

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.015

热电厂循环流化床炉外脱硫的深度治理研究及优化

林梓桦, 王观华

(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: 随着我国经济持续高速发展, 城市化和工业化进程日益加快, 各种大气污染物排放急剧增加, 大气污染防治压力继续加大。某公司响应国家号召, 拟对运行中的两台台循环流化床(CFB)锅炉进行环保升级改造, 并引进国内外先进环保理念, 应用最先进和成熟的环保技术实现炉外脱硫, 使主要污染物排放指标达到国际领先水平。

关键词: 环保; 改造; 脱硫

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0073-05

Research and Optimization on the Deep Treatments of Circulating Fluidized Boiler Desulfurization in Thermal Power Plant

LIN Zihua, WANG Guanhua

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In China, with the rapid and sustainable development of economy and the growing process of urbanization and industrialization, all kinds of air pollutants are increasingly emitted, which causes the pressures of preventing the air pollution continuing to strengthen. In response to the national need and introducing the advanced environmental concepts at home and abroad, the company plans to do the environmental protection and upgrade the environmental equipments for two circulating fluidized boilers with the application of the most scientific and mature environmental technology to re-trofit the flue gas de-sulfurization. The emission limits of major pollutants will reach the international leading level.

Key words: environment; re-trofit; de-sulfurization

循环流化床(CFB)锅炉技术源于七十年代发展起来的新技术, 它的发展动力在于人类社会对环境保护的日益重视。循环流化床技术是一种清洁燃烧技术, 大大的减少了作为世界主要大气污染源—燃煤电站的二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)排放, 即从根本上解决了酸雨的问题。同时, 循环流化床锅炉还具有燃料适应性广、负荷调节性好、投资和运行成本相对较低等优点, 因此该技术在全世界得到广泛的应用。

国内某热电公司为响应国家号召, 建设清洁电厂, 体现企业的社会责任, 拟对运行中的两台循环流化床(CFB)锅炉(后简称A项目)进行环保升级

改造, 实现炉外脱硫, 并引进国内外先进环保理念, 应用最先进和成熟的环保技术, 使主要污染物排放指标达到国际领先水平, 最大限度地降低烟尘、二氧化硫、氮氧化物的排放, 实现绿色供热供电的目标。

A项目地处成都西南部, 根据《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)的要求^[1], 必须执行烟尘 < 20 mg/Nm³、NO_x < 100 mg/Nm³、SO₂ < 50 mg/Nm³的排放标准。

该热电公司倡导“绿色供热计划”, 其远期指标规定: 烟尘 < 10 mg/Nm³、NO_x < 100 mg/Nm³、SO₂ < 35 mg/Nm³。

1 原有锅炉情况介绍

A项目1-2号锅炉共2台150 t/h循环流化床锅炉, 为东方锅炉厂生产制造, 型号为DGJ 150/

收稿日期: 2016-01-15

作者简介: 林梓桦(1982), 女, 广东广州人, 工程师, 硕士, 主要从事电厂环境工程设计工作(email)linzihua@gedi.com.cn。

5.3—II₁。锅炉采用单汽包、自然循环，半露天布置。锅炉由一个膜式水冷壁炉膛，一台汽冷式旋风分离器和一个由汽冷包墙包覆的尾部竖井(HRA)三部分组成。

炉膛内布置有两片水冷蒸发屏。锅炉共设有3台给煤装置和两个石灰石给料口全部置于炉前，在前墙水冷壁下部收缩段沿宽度方向均匀布置。炉膛底部是由水冷壁管弯制围成的水冷风室，水冷风室后布置风道点火器，风道点火器一共有两台，其中各布置有一个高能点火油燃烧器，用于锅炉启动点火和低负荷稳燃。风室底部布置有3根Φ219排渣管，其中一根为事故排渣管。

炉膛与尾部竖井之间，布置有一台汽冷式旋风分离器，其下布置一台“J”阀回料器。在尾部竖井中从上到下依次布置有高温过热器、低温过热器、省煤器和卧式空气预热器。过热器系统中设有一级喷水减温器。

