

# 涂装车间烘干炉安全风量研究

李 兵, 刘立东

(一汽-大众汽车有限公司佛山分公司, 广东 佛山 528225)

**摘要:** 基于 DIN EN 1539:2016 和 GB 1443—2007, 对涂装车间面漆烘干炉的安全风量进行研究, 对烘干炉安全设计和烘干炉的优化有重要的意义。

**关键词:** 涂装车间; 烘干炉; 安全风量

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2024)08-0043-04

## Research on Safe Air Volume of Ovens in Painting Workshop

LI Bing, LIU Li-dong

(Faw-Volkswagen Automotive Co., Ltd., Foshan Branch, Foshan 528225, Guangdong, China)

**Abstract:** Based on DIN EN 1539:2016 and GB 1443—2007, this article researchs the safety air volume of top coat ovens in painting workshop. It is great significance for the safety design and optimization of ovens.

**Key words:** painting workshop; ovens; safety air volume

涂装车间是能耗大户, 占工厂能耗的 50%~60%。烘干炉是涂装车间主要的能耗设备之一, 涂装车间有面漆、电泳、PVC 等不同工艺的烘干炉, 其作用是将车身上的电泳、面漆、PVC 胶等烘干。烘干过程中有溶剂等挥发可燃物, 虽然挥发可燃物在高温条件下释放一定热量, 代替部分天然气燃料, 但是增加爆炸的安全风险。从安全角度, 根据烘干炉挥发可燃物的种类和挥发量等前提条件, 确认安全风量即新鲜空气量至关重要, 在此基础上采取必要的安全措施, 确保烘干炉内任何部位、任何工作状态下, 可燃物浓度都低于爆炸下限, 从而保证烘干炉的长期安全运行。

本文基于 DIN EN 1539:2016《烘干炉挥发可燃物的安全要求》和 GB 1443—2007《涂装作业安全规程 涂层烘干室安全技术规定》, 并借鉴 NFPA 86-2011《烘箱与熔炉标准》, 研究烘干炉的安全风量, 对烘干炉安全设计和优化具有重要的意义。

### 1 烘干炉

我公司某涂装车间烘干炉属于通道式连续性烘干

炉, 根据工艺条件不同, 单个烘干炉包含若干个升温区和保温区。本文以面漆烘干炉为例进行研究, 面漆采用 2010+水性漆工艺, 预喷涂和色漆采用水性漆, 清漆采用 2K 溶剂型清漆, 含有固化剂。面漆烘干炉实现两个功能: 面漆烘干和 PVC 材料固化, 包括升温 1 区、升温 2 区、保温 1 区和保温 2 区, 如图 1 所示。单条面漆烘干炉设计为 36 JPH, 加热箱最高设置温度不超过 160 °C。

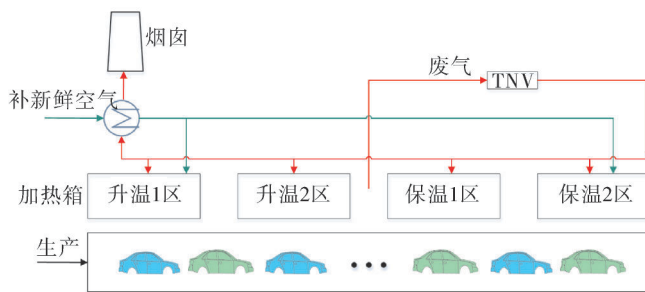


图 1 面漆烘干炉示意

收稿日期: 2023-09-28

作者简介: 李兵(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事涂装工艺规划相关工作。E-mail: bing.li.pl@faw-vw.com。

预喷涂和色漆主要挥发物为水, 基本在中间闪干环节挥发完毕。面漆烘干炉挥发可燃物来源于 PVC 材料和 2K 清漆。以下分别估算 PVC 和 2K 清漆挥发可

燃物的总量。

首先采用喷板称重法估算 PVC 挥发可燃物的量,用已称重的喷板,喷涂 PVC 胶后称重,立即送到 PVC 烘干炉烘干后再次称重,最后送至面漆烘干炉烘干后称重,相关数据如表 1 所列。按照最大车型 PVC 单车 11 kg 消耗计算,PVC 在面漆烘干炉挥发可燃物为 6 947 g/h。

