

ICS 13.100  
CCS C27

ZJATAXX/XXX-XXXX

T/ZJATA

浙 江 测 试 团 体 标 准

T/ZJATA XXXX—XXXX

化学实验反应风险评估与预防技术规范

Technical specification for risk assessment and prevention of chemical  
experimental reactions

(征求意见稿 2023-1-10)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

浙江省分析测试协会 发布

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由浙江省分析测试协会提出并归口。

本文件起草单位：浙江化安安全技术研究院有限公司、浙江吉华集团股份有限公司、上虞京新药业有限公司。

本文件主要起草人：王俊、洪亮、徐海波、谢刚、… …。

## 引 言

了解反应物料性质、控制化学反应进行是化学实验室安全运行的重要保障。通过不同维度揭示反应的风险源，确定化学反应的风险，规避或预防风险，对反应安全性的认识、实验操作的正常开展，以及实验室的安全运行都有着重要的意义，也有利于从本质上提升反应工艺产业化过程中的安全水平，有效预防安全事故的发生。

# 化学实验反应风险评估与预防技术规范

## 1 范围

本文件规定了化学实验反应风险评估的方法和风险预防的技术规范。

本文件适用于化工行业的化学实验反应风险评估与预防。其他行业的实验室可参照使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB13690-2009 化学品分类和危险性公示 通则

GB/T 24777-2009 化学品理化及其危险性检测实验室安全要求

GB/T 27476.5-2014 检测实验室安全 第5部分：化学因素

GB/T 34065-2017 分析仪器的安全要求

GB/T 34708-2017 化学品风险评估通则

GB/T 22232-2008 化学物质的热稳定性测定 差示扫描量热法

GB/T 42300-2022 精细化工反应安全风险评估规范

## 3 术语和定义

GB/T 34065-2017、GB13690-2009、GB/T 42300-2022 界定的术语和定义适用本文件。

## 4 化学实验过程的影响因素与风险等级划分

### 4.1 总则

化学实验的潜在风险在于非预期的实验结果，会造成实验室受损、人员伤亡。按GB/T 24777-2009、GB/T 27476.5-2014、GB/T 34708-2017规定，对化学实验反应过程的影响因素识别，对风险等级进行划分，可预防或降低事故发生的概率和影响程度，提高化学实验运行的安全系数。

影响化学实验安全的主要因素包括实验温度、实验压力、实验物料（使用剂量、物理危险性、健康危险性）、实验反应热（合成反应绝热温升、分解反应绝热温升）、实验设备（耐腐蚀性、安全性）、实验操作、实验前处理和后处理及化学实验类型。

根据潜在风险可能造成的危害划分为稍有风险、轻度风险、中度风险、高度风险、严重风险5个风险等级，分别用风险等级指数1、2、3、4、5表示，各风险等级对应可能造成的危害如表1所示。

表1 风险等级对应的危害

风险等级	可能造成的危害
1	实验危险性较低
2	实验室轻度受损或人员轻度伤害
3	实验室中度受损或人员中度伤害
4	实验室严重受损或人员严重伤害
5	实验室毁灭性受损或人员病危

根据各影响因素的风险等级计算实验的风险系数（亦分为5个风险等级），结合常见化学反应风险定级，确定该化学实验风险综合等级，以对应实施相应的风险预防、控制措施，降低化学实验的风险。

#### 4.2 实验温度、压力

实验温度、压力的风险等级划分如表2所示。

表2 实验温度、压力风险等级

风险等级	实验温度( $T$ ) °C	实验压力( $P$ ) barG
1	$0 < T < 44$	$-1 < P < 0.5$
2	$-20 < T \leq 0$ 或 $44 \leq T < 60$	$0.5 \leq P < 9$
3	$T \leq -20$ 或 $60 < T < 100$	$9 \leq P < 20$
4	$100 \leq T < 170$	$20 \leq P < 39$
5	$\geq 170$	$\geq 39$

注1：以冻伤和烫伤的温度范围定义温度风险等级为1级的温度范围。  
注2：对于实验温度范围较大的，以最高值或最低值进行评定，取等级高者。

#### 4.3 实验物料

##### 4.3.1 使用总剂量

实验物料使用剂量的风险等级如表3所示。对特殊反应（如氧化反应），实验物料剂量必须考虑物料配比对爆炸极限的影响（见4.8节表19）。

表3 实验物料使用剂量、物理危险性、健康危险性风险等级

风险等级	总剂量(M) g	物料物理危险性评估值 ( $\alpha$ )	物料健康危险性评估值 ( $\beta$ )
1	<10	<5	<5
2	10≤M<150	5≤ $\alpha$ <10	5≤ $\beta$ <10
3	150≤M<500	10≤ $\alpha$ <20	10≤ $\beta$ <20
4	500≤M<1000	20≤ $\alpha$ <40	20≤ $\beta$ <40
5	≥1000	≥40	≥40

## 4.3.2 物理危险性

对照《全球化学品统一分类和标签制度》(GHS)物理危险性划分类别,查询原料和产物(物料)中物质的化学品安全技术说明书(MSDS)中对应的物理危险性,根据物质的物理危险性分值 $\alpha_i$ (物质危险性赋值方式示例见附录A)和物质的质量权重 $X_i$ ,确定物料的物理危险性评估值 $\alpha$ 。 $\alpha$ 越大,则物料的物理危险性越高。物料物理危险性评估值 $\alpha$ 按公式(1)计算:

$$\alpha = \sum X_i \times \alpha_i \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\alpha$ ——物料物理危险性评估值;

$X_i$ ——物料中某一物质的质量权重;

