

# 大型火力发电厂塔式锅炉箱式基础施工质量控制

王云龙

中兴电力东平发电有限公司

DOI:10.18686/bd.v1i6.431

**[摘要]** 某大型火力发电厂锅炉基础地质条件复杂, 为避免产生不均匀沉降而采用箱式基础, 该箱式结构基础工程量大, 施工难度高。通过对施工工序的优化以及对钢筋、模板、混凝土施工质量在过程中进行有效的管控, 确保了该单位工程的工期、质量和安全, 使之观感质量达到清水混凝土效果且满足使用要求。

**[关键词]** 箱式结构; 钢筋; 模板; 混凝土

## 引言

某电厂地处鲁中地区山麓带, 地形为南缓北陡、向北突出的半圆形盆地, 北、东、南三面山岭环绕, 中部为低缓起伏平原。锅炉房基础开挖采用大开挖至中等风化基岩作为持力层, 因锅炉房区域地貌成因类型为侵蚀山地丘陵, 经地质勘探测得该区域地层岩溶极强烈发育, 且发育规模较大, 填

充物为粘性土混砂土, 泥包石、空腹溶洞现象普遍, 部分地段岩石被溶蚀呈蜂窝状。本工程锅炉采用塔式炉, 锅炉本体高度 146m, 上部荷载主要通过支撑锅炉本体的四个主立柱传递给基础, 柱脚与基础采用刚性连接, 基础需要承受较大集中荷载, 根据锅炉房地段地层开挖情况, 采用箱型基础可以有效分散集中荷载、平衡下部地基土的不均匀沉降。

## 1 地质情况及地基处理方案

1.1 经现场开挖后对地质进行勘测分析,锅炉柱基础持力层为中等风化泥灰岩,局部为中等风化泥质灰岩或石灰岩,南侧为中风化泥灰岩,北侧为岩溶强烈发育区,填充物为粘性土。中风化泥灰岩地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 1270\text{kPa}$ ;岩溶发育区地基承载力特征值  $f_{ak} \geq 560\text{kPa}$ ,因岩溶发育程度不同,故开挖深度不同,超挖部分采用 C30 毛石混凝土(毛石含量 20%~30%,最大粒径  $< 300\text{mm}$ )换填至设计标高,每边宽出基础外边缘  $\geq 1500\text{mm}$ 。

1.2 锅炉基础长 61m,宽 48m,高 8.5m,整体结构跨距大,为保证基础的不均匀沉降,毛石混凝土换填宽出基础四周 600mm 处上翻 150mm 挡沿,铺压实度 0.9 粗砂做柔性处理后进行垫层施工。

## 2 锅炉箱式基础施工质量控制

本工程锅炉采用大型箱式基础跨度大,高度高,共计 82 个箱格,施工难度较大,工程量大,主要工程量见下表:

材料名称	数量	单位
混凝土	13348	$\text{m}^3$
钢筋	2826	t
模板	16000	$\text{m}^2$

该箱型基础高度为 8.5m,分三次进行施工,第一次施工至底板以上 500mm 处,第二次施工至顶板以下 395mm 处,第三次进行顶板施工。

### 2.1 钢筋工程质量控制

锅炉基础为抗震设防结构,对于钢筋的要求极为严格,使用前必须进行原材料取样试验,现场所使用的钢筋全部采用带“E”标识钢筋,且结构中纵向受力钢筋强度和最大力下总伸长率的实测值应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204-2015 第 5.2.3 条文<sup>[1]</sup>要求。

同时,重量偏差作为钢筋进场主要的验收条件,必须要满足:

重量偏差 = 试样实际总质量 - [(试样总长度 × 理论重量) / 试样总长度 × 理论重量] × 100%<sup>[2][3]</sup>

对于进场的钢筋原材,严格执行流程:报审合格供应商清单及资质→钢筋原材进场→施工单位提报钢筋力学性能检验委托单→现场见证取样→封样检测→出具实验报告→投入工程使用。全过程由监理与现场第三方试验室进行共同把关,保证钢筋原材进场即为合格品。

