

# Solving the problem of large vibration of turbine shaft under the condition of cutting cylinder with zero output force

## 零出力改造切缸工况汽机轴振大问题解决

Zhang Liming, Wang Jianying, Han Yongqing, Sun Jie, Yu Shijie, Zhang Jianshe

张黎明, 王剑影, 韩永卿, 孙杰, 于世杰, 张建设

(State Power Investment Nanyang Thermal Power Co., Ltd., Henan, Nanyang 473000)

(国电投南阳热电有限责任公司, 河南 南阳 473000)

Summary: After the retrofit of the low pressure cylinder of #1 and #2 units in a 210MW power plant in Henan Province, the problem of shaft vibration under non-cutting cylinder working condition is solved, and the problem of shaft vibration under cutting cylinder working condition reappears. It is determined that the two leakage steam in the shaft seal of the high-pressure cylinder is reheated into the low-pressure cylinder, heating the stator causes the change of the temperature field of the low-pressure cylinder and its deformation, which results in the large vibration caused by the radial dynamic-static friction, and the large expansion difference of the low-pressure cylinder caused by heating the rotor, caused the axial static and dynamic rubbing finally caused #2 machine vibration big trip. The valve opening of the two-leakage pipeline is closed to reduce the amount of steam flowing back into the low-pressure cylinder, and the high limit of the differential expansion of the low-pressure cylinder is controlled. Based on the analysis of the causes of the abnormal temperature change of the seven pumps and the serrated continuous amplitude change of the shaft vibration curve, it is concluded that the vibration caused by the return of the inner two leakage steam into the low pressure cylinder for heating is worth using for reference, and the analysis of the axial rubbing is worth affirming.

**摘要:** 河南某电厂 210MW 机组, #1、2 机低压缸零出力改造后, 历经非切缸工况轴振大问题解决后, 切缸工况再现轴振大问题。排查判定是高压缸后轴封内二漏蒸汽返入低压缸内加热所致, 加热定子, 引起低压缸温度场及其变形量变化, 造成径向动静碰磨导致振动大, 加热转子, 引起低压缸胀差大, 造成轴向动静碰磨最终导致#2 机振动大跳闸。关小内二漏管路阀门开度减少返入低压缸蒸汽量, 控制低压缸胀差高限值以下, 成功解决轴振大问题, 确保了两台机切缸安全长周期运行。分析七抽温度异常变化、轴振曲线锯齿状持续波动幅值变化等成因, 判定内二漏蒸汽返入低压缸内加热引发振动的分析思路值得借鉴, 轴向碰磨的分析值得肯定。

Key words: Low pressure cylinder; zero output; cutting cylinder; temperature field; expansion difference; radial; axial; Rub; shaft vibration

**关键词:** 低压缸; 零出力; 切缸; 温度场; 胀差; 径向; 轴向; 碰磨; 轴振

## 0 引言

研究低压缸零出力改造存在叶片水蚀、叶片颤振及鼓风损失导致叶片超温的风险。本案例改造后低压缸零出力也即低压缸切缸运行(以下简称“切缸”)工况汽轮机轴振大问题解决, 值得借鉴。

## 1 概况

河南省某电厂, 2×210MW 供热机组, 2008 年投产。哈汽厂 C160/N210-12.75/535/535 型双缸双排汽机, 哈电 QFSN3-210-2 型水氢氢发电机。轴系有 6 个椭圆瓦, 其中#2 瓦为推力支持联合轴承。#1、2 瓦支承汽轮机高中压转子, #3、4 支承低压转子。两台机高压后轴封内二漏高温蒸汽(以下简称“内二漏”)管道设计接

至七抽管道，去七号低加，设计温度 279.1℃。额定采暖抽汽压力 0.325MPa 时中排温度 265.4℃，六、七抽温度 212.9℃、96.5℃。采暖压力 0.547Mpa 时中排温度 327.2℃。

2021 年 06、10 月分别完成#1、2 机低压缸零出力改造，于 2021.06.30 日、11.01 日改造后首次启动，在 2021.11.18 日、19 日分别完成#1、2 机切缸调试，12.23 日顺利完成两台机同时切缸试验。

非切缸工况运行初期，两台机均出现轴振大问题，历经运行中汽封间隙磨减、轴承座油档更换、轴瓦测振探头支架加固等，成功解决非切缸工况两台机轴振大问题。

两台机切缸调试、同时切缸试验期间振动等各项指标优良。切缸工况运行约 30 小时，两台机于 2021.12.25 日、26 日先后出现轴振大问题，特别是#2 机 25 日因振动大保护跳闸。