$\alpha_i$ ——物料中某一物质的物理危险性分值。

物料中物质的物理危险性分值按表4进行统计,实验物料物理风险等级如表2所示。

表4 实验物料的物理危险性分值

序号	类型	类别与分数	原料 1	原料 2	原料 3	原料 4	产物 1	产物 2
1	爆炸物	1-7 (系数3)						
2	易燃气体	1-3 (系数3)						
3	气雾剂	1-3 (系数3)						
4	氧化性气体	1 (系数8)						
5	高压气体	1 (系数6)						
6	易燃液体	1-4 (系数2)						
7	易燃固体	1-2 (系数4)						
8	自反应物质和混合物	1-5 (系数2)						
9	发火液体	1 (系数10)						
10	发火固体	1 (系数10)						
11	自热物和混合物	1-2 (系数4)						
12	遇水放出易燃气体的物质和混合物	1-3 (系数5)						
13	氧化性液体	1-3 (系数3)						
14	氧化性固体	1-3 (系数3)						

序号	类型	类别与分数	原料 1	原料 2	原料 3	原料 4	产物 1	产物 2
15	有机过氧化物	1-5 (系数 2)						
16	金属腐蚀剂	1 (系数 6)						
17	退敏爆炸物	1-4 (系数 3)						
单物质物理危险性分值 $\alpha_i$								
物料物理危险性评估值 $\alpha$								
注 1: 参考《全球化学品统一分类和标签制度》(GHS) 分类进行评定; 注 2: 根据物料的 GHS 类型和类别对实验人员、设备等的情况, 对各类别物质的危险性赋值, 物质危险性赋值方式示例见附录 A (1 类的危险性最高, 赋值最高); 注 3: MSDS 没有对应 GHS 类别的默认为 0; 注 4: 单物料分值为各类型分值之和; 注 5: 小计分值按单物料质量分数对单物料分值进行加权平均, 原料和产物 (包括副产物) 分别计算后相加, 反应前后未变化的物料不重复计算。								

#### 4.3.3 健康危险性

对照 GHS 健康危险性划分类别, 查询物料中物质的 MSDS 中对应的健康危险性, 根据物质的健康危险性分值 $\beta_i$  (物质危险性赋值方式示例见附录 A) 和物质的质量权重 $X_i$ , 确定物料的健康危险性评估值 $\beta$ 。 $\beta$ 越大, 则物料的健康危险性越高。物料健康危险性评估值 $\beta$ 按公式 (2) 计算:

$$\beta = \sum X_i \times \beta_i \dots \dots \dots (2)$$

式中:

$\beta$ ——物料健康危险性评估值;

$X_i$ ——物料中某一物质质量权重;

$\beta_i$ ——物料中某一物质的健康危险性分值。

物料中物质的健康危险性分值按表 5 进行统计, 实验物料健康风险等级如表 2 所示。

表 5 实验物料的健康危险性分值

序号	类型	级别与系数	原料 1	原料 3	原料 3	原料 4	产物 1	产物 2
1	急毒性物	1-5 (系数 4)						
2	皮肤腐蚀/刺激物	1-3 (系数 4)						
3	严重眼损伤/眼刺激物	1-3 (系数 4)						
4	呼吸或皮肤致敏物	1-2 (系数 2)						
5	生殖细胞致突变性	1-2 (系数 2)						
6	致癌性	1-2 (系数 2)						
7	生殖毒性	1-3 (系数 2)						
8	特定目标器官毒性 (单次接触)	1-3 (系数 4)						
9	特定目标器官毒性	1-2 (系数 2)						

序号	类型	级别与系数	原料 1	原料 3	原料 3	原料 4	产物 1	产物 2
	(多次接触)							
10	吸入危险	1-2 (系数 2)						
单物质健康危险性分值 $\beta_i$								
物料健康危险性评估值 $\beta$								
注：物料的健康危险性分值计算方式与物理危险性一致。								

#### 4.4 实验反应热

##### 4.4.1 合成反应绝热温升

合成反应为化学反应的主要研究对象(含副反应),合成反应中的绝热温升应按公式(3)计算:

$$\Delta T_{ad} = \frac{Q_r}{m \times C_p} \dots \dots \dots (3)$$

式中:

$\Delta T_{ad}$ ——合成反应的绝热温升,单位为开(K);

$Q_r$ ——合成反应放热的总热量,单位为千焦(kJ);

$m$ ——合成反应后料液的混合质量,单位为千克(kg);

$C_p$ ——合成反应后料液的混合比热容,单位为千焦/(千克×开)(kJ/(kg·K))。

合成反应放热的总热量 $Q_r$ 根据公式(4)计算:

$$Q_r = n \times \Delta_r H \dots \dots \dots (4)$$

式中:

$\Delta_r H$ ——合成反应的反应焓,单位为千焦/摩尔(kJ/mol);

$n$ ——合成反应焓计量的基准反应物的物质的量,单位为摩尔(mol)。

典型化学反应的反应焓如表6所示,其他反应可通过文献键能查找或差式扫描量热仪DSC等量热仪实验获得合成反应的反应焓。合成反应绝热温升的风险等级划分如表7所示。

表6 典型化学反应的反应焓

反应类型	反应焓 $\Delta_r H$ kJ/mol
中和反应(盐酸)	-55
中和反应(硫酸)	-105
重氮化反应	-65
磺化反应	-150
胺化反应	-120
环氧化反应	-100
聚合反应(苯乙烯)	-60
加氢反应(烯烃)	-200
加氢(氢化)反应(硝基类)	-560
硝化反应	-130



反应类型	反应焓 $\Delta_r H$ kJ/mol
氯化反应（取代类）	-120
金属有机物合成反应	-300
注：本表部分数据引自《化工工艺的热安全-风险评估与工艺设计》。部分数据由 NIST Chemistry WebBook 数据库查询得到。	

