

基于节能环保的粉末固化炉结构优化设计

高晓娟, 金海陆, 李月林

(天津七所高科技有限公司, 天津 300409)

摘要: 研究了新型的粉末固化炉结构, 以实现输送系统的吊装结构放置在固化炉外部, 使得固化炉在升温和工作过程中吊装输送系统的钢结构保持车间内常温的状态, 以降低能源消耗, 减少固化炉的热量浪费。优化后的结构主要由柔性连接组件和柔性密封组件组成, 简单可靠, 小巧, 可实现热胀冷缩补偿, 柔性化程度较高。结合热压通风原理, 探讨了结构优化前后炉体的能源消耗计算对比, 该结构造价低, 运行维护成本低, 在实际应用中可明显提升能源利用率。

关键词: 粉末固化炉; 热压通风; 节能环保; 结构优化

中图分类号: TQ639

文献标志码: B

文章编号: 1007-9548(2024)04-0053-03

Optimized Design of Powder Curing Oven Structure Based on Energy Saving and Environmental Protection

GAO Xiao-juan, JIN Hai-lu, LI Yue-lin

(Tianjin 707 Hi-Tech Co., Ltd., Tianjin 300409, China)

Abstract: Powder curing oven structure is investigated in this article. Purpose is to realize the hoisting structure of the conveying system to be placed outside the curing oven. The steel structure of the hoisting and conveying system of the curing oven is kept in the normal temperature state in the workshop during the heating and working process, so as to reduce the energy consumption and the heat waste of the curing oven. The optimized structure is mainly composed of flexible connection components and flexible sealing components, which are simple, reliable, compact, and can realize thermal expansion and contraction compensation, with a high degree of flexibility. Combining with the principle of stack ventilation, calculation of energy consumption is compared before and after structure optimization. The structure has low material cost and maintenance cost, it can significantly improve energy utilization in applications.

Key words: powder curing oven; stack ventilation; energy saving and environmental protection; structural optimization

0 引言

表面涂装的核心作用是提高产品的耐用性和装饰性。近年来, 由于粉末涂装具备绿色环保零 VOC 排放、涂层坚固耐用耐高温、生产综合成本低等优势, 正在逐步代替油漆涂装, 尤其大型零件物流装备(如集装箱)、工程机械、汽车工业等正在全面快速地进行“漆改粉”提升改造工程。

收稿日期: 2023-07-19

作者简介: 高晓娟(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事涂装线体总体结构设计工作。E-mail: gxj707gk@sina.com。

对比油漆涂装线, 粉末涂装线需要粉末固化设备模块, 使工件表面附着的粉末达到更高的熔融温度(粉末熔融固化温度 170~220 °C, 油漆烘干温度 80~120 °C), 此模块的能源消耗比喷漆线更高。此外大型工程零件体积大、质量重, 升温过程消耗更多能量。

常规的粉末固化炉的结构是输送系统钢结构支撑在固化炉体内部, 初次升温时候除了需要将炉体内部的空气加热到 170~220 °C, 另外还要同步将炉内支撑输送系统的钢结构升温至这个温度, 小型零件此部分所消耗的热能较低, 可忽略; 但是大型零件涂装线体固化炉内输送系统钢结构动辄几十 t, 升温至炉体需求

温度所消耗的能量需要几十万 kcal/d, 这个对于企业来说是很大的能源浪费, 而且也不符合我国碳达峰、碳中和的目标愿景。

为实现节能降本需求, 研究新型的粉末固化炉结构, 将输送系统的吊装结构放置在固化炉外部, 使得固化炉在升温和工作过程中吊装输送系统的钢结构保持车间内常温的状态, 升温和工作时只需要保持炉内空气的温度达到要求, 以降低能源消耗, 减少固化炉的热量浪费, 提高能源利用率, 从而实现高效节能环保的粉末固化过程。

1 设计原理

常规设计是将输送系统的吊装放在固化炉内部, 如图 1 所示。将输送系统的吊装放置在炉内, 炉体需要增加吊装骨架的高度以及轨道爬坡的高度, 通常要增加的高度大约为 0.7 m, 这部分的能源消耗以及初始炉体成本投入都是无用的, 炉内此部分的热能循环其实也是无用的, 但是也必须保证热量在此高度有必要循环, 才能保证炉内整体的温度曲线, 以满足工件的固化条件, 增加了炉体配置相关设备的成本投入。

