# 基于小料配料流场的除尘罩结构优化

## 姜 鹏,王中医,李 勇\*

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:基于原有小粉料配料除尘罩(方形)模型,采用计算流体动力学(CFD)仿真方法获取罩体附近流场特征,结合目标参数实现除尘罩几何结构的尺寸优化。结果表明,除尘罩下沿加装长度正好覆盖其与粉尘收集容器间隙的水平 挡板,除尘罩下沿与收集容器上沿的垂直间距缩小至40 mm,保持抽吸管道与罩体的接口尺寸不变时,除尘罩除尘效果 最佳。

关键词:粉料;流场;除尘罩;模型仿真;结构优化 中图分类号:TQ330.4<sup>+</sup>3;O241.82 文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)10-0781-06 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.10.0781



粉体在配料和包装过程中会产生大量的粉 尘。粉尘在生产环境内飞扬,不仅损害操作工人 的身体健康,部分粉体颗粒也会加速生产设备的 损耗<sup>[1]</sup>。另外,飞扬的粉体颗粒不易沉降,会在给 料口四周大量悬浮,伴随着周围环境的空气流动, 会出现二次扬起<sup>[2-3]</sup>。目前,为了有效控制粉体包 装时充袋产生的大量粉尘,多数粉体包装设备采 用升降充填的方式来降低散落粉体的尘化,或是 直接在粉袋口增设除尘装置来除尘。在给料口增 设除尘装置,在下料过程中持续进行抽吸,所形 成的负压源可防止粉尘外溢,从而降低对环境的 污染。

近年来,除尘方面的研究多以试验和数值模 拟为主。李娟等<sup>[4]</sup>通过流体仿真软件Fluent对新型 自动配料系统除尘装置进行模拟,最终得出其在 给定负压下的空气流场、颗粒运动轨迹及影响运 动轨迹的3个变量。冯彬彬等<sup>[5]</sup>通过分析流体雷诺 数,确定气流速度是影响粉尘收集的本质因素,并 通过Fluent模拟颗粒轨迹和探究合理抽气速度。 孙健等<sup>[6]</sup>利用大型有限元分析软件MSC.Patran/ Nastran建立除尘罩的有限元模型,并证明模拟分 析具有较高的精度。于健<sup>[7]</sup>详细介绍了一种粉料 自动配料装置除尘系统的结构、工作原理和技术 参数选取。

作者简介:姜鹏(1996一),男,山东济宁人,青岛科技大学在读 硕士研究生,主要从事人-机-环境协同智慧及控制研究。

\*通信联系人(liyong30490@163.com)

有关除尘罩除尘性能的数值模拟研究现在仍 较少。本工作采用计算流体动力学(CFD)仿真方 法对目前橡胶厂各种小粉料配料系统中使用的除 尘罩的尺寸和结构进行数值模拟和优化,将影响 除尘罩除尘性能的参数量化分析,定性和定量表 征监测面的流场分布情况,从而为类似工况除尘 罩设计提供指导。

## 1 参数设定及模型建立

## 1.1 参数设定

本研究主要关注除尘罩(方形)下沿与粉尘 收集容器上沿的间隙处(监测面)流场的均匀性, 如图1所示,对以下5个主要参数进行分析优化: (1)监测面高度(*h*),即除尘罩下沿与收集容器上 沿的垂直间距;(2)除尘罩侧面高度(*H*);(3)抽 吸管道的倾斜角度(*a*);(4)除尘罩下沿加装的外 伸挡板的倾斜角度(*D*);(5)抽吸管道与除尘罩的 接口面积(*W*)。

#### 1.1.1 监测面流速

监测面流速提取如图2所示。由于优化时除 尘罩下沿加装挡板,因此监测面略有差异,但均定 义为除尘罩下沿与收集容器上沿之间的面,以无 挡板工况为例,监测面有4个流速提取点:最大流 速v<sub>max</sub>①处,该处毗连抽吸口;最小流速v<sub>min</sub>②处,该 处为无抽吸口侧面;圆角处流速③;罩口最下方流 速④。此外,监测面的平均流速⑤,是流量与面积 的比值。监测面上的全局流速(m•s<sup>-1</sup>)分布应处





为全面考察监测面上的流速分布情况,取 Polyline(见图3)上的流速值进行对比,只关注最 大流速v<sub>max</sub>⑥和最小流速v<sub>min</sub>⑦,可以看出除尘罩流 速最小位置出现在圆角处。