表 7 合成反应、分解反应绝热温升风险等级

等级	合成反应绝热温升 ( $\Delta T_{ad}$ ) K	分解反应绝热温升 ( $\Delta T_{ad,d}$ ) K
1	<25	$\Delta T_{ad,d} < 50$
2	$25 \leq \Delta T_{ad} < 50$	$50 \leq \Delta T_{ad,d} < 100$
3	$50 \leq \Delta T_{ad} < 200$	$100 \leq \Delta T_{ad,d} < 300$
4	$200 \leq \Delta T_{ad} < 400$	$300 \leq \Delta T_{ad,d} < 600$
5	$\geq 400$	$\geq 600$

注：通气反应，实验时若能时时切断进气，可根据气相和液相未反应物料计算绝热温升。

## 4.4.2 分解反应的绝热温升

若发生分解反应失控，分解反应中的绝热温升应按公式（5）计算：

$$\Delta T_{ad,d} = \frac{Q_d}{m \times C_p} \dots \dots \dots (5)$$

式中：

$\Delta T_{ad,d}$ ——分解反应的绝热温升，单位为开（K）；

$Q_d$ ——分解反应所放出的总热量，单位为千焦（kJ）；

$m$ ——合成反应后料液的混合质量，单位为千克（kg）；

$C_p$ ——合成反应后料液的混合比热容，单位为千焦/（千克×开）（kJ/(kg·K)）。

分解反应放热的总热量  $Q_d$  根据公式（6）计算：

$$Q_d = n \times \Delta_d H \dots \dots \dots (6)$$

式中：

$\Delta_d H$ ——分解反应的反应焓，单位为千焦/摩尔（kJ/mol）；

$n$ ——分解反应焓计量的基准反应物的物质的量，单位为摩尔（mol）。

典型的官能团分解反应的反应焓如表 8 所示，根据物质结构中典型官能团的数目可估算物料分解的绝热温升，如表 9 所示。其他反应可通过差式扫描量热仪 DSC 等量热仪实验获得分解反应的反应焓。

分解反应绝热温升的风险等级划分如表 7 所示。

表 8 不同官能团二次分解反应的反应焓

官能团		分解焓 $\Delta_d H$ kJ/mol
重氮盐	$—N=N^+$	-160 ~ -180
重氮基	$—N=N—$	-100 ~ -180
异氰酸酯	$—N=C=O$	-50 ~ -75

官能团		分解焓 $\Delta_a H$ kJ/mol
氮-氢氧化物	$>N-OH$	-180 ~ -240
过氧化物	$>C-O-O-C<$	-350
硝基	$Ar-NO_2$ 或 $R-NO_2$	-310 ~ -360
硝酸酯	$-O-NO_2$	-400 ~ -480
环氧化物	$\begin{array}{c} -C-C- \\   \quad   \\ O \end{array}$	-70 ~ -100

注：本表引自《化工工艺的热安全-风险评估与工艺设计》。

表9 物料分解的绝热温升

物质	包含的官能团	单物质分解温升	总分解温升
原料 1			
原料 2			
原料 3			
原料 4			
产物 1			
产物 2			
产物 3			

注 1：含常见官能团的物质，利用不同官能团二次分解反应的反应焓计算单物质分解温升，含多个易分解官能团的则累加分解温升；  
注 2：对单物料温升一般要考虑物料组成占比，合成反应产气时可保守不考虑反应后气体的组成占比（即分解放热均作用于固体和液体升温）；  
注 3：总分解温升为原料和产物分别计算分解绝热温升后加和，反应前后未变化的物料不重复计算；  
注 4：纯金属有机物的分解放热初步定为 150kJ/mol（参考甲基氯化镁测试的分解热）。

## 4.5 实验设备

### 4.5.1 耐腐蚀性

通过分析设备材质和介质性质，可得到实验的腐蚀性等级。根据表 10 汇总实验设备材质和物料腐蚀性信息，确定物料对设备材质的腐蚀能力（材质耐腐蚀性查询示例见附录 B）。设备耐腐蚀性风险等级和可能造成的危害如表 11 所示。

表 10 介质腐蚀性表

序号	项目	值
1	设备材质（含金属浆）	
2	介质	
3	介质浓度	
4	反应温度	
5	酸碱性（pH）	
6	耐腐蚀性	

注 1：设备材质要考虑釜、传感器、浆、加料泵送管路设备、排气管路、贮存容器、搅拌机（电路板）；  
注 2：常用设备材质有：石英、玻璃、陶瓷；哈式合金、钛、316 不锈钢、304 不锈钢、蒙乃尔合金；石墨烯（泵）、聚四氟乙烯、氟化塑料、硅胶（密封）、ABS 塑料、PMMA（亚克力板材）、聚丙烯（烧杯）、聚乙烯（手套）、丁腈橡胶（手套）；  
注 3：混合介质的腐蚀性按各自浓度评定，特殊的如硫酸中含氯化钠则要考虑盐酸，具体看《腐蚀性数据与选材手册》P<sub>330</sub> 开始的说明；  
注 4：不确定的先进行小剂量试验验证，使用《腐蚀数据与选材手册》P<sub>51</sub> 失重法计算物料对涉及材质的腐蚀率，判定设备是否可用。

表 11 实验设备耐腐蚀性、安全性风险等级

等级	耐腐蚀性描述	设备安全系数 $Y$
1	优良	$\geq 3.0$
2	良好	$2.0 \leq Y < 3.0$
3	可用	$1.0 \leq Y < 2.0$
4	不适用	$Y < 1.0$

批注[Wang Jun1]:

#### 4.5.2 安全性

设备的安全保障功能、自动化程度、生产年限等会影响实验危险程度。设备缺乏自动控温、自动泄压、自动报警、自动切断、紧急降温等自动化控制功能或生产年限过长会使实验的风险提高。根据设备自动化控制功能数目除以设备生产时间（不足  $n$  年按  $n$  年计）得到设备安全系数  $Y$ ，设备安全性风险等级划分如表 11 所示。

批注[Wang Jun2]:

#### 4.6 实验操作

涉及加料等操作时，采用的方式影响实验的危险程度，根据自动化情况、操作条件等判定实验操作风险等级，如表 12 所示。

表 12 实验操作风险等级

等级	实验操作描述
1	质量泵、色谱泵、推进泵加料
2	手动常压加料
3	高温出料、需惰性气体保护的出料
4	气瓶加料、带压球压入、绝热温升 $> 100K$ 的反应一次性投料、非常规工艺加料顺序

注：主要关注加料和出料方式，试压为反应压力的体现部分，反应速度快的实验杜绝一次性投料，含多种操作描述的以等级高者定级。

#### 4.7 实验前处理和后处理

除了研究的化学反应本身，还附带一些非反应的前置处理过程或后续处理过程。根据处理过程涉及加热、带压、剧毒物料（急性毒性1级、2级）、手动加料等实验条件的数目确定前处理和后处理风险等级，如表13所示。

表13 实验前处理和后处理风险等级

序号	危险条件数
1	0
2	1
3	2
4	≥3

#### 4.8 实验风险定级

实验风险系数  $Z = (\text{物料物理风险等级} + \text{物料健康风险等级} + \text{合成反应的绝热温升风险等级} + \text{分解反应的绝热温升风险等级} + \text{设备耐腐蚀性风险等级} / 2) \times (\text{实验温度风险等级} \times \text{实验压力风险等级} \times \text{实验物料使用总剂量风险等级} \times \text{实验操作风险等级} \times \text{设备安全性风险等级})^{0.3} + \text{前处理和后处理风险等级} \times 10$ 。根据表14确定实验风险系数  $Z$  对应的实验风险等级。

典型危险化学反应因其特殊风险突出，故在评定风险等级设定最低等级，部分特别危险的实验应避免直接进行，如表15所示。结合实验风险等级和典型危险化学反应风险等级，取等级高者作为实验风险综合等级，实验风险定级汇总表16。

表14 实验风险等级

等级	风险系数 $Z$
1	$<20.0$
2	$20.0 \leq Z < 70.0$
3	$70.0 \leq Z < 200.0$
4	$200.0 \leq Z < 400.0$
5	$\geq 400.0$

表 19 典型危险化学反应风险等级

等级	反应类型
3	1. 通(产)剧毒/易燃易爆气体反应: 通 $Cl_2$ / $SO_2$ / $HCl$ / $HF$ /光气/ $CH_3Cl$ / $NH_3$ / $H_2$ / $O_2$ 等
	2. 易自燃物质反应: 金属有机物合成
	3. 含硝基物特殊反应: 硝化、硝化物磺化
	4. 物质热稳定性差且分解剧烈的反应: 分解升温升压明显的重氮化
<p>注 1: 未做过的典型危险实验(或含需特殊前/后处理的实验)风险综合等级至少为 3 级, 资料也要收集齐全;</p> <p>注 2: 整个实验涉及的所有操作(包括含实验的前处理/后处理、淬灭等)都需要定级, 并非仅仅针对反应过程;</p> <p>注 3: 若腐蚀性风险等级为 3 级及以上, 实验风险综合等级至少为 3 级;</p> <p>注 4: 绝热升温大/产气明显的反应杜绝一次性投料;</p> <p>注 5: 一般不进行纯硝基化合物打底的反应/合成纯金属有机物的反应;</p> <p>注 6: 通氧气的反应要考虑配比是否达到爆炸极限, 一般不进行达到爆炸极限配比的实验;</p> <p>注 7: 重氮液浓度在 10% 以上的重氮化反应一律先进行快速筛选验证, 若分解升温升压明显, 实验风险综合等级至少为 3 级;</p> <p>注 8: 出过事故后再次做该实验, 风险等级提升 1 级, 并备注该实验发生过事故。</p>	

批注[Wang Jun3]:

表 20 实验风险定级汇总表

项	实际值	对应等级
实验温度风险		
实验压力风险		
实验物料使用剂量风险		
实验物料物理风险		
实验物料健康风险		
合成反应绝热温升风险		
分解反应绝热温升风险		
实验设备耐腐蚀性风险		
实验设备安全性风险		
实验操作风险		
实验前处理和后处理风险		
实验风险系数		
实验风险综合等级		

## 5 化学实验风险预防、控制措施

### 5.1 1-2 级的风险预防、控制

风险综合等级1-2级的实验，风险较小，风险预防、控制方式为：

- a) 初步探究配置：实验组自行探究，结合相关资料总结风险点，探究完成后向主管汇报，遇到无法自行探究的由主管辅导探究，经主管审核同意后可开展实验；
- b) 仪器设备配置：按照实验要求选择合适的实验仪器进行实验，针对1-2级反应且物料组成不确切的反应需提前进行快速筛选实验或10mL以下的预实验；
- c) 防护用品配置：基本配置为护目镜、防毒面罩、手套，并按照实验需求、样品需求配置其他防护用品；
- d) 实验人员及监督人员配置：实验组自行实验，主管例行巡查；
- e) 应急用品配置及相应应急预案：实验室本身配置应急用品已满足需求，执行常规的灭火应急预案。

### 5.2 3 级的风险预防、控制

风险综合等级3级的实验，风险较大，其风险预防、控制方式为：

- a) 初步探究配置：主管带领实验组进行探究，若无法解决则上报实验风险判定小组，安环部组织人员召开会议进行讨论，经实验风险判定小组人员审核确认后可开展实验可开展实验；
- b) 仪器设备配置：按照实验要求选择合适的实验仪器进行实验，针对3级及以上的反应需提前进行快速筛选实验或10mL以下的预实验，选择自动化程度高、安全性高的设备；
- c) 防护用品配置：基本配置为护目镜、防毒面罩、手套，并按照实验需求、样品需求配置其他防护用品，必要时穿戴防护服、防毒面具；
- d) 实验人员及监督人员配置：实验组进行实验，主管监督实验关键节点情况；
- e) 应急用品配置及相应应急预案：除实验室本身配置应急用品外，根据该反应情况配备额外的应急用品，执行专项应急预案。

