

布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计

武树明, 王弘, 张洪玮

(本溪钢铁(集团)设备工程有限公司, 辽宁 本溪 117000)

摘要 为了提升布袋除尘器在复杂工况下的运行稳定性与过滤效率, 本文分析了滤袋框架易发生的变形失效问题, 并且就布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计要点展开研究。通过分析整体屈曲、局部凹陷及疲劳断裂等失效机理, 确立刚度匹配、应力均匀分布及动态稳定性原则。同时, 从异形截面纵筋、螺旋连续支撑环、节点焊接工艺优化等方面提出布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计重点, 以期为相关设计人员提供有益参考。

关键词 滤袋框架; 抗变形设计; 结构优化; 疲劳寿命

中图分类号: X701.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.035

0 引言

工业烟气净化是改善生态环境的关键, 尤其使用布袋除尘器实现空气净化质量提升。布袋除尘器组成相对复杂, 而内部滤袋框架是重要结构, 其作用是引导气流分布、支撑滤袋形态、传递清灰动力。在布袋除尘器运行过程中, 滤袋框架极易受到过滤压差、径向挤压、高温烟气热冲击、脉冲喷吹的高频次交变载荷影响。滤袋框架长期受到复杂地区环境影响, 一旦发生断裂或变形极易导致其发生破损、脱落、褶皱、磨损, 进而造成烟气净化效果不合格, 对生态环境造成一定破坏影响。目前, 布袋除尘技术发展速度加快, 除尘系统逐步向大型化、长袋化的方向发展, 使滤袋框架长细比增大, 这对结构稳定性产生一定影响。基于此, 深入研究布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计, 能保证滤袋框架结构运行具备稳定性, 以满足布袋除尘器运行功能性需求, 也能实现工业烟气净化效果提升。

1 滤袋框架的失效模式

1.1 整体屈曲失稳

滤袋框架在设计过程中整体屈曲失稳, 其作为长尺寸滤袋框架失效形式之一, 需重点进行分析。如果滤袋框架长度较长, 并且其结构轴向刚度未能达到技术标准, 在过滤过程中产生负压作用, 极易造成结构存在轴向压缩分量过大而导致损坏。如果轴向压力严重超出滤袋框架的临界载荷, 滤袋框架在瞬时就会失去直线平衡状态, 进而出现宏观弯曲变形。这种失稳情况导致滤袋框架结构严重改变, 使滤袋形成 S 型扭曲或弓形。滤袋框架出现整体屈曲失稳现象, 会造成

滤袋发生严重折叠导致过滤面积减小, 特别是大型工业生产中烟气净化未能达到标准。同时, 滤袋框架失稳后无法承受冲击作用力影响, 在后续过滤过程中形成振动或轻微无力现象, 这会导致工况继续恶化^[1]。

1.2 局部屈曲与凹陷

布袋除尘器滤袋框架局部屈曲与凹陷问题发生率较高, 其主要是因为两根支撑管之间纵筋段或支撑环薄弱位置发生变形。因为支撑环受到侧向约束影响, 其纵筋在两环之间形成受压杆件。如果滤袋受到局部压力过大或者支撑环间距超出临界值, 单根纵筋在两环之间存在向外鼓曲或向内凹陷。这种变形虽然影响范围比较小, 但对滤袋框架的功能性产生较大影响。滤袋框架出现凹陷的部位, 其纵筋直接刺破滤袋内壁, 进而出现烟气泄漏现象, 它所产生的危害性较大。而滤袋框架发生变形时, 其鼓曲的纵筋导致滤袋表面形成硬性凸起, 在清灰、振动气流冲刷等作用下产生滤袋结构严重损坏。同时, 滤袋框架局部屈曲导致其圆度出现较大偏差, 相邻纵筋受力不均匀而产生严重连锁反应, 从而出现多纵筋变形严重问题。

1.3 疲劳断裂

布袋除尘器滤袋框架疲劳断裂是长期载荷作用下的结果, 尤其是交变载荷持续作用导致其疲劳断裂而无法满足过滤要求。布袋除尘器运行过程中脉冲喷灰清灰时, 滤袋框架每秒需承受几十次的瞬时冲击荷载, 尤其是循环应力的形成造成滤袋框架结构损坏。滤袋框架焊接存在一定质量缺陷, 或者局部位置有残余应力, 其出现应力集中现象, 进而对滤袋结构的可靠性

作者简介: 武树明 (1973-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械工程类。

与稳定性造成不利影响。此外,滤袋框架长期受到高温环境影响,如果温度超出标准,其造成滤袋框架降低疲劳极限,腐蚀性烟气导致裂纹尖端扩展速率升高,进而出现裂纹快速扩展情况造成滤袋失效。