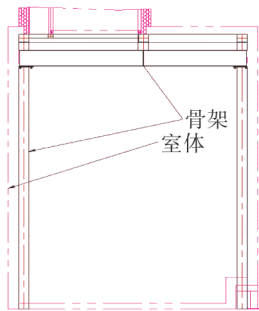


图 1 常规设计的粉末固化炉

为了节约产线的成本以及降低线体的能耗, 降低烘箱高度以优化炉体结构就成了必须要解决的问题。优化设计考虑将粉末固化炉内部输送系统的吊装骨架放置在粉末固化炉体外部, 输送系统与炉外的连接采用特殊的连接的方式进行, 吊装间距根据工件的重量进行匹配设计。为了防止炉内能源从进出口区域扩散出去造成能源浪费, 同时提升车间的工作环境, 粉末固化炉在正常工作时候处于微负压的状态。优化的新型结构的热量损失相比较与之前的常规结构设计, 能源浪费仅在输送系统与炉体内部的连接处, 此部分热量外溢由于炉体内部与车间内的空气的温差产生热压差即空气浮力, 室内外温差至少为 150 ℃, 可产生“烟囱效应”, 即温度较高的室内空气上升通过高位开口流向室外, 这种烟囱效应即热压通风原理, 散热量的损失可以依据热压作用下的散热来计算。

热压通风是一种利用热力学原理和流体力学原理

来实现空气流动的技术, 其基本原理是通过热空气产生热膨胀, 从而形成气流, 然后利用气流的动力将空气从低压区域输送到高压区域, 从而实现流动, 如图 2 所示。这种以室内外温度差引起的压力差为动力的自然通风, 称为热压差作用下的自然通风。

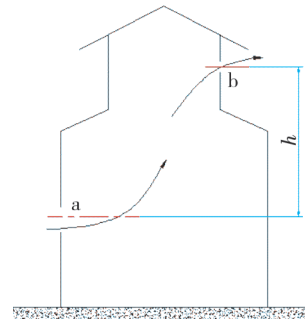
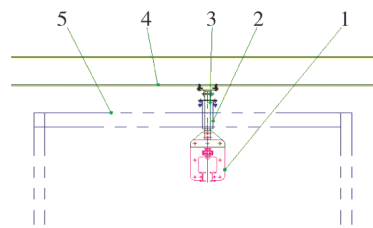


图 2 热压通风原理

室体在受到风压、热压同时作用时, 室体各窗孔的外压差就等于风压、热压单独作用时窗孔内外压差之和。窗孔 a、b 的内外压差分别为: $\Delta P_a = \Delta P_{sa} - K_a V_w^2 \rho_w / 2$, $\Delta P_b = \Delta P_{sb} - K_b V_w^2 \rho_w / 2$, $\Delta P_b - \Delta P_a = hg(\rho_w - \rho_n)$, 式中: ΔP_{sa} 为窗孔 a 的余压, Pa; ΔP_{sb} 为窗孔 b 的余压, Pa; K_a 、 K_b 分别为窗孔 a、b 的空气动力系数; h 为窗孔 a 和 b 的高度差, m; ρ_w 为室外空气密度, kg/m³; ρ_n 为室内空气密度, kg/m³。

新型粉末固化炉结构如图 3 所示, 粉末固化炉内部和车间由于温度差, 在吊装的开孔处即炉体隔热套筒处形成了热压通风。



1. 轨道吊板; 2. 炉体隔热套筒; 3. 炉内轨道吊板与炉外骨架连接件; 4. 炉外骨架; 5. 粉末固化炉

图 3 输送系统与炉外骨架连接示意

套筒处炉内温度为 t_{in} , 根据需要取 180~220 ℃; 炉外车间温度, 按照常温取, 即 $t_{out} = 25$ ℃, 粉末固化炉套筒处由于温度不同, 密度差异产生自发热气外溢。炉体门口自然进风口与顶部的热气外溢口存在高度差, 室内外有温度差这两个是热压存在的必要条件。开口之间的热压计算公式为: $P = g\Delta h(\rho_{out} - \rho_{in})$, 式中: P 为热压, Pa; g 为重力加速度, m/s²; Δh 为两个开口的高度差, m; ρ_{out} 为室外空气密度, kg/m³; ρ_{in} 为室内空气密度, kg/m³。

吊点处热气外溢的热空气量为: $G = \eta \mu F \sqrt{2lP\rho_{in}}$,

式中： μ 为窗孔的流量系数，取经验值； F 为单个窗孔面积， m^2 ； n 为窗孔的总数。

炉体热气外溢量为： $Q=3\ 600\ c\rho_m G(t_{in}-t_{out})$ ，式中： Q 为热气外溢量， $kcal/h$ ； c 为空气比热， $kcal/(kg\cdot^{\circ}C)$ 。

本文以具体实施过的项目来举例说明。

实例设计参数：大型固化炉每班工作 10 h，每天 1 班，固化炉外部尺寸为 85 m×4.3 m×7.95 m，固化炉内吊点数 n 为 90 个，单个窗孔面积为 0.008 m^2 ，车间温度按照室温 25 $^{\circ}C$ 考虑， ρ_{out} 为 1.185 kg/m^3 （取 25 $^{\circ}C$ 时候的空气密度）；粉末固化炉内温度按照 200 $^{\circ}C$ 考虑， ρ_{in} 为 0.746 kg/m^3 ，开口高度差为 2.5 m，则热压为： $P=9.8\times 2.5\times(1.185-0.746)=10.76\ Pa$ ，吊点处热气外溢量为： $G=90\times 0.115\times 0.008\times \sqrt{2\times 10.76\times 0.746}=0.33\ m^3/s$ 。则热气外溢量为： $Q=3\ 600\ c\rho_m G\Delta t=0.24\times 0.745\times 3\ 600\times 0.33\times(200-25)=37\ 172.52\ kcal/h$ 。

