中美防排烟系统设计规范差异研究

王 磊[1] 路子业[1] 韩 瑜[2]

1.中国中元国际工程有限公司 北京 100089

2.融通人力资源开发有限公司北京海淀分公司 北京 100089

【摘 要】：建筑火灾烟气控制受空间形态、火灾规模、疏散方式及系统响应能力影响，中美规范在防排烟设置和参数确定上形成不同路径。研究基于 GB 55037—2022、GB 51251—2017、IBC 及 NFPA 92，对防烟分区、加压送风、机械排烟、补风组织和联动控制进行对比。结果表明，我国规范更强调适用场所、系统形式和量化参数，美国规范则突出设计火灾、压差控制、烟层界面及工程分析。两类体系在排烟量确定、楼梯间防烟、中庭烟控和系统验证方面差异明显。识别其计算边界与控制目标，可减少海外项目设计参数误套，为复杂建筑烟气控制优化提供依据。

【关键词】：防排烟系统；烟气控制；机械加压送风；机械排烟；规范差异

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.056

高层建筑、中庭及地下空间连通关系复杂，火灾后烟气会在浮力、风压和烟囱效应作用下沿竖井、楼梯间及开口迁移。防排烟设计若只满足风机风量或局部压差指标，而未校核门开启、补风路径、烟层稳定和联动时序，可能出现疏散通道失守、排烟效率下降。我国现行规范以明确的设置条件和参数限值保证工程执行，美国规范则较多采用烟气控制目标、设计火灾和工程分析确定系统能力。两种方法在普通建筑中可能形成相近方案，但在超高层、中庭和大空间场所，计算边界和设备容量容易产生差别。厘清这些差异，有助于提高跨规范设计准确性，为海外项目复杂建筑防排烟性能校核提供依据。

1 中美防排烟规范体系差异

（1）规范层级与适用边界：我国现行防排烟设计形成通用规范与专项技术标准并行体系。《消防设施通用规范》GB 55036—2022 对防烟、排烟系统的基本功能、风机能力、联动控制及系统可靠性作出强制规定，《建筑防火通用规范》GB 55037—2022 负责建筑高度、使用性质、防火分区及疏散空间等设置边界，GB 51251—2017 则细化机械加压送风、自然排烟、机械排烟、补风、储烟仓和风管设计等参数。工程采用时需先满足通用规范，再调用专项标准计算。美国体系则以 IBC 为建筑法规框架，第 909 节集中规定烟气控制，NFPA 92 负责烟羽流、压差、烟层及机械排烟等工程分析，各州和城市还可能在采用 IBC 时附加地方修订。两国规范均强调烟气控制，但我国更接近强制底线与专项细化结合，美国更侧重法规触发与工程分析。

（2）系统设置判定方式：我国规范对机械防烟和排烟系统的设置条件划分细，把建筑高度、使用性质、空间位置、面积及自然通风条件作为判断依据[1]。建筑高度大于 100 m 的住宅建筑，以及高度大于 50 m 的公共建筑和工业建筑，其防烟楼梯间、独立前室、合用前室及消防电梯前室多采用机械加压送风；高度较低且外窗、开口面积满足规定时，可采用自然通风。排烟系统则结合房间面积、空间净高、走道长度及地下空间条件确定。美国 IBC 的判定方式更强调使用功能、竖向连通关系和烟控目标，中庭、地下建筑、防烟楼梯及部分集会空间分别设置触发条款，系统是否配置、采用何种形式，还需结合第 909 节的工程分析判断。两套体系在普通办公、住宅中差异相对有限，但在多层中庭、地下商业和超高层建筑中，系统触发条件可能出现明显分歧，设计阶段需要先核定项目采用的法定规范版本，再确定防烟、排烟及补风边界，差异在方案阶段即会显现。

（3）设计目标与计算路径“我国防排烟设计多采用设置条件判定、参数计算、设备选型和联动校核相衔接的技术路径，设计人员先依据建筑高度、净高、防烟分区面积和疏散部位确定系统形式，再计算送风量、排烟量、补风量及风管阻力，最终落实到风机风量、全压、风口尺寸和控制逻辑。对于高大中庭、剧场及复杂地下空间，烟羽流和清晰高度计算承担进一步校核作用。美国 IBC 第 909 节强调 rational analysis，分析内容通常涵盖设计火灾、烟囱效应、室外风、火灾浮力、HVAC 运行状态以及多套烟控系统之间的相互影响，NFPA 92 给出压力法、气流法和排烟法等分析工具。差异并不只是参数取值不同，而在于计算起点不同，我国较多从规范规定的部位和指标展开，美国倾向于从预定烟控目标反推系统能力。

