

# 大机组供热改造与优化运行技术2019年会



叶东平

哈尔滨电气集团汽轮机厂副总设计师。长期从事汽轮机新产品开发、系统设计、项目咨询、节能改造等工作。在复杂机型和供热机型选型、联合循环系统设计等方面有较丰富的经验，参加过多个大型项目的设计和研究工作，在国内技术刊物发表论文10余篇，获省部级科技成果奖多项。

## 第十一届 大容量汽轮机供热改造和典型问题交流

主办单位：中国电力科技网 协办单位：江苏苏夏能源集团 2019年9月25-27日 中国·石家庄

2009 Qingdao / 2010 Nanjing / 2011 Yangzhou / 2012 Wuxi / 2013 Suzhou / 2014 Xian / 2015 Guangzhou / 2016 Shenyang / 2017 Xuzhou / 2018 Changshu / 2019 Shijiazhuang

# 大容量汽轮机 供热改造和典型问题交流

哈尔滨汽轮机厂有限责任公司  
2019.9 石家庄



## 前言

目前，哈汽公司共完成300MW以上汽轮机通流改造接近200多台，其中国外制造机组20多台；300MW等级100多台；600MW等级20多台；800MW等级2台，另有多台机组修复工作。

改造的国外机组包括有俄罗斯机组、美国GE机组、美国西屋机组、波兰机组、意大利安萨尔多机组、捷克斯柯达机组等。

成功修复北京高碑店和大唐洛热的俄制165MW机组（缺级运行）

改造后机组均运行良好

# 汽轮机供热改造的主要途径及问题

- 1、传统改造——汽轮机打孔抽汽（略）
- 2、汽轮机高背压供热改造
- 3、汽轮机旁路供热改造
- 4、抽凝机改背压机（光轴）供热改造
- 5、汽轮机低压缸切缸供热改造（再谈切缸）
- 6、结束语

### 汽轮机高背压供热——汽轮机组能量梯级利用形式的典范

1. 汽轮机冷端损失占总损失的50%以上，冷端损失如果能以利用，是最佳的节能，节能量大、成本低廉
2. 将进入汽轮机的蒸汽的能量中高品质的部分用尽后，再吐给下游供热，避免了冷端损失
3. 抽凝机组采用高背压供热之后，能够在原来最大采暖供热负荷基础上，再增加约20%的供热量，能够将全厂的热电效率从70%提高到95%以上
4. 比热泵技术更简单、投资少，运行费用低廉、收效更大。

低真空循环水供热的特点：供热量大、供热品质低、要求负荷稳定

### 高背压供热改造中几个需要注意的问题

1. 高背压供热的特点：供热量大、品质较低、负荷要求稳定
2. 机组改造能否成行，与诸多因素有关，其中主要的有：

热网循环水量不能太小

循环水入口温度不能过高

机组正常运行的发电负荷不能过小

(以亚临界300MW机组为例说明)

3. 机组改造方案需要单独订制、一事一议、一厂一策
4. 双转子方案还是单转子方案，均有可取之处，需要认真协商
5. 在评价电厂的改造效果时，一定要有全厂的概念，综合考虑全厂的收益，不能仅评价单台机组的改造效果

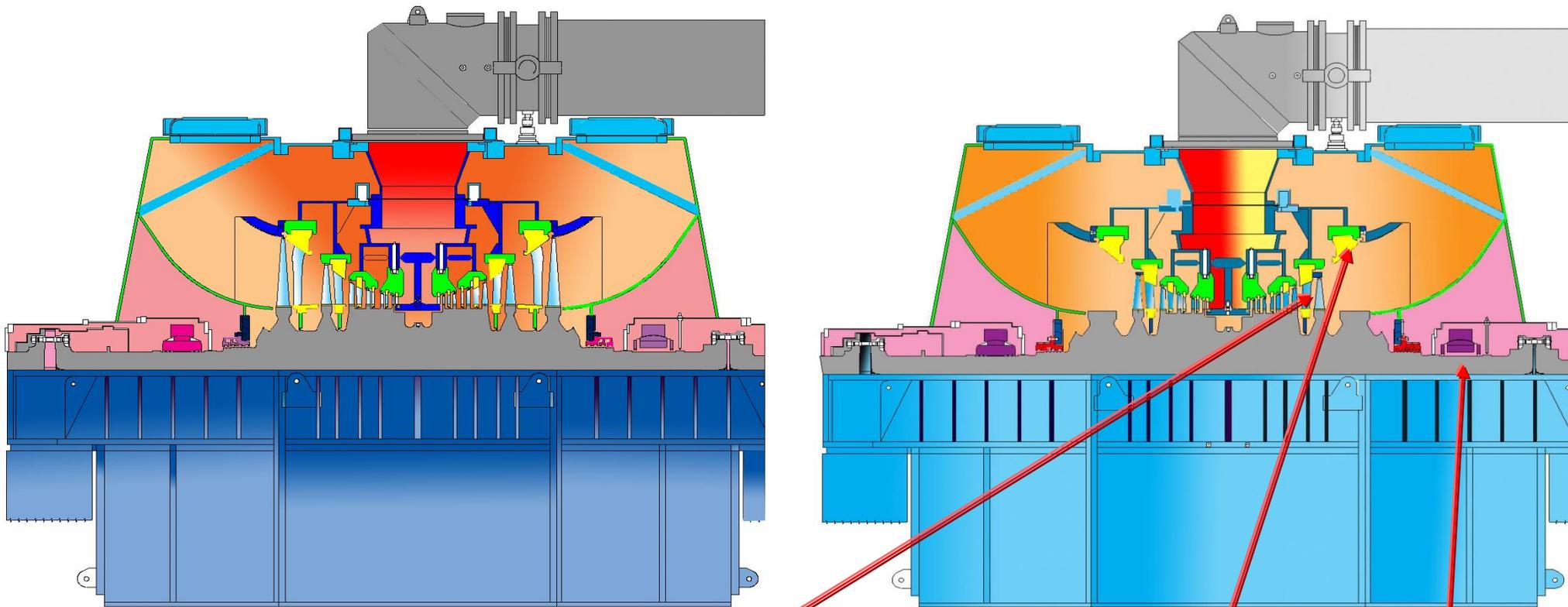
### 低真空循环水供热改造适用范围

- 东北、华北、黄河流域
- 中型和大型城市、供暖人口密集区
- 电厂里最好有两台以上的机组，其中一台至少是抽汽供热的机组
- 有大而稳定的热负荷，且热网循环水温度要合适

### 机组低真空供热改造方案选取

- 改造方案的选择——互换转子方案、改造转子方案
- 互换转子方案：两根低压转子
  - 冬季低真空转子——末叶短、级数少
  - 夏季正常转子——正常末叶和级数
- 改造转子方案：将原有正常转子改造成低真空转子，改造后不再改回来，无论冬夏，只用一根低压转子