2 滤袋框架抗变形结构设计原则

2.1 刚度匹配与冗余度原则

在布袋除尘器滤袋框架设计中,需保证其整体刚度、局部刚度和工况载荷保持匹配,避免因刚度过低导致过大变形,也防止刚度过高出现应力集中以及材料浪费。滤袋框架设计需综合分析布袋除尘器运行过程中弹性变形量,保证滤袋框架始终处于最佳形态。同时,滤袋框架设计时需按照适度刚度冗余度的标准,防止滤袋框架存在材料老化、腐蚀、减薄或意外超载等因素影响结构性能,并保证滤袋框架安全系数处于合理范围内。在滤袋框架设计中,通过配置纵筋数量调整、截面尺寸设置、支撑环密度控制等方式形成多层次刚度体系,从而保证其具备较强的抗载荷储备能力^[2]。

2.2 应力均匀分布原则

在布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计中,需按照应力均匀分布原则进行设计,以防应力集中造成结构损坏。滤袋框架设计时避免尖锐缺口、截面突变、不合理焊缝布置等,其利用平滑过渡方法降低应力集中系数。滤袋框架纵筋与支撑环连接点是薄弱部位,其采用增加过渡圆角、优化焊缝形状、合理布置焊点等方式,确保应力能均匀扩散,从而提高滤袋框架的稳定性。如果滤袋框架顶部结构受到拉拔力较大,或者底部的剪切力较大,需采取局部加强措施,主要是通过增大截面积、安装加强板等方式,确保结构的承载力达到工程运行需求。此外,滤袋框架设计时各位置达到受力均衡性要求,预防因为制造误差或者应力集中而引发结构损坏。滤袋框架设计以有限元软件分析方法为主,需根据布袋除尘器运行工况做出优化调整,使滤袋框架整体处于最佳状态,也能实现制造成本降低。

2.3 动态稳定性原则

布袋除尘器滤袋框架长期受到交变荷载冲击影响,需保证其动态稳定性达到要求。滤袋框架设计满足净强度标准,还要确保滤袋框架材料的固有频率和阻尼特性合格,防止在布袋除尘器运行过程中出现共振现象。滤袋框架一阶固有频率远离清灰脉冲的主频以及倍频,避免因振幅过大而造成滤袋框架结构破坏。同时,滤袋框架具备较高的抗弯刚度与抗扭刚度,防止在清灰过程中出现螺旋状扭曲和横向摆动。在滤袋

框架设计时,将原有的连续螺旋支撑环代替离散平面环,能保证滤袋框架具备较高的动态稳定性与整体性。此外,在滤袋框架设计阶段,需综合分析气流诱导振动的发生概率,防止因为振动作用造成滤袋框架结构损坏。滤袋框架材料具备耐疲劳性,并考虑到长期运行过程中交变荷载持续作用。

3 布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计分析

3.1 异形截面纵筋优化设计

布袋除尘器滤袋框架设计确定适宜纵筋截面形状,这样能保证滤袋框架惯性距、抗弯刚度达到要求。以往滤袋框架纵筋使用圆形钢丝方式,其特点是加工便捷,然而在相同截面下截面惯性距较小、抗弯性能不足。为保证滤袋框架钢筋抗变形能力达到要求,需选择梯形或八字形异形截面纵筋方式。梯形纵筋截面上宽下窄设计方式,能保证滤袋框架有较高的惯性距,从而抵抗外部作用力产生的弯曲变形。八字形截面使两个主轴方向有较大惯性距,从而平衡滤袋框架所受到的多向弯曲以及扭转力矩。在滤袋框架设计过程中,需根据技术标准精准计算纵筋截面尺寸,从而提高滤袋框架结构承载力和稳定性。通常来说,滤袋框架纵筋数量需考虑到滤袋直径与长度配置,一般为10~24根,超长框架可增加至28根^[3]。

3.2 螺旋连续支撑环布局策略

滤袋框架在支撑结构设计时,采用螺旋连续支撑环布局策略,能保证滤袋框架圆度保持与抗扭性合格。以往滤袋框架采用离散式平面支撑环方式,其存在支撑盲区且抗扭强度不足,无法满足滤袋框架交变荷载影响。而在滤袋框架支撑体系设计中,使用螺旋连续支撑环方式取代平面环方式,能保证滤袋框架具备较高稳定性。螺旋环按照恒定螺距连续缠绕在纵筋外侧,这样能对滤袋框架形成良好的侧向约束,从而消除离散支撑点之间的薄弱区域。在滤袋框架设计阶段,需综合考虑纵筋临界区长度,明确最佳螺距为200~300 mm,并在滤袋框架两端受力集中区域加密至150 mm。螺旋环截面选择扁平矩形或椭圆形,这样能增大接触面积并提高框架刚度。而螺旋结构能够改变气流状态,并利用有限元软件模拟后能提高滤袋框架扭转固有频率提升40%,保证滤袋框架动态稳定性达到标准。螺旋连续支撑环的布局设计需与滤袋框架纵筋体系形成协同受力结构,通过满焊工艺将螺旋环与纵筋固定,杜绝交变荷载下出现脱焊、松动问题,进一步强化框架整体刚度。针对滤袋运行中频繁承受的清灰脉冲荷载与

