

DOI: 10.19666/j.rlfed.202501030

管道径向水平支撑板限位支架设计问题 分析与改进

吴晓俊¹, 王聪², 康豫军¹, 刘鸿国³, 陈旭东¹, 董雷¹,
任延南⁴, 王建⁴, 李楠林¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华能铜川照金煤电有限公司, 陕西 铜川 727104;

3.国能神福(石狮)发电有限公司, 福建 石狮 362712;

4.华能国际电力股份有限公司丹东电厂, 辽宁 丹东 118300)

[摘要] 新建燃煤机组参数高、容量大, 重要的长距离大口径管道因为参数高而膨胀量较大, 管道支吊架的设计尤为重要。某电厂2×660 MW超超临界机组主蒸汽管道刚性吊架三角架斜撑屈曲失效、管道下沉近130 mm。对管道支吊架进行了全面检查, 并对超静定三角架结构进行了受力及斜撑压杆稳定性分析, 分析结果认为径向水平限位间隙设计错误导致刚性吊架三角架斜撑屈曲失效及管道下沉, 恒力吊架恒定度较大进一步造成斜撑损坏。研究不仅分析了管道支吊架的设计缺陷, 还提出了优化限位间隙的工程解决办法, 制定并实施了涉及水平极限调整和管道提升的整改方案, 成功地将管道恢复到设计状态并解决了问题。该问题在大型机组基建工程中有很强的代表性, 应该引起设计人员的重视。

[关键词] 管道; 三角架; 斜撑屈曲; 径向水平限位; 间隙

[引用本文格式] 吴晓俊, 王聪, 康豫军, 等. 管道径向水平支撑板限位支架设计问题分析与改进[J]. 热力发电, 2025, 54(10): 168-174. WU Xiaojun, WANG Cong, KANG Yujun, et al. Design issues of radial horizontal support plate limiting brackets of pipes: analysis and improvement[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(10): 168-174.

Design issues of radial horizontal support plate limiting brackets of pipes: analysis and improvement

WU Xiaojun¹, WANG Cong², KANG Yujun¹, LIU Hongguo³, CHEN Xudong¹, DONG Lei¹,
REN Yannan⁴, WANG Jian⁴, LI Nanlin¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Huaneng Tongchuan Zhaojin Coal and Power Generation Co., Ltd., Tongchuan 727104, China;

3. CHN Energy Shenfu (Shishi) Power Generation Co., Ltd., Shishi 362712, China;

4. Dandong Power Plant, Huaneng International Power Co., Ltd., Dandong 118300, China)

Abstract: With the increase in parameters and capacity of newly built coal-fired units, the expansion of critical long-distance and large-diameter pipelines due to high parameters becomes more significant, making the design of supports and hangers particularly important. In a case involving a 2×660 MW ultra-supercritical unit, the diagonal brace of a rigid hanger tripod supporting the main steam pipeline buckled, resulting in a pipeline subsidence of nearly 130 mm. A comprehensive inspection of the pipeline supports and hangers was conducted, along with mechanical analysis of the statically indeterminate tripod structure and stability analysis of the diagonal brace. The study concluded that the failure of the diagonal brace and the pipeline sinking were primarily caused by an incorrect design of the radial horizontal restraint gap. Additionally, the excessive constant force of the constant hanger also contributed to the damage of the diagonal brace. This research not only analyzed the design flaws of the pipeline supports and hangers, but also proposed an engineering solution to optimize the restraint gap, which was validated

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ22-H103)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H103)

第一作者简介: 吴晓俊(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为管道支吊架优化设计与调整、管道振动分析等, wuxiaojun@tpri.com.cn.

on-site. A rectification plan involving horizontal limit adjustment and pipeline lifting was developed and implemented, successfully restoring the pipeline to its designed state and resolving the issue. This problem is highly representative in the construction of large-scale power units and should draw the attention of designers to avoid similar issues in future projects.