### 300MW机组改造前后的低压缸剖面图



重新设计原次末级，作为新转子的末级

拆除原末级隔板，新设计导流环

安装时适当预降低轴承标高

注意：设计时循环水量不宜过小

运行时采暖抽汽量不宜过大

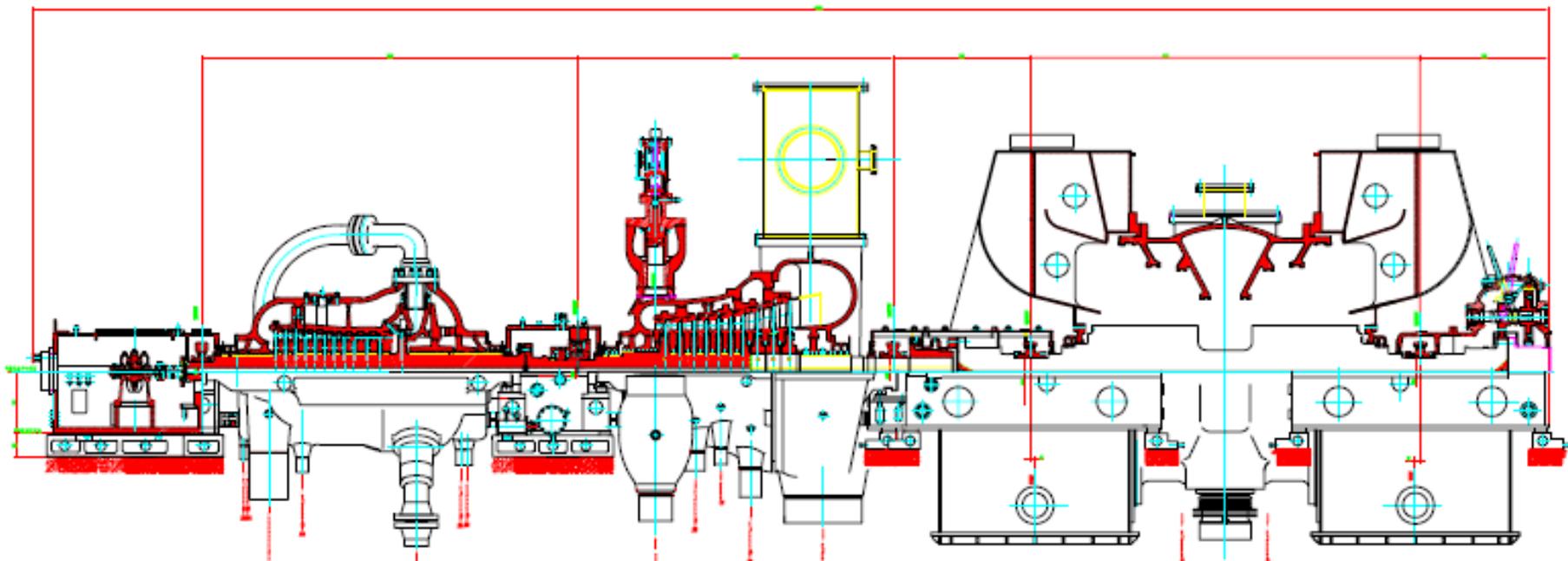
- 循环水量过小，低压缸鼓风现象加剧，改造方案可能不成立
- 高背压运行时，低压缸容易鼓风过热，特别是当机组再有采暖抽汽时，低压缸的缸效率下降，鼓风更容易发生；
- 根据计算经验，高背压运行时，低压缸的安全的排汽量不宜小于额定纯凝时的60%；
- 因此当机组改造成低真空运行时，相应的采暖抽汽量应适当减小，以300MW机组改造为例，采暖抽汽量不宜大于200t/h。
- 必要时，可适当减小低压缸通流面积

### 抽凝改背压供热（光轴）改造基本思路

- 将机组原来的低压转子吊出，更换成一根光轴，连接高压转子和发电机，中压缸排汽全部去热网供热，光轴仅起到传递扭矩的作用；
- 原抽凝机组变成一背压机运行，没有了冷端损失；
- 机组更换连通管，拆除低压缸内的静子部分，基础和其他部件不动；
- 整机出力大约降低到原来的60%--70%；
- 与高背压供热改造相比，可再增加一些供热量，同时运行更加灵活，不受供热负荷限制，供热量可随着供热负荷的变化而任意改变。
- 低压光轴转子适当采用蒸汽冷却

