

整体悬挂式烟囱钢内筒的结构设计

李杰¹, 熊雄²

- (1. 广东省冶金建筑设计研究院有限公司, 广州 510080;
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]整体悬挂式烟囱的钢内筒截面以受拉为主, 接头少利于防渗漏, 具有受力合理, 用钢量省, 利于烟囱运行和维护的优点, 但整体悬挂式钢内筒的筒身、膨胀伸缩节、悬挂平台的设计与施工均要复杂很多。为解决悬挂平台、钢内筒、止晃点及膨胀伸缩节的设计关键问题, 提出了一种整体悬挂式烟囱钢内筒的结构设计方案。[方法]通过具体工程实例, 结合计算分析, 最终确定采用桁架式悬挂平台结构以及新型的悬挂点设计方案, 建立了考虑悬挂平台转动刚度的钢内筒连续梁计算模型, 采用承插式膨胀伸缩节, 并用密封液进行封闭。[结果]结果表明: 该设计方案受力合力, 满足烟囱的密封性和耐久性要求, 且便于施工和缩短工期。[结论]通过对整体悬挂式烟囱钢内筒结构设计问题进行探索和研究, 所采用的设计方案取得了较好的经济效益, 可为类似工程提供参考。

关键词: 整体悬挂式; 烟囱; 钢内筒; 悬挂平台; 止晃点; 膨胀伸缩节

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0016-06

Structural Design of Entire Suspension Steel Inner Cylinder in Chimneys

LI Jie¹, XIONG Xiong²

- (1. Guangdong Metallurgical and Architectural Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction]The section of the entire suspension steel inner cylinder in chimney is mainly in a state of tension, and the joints are less conducive to leakage prevention. The design and construction of the entire suspension steel inner cylinder, expansion joint and suspension platform are much more complicated. In order to solve the key problems in the design of suspension platform, steel inner cylinder, guide point and expansion joint, a structural design scheme of integral suspension chimney steel inner cylinder was proposed. [Method]Through specific engineering examples, combined with calculation and analysis, the truss suspension platform structure and new suspension point design scheme were finally determined, and the calculation model of continuous beam considering the rotational stiffness of suspension platform was established for steel inner cylinder. The socket expansion joint was adopted and sealed with sealing fluid. [Result]The results show that the design scheme meets the requirements of sealing and durability of chimney, and is convenient for construction and shorten the construction period. [Conclusion]Through exploring and researching the structural design of steel inner tube of entire suspension chimney, the design scheme adopted has achieved better economic benefits, which can provide reference for similar projects.

Key words: entire suspension; chimney; steel inner cylinder; suspension platform; guide point; expansion joint

目前新建火力发电厂的烟气脱硫多采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺, 湿法烟气脱硫系统不设置烟气加热系统 (GGH) 时, 烟气进入烟囱的温度只有 50℃左右, 湿度大并处于饱和状态。处理后的烟气

中 SO₂ 含量大大减少, 但对烟气中造成腐蚀的主要成分 SO₃ 脱除效率并不高, 一般还含有氟化氢和氯化物等, 在饱和烟气中, 将形成腐蚀强度高、渗透性强的低温高湿稀酸型物质, 对烟囱结构和防腐设计提出了严格的要求。

套筒式和多管式烟囱作为湿烟囱常用的结构型式, 钢内筒一般采用普通钢、耐硫酸露点钢和钛钢

复合板, 支承方式主要有自立式和悬挂式。自立式即钢内筒承受自身重量, 整体性较好, 但用钢量较大, 经济性差。悬挂式分为整体悬挂式和分段悬挂式, 整体悬挂式将整段钢内筒直接悬挂在烟囱顶部的承重平台, 而分段悬挂式则将钢内筒烟囱分成多段, 分别悬挂在各承重平台, 各段之间设置膨胀伸缩节连接。相比自立式钢内筒, 采用悬挂式的钢内筒截面以受拉为主, 充分利用了钢材的材料特性, 避免了自立式钢内筒钢板易于局部压屈的缺点, 因而其厚度大为减小, 可明显降低总用钢量, 同时高耸烟囱的强度主要受风荷载控制, 筒身弯矩大、轴力小, 钢内筒悬挂在外筒上, 也有利于提高外筒的受力性能。据已建的分段悬挂式烟囱的运行情况反馈, 伸缩节的防渗漏防腐处理是分段悬挂式烟囱的突出问题。而采用整体悬挂式, 则可以有效避免膨胀伸缩节的渗漏问题, 且用钢量更省。

