

基于道化学法的煤气化炉点火安全分析

张友军¹, 杨宏辉², 郝军¹, 黄安龙², 张正¹, 陈龙²

(1. 中国石油江汉机械研究所有限公司, 湖北 荆州 434000; 2. 武汉三江航天远方科技有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 煤气化点火过程涉及高温、高压、易燃易爆等危险工况, 需要严格的安全设计分析。文章运用道化学法开展了煤气化炉点火的安全分析, 研究表明, 在采取安全控制措施后, 丙烷的危险等级由“很大”降低为“较轻”, 三乙基硼烷的危险等级由“很大”降低为“中等”, 硅烷的危险等级由“非常大”降低为“中等”, 安全风险在可控范围内; 所采取的安全措施对降低事故风险效果显著。研究结果可为同类设备的安全分析提供借鉴, 确保系统从设计到交付使用全过程的安全可靠。

关键词: 道化学法; 煤气化; 煤气化点火; 煤气化炉; 安全分析

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2024)S2-0318-08

Safety analysis of coal gasifier ignition based on the dow chemical method

ZHANG Youjun¹, YANG Honghui², HAO Jun¹, HUANG Anlong², ZHANG Zheng¹, CHEN Long²

(1. Jiangnan Machinery Research Institute Limited Company of CNPC, Jinzhou 434000, China;

2. Wuhan Sanjiang Aerospace Distant Technology Co. Ltd, Wuhan 430000, China)

Abstract: The ignition process of coal gasification involves dangerous conditions, such as high temperature, high pressure, and inflammable/explosive substances, which necessitates meticulous safety design analysis. In this study, the Dow Chemical Method was employed to conduct such a safety analysis. The results demonstrated that through implementation of stringent safety control measures, the risk level of propane could be reduced from "very large" to "low", that of triethylborane from "very large" to "medium", and that of silane from "very large" to "medium". Consequently, the safety risks associated with the process became within a controllable range. The adopted safety measures could significantly mitigate the risk of accidents. The research findings could provide valuable guidance for the safety analysis of other coal gasification equipment, ensuring the overall safety and reliability of the system from its design to operational stages.

Key words: Dow Chemical Method; coal gasification; coal gasification ignition; coal gasifier; safety analysis

0 引言

20世纪80年代, 美国道化学公司率先提出了一种定量的危险指数的评价方法, 道化学火灾、爆炸危险指数法(以下简称道化学法), 用于评价整个系统装置的火灾、爆炸危险程度^[1], 其被广泛应用于生产^[2-4]、使用^[5-7]、存储^[8-10]、运输^[11]等过程中涉及量较大的易燃易爆或活性危险物质的安全评价^[12]。

煤气化技术是煤炭清洁高效利用的关键核心技术^[13], 是指煤在特定的设备内, 在一定温度及压力下使煤中有机质与气化剂发生一系列化学反应, 将

固体煤转化为可燃气体和非可燃气体的过程。煤气化炉是将煤作为气化燃料进行可燃气体制造的发生炉, 是该技术的最主要设备, 其类型有固定床气化炉^[14-16]、流化床气化炉^[17-19]、气流床气化炉^[20]。

本文针对煤气化模拟试验装置所涉及的危险因素进行辨识和分析, 并给出安全对策措施及安全预案, 用于指导煤气化模拟试验装置设计、施工、运输、试验过程中的安全作业, 以确保系统从设计到交付使用全过程安全可靠。

1 模拟试验装置系统介绍

试验装置如图1所示, 作为煤气化模拟试验的反应容器, 主要用于煤层点火及气化试验, 研究井下

收稿日期: 2023-07-31; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.23073103

基金项目: 中国石油天然气集团科技专项“煤炭地下气化关键技术研究及先导试验”项目资助(2019E-2504)

作者简介: 张友军(1971—), 男, 湖北孝感人, 硕士, 高级工程师。E-mail: zhangyujun@cnpc.com.cn

通讯作者: 杨宏辉(1986—), 男, 湖北麻城人, 硕士, 高级工程师。E-mail: yanghonghui@yfqjny.com

引用格式: 张友军, 杨宏辉, 郝军, 等. 基于道化学法的煤气化炉点火安全分析[J]. 洁净煤技术, 2024, 31(S2): 318-325.