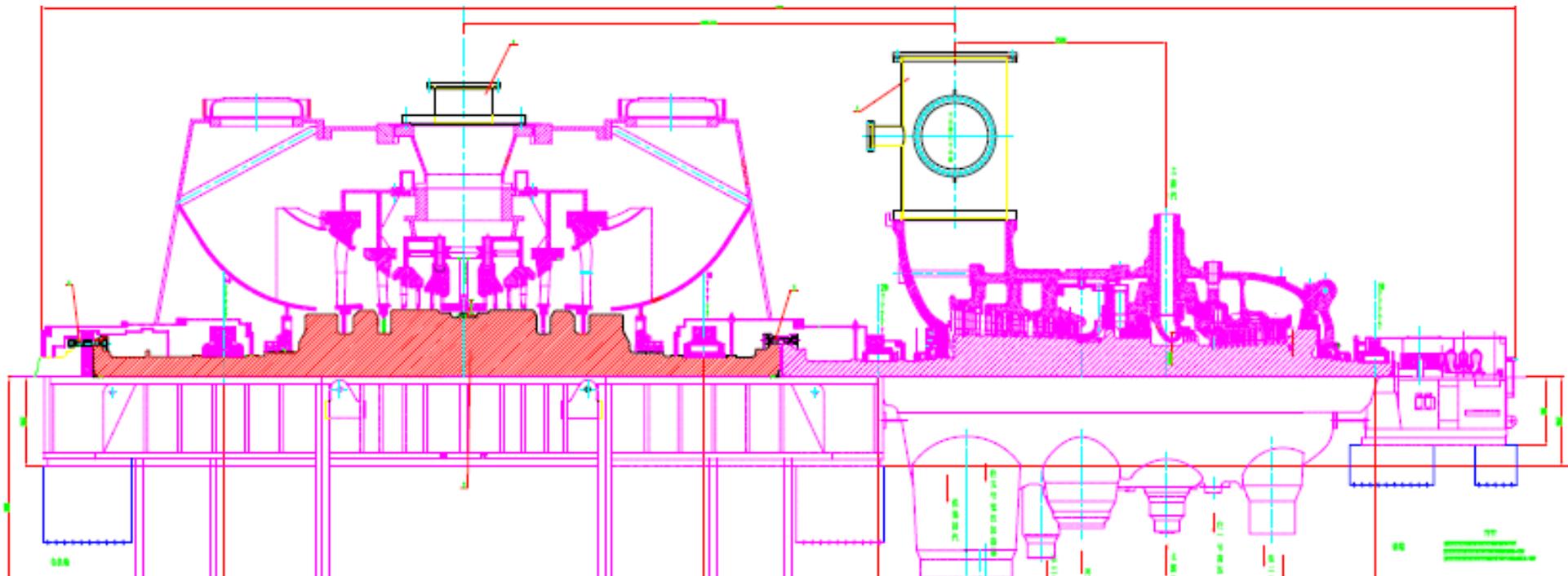
### 200MW机组改背压机（光轴）改造

改造后机组出力155MW，背压供汽量最大490t/h



### 300MW机组改背压机（光轴）改造

改造后机组出力210MW，背压供汽量最大660t/h（大约500MW）



### 低压缸解列（切缸）供热原理图

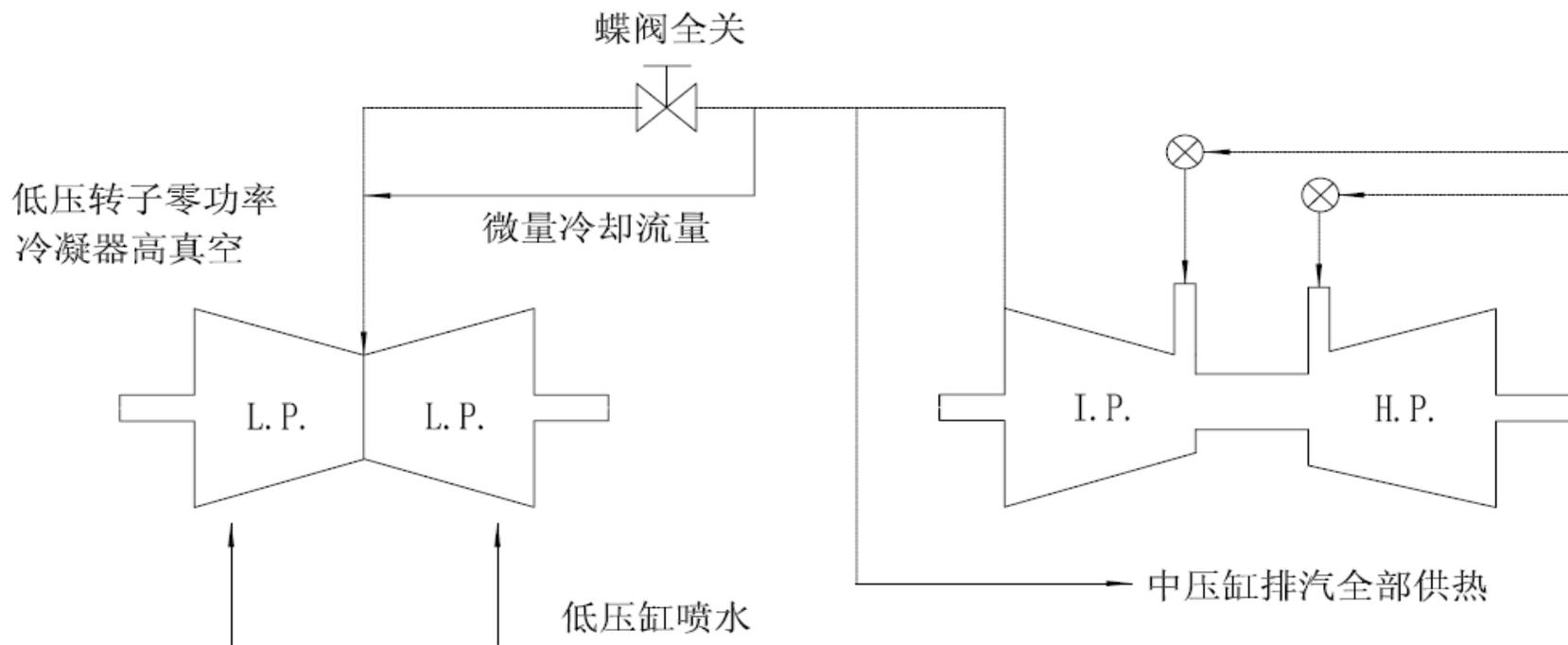
全关型蝶阀

低压转子微量冷却流量、零功率运行

中排蒸汽全部供热

冷凝器高真空运行

低压缸喷水减温连续投入



### 切除低压缸供热技术应用情况

#### 国外应用情况

丹麦Vattenfall公司纯凝407MW的热电机组；  
建厂之初就考虑了机组切缸供热方式

#### 国内2016年开展情况（2017年推广更多）

林河热电1号机组  
延吉热电2号机组  
辽宁东方电厂1号机组  
杨柳青电厂7号机组  
华电铁岭、华电丹东  
沈阳苏家屯机组…… 等等

### 低压缸灵活性运行需要考虑的问题

#### 主机几个大安全问题，以及建议

- 鼓风过热危害（低压缸，不限于末级叶片）
- 末二级叶片汽蚀和水蚀危害
- 末叶片动应力大的危害（曲线，末叶片的安全余量，短期安全不代表安全）
- 目前在计算末叶片动应力方面存在局限性，商业软件无法计算边缘工况，所有的计算都是不准的，其计算结果的正确性无法判断，其计算结果不能作为改造安全性评价依据
- 低压缸长期喷水的安全性
- 安全性评价的原则，不能仅仅短时运行，过于片面
- 一事一议，不宜快速大面积推广

### 小流量时末叶片蒸汽扰流现象

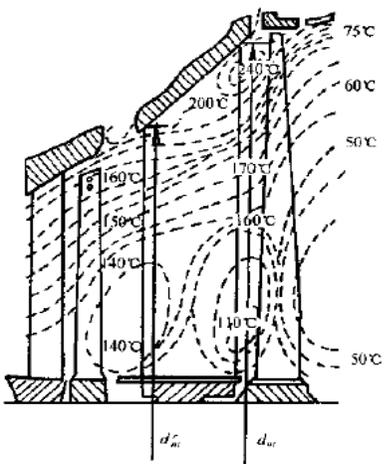
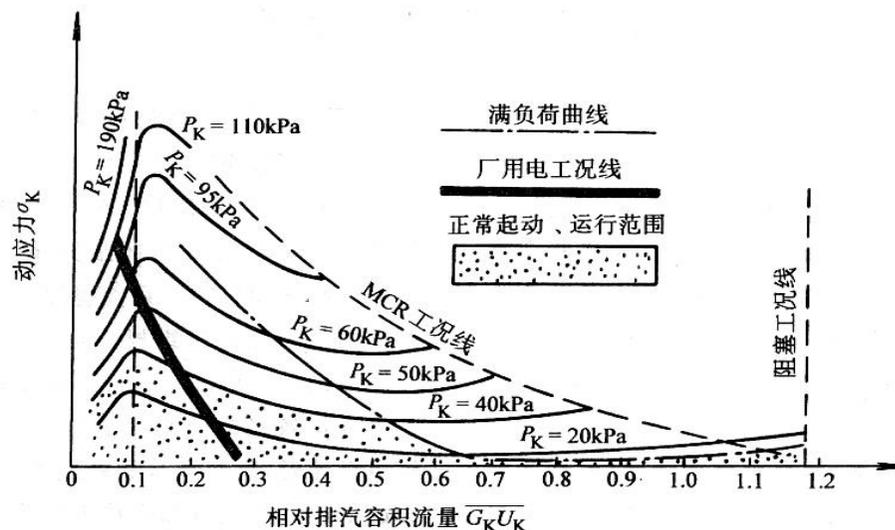


