

# 轮胎硫化烟气精准收集方案的研究

吴佳易

(中策橡胶集团股份有限公司, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**根据轮胎硫化烟气的排放特点,分析一体式大围罩硫化烟气收集方案和风管局部定点间断式精准收集硫化烟气方案的优缺点,推导不同规格轮胎硫化烟气精准收集的支风管直径计算公式,计算硫化烟气精准收集所需的风量,并根据排废风管的风速要求及流体力学原理,得到轮胎硫化烟气精准收集系统风管直径和压损计算及风机选型的完整设计方法。

**关键词:**轮胎;硫化烟气;精准收集;风管直径;风量;流体力学;压损

**中图分类号:**TQ336.1;X783.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-8171(2024)01-0046-08

**DOI:**10.12135/j.issn.1006-8171.2024.01.0046



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

轮胎作为一种橡胶制品,其硫化过程中会产生含有大量挥发性有机物(VOCs)的有毒有害气体,包含各种颗粒物、非甲烷总烃、甲苯、二甲苯、乙苯、硫化氢、氨等物质<sup>[1-3]</sup>,若不做处理任由硫化烟气散溢,有害气体就会在硫化车间内积聚,污染空气,刺激人体呼吸系统、眼睛及神经系统,危害员工身体健康。因此,根据环保生产的要求,轮胎的硫化烟气必须经过精准收集后输送至相关环保设备进行处理。然而,国内轮胎企业一直对轮胎硫化烟气收集工序不够重视,注意力大多放在后端的烟气处理工艺及相关环保设备上。前端烟气收集工序做不好,后端的烟气处理只会事倍功半,因此如何精准收集轮胎硫化烟气,减小收集风量,完善风管网的设计流程是亟待研究解决的问题。

## 1 轮胎硫化烟气收集方案

轮胎硫化过程中只有在硫化机开模时才会有大量烟气快速散溢出来,因此硫化烟气具有周期性排放、流量波动大的特点,并且每次开模时散发出来的烟气污染物浓度低,但烟气量较大。由于车间现场各种规格的硫化机数量众多,使硫化烟

气散溢点分布范围极广,烟气收集不及时就会快速扩散至整个车间内,这进一步加大了烟气收集所需的风量。另外,不同规格轮胎的硫化时间不一,导致车间内硫化机的开合模节奏不同,不同时间硫化机的开模数量及开模位置均不一定,使车间内硫化烟气的散溢量也不同。很显然,轮胎硫化烟气的这些固有特点均大大提高了精准烟气收集的难度。

针对这些问题,本工作分别设计了两种硫化烟气收集方案:一体式大围罩烟气收集和局部定点间断式烟气收集。其中,前者属于传统的常规方案,并已在我公司投入使用,后者是在总结分析前方案优缺点的基础上重新优化设计的方案。

### 1.1 一体式大围罩烟气收集方案

一体式大围罩烟气收集是以一整条硫化沟作为一个单元,搭建一个大围罩将整条硫化沟包裹在内,然后对该封闭空间内所有的轮胎硫化烟气进行统一收集。该围罩以各台硫化机框体作为封闭基准面,主要采用镀锌方管焊接搭建一个与硫化机框体等高的框架,在框架顶部及四周铺设夹心岩棉板作为封闭隔板,然后在围罩顶部两侧各横向布置一路风管,在这两路风管各自对应的硫化机位置处向下安装插入围罩内部的支风管,并要求每个支风管上都装有多叶手动调节风阀,且支风管数量与硫化机数量一致。最后,这两路横向风管汇成一路主风管,竖直上升至屋面,与安

**作者简介:**吴佳易(1986—),男,浙江湖州人,中策橡胶集团股份有限公司工程师,学士,主要从事轮胎机械设备的维护以及硫化烟气环保收集和处理相关工作。

**E-mail:**714328316@qq.com

装在屋面的离心风机对接。此外,为了方便员工日常操作,在大围罩的两侧、每台硫化机正面操作位前各安装一扇快速电动门,要求快速电动门与硫化机联动,通过硫化机开合模的PLC信号自动控制电动门的开闭动作。

在初始方案中,以单台硫化机为单元搭建小围罩进行烟气封闭收集,这样封闭空间更小,更有利于缩减烟气收集风量。然而,由于受操作空间的限制,轮胎后充气装置无法被一同包裹在该小围罩内,使在硫化出模后至后充气装置定型期间高温状态下的轮胎仍会持续散发烟气并散溢到整个车间内。因此,方案改进为将整条硫化沟包裹在内的一体式大围罩,后充气装置也可以一并放置在围罩内部,轮胎硫化及充气定型期间的所有烟气均被封闭在围罩内,如图1所示。

