

# 工业发机电动机转子的热加工工艺优化

■ 王慧, 甄志亮, 曹薇, 张晓芳, 彭元飞

**摘要:** 发动机转子运行时要承受高速旋转产生的巨大离心力和传递扭矩及自重产生的弯曲应力, 具有复杂的工作条件和受力状态, 因此要求转子的锻件冶金质量好、材质均匀, 综合力学性能要求高, 超声波检测要求严格, 因此对冶炼、锻造、热处理专业度都提出了极高的要求。我公司对转子的冶炼、锻造、热处理工艺进行了分析改进及优化, 为用户生产出了完全符合要求的产品。

**关键词:** 工业发动机转子; 冶炼; 锻造; 调质工艺

我公司承接了某工业发机电动机的转子, 系发动机的主要部件, 其工作状态转速高、承受应力大, 从设计出发保证长期安全运行, 对转子的质量提出了很高的要求。

## 1. 转子概况与技术要求:

该转子外形如图1所示, 材质为34CrNi1Mo, 化学成分控制如表1所示。

超声波检测要求为: ①不允许有当量直径等于或大于2mm连续缺陷信号和游动缺陷信号。②当量直径小于2mm的缺陷不计, 允许2~4mm分散缺陷存在, 但相

邻两个缺陷的距离不小于其较大缺陷直径的7倍。③单个分散缺陷的当量直径和数量不允许超过表1的规定。④在应力较大的区域内(中心孔直径加400mm范围

内)不允许有当量直径大于3mm的单个缺陷和大于或等于当量直径2mm的密集缺陷信号(见表2)。

调质后的力学性能要求如表

表1 34CrNi1Mo的化学成分控制 (质量分数) (%)

|        | C         | Si        | Mn      | P≤    | S≤    | Cr      | Ni      | Mo       | Cu≤ |
|--------|-----------|-----------|---------|-------|-------|---------|---------|----------|-----|
| 化学成分   | 0.30~0.40 | 0.17~0.37 | 0.5~0.8 | 0.025 | 0.025 | 1.3~1.7 | 1.3~1.7 | 0.2~0.33 | 0.2 |
| 最大允许偏差 | 0.03      | 0.05      | 0.07    | 0.005 | 0.005 | 0.07    | 0.07    | 0.04     | —   |

表2 单个、分散缺陷的当量直径和数量

| 当量直径范围/mm | 各部位允许数量/个 |     |      |    |
|-----------|-----------|-----|------|----|
|           | 轴身        | 传动端 | 非传动端 | 总数 |
| 2~3       | 12        | 5   | 5    | 22 |
| 3~4       | 3         | 1   | 4    | 8  |
| 总数        | 15        | 6   | 9    | 30 |

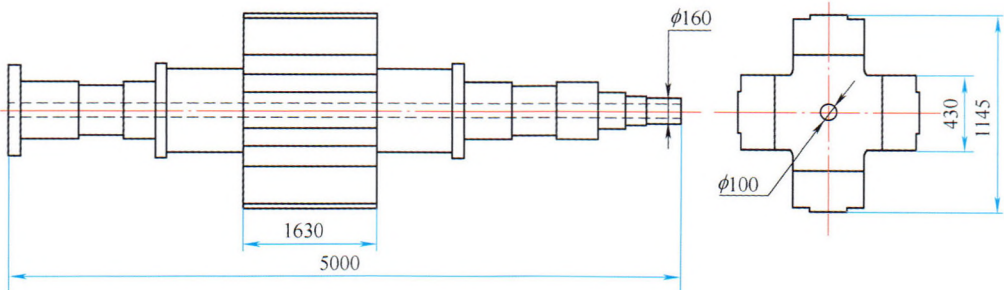


图1 转子的外形及尺寸

3所示，且调质后要求检查硬度均匀性，规定沿周向同一圆弧表面上不允许超过30HBW，轴向同一母线上不允许超过40HBW，沿周向硬度不得大于30HBW。

该转子锻件的制造从冶炼、锻造、到热处理难度都较大，为此我公司开展了技术分析，并从以下方面采取措施，以保证产品质量。

2. 制造过程质量控制方法

此转子要求化学成分偏差很小，且本身对有害气体含量及夹杂物有着严格的要求。

(1) 化学成分控制 在冶炼选料时要求采用优质废钢，80%以上采用汽车板的废钢以保证其化学成分可控，确保Cu≤0.20%；EBT电弧炉应提前造渣除P，为保证钢液质量应确保出钢前P≤0.005%，严禁氧化渣进入精炼包；精炼炉合金化过程中应分批加入合金并随时补加渣料，保证还原渣具有良好的流动性。