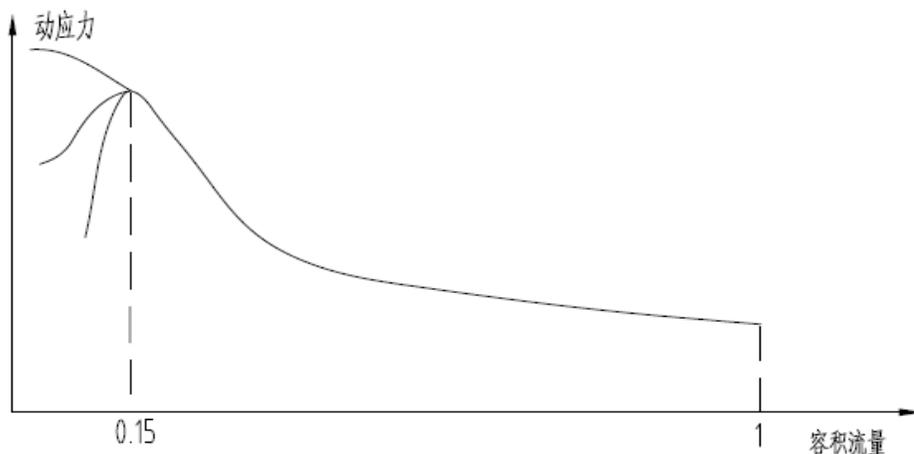
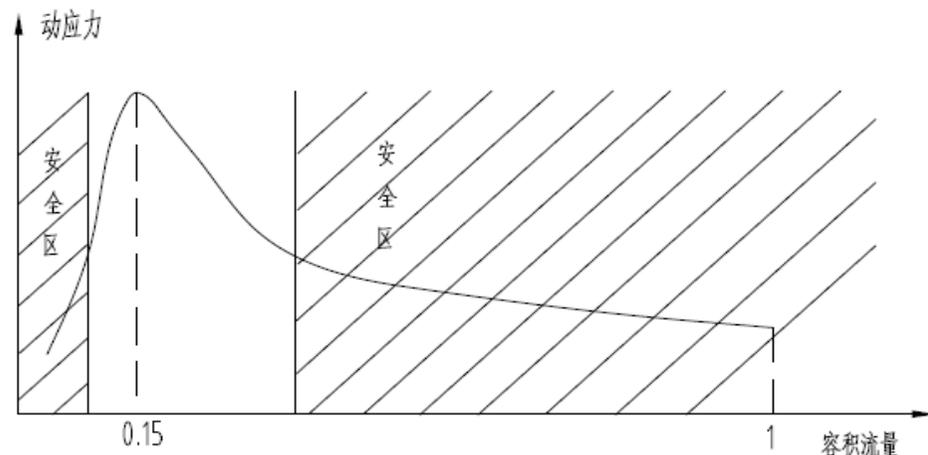
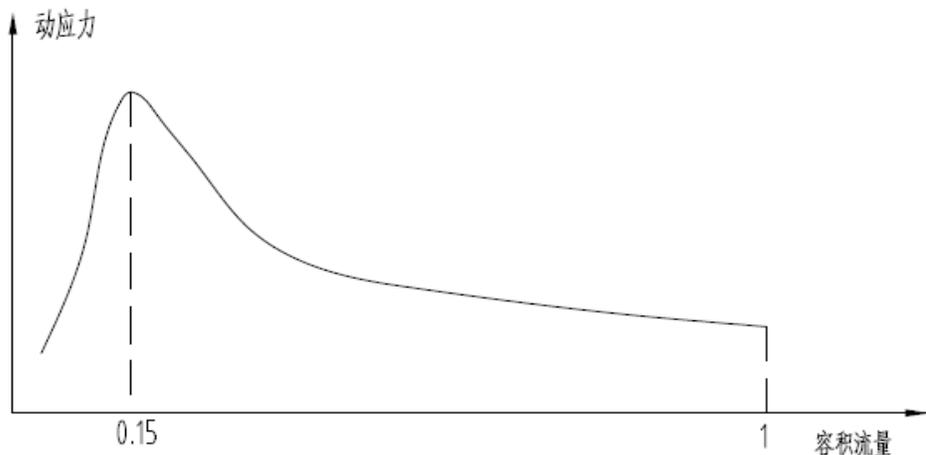
图 5-45 K-300-240 型汽轮机末级和  
倒数第二级出口处实测流线图谱及温度分布

### 教科书上的典型末叶片动应力曲线



- ① 发生鼓风现象，蒸汽温度升高，300MW等级机组，末级叶片温度达到200 °C以上，末级叶片采用17-4PH材料，这种材料使用温度不宜超过200 °C；
- ② 叶片根部出现负反动度，喷水时，水滴吸入工作面，对背弧产生侵蚀，需要采用过渡区叶片考核标准，计算末级叶片；
- ③ 喷水只是降低排汽部分温度，汽缸温度梯度易引起低压缸变形，动静碰磨；
- ④ 叶片处于小容积流量、大负冲角状态，叶片发生颤振现象，目前这种工况下颤振响应无法准确进行计算评估，只能通过试验确认。前苏联、西屋、西德、日本都发生过叶片颤振事故；

