

调漆间防爆措施可行性分析

郝爱玲, 刘庭全, 王宗存

摘要: 本文以某喷漆厂房调漆间为例, 针对其现有的防爆安全措施, 采用理论计算和定性分析的方法, 从措施的有效性和系统可靠性两个方面论证措施的可行性。计算得出甲苯、二甲苯混合蒸气的爆炸下限为 1.10%, 以混合气体体积分数是否低于 0.275% 作为通风系统有效性的判定标准。调漆间现有全室通风条件可以在较短时间内实现爆炸性混合气体浓度的降低。重点局部排风口的设置强化了全室通风的有效性。设置 CO₂ 自动灭火系统并与感温感烟探测器、可燃气体浓度探测相联动是一种有效的防止爆炸危害的方法。

关键词: 调漆间; 防爆; 爆炸下限

1 概述

调漆间主要是用于调配油漆, 为喷漆操作进行准备的场所。本研究分析的调漆间容积约 180m³, 房间高 4.5m。据调研, 在调漆过程中, 调漆间中央会放置需要的清洗剂和油漆, 最大存放量约 400L。由于清洗剂基本上只在调漆间倒一下儿后, 立刻送到喷漆机库大厅, 认为基本可以不考虑清洗剂的挥发, 主要考虑调漆过程中油漆和稀释剂中可燃蒸气挥发导致的火灾爆炸危险。

经测定, 调漆间使用的油漆和稀释剂中主要挥发物成分为甲苯、二甲苯, 其物化性质详见表 1。可以看出, 这些物质都属于易燃、易爆的甲类危险物质, 其爆炸下限和闪点都很低, 爆炸危险程度较高。

表 1 稀料、清洗剂主要成分物化性质

名称	爆炸下限 (V%)	闪点 (°C)	自燃温度 (°C)	蒸气密度 (空气=1)	液体密度 (水=1)
甲苯	1.2	4	535	3.14	0.87
二甲苯	1.0	25	463	3.66	0.88

注: 数据引自《石油化工原料与产品安全手册》。

从形成爆炸性混合物的角度来说, 在倾倒油漆、进行调漆搅拌等工艺操作的过程中, 在一桶油漆被部分使用并且没有及时封闭的时候, 以及在操作人员失误导致油漆洒落等情况下, 都存在挥发出甲苯、二甲苯蒸气的可能, 这些挥发出来的可燃蒸气与空气混合可能在局部形成爆炸性混合物。从存在的点火源来看, 在倾倒油漆、工艺操作过程中, 可能产生静电火花; 搬运油漆时使用的推车等机械设施可能会因冲撞或摩擦而产生火花; 调漆间内使用的电气设备等可能因误操作或故障而产生电气火花。相应的, 调漆间内可燃蒸气与空气形成的爆炸性

混合气体在适宜的条件下一旦遇到合适的点火源，便有可能引发火灾和爆炸。因此，有必要设置合适的防爆安全措施，确保调漆间的消防安全。

2 现有防爆措施

将调漆间内现有的防爆措施归类如下：

2.1 工艺操作措施

(1) 采用 24h 全室通风，为全新风系统，共有 1 个送风口，位于房间上部，采用下送风方式；2 个大排风口和 4 个小排风口，位于房间下部，采用侧排风方式。通风换气次数为：无人工作时，5 次/h；有人工作时，10 次/h。

(2) 采用全新风空气调节系统，控制室内平均温度为冬季 20℃，夏季 26℃。

(3) 设置防静电措施，同时还具有故障时自动切断电源等安全联锁自控技术措施。

(4) 电气设备均采用防爆型产品，并配置双管座防爆照明灯。

2.2 火灾自动报警、可燃气体探测报警系统与灭火措施

(1) 配制感烟、感温型火灾探测器，可指示控制器执行联动。

(2) 安装可燃气体浓度探测报警设备，当浓度为爆炸下限的 20% 时，激活预报警器；达到爆炸下限 40% 时，激活主报警器，该报警将直接进一步激发车间的消防报警。

(3) 配置 CO₂ 自动灭火系统、手提式灭火器。

(4) 报警系统和自动灭火系统与消防队远程连接。

2.3 管理防护措施

(1) 制定了调漆间工作指南，包括相关危险品的操作说明，仪器、生产设备及设施的操作指南和生产规范等。

(2) 配置呼吸面罩、防护衣以及导电的工作鞋等人员保护装置。

(3) 对员工应进行工作培训，如，未授权的人员不允许进入调漆间，禁止吸烟以及明火等。

3 现有措施的可行性分析

3.1 通风的有效性

3.1.1 判定标准

良好的通风是降低房间内爆炸性混合气体浓度，阻止爆炸危险产生的有效方法，是本文研究的调漆间设计中最主要的防爆措施。我国国家标准《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》（GB50058-92）第 2.2.4 条规定：爆炸危险区域内的通风，其空气流量能使易燃物质很快稀释到爆炸下限的 25% 以下时，可定为通风良好。同时美国消防协会《防爆系统标准》（NFPA 69）第 6.3.1 条也要求采用降低可燃物浓度的措施时，应保证可燃物质浓度低于其爆炸下限的 25%。当设置有安全连锁控制装置时，这一要求可适当放宽。