(2) 有害气体含量控制 加强精炼炉还原操作，合金化完成后继续加入脱氧材料保持白渣，白渣保持时间≥20min；真空处

理时，在中真空大氩气状态下保持20~40min，真空处理后气体含量要求满足表4要求；真空浇注时，中间包开浇VC真空度保证在67Pa以下，锭身浇注真空度保证在100Pa以下。

(3) 夹杂物控制 着重检查各种原材料、冶金附具，以减少外来夹杂物的带入；精炼过程中随时观察氩气状况，适时调整氩气流量，以不裸露钢液为宜；减少钢液对浇包的冲刷；真空浇注前，钢水在中间包内镇静5~7min，使夹杂物有充分上浮的时间。

转子的超声波检测级别很高，因此锻造时要采取措施尽可能焊合缺陷，消除铸造组织，并为后续转子的热处理做好组织准备：

(1) 锻造加热控制 为给焊合内部缺陷创造有利的条件，应该将锻粗前的加热温度适当提高，而且比正常的加热保温时间增加50%~100%；加热过程中，应定时观测钢锭加热的均匀性，必要时进行调整以保证加热均匀。

(2) 锻造变形控制 锻造成形工序采用“两锻两拔”工序，锻粗工序，为充分焊合钢锭内部缺陷，打碎铸态组织，改变夹杂物分布的状态，每次锻粗变形程度大于50%；拔长工序是转子锻造工艺中最重要工序，采用WHF法，并严格控制拔长过程中的砧宽比(W/H)在0.6~0.8的范围内，单砧压下率(ΔH/H)在18%~20%的范围内，每次拔长比大于2.5，总锻造比达5.8，以

表3 力学性能要求

| 取样位置项目 | $\sigma_{0.2}$ /MPa | $\sigma_b$ /MPa | $\delta_4$ (%) | $\Psi$ (%) | $A_{KV}$ /J |
|--------|---------------------|-----------------|----------------|------------|-------------|
| 径向     | ≥ 500               | ≥ 750           | ≥ 18           | ≥ 50       | ≥ 40        |
| 纵、切向   | ≥ 500               | ≥ 750           | ≥ 18           | ≥ 50       | ≥ 40        |
| 中心孔纵向  | ≥ 450               | ≥ 700           | ≥ 16           | ≥ 45       | —           |

表4 真空处理后气体含量要求 (ppm)

| [H]   | [O]  | [N]  |
|-------|------|------|
| ≤ 2.5 | ≤ 35 | ≤ 60 |

注：1ppm=10<sup>-6</sup>。

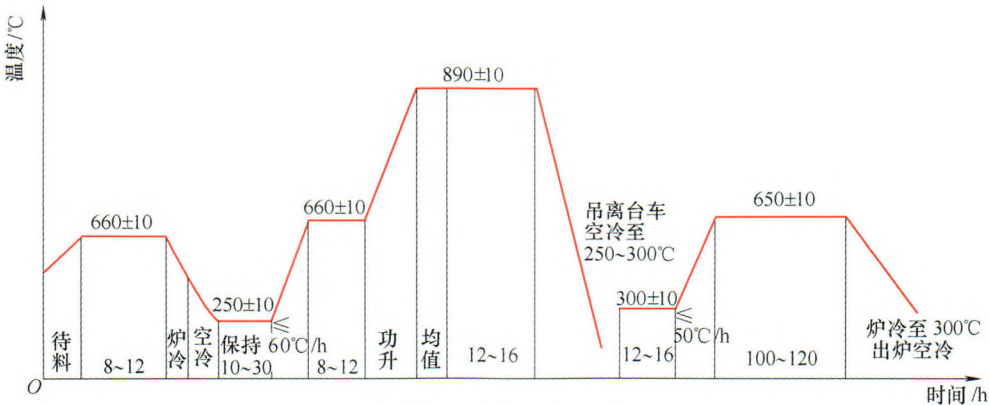


图2 转子的锻后热处理工艺

保证心部为压应力且有足够的变形量。

(3) 锻后热处理控制 采用如图2所示工艺进行锻后热处理,以消除锻造应力,调整和改善锻造过程中形成的粗大组织,并防止和消除白点问题。

(4) 转子调质的控制 力学性能是转子能够正常工作的关键指标,因此如何保证性能就显得尤为重要。资料介绍:当钢的淬火组织为马氏体时,锻件的脆性转变温度最低,下贝氏体组织次之,铁素体和珠光体的最高。为得到要求的力学性能,特别是FATT值,必须使大型转子锻件淬火时沿着整个截面淬透,使其获得马氏体或马氏体加下贝氏体组织,必须采用激冷,不同介质对转子组织转变的影响,正火处理的转子心部获得铁素体、珠光体、上贝氏体,表面为上贝氏体。因此其不能满足高屈服强度与低脆性转变温度的要求,而油冷能获得较多的下贝氏体和马氏体组织,因此表现出有较高的综合力学性能。在终冷温度相同的