气流冲击荷载,螺旋环的连续约束结构可有效分散局部应力,避免纵筋在薄弱区域发生屈曲变形,延长框架使用寿命。同时,在材料选择的过程中,采用高强度镀锌钢丝作为螺旋环与纵筋均的基础材料,因为此类材料能够兼顾耐腐蚀性与力学性能,并且也具备适高温、高湿防护功能。而在有限元分析中除扭转固有频率外,还须重点模拟不同螺距下框架的静刚度与疲劳寿命,从而能够验证加密螺距区域,可使端部受力集中系数,如此才能够规避框架端部开裂风险。

3.3 节点焊接工艺与应力控制

在布袋除尘器滤袋框架设计中,纵筋与支撑环焊接极为重要,这也是应力集中区域。焊接质量对于滤袋框架寿命存在直接影响。以往滤袋框架焊接以手工点焊方式为主,这就容易受到焊接人员的专业技能影响。随着现代焊接技术不断发展,滤袋框架焊接以数控自动焊接技术为主,选择二氧化碳气体保护焊或激光焊工艺,以消除焊接缺陷问题。在滤袋框架焊接中,要保证各焊接点位均匀布置,各位置的焊点达到强度要求。而纵筋与环圈交接位置设置微小过渡圆弧,从而防止在后续投入使用过程中产生几何突变造成应力集中。滤袋框架需要承受拉拔力的顶部文氏管连接位置,需通过加强板结构或多道角焊缝实现结构补强,并且增加过度圆角半径。滤袋框架焊接结束后,需按照要求进行振动时效或退货处理,从而消除残余应力,避免残余应力和工作荷载叠加而导致疲劳破坏^[4]。

3.4 基于有限元的拓扑优化分析

在布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计中,根据有限元软件的拓扑优化分析,构建三维模型模拟多种工况条件下滤袋框架静力学、屈曲以及瞬态动力学仿真。在该模型建设中,通过构建纵筋与支撑环的梁单元模拟,节点区域进行细化处理,从而保证滤袋框架结构设计达到要求。而在模型设计过程中,根据滤袋框架的运行工况,通过施加过滤压差、脉冲冲击、自重以及热荷载的多种边界条件计算框架的 Von Mises 应力云图与位移矢量场。在模拟完成后识别高应力区域、大变形区,将其作为拓扑优化的目标区域。在对滤袋框架拓扑优化分析中,利用变密度法或水平集方法进行材料分布迭代优化,从而去除低应力区冗余材料,使高应力区增加材料密度或改变截面形状。而在该优化过程中使最大位移量控制在 5 mm 内,最大等效应力则低于材料屈服强度 60%。在设计阶段进行多轮迭代优化,从而总结出最佳的滤袋结构形式以及材料分布方案。在模型优化完成后,使滤袋框架重量减轻 10%,并

且最大位移量降低 25%,临界屈曲载荷提升 35%,使滤袋框架达到轻量化与高刚度^[5]。

3.5 表面防腐涂层与界面相容性

在布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计中,需进行表面防腐处理,从而保证滤袋框架运行达到安全性。在滤袋框架表面防腐处理时,结合烟气成分与温度确定适宜的图层结构体系。中高温工况使用耐高温有机硅树脂涂层,其耐温极限达 260 °C,具有较优异的附着力和柔韧性,并且随框架热胀冷缩不会发生开裂。而滤袋框架处于强腐蚀环境下,选择使用聚四氟乙烯浸渍工艺,利用其化学惰性和不粘性建设致密防护层。滤袋框架的涂层厚度一般为 30 ~ 50 μm,厚度过大容易造成脆性剥落,弧度过小则无法满足防护性要求。滤袋框架表面涂层的润滑性合格,其摩擦系数不足 0.3,防止在清灰阶段造成滤袋与框架磨损。同时,根据滤袋框架防腐施工要求,保证防腐涂层与界面具备较高的相容性,避免出现静电吸附和化学反应引发一系列危害。在滤袋框架防腐设计结束后及时进行盐雾试验与冷热冲击试验,检测防腐涂层结构耐久性,进而为后续方案优化与施工提供基础。

4 结束语

在布袋除尘器中,滤袋框架属于系统的部件,滤袋框架结构是否稳定关系到除尘系统的运行效能和经济寿命。本文分析了布袋除尘器滤袋框架变形结构的设计要点,可以看出,采用异形截面纵筋、螺旋连续支撑环、精密焊接工艺、有限元拓扑优化及高性能防腐涂层等系统化抗变形设计方案,能够提升框架的临界屈曲载荷与抗疲劳性能,抑制变形,延长滤袋使用寿命。

参考文献:

- [1] 张洪超,贾金鑫.风力干法选煤除尘新工艺设计与应用[J].选煤技术,2023,51(04):33-36.
- [2] 孙凤玲.布袋式自动除尘系统的设计与调试[J].集成电路应用,2020,37(08):110-111.
- [3] 汪炳音.冶金原料场布袋除尘器的节能设计与实践[J].山西冶金,2025,48(08):238-241.
- [4] 王建全.基于多物理场耦合的布袋除尘器滤袋结构优化分析[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):110-112.
- [5] 申延凯.选煤厂布袋除尘器系统阻力优化设计及节能效果评估[J].煤炭新视界,2025(01):47-48.