表 1 PVC 胶挥发可燃物的量

项目	PVC 烘干炉	面漆烘干炉
湿膜净重/g	22.8	22.8
减重/g	0.2	0.4
减重比例/%	0.88	1.75
单车湿膜重/g	11 000	11 000
生产节拍/JPH	62	36
小时减重/g	5 982	6 947

接着估算面漆 2K 清漆挥发可燃物的量。2K 清漆包含清漆和固化剂两种成分,清漆和固化剂体积混合比为 10:3,清漆固体分约 50%,固化剂固体分约 80%,密度 1 kg/L,混合后的固体分为  $(50\% \times 10 + 80\% \times 3) \div (10 + 3) = 56.9\%$ 。

2K 清漆内表上漆率约 40%,ESTA 上漆率约 70%,最大车型 2K 清漆单车上漆量为 1 408.7 g,相关数据如表 2 所列。按照最大车型计算带入面漆烘干炉 2K 清漆挥发可燃物的总量为:  $1 408.7 \times 36 \times (1 - 56.9\%) = 21 857 \text{ g/h}$ 。

表 2 2K 清漆消耗

项目	CC 内表	CC ESTA	汇总
出漆量/g	1 021	1 429	2 450
上漆率/%	40	70	
上漆量/g	408.4	1 000.3	1 408.7

最后汇总 PVC 和 2K 清漆在面漆烘干炉挥发可燃物总量为:  $6 947 + 21 857 = 28 804 \text{ g/h}$ 。

本文基于上述经验值作为计算安全风量的前提。实际上,在 2K 清漆喷涂完成后,进入面漆烘干炉前,有一定的工艺闪干时间,这个阶段可燃物在喷房存在挥发,因此进入烘干炉 2K 清漆挥发可燃物量略低于上述计算值。

## 2 DIN EN 1539

本章节基于 DIN EN 1539 挥发可燃物的安全要求,研究烘干炉安全风量及相关要求。

DIN EN 1539 烘干炉最大允许挥发可燃物浓度和

允许运行的浓度限值范围如图 2 所示,横坐标  $x$  为烘干炉最高温度( $^{\circ}\text{C}$ ),纵坐标  $y_1$  为  $20^{\circ}\text{C}$  时允许的爆炸下限( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $y_2$  为允许爆炸下限/ $20^{\circ}\text{C}$  时爆炸下限(%),  $y_3$  为  $\Delta_{\text{爆炸下限}}$ ,如  $\Delta_{\text{爆炸下限}} = -20\%/100 \text{ K}$ 。不同的浓度范围采取不同的安全措施或者组合措施,如表 3 所列。范围①,浓度较低时选取 1 项安全措施;范围②,浓度较高时需要 2 项安全组合;范围③,浓度最高时需要 3 项安全组合。

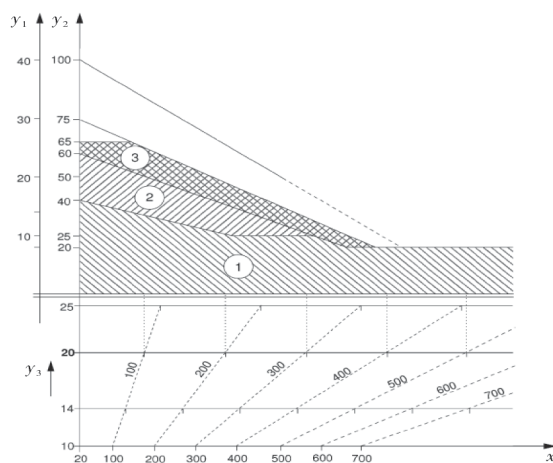


图 2 烘干炉最大允许挥发可燃物浓度和运行浓度限值范围

表 3 烘干炉在图 2 中不同范围内运行的安全措施

范围	运行范围安全要求					
	监控最小 排风量	浓度监控		监控进入 的可燃物	避免 点火源	爆炸 泄压
		不控制 必要风量	控制 必要风量			
①	√					
		√				
			√			
②	√	√				
		√			√	
			√		√	
③	√	√			√	
		√		√	√	
			√	√	√	√