2 原有除尘系统情况介绍

烟风系统采用平衡通风的方式，通过匹配送风机与引风机的出力平衡炉膛的压力。锅炉尾部烟气流程为：空预器——静电除尘器——引风机——烟囱。根据现场实测结果，A项目除尘器出口粉尘浓度小于10 mg/Nm³，综合考虑湿法脱硫系统的部分除尘能力及石膏含量，目前的烟囱出口烟尘排放浓度已满足<10 mg/Nm³的排放要求。因此，原1-2号锅炉的除尘器保留，不改造。新增脱硫装置阻力由新设置的增压风机克服，原引风机不改造。

3 改造研究

3.1 目前现状

3.1.1 炉内脱硫系统

循环流化床锅炉的优势之一就是可以实现炉内脱硫，进而减少炉后烟气脱硫系统的阻力。A项目1-2号锅炉通过石灰石炉前给料系统，调整石灰石的给料量，改变炉内Ca/S，保证炉内脱硫效率。

3.1.2 脱硝系统

A项目1-2号锅炉原有的SNCR脱硝装置经过当地环保局监测均小于100 mg/m³，满足环保要求，因此，A项目不考虑脱硝改造。

3.1.3 SO₂排放现状

A项目1-2号锅炉原有的炉内脱硫装置经过当地环保局监测，平均值为300 mg/m³，不能满足环保要求，因此，A项目在炉内脱硫的基础上，增加烟气脱硫设施。

3.2 环保改造工艺选择

3.2.1 工艺比选原则：

1)如采用干法或半干法脱硫，FGD系统入口SO₂浓度按600 mg/Nm³考虑，烟囱出口SO₂浓度保证值为50 mg/Nm³，并预留35 mg/Nm³能力。如采用湿法脱硫，CFB系统入口SO₂浓度按1500 mg/Nm³考虑，烟囱出口SO₂浓度保证值为50 mg/Nm³，并预留35 mg/Nm³能力。

2)烟囱出口烟尘排放浓度保证值为20mg/Nm³，并预留10 mg/Nm³能力。A项目如果采用干法或半干法脱硫，脱硫后烟尘会增加；因此干法或半干法脱硫后必须再一次除尘方能达到A项目的排放要求。

3)A项目1-2号炉改造完成后，将在原2号锅炉东侧的预留场地上新建一台同类型锅炉。其锅炉的脱硫方案将与1-2号的脱硫方案匹配。脱水系统将沿用1-2号机组脱水系统。废水系统将沿用1-2号机组脱硫废水处理系统。

为了让机组适应不同的煤质，向业主提供更灵活、经济的脱硫运行工况，如果选择湿法脱硫，脱硫系统入口SO₂浓度应按1500 mg/m³设计。如果选择干法脱硫，脱硫系统入口SO₂浓度应按600 mg/m³设计。

4)设计基础参数，详见表1。

表1 1-2号锅炉FGD入口烟气参数表

Tab. 1 Flue gas parameter list for NO. 1-2 boiler FGD inlet

项目名称	SO ₂ 浓度/(mg/Nm ³)	水分(体积比)/%	烟气温度/°C	含氧量/%	标态湿烟气量(BMCR)/(Nm ³ ·h ⁻¹)	年运行小时数/h
数值	1500/600	6.68	138.88	4.98	161167	8000

注：标态湿烟气量(BMCR)，161167 Nm³/h为单台炉满负荷运行时烟气流量。

3.2.2 脱硫改造方案

1)改造脱硫系统脱硫工艺选择

烟气脱硫的工艺很多，各具特点，适用于不同炉型、场地、燃料的锅炉，脱硫效果及经济费用也有较大差别。脱硫的方式主要分为燃烧前脱硫、燃烧中脱硫、燃烧后脱硫。燃烧后脱硫技术有石灰