ZHANG Youjun, YANG Honghui, HAO Jun, et al. Safety analysis of coal gasifier ignition based on the dow chemical method[J]. Clean Coal Technology, 2024, 31(S2): 318-325.



图1 设备图

煤层的点火工艺,模拟井下煤层的气化过程。工作环境的特殊性要求设备能耐高温和高压。依据 GB/T 150.2—2011、GB/T 150.3—2011、HG/T 20570—95 等国家、企业及行业标准进行设计。

2 安全风险识别及控制措施

试验过程涉及易自燃危险化学品的高压环境点火试验,由于危险因素较多,导致安全控制要求高。其面临的主要安全风险及相应的安全控制措施见表1。

表1 安全风险及控制措施

风险因素	主要风险	安全控制措施	安全设计准则
高温	设备损坏,人员伤亡	采用冷却设备,并设置隔热层	热设计安全准则
超压	设备损坏,人员伤亡	采用调节阀和安全阀并联,二级控压	耐压力设计安全准则
爆炸	设备损坏,人员伤亡	装置上安装爆破片; 设置隔离墙并远程控制试验进程,禁止人员试验期间靠近试验装置。	防火及防爆设计安全准则
火灾	设备损坏,人员伤亡	现场供应消防水、配备灭火器等消防器材	防火及防爆设计安全准则
起重伤害	吊装时脱钩等造成人员伤亡	对吊具、吊索质量严格把关,并定期维护,操作时严格遵守相关安全规程	机械产品设计安全准则

针对安全风险提出的控制措施,需要通过设计达到预防或控制的效果。主要进行的安全设计包括耐高温安全设计、耐高压安全设计、防爆安全设计、施工安全设计、运输安全设计等。

3 安全设计分析评价

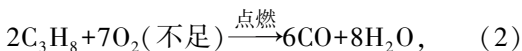
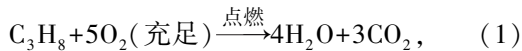
3.1 评估程序

采用道化学火灾、爆炸指数评价法进行安全设计分析评价,其评估计算程序如图2所示。

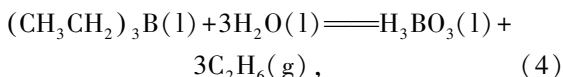
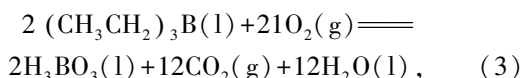
3.2 特征燃料使用安全分析

确定煤气化炉为工艺单元,单元内涉及丙烷、三乙基硼烷、硅烷等易燃易爆物质,物理性质见表2。

丙烷在氧气充足和氧气不足时的化学反应式如下:



三乙基硼烷的相关化学反应式如下:



硅烷的相关化学反应式如下:

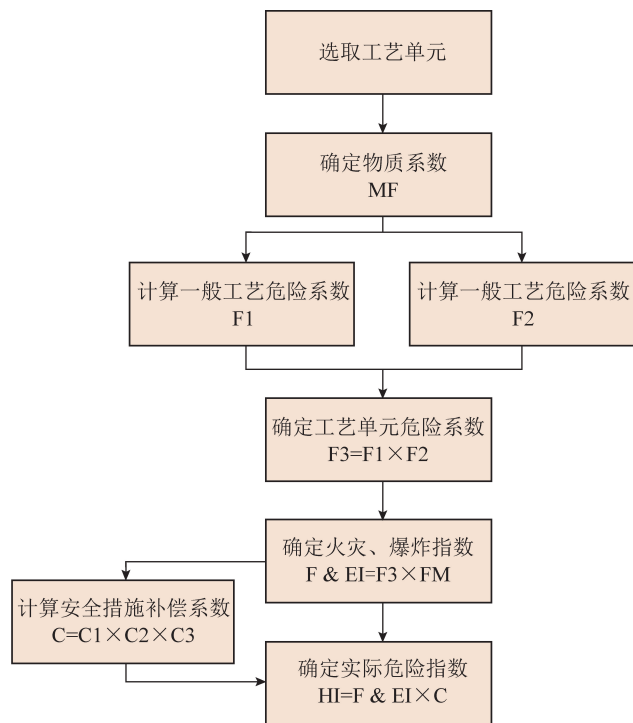
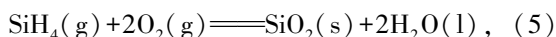
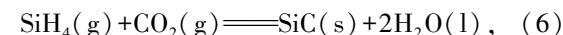
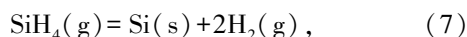