以下具体阐述 DIN EN 1539 各项安全措施:

1) 监控最小排风风量。为了确保安全,烘干炉通过测量装置测量排风和循环风量。加热装置必须和通风连锁。

2) 浓度监控。必须根据 EN 60079-29-1 要求配置烘干炉气体探测器,用于监测挥发可燃物的浓度。

3) 排风风量自动控制。如果所需的排气风量是由挥发可燃物输入决定的,排风风量和烘干炉入口必须连锁。

4) 避免点火源。在烘干炉内的设备或装置,根据 EN 13463-1 或 EN 60079-0,必须至少符合点火源 3G 或者 2G 安全要求,3G 对应国标防爆 2 区,2G 对应国标防爆 1 区。必须考虑部件的耐温性,边界层不得包含点火源。如图 2 中范围①,无需采取避免点火源作为防爆措施;范围②最多只需要满足 3G 要求;而范围③需要根据不同安全组合要求,配置 3G 或者 2G。

5) 监控挥发可燃物进入。烘干炉必须配备自动加料系统。烘干炉必须监控挥发可燃物的相关参数,例如涂层材料的量、每秒溶剂量、膜厚、溶剂含量、输送速度,应在适当的位置进行监测,确保可燃物挥发量没有超过烘干炉最高允许的浓度。生产节拍固定,车身喷涂面积和使用材料成本固定,烘干炉设备和机械化连锁,从而确保烘干炉确保可燃物挥发量不超过烘干炉允许的最高浓度。

6) 爆炸泄压。要求将爆炸泄压作为防爆措施的烘干炉,应根据 EN 14994,并考虑 EN 1127-1 配备爆炸泄压设施,爆炸泄压仅用于范围③。

根据 DIN EN 1539,如果材料成分未知,以爆炸下限  $40 \text{ g/m}^3$ 、温度系数  $-20\%/100\text{K}$  作为计算依据,根据范围②计算面漆烘干炉安全风量。相关计算参数汇总如下:烘干炉最高温度  $\vartheta=160 \text{ }^\circ\text{C}$ ,挥发可燃物总量  $M_{\text{max}}=28\ 804 \text{ g/h}$ ,爆炸下限  $UEG_{20}=40 \text{ g/m}^3$ ,通风系数  $f=1$ ,温度系数  $\Delta_{UEG}=-20\%/100 \text{ K}$ , $UEG_{\vartheta}=UEG_{20} \times (1 - \Delta_{UEG} \times (\vartheta - 20)) = 40 \times (1 - 0.002 \times (160 - 20)) = 28.8 \text{ g/m}^3$ 。如图 2 烘干炉允许的最大浓度  $C_{\text{zul}}=0.6 \times 28.8 = 17.28 \text{ g/m}^3$ ,最小安全风量  $Q_{\text{min,(s)}}=f \times M_{\text{max}}/C_{\text{zul}}=1 \times 28\ 804 / (28.8 \times 0.6) = 1\ 667 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

同样按照图 2 范围①和范围③计算,20 °C 时需要的安全风量如表 4 所列。

表 4 不同范围内运行的烘干炉的安全措施

项目	安全风量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )		
	范围①	范围②	范围③
最高 160 °C	2 500	1 667	1 539
最高 200 °C	2 813	1 875	1 731
最高 300 °C	4 091	2 728	2 518

从表 4 可以看出:采取的安全措施组合越多,安全风量需求越少。最高温度 160 °C 时,范围①需要  $2\ 500 \text{ m}^3/\text{h}$  安全风量,在采取更多的组合措施后,范围③仅需要  $1\ 539 \text{ m}^3/\text{h}$ 。烘干炉最高温度越高,对安全风量要求也越高。最高温度 160 °C 时,范围①需要  $2\ 500 \text{ m}^3/\text{h}$  安全风量,最高温度 300 °C 时,而范围①增加到  $4\ 091 \text{ m}^3/\text{h}$ 。对于面漆烘干炉,达到 300 °C 显然超出 PVC 和 2K 清漆的烘干窗口,出现过烘,而且甚至超过了清漆的燃点。只有故障时才出现此温度,因此加热箱除了有温度调节传感器外,一般设置有额外的超温报警传感器,增加安全性。

