 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i5.10270

Refined Design and Engineering Practice of Exhaust System in Coating Production Workshop

Tao Xu

Shanghai Shenzhao HeXin Environmental Protection Equipment Co., Ltd., Shanghai, 201600, China

Abstract

Based on industrial ventilation engineering principles and the pollutant characteristics in paint production processes, this study proposes a systematic refined design methodology for exhaust ventilation systems. By establishing pollutant dispersion models and employing mass balance methods to calculate workshop exhaust volumes, the study compares these approaches with traditional air change rate methods. The research focuses on exhaust system zoning strategies utilizing the “Four Quadrant Method,” along with comprehensive design solutions incorporating pipeline network balance calculations, standardized duct design, and explosion-proof safety measures. Engineering practice demonstrates that this design approach enables precise exhaust system configuration, significantly reducing initial investment costs and operational energy consumption while ensuring effective pollutant control.

Keywords

exhaust system design; mass balance method; system division; pipeline network calculation; explosion-proof design

涂料生产车间排风系统精细化设计与工程实践

徐涛

上海申兆和信环保设备有限公司，中国·上海 201600

摘　要

本文基于工业通风工程原理，针对涂料生产过程中的污染物特性，提出了一套系统化的排风系统精细化设计方法。通过建立污染物散发模型，采用质量平衡法计算车间排风量，与传统的换气次数法相比较。重点研究了基于"四象限法"的排风系统划分策略，以及包含管网平衡计算、管道标准化设计和防爆安全措施的完整排风系统设计方案。工程实践表明，该设计方法能够实现排风系统的精准化配置，在保证污染物有效控制的前提下，显著降低系统初投资和运行能耗。

关键词

排风系统设计；质量平衡法；系统划分；管网计算；防爆设计

1 引言

涂料生产车间排风系统设计是一个涉及多学科知识的复杂工程问题。传统的以换气次数为基础的设计方法存在明显局限性：一方面可能因设计风量过大造成能源浪费，另一方面又可能因局部排风不足导致污染物逸散。随着对工业建筑环境要求和能源效率要求的不断提高，需要建立更加科学、精细化的排风系统设计方法。

根据最新的工业通风设计标准，现代排风系统设计应当从污染物源头特性出发，通过系统化的分析方法和工程实践经验总结，建立完整的设计流程。本文重点解决了排风量科学确定、系统合理划分、管网精确计算等关键技术问题，为涂料生产车间的排风系统设计提供了创新的解决方案。

【作者简介】徐涛（1989–），男，中国江苏苏州人，本科，工程师，从事公共建筑暖通空调系统节能运行研究。

2 排风系统设计基础

2.1 设计原则与流程

排风系统设计应遵循系统性原则，包括源头优先、分类处理、安全可靠和经济合理四大基本原则。源头优先要求在所有污染物产生点设置有效的局部排风设施；分类处理要求按污染物性质、浓度等因素划分独立系统；安全可靠要求系统满足防爆、防火等安全规范；经济合理要求在保证效果的前提下优化投资和运行成本。

设计流程包括八个主要环节：基础资料收集→污染物特性分析→排风量精确计算→系统科学划分→设备合理选型→管网优化设计→安全防护配置→控制系统集成。每个环节都需要进行详细的技术论证和计算分析，确保系统设计的科学性和可行性。

2.2 设计参数确定

室外设计参数应根据当地气象部门提供的近十年气象资料确定，重点考虑夏季通风温度、冬季通风温度、主导风

向及频率等要素。对于涂料生产车间，还需特别关注大气污染背景浓度，这对新风处理系统的设计具有重要影响。

室内设计参数包括环境参数和安全参数两大类。环境参数要求温度控制在 16-28℃之间，相对湿度不超过 70%，噪声限值控制在 85dB(A) 以下，工作面风速不超过 0.5m/s。安全参数要求各污染物浓度必须低于职业接触限值的 30%，爆炸性气体浓度低于爆炸下限的 25%。

3 排风量计算方法研究

3.1 质量平衡法

基于污染物质量守恒原理，建立排风量精确计算模型。该方法考虑了污染物的实时产生量和排除量，计算公式为 Q = (G × K) / (C - C₀)，其中 Q 为所需排风量 (m³/h)，G 为污染物散发量 (mg/h)，K 为安全系数（取 1.2-1.5），C 为室内允许浓度 (mg/m³)，C₀ 为室外背景浓度 (mg/m³)。