一体式大围罩烟气收集方案的优点明显,具体如下所述。

(1)简化烟气收集的施工难度。只要在每条硫化沟上都搭建一个一体式大围罩,无需考虑单台硫化机的烟气散溢量,只需针对这几个大围罩进行烟气收集即可,省去了对上百台硫化机单独配置风管、风量的工作。

(2)有效缩减了轮胎硫化烟气的散溢空间,降低烟气收集所需的风量。若没有一体式大围罩的限制,轮胎硫化烟气会散溢到整个硫化车间内,烟

气收集就等于对整个车间进行换气,风量浪费极大。安装一体式大围罩后,由于员工大部分时间都在围罩外作业,故烟气收集与大围罩内的换气次数无关,只需让风机不停运转,保持围罩内部的负压状态即可。为保证烟气收集效果,该负压须保证快速电动门开启时形成至少为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流向大围罩内部的负压风速气流,保证硫化烟气不向外溢出。

然而经过一段时间的使用,一体式大围罩烟气收集方案也显现出很多缺陷。

(1)一体式大围罩的建造工程量较大,施工成本过高。虽然车间内各硫化沟长短不一,每条硫化沟的硫化机数量也不同,使多个一体式大围罩烟气收集系统的造价存在差别,但根据建造经验,一套长约60 m的一体式大围罩烟气收集系统的造价在50万元以上,大量费用耗费在方管钢材及夹心岩棉板上。

(2)降低员工作业效率,提高设备的运维难度和成本。加装大围罩后,员工每次进行轮胎硫化开模时都需等待快速电动门开启,轮胎后充气定型时还需通过硫化机一侧的手动门进入大围罩内作业,增加了员工日常作业的步骤及时长,降低了生产效率。此外,硫化机损坏须拆修时,大围罩会严重妨碍维修工作,有时甚至需要将大围罩拆除,维修后还需再恢复大围罩,工序极其复杂,加大了

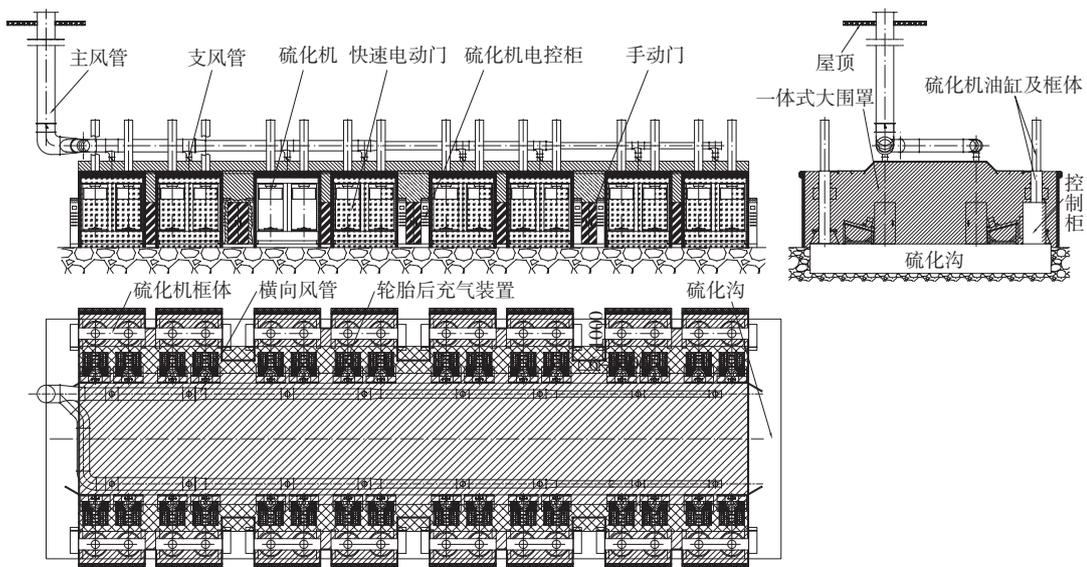


图1 一体式大围罩烟气收集系统结构

人工成本。

(3) 风机能耗过大,浪费严重。一体式大围罩存在密闭性难题,手动门、快速电动门、岩棉板之间、岩棉板与硫化机框体之间广泛存在缝隙,甚至员工会经常不关门,为保持大围罩内部的负压状态,功率达几十千瓦的离心风机必须一直保持运转。