### 3 GB 1443—2007

DIN EN 1539 提出材料成分未知,爆炸下限按照  $40 \text{ g/m}^3$  计算。根据 GB 1443—2007 计算安全风量如下:每小时挥发可燃物总量  $G=28\ 804 \text{ g}$ ,爆炸下限  $a=40 \text{ g/m}^3$ , $Q_c=4G/a=4 \times 28\ 804/40=2\ 880 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

挥发可燃物包括 2K 清漆和 PVC,其中 2K 清漆占比 76%。挥发可燃物主要成分是乙酸丁酯。根据乙酸丁酯计算安全风量,相关计算参数汇总如下:挥发可燃物总量  $G=28\ 804 \text{ g/h}$ ,蒸气密度 4.01(空气=1),爆炸下限 1.2%, $Q_c=4G/a=4 \times 28\ 804/57.74=1\ 995 \text{ m}^3/\text{h}$ ,其中  $a=\text{爆炸下限}(\%) \times \text{蒸气密度} \times 1.2 \times 1\ 000 = 1.2\% \times 4.01 \times 1.2 \times 1\ 000 = 57.74 \text{ g/m}^3$ 。

由于挥发可燃物不止一种成分,根据现场使用的清漆和固化剂等 MSDS 成分,计算汇总如表 5 所列。

表 5 不同挥发可燃物的安全风量

成分	CAS 号	爆炸下限/%	蒸气密度 (空气=1)	爆炸极限值 $a/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	安全风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
乙酸丁酯	123-86-4	1.20	4.01	57.74	1 995
1,2,4-三甲苯	95-63-6	1.20	4.10	44.28	2 602
正丁醇	71-36-3	1.40	2.55	42.84	2 689
乙苯	100-41-4	1.00	3.66	43.92	2 623
石油加氢轻馏分	64742-47-8	0.60	5.93	42.70	2 698

GB 1443—2007 未提到混合挥发可燃物的计算方法。DIN EN 1539 明确对于混合物成分已知,但混合物的爆炸下限未知时,爆炸下限必须采用混合物中最低爆炸下限的成分。根据此方法,安全风量取决于石油加氢轻馏分,来源于 PVC 溶剂,安全风量为  $2\ 698 \text{ m}^3/\text{h}$ 。不同于 DIN EN 1539,NFPA 86 采取加权计算的方法。

NFPA 86 混合爆炸下限  $=100/(P_1/L_1+P_2/L_2+\dots+P_n/L_n)$ ,其中: $P_{1,2,\dots,n}$  为每种溶剂量的百分比, $L_{1,2,\dots,n}$  为每种溶剂的爆炸下限值。

由于材料比例都是在一定范围内波动,安全风量介于 1 995~2 698 m<sup>3</sup>/h 之间。相比 NFPA 86, 根据 DIN EN 1539 混合物标准计算的结果偏大。

根据 GB 1443—2007 评估烘干炉温度的影响,面漆烘干炉温度最高 160 ℃, 不同于 DIN EN 1539 和 NFPA 86 爆炸下限随着温度升高而降低的要求, 根据 GB 1443—2007 对于连续性烘干炉,烘干炉温度 ≥ 120 ℃,取室温时爆炸下限值,因此上述计算结果无需再修正。

通过上述对比分析,根据 GB 1443—2007,单一挥发可燃物安全风量计算简单,材料成分未知,参照 DIN EN 1539,按照 40 g/m<sup>3</sup> 计算,安全风量为 2 880 m<sup>3</sup>/h,对于连续性烘干炉温度无影响。按照主要可燃物成分乙酸丁酯,最小风量为 1 995 m<sup>3</sup>/h;参考 DIN EN 1 539 中明确对于混合物成分已知,但混合物爆炸下限未知时,爆炸下限必须采用混合物中最低爆炸下限的成分,安全风量为 2 698 m<sup>3</sup>/h;参考 NFPA 86 加权计算方法,安全风量介于 1 995~2 698 m<sup>3</sup>/h 之间。