当散发多种有害物质时，采用质量平衡法计算排风时，需分别计算每种物质所需的最小排风量，最终系统排风量取其中的最大值，以确保所有物质的浓度均能被控制在允许范围内。

这个思路的核心是 “就高不就低”，因为不同物质的有害性（允许浓度）和散发量不同，控制要求最严格的那种物质将决定整个系统的排风能力。

特殊情况与深入考量 - 有害物质具有毒性叠加效应

当多种物质共同作用于同一靶器官或系统时（例如，多种有机溶剂都对神经系统有影响，如苯、甲苯、二甲苯；或多种酸雾都对呼吸道有刺激），不能简单地只看单个物质是否超标。

处理方法：

3.1.1 计算当量总浓度

对于每种物质，计算其浓度与其容许浓度的比值，然后将这些比值相加。总和要求小于等于 1。

$$\frac{C_1'}{C_1}+\frac{C_2'}{C_2}+...+\frac{C_n'}{C_n}\leq 1$$

- C_i' = 物质 i 在空气中的实际（或预计）浓度
- C_i = 物质 i 的卫生标准浓度

3.1.2 修正质量平衡方程

在稳态和完全混合的假设下，$C_i'=\frac{G_i}{Q}$。将其代入上式：

$$\frac{G_1/Q}{C_1}+\frac{G_2/Q}{C_2}+...+\frac{G_n/Q}{C_n}\leq 1$$

解出总排风量 Q：

$$Q\geq\frac{G_1}{C_1}+\frac{G_2}{C_2}+...+\frac{G_n}{C_n}$$

在这种情况下，总设计风量是每种物质独立计算所需风量的 SUM（总和），而不是取最大值。

污染物散发量 G 通过三种方法综合确定：实测法通过对类似工艺进行现场测定获得实际数据；物料衡算法根据原料使用量和挥发特性进行理论计算；经验数据法参考同类项目的历史运行数据。在实际工程中，建议采用三种方法相互验证，确保数据准确性。

3.2 控制风速法

对于局部排风系统，采用控制风速法确定排风量。计算公式为 Q = A × V × 3600 × K，其中 A 为罩口面积或控制面积 (m²)，V 为控制风速 (m/s)，根据污染物特性确定，K 为安全系数，主要考虑干扰气流影响。

控制风速的选取需要综合考虑污染物特性、操作工艺和周围环境等因素。对于粉尘类污染物，控制风速取 0.8-1.2m/s；对于挥发性有机物，根据挥发强度取 0.5-1.0m/s；对于高温工艺产生的污染物，还需考虑热射流影响，适当提高控制风速。

3.3 综合计算示例

以某大型涂料生产车间为例，展示各区域排风量的详细计算过程。

粉体投料区，控制风速取 1.0m/s，罩口面积 0.5m²，计算得排风量为 1800m³/h。共计 14 台投料机，同时使用率为 4 台，该除尘系统风量为 1800x4=7200m3/h

调漆区溶剂挥发量 3.169kg/h，由多种挥发性有机物组成，经计算得排风量 68979m³/h，取设计风量 70000m3/h。通过这种精确计算方法，与传统换气次数法相比，总排风量可减少 15-25%，显著降低了系统能耗。

成分	占比	挥发速率 kg/h	平均浓度 mg/m³	短时间接触浓度 mg/m³	设计风量 m³/h	岗位污染物浓度 mg/m³	q/c
正丁醇	2.46	0.089021	100	-	2670.638	1	0.013
异丙醇	3.73	0.134979	200	300	1349.794	2	0.010
乙酸乙酯	20.7	0.749081	200	300	7490.813	11	0.054
乙酸丁酯	17.03	0.616273	200	300	6162.731	9	0.045
丙酮	1.63	0.058986	300	450	393.2375	1	0.003
2- 丁酮	7.38	0.267064	300	600	1335.319	4	0.013
环己烷	2.34	0.084679	250	-	1016.145	1	0.005
甲苯	18.45	0.667659	50	100	20029.78	10	0.194
对二甲苯	26.28	0.951008	50	100	28530.23	14	0.276
求和	100	3.619	1650		68978.68	52	0.612

4 排风系统划分策略

4.1 系统划分原则

采用创新的 " 四象限法 " 进行系统划分，将整个排风系统分为四个独立的子系统。第一象限处理含尘废气，第二象限处理高浓度 VOCs，第三象限处理低浓度混合废气，第四象限处理环境排风。这种划分方法确保了不同类型污染物的有效处理，避免了系统间的相互干扰。

每个象限系统都设有独立的处理设备和控制系统，既能保证处理效率，又便于运行维护。系统间通过压力平衡装置保持协调运行，确保整个车间的气流组织合理有序。

4.2 详细划分方案

含尘废气系统专门处理粉体投料、粉料输送、产品粉碎等工艺产生的粉尘。系统设计管道风速不低于 15m/s，配置高效除尘设备，设置火花探测与灭火装置，独立设置风机房，确保系统安全运行。

高浓度 VOCs 系统处理树脂合成、溶剂计量、设备清洗等过程产生的有机废气。系统管道风速不低于 8m/s，配置在线浓度监测装置，设置阻火防爆设施，与废气处理装置直接对接，实现高效处理。

低浓度混合废气系统处理分散、研磨、调漆、包装等工艺产生的废气。系统按区域设置独立子系统，配置浓缩转轮实现将低浓度转换为高浓度的形式，降低末端治理系统的热氧化能耗。