经过排查分析，判定是内二漏返入低压缸内加热所致，加热定子，引起低压缸温度场及其变形量变化，造成径向动静碰磨导致振动大，加热转子，引起低压缸胀差（以下简称“低胀”）大，造成轴向动静碰磨最终导致#2 机振动大跳闸。关小内二漏管路阀门开度减少返入低压缸蒸汽量，控制低压缸胀差高限值以下，成功解决轴振大问题，确保了两台机切缸安全长周期运行。

## 2 机组切缸情况及振动过程

### 2.1 振动发生前后两台机切缸情况

2021.12.21 日 10:50，#1 机投入切缸，至 23 日 21:30 因低胀达 7.5 mm 量程上限，退出切缸。

#2 机于 23 日 14:18 至 16:10 投、退切缸，完成两台机同时切缸试验。23 日 21:43，#2 机再投切缸，切缸运行时长约 30 小时后，因#3、4 瓦轴振大，于 25 日 3:38 退切缸，至 3:45，终因#3、4 瓦轴振大跳闸，于当天 19:51，#2 机恢复并网运行。

25 日 14:43，#1 机投切缸，至 26 日 23:20，切缸连续运行约 32.5 小时，因#1 机#3、4 瓦轴振大，#1 机退切缸，恢复常规工况。

### 2.2 #2 机切缸#3、4 瓦轴振大过程

表 1 #2 机振动大跳闸前后参数

序号	日期	时间	负荷	转速	低胀	真空	#1X	#2X	#3X	#4X	七抽温度	五段抽汽	采暖汽量	备注
1	2021.12.23	21:11	99.9	3000	4.3	-95.4	46.9	32.1	38.4	77.3	158.4	262	152	
2	2021.12.23	21:33	89.7	3000	4.3	-96.2	45.2	32.6	36.3	75.2	133.7	250.2	282.2	切缸
3	2021.12.24	19:04	99.5	3000	4.7	-98.5	40.5	32.3	33	68.6	230.2	281.5	358.9	
4	2021.12.24	21:49	103	3000	4.8	-98.5	41	32.5	33.3	68.9	233.5	273.2	377.8	
5	2021.12.25	1:03	106	3000	4.9	-98.5	39.6	27	36.6	42.4	235.4	267.5	378.9	#2轴振
6	2021.12.25	2:50	103	3000	5	-98.5	39.6	26.3	35	40.8	234	269.6	380.1	
7	2021.12.25	3:03	106	3000	5	-98.4	39.9	24.2	57.6	51.8	233.8	270	379.1	振动增大
8	2021.12.25	3:36	99.7	3000	5.1	-98.2	43.5	28.4	104.4	93	233.2	267.9	305.4	
9	2021.12.25	3:39	101	3000	5.1	-98.1	49	46.7	137	142	202.2	267.7	206.6	
10	2021.12.25	3:42	71.4	3000	5.2	-98.2	48	131.1	183	165	77	250.9	100.5	
11	2021.12.25	3:45	5.8	3000	5.2	-98.2	46.1	238	254.8	183	55	238	13.4	跳闸
12	2021.12.25	3:49	0.1	1679	5.4	-80.7	100.3	209.4	284.6	31	59.9	231.4	14	
13	2021.12.25	3:52	0.1	912	5.5	-57.6	94.8	73.7	312.7	191	93.2	230.9	14.6	
14	2021.12.25	4:57	0.1	0	5.3	-93.3	2.1	5.8	1.7	4.3	54	203.8	26.1	
15	2021.12.25	8:31	0.1	1186	4.7	-84.5	84	184.8	12.4	107	68.6	144.1	0	冲转
16	2021.12.25	14:01	0.1	1314	4.6	-98.8	86.5	254.7	27.5	62.4	38.2	56.3	0	冲转
17	2021.12.25	19:06	0.1	10.7	4.6	-77.2	13	4.9	10.8	12.6	62.4	62.5	0	冲转
18	2021.12.25	19:22	0.1	1644	4.2	-81.7	80	183.7	64.8	97.3	59.9	64.3	0	
19	2021.12.25	19:29	0.1	3000	4.1	-83.3	29.2	80.3	59.5	97.7	59.2	61.9	0	3000
20	2021.12.25	19:48	3.7	3001	4.2	-81.7	30.4	55.6	53.4	89.3	84	155.6	0	并网
21	2021.12.25	20:37	55.3	3002	4.4	-84.2	42.1	34	49	78.9	152.5	201.2	0	
22	2021.12.25	22:53	95.3	3001	4.3	-82.5	44.6	29	40.4	75.4	193.9	225.9	23.5	
23	2021.12.26	11:30	135	2998	4.4	-87.6	38.5	29.9	43.1	43.1	167.7	266.7	278.7	
24	2021.12.26	11:09	131	3000	4.5	-98.3	38.1	31.6	44.2	75.4	47.6	273.8	294.6	<76