(4) 缩减烟气收集风量并未达到预期,无法做到精准收集。为满足电动门开启时负压风速不低于 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的要求,电动门同一时间开启的数量不能太多,否则负压风速就会低于该数值。以60 m长、装有30台硫化机的硫化沟为例,其分配的风量一般为 $40\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,根据硫化机尺寸选型的快速电动门的高、宽尺寸为 $3.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,按开门高度1.8 m计,理论上同一时间电动门最多只能开启6扇,然而实际上单条硫化沟经常会有超过6台硫化机同时开模的情况,使烟气收集效果不佳。此外,快速电动门经常发生故障,一旦没有及时修复,为了不影响生产,电动门不得处于常开状态,使大围罩内负压失效,硫化烟气外溢出大围罩。要解决该问题,就只能继续加大风量,背离了精准收集的初衷。

## 1.2 局部定点间断式烟气收集方案

局部定点间断式烟气收集方案是根据轮胎硫化烟气的周期性排放、流量波动性大的特点设

计的。相比一体式大围罩方案,该方案取消了封闭用途的大围罩,直接在每台硫化机的轮胎硫化模具位置和后充气装置定型夹盘位置近距离安装风管,即支风管吸风口尽可能靠近硫化烟气散溢的源头,并且在每个支风管上配置一个电动风阀,要求电动风阀的开闭信号与硫化机、后充气装置联动。此外,在安装空间允许的前提下,支风管吸风口处还需安装伞形集气罩,以便加大烟气收集范围。一般单条硫化沟配一路主风管,所有支风管汇入硫化沟中间的主风管,主风管升至屋面后与离心风机及相关烟气处理设施对接。最后,在主风管头尾两端分别安装压差传感器及泄压阀,且压差传感器信号与离心风机变频联动,而泄压阀用于保护风管的安全,一旦风管内外压差超过泄压阀安全值,泄压阀就会打开,保护风管不被破坏。局部定点间断式烟气收集系统结构如图2所示,具有如下主要优点。

(1) 建造成本低。相比一体式大围罩烟气收集方案,局部定点间断式烟气收集方案取消了封闭式大围罩,免去镀锌方管框架、夹心岩棉板、快速电动门以及相关的人工建造成本。虽然本方案改手动风阀为电动风阀,且增加了泄压阀、压差传感器、伞形集气罩等,加大了风管安装难度,但总体建造费用大幅降低。