### 5.3 4-5 级的风险预防、控制

风险综合等级4-5级的实验，风险极大，其风险预防、控制方式为：

- a) 初步探究配置：由安环部组织（人员构成为实验风险判定小组成员、主管、实验组成员）召开会议进行讨论，经实验风险判定小组人员审核确认后可开展实验（无此类实验经验的先开展完整的预实验，包括预处理和后处理，实验量不得超过10mL，或进行快速筛选实验），非必要避免使用危险物料；
- b) 仪器设备配置：优先使用小型量热仪开展实验，若必须使用一般仪器进行实验需

由主管向实验室负责人发起申请，经由实验室负责人同意后开展实验，选择自动化程度高、安全性高的设备；

c) 实验前预演：主管召集实验室负责人、风险判定小组成员、实验组成员及有经验的实验组成员开展实验前预演会，由实验组组长讲解实验方案、设备搭建等过程，主要人员指出整个过程危险的点在哪里，如何防护，可能发生怎样的危险，如何处置；

d) 防护用品配置：除配置基本的护目镜、防毒面罩、手套外，在关键节点必须穿戴防护服、防毒面具，极其危险的实验需要佩戴正压式呼吸器；

e) 实验人员及监督人员配置：实验组进行实验，一个有该类实验经验的实验组进行指导，主管或安环部全程监督；

f) 应急用品配置及相应应急预案：除实验室本身配置应急用品外，根据该反应情况配备额外的应急用品（消防沙不得少于4桶，灭火器不得少于6个），制定该反应专项应急预案。实验前调试呼救铃是否正常，并由实验人员进行事故专项应急预案演练。实验时安排专人看监控，发现异常及时上报。

#### 5.4 腐蚀性3级及以上的风险预防、控制

由于介质腐蚀性3级及以上时设备的耐腐蚀性差，其对应风险预防、控制方式为：

a) 初步探究配置：对于不确定腐蚀性的物料先模拟正常实验的仪器设备及工艺进行预实验探究配置确定腐蚀的严重度，一般使用《腐蚀数据与选材手册》 $P_{51}$ 失重法计算物料对涉及材质的腐蚀率，判定设备是否可用，不可用的按3级及以上处置；

b) 仪器设备配置：对仪器设备的腐蚀较明显的需提前做好仪器的保护措施，准备应急用中和剂，在实验前在仪器设备关键位置放置pH试纸（实验时监控pH试纸变化，腐蚀严重的加大监控频次），由部门主任向实验室负责人发起申请，经由实验室负责人同意后开展实验；

c) 防护用品配置：基本配置为护目镜、防毒面罩、防腐蚀手套，并按照实验需求、样品需求配置其他防护用品，必要时穿戴防护服、防毒面具；

d) 实验人员及监督人员配置：组长及组员进行实验，主任监督实验过程关键节点；

e) 应急用品配置及相应应急预案：除实验室本身配置应急用品外，根据该反应情况配备额外的应急用品，执行专项应急预案。

#### 5.5 专项应急预案

##### 5.5.1 现场触电应急预案

若出现触电事故，应先切断电源或拔下电源插头，若来不及切断电源，可用绝缘物挑开

电线，在未切断电源之前，切不可用手去拉触电者，也不可用金属或潮湿的物体挑电线。分析漏电的程度，如果较为严重，在切断电源后，马上通知专业电工处置，并指挥实验人员离开现场。遇到人员触电，应及时施救，若触电者出现休克现象，要立即进行人工呼吸，并请医生治疗，同时上报领导。

#### 5.5.2 常规火灾应急预案

发现火灾时，需进行的操作为：

- a) 趁火情较小，首先用灭火毯及消防砂迅速扑灭；
- b) 若火势未灭则用灭火器进行灭火；
- c) 及时向上级汇报情况；
- d) 佩戴好防护用具进入事故区域进行后续处置。

#### 5.5.3 刺激性液体、有毒气体泄漏应急预案

当发现实验室存在刺激性液体、气体泄漏时，需进行的操作为：

- a) 在有条件的情况下，第一时间找到并关闭泄漏源；
- b) 打开实验室所有通风设备，开窗并通知实验室其他人员撤离实验室；
- c) 及时向上级汇报情况，可以是自己的主管，安环部或实验室负责人；
- d) 注意关门，防止气味逸散至楼道走廊；
- e) 佩戴好防护用具（防毒面具、护目镜等）进入泄漏实验室（一般配备两人进入，一人喷洒处理，一人从旁协助），进行应急处置。若泄漏的是酸性物质则喷洒1%氢氧化钠溶液，若泄漏的是碱性物质则喷洒1%醋酸溶液，如泄漏的是中性物质则喷洒水（喷洒的液体会放置在实验室固定区域，并贴上相应标签）。优先对楼道进行喷洒，喷洒两次后快速拖地。

#### 5.5.4 自燃物质泄漏起火应急预案

当发现实验室存在自燃物质泄漏起火时，需进行的操作为：

- a) 在有条件的情况下，及时关闭管路阀门，防止物料持续泄露；
- b) 用灭火器迅速灭火，并用消防砂进行覆盖，灭火过程快速有序，用完的灭火器和消防砂桶别乱丢，留下后续处置通道并通知人员疏散；
- c) 及时切断电源，防止引发电气火灾，同时向上级汇报情况，可以是自己的主管，安环部或实验室负责人；
- d) 穿戴好防护用品后进入事故场所进行后续处理。



### 5.5.5 腐蚀性物质泄漏应急预案

当发现实验室存在腐蚀性物质泄漏时，需进行的操作为：

- a) 穿戴好防护用品后用消防砂制作临时围堰防止腐蚀性物质四处流淌；
- b) 小心收集至收纳容器内并转移至安全区域进行淬灭；
- c) 对残留的液体缓慢稀释后转移至安全区域进行淬灭；
- d) 加大量水清洗。