对于分段悬挂式钢内筒的设计和施工, 国内已有不少学者^[1-7]进行了相关的研究, 但整体悬挂式钢内筒的筒身、膨胀伸缩节、悬挂平台的设计与施工均要复杂很多, 目前应用的工程实例较少。刘付浩^[8]进行了整体悬挂式烟囱设计的尝试, 张凌伟^[9]则提出了内、外筒相互作用影响下的钢内筒内力计算方法, 吴留恩^[10]采用液压提升倒装法完成国内首座整体悬挂式烟囱钢内筒的施工。某发电厂的烟囱钢内筒采用悬挂式的超长内筒, 其作为我国目前单机容量最大的高效超超临界火电机工程, 内筒直径大, 悬挂段长, 国内少见, 本文对其关键设计难题进行探讨, 以供类似工程参考。

1 工程概况

该发电厂工程烟气采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺, 不设置烟气加热系统(GGH)。烟囱设置2座出口直径9.0 m的排烟内筒, 高度240 m, 每台炉引入1座内筒。外筒高度为230 m, 采用钢筋混凝土结构, 底部直径25.9 m, 顶部直径22.0 m, 内部共设有6层钢平台。内筒材料为钛钢复合板, 采用整体悬挂式, 悬挂长度166 m, 悬挂于标高220 m处钢平台。其结构立面如图1所示。

主要设计参数如下:

- 1) 抗震设防烈度: 7度(0.10 g)。
- 2) 场地特征周期: 0.25 s。
- 3) 百年一遇基本风压: 0.94 kPa。

4) 夏季极端最高温度(°C): 37.5。

5) 冬季极端最低温度(°C): -1.4。

6) 烟气正常运行温度(°C): 50.0。

7) 烟气非正常运行温度(°C): 110.0。

2 悬挂平台设计

用于支撑双钢内筒的悬挂平台, 一般采用主次钢梁体系的结构布置。由于本工程钢内筒直径大, 悬挂段长, 悬挂平台承受的荷载大, 采用常规的主次钢梁体系布置方案, 不仅导致钢梁所需截面过大, 而且因次梁与主梁叠加的挠度过大, 往往难以做到钢内筒支撑点处的刚度均匀, 从而导致支撑点受力不均, 造成钢内筒局部应力显著增大, 不利于结构受力, 甚至会导致钢内筒产生严重的倾斜。因此, 整体悬挂式烟囱的悬挂平台, 对承载力和刚度都提出了更高的要求。

本工程悬挂平台结构布置采用如图2所示的形式, 采用空间钢桁架结构, 主受力构件由桁架HJ-1及HJ-2组成(如图3所示), 其余平台钢梁为焊接H型钢或热轧H型钢。桁架上、下弦形成了两层平台空间, 并形成稳定的支撑结构体系。采用SAP2000对悬挂钢平台进行计算分析和设计, 以满足钢内筒在吊装、正常使用过程中的平台强度和变形要求。桁架上弦平台作为施工吊装作业平台, 每个钢内筒设置4个千斤顶, 由穿过吊装吊耳的钢丝绳束向上提升钢内筒。当钢内筒提升至设计标高后, 钢内筒悬挂在桁架下弦平台, 每个内筒共有4个悬挂点, 悬挂受力点作用在钢梁GL-1或GL-3上。钢内筒的吊装作业平台和悬挂受力平台分别设置在桁架上下弦钢平台, 施工工作面互不干扰, 且吊装过程不需吊点转换, 便于钢内筒的吊装施工, 缩短施工工期; 悬挂受力点作用在桁架下弦, 利于提高桁架的稳定性。