石-石膏湿法脱硫工艺、循环流化床半干法脱硫(CFB-FGD)工艺、海水脱硫工艺、氨法脱硫工艺等。氨水洗涤脱硫工艺最大的推动力是硫酸铵的销售收入, 如果硫酸铵销路不好或销售渠道有问题, 每年仅吸收剂的成本就高达几千万元, 风险较高。海水脱硫只适用于海滨电厂。因此, 石灰石-石膏湿法脱硫和循环流化床半干法脱硫两种脱硫工艺对厂址条件、反应剂和产物等条件要求较低, 适用于A项目的燃煤电厂烟气脱硫。本文主要针对这两种工艺从技术经济角度作比较。

2) 综合方案比较

对以上两种脱硫工艺进行综合比较, 比较结果列于表2中。

从表2可见, 湿法脱硫流程较之干法的复杂, 施工期长。湿法脱硫处理需要锅炉引风机后进行脱硫改造外, 还需要增加临时烟囱, 拟采用钢结构直接支撑在吸收塔上面, 临时烟囱防腐采用内涂玻璃鳞片, 改造完成后拆除。除此之外, 原烟囱也需要粘贴宾高德玻璃砖进行防腐。但相比之下, 湿法脱硫的水量和电耗量都较干法的少, 湿法脱硫只需石灰石作为吸收剂, 干法需要石灰石和生石灰作为吸收剂。从市场价格来看, 石灰石的价格比较低。无论是总包费用, 还是运行费用, 湿法脱硫都占优势。根据当前两种脱硫技术, 干法脱硫的脱硫效率最高也只能到达95%, 湿法脱硫的脱硫效率可达99.5%。湿法脱硫的工业更能满足往后日益严格的环保要求。此外, 如果1-2号炉为湿法脱硫, 脱水楼和废水处理系统也将在改造中建成。3号炉将沿用1-2号炉的公用系统, 无需新建。因此, A项目拟进行除尘器后增加湿法脱硫装置。

3.3 除尘器后增加湿法脱硫的研究

A项目地处成都西南部, 根据《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)的要求^[1], 必须执行 $\text{SO}_2 < 50 \text{ mg/Nm}^3$ 的排放标准。项目倡导“绿色发电计划”, 其远期指标规定: $\text{SO}_2 < 35 \text{ mg/Nm}^3$ 。

A项目按 $\text{SO}_2 < 35 \text{ mg/Nm}^3$ 计算, 脱硫效率要 $\geq 97.7\%$, 能满足电厂远期指标的规定。

烟气脱硫改造主要设计原则

1) 脱硫工艺采用石灰石-石膏湿法脱硫(FGD)工艺, 脱硫效率按97.7%考虑, 可满足环评报告及其批复意见的要求。

2) 每套脱硫装置的烟气处理能力为相应锅炉BMCR工况时的100%烟气量。

3) 脱硫系统不设烟气旁路, 但设置增压风机, 脱硫装置可用率与机组同步。

4) 石灰石制浆方式采用外购符合要求的石灰石粉。

5) 脱硫装置所需的电源、水源、气源、汽源尽量利用主体工程设施。

6) 脱硫石膏浆采用真空皮带脱水, 石膏脱水后含湿量 $\leq 10\%$, 按石膏库考虑。

7) 本期改造中的公用系统将与3号机组的一并建成。

8) A项目改造期间, 每台炉的停炉时间不超过1个月。

9) 从经济性角度表示, 脱硫系统控制与全厂统一考虑, 不设置单独的脱硫控制室。

根据目前国内同类型电厂烟气脱硫项目的经验, 并结合本工程实际情况, 全套烟气脱硫装置的工艺系统将利用国外技术, 原则上, 设备及材料将国内采购, 关键设备及关键零部件考虑国外进口。

3.3.1 脱硫系统工程设想

A项目烟气脱硫为1-2号锅炉全烟气脱硫系统, 采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺。A项目炉外烟气脱硫浓度按照 1500 mg/Nm^3 设计, 为实现近零排放, 使燃煤机组与燃气机组达到相应的排放水平, 排放的 SO_2 浓度不超过 35 mg/Nm^3 (6% O_2), 脱硫效率需达到97.7%以上。