Key words: pipe; tripod; sway rod bending; radial horizontal restraint; gap

近年来，新建燃煤机组的重要的大口径管道如主蒸汽管道、高温再热蒸汽管道因为参数高、管线长引发的安全问题频发^[1-5]，这已引起设计、制造、安装及运营等相关单位的重视。支吊架装置是炉外管道系统的重要组成部分，起着承受管道重量、限制管道位移和控制管道振动的重要作用。支吊架的配置（状态、荷载、类型、位置）将直接影响管系的应力分布和大小，其性能和状态的好坏、承载是否合理都直接影响管道的使用寿命及安全运行^[6-7]。

某电厂 2×660 MW 超超临界机组投运初期锅炉侧 2 条主蒸汽管道编号为 11-001、12-001 的刚性吊架三角架均发生斜撑屈曲失效、悬臂梁倾斜根部撕裂、管道下沉将近 130 mm，对管道安全运行构成威胁（图 1）。三角架斜撑屈曲失效的原因可能有两方面：一是斜撑设计承载裕度不足，恒力吊架（恒吊）恒定度^[8-11]偏差引起荷载转移到刚性吊架上，造成刚性吊架斜撑失稳弯曲；二是管系其他支吊架异常造成刚性吊架严重超载使斜撑弯曲变形。

项目组对管系支吊架进行了全面细致检查，对超静定三角架结构进行了受力分析，并对斜撑进行压杆稳定性分析，发现该产生问题的根本原因并进行整改。



图 1 管道下沉及刚性吊架三角架斜撑弯曲失效
Fig.1 Pipe sinking and rigid hanger tripod sway bending

1 支吊架检查

主蒸汽管道材质为 A335P92，规格为 $\phi 490 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$ ，设计温度 610 °C，设计压力 29.4 MPa，管道上支吊架的布置如图 2 所示，部分支吊架的荷载及位移见表 1。对管道支吊架进行了全面检查发现，液压阻尼、弹簧吊架、恒力吊架等均无卡死、脱载等问题，但刚性吊架下方 11-002、12-002 号 X 向水平支撑板限位支架冷态径向间隙为 2 mm，热态无间隙，管道及管夹径向热膨胀约 8 mm，热态时管道径向将被限位梁夹死，管道垂直方向热位移被部分约束。

