

涂装车间前处理槽体搅拌管路优化设计

尹成果, 程依, 韩俊, 尚龙飞, 李昂

中国汽车工业工程有限公司 天津 300113

摘要: 提出了一种优化的涂装车间前处理槽体搅拌管布置型式, 与传统型式相比, 优化型式使用的手动阀门数量大大减少, 这使得生产管理时管控点和风险点数量大为减少。通过计算, 优化型式的成本显著低于传统型式。但优化型式对管路设计的要求更高, 需要进行更详细的仿真计算。从flownex软件流量仿真的结果看, 优化型式的流量分配是完全满足要求的。

关键词: 前处理; 搅拌管; 流量分配; flownex仿真; 成本分析

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.11.011

前处理设备是汽车涂装生产线的重要组成部分, 在前处理工艺段, 白车身需要经过脱脂、水洗工序, 把车身表面的油污、焊渣、纤维等杂质清洗干净, 再经过磷化(或薄膜处理)、水洗、纯水洗等工序生成一层薄膜。前处理质量的好坏, 对后序电泳漆膜的质量具有决定性的作用, 并对中涂、面漆涂层的质量产生影响。要实现良好的前处理效果, 必须使前处理各槽液充分流动起来。实际工程中, 一般采用混流喷嘴实现, 向混流喷嘴供液的管路称为搅拌管。槽液搅拌可以实现三个功能: 使脱脂、磷化等化学反应稳定进行; 通过槽液流动增强清洗效果; 把槽体底部的杂质搅动起来让泵吸走从而在过滤器中除去。因此, 做好槽体搅拌管路的设计和生产管理具有十分重要的意义。

管路布置型式

1. 传统布置型式

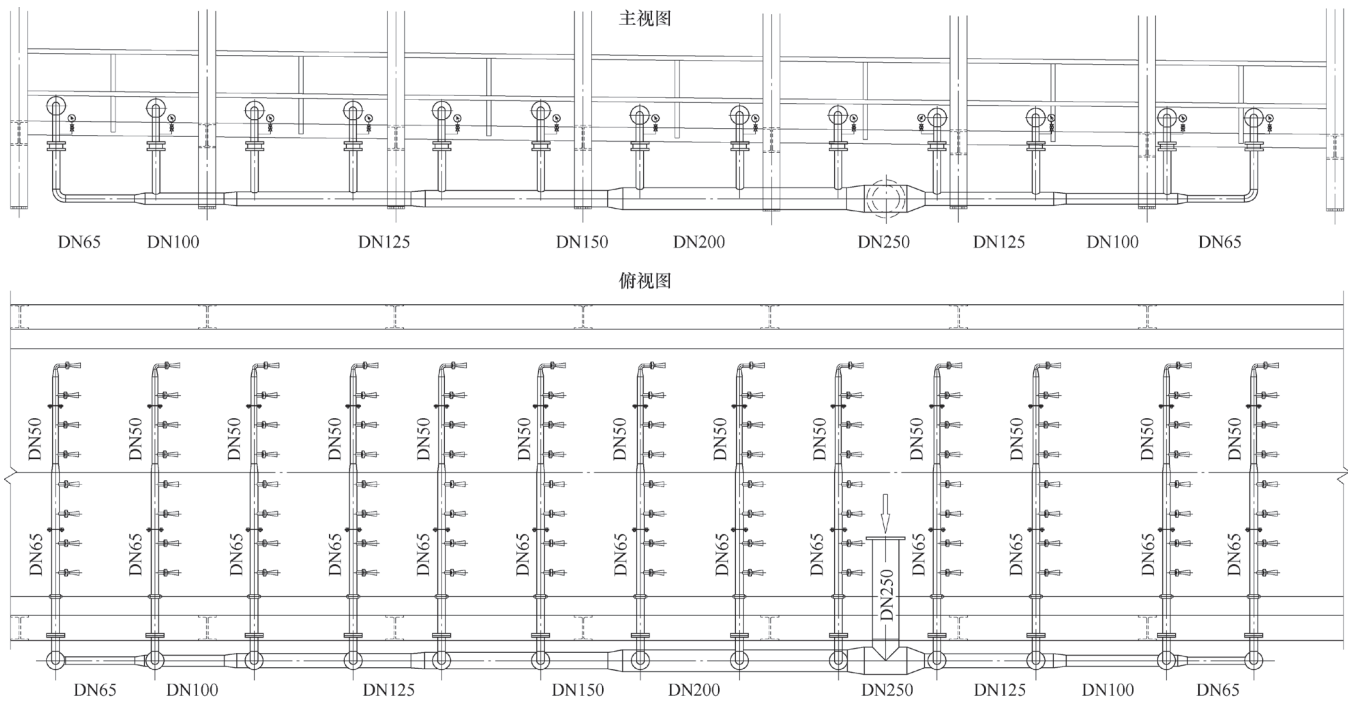
传统的管路型式为, 槽体内部布置多根独立的搅拌管, 每根搅拌管在槽体外侧设有手动阀门和压力表, 以实现对接压力的控制。