环境排风系统负责排除逸散到车间环境中的污染物。在污染物易积聚区域设置下部排风口，在热源上方设置上部排风口，排风口与污染源距离不超过 2m，确保有效排除污染物。

4.3 系统配置要点

各系统独立设置风机和处理设备，重要区域设置备用系统，系统间设置压力平衡装置，同时考虑系统间的互联备用关系。这种配置方式既保证了系统的可靠性，又提高了运行的灵活性。

5 管网系统精细化设计

5.1 管网设计原则

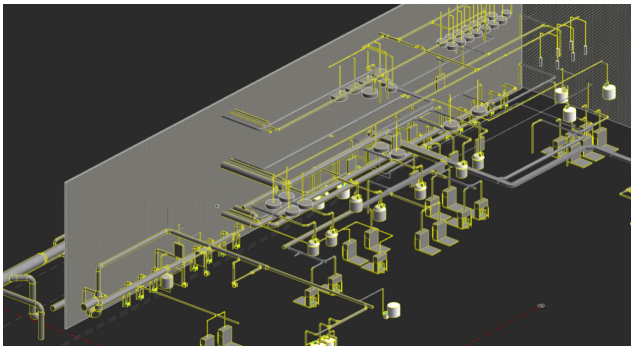
管网设计遵循四大原则：管线简短原则要求尽可能缩短管道长度，减少阻力损失；平衡分配原则要求保证各支路风量平衡；维护便利原则要求设置必要的检修孔和测量孔；安全可靠原则要求满足强度、密封性和防爆要求。

在实际设计中，采用三维设计软件进行管道综合，避免与其他管线冲突，确保管道布局合理。同时考虑管道膨胀补偿，在适当位置设置膨胀节，防止热应力对系统造成破坏。

5.2 水力计算

采用静态压力法进行管网水力计算，公式为 $\Delta P = \Sigma(\xi \times \rho \times v^2/2) + \Sigma(\lambda \times L/d \times \rho \times v^2/2)$。通过迭代计算，确定最优管径配置，保证系统阻力平衡。

计算过程中需要考虑管道粗糙度变化、管件局部阻力、系统漏风等因素的影响。对于复杂系统，建议采用专业的流体计算软件进行模拟分析，确保计算结果的准确性。



室内管网建模

5.3 管道标准化设计

管道规格实行标准化系列，主管道直径 500-1200mm，支管道直径 200-500mm，分支管直径 100-200mm。管件设计标准化，弯头曲率半径取 1.5D，三通夹角 30° -45° ，变径管角度不超过 15° 。

管道布置要求严格，主干管沿柱网布置，支管沿工艺设备排列方向布置。管道坡度不小于 0.002，坡向排水点。设置必要的支吊架，间距不超过 4m，确保管道系统稳定可靠。

5.4 防爆安全设计

管道系统防爆措施包括：管道材质选用镀锌钢板或不锈钢，厚度按直径大小选择 0.8-1.5mm；静电防护要求整体接地，电阻不超过 0.03Ω；防爆泄压要求设置泄爆片，面积按 NFPA 68 标准计算。

安全监测系统配备完善，包括关键点风速监测、爆炸性气体浓度监测、轴承和电机温度监测、风机振动监测等。所有监测信号接入中央控制系统，实现实时监控和自动报警。

6 结论与建议

本研究针对涂料生产车间排风系统设计中的关键技术问题，提出了一套完整的精细化设计方法。通过建立基于污染物特性分析的系统化设计流程，实现了从污染源控制到系统集成的全过程优化。质量平衡法的应用使排风量计算更加精确可靠，有效解决了传统换气次数法的局限性，在保证污染物控制效果的同时显著降低了系统能耗。

系统划分方面，创新的 " 四象限法 " 实现了对不同性质污染物的分类处理，含尘废气系统、高浓度 VOCs 系统、低浓度混合废气系统和环境排风系统的独立设置，既确保了处理效率，又提高了系统运行的可靠性和灵活性。这种系统划分方法特别适用于涂料生产这种多污染物共存的复杂工况。

管网系统的精细化设计体现了工程设计的专业化水平。通过科学的水力计算和标准化设计，确保了系统阻力平衡和运行稳定性。防爆安全设计的全面考虑，包括管道材质选择、

静电防护、泄爆装置设置等多重措施，为系统的安全运行提供了可靠保障。

工程实践表明，本设计方法具有良好的实用性和推广价值。系统运行数据证实，在实现污染物全面达标排放的同时，能耗指标较传统设计显著降低，维护成本得到有效控制。这种方法不仅适用于涂料行业，也可为其他类似工业环境的通风系统设计提供参考，对推动工业通风技术发展具有重要意义。

参考文献

[1] GB50019-2015，工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].

[2] GB50058-2014，爆炸危险环境电力装置设计规范[S].

[3] 孙一坚. 工业通风(第四版)[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[4] 李强. 工业通风系统优化设计理论与方法[M]. 北京：科学出版社，2019.

[5] 美国供热制冷空调工程师学会. ASHRAE Handbook-HVAC Applications[M]. 2021.

[6] 王建军. 防爆通风系统设计要点分析[J]. 安全与环境工程，2021,28(3):112-116.

[7] National Fire Protection Association. NFPA 68:Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting[S]. 2018.