图2 风险评估计算程序图



300℃以上时硅烷发生分解反应:



硅烷在酸性和中性水中比较稳定,但在碱性水中容易分解:

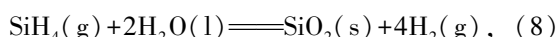
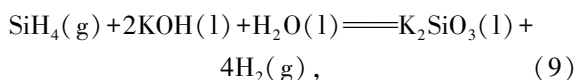


表 2 燃料物理性质

物料名称	丙烷 ^[21]	三乙基硼烷	硅烷 ^[22]
化学式	CH ₃ CH ₂ CH ₃	C ₆ H ₁₅ B	SiH ₄
性状	无色气体	无色透明发烟液体	无色气体,有大蒜气味
溶解性	微溶于水,溶于乙醇、乙醚	不溶于水,溶于乙醇、乙醚	溶于水,几乎不溶于乙醇、乙醚、苯、氯仿、硅氯仿和四氯化硅
密度/(kg·m ⁻³)	1.83(气体)	8.65e ⁻⁴	11.14e ⁻⁴
熔点/°C	-187.6	-92	-185
沸点/°C	-42.1	95	-112
闪点/°C	-104	-35.6	
临界温度/°C	96.8		-3.5
临界压力/MPa	4.25		4.864
引燃温度/°C	450		
爆炸上限(V/V)	9.5%		
爆炸下限(V/V)	2.1%		



3.3 参数取值及计算过程

确定以煤气化炉为工艺单元,单元内涉及丙烷、三乙基硼烷、硅烷及原煤等易燃易爆物料,确定上述物质为 MF 物质,确定其物质系数后,分别计算其火

灾、爆炸危险指数 F&EI。物质系数是表述物质在燃烧或其他化学反应中引起火灾、爆炸时释放能量大小的内在特性,是一个基础数值,可查道化学火灾、爆炸指数评价法附表获取。表外物质系数可根据物质燃烧性 NF(由热值决定)和化学不稳定性 NR 来确定,其对应关系见表 3。