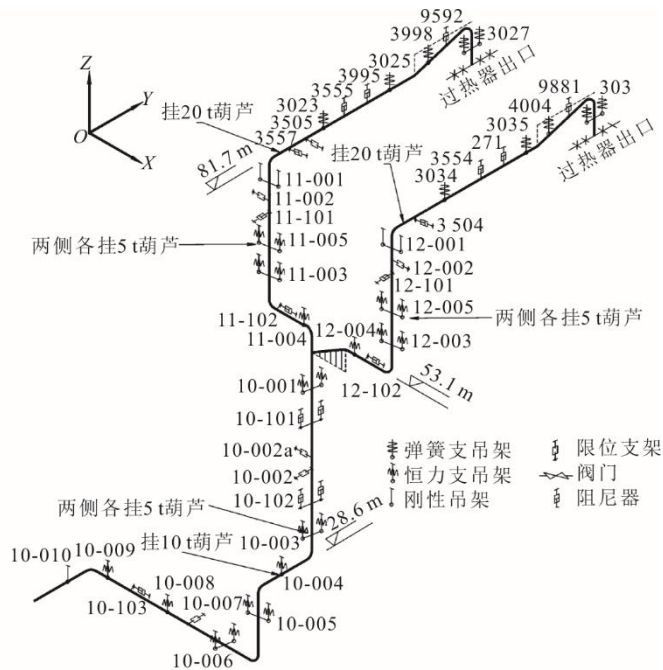


图 2 管道支吊架布置
Fig.2 Pipe hanger configuration

表 1 部分支吊架的载荷位移

Tab.1 Load-displacement of partial supports and hangers

支吊架编号及型式	载荷/N		热位移/mm		
	结构	工作	ΔX	ΔY	ΔZ
11-001/Z 向限位	176 860	32 282	40	-190	0
11-002/X 向限位	132 340	129 402	0	-151	-60
11-005/立管恒力吊架	119 147	70 000	-32	-135	-83
11-003/立管恒力吊架	133 062	90 000	-135	-79	-151
11-004/单恒力吊架	54 430	38 878	-129	-39	-182
12-001/Z 向限位	191 742	40 853	-5	-180	0
12-002/X 向限位	45 266	44 232	0	-152	-60
12-005/立管恒力吊架	119 147	70 000	5	-136	-83
12-003/立管恒力吊架	143 611	90 000	9	-80	-151
12-004/单恒力吊架	87 415	62 440	-59	-36	-151
10-001/立管恒力吊架	268 294	191 132	-63	-17	-190
10-002a/X 向限位	349 922	345 810	0	-4	-223
10-002/Y 向限位	89 633	86 863	33	0	-237
10-003/立管恒力吊架	347 991	246 367	153	6	-280
10-004/单恒力吊架	117 229	83 735	290	-44	-309
10-005/立管恒力吊架	141 085	100 848	293	-79	-300
10-006/横担恒力吊架	151 564	105 435	277	-82	-320

2 超静定三角架受力分析

图 3 为三角架结构的受力分析模型，悬臂梁 A 点固定，斜撑 B、C 点铰接。

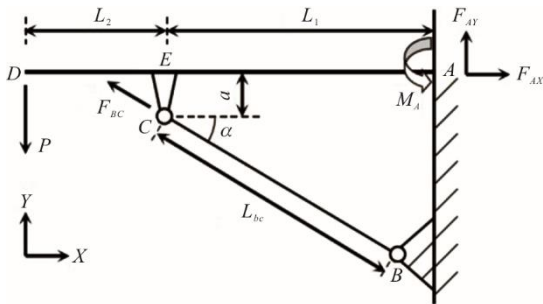


图 3 三角架结构受力分析模型
Fig.3 Stress analysis model for the tripod

该结构为一次超静定结构，需要增加一个变形协调方程。忽略 BC 杆的压缩量及刚性件 CE 的变形，则 E 点竖直位移为 0。无 BC 杆时，载荷 P 使悬臂梁 AD 的 E 点向下的位移（图 4）为^[12-13]：

$$\delta_{PE} = \frac{PX^2[3(L_1 + L_2) - X]}{6EI} = \frac{PL_1^2(2L_1 + 3L_2)}{6EI} \quad (1)$$

式中： δ_{PE} 为 E 点向下的位移，m；P 为载荷，N；E 为弹性模量，Pa；I 为悬臂梁 AD 的截面惯性矩， m^4 ；X 为悬臂梁 AD 上任一点到固定点 A 的距离，m，求 E 点竖向下的位移时 $X=L_1$ 。

BC 杆为二力杆，当悬臂梁 AD 仅承受二力杆作用

力 F_{BC} 时，E 点受到的作用力可等效为力 F_{BC} 和力矩 M_E ，该力和力矩使悬臂梁 AD 的 E 点向上的位移为：

$$\delta_{FME} = \delta_F + \delta_M = \frac{F_{BC}L_1^3 \sin \alpha}{3EI} + \frac{F_{BC}aL_1^2 \cos \alpha}{2EI} = \frac{F_{BC}L_1^2}{6EI} (3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha) \quad (2)$$

式中： δ_{FME} 的单位为 m； δ_F 为悬臂梁 AD 承受力 F_{BC} 时引起的 E 点向上位移，m； δ_M 为悬臂梁 AD 承受力矩 M_E 时引起的 E 点向上位移，m。