### 5.6 事故调查

实验发生事故后，开展事故调查工作，完成事故报告，对类似工艺做风险判定，提出可调整的操作/工艺路线，并进行人员培训与考核，存档。

## 6 评定步骤

化学实验反应风险评估与风险预防的步骤如下：

- a) 分析实际需进行的反应的实验条件（温度、压力、物料配比等）、所需设备、操作方案等，反应所涉及的前/后处理过程；
- b) 根据实验条件、物料、设备、操作等，结合查询资料，从各维度计算实验的风险等级；
- c) 根据各维度影响因素计算实验的风险系数，获得实验风险等级；
- d) 结合典型危险反应的风险等级，评定实验风险综合等级；
- e) 结合各维度影响因素风险、实验风险综合等级及应急预案，针对性地做相应处置措施；
- f) 若发生事故则进行事故调查，分析事故原因和应对措施，针对同类反应，实验前在措施上应进行更完备的准备。

## 7 风险评估与预防报告规范

7.1 风险评估与预防报告应该包括以下内容：

- a) 实验基本信息；
- b) 实验各维度的风险分等级；
- c) 实验风险综合等级及对应的应急预案与处置措施。

7.2 化学反应风险评估与预防示例见附录 C。

## 8 限制说明

依据本文件的过程中应该注意以下几点：

- a) 化学反应一般指非放射性物质参与的化学反应，不含生物实验；
- b) 物料的物理危险性和健康危险性一般针对组成确定、信息可查的情况，如组成复杂无法准确分析，建议使用自动化程度较高的设备进行小规模实验，避免人员直接接触；
- c) 合成反应绝热温升根据同类或类似反应的反应焓变，结合实际浓度、比热容进行估算，如无类似反应参考，建议进行小规模验证实验判断；
- d) 分解反应的绝热温升一般根据物质官能团判定，如组成或结构复杂，建议进行快速筛选量热测试分解热；
- e) 物料的腐蚀性不确定时，可预先用与实验器材同类材质的材料进行测试，判断腐蚀性后再选择合适的实验器材。

附 录 A  
(资料性)  
物质危险性赋分方式示例

### A.1 爆炸物标签要素

爆炸物标签要素（不稳定爆炸物、1.1项，1.2项，1.3项，1.4项，1.5项，1.6项），分为7类（n类），危险性分值系数为3（y倍），危险性分值从高到低为 $7 \times 3$ 、 $6 \times 3$ 、 $5 \times 3$ 、 $4 \times 3$ 、 $3 \times 3$ 、 $2 \times 3$ 、 $1 \times 3$ ，即 $n \times y$ 、 $(n-1) \times y \cdots 1 \times y$ ，见表A.1。

表 A.1 GHS 爆炸物标签要素及对应物质 GHS 危险性赋分

危险分类	标签信号词	标签危险说明	危险说明编码	危险性赋分
不确定爆炸物	危险	不稳定爆炸物	H200	21
第 1.1 项		爆炸物：整体爆炸危险	H201	18
第 1.2 项		爆炸物：严重迸射危险	H202	15
第 1.3 项		爆炸物：起火、爆炸或迸射危险	H203	12
第 1.4 项	警告	起火或迸射危险	H204	9
第 1.5 项	危险	遇火可能整体爆炸	H205	6
第 1.6 项	无信号词	无危险说明	无	3

### A.2 易燃气体标签要素

易燃气体标签要素（1A，1B，2），分为3类，危险性分值系数为3，危险性分值从高到低9、6、3，见表A.2。

表 A.2 GHS 易燃气体标签要素及对应物质 GHS 危险性赋分

危险类别		标签信号词	标签危险说明	危险说明编码	危险性赋分
1A	易燃气体	危险	极其易燃气体	H220	9
	发火气体		极其易燃气体	H220	
			暴露在空气中可自燃	H232	
	化学性质不稳定气体		A	极其易燃气体 即使在无空气的条件下仍可能发生爆炸反应	
B		极其易燃气体 在高压和/或高温条件下，即使无空气仍可能发生爆炸反应	H220 H231		
1B			易燃气体	H221	6
2		警告	易燃气体	H221	3

### A.3 呼吸或皮肤致敏物标签要素

呼吸或皮肤致敏物标签要素（呼吸 1 或 1A/1B，皮肤 1 或 1A/1B），分为 2 类，呼吸致敏为较危险类，危险性分值系数为 2，危险性分值从高到低 4、2，见表 A.3。

表 A.3 GHS 呼吸或皮肤致敏物标签要素及对应物质 GHS 危险性赋分

分类		标签信号词	标签危险说明	危险说明编码	危险性赋分
危险类别	危险分类				
呼吸致敏物	1	危险	吸入可引起过敏或哮喘症状，或造成呼吸困难	H334	4
	1A				
	1B				
皮肤致敏物	1	警告	可引起皮肤过敏反应	H317	2
	1A				
	1B				

### A.4 生殖毒性标签要素

生殖毒性标签要素（1 或 1A/1B，2，附加类别），分为 3 类，危险性分值系数为 2，危险性分值从高到低 6、4、2，见表 A.4。

表 A.4 GHS 生殖毒性标签要素及对应物质 GHS 危险性赋分

危险分类	标签信号词	标签危险说明	危险说明编码	危险性赋分
1 (1A 和 1B 子类)	危险	可能对生育能力或对胎儿造成损害(说明已知的具体影响)(说明接触途径——如已确证无其他接触途径造成这一危险)	H360	6
2	警告	怀疑对生育能力或对胎儿造成损害(说明已知的具体影响)(说明接触途径——如已确证无其他接触途径造成这一危险)	H361	4
有关对哺乳或通过哺乳造成影响 的附加分类	无信号词	可能对母乳喂养的儿童造成伤害	H362	2