(2) 不影响员工生产效率,不干扰设备的日常

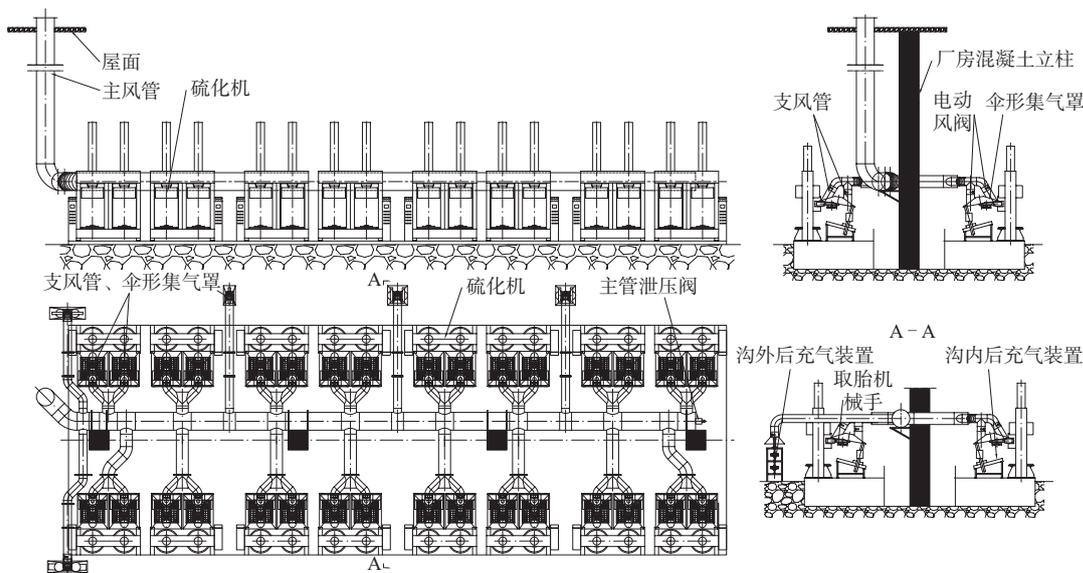


图2 局部定点间断式烟气收集系统结构

拆修、运维。由于本方案只需风管收集烟气,所有设备均敞开在车间内,员工日常生产作业及设备拆修均不受干扰。

(3)理论上将烟气收集风量及风机能耗降至最低。针对硫化烟气周期性排废、烟气流波动大的特点,屋顶的离心风机无需长时间、全功率运转,可以根据主风管内与管外的压差调控变频器频率,做到降频甚至间断式运转。按照设定程序,离心风机运转频率与压差呈反比,当主风管内与管外的压差为零时风机全功率运转;当压差逐渐增大,风机逐渐降频运转,直至压差超过设定最大值时停转。另外,风管内外压差除与风机相关外,还受各支风管上电动风阀调节控制。当硫化机合模时无硫化烟气外溢,对应位置的电动风阀关闭,没有气流进入风管内,管内压差只受风机影响;当某台硫化机即将开模时,电动风阀会在开模5 s前打开,受管内外压差的影响,气流自动进入风管内,压差逐渐减小,风机则逐步加速运转,待5 s后硫化机开模时支风管即能全速收集外溢的硫化烟气。同理,轮胎从硫化机出模并运至后充气装置时,对应位置的电动风阀自动打开,并且在轮胎开始充气定型5 min(具体时长可根据轮胎规格调整)后自动关闭。可见,本方案的烟气收集系统只在必要时进行烟气收集工作,既做到精准收集烟气,又能最小化收集风量,降低风机能耗。

经分析比较,一体式大围罩烟气收集方案虽然可行,但一直没有解决收集效率低、施工及运维成本高的问题,而局部定点间断式烟气收集方案则规避了前者的问题,能够真正做到高效率、小风量、低功耗的精准烟气收集,较前者更有优势。

## 2 支风管直径计算

风量计算是所有烟气精准收集系统的基础,关系到后续风管直径、风压损耗、风机选型等一系列问题。目前工程上往往是根据经验估算总风量,然后采用超配风机的方式保证烟气收集效果,无效风量和能耗浪费严重。因此,局部定点间断式烟气收集方案要做到硫化烟气精准收集就必须明确单个支风管所需的具体风量,然后才能推导出整个系统的总风量。通过查询相关通风设计手

册可知,支风管风量与控制风速(烟气散溢处的吸捕风速)、风管直径密切相关,然而目前业内却没有确切的针对不同规格轮胎硫化烟气收集支风管直径的计算公式。显然,支风管直径是整个烟气收集系统设计的关键,直径过大,无效风量就会增加,浪费系统的总风量;直径过小,就必须增大控制风速,导致系统能耗增加。

### 2.1 竖直安装位的支风管直径

通过查询相关设计手册,可知支风管直径与风速的关系式为

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{40H^2 + \pi d^2}{\pi d^2} \quad (1)$$

式中: $v_2$ 为支风管吸风口处风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在工程上通常取 $5 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_1$ 为轮胎边缘烟气散溢点处的控制风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,通常取 $0.25 \sim 0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H$ 为支风管吸风口至轮胎中心点的距离, $\text{m}$ ;  $d$ 为支风管直径, $\text{m}$ 。

从式(1)可以看出,只需知道 $v_1$ 、 $v_2$ 和 $H$ 这3个变量的值就可以计算出所需支风管直径,然而这个公式对轮胎硫化烟气收集存在局限性,它没有考虑轮胎直径。轮胎是一个空心的大圆环,其中心位置烟气的散溢量反而较小,可能出现支风管吸风口与轮胎中心的距离过小,且按式(1)计算的风管直径又不够大的情况,使轮胎四周的烟气散溢点超出支风管的烟气吸捕范围。因此,确定轮胎硫化烟气收集的支风管直径应在上述3个变量的基础上还需考虑轮胎直径。为简化计算,假定风管竖直正对着轮胎,吸风口在轮胎的正上方。支风管吸风口烟气收集如图3所示。由于风量未定, $d$ 未知; $O$ 代表风管中心; $D$ 和 $H$ 均已知。