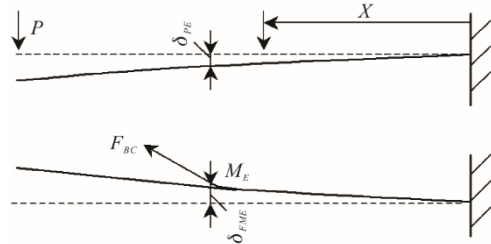


图 4 变形协调条件的挠度分析
Fig.4 Deflection analysis of deformation compatibility condition

变形协调方程、力及力矩平衡方程组如下：

$$\begin{cases} \delta_{PE} = \delta_{FME} \\ \frac{PL_1^2(2L_1 + 3L_2)}{6EI} = \frac{F_{BC}L_1^2}{6EI} (3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha) \\ \sum F_X = 0, \quad F_{AX} - F_{BC} \cos \alpha = 0 \\ \sum F_Y = 0, \quad F_{BC} \sin \alpha + F_{AY} - P = 0 \\ \sum M_C = 0, \quad PL_2 + L_1 F_{AY} + M_A - a F_{AX} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\sum F_X$ 为悬臂梁 AD 所承受的 X 向力之和； $\sum F_Y$ 为悬臂梁 AD 所承受的 Y 向力之和； $\sum M_C$ 为以点 C 为旋转中心，悬臂梁 AD 所承受的力矩之和； F_{AX} 为悬臂梁 AD 固定点 A 承受的 X 向支反力，N； F_{AY} 为悬臂梁 AD 固定点 A 承受的 Y 向支反力，N； M_A 为悬臂梁 AD 固定点 A 承受的支反力矩，N·m。

求解的结果如下：

$$\begin{cases} F_{BC} = \frac{P(2L_1 + 3L_2)}{3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha} \\ F_{AX} = \frac{P(2L_1 + 3L_2) \cos \alpha}{3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha} \\ F_{AY} = \frac{-3P(L_2 \sin \alpha - a \cos \alpha)}{3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha} \\ M_A = \frac{PL_1(L_2 \sin \alpha - a \cos \alpha)}{3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha} \end{cases} \quad (4)$$

3 斜撑压杆稳定性分析

两端铰接细长压杆临界力的计算公式为式(5)，

该式亦称欧拉公式^[12]。

$$F = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (5)$$

式中： F 为压杆载荷，N； L 为压杆长度，m。

若不同平面内抗弯刚度 EI 不同，则以最小值代入计算。由式(5)得压杆的应力为：

$$\sigma = \frac{\pi^2 EI_0}{L^2 A} \quad (6)$$

式中： σ 为应力，Pa； A 为压杆截面积， m^2 ； I_0 为压杆横截面的最小形心惯性矩， $I_0 = Ai^2$ ； i 为压杆截面的最小惯性半径，m。

令 $\lambda = L/i$ ，得：

$$\sigma = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (7)$$

式中：无量纲的量 λ 为压杆的柔度或细长比。

欧拉公式是由挠曲微分方程导出的，材料服从胡克定律是微分方程的基础，只有临界应力小于屈服极限时欧拉方程才适用，即：

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_s \\ \lambda \geq \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： σ_s 为材料屈服强度。

即压杆柔度大于 $\pi\sqrt{E/\sigma_s}$ 时需要进行稳定性分析。

材料为 Q235 角钢^[10]的许用应力 σ_s 为 235 MPa，弹性模量 E 为 206 GPa，由式(8)得角钢临界柔度 λ_p 为 93。

设计三角架结构几何参数为： $\alpha = 30^\circ$ ， $L_1 = 870$ mm， $L_2 = 460$ mm， $L_{BC} = 813$ mm， $a = 150$ mm。斜撑角钢型号为 75 mm × 8 mm，斜撑背靠背角钢的最小惯性半径应取 $x-x$ 惯性轴截面的惯性半径，查型钢表^[4]得惯性半径 $i_x = 2.28$ cm，单角钢截面积 $A = 11.5$ cm^2 。

该斜撑实际柔度 λ 为 35.7，小于临界柔度 93。因此，该斜撑满足压杆稳定性要求，应该进一步用胡克定律的材料屈服条件评估斜撑的安全性。

4 刚性吊架及斜撑承载计算与安全性评估

4.1 斜撑及刚性吊架可承受的最大载荷

背靠背组合角钢斜撑 BC 可承受的最大载荷为：

$$F_{BCmax} = A_{BC} \cdot \sigma_s = 2 \times 11.5 \times 10^2 \times 235 = 540.5 \text{ kN} \quad (9)$$