所以，可以将易燃、易爆液体全部挥发后，弥漫在整个房间内所形成的爆炸性混合气体浓度是否低于其爆炸下限的 25%，作为通风系统有效性的判定标准。

已知油漆中甲苯、二甲苯的液体密度分别为 10.26kg/m^3 和 15.02kg/m^3 ，结合表 1，可以求出：1L 油漆完全挥发时产生的甲苯和二甲苯蒸气体积分别为 3.27L 和 4.10L。计算得出甲苯、二甲苯混合蒸气的爆炸下限为：

$$x = \frac{100}{\frac{3.27/(3.27+4.10)}{1\%} + \frac{4.10/(3.27+4.10)}{1.2\%}} \% = 1.10\%$$

对于本文研究的调漆间来说，就是以甲苯、二甲苯形成的爆炸性混合气体浓度（体积浓度）是否低于 0.275%，作为通风系统有效性的判定标准。

3.1.2 全室通风的有效性

该调漆间全室通风系统为全新风系统，引入的气源安全可靠，无易燃物质。同时，采用上送下排的进气口、排气口设置，利于对房间内重于空气的易燃挥发蒸气的稀释。

已知调漆间内任意时刻的最大调漆量为 150L/次，调漆时间大约 5min。下面设计了 2 个不利场景来讨论调漆间通风系统的有效性：

(1) 150L 油漆在调漆的 5min 内逐步完全挥发

参考《防爆系统标准》（NFPA 69）附录 D 中的公式，见式（1），分析全室通风且挥发性可燃物逐步泄露时，爆炸性气体混合物体积浓度的累积情况。

$$C = \frac{G}{Q} \cdot (1 - e^{-K \cdot N \cdot t}) \quad (1)$$

式中：C—t 时刻房间内可燃气体的浓度，%；

G—爆炸性气体释放速率， m^3/h ；

Q—新风通风量， m^3/h ；

K—混合有效系数；

N—换气次数，次/h；

t—时间，以可燃气体瞬间释放为零时刻，h。

已知在有人工作时，调漆间通风换气次数 $N=10$ 次/h， K 值取 0.5。此时，爆炸性气体释放速率 $G=(3.27+4.10)\times 150\times 10^{-3}\times 60/5=13.27$ (m^3/h)。进而可以求得油漆逐步挥发过程中的爆炸性气体混合物的浓度变化情况，计算结果见表 2。

表 2 油漆逐步挥发时爆炸性气体混合物浓度的累积

C (%)	t (min)	C/C _{下限} (%)
0.057	1	5.33
0.110	2	10.24
0.158	3	14.75
0.203	4	18.90
0.244	5	22.73

从表 2 可以看出，若油漆中爆炸性气体在一次调漆过程中匀速完全挥发，其浓度在调漆结束时累积至爆炸下限的 22.73%，略低于对于通风良好的限定标准 25%。所以认为现有的全室通风条件在大部分情况下能够保证房间内的通风良好，从而可以有效地降低房间内爆炸性混合气体的浓度，减少该浓度在房间内的累积。

(2) 150L 油漆一次性完全挥发的情况

参考《防爆系统标准》(NFPA 69) 附录 D 中的公式，见式 (2)，来计算可燃气体瞬间释放时，全室通风的有效性：

$$C = C_0 \cdot e^{-K \cdot N \cdot t} \quad (2)$$

式中： C_0 —房间内可燃气体的初始浓度，%。

取 C_0 为 150L 油漆完全挥发后的爆炸性气体体积浓度，应用式 (2) 可以得出房间内爆炸性气体浓度 C 随通风时间延长而降低的曲线，如图 1 所示。图中还给出了爆炸性混合气体中甲苯和二甲苯各自的浓度降低情况。

