

电厂加热器解列后负荷飞升量的计算

封坤 王飞

中国能源建设集团西北电力试验研究院有限公司 陕西西安 710054

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16093

[摘要] 通过等效焓降法计算高压加热器 RB 试验后的负荷飞升量, 在高加 RB 试验前, 确定合适的负荷点, 既要确保试验过程中设备安全, 又给控制组态提供参考依据, 以便控制锅炉增减煤量。提高高加 RB 试验的成功率, 既能节省电厂宝贵的试运时间, 又能确保机组的安全性。

[关键词] 高加 RB 试验; 负荷飞升

The calculation of the load rise after HP heater off-line in power plants

FENG Kun WANG Fei

Northwest Electric Power Test Research Institute Co., Ltd. Of China Energy Engineering Group, Xi'an 710054

[Abstract] The load surge after the run back of the HP heater is calculated by the equivalent enthalpy drop method. Before the RB test of the HP heater, a suitable load point is determined to ensure the safety of the equipment during the test, and a reference be provided for the control configuration to control the coal in the boiler. Improving the success rate of the RB test of the HP heater, at the same time, the precious commissioning time of the power plant be saved.

引言:

火电厂在基建调试期间, 均要求进行高压加热器 RB 试验, 调试人员对高压加热器 RB 试验过程的理解局限于定性认识, 明确清楚机组负荷会升高, 但负荷将升至多少并无明确认识。部分在役也发生过高加解列事故, 解列前机组出力不等, 解列后负荷飞升率在 11-13%^{[1][2]}, 且从现象方面清晰描述事件过程。

本文从基本机理出发, 推导计算高压加热器解列后机组的负荷飞升情况, 以便于调试人员更深层次理解高压加热器 RB 试验过程。

1. 等效焓降法介绍及公式推导^[3]

在推导前, 将各抽汽回热加热器附属加热器以能级利用的方式划归至某级加热器, 即附属加热器产生的能量用于哪级加热器, 就将附属加热器因抽汽量的变化而引起的做功能力的变化归集到相应的某级加热器上, 如轴封加热器吸收的热量最终使 8 号加热器入水侧入口温度上升, 所以将轴封加热器归集到 8 号加热器。

为简化计算, 规定如下:

对于汇集式加热器

$$\tau_j = \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \quad (1)$$

$$q_j = h_j - \bar{t}_{j-1} \quad (2)$$

$$\gamma_j = \bar{t}_{sj+1} - \bar{t}_{j-1} \quad (3)$$

对于疏水放流式加热器

$$\tau_j = \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \quad (5)$$

$$q_j = h_j - \bar{t}_{sj} \quad (6)$$

$$\gamma_j = \bar{t}_{sj+1} - \bar{t}_{sj} \quad (7)$$

γ_j : 1kg 疏水在加热器 j 中的放热量[kJ/kg];

t_j : 加热器 j 的出口水焓值[kJ/kg];

h_j : 加热器 j 的抽汽焓值[kJ/kg];

\bar{t}_{sj} : 加热器 j 的抽汽焓值[kJ/kg];

τ_j : 1kg 水在加热器中的焓升[kJ/kg];

q_j : 1kg 加热蒸汽在加热器 j 中的放热量[kJ]

H_j : j 号加热器的等效焓降[kJ/kg];

a_{i-j} : j 加热器排除 1kg 的蒸汽, i 加热器的抽汽份额。

η_j : 加热器 j 的抽汽效率。

计算抽汽等效焓降应从凝汽器侧开始推导, 以上汽 660MW 机组为例, 推导如下:

1.1 8 号加热器等效焓降

假定 N₈ 加热器获得的热量 w_8 , 恰使其抽汽量减少 1kg, 则该排挤蒸汽返回汽轮机中继续做功, 其等效热降等于它的实际焓降。

$$H_8 = h_8 - h_n \quad (8)$$

$$\eta_8 = \frac{H_8}{q_8} \quad (9)$$

1.2 7 号加热器等效焓降计算:

假定 N₇ 加热器获得的热量 w_7 , 恰使抽汽减少 1kg, 这时进入 N₈ 的疏水也相应的减少 1kg, 因而疏水在 N₈ 中的放热量减少 γ_8 , 为补偿这个加热不足, N₈ 加热器抽汽将增加:

$$a_{8-7} = \frac{\gamma_8}{q_8} \quad (10)$$

剩余的 $1 - a_{8-7}$ 的排挤抽汽将直达凝汽器。因此, 第二

段抽汽的等效焓降为

$$H_7 = (h_7 - h_n) - a_{8-7}(h_8 - h_n) \\ = (h_7 - h_n) - \frac{\gamma_8}{q_8} H_8 \quad (11)$$

$$\eta_7 = \frac{H_7}{q_7} \quad (12)$$

1.3 6 号加热器等效焓降:

No6 加热器如获得热量 w_6 , 恰使其抽汽减少 1kg, 此 1kg 的蒸汽将通过不同途径回到凝汽器, 为使凝结水量不变, 该 1kg 的凝结水通过凝泵又回到系统, 从而使经过 No7 和 No8 加热器的凝结水增加 1kg。

该排挤抽汽的一部分将做功到凝汽器, 另一部分将做功到 No7 和 No8 后加热凝结水增加的 1kg 凝结水。

1kg 凝结水经过 No7 需要增加的抽汽量:

$$a_{7-6} = \frac{\tau_7}{q_7} \quad (13)$$

此 1kg 凝结水也同样流过 No8 加热器, No7 加热器的 a_{7-6} kg 的疏水也流进 No8 加热器, 放热 $a_{7-6}\gamma_8$, 所以, No8 加热器的抽汽量增加

$$a_{8-6} = \frac{\tau_8 - a_{7-6}\gamma_8}{q_8} = \frac{\tau_8}{q_8} - \frac{\tau_7\gamma_8}{q_7q_8} \quad (14)$$

因此, 6 段抽汽的等效焓降为

$$H_6 = (h_6 - h_n) - a_{7-6}(h_7 - h_n) - a_{8-6}(h_8 - h_n) \\ = (h_6 - h_n) - \frac{\tau_7}{q_7} H_7 - \frac{\tau_8}{q_8} H_8 \quad (15)$$

$$\eta_6 = \frac{H_6}{q_6} \quad (16)$$

1.4 5 号加热器的等效焓降:

5 号加热器获得热量 w_5 。恰好产生 1kg 的排挤抽汽, 产生的排挤抽汽将分配在后面的几个加热器中, 剩余的排挤抽汽将直达冷凝器, 各个加热器的分配份额如下:

因为排挤 1kg 的抽汽, No5 加热器排出的疏水也相应减少 1kg, 所以在 No6 加热器中的放热量将减少 γ_6 , 为补偿这部分热量, No6 加热器将多抽汽:

$$a_{6-5} = \frac{\gamma_6}{q_6} \quad (17)$$

排挤抽汽的剩余部分 $(1 - a_{6-5})$, 剩余的这些蒸汽经过不同途径最终都变凝结水汇集到凝汽器, 使凝结水增加 $(1 - a_{6-5})$, 因而 No7 加热器的抽汽将增加:

$$a_{7-5} = \frac{(1 - a_{6-5}) \tau_7}{q_7} \quad (18)$$

同理经过 No8 加热器的凝结水也增加 $(1 - a_{6-5})$, 但由 7 号至 No8 的疏水也增加了 a_{7-5} kg, 所以 No8 的抽汽量将增加:

$$a_{8-5} = \frac{(1 - a_{6-5}) \tau_8 - a_{7-5}\gamma_8}{q_8} \quad (19)$$

因此, 第五段抽汽的等效焓降为:

$$H_5 = (h_5 - h_n) - a_{6-5}(h_6 - h_n) - a_{7-5}(h_7 - h_n) - a_{8-5}(h_8 - h_n) \\ = (h_5 - h_n) - \frac{\gamma_6}{q_6} H_6 - \frac{\tau_7}{q_7} H_7 - \frac{\tau_8}{q_8} H_8 \quad (20)$$

$$\eta_5 = \frac{H_5}{q_5} \quad (21)$$

1.5 4 号的等效焓降

4 号加热器为除氧器, 除氧器汇集式加热器, 如获得热量 w_4 , 恰好使其抽汽量减少 1kg, 该排挤抽汽的一部分将到凝汽器, 其余部分将做功到 No5、No6、No7 及 No8 加热器上, 如同 No6 号加热器推导过程, 其等效焓降为:

$$H_4 = (h_4 - h_n) - \frac{\tau_5}{q_5} H_5 - \frac{\tau_6}{q_6} H_6 - \frac{\tau_7}{q_7} H_7 - \frac{\tau_8}{q_8} H_8 \quad (22)$$

$$\eta_4 = \frac{H_4}{q_4} \quad (23)$$

1.6 3 号加热器抽汽等效焓降

三号加热器获得热量 w_3 , 恰使其抽汽量减少 1kg, 该排挤抽汽将在除氧器、No5、No6、No7 及 No8 加热器上分配, 其余的将到达凝汽器, 其等效焓降为, 在计算三号加热器放热量时, 应用外置加热器的排汽算三号加热器的抽汽。外置加热器的换热量用在了锅炉里, 对整体机组的效率有所提高。

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \frac{\gamma_4}{q_4} H_4 - \frac{\tau_5}{q_5} H_5 - \frac{\tau_6}{q_6} H_6 - \frac{\tau_7}{q_7} H_7 - \frac{\tau_8}{q_8} H_8 \quad (24)$$

$$a_3 = \frac{\tau_3 - (a_1 + a_2)\gamma_3 - \tau_b}{q_3} \quad (25)$$

$$\eta_3 = \frac{H_3}{q_3} \quad (26)$$

由于外置冷却器存在会产生给水加热不足及给水带走热量两部分损失, 由外置冷却器存在, 给水加热不足产生的做功能力减少微乎其微, 所以, 仅考虑给水带走的热量部分的损失。

$$\Delta H = (t_{gs} - t_1) \eta_3 \quad (27)$$

三号加热器等效焓降为

$$H_3 = (h_3 - h_n) - \frac{\gamma_4}{q_4} H_4 - \frac{\tau_5}{q_5} H_5 - \frac{\tau_6}{q_6} H_6 - \frac{\tau_7}{q_7} H_7 - \frac{\tau_8}{q_8} H_8 - \Delta H \quad (28)$$

1.7 2 号加热器抽汽等效焓降

当 2 号高加获得 w_2 时, 该加热器排挤抽汽 1kg, 由于 2 号加热器是从再热冷段抽汽, 所以, 此排挤的 1kg 抽汽全部进入再热器, 2 号高加往三号高加的疏水同样减少 1kg, 三号高加需多抽部分蒸汽来弥补减少的疏水放热, 同时这部分蒸汽将流过外置冷却器与给水换热, 此部分热量将在锅炉内被应用, 减少给煤量, 但不影响汽轮机内的抽汽分布,

$$H_2 = h_2 + \sigma - h_3 + H_3 - \frac{\gamma_3}{q_3} H_3 \quad (29)$$

$$a_2 = \frac{\tau_2 - a_1\gamma_2}{q_2} \quad (30)$$

$$\eta_2 = \frac{H_2}{q_2} \quad (31)$$

1.8 1 号加热器抽汽等效焓降

由于 1 段抽汽位于冷再前, 当 1 号加热器吸收 w_1 热量后,

该加热器排挤 1kg 的蒸汽, 一部分用于 2 号加热器抽汽, 另一部分经过再热器吸收热量后, 重新返回汽轮机做功, 其等效焓降为:

$$H_1 = h_1 - h_2 + H_2 - \frac{\gamma_2}{q_2} H_2 \quad (32)$$

$$a_1 = \frac{\tau_1}{q_1} \quad (32)$$

$$\eta_1 = \frac{H_1}{q_1} \quad (33)$$

机组正常运行中的个各蒸汽损失已经存在, 不会因为高加解列而增加或减少多少, 所以, 此计算方法不考虑各蒸汽损失 (如阀杆漏气等)。

由上述公式可计算每个加热器解列后排出的蒸汽可做技术功的量,

$$W_t = H_1 \cdot m_1 + H_2 \cdot m_2 + H_3 \cdot m_3 \quad (34)$$

W_t 乘以机械效率及发电机效率, 就可计算出加热器解

列后可产生的电能,

$$P_z = \frac{W_t \cdot \eta_{jx} \cdot \eta_d}{3600} \quad (35)$$

σ : 1kg 蒸汽通过再热器获得的热量;

m_1 : 1 号高加解列前抽汽量 kg/s;

m_2 : 2 号高加解列前抽汽量 kg/s;

m_3 : 3 号高加解列前抽汽量 kg/s;

P_z : 高加解列后发电量增长值;

W_t : 技术功;

η_{jx} : 机械效率 0.99;