#### 4 烘干炉安全风量设计

面漆烘干炉采用废气焚烧炉 TNV 设计,如图 1 所示,从烘干炉中抽废气到 TNV 后,在 TNV 高温裂解和换热后形成净化空气,净化空气给各个加热箱提供热量,最后经过新鲜空气换热后经烟囱排放。补的新鲜空气即安全风量,用于确保烘干炉的安全。

烘干炉不仅要满足安全风量,而且提供生产所需足够热量的风量。面漆烘干炉从最初设计 12 000 Nm<sup>3</sup>/h 优化至 8 300 Nm<sup>3</sup>/h,根据风平衡,优化后实际补充 8 300 Nm<sup>3</sup>/h,即 20 ℃时 8 908 Nm<sup>3</sup>/h 的安全风量<sup>[1]</sup>。

根据 DIN EN 1539 按照满足爆炸下限 40 g/m<sup>3</sup>、温

度系数-20%范围<sup>①</sup>计算,安全风量为 2 500 m<sup>3</sup>/h。如果采用更严格的安全组合措施,安全风量可以降低到 1 539 m<sup>3</sup>/h。

根据 GB 1443—2007,无论何种计算方式,安全风量均介于 1 995~2 880 m<sup>3</sup>/h 之间。

烘干炉热量所需要的风量远大于烘干炉的安全风量,因此整体设计角度是安全的。

烘干炉一般通过不同加热箱,风幕以及烘干炉出入口两侧微负压补充安全风量,不同的设计方案有差异。由于挥发可燃物大部分从升温区蒸发出来,故排风装置应设置在浓度高的部位<sup>[2]</sup>。

烘干炉爆炸的设计具体安全方案,DIN EN 1539 和 GB 1443—2007 都有防爆区域划分、爆炸泄压等具体要求。根据挥发可燃物浓度,DIN EN 1539 爆炸下限分区设计,给出不同的安全措施或安全组合,可以结合不同烘干炉特点进行设计。

#### 5 结语

本文基于 DIN EN 1539:2016 和 GB 1443—2007,并参考 NFPA 86-2011,对涂装车间面漆烘干炉的安全风量进行研究。研究烘干炉的安全风量,对烘干炉安全设计和烘干炉的优化有重要的意义。除了节能优化外,生产中车型和材料变化、工艺变更等都可以利用本文计算和修正安全风量及相关要求。

#### 参考文献:

- [1] 李兵,周波.涂装车间天然气节能研究[J].现代涂料与涂装,2011(11):39-42.
- [2] 王锡春.涂装车间设计手册[M].2版.北京:化学工业出版社,2013:269-270.

(上接第 39 页)

7)无滑梯输送系统的应用,预估收益:降低能耗 10~20 kW·h/台。

8)冷凝水回收,预估收益:降低能耗 0.5~2 kW·h/台。

9)可变风量烘干炉,预估收益:降低能耗 3~8 kW·h/台。

10)PTRO/EDRO,预估收益:减少废水排放 0.2~0.5 t/台。

#### 5 结语

随着环保及节能降耗要求的提高,主机厂越来越注重技术创新、材料创新、设备创新、工艺创新,在未来的发展中谁能用最低的成本、最低的能耗、最小的污染

去从事涂装生产,那么它就将占据生存的优势。绿水青山就是金山银山,未来涂装的生产方式必然是与自然共存的和谐方式。

#### 参考文献:

- [1] 王锡春,吴涛.涂装车间设计手册[M].3版.北京:化学工业出版社,2019.
- [2] 潘雷亮,徐世杰.汽车涂装生产线规划设计[J].设备管理与维修,2019(2):158-159.
- [3] 仓里.涂装工艺[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [4] 刘登良.涂料工艺[M].2北京:化学工业出版社,2009.
- [5] 汪士选.汽车涂装[M].北京:化学工业出版社,2010.