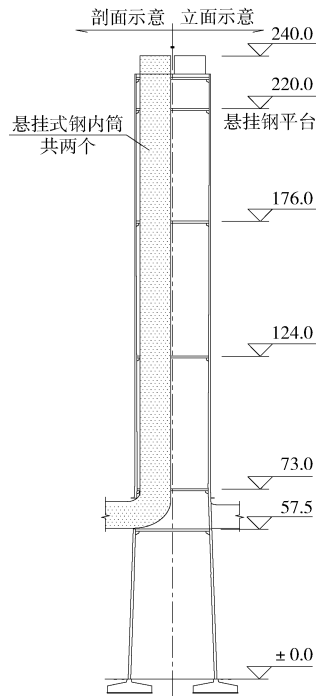


图1 烟囱结构立面图
Fig. 1 Elevation of chimney structure

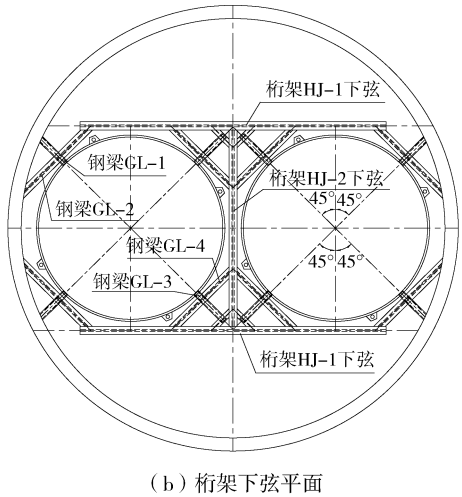
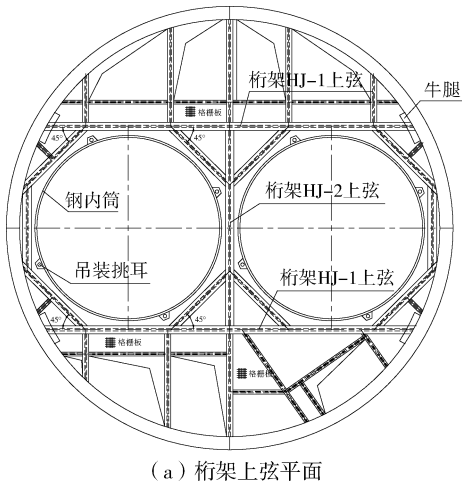


图2 悬挂平台结构布置图

Fig. 2 Structure layout of suspension platform

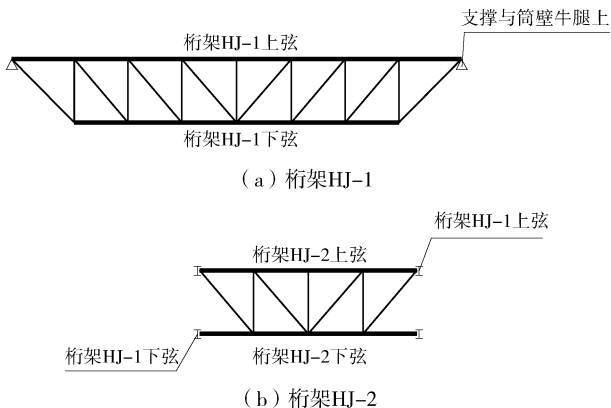


图3 桁架立面结构图

Fig. 3 Elevation of truss structure

3 钢内筒的悬挂点设计

悬挂式钢内筒的重量通过悬挂点传给悬挂平

台，常用的悬挂方式有平台下吊挂和平台上支挂。平台下吊挂采用钢索或其它钢构件将内筒吊挂在钢平台下方，可避免钢平台承重梁的扭转受力，利于受力稳定，但需在平台梁上另加止晃装置，才能保证钢内筒的稳定。这种悬挂方式由于悬吊点设置在平台下方，给施工和维修带来不便。平台上支挂一般是通过牛腿将钢内筒荷载传到钢平台承重梁上，节点做法简单，不需另加止晃装置，施工和维修较为方便。悬挂点处在钢内筒产生集中力，造成钢内筒明显的应力集中，悬挂点是整体悬挂式烟囱设计的关键和难点。在悬挂点受力影响范围内的钢内筒，采用加劲环进行加强，以满足受力和变形控制要求。

本工程单个钢内筒总荷载约475 t，设有4个吊点悬挂在悬挂平台上。采用通用有限元软件 ANSYS，对钢内筒在施工、运行状态下的应力、变形进行计算和分析。采用壳单元建立钢内筒加劲环的模型，将加劲环以下钢内筒的荷载转化为节点荷载，施加在内筒与加劲环底部衔接的节点上。在模型中分别计算4个悬挂点均匀受力和1个悬挂点失效后3点受力的两种工况。计算表明，两种工况下在悬挂点处均产生明显的应力集中，悬挂点反力作用形成的集中弯矩使加劲环发生明显的径向变形；4点均匀受力工况下，加劲环的应力集中及变形均得到有效的改善。

为优化加劲环设计，模型中计算了加劲环刚度、悬挂点支撑刚度、悬挂点偏心距等不同参数下的应力和变形结果，以研究对加劲环受力的影响。通过结果对比得出，避免应力集中的有效办法是保持各悬挂点均匀受力；加大加劲环刚度可以分散应力，减小应力集中，同时减小变形；减小悬挂点偏心距，可以有效减小作用在加劲环上的集中弯矩，从而减小加劲环的径向变形。

