：腐蚀、不可触摸、不可食用。触摸到分散剂，有严重的灼痛感，会导致皮肤灼伤、脱落。分散剂进入眼睛，可能导致失明。分散剂的装卸、输送等环节要尽量密闭。分散剂槽、管线、泵出现泄漏要及时汇报，防止泄漏的分散剂溅到人体上。操作人员在从事与分散剂有关的操作或在分散剂附近区域活动时，要穿戴好防护用品。要定期检查分散剂的平台栏杆，防止跌落滑到并接触到分散剂。

### （四）煤气化和闪蒸

煤气化具有高温高压、易燃易爆、有毒有害等特点。

煤气化装置较高风险的因素有：泄漏、过氧爆炸、超温超压、气化反应失控、物流紊乱。

#### 1. 泄漏

较高风险的泄漏包括煤浆泄漏、烧嘴冷却水泄漏和工艺气泄漏等。

##### （1）煤浆泄漏

如果煤浆管线发生大的煤浆泄漏，气化炉停车联锁未及时停车，未及时隔断气化炉和煤浆管线，可能导致烧嘴、煤浆管线剧烈爆炸。

2006年，某石化公司气体联合车间煤气化装置煤浆管线上的吹扫氮气管线振动断裂，导致煤浆管线失压，工艺气和氧气从炉头煤浆管线倒回，导致了严重的烧嘴和炉头煤浆管线爆炸。

2008年，某石化公司煤气化装置，2名操作人员误将运行的高压煤浆泵出口煤浆导淋打开，导致煤浆管线失压，气化炉内工艺气和氧气快速倒回煤浆管线，导致烧嘴和高压煤浆泵出口所有煤浆管线爆炸。

##### （2）烧嘴冷却水泄漏

烧嘴冷却水发生泄漏主要指气化炉工艺气通过烧嘴盘管泄漏到烧嘴冷却水系统中。烧嘴冷却水系统设置了流量、温度和流量差联锁，烧嘴冷却水还设置了一氧化碳在线监测系统，监测到一氧化碳时，往往说明烧嘴出现了内漏。