2 防排烟关键设计参数差异

（1）加压送风与压差控制：我国机械加压送风以维持疏散空间正压、阻止烟气侵入为控制目标[2]。GB 55036—2022 规定，前室、合用前室、封闭避难层与疏散走道之间压差控制在 25～30 Pa，防烟楼梯间与疏散走道之间控制在 40～50 Pa，加压送风机公称风量不低于计算风量的 1.2 倍。工程设计除核定余压值，还需计入门扇开启、风管漏风、竖向阻力和泄压条件，避免高区送风不足或低区正压过大。美国 IBC 同样采用压力差法限制烟气迁移，在设置自动喷水灭火系统的建筑中，烟控分隔两侧最低压差常取 0.05 in.w.g，约 12.4 Pa，并同步校核疏散门开启力。两套体系的差异在于，我国更强调明确压差区间和设备动作，美国则把最低压差、门开启条件及烟囱效应纳入同一工况分析。超高层建筑设计中，适宜采用分段送风、变频调节或泄压装置，使不同楼层保持稳定压力梯度，并校核风口开启组合对总风量和静压的影响，并兼顾人员疏散。

（2）排烟量与烟层控制：我国机械排烟量确定兼具参数法和火灾模型法。对于净高不大于 6 m 的部分场所，GB 51251—2017 采用单位面积排烟量法，设计值不低于 60 $m^3/(h·m^2)$，并设置最小排烟量下限；空间净高超过 6 m 后，计算重点转向设计火灾、烟羽流质量流量和清晰高度，中庭及大空间还需区分轴对称烟羽流、阳台溢流烟羽流或窗口型烟羽流。防烟分区借助挡烟垂壁、结构梁等限制烟气水平扩散，机械排烟时储烟仓厚度一般不小于空间净高的 10%，且不小于 500 mm，排烟口设置在储烟仓内，并控制最远点至最近排烟口的水平距离。美国 NFPA 92 更强调设计火灾热释放速率、烟羽流卷吸量、烟层温度及界面高度，排烟能力会随火源位置、空间高度和燃料特性变化。我国偏重分区和参数控制，美国更关注烟层随时间的演化，复杂中庭采用烟层计算或 CFD 校核，更能反映两套规范在设计边界和排烟能力确定上的差异以及风口布置。

（3）补风组织与系统平衡：机械排烟运行后，室内空气持续外排，若补风不足，负压会使排烟口实际流量下降，并增加疏散门开启阻力；若补风射流过强，又可能扰动烟层并扩大烟羽流卷吸[3]。我国现行规范允许采用自然补风或机械补风，地下商业、无外窗房间及大面积中庭多设置独立机械补风系统，补风口通常布置在储烟仓下沿以下，并避开直接冲击火源和烟层的位置。设计时除校核补风量与排烟量的匹配，还需结合开口面积、风管阻力、风口速度和气流路径判断是否形成短路。美国 make-up air 设计同样强调质量平衡，但更重视补风速度、送风方向与烟羽流稳定性的相互影响，中庭底部若采用高速机械送风，冷空气卷入烟羽流后会增加排烟负荷。跨规范设计时，补风不宜作为排烟风机选型后的附加配置，而需与压差、门开启力、烟层界面和风口布置一并校核，并在最不利开门工况下复核室内负压变化，使排烟和补风保持稳定气流组织，进一步降低不同工况下的运行偏差。

3 规范差异对工程设计的影响

（1）高层建筑竖向防烟：高层建筑的竖向压差受建筑高度、室内外温差、风压和竖井连通状态共同影响，楼梯间若仅按平均风量设计，低区可能正压过高，高区则可能出现防烟不足。我国规范对系统竖向分段给出较明确限制，建筑高度超过一定范围后，机械加压送风系统和机械排烟系统均需按服务高度分段设置，以减小长距离风管阻力及上下区压力差。工程设计中还需校核最不利楼层送风口开启后的实际风量，并结合余压阀、旁通或变频风机处理门开启力和压力波动。美国高层烟控更强调烟囱效应计算，冬季室内温度高于室外时，竖井上部易形成较高正压，下部则可能产生负压，夏季又可能出现反向变化；外墙迎风面和背风面的压力差还会改变楼梯间与走道之间的压差。对于 150～200 m 级高层建筑，IBC 框架下需把不同季节、门开启组合纳入工程分析，风机静压和泄压设施据此确定，设计结果更依赖具体气候和建筑几何条件，并影响系统分区方式。