从图3可以看出,带箭头的弧线代表风管吸捕

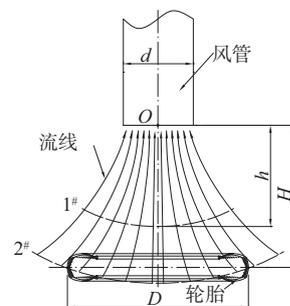


图3 竖直支风管吸风口烟气收集示意

的气体流线,离吸风口越近流线越密集,流速越大,离吸风口越远流线越稀松,流速越小,整个烟气的理想吸捕范围呈上窄下宽的圆锥台体形状。

另外,图3所示的1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>两条虚线表示两个弧面,每个弧面上的风速、动压均相等,故称等压/等速面(以下均简称为等速面)。很明显,1<sup>#</sup>等速面的风速、动压均大于2<sup>#</sup>等速面,且2<sup>#</sup>等速面刚好覆盖轮胎,即表示轮胎在此吸风口收集烟气的气流吸捕范围内。现假定该吸风口的烟气吸捕范围只到达1<sup>#</sup>等速面,并没有将轮胎覆盖在内,即距离 $h < H$ 。此时轮胎散发的烟气无法被风管主动吸捕,但轮胎硫化烟气是高温气体,会自动上升穿过1<sup>#</sup>等速面从而进入支风管的吸捕范围内,从理论上可以将支风管所需的风量、风压最小化。然而这过于理想化,因为硫化烟气在未进入吸捕范围的这段时间内极易受到外部因素干扰,导致硫化烟气逸散。因此,应假定2<sup>#</sup>等速面为支风管吸捕范围的最底面,且2<sup>#</sup>弧面的底面直径刚好与轮胎直径相等。理论上2<sup>#</sup>等速面上的控制风速不小于零即可,考虑到烟气收集效果,在工程上通常取 $0.25 \sim 0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

进一步分析,由于2<sup>#</sup>等速弧面的弧度不大,可以近似为平面,因此图3可简化为简易几何示意图(见图4)。图中 $AB$ 代表轮胎水平面位置, $EF$ 代表风管吸风口位置。

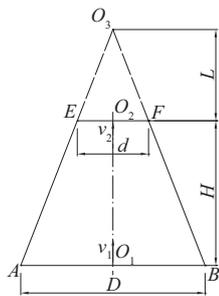


图4 竖直烟气吸捕范围简化示意

取一个位于 $AB$ 面中心点的极小的烟气体微团,可近似看成是一个位于 $O_1$ 点的质点,其以起始速度 $v_1$ 经过时间 $t$ 加速流至 $EF$ 面中心点 $O_2$ ,末端速度为 $v_2$ 。又由于 $AB$ 和 $EF$ 面均为等速面(经上述简化处理,2<sup>#</sup>等速弧面被近似为 $AB$ 平面, $AB$ 面各质点流至 $EF$ 面的行程都可近似为 $H$ ),故 $AB$ 面各质点风速

均为 $v_1$ , $EF$ 面各质点风速均为 $v_2$ ,且 $AB$ 面各质点流至 $EF$ 面的时间相等,均为 $t$ ,因此各质点的平均加速度也相等,设为 $a$ ,得如下公式:

$$\begin{cases} v_2 = v_1 + at \\ H = v_1 t + \frac{1}{2} at^2 \end{cases} \quad (2)$$

解方程组得

$$t = \frac{2H}{v_1 + v_2} \quad (3)$$

结合图4所示几何结构,可得到如下关系式:

$$\frac{L}{L+H} = \frac{d}{D} \quad (4)$$

$$V = \frac{\pi D^2}{12}(L+H) - \frac{\pi d^2}{12}L \quad (5)$$

式中: $L$ 为假想的小圆锥体的高度, $m$ ;  $V$ 为圆锥台的体积,即烟气精准收集所需的吸捕范围, $\text{m}^3$ 。

将式(4)变形后代入式(5),可得

$$V = \frac{\pi H}{12}(D^2 + Dd + d^2) \quad (6)$$

当处于吸捕范围 $V$ 内的烟气经过时间 $t$ 后被支风管全部吸入,可将单位时间内被吸入风管的平均烟气体积视为该支风管的流量,其计算公式为

$$Q_V = \frac{V}{t} = \frac{\pi(v_1 + v_2)}{24}(D^2 + Dd + d^2) \quad (7)$$

式中, $Q_V$ 为支风管的流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

风管吸风口处风量(即 $Q_V$ )可用常规计算公式计算:

$$Q_V = v_2 \frac{\pi d^2}{4} \quad (8)$$

将式(7)(8)联立,可得到一个以 $d$ 为变量的一元二次方程,解方程并推导其计算公式为

$$d = \frac{-(v_1 + v_2) - \sqrt{3(7v_2 - v_1)(v_1 + v_2)}}{2(v_1 - 5v_2)} D \quad (9)$$

支风管直径只与吸风口风速、轮胎处控制风速和轮胎直径相关。通过式(9)计算得支风管直径后,再将其代入式(1),可得到竖直安装位支风管吸风口与轮胎间的距离,弥补了缺失距离因素的不足。