### 末叶片动应力曲线——曲线形式是多种多样的



- ① 末叶片动应力曲线形状不是唯一的
- ② 不同的末叶片有不同的动应力曲线
- ③ 过小流量的运行区存在安全隐患

## 五、汽轮机低压缸切缸供热改造（再谈切缸）

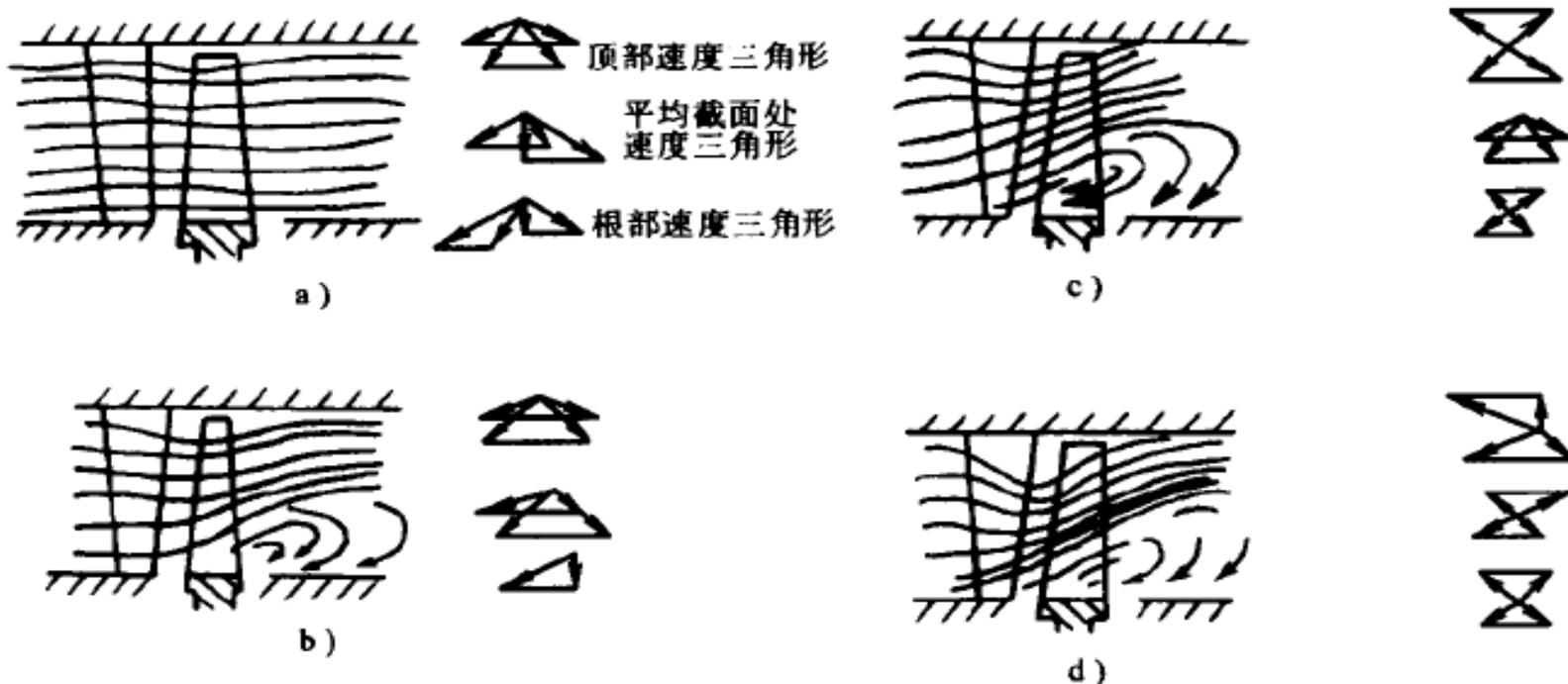


图 2-5-54 不同容积流量工况下的流线图

a)  $GV_n$  额定负荷    b)  $0.54GV_n$     c)  $0.46GV_n$     d)  $0.28GV_n$

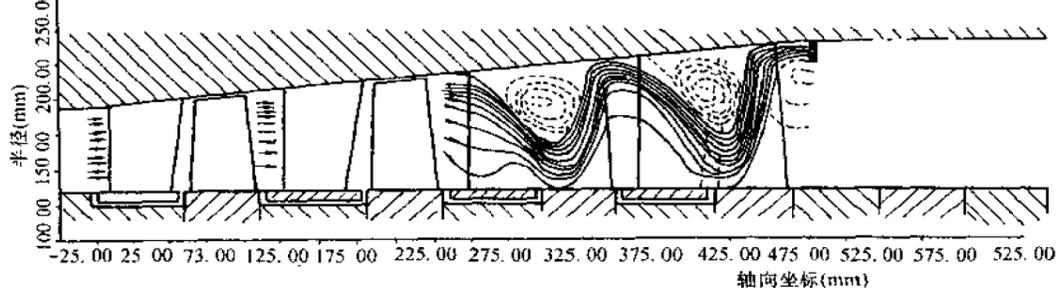
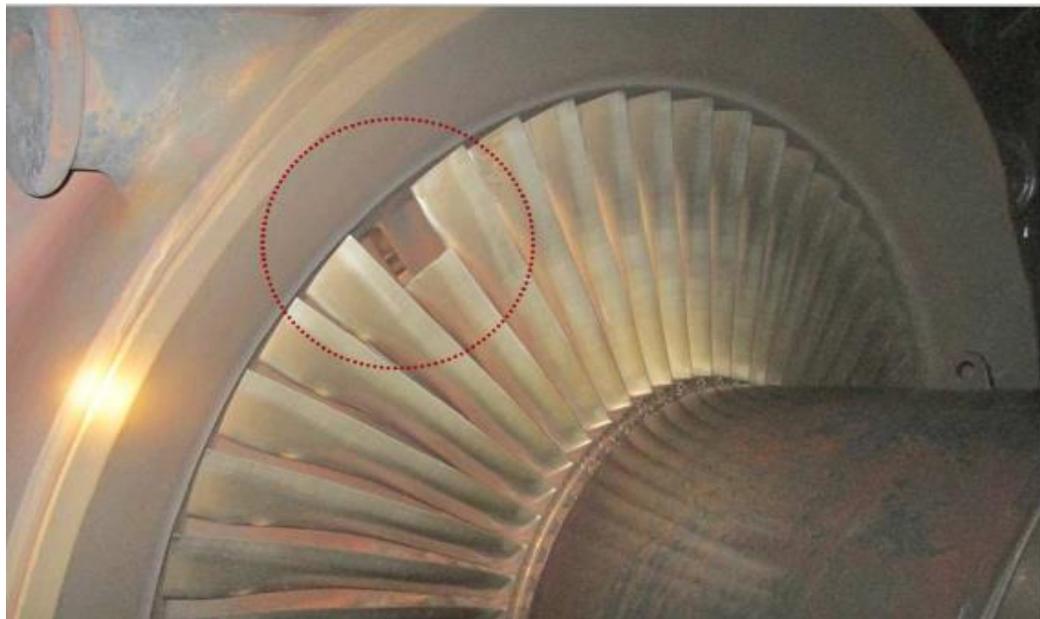


图 5-43 某一试验汽轮机当质量流量为 4% 额定流量时流线图

小流量时，末级叶片  
蒸汽回流，出现水刷

- ① 小流量时叶片根部水刷加剧；
- ② 容量流量越小，水刷越大；
- ③ 摘自《核动力汽轮机》和《火力发电设备技术手册》

因动应力大而曾经损坏过的末叶（断裂的典型位置是位于叶片高度约2/3处）



ALSTOM机组断裂的末叶片



LMZ机组断裂的末叶片

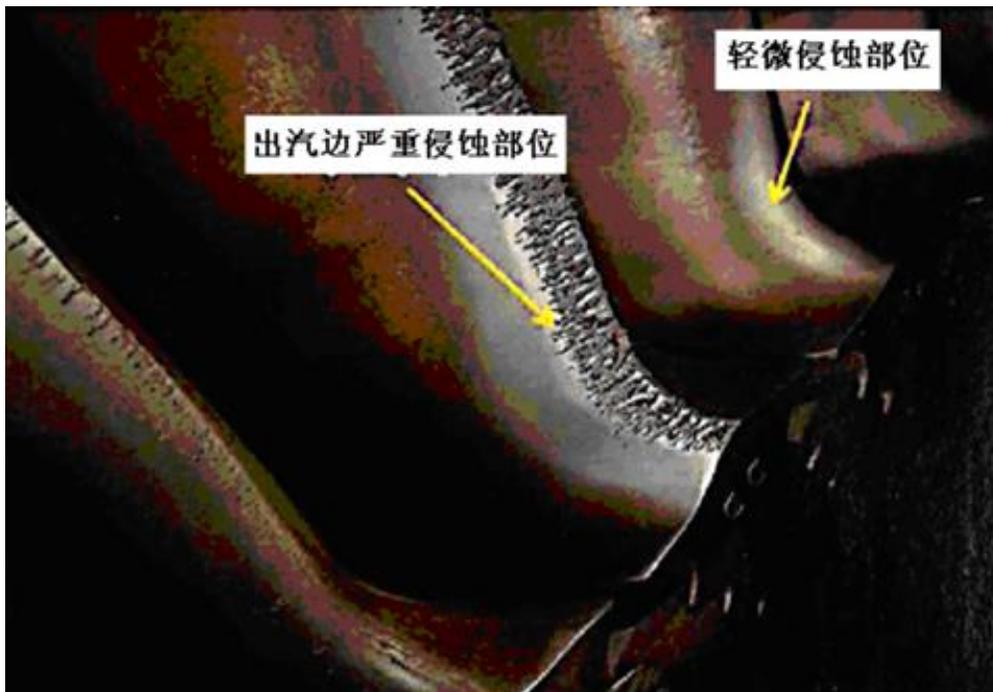
### 末几级叶片鼓风危害

鼓风引起排汽温度会升高到100—200℃，将带来问题如下：

- ① 汽缸变形，易引起轴承标高发生变化，动静碰磨；
- ② 末三级叶片许用值发生变化，存在静应力超标的风险；
- ③ 末三级叶片整圈动频率下降，存在共振点落入避开区的风险。
  
- ④ 低压缸喷水能够降低排汽温度，但是大多数低压缸喷水系统都不能够长期投入

### 末级叶片的水蚀危害

- ▶ 叶片长时在低负荷工况下运行，叶片根部的脱流和叶片顶部的涡流汽流中夹带的水滴随蒸汽倒流冲刷叶片，使叶片根、顶部水蚀严重，长期运行会给叶片带来严重的安全隐患。



国电吉林某热电厂2#机组为哈汽20万机组，低压末级为855mm叶片，2017年由西安热工院做切除低压缸灵活性改造，据电厂工作人员介绍，电厂在2018年切低压缸运行累计共约88小时，停机检修后发现末级叶片水蚀严重，次末级叶顶汽封环脱落等若干问题。