以某项目的脱脂槽底部搅拌管为例, 主管路流量为 $324\text{m}^3/\text{h}$ (90 kg/s), 末端混流喷嘴按照初选压力 0.15MPa 选型为HL30, 标准流量为 50 L/min ($3.0\text{ m}^3/\text{h}$), 结合脱脂槽尺寸确定搅拌管数量为13根, 每根有8个喷嘴, 校验喷嘴实际流量为 $324\text{m}^3/\text{h} / (13 \times 8) = 3.12\text{m}^3/\text{h}$, 略大于初选压力下的标准流量, 符合要求。按照传统的管路型式, 每根搅拌管的管径为DN65, 如图1a所示。

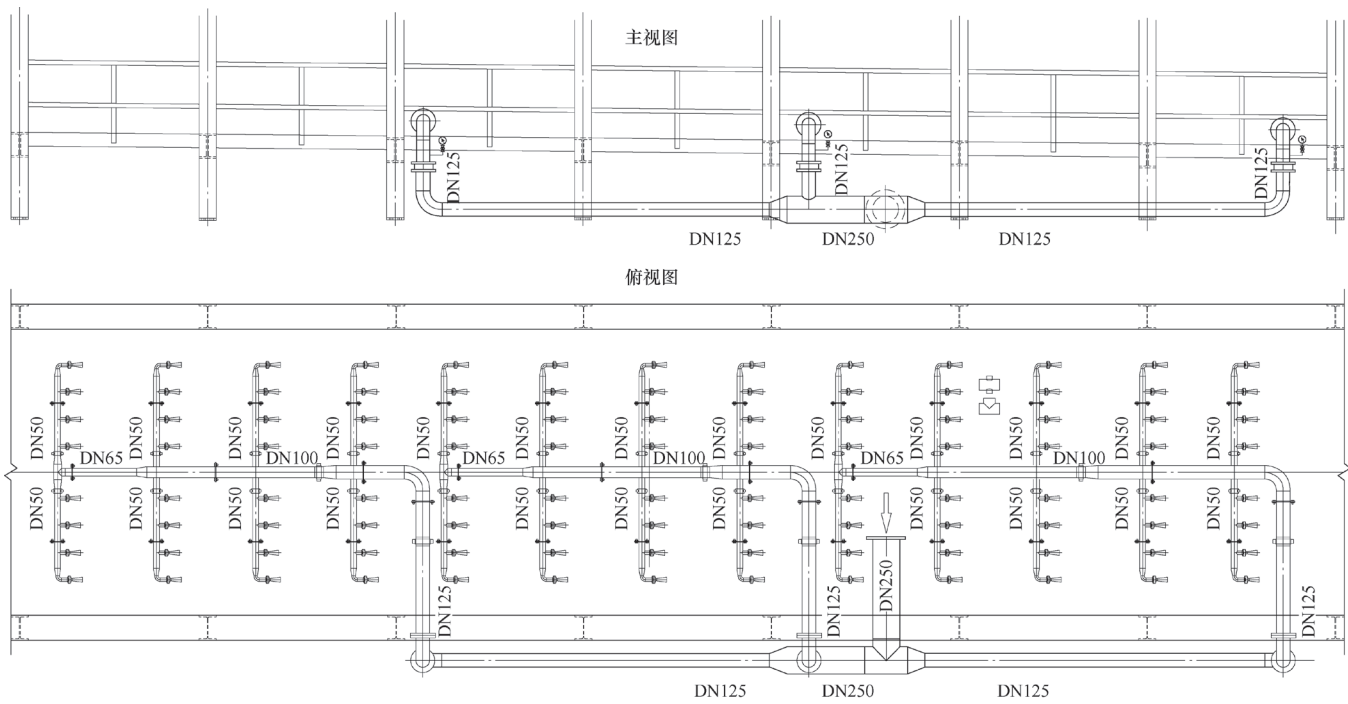
2.优化布置型式

一种优化的管路型式为，将槽体内部的搅拌管分为若干组，每一组在槽体外侧设置一个手动阀门和压力表，组内各支管的流量分配靠管路变径实现基本均等。

如果按照优化的管路型式，可将13根搅拌管按照4、4、5分为三组，每根汇管的管径为DN125，汇管进入槽内之后，从中间向两边分出支管，支管管径为DN50，每根支管有4个混流喷嘴，如图1b所示。



a) 传统布置型式



b) 优化布置型式
图1 两种管路布置型式

管路流量分配设计

为判断各搅拌管的流量分配是否均衡，使用 flownex 软件^[1]进行仿真分析。该软件是一个通过 ISO9001:2008 质量认证的一维热流体系统仿真软件，一维仿真是指将复杂的三维流动结构离散成由若干个一维流动元件组成的网络拓扑结构，对每个流动元件采用一维的经验关系式计算其流动与传热，然后全网联立求解，求得网络上每个元件的流量与换热量以及每个节点的温度、压力等参数。一维仿真软件认为，只在长度方向上发生参数的变化，而在任一截面上的各参数均相等。本案例中，不考虑传热过程。