式中： A_{BC} 为 BC 背靠背组合角钢斜撑 BC 的横截面积。

由设计图查得，刚性吊架中心点离生根框架梁两端的距离比 $L_3:L_4$ 为 1:4（图 5）。由载荷分配关系及式(4)中的第 1 个式子得到该斜撑对应刚性吊架可承受的最大载荷为：

$$P_{max} = \frac{5F_{BCmax}(3a \cos \alpha + 2L_1 \sin \alpha)}{4 \cdot (2L_1 + 3L_2)} = \frac{5 \times 540.5 \times (3 \times 0.15 \cos 30^\circ + 2 \times 0.87 \sin 30^\circ)}{4 \times (2 \times 0.87 + 3 \times 0.46)} = 272.78 \text{ kN} \quad (10)$$

即刚性吊架载荷超过 272.78 kN 时斜撑将屈曲变形而损坏。以 11-001 号刚性吊架为例，设计冷态载荷为 P_a 为 126.33 kN，该三角架设计安全裕度约为 2.16。

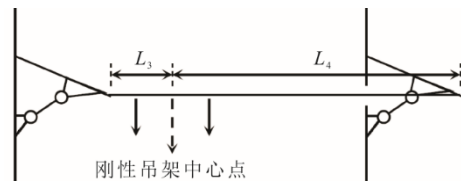


图 5 刚性吊架及生根框架梁结构示意图

Fig.5 Structural diagram of the rigid hanger and rooting beam

4.2 恒力吊架恒定度与三角架安全性的关系

图 2 中与刚性吊架相关的 10-006 号吊架以上，11-001、12-001 号吊架以下所有热位移向下的恒力吊架设计总载荷为 $P_{hz} = 1\ 148.84$ kN，见表 2。

表 2 主蒸汽管道与刚性吊架相关的 10-006 号之上恒力吊架载荷统计

Tab.2 Statistics of constant load on hanger 10-006 related to the main steam pipeline and rigid hanger

支吊架编号及型式	工作载荷/N
11-005/立管恒力吊架	70 000
11-003/立管恒力吊架	90 000
11-004/单恒力吊架	38 878
12-005/立管恒力吊架	70 000
12-003/立管恒力吊架	90 000
12-004/单恒力吊架	62 440
10-001/立管恒力吊架	191 132
10-003/立管恒力吊架	246 367
10-004/单恒力吊架	83 735
10-005/立管恒力吊架	100 848
10-006/横担恒力吊架	105 435
合计	1 148 835

由恒定度的定义可知^[8], 恒力吊架恒定度均为 $x\%$ 时, 转移到刚性吊架的载荷为:

$$P_h = \frac{1}{2} P_{hc} x\% \quad (11)$$

刚性吊架冷态总荷载为:

$$P_c = P_h + P_a \quad (12)$$

式中: P_a 为冷态安装荷载。

《火力发电厂汽水管道与支吊架维修调整导则》(DL/T 616—2023)^[8]规定恒力吊架恒定度应小于 6%, 恒吊恒定度与刚性吊架总荷载、三角架斜撑荷载的安全性评估结果见表 3。当管系中恒力吊架恒定度大于 26% 时会发生因荷载转移至刚性吊架而导致三角架斜撑超载而屈曲失效。

表 3 恒力吊架恒定度与三角架安全性的关系
Tab.3 Relationship between the force deviation of the constant hanger and the safety for the tripod

恒定度/%	刚性吊架总荷载 P_c /kN	斜撑荷载 F_{BC} /kN	斜撑是否安全
6	160.80	318.62	安全
10	183.77	364.13	安全
20	241.21	477.94	安全
26	275.68	546.24	不安全

5 管道下沉及三角架斜撑损坏原因分析

《管道与支吊架 第一部分 技术规范》(GB/T 17116.1—2018) 第 6.5.5 条^[15]: “限位装置和导向装置在预定约束方向上的冷态间隙一般不超过 2 mm。对于在管道径向两侧约束装置和导向装置, 其冷态间隙还应计及管道径向热膨胀量。” 该立管径向水平限位设计冷态安装总间隙为 2 mm, 设计单位未考虑管道径向热膨胀量, 是对标准的误读。已在多家电厂发现了相似的设计安装问题, 造成严重的安全隐患, 应引起电厂和设计单位高度重视。

