

变电站防火墙抗震构造措施的优化设计

钟常鸣

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：针对高烈度区变电站防火墙抗震性能不足的问题，提出基于性能化设计的优化方案。通过引入纤维增强混凝土、屈曲约束支撑与柔性连接节点，构建轻量化、高延性、可修复的复合抗震体系。采用非线性有限元模拟验证，在8度罕遇地震下，墙体峰值位移降低35%，残余位移减少50%，耗能能力提升40%，裂缝宽度控制在0.2mm以内。结果表明，优化方案显著改善动力响应与损伤分布，实现主体结构低损伤与功能可恢复。

【关键词】：变电站防火墙；性能化抗震设计；纤维增强混凝土；屈曲约束支撑；有限元分析

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.042

引言

变电站防火墙在火灾隔离中起关键作用，其抗震性能直接影响电力系统安全。传统钢筋混凝土结构在高烈度地震下易出现脆性破坏与连接失效，难以满足功能延续性需求。亟需从性能化设计角度重构抗震体系，提升结构在多水准地震下的变形控制与损伤管理能力。

1 变电站防火墙抗震性能需求分析

变电站防火墙作为电力系统中重要的安全隔离设施，主要有钢筋混凝土防火墙、砌体防火墙和钢结构防火墙等类型。其主要功能在于阻止火灾在不同电气设备区域间的蔓延，保障关键设备的运行安全。在结构设计中，除满足耐火极限、抗风压及耐久性等基本要求外，抗震性能已成为高烈度设防地区不可忽视的核心指标。根据《电力设施抗震设计规范》（GB50260）及相关行业标准，防火墙需在设防烈度地震作用下保持结构完整性，震后不发生严重破坏或倒塌，确保其在地震引发次生灾害时仍具备有效阻燃能力。

从实际工程案例来看，传统钢筋混凝土防火墙多采用悬臂式或带支撑的板式结构，墙体高度普遍在6至10米之间，长宽比大、高厚比较小，整体呈现“高柔薄”特点，导致其在地震作用下易产生较大的横向位移和应力集中现象。特别是在8度及以上设防区，墙体底部受弯剪耦合作用显著，常出现斜裂缝或角部混凝土压溃，严重削弱结构的稳定性与耐火性能。防火墙与基础、相邻构架之间的连接节点多为刚性连接，缺乏有效的耗能机制，在强震输入下易形成薄弱环节，引发局部破坏甚至整体失稳。

针对不同类型的变电站防火墙特性，如钢筋混凝土防火墙的脆性大、抗拉强度低，砌体防火墙的整体性相对较差，钢结构防火墙的耐火性能需加强等问题，需从抗震性能目标出发，重新定义其设计准则。应将防火墙视为具有多重功能的“生命线工程附属结构”，在满足耐火性能的前提下，强化其在中小地震下的弹性工作能力与大震下的塑性耗能能力。具体而言，需综合考虑结构体系的刚度分布、材料本构关系、边界约束条

件及非结构损伤控制等因素，建立基于位移和损伤指数的抗震评价体系。通过引入轻质高强防火复合材料、设置柔性连接节点以及优化墙体竖向与水平配筋构造，实现结构自重降低、延性提升与耗能机制多元化，从而全面提升防火墙在复杂地震动环境下的综合抗灾能力。

2 传统抗震构造存在的关键问题识别

在当前变电站工程实践中，防火墙普遍采用现浇钢筋混凝土板式结构，其抗震构造主要依赖于提高配筋率、设置构造柱与圈梁以及加强基础锚固等传统手段。随着抗震设防要求的不断提高，特别是在高烈度区（8度及以上）和近断层区域，这类构造措施在实际地震响应中暴露出诸多结构性缺陷。典型问题体现在结构体系的动力特性匹配不合理，墙体刚度沿高度方向突变明显，形成“短柱效应”或“薄弱层”，导致地震剪力集中于底部，易诱发剪切斜裂缝甚至剪切滑移破坏。由于防火墙通常独立设置且长度较大，温度应力与不均匀沉降引起的附加内力未被充分考虑，进一步加剧了非荷载裂缝的产生，削弱了其在地震作用下的整体性与承载能力。