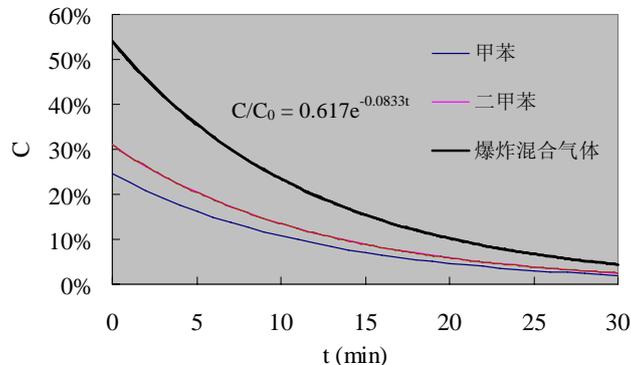


图 1 通风条件下爆炸气体浓度降低曲线

可以求出，当 150L 油漆一次性完全挥发后， $N=10$ 次/h 的通风作用可以使爆炸性混合气体浓度在 9.23min 时降至其爆炸下限的 25.0%；在 28.55min 时，可

以降至爆炸下限的 5.0%。计算结果说明调漆间现有全室通风条件，可以在较短时间内实现爆炸性混合气体浓度的降低。

3.1.3 局部通风的有效性

由于调漆间内一些工艺操作地点是已知的，例如调漆操作台等，即爆炸气体释放源的位置较为固定，在这些局部区域还是存在一定量爆炸性气体集聚进而引发爆炸的可能。为了进一步确保调漆间的爆炸安全，建议在这些已知的爆炸性气体释放源处增设局部的排风口。从定性的角度分析，在设有局部排风口的爆炸性气体释放源附近，可以认为其换气次数明显大于全室的平均换气次数。图 2 给出了在 150L 油漆瞬间完全挥发后 ($t=0\text{min}$) 不同换气次数条件下，房间内的爆炸性混合气体浓度 C_0 降为爆炸下限的 25% 时所用的时间。

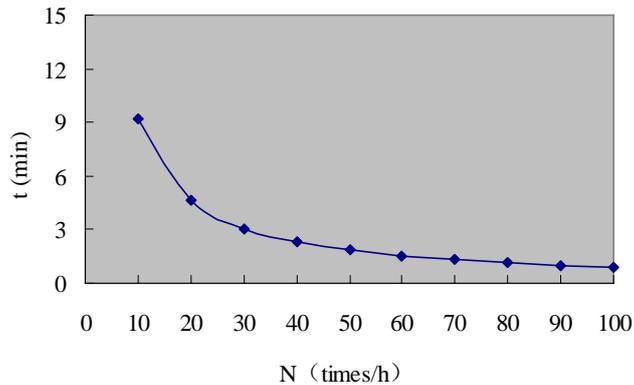


图 2 不同换气次数对降低爆炸性混合气体浓度的影响

由图 2 可以明显看出，增加换气次数减少了爆炸性混合气体的滞留时间，利于房间内爆炸性混合气体浓度的降低，缩短了将气体浓度降至安全范围内所需的时间。这侧面证明了局部排风对于降低房间内爆炸性混合气体浓度的有效性。

据悉调漆间设计方案中对房间排风口的布置的确在考虑均匀布置的同时，还专门针对一些产生爆炸性可燃蒸气较为频繁的场所设置了排风口。例如将排风口设在调漆设备处、调漆操作台处和废弃油漆桶放置处等地点。这些重点局部排风口的设置，利于及时将泄漏出来的可燃气体排走，防止积聚引起爆炸，从安全角度强化了全室通风的有效性。

3.2 CO₂ 自动灭火系统的有效性

在调漆间内还设置了 CO₂ 自动灭火系统，分别采用感烟、感温探测器和可燃气体浓度探测装置来进行探测报警和系统控制。当感烟感温探测器同时报警时，喷放 CO₂ 进行灭火。当气体浓度探测器探测到可燃气体浓度达到其爆炸下限的

20%时，启动声光报警器，通知工作人员到现场察看。若发现火源，则操作按钮手动启动 CO₂ 灭火系统进行灭火。当探测到可燃气体浓度达到其爆炸下限的 40% 时，直接自动喷放 CO₂，在稀释可燃性气体浓度的同时，实现惰化。同时启动主报警器与消防队伍建立联系，等待救援。上述情况在 CO₂ 喷放前，房间内的通风空调设备、通风管道中的防火阀和房间门应通过联锁装置自动关闭。

通过对 CO₂ 自动灭火系统的动作情况分析，可以看出调漆间内 CO₂ 自动灭火系统的设置，除了灭火以外还起到惰化作用。所谓惰化作用，是指通过喷射 CO₂ 置换房间内的空气，使氧含量降低到爆炸临界氧浓度以下，此时由于房间内含氧量不足，即使存在可燃物质又有点火源，也完全不会引起爆炸。惰化作用破坏了爆炸性气体混合物的燃烧爆炸条件，在火灾发生前，就已经消除了爆炸的可能性，从而降低或消除燃烧爆炸的危险性。所以，在调漆间内设置 CO₂ 自动灭火系统与感温感烟探测器、可燃气体浓度探测相联动是一种有效的防止爆炸危害的方法。它与全室通风一起强化了系统安全，提高了防爆系统的可靠性。