本工程采用如图4所示的悬挂方案，钢内筒加劲环由箱型钢梁支撑，当钢内筒提升至设计标高后，将钢梁插入加劲环上预留的凹槽。这样可有效减小悬挂点的偏心距，及其产生的集中弯矩，利于提高加劲环受力性能和控制变形，且便于钢内筒加劲环悬挂受力点的调平。与常规的悬挂点设计相比，该方案在高空平台大大减少了焊接施工量，利于保证施工质量。在牛腿钢梁布置限位装置，限制牛腿的侧向位移，保证钢内筒在风、地震作用下的

稳定。

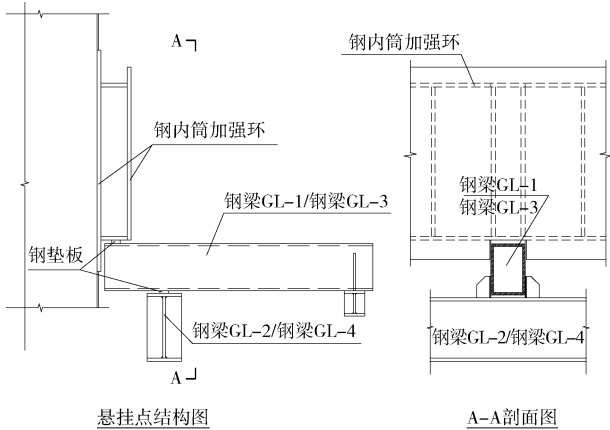


图 4 悬挂点结构

Fig. 4 Suspension point structure

4 钢内筒设计

钢内筒悬挂在悬挂平台上, 其它各层钢平台设置止晃装置, 以限制内筒的水平位移。混凝土外筒与钢内筒通过钢平台的连接相互作用, 变形协调。因此, 在风载、地震力、温度等荷载效应作用下, 混凝土外筒产生的水平位移通过钢平台, 作用在钢内筒上。影响钢内筒内力的主要因素为悬挂平台对悬挂段钢内筒的约束作用, 即悬挂平台的转动刚度与钢内筒线刚度的比值。悬挂平台的转动刚度取决于钢平台的结构布置, 钢内筒线刚度则受止晃点的设置间距影响显著, 止晃点间距越小, 钢内筒的线刚度越大, 由转动引起的内筒内力越大。

钢内筒设计的关键在于确定合理、准确的计算模型。整体悬挂式钢内筒实际上为超静定结构, 可采用连续梁模型进行计算。根据烟囱规范^[11], 悬挂平台处的边界条件根据悬挂平台的转动刚度与钢内筒线刚度的比值 K 来确定, 当 $K < 0.1$ 时, 悬挂端可简化为不动铰支座; 当 $K > 10$ 时, 悬挂端可简化为固定端; 当 K 值介于 $0.1 \sim 10$ 时, 应将悬吊端简化为弹性转动支座。本工程悬挂钢平台对钢内筒约束的转动刚度, 由钢平台的 SAP2000 模型计算得出。将钢内筒的 4 个悬挂点分为两组, 施加一对力偶, 即以相邻的两个悬挂点作为一组, 施加竖向的集中作用力 F , 另外一组施加作用方向相反的作用力 $-F$, 求得力偶作用点的相对位移 S , 最后根据弯矩与转角的关系来求得悬挂平台的转动刚度:

$$Kr = M/\theta = 2FL/\theta = 2FL^2/S$$

式中: L 为力偶的力臂, 即悬挂点之间的距离。

其余各层钢平台上的止晃装置只在水平方向上限制钢内筒的位移, 不约束内筒的竖向变形, 因此可作滑动铰支座处理。在钢内筒底部的膨胀伸缩节, 采用承插式的接头方式, 当钢内筒发生水平位移时, 膨胀伸缩节对钢内筒下端的作用力很小, 对钢内筒没有竖向约束, 因此将钢内筒下端简化为自由端。钢内筒的计算模型如图 5 所示。

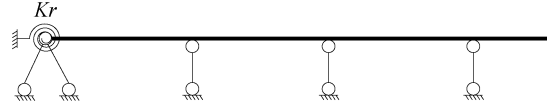


图 5 钢内筒计算模型

Fig. 5 Calculation model of steel inner cylinder

在外筒计算时, 获得各止晃钢平台相对于悬挂钢平台的相对位移, 以支座位移的形式施加到计算模型, 从而求得在外筒变形作用下钢内筒的内力。

外筒位移采用标准值时, 所包含的位移工况如下:

- 1) 恒载(1.0) + 风荷载(1.0)。
- 2) 恒载(1.0) + 风荷载(1.0)。
- 3) 重力荷载代表值(1.0) + 风荷载(0.20) + 水平地震力(1.0) - 竖向地震力(0.4)。
- 4) 重力荷载代表值(1.0) + 风荷载(0.20) + 水平地震力(1.0) + 竖向地震力(0.4)。
- 5) 重力荷载代表值(1.0) + 风荷载(0.20) + 水平地震力(0.4) - 竖向地震力(1.0)。
- 6) 重力荷载代表值(1.0) + 风荷载(0.20) + 水平地震力(0.4) + 竖向地震力(1.0)。
- 7) 恒载(1.2) + 风荷载(0.28) (用于非正常温度工况)。

悬挂段钢内筒的水平地震作用可只考虑在水平地震作用工况下, 钢筋混凝土外筒壁传给悬挂段钢内筒的作用效应, 悬挂段钢内筒的惯性力可忽略不计。

5 止晃点及膨胀伸缩节设计

钢内筒长度大, 其长细比较大, 因此在需设置止晃点, 以保证内筒的稳定性。止晃装置可分为刚性和柔性两种, 本工程利用钢平台设置刚性止晃装置, 对钢内筒仅限制水平向位移, 不约束由于温度作用引起钢内筒的竖向变形, 在钢内筒止晃装置处

设置加强环梁,如图6所示。在止晃点处设置了聚四氟乙烯板,可承受止晃平台对钢内筒的水平冲击力,同时其耐磨性好,可满足钢内筒在温度作用下自由伸缩的使用要求。

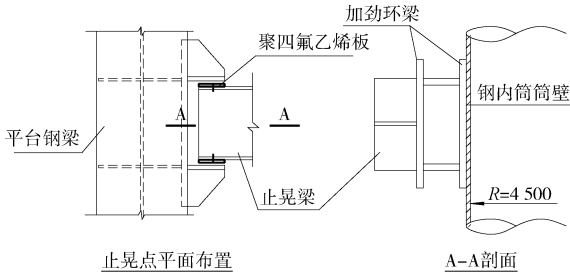


图6 止晃点结构

Fig. 6 Guide point structure

悬挂式钢内筒在各段连接处既要考虑上段钢内筒因温度变化产生的膨胀或收缩变形,同时又需保证连接处的密闭性以保证烟囱的正常运行。因此,在连接处需设置膨胀伸缩节,以消除热胀冷缩和烟囱水平位移引起钢内筒在水平、纵向变形的影响,其设计重点在于考虑钢内筒的膨胀伸缩变形,以及满足防止漏水漏气和防腐蚀要求。膨胀伸缩节的竖向间距需设置足够的长度,以满足钢内筒在各温度工况下的自由滑动,既不脱节又不至于发生碰撞。本工程钢内筒采用整体悬挂式,悬挂段长166 m,在极端温度工况下的伸缩变形很大,常规的膨胀伸缩节较难满足要求。因此,采用如图7所示的承插式膨胀伸缩节。采用广东院研发的烟囱膨胀节专用密封液注入槽内,密封液体沸点高达350℃以上,分子结构稳定,不蒸发,可长期保持液态。同时对钢不腐蚀,与烟气酸液不起化学反应,不混合。湿烟囱因烟气冷凝流量较大,冷凝液体流入膨胀伸缩节槽内后能始终浮在密封液体上层,使多余的酸液

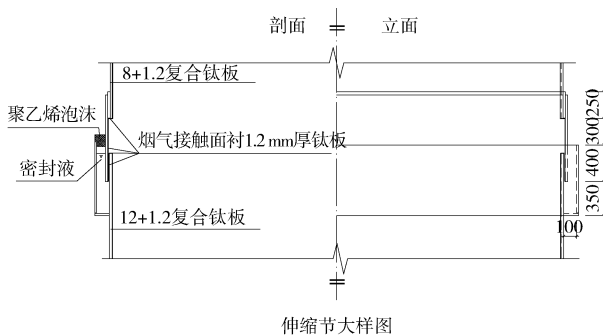


图7 膨胀伸缩节结构

Fig. 7 Expansion joint structure

由筒内壁溢出。由此,无需添加密封液即可达到长期使用的目的,保证烟囱的密封性和耐久性。

6 结论

本工程悬挂平台采用桁架式结构,钢内筒的吊装作业平台和悬挂受力平台分别设置在桁架上下弦钢平台,施工工作面互不干扰,便于施工和缩短工期;通过计算悬挂平台的转动刚度,确定了考虑转动刚度的钢内筒连续梁计算模型,计算得到了合理、准确的内力;采用承插式膨胀伸缩节,并用密封液进行封闭,满足烟囱的密封性和耐久性要求。本文结合工程实践,对整体悬挂式烟囱钢内筒设计的关键问题进行了探讨,以期在后续设计中不断地改进和提高,对整体悬挂式烟囱的应用进行探索和创新。