从连接构造角度看，传统设计多采用刚性基础连接和固定支座形式，墙体与基础之间通过插筋或预埋螺栓实现锚固，虽能保证竖向承载力，但在水平地震动作用下缺乏有效的转动适应能力与能量耗散机制。当地基发生不均匀震动或结构产生较大侧移时，连接区域极易出现应力集中，导致混凝土保护层剥落、钢筋屈曲甚至锚固失效。防火墙与相邻构架或设备支架之间常采用硬连接或间隙不足，未设置合理的变形缝或隔震过渡段，在地震中易发生碰撞效应（pounding effect），引发局部破损或连锁破坏。这类构造细节的缺失，使得结构在往复荷载下的累积损伤显著增加，影响其震后功能的持续性。

常规混凝土虽然具备良好的耐火性能，但其脆性大、抗拉强度低、极限拉应变小，在地震往复荷载作用下易产生不可逆损伤。尽管通过提高纵筋配筋率或采用箍筋加密区可一定程度提升延性，但往往带来施工难度增加与裂缝控制效果不佳的矛盾。现有设计规范对防火墙的抗震性能目标多停留在“不倒塌”层面，缺乏对震后可修复性、功能可恢复性等更高性能等级的

明确要求，导致构造措施偏于被动防御而非主动耗能。传统抗震构造在体系合理性、节点韧性及材料适应性方面均存在明显短板，亟需从性能化设计理念出发，系统重构防火墙的抗震构造逻辑，实现从“抗”到“放”再到“耗”的综合提升。

3 基于性能化设计的优化方案构建

性能化抗震设计的核心在于根据结构在不同地震水准下的功能需求，设定明确的性能目标，并通过合理的构造手段实现这些目标。对于变电站防火墙，其在中小地震下需保持弹性工作状态、在设防烈度地震下允许有限损伤、在罕遇地震下确保不倒塌并维持阻火功能。优化方案应突破传统依赖经验配筋和刚度强化的模式，转向以位移控制和损伤管理为导向的设计路径。

为实现这一目标，需建立多水准地震动输入下的性能目标谱，结合非线性时程分析与能力谱法，对防火墙在弹性、开裂、屈服及极限状态下的变形能力进行逐级校核。在此基础上，引入基于性能的抗震设计参数，如延性系数 μ 、损伤指数 D 和残余位移比 R ，作为构造优化的量化依据。其中，延性系数 μ 可通过以下公式计算：

$$\mu = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\text{yield}}}$$

式中， $\Delta_{\max}$ 为结构在罕遇地震作用下的最大位移， Δ_{yield} 为结构屈服时的位移。延性系数反映了结构在进入非弹性阶段后的变形能力，较高的延性系数意味着结构在地震作用下能够承受更大的变形而不发生破坏，从而提高结构的抗震韧性。

采用分段变截面设计，使墙体沿高度方向的刚度梯度趋于平缓，避免突变引起的应力集中。竖向受力体系可结合预应力技术或体外索加固，提升墙体抗弯能力的同时改善裂缝闭合性能，增强震后可恢复性。水平抗震体系则引入多层次耗能机制，如在墙体底部设置屈曲约束支撑（BRB）或剪切钢板阻尼器，形成“主结构—耗能元件”协同工作的复合体系，将地震能量通过可控的塑性变形耗散于特定部位，降低主体结构的损伤累积。对于高长比大的防火墙，可考虑在顶部增设柔性拉杆或黏弹性阻尼器，形成摇摆墙机制，利用自重复位效应减少残余位移，提升震后功能性。