η_d : 发电机效率 0.99;

2. 计算分析

现以上汽 660MW 机组 100%、90%、75% 工况为例, 以 C++ 为工具进行计算, 100% 负荷工况参数如表 1 所示:

表 1 上汽 660MW 机组 100% 负荷时参数

抽汽压力 (MPa)	抽汽焓值 (kJ/kg)	加热器出口焓值 (kJ/kg)	加热器疏水焓值 (kJ/kg)
Pr8	0.0357	h8 2561.24	t8 290.6
Pr7	0.0876	h7 2714.9	t7 385.4
Pr6	0.1958	h6 2820.4	t6 485.3
Pr5	0.578	h5 3026.6	t5 644.1
Pr4	1.228	h4 3217.5	t4 790.3
Pr3	2.753	h3 3459.8	t3 985.6
Pr2	5.643	h2 3070.3	t2 1180.1
Pr1	7.898	h1 3149.4	t1 1296.6
pn	0.01	hn 2399.3	tb 41.1
外置冷却器进口焓值 (kJ/kg)		1296.6	外置冷却器出口焓值 (kJ/kg)
冷再与热再焓差 (σ) (kJ/kg)		594.8	三号加热器进口焓值 (kJ/kg)
m_1 (kg/s)	31.34	m_2 (kg/s)	45.93
		m_3 (kg/s)	31.33

计算结果如表 2 所示:

表 2 上汽 660MW 机组 100% 工况时各加热器抽汽等效焓值及抽汽效率

加热器等效焓降 (kg)	抽汽效率 η
H_8	161.94
H_7	303.33
H_6	401.86
H_5	586.88
H_4	744.76
H_3	929.67
H_2	1065.7
H_1	1037.88

由表 2 可见, 各加热器抽汽的等效焓值依次减小, 但 2 号加热器的等效焓值大于 1 号机的等效焓值, 这主要由于两个方面影响, 一方面由于 2 号加热器排出 1kg 的蒸汽全部进入再热器吸热, 吸热的工质较多, 吸收的热量自然多; 1 号加热器排挤蒸汽一部分要被用于 2 号加热器, 约占总蒸汽流量的 1/10, 进而进入再热器的工质变少, 总吸热量相应减少, 所以 2 号加热器的等效焓降略大于一号加热器抽汽等效焓值。

加热器的抽汽效率由高阶加热器到低阶加热器逐级减少, 这也证明了蒸汽的做功能力由高阶到低阶逐级减少。

将表一及表二参数带入式 35

$$P_z = \frac{(H_1 \cdot m_1 + H_2 \cdot m_2 + H_3 \cdot m_3) \cdot \eta_{jx} \cdot \eta_d}{3600} = 103.1 \text{ (MW)} \quad [4]$$

上汽 660MW 机组在 100% 负荷时, 高加解列瞬间负荷飞升 105MW, 占总负荷的 15.6%, 但当负荷上升后, 自动控制系统

会根据一定速率关小高压调门，进而减小进气量，减弱负荷上升量，减弱的程度取决于调门调节 PID 及调门本身特性，所以实际负荷的飞升量应略小于理论计算值。

值下降 490kJ/kg，导致锅炉平均吸热温度减小，吸热量增大，进而使整体循环效率下降，所以不建议在高加解列的情况下长期运行。

高加解列后，锅炉给水温度会下降 110℃左右，给水焓

90%负荷工况参数如表 3 所示：

表 3 上汽 660MW 机组 90%负荷时参数

抽汽压力 (MPa)		抽汽焓值 (kJ/kg)		加热器出口焓值 (kJ/kg)		加热器疏水焓值 (kJ/kg)	
Pr8	0.0357	h8	2566.4	t8	290.6	ts8	296.1
Pr7	0.0876	h7	2718.7	t7	372.6	ts 7	383.4
Pr6	0.1958	h6	2827.2	t6	475.7	ts 6	485.4
Pr5	0.578	h5	3032.9	t5	628.8	ts5	498.9
Pr4	1.228	h4	3226.2	t4	773.2	ts4	
Pr3	2.753	h3	3464.9	t3	959.8	ts3	821.6
Pr2	5.643	h2	3089.5	t2	1147.8	ts2	978.1
Pr1	7.898	h1	3170.4	t1	1288.3	ts1	1176.8
pn	0.01	hn	2411.3	tn	191.8		
外置冷却器进口焓值 (kJ/kg)			1261.1	外置冷却器出口焓值 (kJ/kg)			1288.3
冷再与热再焓差 (σ) (kJ/kg)			579.9	三号加热器进口焓值 (kJ/kg)			3001.3
m_1 (kg/s)	26.3	m_2 (kg/s)	38.7	m_3 (kg/s)	27.2		