**附录 B**  
(资料性)  
**材质耐腐蚀性查询示例**

**B.1 腐蚀性符号说明**

《腐蚀数据与选材手册》第1版中标注的符号说明见表B.1。耐腐蚀性划分为4个等级按表14。

表 B.1 符号说明

符号	说明(腐蚀情况)
金属部分	
∨	优良
∨	良好
○	可用,但腐蚀较严重
×	不适用,腐蚀严重
非金属部分	
∨	良好,腐蚀轻微或无
○	可用,但有明显腐蚀
×	不适用,腐蚀严重

**B.2 腐蚀性查询**

《腐蚀数据与选材手册》第三篇记录了多种材质的腐蚀性数据,表B.2给出了金属及合金中碳钢和铸铁的部分耐腐蚀数据,通过符号(见表B.1)对照和说明来确认碳钢和铸铁的耐腐蚀性数据。

表 B.2 碳钢和铸铁的耐腐蚀数据(部分)

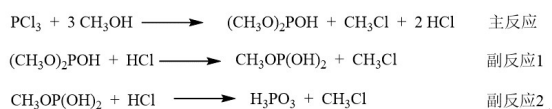
介质	浓度 %	温度 ℃			
		25	50	80	100
硫酸	<65	×	×		
	65~75	○	○	×	×
	75~100 <sup>a</sup>	∨	○	×	×
发烟硫酸	100~102	×			
	>102 <sup>b</sup>	∨	∨	∨	∨
硝酸		× <sup>c</sup>			
红发烟硝酸		○ <sup>bc</sup>			
白发烟硝酸		×			
硝酸蒸气			×	×	×
盐酸		×			
磷酸		×			
磷酸蒸气					○ <sup>b</sup>

<sup>a</sup>高转速泵、阀应采用高铬镍不锈钢。铸铁优于碳钢,可用于80~100℃;  
<sup>b</sup>铸铁不适用;  
<sup>c</sup>铬5铝7钕钛低合金钢在60~98%的酸及发烟酸中50℃以下的耐腐蚀性良好。50~70℃时耐腐蚀性较差。

附录 C  
(资料性)  
化学反应风险评估与预防示例

### C.1 实验基本信息

反应方程式:



实验设计: 前处理为蒸馏三氯化磷收集较高纯度三氯化磷。反应使用铁制反应器, 以 204.1g 蒸馏收集的三氯化磷作为打底料, 在油浴锅 (10 个月前生产) 中控温 25℃, 最后手动一次性加 158.5g 甲醇, 保温 1h, 进行酯化反应, 实验条件如表 C.1 所示。反应的原料和产物组成如表 C.2 所示。

表 C.1 物料配比和反应条件

反应名称 物质	原料		滴加温度	加料时间	反应温度	保温时间
	PCl <sub>3</sub>	甲醇	℃	h	℃	h
酯化反应	204.1g	158.5g	25	一次性	25	1

表 C.2 反应原料和产物组成

物质	原料		主、副产物		
	PCl <sub>3</sub>	甲醇	主产物	CH <sub>3</sub> Cl	HCl
质量 (占比)	204.1g (56%)	158.5 (44%)	180g (49%)	75g (21%)	109g (30%)

反应基本热力学数据:

- 此经小剂量的量热实验测得合成反应 (含副反应) 反应焓  $\Delta_r H = -44.6 \text{ kJ/mol}$  (以三氯化磷计);
- 反应后物料比热容  $C_p \approx 2 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ;
- 反应后液相料液质量约为 0.18 kg;
- 原料三氯化磷相对分子量为 137.3 g/mol, 产物亚磷酸二甲酯相对分子量为 110.05 g/mol;
- 合成反应放热量  $Q_r = -\Delta_r H \times n(\text{PCl}_3) = -(-44.6) \times (204.1/137.3) = 66.3 \text{ kJ}$
- 合成反应绝热温升  $\Delta T_{ad} = Q_r / (mC_p) \approx 66.3 / (0.18 \times 2) = 184 \text{ K}$ ;
- 差式扫描量热仪 DSC (GB/T 22232-2008 化学物质的热稳定性测定 差示扫描量热法) 测得产物 (含副产物) 的分解放热量为 1300 kJ/kg, 则  $Q_d = 1300 \times 0.18 = 234 \text{ kJ}$ ;
- 保守不考虑产气移热,  $\Delta T_{ad,d} = Q_d / (mC_p) \approx 234 / (0.18 \times 2) = 650 \text{ K}$ 。

酯化反应的介质腐蚀性如表 C.3 所示。

表 C.3 介质腐蚀性表

序号	项目	值
1	设备材质	铁制釜
2	介质	PCl <sub>3</sub> 、HCl
3	介质浓度	-
4	反应温度	25℃
5	酸碱性 (pH)	约 1
6	耐腐蚀性 <sup>a</sup>	不适用, 严重腐蚀/破坏