需要说明的是,在轮胎直径及 $AB$ 和 $EF$ 两个截面风速均可按需选取的情况下,根据流体力学的连续性方程 $Q_{AB} = Q_{EF}$ ,风管直径似乎可以通过公式 $d = D(v_1/v_2)^{0.5}$ 求出。然而连续性方程只适用于风管管路内部,一旦超出风管范围,流体范围就不再

局限于风管内前后顺序的截面,故用连续性方程计算的风管直径往往较小,不能满足实际需求。

## 2.2 任意安装位的支风管直径

由于硫化现场的实际环境比较复杂,硫化机的油缸、框体结构、附近的管路和钢平台等都会阻碍风管的布置,实际上支风管很少能刚好竖直正对着轮胎进行烟气收集。因此改进图4所示结构,将支风管吸风口改为斜对着轮胎,如图5所示。

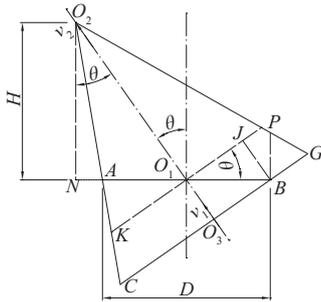


图5 倾斜支风管烟气吸捕范围简化示意

图5中顶点 $O_2$ 表示支风管吸风口(示意图中将风管吸风口进行了简化,以吸风口中心点 $O_2$ 代表图4中的整个 $EF$ 线段),线段 $AB$ 和 $O_2N$ 分别表示轮胎直径 $D$ 、支风管中心与轮胎垂直距离 $H$ ,且风管中心线 $O_2O_3$ 与轮胎竖直法线的夹角为 $\theta$ (即支风管任意倾斜安装, $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ )。此时,轮胎 $AB$ 不再处于等速面,为保证与风管距离最远的端点 $B$ 仍能处于烟气吸捕范围内(由于烟气能够自动上升散溢,且 $B$ 点吸捕风速 $v_1$ 往往不高,故需预留一段空间 $BP$ ,以防烟气在初始阶段逃逸出烟气吸捕范围,而 $A$ 点则无这个问题),过 $B$ 点画一条线作为新的等速面 $CG$ ,此弧面各质点的吸捕风速均为 $v_1$ 。显然,不同于竖直安装位的风管,倾斜风管针对轮胎的控制风速 $v_1$ 处于 $B$ 点所在的 $CG$ 等速面上,故要求出 $CG$ 等速面的直径,即 $CG$ 线段的长度。

为方便求解,画辅助线,过 $O_2$ 点画竖直虚线 $O_2N$ ,连接 $O_2$ 与 $C$ 两点,过 $O_1$ 点画平行于 $CG$ 的虚线 $KJ$ 。已知, $O_1$ 为 $AB$ 中点, $AB=D$ , $O_2N=H$ ,风管倾角为 $\theta$ 。根据结构几何关系可推导得到 $CG$ 等速面直径的计算公式:

$$CG = 2CO_3 = 2\sqrt{(O_2C)^2 - (O_2O_3)^2} = \frac{2H + D\sin\theta\cos\theta}{2H - D\sin\theta\cos\theta} D\cos\theta \quad (10)$$

由于倾斜风管状态下的 $CG$ 面直径等于竖直风管状态下 $AB$ 面直径 $D$ ,因此将式(10)代入式(9)可得

$$d = \frac{-(v_1 + v_2) - \sqrt{3(7v_2 - v_1)(v_1 + v_2)}}{2(v_1 - 5v_2)} \times \frac{2H + D\sin\theta\cos\theta}{2H - D\sin\theta\cos\theta} D\cos\theta \quad (11)$$

显然,当风管处于竖直状态,即 $\theta=0$ 时,式(11)与式(9)完全一致。

另外,式(11)中隐含 $2H - D\sin\theta\cos\theta > 0$ (即 $H > D\sin\theta\cos\theta/2$ )的要求,这印证了上节所论述的支风管吸风口不能过于靠近轮胎中心,否则有可能会出轮胎部分烟气散溢点处于烟气收集的吸捕范围之外的情况。最后,将通过式(11)计算出的 $d$ 值以及 $O_2O_3$ 的长度 $[H/\cos\theta + (D/2)\sin\theta]$ 分别代入式(1)中的 $d$ 和 $H$ ,以便验证支风管吸风口处风速及轮胎处控制风速符合流场分布规律。

## 3 烟气收集管网的设计

设计轮胎硫化烟气精准收集系统时,一般会先将整个风管网绘制出来,根据已推导出的支风管直径公式计算出各段风管的风量,进而推算出整个系统所需的总风量,然后整个系统的管径、压损都能按照流体力学的相关公式逐段计算出来,最后选配符合要求的风机。