（2）中庭大空间排烟：中庭和大空间的烟气控制难点在于烟羽流卷吸量随上升高度快速增加，单纯按建筑面积确定排烟量容易低估高位烟层负荷[4]。我国设计通常先确定设计火灾和目标清晰高度，再依据火源是否靠近墙面、阳台或中庭边缘选择轴对称烟羽流、阳台溢流烟羽流等模型，计算烟羽流质量流量后换算排烟体积流量；排烟口还需校核单口最大允许排烟量，防止吸穿烟层。补风口多设置在低位，并与高位排烟口形成明确的气流路径。美国 IBC 与 NFPA 92 同样重视烟羽流和烟层界面，但工程分析往往进一步引入自动喷水作用、火灾增长曲线、补风扰动及相邻楼层开口条件，必要时采用区模型或 CFD 核查能见度、温度和烟层下降时间。对于净高 20～30 m 的商业中庭，两套规范可能得出不同的风机容量和排烟口数量，设计对比宜在相同火灾场景和边界条件下展开，同时核查顶部蓄烟容积、排烟口间距和补风路径，防止局部补风气流短路。

（3）联动控制与性能验证：防排烟系统能否发挥

作用，与火灾报警、风阀、风机和控制程序之间的动作顺序密切相关。我国系统在火灾确认后，通常由消防联动控制器开启相应加压送风口或排烟阀，并联动启动送风机、排烟风机和补风机；排烟防火阀在烟气温度达到 280℃时关闭，同时联锁停止对应排烟风机和补风设备。调试阶段除检查单台设备启停，还需测定最不利点风量、楼梯间与走道压差、前室余压及排烟口实际风速，发现偏差后再调整风阀或风机工况。美国 IBC 除功能测试外，强调专项检查和最终安装状态验证，测试对象包括风管漏风、实际风量、压差、探测器输入、控制矩阵和备用电源切换。设计文件往往同步编制 sequence of operation 和测试程序，使每一种火灾信号对应明确的设备动作。两国差异说明，防排烟设计不能停留在计算书层面，控制逻辑、测试工况及验收记录同样属于系统性能的一部分。

（4）跨规范项目设计协调：涉外工程同时面对中国规范和美国规范时，最容易出现的问题并不是单位换算，而是不同设计目标被误认为同一参数[5]。稳妥的做法是在方案阶段建立条款对照表，逐项核对系统设置条件、设计火灾、烟控分区、目标压差、排烟能力、补风方式、控制逻辑和测试方法，并把强制性要求与工程分析参数分开记录。楼梯间设计若中国规范要求 40～50 Pa 余压，而美国方案还需满足门开启力和最低压差条件，则风机静压不能简单取两者中的较大值，而要重新核算泄压面积、变频控制和最不利开门组合；中庭设计也不宜直接把单位面积排烟量换算为 NFPA 92 模型输入，而需统一火灾热释放速率和烟层目标。项目进入施工图阶段后，还需明确法定采用版本、审批机构和验收判据，避免设备选型满足一套规范、联动测试却按另一套规范执行。跨规范协调的关键在于统一设计边界，而不是追求单个参数数值一致。

4 总结

中美防排烟规范均以限制烟气蔓延、保障疏散安全和消防救援为基本目标，但在系统设置、参数确定及性能验证方面存在不同技术路径。我国规范侧重适用条件、设计指标和设备配置，便于施工图设计与实施；美国规范更强调设计火灾、烟层界面、压差控制及工程分析。两者并非简单的数值差异，而是计算起点不同，我国从规范规定的部位和指标展开，美国从预定烟控目标反推系统能力，因此，海外项目项目应在方案阶段先统一设计边界、火灾场景与验收依据，再按所采用的法定规范分别完成选型与校核，并在规则化设计与性能化分析之间相互借鉴，以提高防排烟系统的合规性与运行可靠性。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑防火通用规范:GB 55037—2022[S].北京:中国计划出版社,2022.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.消防设施通用规范:GB 55036—2022[S].北京:中国计划出版社,2022.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑防烟排烟系统技术标准:GB 51251—2017[S].北京:中国计划出版社,2017.

[4] International Code Council.International Building Code:IBC 2021[S].Country Club Hills,IL:ICC,2021.

[5] NFPA.Standard for Smoke Control Systems:NFPA 92-2021[S].Quincy,MA:National Fire Protection Association,2021.

[6] 曾甫海.国内外防烟排烟系统设计规范对比分析[J].制冷与空调(四川),2025,39(6):917-921.

[7] 谢元一,黄晓露.扁平大空间建筑相邻分区不同排烟模式可行性研究[J].消防科学与技术,2024,43(10):1408-1412.

[8] 范传刚,盛子琼,焦澳.室内步行街中庭火灾温度场特征及烟气蔓延控制全尺寸试验研究[J].土木工程学报,2023,56(11):56-63.

[9] 端木祥玲,詹子娜,李磊,宋云龙.中庭式地铁车站不同补风方式对排烟效率影响分析[J].消防科学与技术,2022,41(3):343-346.

[10] 胡浪,陈健,王海燕,张丙森.某室内商业步行街火灾烟气控制研究[J].消防科学与技术,2022,41(3):334-338.