传统的喷淋空塔技术在国内已成功运行。工程业绩中, 大型电厂以石灰石/石灰-石膏法工艺为主, 大部分可以保证长期运行的脱硫效率在95%以上, 设计合理、管理水平高、运行状况优良的系统脱硫效率在98%左右, 但能实现 SO_2 浓度不超过 35 mg/Nm^3 (6% O_2)工程实例较少。因而, 在传统脱硫技术上改进的高效湿法脱硫工艺应运而生。

高效的湿法脱硫技术有: 在常规的脱硫塔基础上增加喷淋层数量和浆池容量、FGDplus技术、单、双塔双循环湿法脱硫技术、双托盘技术、湍流子技术、液柱塔技术等。

1) 传统喷淋空塔湿法FGD技术

国内外某些电厂采用传统喷淋空塔技术可以在入口含硫量很高时吸收塔效率达到98%以上, 但其

表2 脱硫工艺方案比较

Tab. 2 A comparison for de-sulfurization processes

对比内容	循环流化床(无炉内脱硫) + 石灰石 —石膏湿法烟气脱硫(WFGD)	循环流化床(带炉内脱硫)半干法脱硫 (CFB-FGD)
需改造或新增系统	脱硫用增压风机, 烟气系统, 吸收塔系统, 制浆系统, 废水系统及脱水系统, 工艺水系统	脱硫用增压风机、脱硫塔, 物料再循环系统, 工艺水系统, 流化风机, 脱硫后除尘系统
适用锅炉及煤质	适合各种机组, 各种煤质	适合中小型机组, 低硫煤
工艺水量	5.9 t/h × 2(台)	7 t/h × 2(台)
电耗量	510 kWh × 2(台)	575 kWh × 2(台)
脱硫剂	石灰石粉	石灰
脱硫效率	99%	90%
现场布置	可以	可以
公用系统	公用	公用
脱硫塔	—炉—塔	—炉—塔
排放标准	35 mg/m ³ (SO ₂), 10 mg/Nm ³ (烟尘)	35 mg/m ³ (SO ₂), 10 mg/N m ³ (烟尘)
脱硫剂耗量	0.436 t/h(石灰石)	0.143 t/h(石灰石) + 0.48 t/h(生石灰)
增压风机的风压	1 200 Pa	3 300 Pa
废水处理	需要废水处理	无需废水处理
废水处理费用	120 万(两台机组)	无
对煤种含硫量的调整	可预留喷淋层来适应燃煤含硫量的大范围变化	改变吸收剂的加入量以适应燃煤含硫量的变化, 入口 SO ₂ 浓度不超过 2 000 mg/ m ³
Ca/S	约 1.03	约 1.4
对烟囱要求	烟囱需要防腐	无需防腐
烟囱防腐费用	2 100 元/m ² × 2 550 m ² = 535 万(三台炉共用一个烟囱)	无
是否需要临时烟囱	需要(300 万), 根据环保局要求, 如高度在 50 m 以内的临时钢烟囱则可大幅度降低造价	不需要
脱硫固废利用情况	脱硫副产物石膏可综合利用	可用于矿井填埋, 路基, 水泥掺合等
总包费用(包括土建费)	1 100 万/台 × 2 台 + 535 万 + 300 万 + 120 万 = 3 155 万	2 400 万/台 × 2 台 = 4 800 万
工艺水单价	0.5 元/ t	0.5 元/ t
工艺水耗量	5.9 t	7 t
工艺水总计	2.95 元	3.5 元
电耗单价	0.440 2 元/kWh	0.440 2 元/kWh
电耗耗量	510 kWh	572 kW/h
电耗总计	225 元	252 元
石灰石单价	280 元/ t	280 元/ t
石灰石耗量	0.436 t/h	0.48 t/h
石灰石总计	122 元	134.4 元
生石灰单价	360 元/ t	360 元/ t
生石灰耗量	无	0.143 t/h
生石灰总计	无	52 元
单台机年运行费用 (运行小时数为 8 000 h)	280 万元/台	354 万元/台
施工工期	8 个月, 烟囱防腐需要 60 d	5 个月