见表 1 23 日 21:43，低胀 4.3 mm，#2 机投切缸运行振动稳定，24 日 21:49 电负荷 103MW，采暖供汽量 377.8t/h，五抽温度 273.2℃，真空-98.5KPa，低胀 4.8 mm，#3、4 瓦 X 轴振:33.3、68.9 μm。24 日 23:00 时低胀 4.8 mm，#4 瓦轴振有下降过程，至 25 日 02:50 低胀 5 mm，#3、4 瓦 X 轴振 35、40.8 μm，25 日 03:03，负荷 106MW，低胀 5 mm，#3、4 瓦轴振有增大趋势，调整旁路冷却蒸汽流量 15t/h 至 30t/h，机组减负荷至 100MW，25 日 03:36 时#3、4 瓦 X 轴振增大至 104.4、93 μm，25 日 03:38 退切缸，25 日 03:39 时低胀 5.2 mm，#3、4 瓦 X 轴振增大至 137、142.4 μm，#4 瓦最先达峰值，开大中排蝶阀开度减少供热抽汽量，并逐步减电负荷，至 25 日 3:45 低胀 5.2 mm，#3、4 瓦 X/Y 轴振:254/238 μm、183/102 μm，轴振大保护跳闸。机组恢复过程中，因极热态冲转蒸汽温度稍微偏低，前两次冲转皆因振动大不成功，至 25 日 19:48 时#2 机恢复并网运行。

### 2.3 #1 机切缸#3、4 瓦轴振大过程

25 日 14:10，#1 机常规工况，负荷 125.7MW，低胀 4.9 mm，#3、4 瓦 X 轴振:76.2、61.7 μm、真空-98.3KPa，采暖抽汽量 241.8t/h，五、六、七抽温度 216.8℃、130.2℃、39℃。

25 日 14:43，#1 机投切缸，负荷 106.4MW，低胀 4.8 mm，#3、4 瓦 X 轴振:79.3、60.4 μm、真空-98.5KPa，采暖抽汽量 300.9t/h，五、六、七段抽汽温度 236℃、65.5℃、149.5℃。

26 日 21:00 时#3、4 瓦轴振有增大趋势，21:32，#1 机负荷 99.6MW，#3、4 瓦 X 轴振:118.1、108.4 μm。通过降真空、减负荷，至 26 日 23:16 振动相对稳定，负荷 90MW，#3、4 瓦 X 轴振:38、42.1 μm，至 26 日 23:20，为了避免轴振大，退切缸，恢复常规工况。

26日06:57, #1机负荷94.1MW, 低胀达7.5mm, 至17:22分, 低胀超量程指示值显示-6mm, 经过降真空、降负荷、退切缸等调整, 至27日00:46, 低胀恢复正常指示7.5mm。

### 3 原因分析

切缸工况运行约30小时两台机均发生#3、4瓦轴振大问题, 从非切缸、切缸工况、两台机切缸试验等过程, 完全排除转子动不平衡、切缸改造系统设计、安装缺陷等导致振动的可能性, 也排除了防止叶片水蚀进行的叶片喷涂不均匀或者运行中涂层脱落导致质量不平衡引起振动的可能。

DN400旁路冷却蒸汽管道按照0.325MPa, 260℃参数计算最大旁路冷却蒸汽量约35t/h, 振动发生前, 两台机旁路冷却蒸汽量稳定均<25t/h。低压转子各级动叶自带围带, 且次、末级动叶均有拉筋, 完全排除因小容积蒸汽流量工况颤振引发振动的可能。

末端低负荷喷水系统改造增加减温水雾化喷嘴, 确保均匀喷水、减温的同时, 杜绝局部喷水过量水蚀加剧等问题。运行控制末级叶片最高温度测点温度约60℃, 为此减温水量调整控制在10t/h以内, 对比调试期间喷水调节阀全开喷水量约25t/h的情况, 已排除减温喷水导致振动的可能。