参考文献:

- [1] 卢昊,孙洪民,李炳益.分段悬挂式钢内筒烟囱结构设计[J].武汉大学学报(工学版),2008,41(增刊1):212-214. LU H, SUN H M, LI B Y. Structural design of sectionally suspensory inner steel cylinder chimney [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(Supp. 1): 212-214.
- [2] 廖洁,孙景江,于澎涛.火电厂悬挂式钢内筒烟囱地震反应分析[J].土木工程学报,2010,43(增刊1):173-176. LIAO J, SUN J J, YU P T. Seismic response analysis on chimney with suspensory inner steel cylinder of thermal power plants [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Supp. 1): 173-176.
- [3] 章卫松,崔传宗,何昭仁.悬挂式钢内筒烟囱结构设计[J].建筑结构,2012,42(3):42-44+48. ZHANG W S, ZHANG C Z, HE Z R. Structural design of suspended inner steel cylinder chimney [J]. Building Structure, 2012, 42(3): 42-44+48.
- [4] 杨小兵,何丽婷,田树桐,等.大型火电厂悬挂式钢内筒烟囱设计研究[J].特种结构,2008,25(2):72-74+82. YANG X B, HE L T, TIAN S T. Design and research of suspended steel inner tube chimney in large thermal power plant [J]. Special Structure, 2008, 25(2): 72-74+82.
- [5] 黄楠,彭博,刘佳.大型火力发电厂悬挂式内筒烟囱设计研究[J].中国电机(技术版),2014,10:14-17. HUANG N, PENG B, LIU J. Design and research of suspended steel inner tube chimney in large thermal power plant [J]. China Electric Industry (Technical Edition), 2014, 10: 14-17.
- [6] 刘贤彬,孔祥华.单点悬挂式烟囱钢内筒液压顶升法施工[J].电力勘测设计,2018(9):18-23. LIU X B, KONG X H. Hydraulic jacking-up construction of single-point hanging chimney steel inner cylinder [J]. Electric

- Power Survey & Design, 2018(9): 18-23.
- [7] 邢咪咪. 悬挂式钢内筒的设计方法及内筒分段数的优化设计 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
XING M M. Design method of suspended steel inner tube and optimum design of segmentation number of inner tube [D]. Xi'an: Xi'an University of Architectural Science and Technology, 2010.
- [8] 刘付浩, 张凌伟. 火力发电厂全悬挂式双钢内筒烟囱的结构设计 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(增刊1): 225-228.
LIU F H, ZHANG L W. Structural design of chimney with double entire suspension steel inner cylinder of a thermal power plant [J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2012, 45(Supp. 1): 225-228.
- [9] 张凌伟, 杨小兵, 王勇强. 全悬挂式钢内筒烟囱计算模型研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(增刊1): 243-246.
ZHANG L W, YANG X B, WANG Y Q. Study of calculation model of chimneys with entire suspension steel inner cylinder [J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2012, 45(Supp. 1): 243-246.
- [10] 吴留恩, 王德闯, 王臻玮. 陈家港电厂整体悬挂式烟囱钢内筒施工 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(增刊1): 359-363.
WU L E, WANG D C, WANG L W. Construction of integral hanging steel inner barrel of chimney in Chenjiagang power plant [J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2011, 44(Supp. 1): 359-363.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 烟囱设计规范: GB 50051—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for chimney design: GB 50051—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

作者简介:

李杰(通信作者)

1982-, 男, 广西桂林人, 广东省冶金建筑设计研究院有限公司副总工, 高级工程师, 一级注册结构师, 土木工程硕士, 主要从事建筑结构设计研究工作 (e-mail)254129831@qq.com。



LI J

熊雄

1982-, 男, 土家族, 湖南张家界人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 一级注册结构师, 土木工程硕士, 主要从事建筑结构设计研究工作 (e-mail)xiongxiiong@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