FGD 出口 SO₂ 浓度一般均超过 50 mg/Nm³。根据 A 项目煤质中含硫量要求, 设置 3 层喷淋层虽然理论

上吸收塔可能达到 97.7% 的脱硫效率, 但若使吸收塔出口 SO₂ 浓度在长期运行时低于 35 mg/

Nm^3 , 将存在风险。因此需要采取增效措施如另外增加一级吸收塔, 形成串联, 确保脱硫效率达到 97.7% 甚至更高的水平。

2) FGDplus 技术

FGDplus 技术是奥地利能源与环境公司(AEE) 为高硫份煤与超低 SO_2 浓度排放的先进脱硫技术。基于“导向传质”的原理, 对现有的空塔喷淋层技术进行改进, 以减少气液传质阻力和能量消耗, 提高脱硫效率, 减少系统的能量损耗和达到低浓度的 SO_2 排放。此技术已于 2009 年在德国 Niederaussem 电厂建立了一个示范装置, 处理烟气量 $30\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h}$, 运行两年期间, 脱硫效率达到 99.7%。目前, 该技术在太原第二热电厂已运行。

3) 双循环技术

双循环技术是德国诺尔公司的一种湿法脱硫技术。该技术是通过两级的浆液循环, 将 SO_2 进行两次的脱除过程, 这两级循环分别设有独立的循环浆池, 喷淋层, 每级循环具有不同的运行参数。烟气首先经过一级循环, 此级循环的脱硫效率在 30% ~ 70%, 此级循环的主要功能是保证优异的亚硫酸钙氧化效果和充足的石膏结晶时间^[3]。经过一级循环, 烟气直接进入二级循环, 此级循环主要是完成脱硫洗涤。

国电龙源公司在国电肇庆大旺热电联产($2 \times 300\ \text{MW}$ 级)和广州恒运电厂 $2 \times 300\ \text{MW}$ 机组首次采用单塔双循环, 于 2013 年投运, 国电永福电厂脱硫改造项目采用了双塔双循环技术, 4 号机组已于 2011 年 11 月运行, 脱硫效率达到了 99% 左右。

4) 双托盘脱硫技术

开发应用此技术的是美国巴威公司, 在喷淋空塔的基础上, 设置一层或多层塔板, 塔板位于吸收浆液喷嘴下部, 塔板上按照一定的开孔率布满小孔, 吸收剂浆液在塔板上形成一定厚度的液层, 因此称塔板为多空托盘^[3]。

双托盘脱硫技术是在传统的脱硫塔的基础上, 增加两层托盘, 托盘产生的阻力使气体流量均匀地分布在塔的截面。在气体和浆液刚接触时形成了这种阻力使浆液均布, 使浆液与烟气得到充分的接触。双托盘技术重点在气流均质、气液接触、提高石灰石的溶解量等方面进行加强, 脱硫效率可比单托盘提高可达 8% 以上, 达到 98% 以上。

目前, 国内华能珞璜 300 MW 机组、广州珠江

电厂 300 MW 机组及华能长兴电厂 600 MW 均采用了该技术。

5) 液柱塔技术

液柱塔技术是日本三菱公司的专有技术, 单回流液柱塔脱硫技术烟气从下部进入塔内, 先与向上喷射的浆液液柱顺流接触, 浆液柱到达最高点后散开形成向下落的液滴, 再与烟气自上而下逆流接触^[2]。双回流液柱塔脱硫技术烟气从左侧吸收塔上部进入塔内, 先与向上喷射的浆液液柱逆流接触, 浆液柱到达最高点后散开形成向下落的液滴, 再与烟气自上而下顺流接触; 再由右侧吸收塔底部自下而上与浆液顺流接触, 右侧吸收塔浆液柱下落再与烟气逆流接触, 双回流液柱塔脱硫技术脱硫效率可达 98% 以上。

6) 旋汇耦合(湍流子)脱硫技术

湍流塔是在传统喷淋空塔的基础上, 增设一套由多个湍流单元构成的旋汇耦合装置。该技术基于多相紊流掺混的强传质机理, 利用气体动力学原理, 通过特制的旋汇耦合装置, 产生气液旋转翻腾的湍流空间, 气液固三相充分接触, 大大降低了气液膜传质阻力, 大大提高传质速率, 迅速完成传质过程, 从而达到提高脱硫效率的目的^[4]。