考虑到释放 CO₂ 会导致喷射房间内压力的增加，对围护结构存在一定的破坏危险，需要在调漆间设置一定面积的泄压口或泄压管路，以承担泄压工作。

3.3 其他措施的有效性

调漆间内采用防爆型电气设备，给工作人员配置导电的工作鞋，设置防静电措施等，均是从杜绝点火源的角度提出的防护措施。制定相关的工作指南、操作说明以及对工作人员进行培训等可以大大减少人为因素导致火灾爆炸危险发生的可能性。此外，应用空调系统在调漆间内保持恒定且较低的环境温度，利于限制易燃液体的蒸发速度，减少其挥发量，也部分降低了调漆间内的火灾爆炸危险性。

3.4 措施可靠性分析

无论通风系统还是 CO₂ 自动灭火系统等消防系统，其可靠运行是保证有效防爆、减爆的必要条件。因此，需要尽量减少电气及机械设备的故障可能性，这需要建立完善的系统安装、操作、测试和维护的程序。

《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》(GB50058-92)第 2.2.4 条规定：

采用机械通风在下列情况之一时，可不计机械通风故障的影响：

- (1) 对封闭式或半封闭式的建筑物应设置备用的独立通风系统；
- (2) 在通风设备发生故障时，设置自动报警或停止工艺流程等确保能阻止易燃物质释放的预防措施，或使电气设备断电的预防措施。

由于调漆间内设置了机械通风故障时的自动切断电源等安全连锁自控技术措施，所以可以认为调漆间内的全室通风系统及局部通风装置是可靠的。

影响 CO₂ 自动灭火系统可靠性的一个重要因素是系统的误动作。据统计，国内曾多次发生由于管理和操作原因致使 CO₂ 自动灭火系统在无火灾时误动作，CO₂ 气体喷射一空的情况。而 CO₂ 灭火系统的重新灌装、日常维护保养等费用较高，因为系统误动作而导致重新充装 CO₂ 和更换配件造成的经济损失往往较为巨大。并且重新装灌 CO₂ 需要一定的周期，这减弱了此期间内调漆间的整体防爆水平。因此，建议调漆间配备专门的消防安全管理人员，并经过严格的技术培训，以保证 CO₂ 灭火系统的正常工作，及时处理误报警问题，发现和防止系统的误动作。

同时，现有的组织管理防护措施要求对进出调漆间工作人员进行授权培训也是有效的确保调漆间内实现防爆安全的重要措施，利于降低产生点火源和爆炸性挥发蒸气的可能性。

4 结论和建议

调漆间在调漆操作时使用的油漆和稀释剂中能够挥发出甲苯、二甲苯等易燃易爆的可燃蒸气，存在一定的火灾、爆炸危险性。本文研究的调漆间在设计中采用了以全室通风、可燃气体探测报警系统和 CO₂ 自动灭火系统为主的防爆措施，对于保证调漆间的消防安全来说是可行的：

(1) 计算表明，大多数情况下采用 N=10 次/h 的全室通风，可以有效地降低房间内爆炸性混合气体浓度的累积。局部排风口的设置，能够及时将泄漏出来的可燃气体排走，防止可燃气体聚集引起爆炸。

(2) CO₂ 自动灭火系统分别与感温感烟探测器、可燃气体浓度探测相联动，同时具有灭火和系统惰化的功能，是有效的防爆措施。

(3) 温度控制、电气防爆、静电防护、安全连锁、完备的组织管理程序等措施，从系统的角度完善了调漆间的防爆体系。

同时，为了更好地防爆、确保安全，在上述防爆措施基础上，提出如下建议：

(1) 调漆间应配备专门的经过专业技术培训的消防安全管理人员，以保证 CO₂ 灭火系统的正常工作。

(2) 建议严格规范调漆间的操作内容，只进行调漆和清洗操作。

(3) 根据具体的工艺布局设计局部排风口的位置和尺寸，确保局部排风口设置在大量或频繁的挥发出易燃蒸气的地点，如调漆操作台、清洗台等。

(4) 限制油漆罐、溶解剂罐等开罐操作的地点，如放于设局部排风口的位置等。一旦油漆罐内残余的油漆需要下次待用时，要及时密封。

参考文献：

- [1] GB50058-92，爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范[S]
- [2] 戴旻. 涂装车间有关消防问题的探讨与对策[J]. 材料保护，2001，34(12).
- [3] NFPA69-2008，Standard on explosion prevention systems[S]
- [4] Philip J. DiNunno, Dougal Drysdale, Craig L. Beyler, *et al.* SFPE handbook of fire protection engineering, third edition [M]. Massachusetts: National fire protection association, 2002.

——本文发表于《消防科学与技术》(2011年第9期)