

# 连接螺栓断裂失效分析原因分析过程及案例

产品名称	连接螺栓断裂失效分析原因分析过程及案例
公司名称	深圳市华瑞测科技有限公司
价格	.00/件
规格参数	厂家:华瑞测 型号: SX14 周期: 3-7天
公司地址	中国深圳龙岗区横岗街道富利时路3号
联系电话	0755-23093158 13684912512

## 产品详情

水管是大型水轮发电机组的重要部件，其主要作用是利用下游水面到机组转轮出口的高程差，在转轮出口形成静力真空，从而将该处水流引向下游；还能利用转轮出口的水流动能，将其转换为动力真空以回收水流能量从而提高发电效率。因此，尾水管工作状态正常与否直接关系到水轮发电机组能否安全稳定运行。

### 事故背景

黄河中游某大型水电站2号机组为HLFN235-LJ-610型立轴混流式水轮机(功率为180MW)，该水轮机采用金属蜗壳，转轮标称规格为6.087m，由两个规格为490mm的直缸式接力器通过其传动机构控制24只导叶，以调节水轮机的力度和停机切断水流，采用弯肘型尾水管导流及回收能量。该水轮机在运行过程中发生尾水管进人门连接螺栓断裂失效。此次断裂发生时，该批次螺栓已累计使用约76000h。

### 理化检验

#### 1.宏观分析

图1 断裂螺栓的宏观形貌

尾水管进人门连接螺栓是8.8级高强螺栓，材料为40Cr钢，规格为M30mm × 120mm。对尾水管进行宏观检查，由图1可见，尾水管进人门连接螺栓表面较粗糙且锈蚀严重，断裂处位于螺杆与六角头连接的变截面过渡部位；断口表面整体较平整，未见明显的塑性变形；断口与螺栓轴线垂直，存在起裂区、扩展区及瞬断区，为典型的疲劳断口形貌。起裂区位于断口边缘，扩展区占据了断口表面大部分区域，该区域呈暗灰色，表面细密平滑，可以观察到较清晰的“海滩状”疲劳条纹。瞬断区位于和起裂区对称的断口边缘，其所在区域面积约为断口面积的1/10，表面较粗糙。此外，断口及附近区域未见机械损伤及腐蚀损伤等缺陷。

## 2.断口分析

### 图2 螺栓断口表面的微观形貌

对断口进行微观形貌观察。由图2a)可见，疲劳源位于断口边缘且为多源性开裂，随着裂纹的扩展，各裂纹源的裂纹趋向合并，在不同断裂平面交汇处形成错层台阶。由图2b)可见，在断口扩展区存在明显的疲劳辉纹，在接近疲劳源的区域疲劳弧线较细密，说明在该区域裂纹扩展较缓慢；在远离疲劳源的区域疲劳弧线较稀疏，说明裂纹扩展速率加快。此外，断口上还存在大量的二次裂纹。由图2c)可见，瞬断区内撕裂棱与韧窝共存，呈现出准解理断裂特征。

## 3.化学成分分析

对进入门连接螺栓取样，采用SPECTROLABMAXx型火花源原子发射光谱仪对试样的化学成分进行分析，结果见表1。

### 表1 进入门连接螺栓的化学成分(质量分数)

可见该螺栓的化学成分在GB/T 3077 - 2015合金结构钢对40Cr钢的成分要求范围内。

## 4.金相检验

### 图3 进入门连接螺栓不同部位的显微组织形貌

对进入门连接螺栓截取断口位置制样，试样经磨制、抛光后，采用体积分数为4%的硝酸酒精溶液浸蚀，然后使用Axio Observer Alm型研究级倒置金相显微镜进行观察。由图3a)可见，螺栓基体显微组织为回火索氏体+块状铁素体，说明螺栓调质处理工艺不当，加热温度较低或保温时间不足，造成铁素体未完全奥氏体化而存在较多块状铁素体。由图3b)可见，螺杆表层存在厚度约40 μm的全脱碳层组织及70 μm的半脱碳层组织。

## 5.力学性能试验

采用CMT5305型电子wanneng材料试验机对进入门连接螺栓进行力学性能测试，试验结果见表2。

### 表2 进入门连接螺栓的力学性能测试结果

可以看出螺栓的维氏硬度和 - 20 下的冲击吸收能量均符合GB/T 3098.1 - 2010紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱的要求；根据GB/T 1172 - 1999黑色金属硬度及强度换算值，将硬度测试值换算成抗拉强度后，其抗拉强度也符合该标准要求。

## 分析与讨论

水轮机尾水管进入门连接螺栓一般需进行淬火加回火的调质处理以达到使用要求。在淬火工艺中，由于加热温度较高，螺栓表层碳原子因受热振动脱离金属晶格的束缚逃逸，从而在螺栓表面形成大量的全脱碳层。在热力作用下全脱碳层铁素体晶粒长大较为严重，且与基体的回火索氏体组织差别较大，淬火过程中在较大的组织应力及膨胀系数差产生的应力作用下沿全脱碳层铁素体晶界形成微裂纹。螺杆与六角头连接变截面及螺纹牙底等部位存在微裂纹，同时由于全脱碳层硬度低，导致上述部位的抗疲劳性能严重降低。

对于混流式水轮机，在偏离最优工况的小开度区和大开度区时，转轮出口会有不同程度的回流使尾水管内形成低频压力脉动，从而对进人门产生非稳定的脉动冲击，使进人门连接螺栓承受循环冲击载荷。在循环冲击载荷作用下，螺栓会在全脱碳层的晶界微裂纹处形成疲劳源，且裂纹在尾水管过流产生的循环载荷作用下不断扩展。

螺栓的组织中存在较多的块状铁素体，说明螺栓在淬火过程中加热温度偏低或保温时间不足，铁素体向奥氏体转变不充分。此外，大量块状铁素体的存在会降低螺栓的强度和韧性，使其抵抗疲劳断裂的能力大幅下降。

螺栓表面较粗糙，推测这是由于在前期车削加工中刀口较粗糙造成螺栓表面损伤，这易造成应力集中，导致螺栓抗疲劳性能下降。此外，从断口形貌可以看出，螺栓断口大部分区域为扩展区，该区域疲劳条纹密集，说明螺栓在使用过程中承载的应力水平较低且应力循环次数较多，呈现典型的高周低应力疲劳断裂特征，即螺栓不存在过载荷使用的情况。

## 结论及建议

尾水管进人门连接螺栓在加工过程中由于热处理控制不当，造成螺栓表层形成大量的全脱碳层，并使螺栓组织中存在较多的块状铁素体，降低了螺栓的强度和韧性，造成其抵抗疲劳断裂的能力不足。在尾水管过流产生的循环冲击载荷作用下，在全脱碳层的晶界微裂纹处形成疲劳源，并以高周低应力方式扩展至断裂。

为保证进人门连接螺栓的质量，首先应严格控制螺栓热处理工艺，防止形成全脱碳层；其次应优化加工工艺，通过降低表面粗糙度等方式增强螺栓的抗疲劳性能；再次应优化水轮机的运行工况，避免频繁出现转轮出口回流现象，进而导致螺栓断裂失效。