从现场支吊架检查和第 3 节受力分析可知, 立管径向水平限位安装间隙过小, 未考虑管道及管夹的径向热膨胀, 热态时水平限位梁将管道夹死, 停机初期管道冷缩, 导致将刚性吊架三角架下拉, 斜撑屈曲、悬臂梁根部撕裂、管道下沉。

由表 3 可知, 刚性吊架下方有多组恒力吊架, 如果恒力吊架质量较差, 恒定度较大时恒吊荷载转移到刚性吊架上, 均会对刚性吊架三角架及管道的安全构成威胁^[5,9,16-18]。因此, 支吊架检查和调整非常重要^[19-20]。

6 三角架斜撑屈曲及管道下沉情景重构

主蒸汽管道 (图 6) 材质为 A335P92, 该竖直线段管道长度 8.3 m, 总膨胀量约 62 mm。刚性吊架三角架斜撑屈曲及管道下沉的过程如下。

1) 启动过程 管道逐渐升温, 水平限位处管道向下自由膨胀约 30 mm 后, 管道径向膨胀至水平限位梁夹紧管道而停止向下位移, 致使水平限位以上管道向上膨胀, 刚性吊架向上顶三角架。当刚性吊架下压管道的载荷大于水平限位夹持管道的载荷时, 将挤压管道向下移动约 30 mm, 进入稳定运行状态。

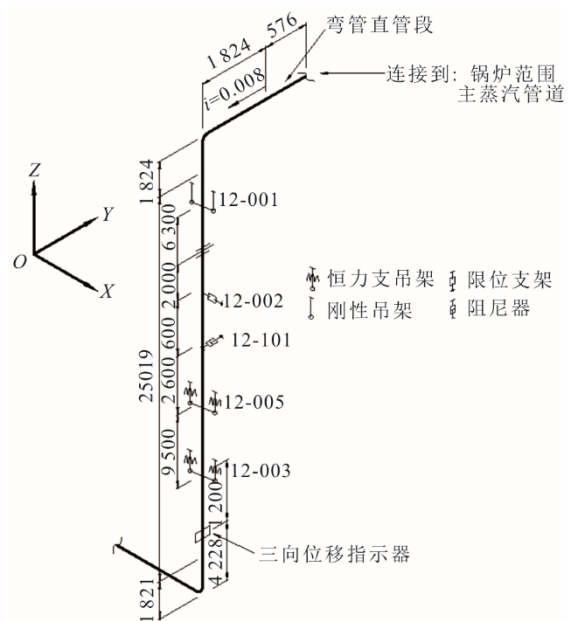


图 6 主蒸汽管道局部图 (mm)
Fig.6 Partial diagram of the main steam pipeline (mm)

2) 停机过程 管道逐渐降温, 限位支架夹紧管道, 该段管道收缩约 30 mm, 刚性吊架下拉三角架使斜撑超载屈曲变形, 温度较低时水平限位松开管道, 管道向上收缩至冷态, 此阶段恒吊荷载转移到刚性吊架上, 也促进了斜撑弯曲变形。至此一次循环结束。

机组的每次启停使上述过程形成“棘轮效应”, 数次循环后三角架屈曲变形和管道下沉不断累积。如果仅从现象判断, 认为三角架强度不够而对其进行加固, 会由于刚性吊架过载而损坏管道卡块, 引发管道更严重的损伤或事故。

7 管道整体提升及水平限位整改

由于管线较长且管道质量大, 管道恢复至原设

计位置难度很大,有设计单位提出采用多台巨型吊车同步提升的设想,还有施工单位提出割管、分段提升的解决方案。综合比较了各种方案的经济性和安全性后,制定了用数组手拉葫芦提升管道到设计位置的方案。