### 3.1 伞形集气罩匹配选型及风量计算

为便于工程施工,通过式(11)计算出支风管的理论直径后,还需将其圆整化,设为 $d'$ ,且要求 $d' \geq d$ ,然后代入式(8),再考虑风管漏风因数即可算出针对单个轮胎的支风管烟气收集风量。

$$Q_0 = kv_2 \frac{\pi d'^2}{4} \quad (12)$$

式中: $Q_0$ 为针对单条轮胎的支风管硫化烟气精准收集风量, $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $k$ 为风管漏风因数,一般取1.1~1.2。

考虑到轮胎产品规格、硫化机型号不同,且不同硫化机的硫化模具数量也可能不同,上述单个支风管对单条轮胎进行烟气精准收集的方式就显得不实用,在实际施工时多个支风管在有限的空间内极难布局。因此针对含多层硫化模具的硫化机,支风管要进行调整,需在吸风口处加装一个伞

形集气罩,使一个支风管能够对多条轮胎同时进行烟气收集,且伞形集气罩风量可在式(12)的基础上进一步推导得出。

$$Q_n = kn_1 v_2 \frac{\pi d^2}{4} \quad (13)$$

式中: $Q_n$ 为针对多条轮胎的单个伞形罩的硫化烟气精准收集风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $n_1$ 为单台硫化机同时硫化的轮胎数量。

此外,通过查询相关技术手册可知,伞形集气罩排风量的计算公式为

$$Q_n = KWL_s v_1 \quad (14)$$

式中: $K$ 为安全因数,通常取1.4;  $W$ 为伞形集气罩敞开面的周长, $\text{m}$ ;  $L_s$ 为伞形罩吸风口至轮胎烟气散溢中心点的距离, $\text{m}$ 。

显然,通过式(13)计算出伞形集气罩的风量后,就可利用式(14)计算出伞形集气罩敞开面的周长。

最后,考虑到硫化现场同时处于开模状态的硫化机的最大机台数 $n_2$ 以及上述所有已分析过的因素,得到整个轮胎硫化烟气精准收集系统所需的总风量 $Q_T$ 。

$$Q_T = kn_1 n_2 v_2 \frac{\pi d^2}{4} = n_2 KWL_s v_1 \quad (15)$$

### 3.2 风管直径、压损计算及风机选型

#### 3.2.1 风管直径计算

首先,在已知各初始段支风管风量的前提下,结合流体力学的连续性方程 $Q_1 = Q_2$  [ $Q_1$ 和 $Q_2$ 泛指连续性管道内(如风管)两个不同截面内的流量],可沿着风管管线逆流逐段往前推算各段风管内的流量,然后对各段风管选择合适的风速(主风管风速为 $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,次级风管风速为 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,末端各路支风管风速为 $5 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),分别计算出前端各段风管直径 $d_i$ ,其计算公式为

$$d_i = \left( \frac{4Q_i}{\pi v_i} \right)^{0.5} \quad (16)$$

式中: $Q_i$ 为某段风管内的风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_i$ 为某段风管内的风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

然后对各段风管直径圆整化处理,最终得到各段风管的合理直径。

#### 3.2.2 压损计算

在计算出各段风管的直径后,即可推算出整

个系统内的风管压损。根据流体力学,整个系统的压损分为沿程压损和局部压损<sup>[4]</sup>。其计算公式为

$$P_q = P_f + P_m \quad (17)$$

$$P_f = \lambda \frac{l \rho v_i^2}{2d_i} \quad (18)$$

$$P_m = \zeta \frac{\rho v_i^2}{2} \quad (19)$$

式中: $P_q$ 、 $P_f$ 和 $P_m$ 分别为系统的总压损、沿程压损和局部压损, $\text{Pa}$ ;  $\lambda$ 为沿程阻力系数;  $\zeta$ 为局部阻力系数;  $l$ 为风管长度, $\text{m}$ ;  $\rho$ 为烟气密度,由于轮胎硫化烟气浓度较低,可等同于空气密度,在标准条件(1个标准大气压、 $0^\circ\text{C}$ )下取值为 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,可在相关技术手册中通过空气密度-温度对照表查询相应温度下的空气密度值, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由于沿程阻力系数与空气流体的层流、紊流状态有关,而流体状态又取决于雷诺数 $Re$ ,故计算沿程压损前首先需要计算出相应风管的 $Re$ ,其计算公式为

$$Re = \frac{v_i d_i}{\nu} \quad (20)$$

式中: $\nu$ 为风管内空气流体的运动粘度,可通过手册查询对应温度下的空气动力粘度及密度的值,然后由两者相除得到, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