2018年5月24日9点我方人员到电厂，从人孔进入低压缸查看末叶片，发现调端叶片有轻微水蚀，但是电端叶片存在水蚀严重等若干问题。

2019年中旬再对该机组揭缸检查时，又发现叶片裂纹、水蚀严重等新问题。

### 2018年5月的现场照片

1、末级叶片叶型顶部进汽侧司太立合金位置水蚀严重，占数量的80%。



司太立合金片水蚀脱落（13mmx80mm）  
且已水蚀到叶片母材



司太立合金片水蚀脱落（13mmx110mm）  
且已水蚀到叶片母材



司太立合金片水蚀脱落（13mmx110mm）  
且已水蚀到叶片母材

### 2018年5月的现场照片

- 2、末级叶片叶型顶部进汽侧司太立合金位置约有多处疑似机械性损伤，  
怀疑是与叶片动应力大有关



### 2018年5月的现场照片

3、末级叶片叶型出汽侧位置水蚀，数量占30%左右。

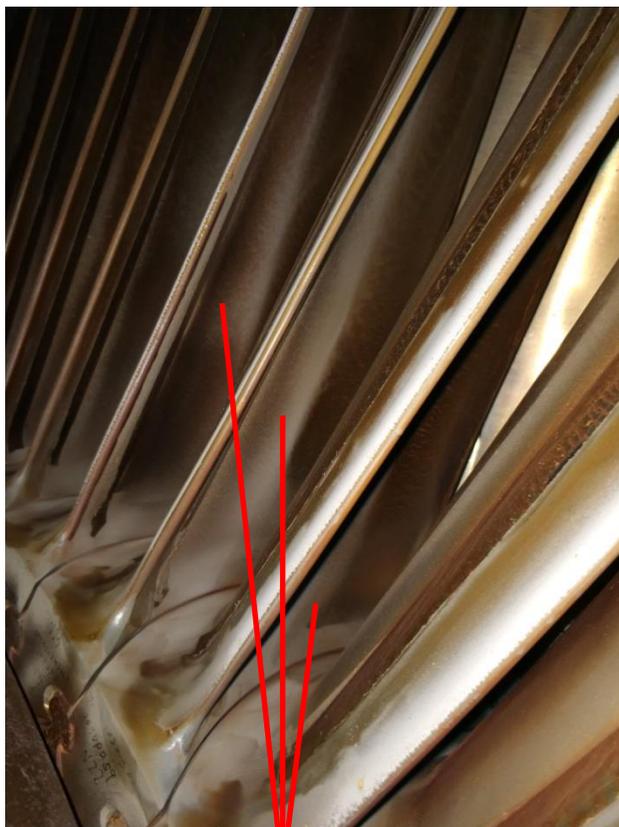


### 2018年5月的现场照片

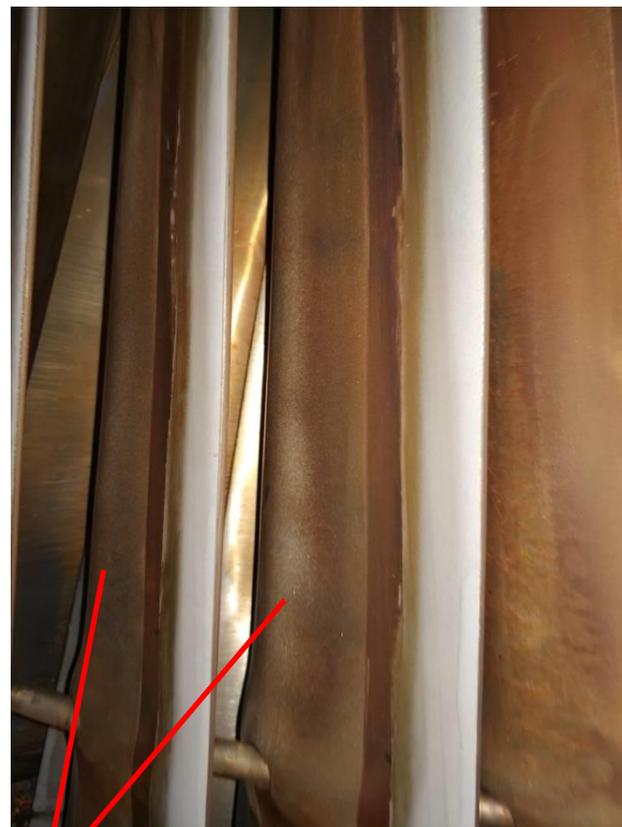
4、末级叶片叶型内弧和背弧水蚀麻点，详细如下图所示。



水蚀麻点



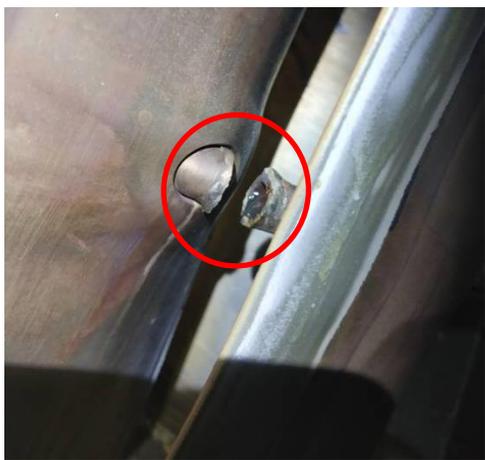
水蚀麻点



水蚀麻点

## 2018年5月的现场照片

5、末级叶片拉筋约有5处位置断裂，疑似在小流量下动应力大造成。



### 2018年5月的现场照片

6、末级叶片所有围带下表面附着了大量的疑似铁锈/氧化皮、断裂的司太立合金片。



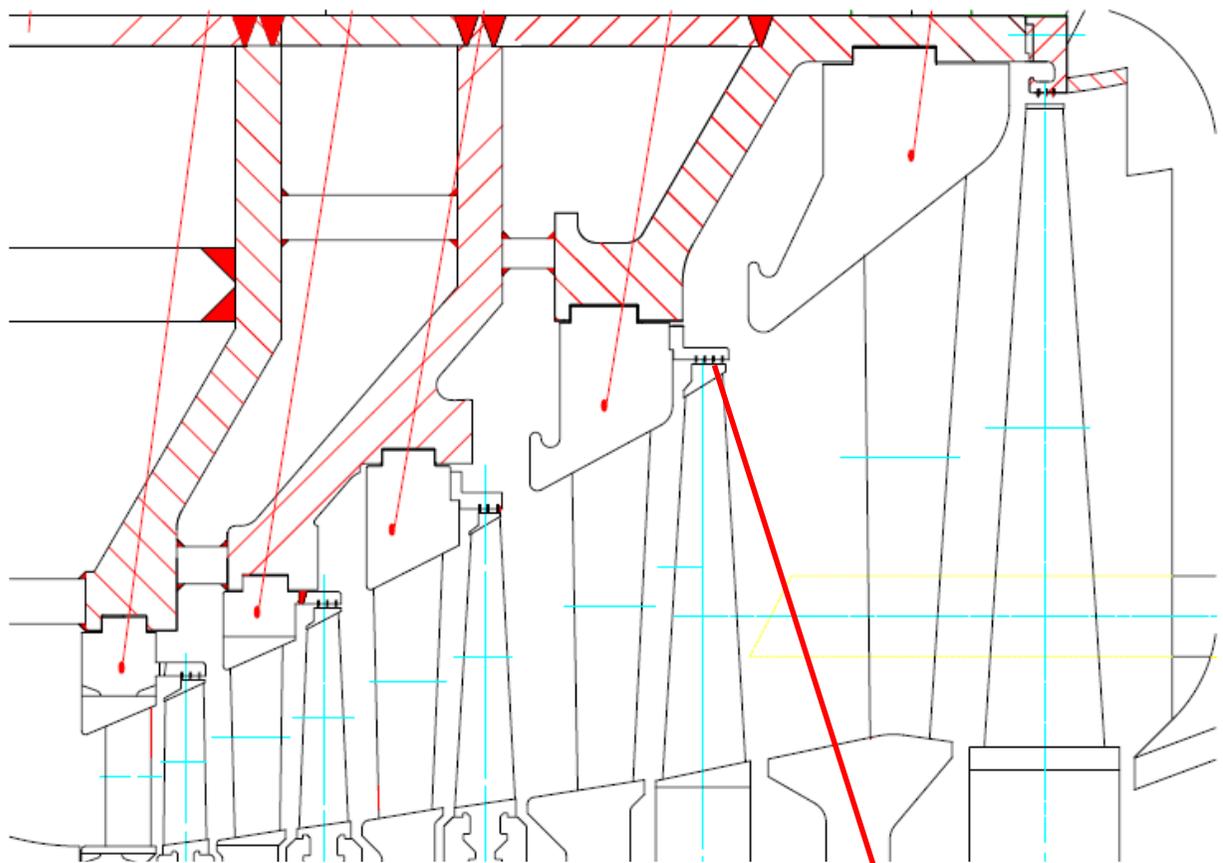
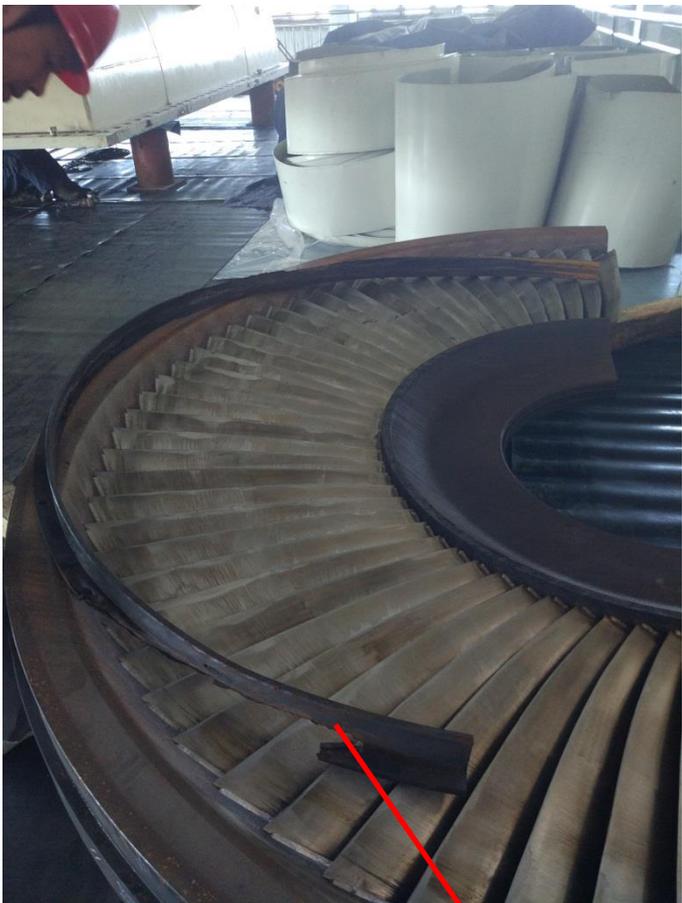
疑似铁锈/氧化皮、断裂的司太立合金片