因此, A 项目需根据实际情况, 合理选择与之相符的高效脱硫技术, 尽量做到扬长避短。

4 结论

脱硫系统的改造是以节能减排为核心的, 由于现有脱硫系统的场地有限, 以及改造工期的限制, 增加了场地的布置、工艺设计的难度。脱硫改造的设计方案将按照实际情况进行设计, 对脱硫改造技术方案的选取仍需进行详细讨论。

A 项目循环流化床“炉内脱硫 + 石灰石-石膏湿法脱硫”结合静电除尘法工艺, 技术成熟、可靠, 治理效果良好。工程建成后二氧化硫和烟尘的排放量将大幅下降, 电厂区域空气环境质量将得到明显的改善, 完全可满足我国烟气“超净 + 排放”治理的需求, 是适应燃煤烟气环保新形势的科学选择, 满足“资源节约型、环境友好型”社会建设的需要, 能实现社会与环境的可持续发展。因此, 从环境保护的角度出发, A 项目建设是可行的。

(下转第 101 页 Continued on Page 101)

- [7] 王千. 龙滩工程地下洞室群围岩稳定和支持参数研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005
- [8] PIRQUIER W. The effect of dam foundation conditions upon the design of dams [C]//14th International Congress of Large, 1986(3): 173-208.
- [9] 徐志英. 岩石力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版

社, 1993.

- [10] ITO H, KITAHARA Y. The influence of the dispersion of the mechanical properties foundation [C]//Proc. of 6th ICRM, Montreal, 1987: 467-474.

(责任编辑 隋卿毅)

(上接第 68 页 Continued from Page 68)

- [6] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 56-60.
- [7] TRINH N G, MARUVADA P S. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results [J]. IEEE Trans., 1977(1): 312-325.
- [8] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 56-60.
- [9] 无线电干扰标准化技术委员会. 高压架空送电线无线电干扰计算方法: DL/T691—1999 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [10] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 北京: 中国

电力出版社, 2004.

- [11] 国家能源局. 2011—2012 年投产电力工程项目造价情况 [EB/OL]. [2014-05-29]. <http://www.docin.com/p-1549995373.html>.
- [12] 国家能源局. 全国 6 000 千瓦及以上电厂发电设备平均利用小时情况 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2015-01/21/c_133936073.htm.
- [13] 中国电力企业联合会. 输变电工程经济评价导则: DL/T 5438—2009. [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 77 页 Continued from Page 77)

参考文献:

- [1] 环境保护部科技标准司. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [2] 戴铁华, 李彦, 胡昌斌, 等. 大型燃煤电厂大气污染物近零排放技术方案 [J]. 湖南电力, 2014, 34(6): 47-50.

- [3] 方宝龙. 燃煤电厂烟气近“零”排放技术方案浅析 [J]. 科技与创新, 2014(10): 146-150.
- [4] 刘晓威, 王冰, 鞠鑫, 等. 火电厂大气污染物近“零”排放污染控制技术的示范应用 [J]. 电力科技与环保, 2015, 31(6): 25-27.

(责任编辑 黄肇和)

(上接第 81 页 Continued from Page 81)

参考文献:

- [1] 林建中, 张赢. 脱硫废水零排放方案选择 [R]. 广州: 广东省电力设计研究院, 2014.

- [2] 吴海波, 龙国庆, 唐刚. 高硫酸根高氯根高硬度含盐废水处理工艺的选择 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(18): 31-33.
- [3] 李培元. 火力发电厂水处理及水质控制(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 238.

(责任编辑 张春文)

(上接第 91 页 Continued from Page 91)

5) 如果考虑将桩建入计算模型, 可以通过本方法得出的四个刚度参数输入到弹簧支座刚度矩阵中, 能够节省桩建模及其内部单元带来的大自由度, 计算模型更容易维护。笔者认为, 这也是一体化建模(上部结构、基础、地基在同一个计算模型中)发展过程中的一个重要里程碑。

参考文献:

- [1] 高大钊. 土力学与基础工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(责任编辑 张春文)