## 1.2 模型建立

根据图1所示结构与CFD仿真关注点,模型 在简化时保留金属内壁面(因为内壁面决定最终 流体的流通区域),删除气缸与调气阀门;由于下 料过程粉体充满料口,计算时将该口封闭,不考 虑除尘罩外侧若干固定结构对流场的影响。粉体 下料过程存在大量的颗粒运动,并且抽吸时伴随 的气固耦合运动和管道压损等现象将显著增加计 算量,计算时采用平面对称模型且仅考虑气体流 动。虽然模型计算会产生一定误差,但只要针对 主要问题,在仿真过程中平行处理原结构与各对 比方案结构,便能够获得气动性能较高的结构。

除尘罩下面的收集容器口直径按照罩口直径

减小25 mm设定,设收集容器口直径为d,流域尺度 为3d×d×2.7d,网格采用六面体与四面体混合形 式,求解时将非结构网格转换为多面体形式,如图 4所示。



仿真采用平面对称模型,转化前单元总数约 为230万,均采用有限体积法离散。计算采用k(紊 流脉动动能)-ε(紊流脉动动能耗散率)湍流模型, 二阶离散格式,支管顶部端口给定抽吸流速,四周 连通大气并给定低强度湍流参数<sup>[8-9]</sup>。

## 2 结果与讨论

为便于区分各仿真算例,在工况描述中采用 参数(见图1)记法,例如"H107-h35-a45-D45-G25-W218×87-v6.5",H107表示除尘罩侧面高 度为107 mm,h35表示除尘罩下沿与收集容器上沿 垂直间距为35 mm,a45表示抽吸管道倾角为45°, D45表示除尘罩下沿加45°倾斜角挡板,G25表示除 尘罩下沿与收集容器上沿的水平间距为25 mm, W218×87表示接口尺寸为218 mm(长度)×87 mm(宽度),v6.5表示抽吸(口)流速为6.5 m・s<sup>-1</sup>。 除尘罩的计算工况与提取点数据如表1所示。

## 2.1 h的影响

针对h的影响,共设3种对比工况,h分别为50, 35,25 mm,其中50 mm的h为原结构模型尺寸。仿 真3—6中结构尺寸仅有h发生变化,其余尺寸与原 结构相同,为接近实用流速值,计算时适当调整了 抽吸流速。由表1可以得出以下结论。

(1)原工况(仿真3)监测面平均流速较小,而 且全局最大流速超出1.5 m•s<sup>-1</sup>的要求,而最小流 速不足,这种情况下即使增大抽吸流量以增大监 测面平均流速和全局最小流速,最大流速也会过

表1 除尘罩的计算工况与提取点数据

仿真 序号	工况 编号	工况描述	全局流速			圆角处	罩口最下	监测面			Polyline流速		
			v <sub>max</sub> ①	$v_{\min}$	流速差	流速③	方流速④	面积	流量	平均流速⑤	v <sub>max</sub> 6	$v_{\min}$	流速差
1	0	H107-h35-a45-v8	1.90	1.20	0.70	1.10	1.20	0.0257	0.0363	1.41	1.74	1.33	0.41
2	0 - 1	<i>H</i> 107- <i>h</i> 35- <i>a</i> 45- <i>v</i> 6.5	1.60	0.92	0.68	0.84	0.92	0.0257	0.029 5	1.15	1.42	1.08	0.34
3	1	H98-h50-a45-v8	1.71	0.81	0.90	0.72	0.72	0.035 6	0.0363	1.02	1.26	0.95	0.31
4	2	H98-h25-a45-v8	2.45	1.55	0.90	1.42	1.55	0.0194	0.0363	1.87	2.29	1.80	0.49
5	2-1	H98-h25-a45-v5.3	1.50	1.09	0.41	0.92	1.00	0.0194	0.024 0	1.24	1.51	1.15	0.36
6	3	H98-h35-a45-v8	2.03	1.18	0.85	1.07	1.18	0.0257	0.0363	1.41	1.74	1.35	0.39
7	4	$H_{127}-h_{35}-\alpha_{45}-v_{8}$	1.80	1.23	0.57	1.14	1.23	0.0257	0.0363	1.41	1.72	1.37	0.35
8	4-1	<i>H</i> 127- <i>h</i> 35- <i>a</i> 45- <i>v</i> 6.5	1.55	1.06	0.49	0.98	1.06	0.0257	0.0308	1.20	1.46	1.15	0.31
9	5	$H107-h35-\alpha 55-v8$	1.99	1.15	0.84	1.05	1.15	0.0257	0.0363	1.41	1.73	1.35	0.38
10	6	$H107-h35-\alpha 45-$											
		D45-v8	1.70	1.43	0.27	1.34	1.43	0.024 3	0.0363	1.49	1.78	1.50	0.28
11	6-1	$H107-h35-\alpha 45-$											
		D45-v6.5	1.40	1.18	0.22	1.11	1.11	0.024 3	0.029 5	1.21	1.46	1.25	0.21
12	7	H98-h35-a45-											
		D45-v6.5	1.40	1.12	0.28	1.04	1.12	0.024 3	0.029 5	1.21	1.48	1.24	0.24
13	0	H98-h50-G25-											
		$W218 \times 87 - v8$	1.55	0.74	0.81	0.74	0.74	0.041 8	0.0363	0.87	1.07	0.84	0.24
14	0 - 1	H98-h50-G25-											
		$W218 \times 87 - v11$	2.23	0.94	1.29	0.94	0.82	0.041 8	0.049 9	1.19	1.50	1.17	0.33
15	1	H98-h50-G0-											
		$W218 \times 87 - v11$	1.53	1.12	0.41	0.96	1.04	0.094 0	0.049 9	1.27	1.50	1.21	0.29
16	2	H98-h40-D0-G0-											
		$W218 \times 87 - v8.6$	1.43	1.13	0.30	0.98	1.06	0.0315	0.0390	1.24	1.46	1.19	0.27
17	3	H98-h40-D0-G0-											
		$W268 \times 87 - v8.6$	1.41	1.11	0.30	1.04	1.11	0.0315	0.0390	1.24	1.44	1.21	0.23
18	4	H98-h40-D0-G0-											
		$W268 \times 40 - v8.6$	1.50	1.10	0.40	1.02	1.02	0.0315	0.0390	1.24	1.52	1.18	0.34
19	5	H98-h40-D0-G0-											
		$W168 \times 87 - v8.6$	1.43	1.13	0.30	1.06	1.06	0.0315	0.0390	1.24	1.46	1.20	0.26