采集运行参数分析, 排除了机组负荷、汽缸总胀、高压缸胀差、轴向位移、主再热蒸汽参数、汽封温度、真空、排汽温度、润滑油温等等参数与振动的关联性, 振动原因排查陷入困境, 难以定论。

深入排查发现, 一是两台机七抽温度异常变化, 非切缸工况七抽温度低负荷时高, 高负荷时低, 而切缸工况七抽温度均>230℃, 如#1机最高达238℃, 二是切缸振动时#2机低胀仅5mm, #1机达低胀探头7.5mm量程以上, 超量程而显示值为-6mm。

针对两台机七抽温度异常变化原因分析如下: 非切缸工况, 低压缸进汽, 七抽蒸汽和内二漏混合, 因低负荷时七抽蒸汽压力低、量小, 所以二者混合后提高了七抽温度, 而高负荷时七抽蒸汽压力高、量大, 则二者混合后的蒸汽温度相对就较低。切缸工况, 低压缸不进汽, 则, 仅有内二漏经七抽管道返入低压缸内, 所以七抽温度异常升高, 实际指示的是内二漏温度。

针对#1机低胀大超量程问题分析, 汽封温度已控制稳定在约140±15℃较低值, 旁路冷却蒸汽量及末端喷水量调整, 确保控制末级叶片最高温度测点温度约60℃, 杜绝了低压缸内鼓风损失发热问题, 判定中排温度增高和内二漏返入低压缸内加热是低胀增大的要因。采暖压力高限时设计中排温度327.2℃较额定压力时265.4℃中排温度增高约60℃, 而内二漏较七抽温度高约180℃, 所以内二漏返入低压缸内加热对低胀影响程度更大。

针对#1机较#2机低胀大问题, 经热工专业测量比对两台机低胀测量回路前置器输出间隙电压与低胀值线性关系, 判定是#2机低胀表计测量误差所致指示偏小约2.5mm。

排查改造后机组初始启动过程等参数历史曲线发现, 一是#3、4瓦轴振幅值随七抽温度异常变化而变化(见图1), 二是持续稳定工况后的变工况易导致#3、4瓦轴振曲线出现持续的锯齿状波动现象, 如图2振动幅值变化约13μm, 三是如#1机#3、4瓦轴振历史曲线, 存在阶跃性振动幅值突降的情况(见图2)。以此判定轴振大是内二漏返入低压缸内加热所致, 加热定子, 引起低压缸温度场及其变形量变化, 造成径向动静碰磨导致振动大, 加热转子, 引起低胀大, 进一步造成轴向动静碰磨最终导致#2机振动大跳闸。