各级抽汽等效焓值及加热器的抽汽效率的变化趋势与 100%负荷高加解列时一致，在此不重复叙述。

上汽 660MW 机组在 90%负荷时，高加解列瞬间负荷飞升 90.2MW，占总负荷的 15.1%，但当负荷上升后，调门会自动关小，减弱负荷上升，减弱程度快慢取决于调门调节 PID 及调门本身特性。

$$P_z = \frac{(H_1 \cdot m_1 + H_2 \cdot m_2 + H_3 \cdot m_3) \cdot \eta_{jx} \cdot \eta_d}{3600} = 90.2 \text{ MW}$$

75%负荷工况参数如下表：

表 4 上汽 660MW 机组 75%负荷时参数

抽汽压力 (MPa)		抽汽焓值 (kJ/kg)		加热器出口焓值 (kJ/kg)		加热器疏水焓值 (kJ/kg)	
Pr8	0.0357	h8	2578.2	t8	271.4	ts8	220
Pr7	0.0876	h7	2728.9	t7	360.9	ts 7	371.8
Pr6	0.1958	h6	2837.8	t6	455.8	ts 6	465.7
Pr5	0.578	h5	3042	t5	603.6	ts5	479
Pr4	1.228	h4	3238.7	t4	744.2	ts4	
Pr3	2.753	h3	3472.3	t3	918	ts3	787.7
Pr2	5.643	h2	3116.7	t2	1095.8	ts2	936.5
Pr1	7.898	h1	3199.2	t1	1203.7	ts1	1122.2
pn	0.01	hn	2438.6	tn	195.6		
外置冷却器进口焓值 (kJ/kg)			1203.7	外置冷却器出口焓值 (kJ/kg)			1231.3
冷再与热再焓差 (σ) (kJ/kg)			558.9	三号加热器进口焓值 (kJ/kg)			2985.2
m_1 (kg/s)	19.7	m_2 (kg/s)	29.3	m_3 (kg/s)	21.5		

$$P_z = \frac{(H_1 \cdot m_1 + H_2 \cdot m_2 + H_3 \cdot m_3) \cdot \eta_{jx} \cdot \eta_d}{3600} = 69.3 \text{ MW}$$

上汽 660MW 机组在 75%负荷时，高加解列瞬间负荷飞升 69.3MW，占总负荷的 14%，但当负荷上升后，调门会自动关小，减弱负荷上升，调节快慢取决于调门调节 PID 及调门本身特性。

本文通过理论计算，得出不同负荷点高压加热器解列后负荷的飞升量，由计算结果分析可知，在 86%时，高加解列，负荷最大值恰好达到额定负荷，当负荷大于 86%时，高加解列后的负荷将大于机组额定负荷，存在一定风险；当负荷小于 86%额定负荷时，高加解列后，最大负荷小于额定负荷，机组处于安全状态。所以，在进行 RB 试验时机组负荷点宜选在 85%左右。

由上述计算可见，随着机组负荷的减小，高加解列后负荷的飞升率逐步减小，在 90%时，原负荷及飞升负荷之和 683.3 达到 683.1MW 左右，已达到机组最大负荷，负荷飞升率为 15.1%；机组负荷在 75%时，高加 RB 后，负荷飞升量约 69.3MW，加上原负荷，总负荷约 564MW 左右，负荷飞升率为 14%。根据插值法计算得当原负荷在 86%时，高加解列后，原负荷及飞升负荷量之和为 660MW 左右。

参考文献：

[1] 刘宏禹《切除高加运行对 330MW 亚临界机组产生的影响研究》[J]. 晋控科学技术, 2023: 18-33.
 [2] 杜长华《国产 600MW 机组满负荷高加解列事故分析及应对策略》[J]. 机电信息, 2010: 138-141
 [3] 林万超《火电厂节能理论》[M] 西安交通大学出版社. 1994
 [4] 沈维道《工程热力学》[M]. 高等教育出版社. 1982

3. 总结