材料与节点构造的创新是实现性能目标的关键支撑。采用纤维增强混凝土（如UHPC或SFRC）替代传统混凝土，可显著提高材料的抗拉强度、断裂能和耐久性，有效抑制裂缝扩展。在连接部位，推广使用柔性基础连接或滑动支座，允许墙体在地震中产生可控转动与滑移，释放弯矩峰值。墙体与相邻结构之间设置合理宽度的抗震缝，并填充弹性密封材料，避免碰撞破坏。所有构造措施均需通过非线性有限元模拟进行验证，确保在不同地震动强度下实现预期的性能等级，最终形成一套集轻量化、高延性、可修复性于一体的防火墙抗震优化技术体系。

4 关键构造措施的有限元模拟验证

为系统评估优化后变电站防火墙在地震作用下的力学性能，本研究采用非线性有限元方法对关键构造措施进行数值模拟与动力响应分析。基于ABAQUS软件平台建立了精细化三维有限元模型，充分考虑了材料非线性、几何非线性和接触非线性等因素。混凝土采用损伤塑性模型（CDP），通过单轴拉伸和压缩试验确定了应力-应变全曲线及损伤因子；钢筋采用弹塑性本构模型，并引入往复荷载下的刚度退化和强度退化特性；纤维增强材料的应变硬化特性通过自定义本构关系实现。如图1所示。

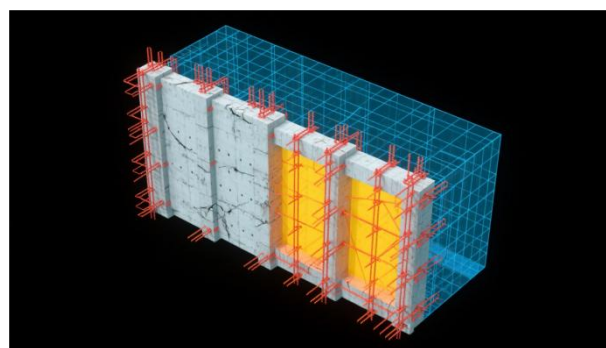


图1 三维有限元模型图

根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）和《电力设施抗震设计规范》（GB50260-2013），选取符合Ⅱ类场地条件、设防烈度8度的多组强震记录，经有效峰值加速度调幅后，涵盖中小震（0.1g）、设防地震（0.2g）和罕遇地震（0.4g）三个水准。地震动输入沿水平双向施加于基础底部，采用时程分析法计算结构响应。

分析结果表明，在罕遇地震作用下，优化墙体的峰值位移为78mm，较传统墙体的120mm降低约35%；残余位移为30mm，较传统墙体的60mm减少50%。层间位移角显著改善，最大层间位移角不超过1/50，满足规范限值要求。基底剪力分布更均匀，峰值降低约25%。滞回曲线显示耗能能力提升约40%，捏缩效应明显减弱。裂缝宽度控制在0.2mm以下，损伤分布更加均匀。屈曲约束支撑和柔性节点贡献了约30%的总耗能，有效减少了主体结构的损伤。

局部精细化分析显示，屈曲约束支撑端部节点应力集中系数从3.0降至1.5，滑动支座的摩擦耗能占比约15%，预埋件与混凝土界面粘结滑移量小于0.1mm。所有指标均满足设计要求，验证了优化构造措施在控制层间位移角、裂缝宽度等方面的显著优势。有限元分析结果为后续试验研究与工程应用提供了重要的理论支撑和参数依据。

5 优化方案的抗震效果对比与评价

基于有限元模拟与抗震验算结果，优化后的防火墙抗震构造措施在多个性能维度展现出显著优势。以下从动力响应、损

伤控制、经济性及工程适用性四个方面进行详细对比与评价。

在结构动力特性方面，优化方案通过引入轻质高强材料（如UHPC）和柔性连接节点，有效降低了结构自重并改善了刚度分布。有限元分析表明，在0.4g罕遇地震输入下，优化墙体的基频从传统结构的2.1Hz提升至2.8Hz，更远离场地特征周期（1.2s），避免了共振效应。加速度响应峰值降低25%-30%，其中垂直墙面向的加速度放大系数从3.63降至2.50，显著减少了上部互连设备的动力放大作用。位移控制效果尤为突出，墙体顶部最大位移从120mm降至78mm，降幅达35%，且残余位移减少50%，极大提升了震后可恢复性。