1. 传统型式的流量分配

为使流量尽量均衡分配，槽体外部主管路需要逐级变径。从图1的主视图可以看出，入口DN250的管径向两边分别变径为DN200和DN125，再逐级缩小至DN65。异径管的位置和尺寸需要依据仿真结果确定，目标是确保在阀门开度相同时，各搅拌罐的流量趋同，然后再通过调节阀门的开度，缩小流量差距。

flownex 中建立的主管路逐级变径模型如图2所示。其中入口压力设置为350kPa，温度设置为45℃，13个出口压力均设置为310kPa，介质为水，入口质量流量设置为90kg/s，管路材质为不锈钢，表面粗糙度为

67.5 μm。

将13个节流器的开度设置为1，计算出所有阀门全开时的流量，结果见图3中蓝色柱状图，其中流量最小的是第4根搅拌管，为5.84kg/s，比理论平均流量（90 kg/s/13=6.92kg/s）小15.6%，流量最大的是第13根搅拌管，为7.97 kg/s，比理论平均流量大15.1%。

调整节流器的开度，再计算各支管的流量，直至计算出的流量最为平均。由于实际采用的手动蝶阀一般有10档限位，因此开度的取值可精确到小数点后1位，即0.9、0.8、0.7等，阀门的开度不宜小于0.5，如果开度过小，说明阀门管径选型过大，而且会导致使用时的调节余量较小。

经过迭代尝试，确定了各个阀门的最佳开度和流量，分别如图3中的橙色折线图和橙色柱状图所示。其中阀门全开的有3根，开度为0.9、0.8、0.7的分别有2、3、5根；流量与理论平均流量偏差最大的是第13根搅拌管，为7.23 kg/s，偏差为+4.4%。

2. 优化型式的流量分配

计算优化形式的流量分配，需要分两步进行，先要计算出主管路所连接的3根支管的流量和阀门开度，再计算每根支管到搅拌管的流量分配。为体现出优化设计方法可以适应更复杂的情况，本案例特意选择13