表 3 物质系数对比表

	NF	0	1	2	3	4
MF						
NR						
0		1	4	10	16	21
2		14	14	14	16	21
3		24	24	24	24	24
4		29	29	29	29	29
5		40	40	40	40	40

丙烷物质系数查附表可知为 21,三乙基硼烷和硅烷的物质系数不在附表内,需分别确定其 NF

和 NR,然后根据表 3 来确定其物质系数,具体见表 4。

表 4 易燃物质系数表

物质名称	燃烧性 NF	化学不稳定性 NR	物质系数 MF
丙烷	4	0	21
三乙基硼烷	4	2	24
硅烷	3	3	29
原煤	2	0	10

确定物质系数后,进一步确定工艺单元危险系数(F3)中的各项系数,选择物质在工艺单元中所处

的最危险的状态。上述物料的火灾、爆炸指数 F&EI 具体见表 5。

表5 火灾、爆炸指数

易燃易爆物料:丙烷、三乙基硼烷、硅烷、原煤	工艺单元名称:煤气化炉				
	MF 物质	丙烷	三乙基硼烷	硅烷	原煤
	物质系数 MF	21	24	29	10
操作温度:夏季最高温度 40 ℃	工艺危险系数取值标准	工艺单位危险系数			
主要因素	1.一般工艺危险系数(F1)				
A.放热化学反应	1.轻微放热反应取 0.3,如中和反应。 2.中等放热反应取 0.5,如氧气反应。 3.剧烈放热反应取 1.0,如卤化反应。	0.5	0.5	0.5	0.5
B.吸热反应	1.煅烧,系数取 0.4。 2.电解,系数取 0.2。 3.解,直接火加热取 0.4;电加热或高温气体间接加热取 0.2。	0	0	0	0.4
C.封闭单元或室内单元	1.粉尘过滤或捕集器安置在封闭区域内,系数取 0.5。 2.在封闭区域内,在闪点以上处理易燃液体时,系数取 0.3。 3.在封闭区域内,在沸点以上处理易燃液体时,系数取 0.6。 4.若工艺单元为明火炉,则本项不取系数。	0	0	0	0
D.通道	通道要求:装置周围至少在两个方向上设有通道,至少有一条通道通向公路,火灾时消防道路可以看作第二条通道,设有监控水枪并处于待用状态。 整个操作区面积大于 925 m ² ,且通道不符合要求,系数取 0.35。 操作区面积小于上述值,且通道不符合要求,影响消防时,系数取 0.2。	0.2	0.2	0.2	0.2
一般工艺危险系数 F1(A-D 各项系数相加)		0.7	0.7	0.7	1.1
	2.特殊工艺危险系数(F2)				
A.毒性物质	1.短期接触可引起刺激,致人轻微伤害,系数取 0.2。 2.高浓度或短期接触可致人暂时失去能力或残留伤害,系数取 0.4。 3.短期接触可致人严重失去能力或残留伤害,系数取 0.6。 4.短暂接触也能致人死亡或严重伤害,系数取 0.8。	0.4	0.6	0.2	0
B.粉尘爆炸	1.粉尘粒径>175 μm,系数取 0.25。 2.粉尘粒径为 150~175 μm,系数取 0.5。 3.粉尘粒径为 100~150 μm,系数取 0.75。 4.粉尘粒径为 75~100 μm,系数取 1.25。 5.粉尘粒径<75 μm,系数取 2.0。	0	0	0	0.25
C.释放压力	操作压力高于大气压时,由于高压可能会引起高速率泄露,因此要采用危险系数,危险系数取值: $Y = 0.161\ 09 + 1.615\ 03(X/1\ 000) - 1.428\ 79(X/1\ 000)^2 + 0.517\ 2(X/1\ 000)^3$,其中 X 为表压/(lb·in ⁻²)。	5.44	5.44	5.44	0.78

续表

易燃易爆物料:丙烷、三乙基硼烷、硅烷、原煤	工艺单元名称:煤气化炉				
	MF 物质	丙烷	三乙基硼烷	硅烷	原煤
	物质系数 MF	21	24	29	10
D.腐蚀	1.腐蚀速率 $V < 0.127$ mm/a,系数取 0.1。 2. $0.127 < V < 0.254$ mm/a,系数取 0.2。 3. $V > 0.25$ mm/a,系数取 0.5。	0.2	0.2	0.2	0.2
E.泄漏-接头和填料	1.泵和压盖密封处发生轻微泄露,取 0.1。 2.泵、压缩机和法兰连接处产生正常的一般泄露时,系数取 0.3。 3.承受热和压力周期性变化的场合,系数取 0.3。 4.物料是有渗透性和磨蚀性的浆液,或者工艺单元使用转动轴封或填料函时,系数取 0.4。 5.单元中有玻璃视窗、波纹管或膨胀节时,系数取 1.5。	0.3	0.3	0.3	0.3
特殊工艺危险系数 F2(A-E 各项系数相加)		6.34	6.54	6.14	1.53
工艺单元危险系数($F3 = F1 \times F2$)	1~8	4.43	4.58	4.29	1.68
火灾、爆炸指数($F&EI = F3 \times MF$)		93.2	110	124	16.8