现场使用钢筋为 HRB400E 32mm、28mm、25mm 三级钢,连接方式全部采用直螺纹连接,在钢筋加工之前,由套丝机生产厂家现场对人员进行指导培训,推行现场工艺质量挂牌,标明各种规格钢筋对应套筒的丝扣数和工艺要求并制作工艺试件进行比对。安装完成后联合施工单位三级质检人员现场用扭力扳手对直螺纹连接进行校核拧紧扭矩检查,填写《现场钢筋直螺纹接头质量检验记录表》,拧紧扭矩值应符合《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107-2016 表 6.3.1<sup>[4]</sup>规定。钢筋机械连接检测由现场第三方实验室出具

检测报告后,结合钢筋原材建立钢筋见证取样动态管理台账,做到钢筋进场到使用于工程中的可追溯性。

锅炉基础分项工程钢筋施工过程中,重点对钢筋的制作和安装及钢筋保护层厚度进行质量控制。

### 钢筋制作:

在钢筋制作前,将钢筋放样图与图纸进行对照确认后根据放样单制作,钢筋下料及成型的第一件产品必须经质检人员与监理确认加工尺寸无误后批量加工,并在成品存放处设置样品尺寸牌,以备过程中查验。

### 钢筋安装:

因该单位工程钢筋使用量大,从而增加了钢筋安装施工难度。根据设计图纸在钢筋加工过程中充分考虑了钢筋相互间迭放位置、穿插顺序和占位避让关系,将钢筋接头形式、接头位置、搭接长度、锚固长度、通长钢筋端头弯钩方向对钢筋绑扎的影响作为控制点,对施工方案进行了优化,确定了钢筋南北向、东西向与 U 型箍筋相互穿插交替放置,直径 14mm、28mm 三级钢作为措施性筋辅助进行固定的施工方法,每层钢筋之间通过增加措施性垫铁保证间距,用钢筋下脚料焊接模板支架和标准垫块配合使用保证钢筋保护层厚度。

### 2.2 模板工程质量控制

锅炉箱型基础模板采用钢模板为主,木模板辅助的方式施工,基础内墙模板采用钢模板,基础外墙模板采用木模板,基础内外模板连接以  $\Phi 48 \times 3.5\text{mm}$  普通钢架管及  $\Phi 14$  对拉螺栓为主,外墙对拉螺栓中间焊接止水环,钢模板接缝处采用 U 型卡进行紧固。为保证混凝土拆模后观感质量,内外两侧模板上口均拉通常墨线,木模板按所弹模板边线支设,内侧边与墨线平齐,整张的木模板尽量水平使用。木模板安装时,上下竖向拼缝要互相错开,模板之间横向接缝处钉木方固定,模板拼竖向拼缝处粘贴双面胶带。内侧钢模板全部采用新模板并在箱格中搭设井字脚手架,纵向每 600mm 设置一道顶丝加方木对钢模板进行加固,确保拆模后混凝土表面的平整度。全过程严格按照《电力建设施工质量验收及评价规程 第 1 部分:土建工程》DL/T5210.1-2012 中表 5.10.5<sup>[5]</sup>控制,同时要求在混凝土浇筑过程中设置多个线坠吊点,在混凝土初凝前对模板垂直度进行适时监测。

### 2.3 混凝土工程质量控制

混凝土分三次进行浇筑,基础底板约 3600 $\text{m}^3$ 、板墙约 6100 $\text{m}^3$ 、基础顶板约 2500 $\text{m}^3$ ,因此属于大体积混凝土,如何控制该混凝土的温度、保持湿度,避免产生温度收缩裂缝以及每段混凝土施工接槎处处理是该工程的质量控制重点。

锅炉基础混凝土分三次浇筑,设水平施工缝,在混凝土初凝后对水平施工缝做凿毛处理,打掉表面的浮浆,剔除松动石子,露出新鲜骨料,并在混凝土浇筑前 24 小时进行充分湿润。