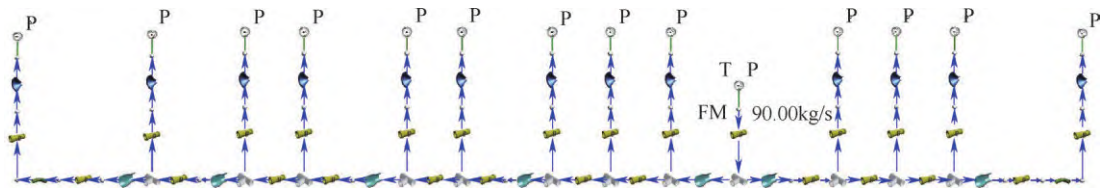


图2 主管路连接13根支管模型

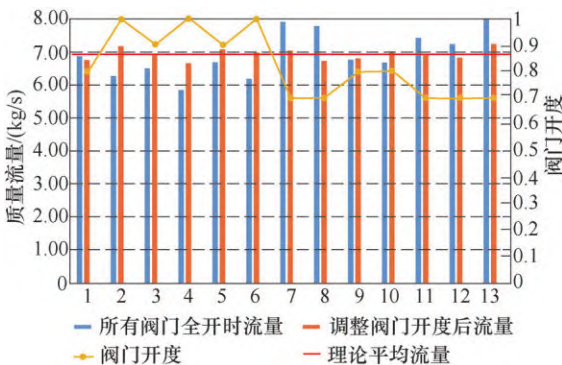


图3 传统形式下的flownex仿真计算结果

根搅拌管分配为不相等的4、4、5情形，实际设计时可以从简，将三根支管都分配4根搅拌管（左右分出，合计为8根搅拌管）。

在flownex中建立模型如图4所示，入口压力设置为350kPa，温度设置为45℃，3个出口压力均设置为330kPa。因为3根支管分别对应传统型式中的4、4、5根搅拌管，所以第3根支管的流量应为前2根支管流量的5/4倍。通过调整阀门开度，迭代尝试出结果如图4所示，其中3个阀门开度分别为0.8、0.7、全开。假设支管内流量均分，计算三组搅拌支管的理论流量分别为7.24kg/s（28.97kg/s/4）、7.27kg/s（27.28kg/s/4）、6.57 kg/s（33.75kg/s/5），与理论平均流量6.92kg/s偏差+4.7%、-1.4%、-2.5%，实际的搅拌支管流量要经过进一步仿真求解。

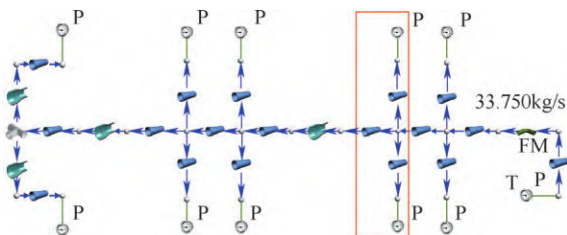


图4 主管路连接3根支管模型

确定了3个支管的流量之后，需要将其作为输入值，计算支管到搅拌管的流量分配。flownex中建立模型如图5所示，入口压力设置为330kPa，温度设置为45℃，10个出口压力均设置为310kPa，入口质量流量设置为33.75 kg/s，便可以计算出9~13根搅拌管的流量（左右支管流量合并相加，即相当于传统型式中的一整根搅拌管流量），如图6所示。

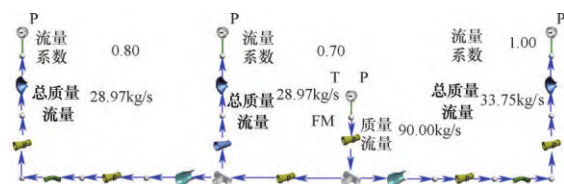


图5 支管连接搅拌管模型

由于flownex中没有异径四通模型，因此用节点代替异径四通，将其局部阻力损失设置在相应的管路上，根据手册^[2]并结合工程实际，设定DN125/DN50的分支四通的局部阻力系数为2.5，DN100/DN50的分支四通的局部阻力系数为2.0，直流四通的局部阻力系数为

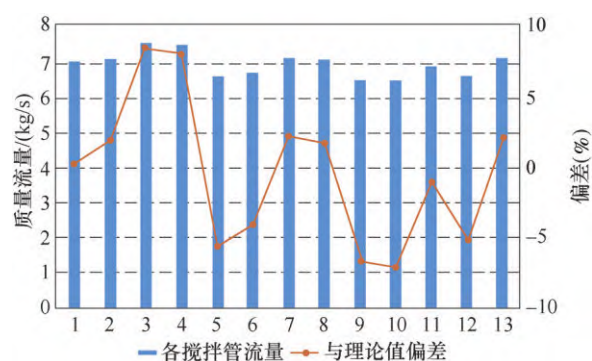


图6 优化形式下的flownex仿真计算结果

0.1。

计算第1~4、5~8根搅拌管流量时的模型，可由图5中的模型稍作修改生成，把红色矩形框内的元件删除，将直管与异径管相连，然后调整一下直管长度即可。分别将入口流量设为28.97 kg/s和27.28 kg/s，计算出第1~4、5~8根搅拌管的流量。结果显示，正负偏差最大的搅拌管为第4、9根搅拌管，分别为+8.4%、-7.1%，偏差略大于传统布置方式下调整阀门后的结果（+4.4%），但仍低于±10%的经验限值，因此是可行的。