7.1 手动葫芦配置

与刚性吊架相关 10-006 号吊架以上,11-001、12-001 号吊架以下所有热位移向下的恒力吊架设计总载荷为 $P_{hz}=1\ 148.84\ \text{kN}$,按照 10% 恒定度保守计算,提升管道时恒吊总荷载转移量为 114.9 kN,卸载刚性吊架的荷载为 $2\times 126.3\ \text{kN}$,总荷载 367.5 kN。考虑到多组葫芦提升管道的不同步性,葫芦总载荷应有约 2 倍的载荷裕度,因此,确定葫芦总载荷为 700 kN。手动葫芦选点和配置应遵循上部载荷略大、分散布置的原则,葫芦分布位置见图 2。同时,根据管道热位移方向调整 11-002、12-002 号 X 向水平径向限位梁,使冷态总间隙为 12 mm。

7.2 管道提升及刚性吊架生根梁改造

在管道挂好葫芦并承担管道全载荷的情况下,用 6 组共 9 只手动葫芦同步整体提升管道,并防止葫芦超载;同时密切关注管道上所有恒力吊架承载情况,防止管道提升过程中恒力吊架因为上位移过多造成脱载;将管道提升到设计位置后完成框架梁及三角架的整改焊接;同步缓慢卸载所有手动葫芦,检查管道恢复至正常状态,改进后刚性吊架三角架斜撑如图 7 所示。



图 7 改进后刚性吊架三角架斜撑
Fig.7 The improved rigid hanger triangle sway

8 结 论

1) 通过支吊架检查和刚性吊架三角架受力分

析找出了三角架斜撑屈曲失效和管道下沉的原因,即水平限位间隙的设计未考虑管道径向热膨胀,热态时水平径向限位夹死管道是三角架斜撑屈曲失效的主要原因,并通过情景重构说明了三角架的损坏过程;其次,恒力吊架恒定度较大也对斜撑损坏有促进作用。对管道支吊架服役状态中常见的此类问题,不应仅从现象判定为三角架强度不够而对其进行加固,会导致问题隐藏而引发管道更严重的损伤或事故,应引起电厂和设计单位的高度重视。

2) 所得出的超静定三角架受力计算公式可用于各种型钢三角架的设计、校核计算。

3) 改造方案加大了水平限位的间隙,并适当加强了生根三角架强度。较长管道整体提升方案的实施过程中还应考虑恒吊吊杆收紧调整及多组吊装葫芦同步提升管道,葫芦总载荷应留有所需荷载 2 倍以上的安全裕度。方案实施后管道冷热态位置及其生根结构恢复到正常状态,有利于主蒸汽管道全寿命周期安全运行。同时,该案例说明了电厂进行管道支吊架检查和调整的必要性。

[参 考 文 献]

- [1] 黄军军,薛家春,林磊鑫,等.超超临界二次再热机组猫爪上翘的原因分析及建议[J].电力勘测设计,2024(5):64-67.
HUANG Junjun, XUE Jiachun, LIN Leixin, et al. Analysis and suggestion on the raising cat's claw in ultra-supercritical secondary reheat unit[J]. Electric Power Survey & Design, 2024(5): 64-67.
- [2] 林庆宇,李勇军,黄庆华,等.350 MW 超临界机组高温再热蒸汽管道下沉原因分析及治理[J].锅炉技术,2024(3):53-59.
LIN Qingyu, LI Yongjun, HUANG Qinghua, et al. Cause analysis and treatment of high temperature reheat steam pipe sinking in 350 MW supercritical unit[J]. Boiler Technology, 2024(3): 53-59.
- [3] 冯亦武,杨昆山,景岗呈.某电厂主蒸汽管道下沉原因分析及治理措施[J].东北电力技术,2020,41(5):10-13.
FENG Yiwu, YANG Kunshan, JING Gangcheng. Research on cause analysis and treatment measure of main steam pipe sinking in thermal power plant[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(5): 10-13.
- [4] 王彪,唐远富,秦旭明,等.某电厂高温再热蒸汽管道下沉原因分析及治理[J].湖南电力,2020,40(2):33-36.
WANG Biao, TANG Yuanfu, QIN Xuming, et al. Cause analysis and treatment for sinking of high temperature reheat steam pipe line in a power plant[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(2): 33-36.
- [5] 康豫军,安付立,吴晓俊,等.弹簧支吊架荷载变化系数的选取与汽水管支吊架优化设计[J].热力发电,2024,53(2):192-198.
KANG Yujun, AN Fuli, WU Xiaojun, et al. Selection of load variation factor of spring hanger and optimization design of steam/water pipe support and hanger[J].

- Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 192-198.
- [6] GHAFFAR M H A, HUSIN S, BAEK J E. Application of displacement monitoring system on high temperature steam pipe[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 257(1): 1-8.
- [7] 李英, 唐璐. 某 300 MW 机组低温再热蒸汽管道异常膨胀原因分析及防治[J]. 发电设备, 2019, 33(2): 138-141. LI Ying, TANG Lu. Cause analysis and treatment on low-temperature reheater steam piping abnormal expansion a 300 MW unit[J]. Power Equipment, 2019, 33(2): 138-141.
- [8] 火力发电厂汽水管道与支吊架维修调整导则: DL/T 616—2023[S]. 北京: 中国电力出版社, 2023: 7. Maintenance & adjusting guide for thermal power plant steam-water piping and support-hangers: DL/T 616—2023[S]. Beijing: Electric Power Press, 2023: 7.
- [9] 康豫军, 姚军武, 王必宁, 等. 恒力吊架恒定度对管系热位移影响的研究[J]. 热力发电, 2009, 38(5): 72-76. KANG Yujun, YAO Junwu, WANG Bining, et al. Study on the influence of load deviation in constant-forced hanging bracket upon piping's thermal displacement[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(5): 72-76.
- [10] 火力发电厂汽水管道设计规范: DL/T 5054—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016: 105. Code for design of steam/water piping of fossil-fired power plant: DL/T 5054—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016: 105.
- [11] 康豫军, 吴晓俊, 程勇明, 等. 恒力支吊架性能指标研究及标准修改建议[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 177-182. KANG Yujun, WU Xiaojun, CHENG Yongming, et al. Study on the performance index of constant supports and hangers and the modification suggestions of the standard[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 177-182.
- [12] 苟文选. 材料力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000: 1. GOU Wenxuan. Mechanics of materials[M]. Xi'an: Northwestern Poly Technical University Press, 2000: 1.
- [13] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2009: 77-78. TANG Yongjin. Pressure pipe stress analysis[M]. 2th ed. Beijing: China Petrochemical Press, 2009: 77-78.
- [14] 张玉龙, 马平. 新编材料速查速算手册[N]. 北京: 化学工业出版社, 2008(1): 448. ZHANG Yulong, MA Ping. New material quick search and calculation manual[N]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008(1): 448.
- [15] 管道支吊架第 1 部分: 技术规范: GB/T 17116.1—2018[S]. 北京: 中国出版社, 2018: 20. Pipe supports and hangers: part 1: technical specification: GB/T 17116.1—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018: 20.
- [16] 发电厂汽水管道应力计算技术规程: DL/T 5366—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 23-28. Technical code for stress calculating of steam/water piping in fossil fuel power plant: DL/T 5366—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2006: 23-28.
- [17] 电厂动力管道设计规范: GB/T 50764—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 104-114. Design code of power piping for power plant: GB/T 50764—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012: 104-114.
- [18] 工业金属管道设计规范: GB 50316—2000[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 74-81. Design code for industrial metallic piping: GB 50316—2000[S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 74-81.
- [19] 刘明, 郭延军, 何贵宽, 等. 火电厂汽水管道热胀位移异常综合评估及处理[J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(4): 256-261. LIU Ming, GUO Yanjun, HE Guikuan, et al. Comprehensive assessment and treatment on abnormal thermal expansion displacement of steam and water pipelines of thermal power plants[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2018, 54(4): 256-261.
- [20] 张伟江, 卫大为, 吴晓俊, 等. 某火电厂 1 000 MW 机组高温再热蒸汽管道热位移异常原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49(7): 432-434. ZHANG Weijiang, WEI Dawei, WU Xiaojun, et al. Cause analysis on abnormal thermal displacement of high temperature reheat steam pipelines of 1 000 MW units in power plant[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013, 49(7): 432-434.

(责任编辑 邓玲惠)