因本工程浇筑时间在 10 月份左右,根据中央气象台对

该地区年平均气温的统计, 10月份平均最高气温为20℃, 平均最低气温为6℃, 取二者平均温度13℃做为环境温度进行混凝土的温度应力计算。

1) 最大绝热温升:

$$T(t) = \frac{WQ}{C\rho} (1 - e^{-mt})$$

式中:

$T(t)$ ——混凝土龄期为  $t$  时的绝热温升(℃);

$W$ ——每  $m^3$  混凝土的胶凝材料用量( $kg/m^3$ ), 本工程取  $430(kg/m^3)$ ;

$Q$ ——胶凝材料水化热总量 [ $kJ/(kg \cdot K)$ ];

$C$ ——混凝土的比热, 取  $1[kJ/(kg \cdot ^\circ C)]$ ;

$\rho$ ——混凝土的重力密度, 本工程取  $2349(kg/m^3)$ ;

$m$ ——与水泥品种、浇筑温度等有关的系数,  $0.3 \sim 0.5$  (d-1), 本工程取  $0.3(d-1)$ ;

$t$ ——混凝土龄期(d)

其中  $Q = k Q_0$

$k$ ——不同掺量掺合料水化热调整系数, 本工程取  $0.94$ , 其取值法参见《GB50496-2009 大体积混凝土施工规范》表 B.1.2<sup>[6]</sup>

$$Q_0 = \frac{4}{7/Q_7 - 3/Q_3}$$

根据现场第三方实验室提供的数据, 硅酸盐水泥3天水化热为  $230[kJ/(kg \cdot K)]$ , 7天水化热为  $270[kJ/(kg \cdot K)]$ 。

$$Q = k Q_0 = 292 [kJ/(kg \cdot K)]$$

所以, 计算得各龄期最大绝热温升为

龄期 t (d)	3	6	9	12	15	3
T(t)	34.16	48.06	53.7	56.02	56.98	34.16
龄期 t (d)	18	21	24	27	30	18
T(t)	57.33	57.59	57.59	57.59	57.59	57.33

2) 混凝土中心计算温度:

$$T_{1(t)} = T_j + T(t) \cdot \varepsilon_{(t)}$$

$T_{1(t)}$ —— $t$  龄期混凝土中心计算温度(℃)

$T_j$ ——混凝土浇筑温度(℃)

$T(t)$ —— $t$  龄期混凝土最大绝热温升(℃)

$\varepsilon_{(t)}$ —— $t$  龄期降温系数, 查《建筑施工手册》(第五版)表 10-83<sup>[7]</sup>

所以, 计算如下表:  $T_{1(t)}$

浇筑厚度 (1.2m)	龄期 t (d)				
	3	6	9	12	15
$\varepsilon_{(t)}$	0.65	0.62	0.57	0.48	0.38
$T_{1(t)}$	52.2	59.8	60.61	56.89	51.65
浇筑厚度 (1.2m)	龄期 t (d)				
	18	21	24	27	30
$\varepsilon_{(t)}$	0.29	0.23	0.19	0.16	0.15
$T_{1(t)}$	46.63	43.25	40.94	39.21	38.64

3) 混凝土表层温度

混凝土龄期  $t$  时混凝土表面温度:

$$T_{2(t)} = T_q + \frac{4h' \cdot (H - h') \cdot (T_{1(t)} - T_q)}{H^2}$$

式中:  $T_{2(t)}$ ——混凝土表面温度(℃)

$T_q$ ——施工期大气平均温度(℃)

$H$ ——混凝土的计算厚度(m)

$h'$ ——混凝土虚厚度(m)

$T_{1(t)}$ ——混凝土中心温度(℃)

所以, 经过计算, 混凝土表面温度如下表:

各参数	龄期 (t)				
	3	6	9	12	15
$T_s$	13				
A	2.775				
B	39.2	36.8	37.61	43.89	38.65
C	36.06	33.85	34.6	40.38	35.56
$T_{2(t)}$	49.06	46.85	47.6	53.38	48.56
各参数	龄期 (t)				
	18	21	24	27	30
$T_s$	13				
A	2.775				
B	33.63	30.25	27.94	26.21	25.64
C	30.94	27.83	25.7	24.11	23.59
$T_{2(t)}$	43.94	40.83	38.7	37.11	36.59
$T_s$	33.63	30.25	27.94	26.21	25.64

式中:  $A = (H - h')$ ,  $B = [T_1(t) - T_q]$ ,

$$C = \frac{4h' \cdot (H - h') \cdot (T_{1(t)} - T_q)}{H^2}$$

4) 混凝土温度应力计算

4.1) 混凝土收缩变形值和收缩当量温度

i. 混凝土干缩率

$$\varepsilon_{(t)}^Y = \varepsilon_Y^0 (1 - e^{-0.01t}) \times M_1 \times M_2 \times \dots \times M_{10} \times M_{11}$$

$\varepsilon_{t_0}^y$ —t龄期混凝土干缩率

$\varepsilon_y^0$ —混凝土在标准状态下的极限收缩值, 取  $3.24 \times 10^{-4}$

M1、M2、M3、M4、M5、M6、M7、M8、M9、M10、M11—考虑各种非标准条件的修正系数。取值见《GB50496-2009 大体积混凝土施工规范》表 B.2.1<sup>[6]</sup>。

M1——硅酸盐水泥, 取 1.00

M2——水泥细度 300, 取 1.00

所以, 经过计算, 各龄期的混凝土干缩率如下表:

各种参数 龄期(t)

各种参数	龄期 (t)				
	3	6	9	12	15
$\varepsilon_y^0$	$3.24 \times 10^{-4}$				
$1-e^{-\alpha t}$	0.03	0.06	0.09	0.11	0.14
M1×M2 ×... ...× M11	0.17				
$\varepsilon_{y(t)}$	0.16E-0 5	0.3E-0 5	0.49E-0 5	0.6E-05	0.76E-0 5
各种参数	龄期 (t)				
	18	21	24	27	30
$\varepsilon_y^0$	$3.24 \times 10^{-4}$				
$1-e^{-\alpha t}$	0.16	0.19	0.21	0.24	0.26
M1×M2 ×... ...× M11	0.17				
$\varepsilon_{y(t)}$	0.88E-0 5	0.1E-0 4	0.12E-0 4	0.13E-0 4	0.14E-0 4

ii. 混凝土收缩变形值的当量温度

$$T_{Y(t)} = \frac{\varepsilon_{Y(t)}}{\alpha}$$

—混凝土线膨胀系数, 取  $10^{-5}(1/^\circ\text{C})$

所以, 经过计算, 混凝土不同龄期收缩当量温差如下

表:

各参数	龄期 (t)				
	3	6	9	12	15
$\alpha$	$1 \times 10^{-5}$				
$\varepsilon_{y(t)}$	0.16E-0 5	0.3E-05	0.49E-0 5	0.6E-05	0.76E-0 5
$T_Y(t)$	0.16	0.3	0.49	0.6	0.76
各参数	龄期 (t)				
	18	21	24	27	28
$\alpha$	$1 \times 10^{-5}$				
$\varepsilon_{y(t)}$	0.88E-0 5	0.1E-04	0.12E-0 4	0.13E-0 4	0.14E-0 4
$T_Y(t)$	0.88	1	1.2	1.3	1.4

4.2) 抗裂安全度

$$f_{tk}(t) = f_{tk}(1 - e^{-\gamma t})$$

式中:  $f_{tk}(t)$ ——混凝土龄期为 t 时的抗拉强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>), C40

$f_{tk}$ ——混凝土抗拉强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma$ ——系数, 应根据所用混凝土试验确定, 当无试验数据时, 可近似地取  $\gamma=0.3$