注:流速单位均为m•s<sup>-1</sup>,面积单位为m<sup>2</sup>,流量单位为m<sup>3</sup>•s<sup>-1</sup>。

大,因此不能满足要求。

(2)当h缩小为25 mm(仿真4和5)时,通过调整抽吸流速可令监测面平均流速满足要求,但全局最小流速、圆角处流速以及Polyline最小流速均较小,因此不能满足要求。

(3) h在前两者之间选取35 mm(仿真6)时,情况与(1)节所述类似,因此不能满足要求。

综上所述,在同样抽吸流速条件下,*h*为50, 35,25 mm对应的全局最大流速分别为1.71,2.03, 2.45 m • s<sup>-1</sup>,差异较为明显。但同时不难发现两 点:首先,缩小*h*可以减小抽吸流量,从而降低除尘 能耗;其次,减小抽吸流量的同时减小了全局最大 流速和最小流速,结果与优化指标无法协调,因此 单纯改动*h*很难获得较佳方案。 分析发现:全局最大流速超标,无法满足工况 要求,而该流速提取位置为监测面对应抽吸口的 正下方,受抽吸流速影响严重,因此不妨将H增大, 这样可减小最大流速;另外,从降低能耗的角度考 虑,可以缩小h,以减小抽吸流量,但h为25 mm时过 小,监测面上流速梯度变化较大,不利于达到收集 容器近口工况要求,因此下面的研究h取35 mm。

## 2.2 H的影响

为了验证H的影响,共提出3个H方案,H分别 为98,107,127 mm,其中98 mm的H为原结构模型 尺寸。仿真1,2,6,7,8中仅H发生变化。由表1可 见,改变H带来的流速减小效果并不明显。对h和H 的影响进行量化,分别如图5和6所示(以原结构模 型为基础)。由曲线斜率可知,h的影响远大于H。



图6 H对全局流速的影响

仔细观察图6可以很容易地发现,随着H的增大,全局最小流速略微增大,即随着H的增大,监测面流速均匀性有所提高,但效果不明显,说明H可不作重点考虑。下面的研究H取中值,即为107mm。

#### 2.3 α的影响

由表1可见,仿真9的α在原结构模型为45°的 基础上增大10°,对比仿真1与9的各项参数值,发现 差异较小,可以认为改变α对流速的影响不大,可 以忽略,因此对α的改动可不予考虑。