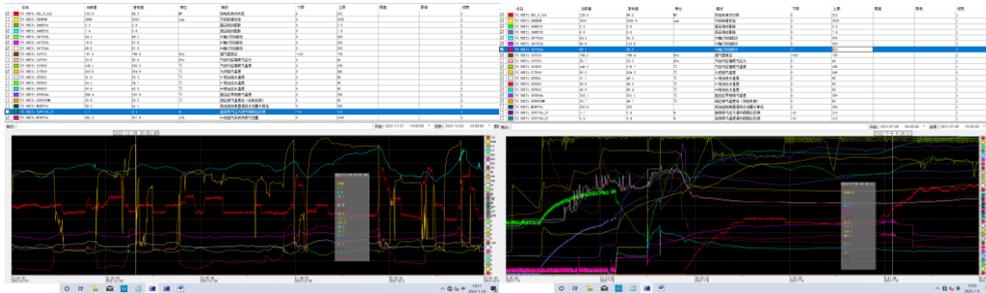


图1 七抽温度异常变化与#3、4瓦轴振变化相关性

图2 #3、4瓦轴振曲线锯齿状持续波动及阶跃性突降

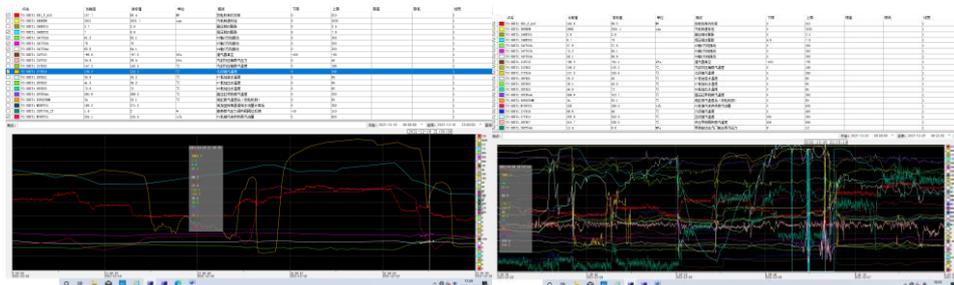


图3 #3、4瓦轴振曲线锯齿状持续波动幅值减小 图4 #1机#3、4瓦轴振波动时低胀-6，五抽温度303℃

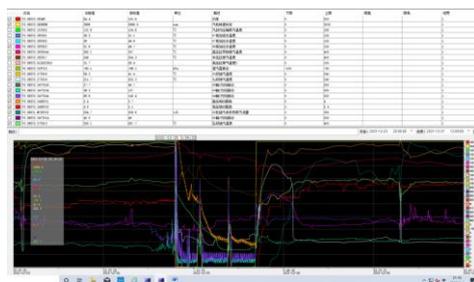


图5 #2机轴振大跳闸前#4瓦轴振达峰波动过程

如图2，从2021.07.08日机组启动到09日09:26负荷99MW，七抽温度基本一直在上涨，低胀增大，#3、4瓦振动也增大。判定是内二漏高温蒸汽返入低压缸内部，加热定子，引起低压缸温度场及其变形量变化，造成径向动静碰磨导致振动大，同时高温蒸汽加热转子带来低胀增大。机组加负荷过程七段抽汽温度有下降的拐点，也是缸体温度场变化过程，带来持续接触碰磨突然脱离振动降低并稳定在较低值的过程，所以09日10:57有#3、4瓦轴振同时出现阶跃性振动幅值突降（#3X、#4X分别下降20、15 $\mu\text{m}$ ）的过程，对应此区间，也是#6、7低加温升建立的过程，说明低加进汽加热了，则更多的内二漏来汽量分流到低加，所以低胀增大趋势也趋于平缓。这也是图1所示非切缸与切缸工况切换过程等，七抽温度变化剧烈的过程中对应#3、4瓦轴振波动的要因。由于温度场变化带来缸体变形导致动静接触碰磨，只有到缸体变形消失或磨出间隙，碰磨脱离振动才消失，所以#3、4瓦轴振曲线锯齿状持续波动时间比较长，如图2持续约1.5小时。

查看2010年至今两台机A、B级检修低压缸解体报告，历次都有低压缸正反旋3、4、5级动叶隔板叶顶封、隔板汽封磨损严重的记录，低压缸隔板挂耳压板螺钉、隔板中分面连接螺栓断裂（即便是材质更换为35CrMo合金材质依然会断裂）等，究其原因，判定依然是内二漏来汽返入低压缸内导致低压缸内温度场及其变形量变化引起。#3、4瓦轴振锯齿形曲线变化幅值随运行时长而减小也充分说明温度场变化导致动静碰磨的情况真实，如图3所示2021.12.18日21:30切缸退出时#3、4瓦轴振锯齿形曲线变化幅值波动量明显减小。

如上所述，内二漏返入低压缸内加热，引起低压缸温度场及其变形量变化，造成碰磨的情况无论是叶顶封还是隔板汽封的碰磨，都是径向碰磨，一般经过机组启停过程、多次切缸投退及一定运行周期的磨减，振动会逐步降低。由此进一步判定，内二漏加热低压转子带来低胀大引起轴向碰磨最终导致25日#2机振动大跳闸，也是26日#1机轴振大的要因。如图4，#1机#3、4瓦轴振波动期间低胀-6mm，五抽也即中排温度达303℃，低胀大超过探头测量量程而无法显示。图5，#2机25日03:39时振动大跳闸前#4瓦最先达峰值的波动过程低胀5.2mm达历史新高，跳闸后降速至912r/min时低胀达5.5mm最大值，#3、4瓦X轴振增大至312.7、191 $\mu\text{m}$ 。排查#2机轴振大原因，#4瓦轴振幅值先降低的起振过程，以及振动大跳闸前有#4瓦最先达峰值的波动过程，可较合理推定是低胀大导致#4瓦侧轴向碰磨造成轴振大跳闸的结论。