当 t=15d 时,  $=2.18\text{N/mm}^2$ ; 当 t=28d 时,  $f_{tk}(t)=2.2\text{N/mm}^2$  抗裂安全度可按下式计算

$$\sigma \leq \frac{\lambda f_{tk}(t)}{K}$$

当 t=15d 时,  $\sigma = 0.27 \leq \frac{\lambda f_{tk}(t)}{K} = 1.89$

当 t=28d 时,  $\sigma = 1.0 \leq \frac{\lambda f_{tk}(t)}{K} = 1.91$

K——抗裂安全系数, 取 K=1.15

$\lambda$ ——掺合料对混凝土抗拉强度影响系数, 可按照《GB 50496-2009 大体积混凝土施工规范》表 B.7.2-1<sup>[6]</sup>取值, 本工程取 1。

经计算, 混凝土的温度应力、收缩变量、抗裂度等均满足规范要求。混凝土的振捣采用二次振捣工艺, 即在混凝土初凝前对混凝土再次振捣, 以排除混凝土因泌水在粗骨料、水平钢筋下部生成的水分和孔隙, 增加混凝土的密实度, 减少内部微裂缝和改善混凝土强度, 提高抗裂性。在每个浇灌点的前、后各布置三道振动器, 第一道布置在混凝土卸料点, 主要解决上部混凝土的捣实, 第二道布置在中间位置, 第三道布置在混凝土坡角处以确保下部混凝土的密实。同时为避免基础端部砂浆过于集中而影响混凝土质量, 在混凝土坡脚抵达顶端模板时改变混凝土浇灌方向。监理在施工过程中对人、机、料、法、环五个方面进行控制, 通过旁站监理、对混凝土搅拌站不定时抽查、对现场供料混凝土的塌落度、和易性以及力能供应适时检查, 确保混凝土施工连续浇筑, 不留设施工缝。并在施工过程中加强对混凝土入模及振捣的监控, 以免产生离析、漏振或过振。

因大体积混凝土会产生大量水化热, 所以浇筑完成后应立即进行覆盖保温养护, 采用第一层覆盖塑料薄膜, 第二层覆盖棉毡, 第三层覆盖棉被养护并做好防风措施。锅炉基础共设置 9 个测温点, 绘制测温点布置图并编号。采用 JDC-2 型便携式电子测温仪对混凝土温升情况测定, 每个测温点设下、中及表面三个测温探头, 分别设在距离混凝土表面以下 50mm、混凝土中心和混凝土底面以上 50mm。混凝土浇筑完毕 12 小时后开始测温, 由专人进行测温记录。测温工作结束后, 将原始记录整理收装订成册备案。待混凝土浇筑体表面温度与大气温差小于 20℃即可进行拆除模板作业。

3 结语

在本工程地质及工程环境复杂的情况下,锅炉基础采用箱式基础,不仅通过结构的弯矩变量解决了不均匀沉降的问题,同时箱式基础能够均布上部锅炉本体向下传递的荷载。通过对施工方案进行优化和相应的计算,并在施工过程中进行有效的质量管控,钢筋工程原材共取样48组,合格48组,合格率100%,机械连接取样101组,合格100组,合格率100%。模板工程在拆模后混凝土垂直度控制在4mm,表面平整度控制在3mm,角线顺直度控制在4mm,符合清水混凝土结构外观尺寸偏差标准。混凝土浇筑完成后实测温度统计得出混凝土表面、中心与底部最大温差为18℃,平均降温速率为1.2℃/d,大体积混凝土600℃/d性能报告全部合格,满足设计及相关规范要求,且锅炉基础外观观感质量达到清水混凝土施工工艺质量标准。

#### 参考文献:

- [1]《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204-2015
- [2]《钢筋混凝土用钢第一部分:热轧光圆钢筋》GB1499.1-2008
- [3]《钢筋混凝土用钢第二部分:热轧带肋钢筋》GB1499.2-2013
- [4]《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107-2016
- [5]《电力建设施工质量验收及评价规程 第1部分:土建工程》DL/T5210.1-2012
- [6]《大体积混凝土施工规范》GB50496-2009
- [7]《建筑施工手册》(第五版)