表 6 是火灾、爆炸危险指数 F&EI 与危险程度之间的关系,通过对比表 6 可知,原煤处于低风险,丙烷和三乙基硼烷处于较大风险,硅烷处于重大风险。因此,需对工艺单元采取安全措施补偿。

表 6 F&EI 及危险等级表

F&EI	≤60	60~90	90~120	≥120
危险等级	较轻	中等	很大	非常大
对应《实施指南》	低风险	一般风险	较大风险	重大风险

3.4 安全措施补偿

对煤气化炉的安全风险采取工艺控制、物质隔

离和防火措施等安全措施,查安全措施补偿系数表,经过计算,得出各 MF 物质安全系数见表 7。

表 7 安全措施补偿系数

项目	补偿系数取值	采用补偿系数				具体安全设计及安全控制措施
		丙烷	三乙基硼烷	硅烷	原煤	
1.工艺控制						
A.应急电源	基本设施具有应急电源,补偿系数取 0.98。 只有当应急电源与评价单元事故的控制有关时才考虑该系数。	0.98	0.98	0.98	0.98	供应冷却水的泵配备应急电源。
B.冷却装置	1.冷却系统难保证在出现故障时维持正常的冷却 10 min 以上,补偿系数为 0.99。 2.有备用冷却系统,冷却能力为正常需要量的 1.5 倍且至少能维持 10 min,补偿系数取 0.97。	0.99	0.99	0.99	0.99	设备壳体外设置夹套水冷散热。
C.抑爆装置	1.设备上安有抑爆装置或设备本身有抑爆作用时,系数为 0.84。 2.采用防爆膜或泄爆口,系数为 0.98。	0.98	0.98	0.98	0.98	设备配备安全阀及爆破片。

续表

项目	补偿系数取值	采用补偿系数				具体安全设计及 安全控制措施
		丙烷	三乙基硼烷	硅烷	原煤	
1.工艺控制						
D.紧急停车装置	1.情况出现异常能紧急停车并转换到备用,系数取 0.98。 2.重要的转动设备装有振动测定仪时,若振动只能报警,系数取 0.99。 若振动仪能使设备自动停车,系数取 0.96。	1	1	1	1	
E.计算机控制	1.设置了在线计算机以帮助操作者,但它不直接控制关键设备或经常不用计算机操作时,系数取 0.99。 2.具有失效保护功能的计算机直接控制工艺操作时,系数为 0.97。 3.采用下列两项措施之一,则系数为 0.93。 ①关键现场数据输入的冗余技术; ②关键输入的异常中止功能; ③备用的控制系统	0.93	0.93	0.93	0.93	装置控制系统具备关键输入的异常中止功能及备用的控制系统。
F.操作规程/程序	正确的操作指南、完整的操作规程,可取系数 0.91~0.99。	0.95	0.95	0.95	0.95	
工艺控制安全补偿系数 C1 (a-i 各项系数相乘)		0.84	0.84	0.84	0.84	
2.物质隔离						
A.远距离控制阀	1.如果单元备有遥控的切断阀,系数为 0.98。 2.如果阀门至少每年更换一次,系数为 0.96。	0.98	0.98	0.98	0.98	装置备有遥控气动切断阀。
B.备用泄料装置	1.如果备用贮槽能安全地(有适当冷却和通风)直接接受单元内的物料,系数为 0.98。 2.备用贮槽安置在单元外,系数为 0.96。	1	1	1	1	
C.排放系统	1.为移走泄漏物,地面斜度至少保持 2%(硬质地面 1%),以使泄漏物流至尺寸合适的排放沟,系数取 0.97。 2.排放沟能容纳最大贮罐内的所有物料再加上第二大贮罐 10%物料,以及消防水 1 h 喷洒量,系数取 0.91。	1	1	1	1	
D.连锁装置	装有连锁系统以避免出现错误的物料流向以及由此引起的不需要反应时,系数取 0.98。	0.98	0.98	0.98	0.98	
物质隔离安全补偿系数 C2 (a-d 各项系数相乘)		0.96	0.96	0.96	0.96	