低胀大导致#2机轴振大跳闸曾令人难以置信，毕竟#2机轴振大跳闸是#3轴振幅值最大，#1机轴振大也更多反映在#3瓦幅值大而非#4瓦侧，而且，两台机均没有明显的轴向位移参数突变情况，况且，转子膨胀出去导致轴向动静接触碰磨应该难以脱离引起持续振动现象才对。究其原因，一是，#4瓦侧连接的是质量大的发电机转子，而#3瓦侧连接的是质量相对小的高中压转子，一旦有碰磨#3瓦较#4瓦更易激发振动；二是，内二漏加热转子低胀增大的同时，也存在加热隔板造成其轴向变形量大加剧轴向间隙变小情况，引起某一级轴向动静碰磨而最终体现在#4瓦或#3瓦轴振大，所以并不一定低胀大引起轴向碰磨一定应该发生在#4瓦侧；三是，动叶轮盘与隔板体轴向间隙设计值一般10mm以上，而该机型隔板汽封高低齿与转子凸肩的轴向间隙最小7.5mm，与#1机存在的7.5mm低胀值一致，加之隔板挠度变形量大导致轴向间隙更小时，更易导致轴向碰磨，轴向碰磨部位是在某一级的隔板汽封或低压缸末端轴封处；四是，轴向碰磨时，转子凸肩像车刀头与汽封齿接触碰磨，基本上是点接触，汽封块在隔板槽道内有轴向膨胀间隙而存在一定活动量，所以即便是轴向碰磨也会因汽封块被顶开、汽封齿歪倒或磨出间隙而快速脱离，故没有轴向位移变化或者持续振动的现象；五是，七抽管道与汽缸体对应汽、励端两个DN500接口，#4瓦侧也即励端接口经过弯头、大小头变径后与七抽母管连接，而#3瓦侧也即汽端接口是直管三通对接母管，沿程阻力小，内二漏来汽更多的是返入汽端#3瓦侧低压缸内，所以存在#3瓦侧隔板变形量大更易轴向碰磨的可能性，这也是历次检修记录低压缸反旋4、5级隔板叶顶封、汽封磨损最严重的原因。

## 4 振动降控措施及效果

关小内二漏至七段抽汽管路隔离门开度，减少内二漏返入低压缸内的蒸汽量，减弱由此引起温度场变化

量及转子膨胀量。切缸运行工况，适当降低再热汽温等措施，控制#1 机低胀 $\leq 7.5$  mm，控制#2 机低胀 $\leq 4.9$  mm，成功解决轴振大问题，确保了两台机切缸安全长周期运行。

## 5 结语

5.1 针对切缸工况轴振大问题，排查判定是内二漏蒸汽返入低压缸内加热所致，加热定子，引起低压缸温度场及其变形量变化，造成径向动静碰磨导致振动大，加热转子，引起低胀大，造成轴向动静碰磨最终导致#2 机振动大跳闸。关小内二漏管路阀门开度减少返入低压缸蒸汽量，控制低胀高限值以下，成功解决轴振大问题，确保了两台机切缸安全长周期运行。

5.2 分析七抽温度异常变化、轴振曲线锯齿状持续波动幅值变化等成因，判定内二漏蒸汽返入低压缸内加热引发振动的分析思路值得借鉴，轴向碰磨的分析值得肯定。

### 参考文献：

- [1] 施维新. 汽轮发电机组振动[M]. 北京：水利电力出版社，1991. 04:12-12.
- [2] 张黎明, 张彬, 赵金涛等. 汽轮发电机组轴系三倍频分量、基频振动大问题解决[J]. 电力技术, 2015, 08 (136): 67-68.
- [3] 张黎明, 秦晓丽, 王春辉. 高压调节阀装配缺陷诱发汽流激振问题解决[J]. 中国化工贸易, 2015, 11 (32): 12-15.

### 作者简介：

张黎明（1972-），男（汉族），河南省信阳市固始县人。1990 年参加工作，热能动力工程专业教授级高级工程师，国电投南阳热电有限责任公司，多年从事发电厂汽机专业技术管理工作。通讯地址：河南省南阳市国电投南阳热电有限责任公司生产技术部，邮编 473000，电子邮件地址：liming9936@163.com，联系电话：0377-60182268 传真 0377-60182003 手机 13503870735 。

王剑影，1968. 11，男，高级工程师，郑州电力高等专科学校，从事发电行业生产运营管理工作；

韩永卿，1973. 01，男，高级工程师，葛洲坝水电工程学院，从事发电行业生产技术管理工作；

孙杰，1974. 04，男，高级工程师，葛洲坝水电工程学院，从事发电行业生产技术管理工作；

于世杰，1976. 04，男，高级工程师，华北电力大学，从事发电行业生产技术管理工作；

张建设，1975. 06，男，工程师，郑州电力高等专科学校，从事发电行业生产技术管理工作；