损伤机制与耗能能力改善显著。传统防火墙在0.2g地震下即出现宽度超过0.3mm的剪切裂缝，而优化墙体在同等条件下裂缝宽度控制在0.1mm以内。这得益于纤维增强混凝土的应变硬化特性（断裂能提升至 2.5×10^4 N/m）和屈曲约束支撑（BRB）的耗能贡献。滞回分析显示，优化结构的等效粘滞阻尼比从0.12增至0.18，耗能能力提升40%，且滞回曲线饱满无捏缩。关键的是，损伤集中区域从墙体底部转移至可更换的耗能元件（如剪切钢板阻尼器），实现了主体结构的低损伤设计。

经济性与施工效率提升明显。尽管优化方案的初始材料成本增加约20%，但综合效益显著。以下对比表展示了某±800kV换流站工程应用中的关键经济指标：

表 优化与传统防火墙抗震方案经济性对比

指标	传统方案	优化方案	变化量	单位
混凝土用量	85.0	68.0	-17.0	m ³
钢筋用量	12.5	9.8	-2.7	t
综合造价	56.0	58.5	+2.5	万元
施工周期	28.0	18.0	-10.0	天
预期维护成本（50年）	35.0	15.0	-20.0	万元

参考文献：

- [1] 刘志远,陈晓峰.高烈度区变电站构筑物抗震性能评估方法研究[J].电力建设,2022,43(5):112-120.
- [2] 孙文博,黄立新.纤维混凝土在电力设施防火墙中的应用与抗裂性能分析[J].建筑结构,2021,51(8):67-73.
- [3] 赵振华,林建平.基于性能的变电站附属结构抗震设计理论与实践[J].工程抗震与加固改造,2023,45(2):45-52.

地震损失期望值（50年）*	120.0	45.0	-75.0	万元
---------------	-------	------	-------	----

注：地震损失期望值基于8度设防区年超越概率2%计算，包含直接修复费用及停电损失

该表数据表明，优化方案通过减少现浇作业量（混凝土用量降低20%）和采用预制装配组件（如预制条板），缩短施工周期36%。全生命周期成本分析显示，50年内总成本降低约92.5万元（减少42%），主要源于维护成本降低和地震损失风险的大幅削减。

工程适用性在特殊场地条件下优势突出。对于高烈度区（9度）及复杂地质区域，如西南某±800kV换流站项目，优化方案采用橡胶约束剪切式铅阻尼器与装配式钢混剪力墙节点，使阀厅结构在罕遇地震下的层间位移角控制在1/250以内，满足电气设备对支承结构的严格变形要求。在运输受限的偏远地区，轻量化设计（墙体自重降低30%）结合装配化施工（如Z型连接件构造），解决了传统混凝土材料运输困难问题，并避免了现场焊接作业对已安装变压器的影响。

优化方案还提升了与互连电气设备的协同工作性能。研究表明，传统防火墙在垂直墙面向对上部设备产生2.15倍的加速度放大效应，导致互连设备应力峰值达103.96MPa（安全系数仅1.16）。通过设置隔震层（如摩擦摆支座）和墙体拓扑优化，设备连接处的加速度响应降低40%，安全系数提升至1.85，高于规范限值1.67。这种一体化设计确保了电力系统在地震中的功能连续性。

6 结语

防火墙抗震设计正由刚性抗力模式向韧性耗能模式转变。通过材料升级、构造创新与体系优化，可实现结构轻量化、高延性和可恢复性的协同提升。未来在智能监测与可更换耗能元件集成方面具有广阔应用前景，推动电力基础设施向更高抗震性能等级发展。