续表

项目	补偿系数取值	采用补偿系数				具体安全设计及 安全控制措施
		丙烷	三乙基硼烷	硅烷	原煤	
3. 防火设施						
A. 泄漏检测装置	1. 安装了可燃气体检测器, 但只能报警, 系数取 0.98。 2. 若既能报警又能在达到燃烧下限之前使保护系统动作, 则系数取 0.94。	0.98	0.98	0.98	0.98	
B. 钢质结构	1. 防火涂层涂覆高度大于 5 m, 系数为 0.98。 2. 涂覆高度 5~10 m, 系数为 0.97。 3. 涂覆高度大于 10 m, 系数为 0.95。 防火涂层必须及时维护, 否则不能去补偿系数。	1	1	1	1	系统单元无防火涂层, 装置四周放置水马。
C. 消防水供应	1. 消防水压力为 690 kPa (表压) 或更高时, 系数为 0.94。 2. 压力低于 690 kPa 时, 系数为 0.97。	1	1	1	1	试验场地附近无消防水供应, 但备有消防器材。
D. 特殊系统	特殊系统包含烟火探测器、防爆墙或防爆小层等, 具备适合该单元安全措施的火系统, 可取系数 0.91。	0.91	0.91	0.91	0.91	装置外设置水马。
E. 喷洒系统	具有洒水灭火系统, 系数取 0.97。	0.97	0.97	0.97	0.97	装置配备喷淋水管。
F. 泡沫灭火装置	1. 设置了远距离手动控制的将泡沫注入标准喷洒系统的装置, 系数取 0.94。 2. 全自动泡沫喷射系统, 系数为 0.92。	1	1	1	1	
G. 手提式灭火器	1. 配备了手提式或移动式灭火器, 系数取 0.98。 2. 安装了水枪, 系数取 0.97。 3. 若能在远距离控制水枪, 系数为 0.95。 4. 带有泡沫喷射能力的水枪, 系数为 0.93。	0.98	0.98	0.98	0.98	试验现场配备了手提式灭火器。
H. 电缆防护	1. 电缆有 14~16 号钢板金属罩保护, 且有喷水保护装置, 系数取 0.98。 2. 无喷水装置, 金属罩上涂有耐火材料, 系数也为 0.98。 3. 电缆管理地下的电缆沟内, 系数取 0.94。	0.94	0.94	0.94	0.94	
防火设施安全补偿系数 C3 (a-i 各项系数相乘)		0.797	0.797	0.797	0.797	
安全措施补偿系数 (C=C1×C2×C3)		0.643	0.643	0.643	0.643	

注: 无安全补偿系数时, 填入 1.00, 即 C=1.00。

3.5 评估结果

危险分析汇总见表 8, 采取安全措施补偿后, 煤气化炉的火灾爆炸危险指数 F&EI 均有较大程度下降, 其中丙烷补偿后危险等级降为“较轻”, 对应风

险等级为低风险; 三乙基硼烷和硅烷补偿后危险等级降为“中等”, 对应的控制风险等级为一般风险。因此, 三乙基硼烷和硅烷在使用过程中应严格依据安全操作规程, 谨慎使用。

表8 危险分析汇总

内容	工艺单元评估结果			
	丙烷	三乙基硼烷	硅烷	原煤
火灾、爆炸危险指数(F&EI)	93.2	110	124	16.8
危险等级	很大	很大	非常大	较轻
安全措施补偿系数(C)	0.643	0.643	0.643	0.643
补偿后火灾、爆炸危险指数	59.9	70.7	79.7	10.8
补偿后危险等级	较轻	中等	中等	较轻
与《实施指南》对应的控制风险等级	低风险	一般风险	一般风险	低风险