至于搅拌管入口到各喷嘴的流量分配，由于喷嘴的收口作用产生了主要的阻力损失，所以管路上的局部阻力起次要作用，而喷嘴型号是相同的，所以认为搅拌管入口的流量在各喷嘴处是均匀分布的，因此本文不再赘述。

管路系统成本分析

1. 固定成本分析

管路系统的固定成本，包括材料成本、外购件成本、预制安装成本。管路采用SUS304薄壁不锈钢焊接钢管，根据图样计算，传统型式和优化型式的管路材料重量分别为400kg、300kg。材料和预制安装成本一般以综合单价的形式合并计算，按照5万元/t的综合单价，可粗略得出成本分别为2.0万元、1.5万元。因此优化型式的材料和预制安装成本是较低的。

外购件的种类较多，包括管件、法兰、卡箍接头、手动蝶阀、压力表（含手动球阀），表1中列出了两种布置方式下外购件的数量，简单加和可以计算出传统型式的外购件数量为140个，优化型式的外购件数

量为78个，采用优化型式，可以使外购件数量大为减少。

考虑价格因素，采用某知名电商平台的价格(此处仅进行定性分析，实际工业品价格高于电商平台价格)进行粗略估算，可得出传统型式的外购件价格为1.5万元，优化型式的外购件价格为0.9万元，优化布置型式的外购件成本也是较低的。

2.运行维护成本分析

管路系统的运行维护主要是手动阀门、仪表的日常点检和更换维修，手动阀门、仪表的数量越少，泄漏点、管控点、风险点的数量就越少。从数量上看(见表1)，优化型式仅有3个手动蝶阀和3个压力表

表1 两种布置型式的外购件数量对比

名称	规格	传统型式数量	优化型式数量
三通	DN65	0	3
弯头	DN125	0	8
	DN65	15	0
异径管	DN250/DN200	1	0
	DN250/DN125	1	2
	DN200/DN150	1	0
	DN150/DN125	1	0
	DN125/DN100	2	3
	DN100/DN65	2	3
	DN65/DN50	13	6
法兰	DN125	0	12
	DN65	52	0
卡箍接头	DN125	0	3
	DN100	0	3
	DN65	13	0
	DN50	0	26
手动蝶阀	DN125	0	3
	DN65	13	0
压力表	YBN-60	13	3
手动球阀	DN15	13	3

(含手动球阀)，而传统型式有13个手动蝶阀和13个压力表，优化后的数量大大减少，按照每年更换30%的概率，采用电商平台价格估算可节省成本0.2万元。

以上关于成本的定量分析是基于脱脂槽底部搅拌管的，放大到涂装车间前处理线和电泳后水洗线，成本是可观的。更重要的是，采用优化布置型式，可以使前处理线的点检人员、设备维护人员的数量都减少，即使仅减少1人，且按照最低工资标准计算，每年也可节约人员成本约3万元。因此，从成本分析的角度看，采用优化布置型式无疑是合适的。

结语

优化布置型式在流量分配上是可行的，但是在设计时，需要比传统布置型式多进行一步仿真计算，以确定变径管的准确规格和位置。从成本角度分析，优化布置型式的设备固定成本是明显较低的，更重要的是，手动阀门和人工点检仪表数量的大大减少，降低了生产管理时的风险点，且能够减少运维人员数量，这无疑更加符合未来汽车工厂的选择。

参考文献：

- [1] 吴俊宏. 油气管路系统仿真及数字化应用[C]. 2016中国数字管路技术大会论文集, 2016: 19-22.
- [2] 中国市政工程西南设计研究院. 给水排水设计手册(第一册)[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. **AUTO1950**

《汽车工艺师》投稿邮箱:

<http://www.auto1950.com/>



详情请扫二维码