每班升温所散失的热量为： $Q_{升温}=18\ 586\ kcal/h$ ，每班散失的总热量为： $Q_{总}=9\times Q+Q_{升温}=353\ 134\ kcal$ 。

采用常规结构输送系统钢结构在炉内，炉体加高 400 mm，则每班热损耗量计算如下。

固化炉外部吊装积放链型材为 32 t，初始升温型材所消耗的热量为： $Q_{型材}=cm\Delta t=0.115\times 32\ 000\times(200-25)=644\ 000\ kcal$ 。

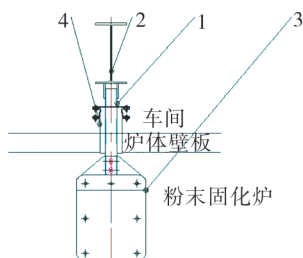
炉体加高 400 mm，成本增加不计入，只考虑热量损失，则增加 400 mm 后，空气热量损失增加为： $Q_{增高热损}=cm\Delta t=0.24\times 1.185\times 85\times 4.3\times(200-25)=18\ 190\ kcal$ 。

采用常规结构热损共计：662 190 kcal。

对比传统常规结构，每天热量损失仅为原来的 53%，节约能源近一半。

2 输送系统吊装结构示意图

炉体隔热套筒结构主要由柔性连接组件和柔性密封组件组成，如图 4 所示。柔性密封组件安装在炉体壁板上，密封炉体的开孔以及隔热，同时配置有耐高温弹性密封套筒，可以补偿室体热胀冷缩产生的变形量与外部固定骨架之间的相对稳定，保证线体可以正常运行。



1. 炉外骨架与炉内输送系统连接的柔性连接组件；
2. 炉外骨架；3. 炉内轨道吊板；4. 炉体

图 4 炉体隔热套筒结构示意图

柔性连接组件主要是连接炉体外部骨架与输送系

统的连接件，由于室体较大较长，轨道的热胀冷缩调节量相对较大，因此该部分连接需要是柔性调节，且方向是万向的，还需要耐炉体内部的温度，甚至于比炉体温度更高，因此该部分的柔性调节量需要计算准确，满足生产需求，且耐温要求要达到 250 $^{\circ}C$ 。此部分优化设计完成以后，就可以实现将轨道和工件的承载骨架放置在粉末固化炉炉体外部，在升温过程和正常生产过程中只有炉体进出口和炉体顶部开孔处的热压损失，此结构简单可靠，小巧，可实现热胀冷缩补偿，柔性化程度较高，且没有冗余结构，在高温状态下无需维护，极大地减少了炉体内部的能源浪费。

3 使用效果

为检验此设计使用效果，本文按照具体实施的计算项目进行验证，将结构优化前后的能耗比进行测试，结果见表 1 所列。

表 1 结构优化前后能耗对比

项目	优化前	优化后
每班时间/h	10	10
每班生产工件质量/t	2 100	2 100
天然气每班流量/ m^3	1 550	1 490
炉内吊装积放链骨架质量/t	32	0
燃烧机配置/($kcar\cdot h^{-1}$)	300 万	250 万
骨架形式	内置	外置

骨架内置时，每班升温阶段的热损失为 290 万 $kcar/h$ ，每班天然气流量为 1 550 m^3 ，改为骨架外置后，32 t 积放链吊装骨架放置在炉体外部，每班升温阶段的热损失为 230 万 $kcar/h$ ，每班天然气流量为 1 490 m^3 ；每班节约天然气能源为 60 m^3 ，每年工作 220 d，节约天然气能源为 13 200 m^3 ，降低成本 4 万余元。

4 结语

该设备整体布局合理，结构紧凑，降低了设备的投入和能源消耗成本；此结构简单可靠，耐高温，柔性化程度较高，在高温状态下无需维护。

参考文献：

- [1] 王锡春. 涂装车间设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 范祖尧. 现代机械设备设计手册 第 3 卷 非标准机械设备设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [3] 吴德荣. 化工工艺设计手册[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] 朱尚斌, 李灿, 陈泉. 孔口面积及热源位置对热压通风影响的模拟研究[J]. 湖南工业大学学报, 2017(5): 39-44.
- [5] 刘建军, 仝辉, 孔鸿玲. 基于热压通风原理的建筑建构模式研究[J]. 山东建筑大学学报, 2011(5): 494-497.