4 结论

1) 基于道化学火灾、爆炸指数评价法,通过对煤气化炉的风险因素进行辨识、分析、安全控制措施研究后,分析得到丙烷的危险等级由“很大”降低为“较轻”,三乙基硼烷的危险等级由“很大”降低为“中等”,硅烷的危险等级由“非常大”降低为“中等”,原煤的危险等级处于“较低”,煤气化炉安全风险在可控范围内。

2) 通过30余次煤炭地下气化点火模拟试验充分验证了安全控制措施和安全预案的有效性。

3) 研究表明所采取的安全措施对降低事故风险效果显著。

参考文献:

[1] 张乃禄. 安全评价技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2016.

[2] 于雁武,刘玉存,袁俊明,等. 环氧乙烷生产系统的安全性评价[J]. 安全与环境学报,2005,3(7):34-36.

[3] 王安. 甲醛生产装置火灾爆炸危险性的评价[J]. 化工催化剂及甲醇技术,2007,32(1):24-25.

[4] 曾灵波. 聚丙烯生产工艺系统安全评价[J]. 中国职业安全卫生管理体系认证,2004,3:24-27.

[5] 宋元宁,高成凤. 应用DOW化学火灾爆炸指数法对石化气体分馏装置分析与评价[J]. 化工安全与环境,2003,16(19):2.

[6] 靳涛. 10万吨/年甲醇装置气化炉区安全评价[J]. 化工劳动保护,2001,22(5):4.

[7] 杨柳,丁六兵. 火灾爆炸危险指数评价法在催化裂化装置中

的应用[C]. 2010中国消防协会科学技术年会论文集. 2010.

[8] 孙剑. 道化学公司危险指数评价方法在乙二醇装置环氧乙烷罐区的应用[J]. 化工劳动保护,2001,22(8):3.

[9] 王志云,肖勇,贾伟玲,等. 汽油储罐火灾爆炸事故定量安全评价方法简析[J]. 安全,健康和环境,2006,6(7):29-30.

[10] 黄郑华,范豪杰. 油罐区火灾爆炸危险性评价及其控制[J]. 安防科技:安全经理人,2004(8):3.

[11] 赵军,靳江红. 应用DOW化方法对液化石油气(LPG)储运项目输送管道的风险评价[J]. 安全,2006,(5):7.

[12] 李小伟. 道化学火灾、爆炸指数评价法在危化企业安全评价中的应用研究[D]. 天津:天津理工大学,2008.

[13] 王辅臣. 煤气化技术在中国:回顾与展望[J]. 洁净煤技术,2021,27(1):33.

[14] 曾杰,张兴芳. BGL固定床熔渣气化技术简介[J]. 云南化工,2018,45(9):210-211.

[15] 王庚宵,郭靖. BGL气化炉装置搅拌器长周期运行实践[J]. 煤炭科学技术,2018,46(S2):246-248.

[16] 刘立强. 中煤图克项目BGL气化炉阶段性运行分析[J]. 煤化工,2020,48(6):53-55.

[17] 彭万旺,步学朋,王乃继,等. 加压粉煤流化床气化技术试验研究[J]. 煤炭转化,1998(4):69-76.

[18] 曾上游. 浅谈我国自主研发的气流床煤气化技术现状与发展[J]. 广东化工,2011,38(5):299-300.

[19] 褚晓亮,苗阳,付玉玲,等. 流化床气化技术在我国的应用现状及发展前景[J]. 化学工程师,2014,28(1):50-52.

[20] 蔡昂. 当前主流气流床煤气化工艺技术分析[J]. 化工管理,2017(33):95.

[21] 胡景江,文建雷,景耀,等. 杨树体内苯丙烷代谢与其对溃疡病抗性的关系[J]. 植物病理学报,1992,22(2):185-188.

[22] 李宝莲. 八甲基环甲硅氧烷聚合动力学[J]. 有机硅材料,1998,012(005):1-4.