疑似铁锈/氧化皮、断裂的司太立合金片



## 7. 次末级动叶顶汽封环脱落，动静碰摩

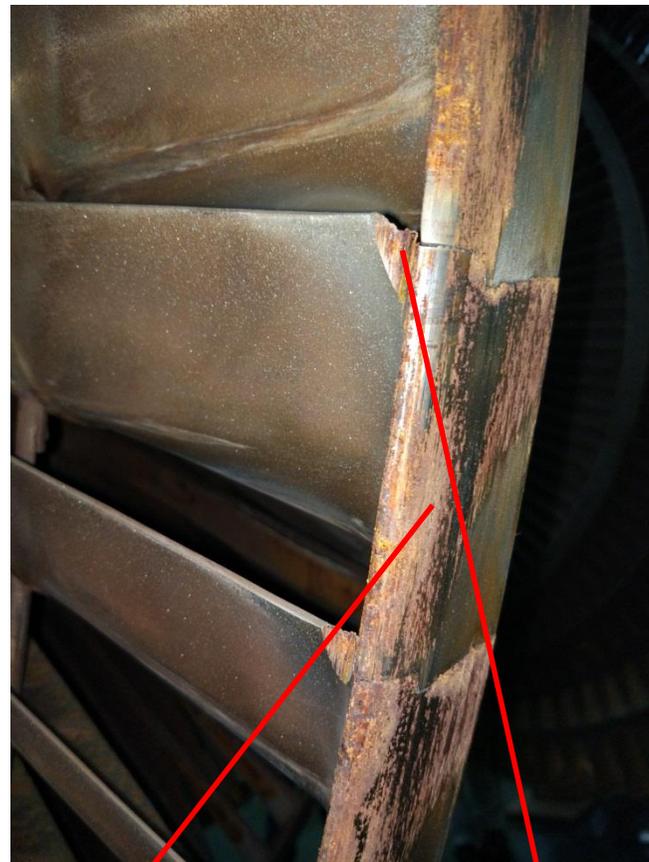


脱落磨损严重的气封体

## 8、次末级动叶顶气封体脱落，动静碰磨严重



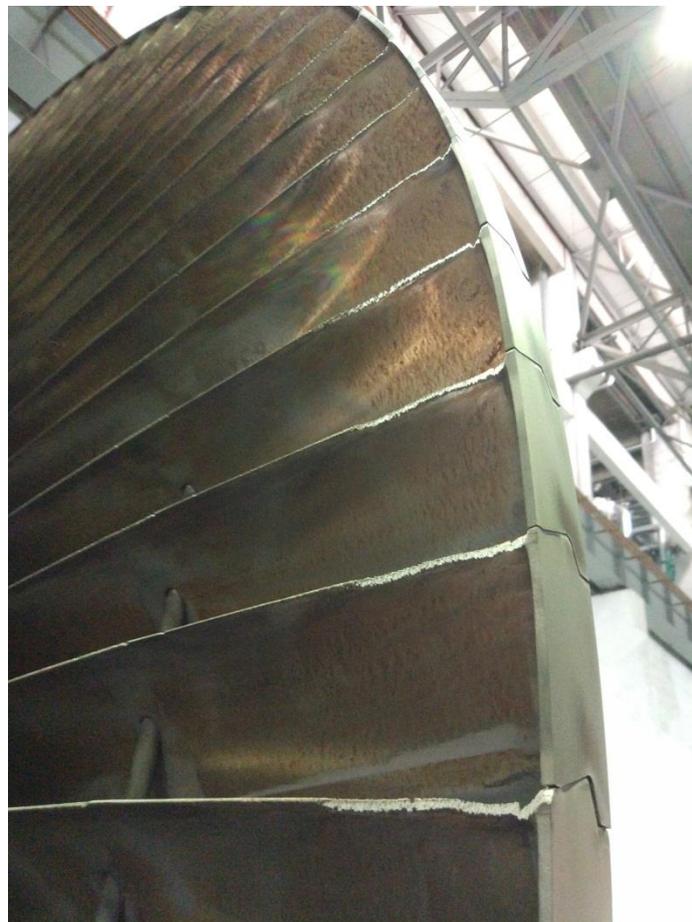
电端次末级动叶出汽边磨损情况



调端次末级动叶出汽边磨损情况  
围带外圆磨损锈蚀

围带磨损缺肉

### 9、调端末级动叶水蚀严重



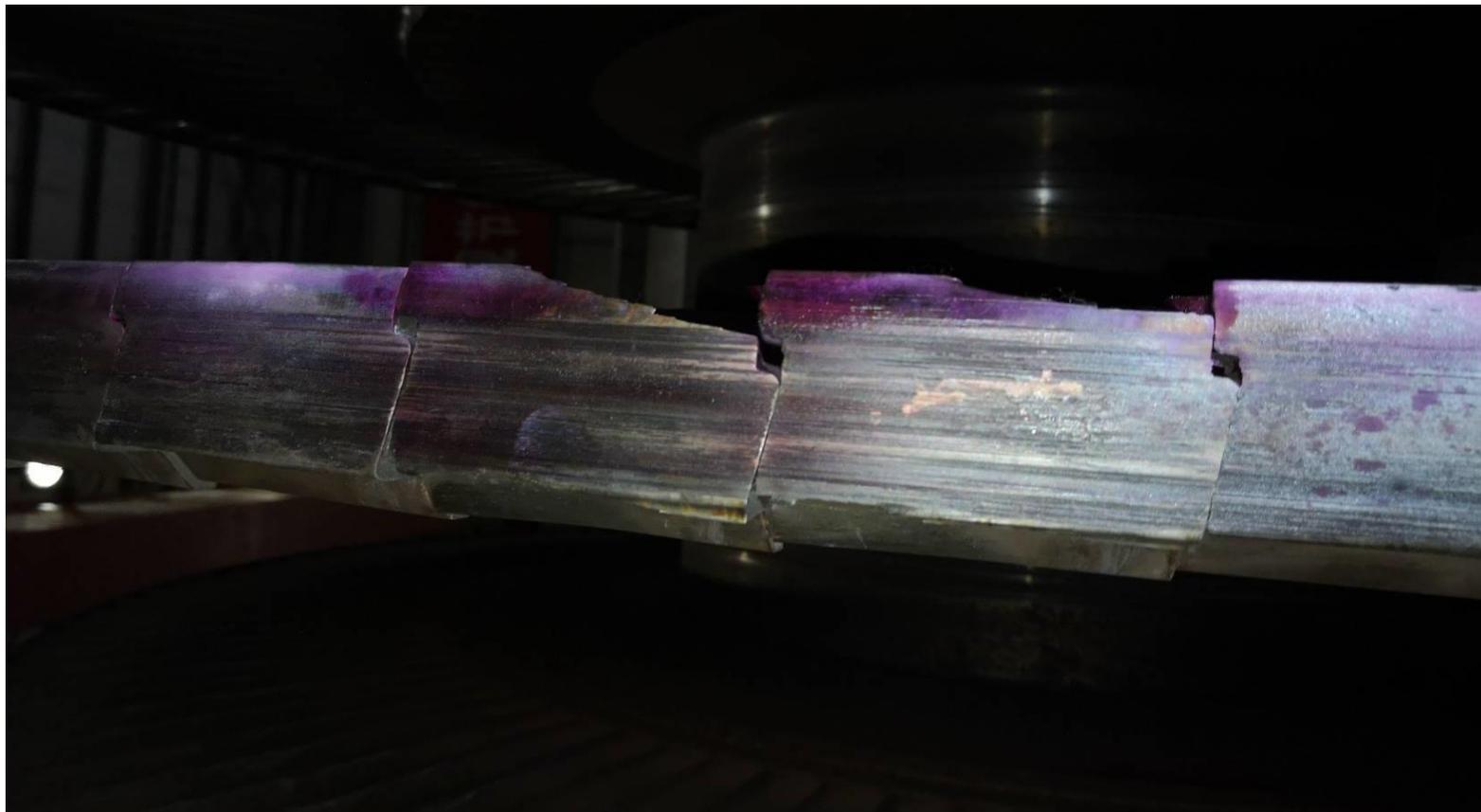
调端末级叶片进汽边水蚀情况

### 10、电端末级动叶也水蚀严重（2019年5月）。



电端末级叶片进汽边水蚀情况

### 11. 电端次末级叶片围带错牙情况



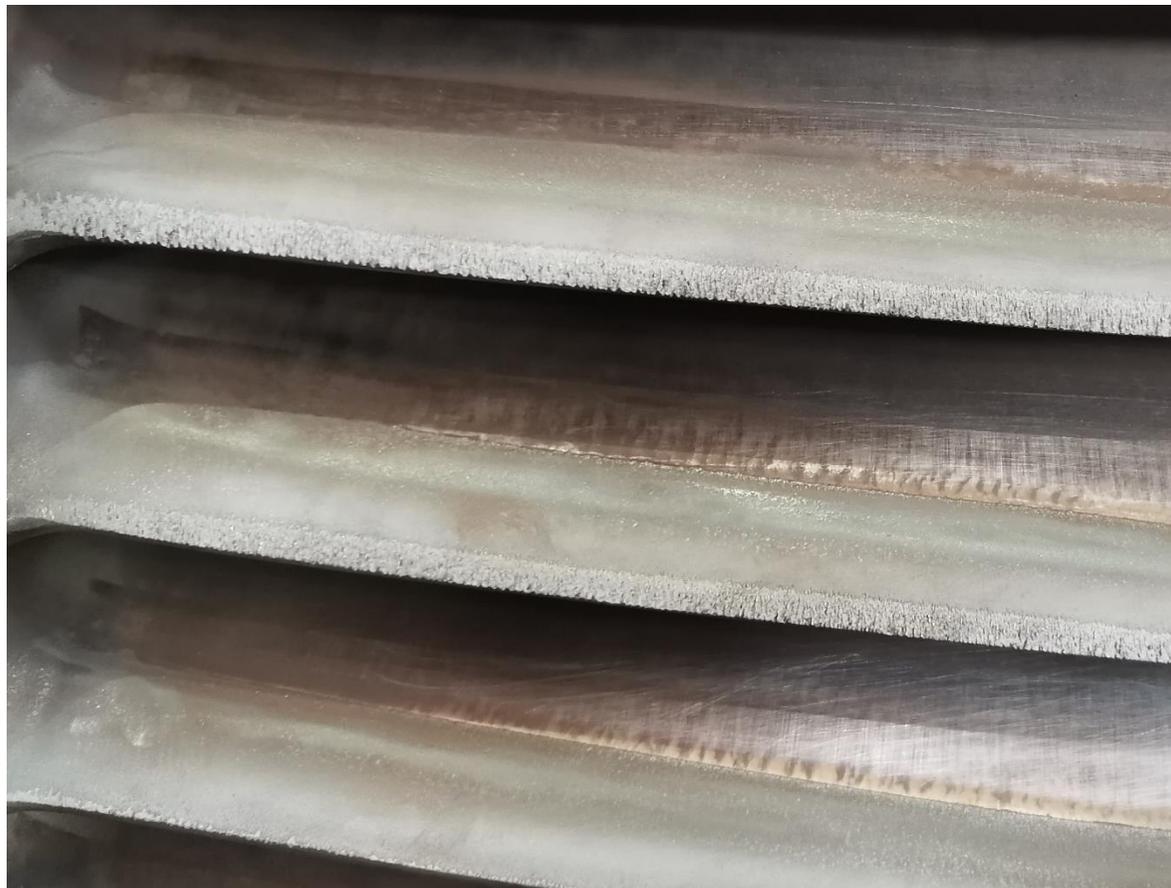
### 12. 末级叶片拉筋开焊情况



### 13. 末级叶片司太立合金片下部焊料水刷导致缺失情况（2019年5月）



### 14. 末级叶片出汽侧水蚀情况在2018年5月后更加严重（2019年5月）



末级叶片出汽侧叶型根部