通过式(20)算得 $Re$ 后,检查其所处的阻力区间,选取合适的 $\lambda$ 计算公式,计算得 $\lambda$ 值,再代入式(18)计算相应风管的沿程压损。以此类推,最终所有风管的沿程压损计算出来后全部相加,得到整个风管网网的沿程压损。

与沿程压损计算过程类似,局部压损的计算也需要优先求得局部压力系数。不同的是,局部压损种类繁多,与风管接头的形状有关,基本出现在风管入口、风管出口、弯头、三通、变径、阀门等位置,且这些局部障碍位置的流体大多处于紊流状态。

局部阻力系数没有成体系的计算公式,只能根据风管接头的类型及尺寸查询相关技术手册或流体力学文献[5]中的局部压损系数表,才可得出各个风管接头局部阻力系数值,并分别代入式(19)后将所有局部压损相加,求出整个风管网网的局部压损。

### 3.3.3 风机选型

轮胎硫化烟气收集方案常选用离心式风机,且该风机的选型主要考虑风量、全压、功率3个参数。由于本烟气收集系统的风量已经求得,只需求得后两个参数即可选定合适的风机。经查询相关技术手册,风机选型所需的全压、功率的计算公式<sup>[6]</sup>如下:

$$P = (P_q \alpha_1 + P_s) \alpha_2 \quad (21)$$

$$N = \frac{Q_L P K_L}{\eta_1 \eta_2} \quad (22)$$

式中: $P$ 为风机全压,Pa; $P_s$ 为由烟气处理设备造成的压损,此数值可向设备供应商咨询获得,Pa; $\alpha_1$ 为总压损的附加系数,变频离心风机通常取值为1; $\alpha_2$ 为风机全压负差系数,一般取值为1.05; $N$ 为风机的电动机功率,W; $Q_L$ 为风机风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $K_L$ 为电动机安全因数,一般取1.15~1.30; $\eta_1$ 为风机全压效率,一般取0.7~0.8; $\eta_2$ 为风机机械效率,一般取0.95~0.98。

显然,式(21)(22)中所有变量均为已知量,只要分别向公式内依次代入数值就可求得风机的全压和功率。

## 4 结语

伴随着越来越严格的环保要求,轮胎硫化烟

气的精准收集越发显得重要,以往那种根据工程经验估算烟气收集风量的方法已逐渐落伍,其结果或者是风量估算不足,烟气收集效果不佳,或者是风量估算过大,造成严重浪费。因此本文论述的轮胎硫化烟气精准收集方案、支风管直径计算公式以及风量计算公式意义重大,能精准计算出各种规格轮胎收集硫化烟气所需的风量,使烟气收集风量最小化,进而有助于后续烟气收集风管管网的设计,减小风管直径、风管压损及电动机功耗,进而大大降低后续配套的烟气处理设施的采购及运维成本。

### 参考文献:

- [1] 张建萍,陈哲铭,林函,等. 橡胶硫化烟气的组分和污染控制探讨[J]. 橡胶技术与装备,2015,41(7):52-56.
- [2] 温劭,刘雪姣,吴爱芹,等. 车间硫化烟气与实验室模拟硫化烟气相关性研究[J]. 橡胶工业,2021,68(12):942-947.
- [3] 梁守智,钟延堃,张丹秋. 橡胶工业手册(修订版) 第四分册 轮胎[M]. 北京:化学工业出版社,1989.
- [4] 刘建军,章宝华. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社,2006:72-98.
- [5] 陈长植. 工程流体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2007:222-226.
- [6] 孙一坚. 简明通风设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:285-289.

收稿日期:2023-11-07

## Study on Accurate Collection Schemes for Tire Vulcanization Fumes

WU Jiayi

(Hangzhou Rubber Group Co., Ltd, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** According to the emission characteristics of tire vulcanization fumes, the advantages and disadvantages of the integrated large enclosure vulcanization fume collection scheme and the air duct local fixed-point intermittent accurate vulcanization fume collection scheme were analyzed, the calculation formula of the diameter of the branch air duct for the accurate collection of different specifications of tire vulcanization fumes was derived, the air volume required for the accurate collection of vulcanization fumes was calculated, and according to the wind speed requirements of the exhaust air duct and the principle of fluid mechanics, a complete design method was obtained for calculating the diameter and pressure loss of the air duct, as well as selecting the fan of the precise collection system of tire vulcanization fumes.

**Key words:** tire; vulcanization fumes; accurate collection; air duct diameter; fluid mechanics; pressure loss