<sup>a</sup>通过查询《腐蚀数据与选材手册》中盐酸对铸铁的腐蚀性数据得到。

## C.2 实验各维度风险评估过程

通过对比实验条件和文献查找, 实验各维度的风险等级分值如表 C.4 - C.14 所示。

表 C.4 实验温度风险等级

温度, °C	等级
25	1

表 C.5 实验压力风险等级

压力, barG	等级
0	1

表 C.6 实验物料使用剂量风险等级

总剂量, g	等级
362.6	3

表 C.7 实验物料的物理危险性分值与风险等级

序号	类型	类别与系数	CH <sub>2</sub> O	PCl <sub>3</sub>		亚磷酸二甲酯	CH <sub>3</sub> Cl	HCl
1	爆炸物	1-7 (系数 3)						
2	易燃气体	1-3 (系数 3)					9	
3	气雾剂	1-3 (系数 3)						
4	氧化性气体	1 (系数 8)						
5	高压气体	1 (系数 6)					常压	常压
6	易燃液体	1-4 (系数 2)	6					
7	易燃固体	1-2 (系数 4)						
8	自反应物质和混合物	1-5 (系数 2)						
9	发火液体	1 (系数 10)						
10	发火固体	1 (系数 10)						
11	自热物和混合物	1-2 (系数 4)						
12	遇水放出易燃气体的物质和混合物	1-3 (系数 5)						
13	氧化性液体	1-3 (系数 3)						
14	氧化性固体	1-3 (系数 3)						
15	有机过氧化物	1-5 (系数 2)						
16	金属腐蚀剂	1 (系数 6)						
17	退敏爆炸物	1-4 (系数 3)						
单物质物理危险性分值 $\alpha_i$			6				9	0
物料物理危险性评估值 $\alpha$			$6 \times 0.44 + 9 \times 0.21 \times 2.6 \approx 4.6$					
实验物料物理风险等级			1					



表 C.8 实验物料的健康危险性分值与风险等级

序号	类型	级别与系数	CH <sub>2</sub> O	PCl <sub>3</sub>		亚磷酸二甲酯	CH <sub>2</sub> Cl	HCl
1	急毒性物	1-5 (系数 4)	12	16				12
2	皮肤腐蚀/刺激物	1-3 (系数 4)		12				12
3	严重眼损伤/眼刺激物	1-3 (系数 4)						
4	呼吸或皮肤致敏物	1-2 (系数 2)				2		
5	生殖细胞致突变性	1-2 (系数 2)				2		
6	致癌性	1-2 (系数 2)				2	2	
7	生殖毒性	1-3 (系数 2)						
8	特定目标器官毒性 (单次接触)	1-3 (系数 4)	12					
9	特定目标器官毒性 (多次接触)	1-2 (系数 2)		2			2	
10	吸入危险	1-2 (系数 2)						
单物质健康危险性分值 $\beta_i$			24	30		6	4	24
物料健康危险性评估值 $\beta$			$24 \times 0.44 + 30 \times 0.56 + 6 \times 0.49 + 4 \times 0.21 + 24 \times 0.3 \approx 38.4$					
实验物料健康风险等级			4					

表 C.9 合成反应绝热温升风险等级

合成反应绝热温升 $\Delta T_{ad}$ , K	等级
184.0	3

表 C.10 分解反应绝热温升风险等级

分解反应绝热温升 $\Delta T_{ad,d}$ , K	等级
650.0	5

表 C.11 设备耐腐蚀性风险等级

耐腐蚀性	等级
不适用	4

表 C.12 设备安全性风险等级

设备安全系数 $Y$	等级
1.0	3

表 C.13 实验操作风险等级

操作描述	等级
手动常压加料、绝热温升>100K 的反应一次性投料	4

表 C.14 前处理和后处理性风险等级

危险条件	等级
加热、剧毒物料	3

### C.3 实验风险综合等级与应急措施

实验风险定级情况如表 C.15 所示，对应可能造成的危害和紧急措施列于表 C.16。

表 C.15 实验风险定级汇总表

项	实际值	对应等级
实验温度风险	25.0	1
实验压力风险	0	1
实验物料使用剂量风险	363.0	3
实验物料物理风险	4.6	1
<b>实验物料健康风险</b>	<b>38.4</b>	<b>4</b>
合成反应绝热温升风险	184.0	3
<b>分解反应绝热温升风险</b>	<b>650.0</b>	<b>5</b>
<b>实验设备耐腐蚀性风险</b>	<b>不适用</b>	<b>4</b>
实验设备安全性风险	1.0	3
<b>实验操作风险</b>	<b>绝热温升&gt;100K 的反应一次性投料</b>	<b>4</b>
实验前处理和后处理风险	加热+剧毒物料	3
实验风险系数	120.0	3
实验风险综合等级	3	

表 C.16 实验预案措施

可能造成的危害	可能造成实验室中度受损或人员中度伤害。
应急措施、人员防护、物料处置	建议改变操作方式、选择自动化高的耐腐蚀仪器。 如需进行则按要求 3 级的措施要求进行预防、控制。

### 参 考 文 献

- [1] GB 30000.3-2013 化学品分类和标签规范 第3部分：易燃气体
- [2] GB 30000.7-2013 化学品分类和标签规范 第7部分：易燃液体
- [3] GB 30000.8-2013 化学品分类和标签规范 第8部分：易燃固体
- [4] GB 30000.9-2013 化学品分类和标签规范 第9部分：自反应物质和混合物
- [5] GB 30000.10-2013 化学品分类和标签规范 第10部分：自燃液体
- [6] GB 30000.11-2013 化学品分类和标签规范 第11部分：自燃固体
- [7] GB 30000.12-2013 化学品分类和标签规范 第12部分：自热物质和混合物
- [8] GB 30000.13-2013 化学品分类和标签规范 第13部分：遇水放出易燃气体的物质和混合物
- [9] GB 30000.18-2013 化学品分类和标签规范 第18部分：急性毒性
- [10] T/CCSAS 005-2019 化学化工实验室安全管理规范
- [11] T/CCSAS 011-2021 化学化工实验室安全评估指南
- [12] 弗朗西斯·施特塞尔著（陈网桦等译），化工工艺的热安全——风险评估与工艺设计[M]，北京，科学出版社，2009
- [13] 联合国，全球化学品统一分类和标签制度（全球统一制度）第7修订版，纽约和日内瓦，2017
- [14] 左景伊、左禹，腐蚀数据与选材手册[M] 第1版，北京，化学工业出版社，1995
- [15] 罗渝然，化学键能数据手册[M]，北京，科学出版社，2005
- [16] 《精细化工反应安全风险评估导则（试行）》，安监总管三[2017] 1号
- [17] 重点监管18类危险化工工艺目录，安监总管三[2009] 116号和安监总管三[2013] 3号