末级叶片出汽侧叶型根部局部放大

### 15. 次末级叶片叶顶及围带被脱落的汽封损坏



16. 次末级叶片上的缺口和裂纹（有被脱落的汽封打坏的可能，也有动应力大造成颤振的可能，且后者可能性大，这是一个非常强烈的信号）（2019年5月）



### 关于这起改造事故的思考

1. 工程技术的推广不能存在侥幸，闯红灯未出问题，不能证明闯红灯正确
2. 未经证明准确性的计算结果，不能用来作为设计依据
3. 央企支持创新，但是不支持带有明显冒险性的蛮干
4. 一哄而上的技术，不能算是成熟技术
5. 工程技术，不光需要学历，也需要经验，甚至需要教训。

末叶片动应力问题，是切缸改造最大的问题，它看不见、摸不着、算不准，但是它就在那里，却一直被忽视。

我们一直说狼要来了，可是一直没看见狼，今天狼终于出现了。

## 结束语

1. 精细化设计，是今后产品性能提高的必由之路；
2. 新技术的推广，需要循序渐进的过程
3. 实践能够检验真理，但是实践也需要一定的时间来检验
4. 有问题就一定有解决的办法，我们愿与电厂加强沟通与信任，在工程设计上考虑充分，万无一失。

谢 谢