## 2.4 挡板的影响

## 2.4.1 倾斜挡板

除尘罩挡板的D为45°,长度为20 mm。挡板及 监测面位置如图7所示。

由表1中仿真1,2,6,10,11,12的各项参数值 可知,加挡板后流场均匀性明显改善。下面重点 分析仿真11和12与其他仿真算例的区别。



#### 图7 倾斜挡板及监测面位置示意

(1)加装挡板后,抽吸流速减小,即6.5 m·s<sup>-1</sup> 时基本可以达到使用要求,耗气量减小;

(2)无挡板工况全局流速差大,很难协调最大 流速和最小流速的关系,而加装挡板后监测面上 最大流速较无挡板工况有所降低,最小流速略微 增大。

结合图7可知,在相同h的前提下,加装挡板后 监测面面积较无挡板工况小,因此监测面平均流 速相同时,所需要的抽吸流速小,另外监测面全局 最大流速和最小流速提取位置分别靠近B(C)及A 点,由于加装挡板后,最大流速位置C点较无挡板 时的B点远离抽吸口,因此该处流速大为减小,而A 点处流速会有小幅增大,因为监测面面积减小,气 流流通AC面时会受挡板挤压,这样的综合作用使 得监测面上的流速分布均匀性得到提高。

由此可见,在除尘罩下沿加装挡板可以显著 改善流场特征,实现优化目的,由于仿真11和12均 满足工况要求,建议保持原结构H。

### 2.4.2 水平挡板

实际使用过程中,为防止除尘罩内壁面吸附 的粉尘落在收集容器外,通常收集容器边沿直径 大于除尘罩边沿直径25 mm左右,且挡板延伸后 其边沿超过容器口,这样在清灰过程中,粘附在除 尘罩内壁面的粉尘易受气流扰动而掉落收集容器 外,因此在除尘罩下沿加装水平挡板,由于收集容 器边沿直径较除尘罩边沿直径大25 mm,挡板正好 覆盖该缝隙,如图8所示。

水平挡板可以规避倾斜挡板易造成粉料沿挡 板滑落至收集容器外的缺点,同时也类似倾斜挡 板,起到约束外侧进气的作用<sup>[10-11]</sup>。结合表1中仿 真14和15的各项参数值可见,加装挡板后流场分 布改善很明显,全局最大流速显著减小,由2.23



**m**•s<sup>-1</sup>变为1.53 m•s<sup>-1</sup>,由于抽吸气流下行,全局 最小流速增大,由0.94 m•s<sup>-1</sup>变为1.12 m•s<sup>-1</sup>,各 衡量流速接近设定指标,优化效果较明显。

原结构和加挡板结构监测面流场分布如图9 所示。



(a)原结构



(b)加挡板结构

图9 原结构和加挡板结构监测面流场分布(h=50 mm) 由图9可见,对于原结构,除尘罩红色区域(高速区)仅在抽吸管道与罩体接口面附近,加装水平 挡板后,整个监测面流速改善较为明显。

以往除尘罩现场使用时发现:当h为45~50 mm时,除尘效果较好;原结构模型中h为50 mm,由 仿真15的各项参数值可见,结果较为接近优化目 标。通过流体理论可知,当流通面减小时,流速会 有所提高,因此不妨针对h进行量化分析。仿真16 将h减小为40 mm,全局流速分布有一定改善,主要 表现在最大流速有小幅减小,最小流速无明显变 化,因为该效果较优,后续分析h取40 mm。

## 2.5 W的影响

监测面是除尘罩下沿与收集容器口上沿之间 的连线沿周向扫略一周形成的。为了便于分析监 测面靠近和远离抽吸管道与除尘罩接口位置处的 流动均匀性,将监测面分为左、中、右三部分。监 测面分区和抽吸管道与除尘罩接口如图10所示。



#### 图10 监测面分区和抽吸管道与除尘罩接口示意

为进行接口面积对比,采用小、中(原结构模型尺寸)、大3种长度等级,宽度则选取87 mm(原结构模型尺寸)和约减半40 mm两种。接口面积影响的分析结果如表2所示。由表2可以得出以下结论。

(1)对于原结构(仿真14)不加挡板工况,h较 大,使监测面面积增大,不仅需要较大的抽吸流 速,而且易造成两侧区域流速较中部区域低。

(2) 增加挡板后, 接口宽度采用40 mm时, 流场 分布效果不佳, 而长度变化对流速影响不明显。

综上所述,当加装挡板后,W对监测面平均 流速影响不大,但当接口宽度减小时,流动效果 亦有所减弱。因此希望通过加大W来改善侧面 流速较低的情况存在一定阈值,即接口尺寸选择 156~216 mm小、中等长度和87~90 mm宽度可满 足要求,接口面积过大不会产生额外效益,而且对 除尘罩侧面安装其他装置也有妨碍。

### 3 结论

通过对除尘罩和除尘系统的流场进行仿真模 拟,得出监测面的流速分布,总结得到以下结论。

(1)除尘罩下沿加装长度正好覆盖其与收集容器间隙的水平挡板对监测面流速分布影响显著,可明显提高流速分布均匀性,是设计除尘罩时需要重点考虑的因素。

橡胶工业

表2 W影响分析												
仿真	工况	工石井子	W		监测面-中	1	监测面-左			监测面-右		
序号	编号	工优抽还		面积	流量	流速	面积	流量	流速	面积	流量	流速
14	0-1	H98-h50-G25-										
		$W218 \times 87 - v11$	0.0190	0.015 5	0.0200	1.29	0.0132	0.0151	1.14	0.0132	0.0148	1.12
16	2	H98-h40-D0-G0-										
		$W218 \times 87 - v8.6$	0.0190	0.0111	0.014 3	1.29	0.0102	0.0124	1.22	0.0102	0.0123	1.21
17	3	H98-h40-D0-G0-										
		$W268 \times 87 - v8.6$	0.023 3	0.0111	0.014 2	1.28	0.0102	0.0124	1.22	0.0102	0.0124	1.22
18	4	H98-h40-D0-G0-										
		$W268 \times 40 - v8.6$	0.0107	0.0111	0.0143	1.29	0.0102	0.0124	1.22	0.0102	0.0122	1.20
19	5	H98-h40-D0-G0-										
		$W168 \times 87 - v8.6$	0.014 6	0.0111	0.014 3	1.29	0.0102	0.0124	1.22	0.0102	0.0123	1.21

注:同表1。

(2)除尘罩与收集容器的间距对监测面的流 场均匀性影响较大,添加水平挡板后有所减小。

(3) W影响接口附近的流速,但对监测面全局 流速影响较小。

(4)除尘罩侧面高度和抽吸管道倾斜角对除 尘罩性能的影响可以忽略。

## 参考文献:

 Ansart R, De Ryck A, Dodds J A, et al. Dust Emission by Powder Handling: Comparison between Numerical Analysis and Experimental Results[J]. Powder Technology, 2009, 190 (1/2):274–281.

- [2] 张桂芹,刘泽常,王磊.可吸入颗粒物产生机理的研究[J].环境与 可持续发展,2006(2):34-36.
- [3] 张桂芹,刘泽常,李敏,等.工业粉体下落过程粉尘排放特性的实验 研究[J].环境科学与技术,2006,22(3):3-7.

- [4] 李娟,张琰,白俊武,等.基于FLUENT对自动配料除尘装置的优化 设计[J]. 机械工程师,2015(3):86-90.
- [5] 冯彬彬,唐正宇.粉体抽气除尘的流场分析与模型仿真[J].包装与 食品机械,2017,35(2):31-35.
- [6] 孙健,曹静.基于MSC. Patran/Nastran的移动除尘罩结构和稳定性 有限元分析[J]. 机械工程师,2013(4):68-70.
- [7] 于健. 粉料自动配料装置的除尘系统[J]. 橡胶工业,2002,49(8): 489-492.
- [8] 李昭祥,徐江荣.随机轨道模型中颗粒湍流量模拟方法[J].杭州电子工业学院学报,2004(3):11-14.
- [9] 李勇,张文青,刘伟冬,等.不同人口导流板炭黑除尘器内部流场的 模拟分析[J].橡胶工业,2017,64(12):749-753.
- [10] 王琨. 吸尘罩设计中的几个问题[J]. 水泥生产设备, 1997(6):21-23.
- [11] 王建伟. 除尘器吸尘罩改进[J]. 设备管理与维修,2012(9):64-65. 收稿日期:2020-04-08

## Structural Optimization of Dust Removal Hood Based on Flow Field of Small Powder Ingredients

JIANG Peng, WANG Zhongyi, LI Yong (Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Based on the original dust removal hood (square) model of small powder ingredients, computational fluid dynamics (CFD) simulation method was used to obtain the flow field characteristics near the hood and achieve the size optimization of the geometric structure of the dust removal hood in combination with the target parameters. The results showed that, when the dust removal hood was equipped with a horizontal baffle on the lower edge to cover the gap between the dust removal hood and the dust collection containers, the vertical distance between the lower edge of the dust removal hood and the upper edge of the collection container was reduced to 40 mm, and the interface size between the suction pipe and the hood was kept unchanged, the dedusting effect was the best.

Key words: powder; flow field; dust removal hood; model simulation; structural optimization