情况下,则水冷比油冷能获得更多的下贝氏体和马氏体组织。

直径大于1m的锻件,为使其淬火后得到马氏体与下贝氏体组织,特别是心部也得到贝氏体组织,或至少避免析出铁素体组织,需采用激冷、深冷淬火等淬火方式,以增加锻件心部在淬火过程的冷却速度。该转子最大尺寸为1145mm,最小尺寸为 $\phi 160\text{mm}$ ,尺寸差距较大,若采用水淬或水淬油冷,不同截面冷却速度不同,开裂风险极大。我公司采取以下措施来保证转子水淬油冷工艺的顺利实施:右端直径较小的轴颈按照大直径加工,将所有的直角都按R40~60mm加工成圆角,从而避免较大的直径差和局部的应力集中现象。且调质工艺如图3所示。

操作注意事项:由于该转子大小截面差距大,小截面冷却快,为减小小截面的过冷度,使其尽量与大截面过冷度一致,需要留有一定的预冷时间。预冷时间以工件从加热托盘起吊算起到入水前(包括在空气中停留的时

间)共2~5min。刚入水时由于工件本身强大的热量,水发生沸腾并听到密集的水泡破裂的声音,随着工件温度的降低,水泡的破裂声逐渐减少,到8~15min时几乎听不到水泡破裂的声响立即出水入油,油冷时间2h左右。在转子的终冷温度在200~250℃及时入炉回火。

(5) 转子残余应力的控制 转子承受着很大的纵向、径向和切向的应力,齿根部位的拉应力也较大,尤其是中心孔孔壁的切向拉应力最大,这样的工作条件决定了经过调质后转子的残余应力应不大于屈服强度的10%。我公司采用比调质回火温度低30~50℃的温度消除应力,去应力工艺曲线如图4所示。

### 3. 转子的检测结果

转子的材质为34CrNi1Mo,采用41t双真空钢锭,其化学成分(熔炼分析)如表5所示。

转子锻件粗加工后按JB/T1267—1993《50~200MW汽轮发电机转子锻件技术条件》要求

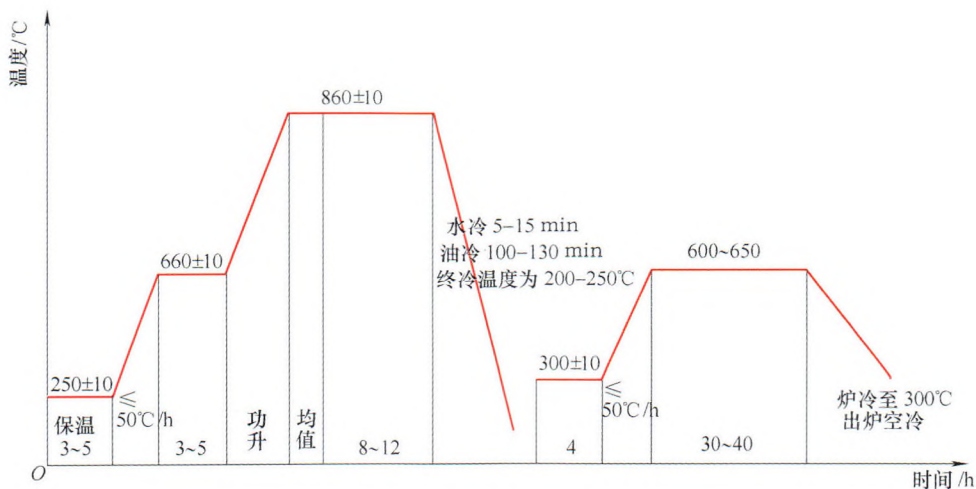


图3 转子的调质工艺

进行超声波检测，均未发现灵敏度为 $\phi 2\text{mm}$ 以上的超标缺陷。转子经调质后，不同部位的力学性能如表6所示。检测部位以及检测结果如图5和表7所示。

依据JB/T1267—2002标准内容，转子残余应力 $\sigma_{\text{r}}=E\delta/$

$D$ （其中 $E$ 弹性模量钢材为 $2.1\times 10^5\text{MPa}$ ， $D$ 为切割前外径值）。转子产品的残余应力 $\sigma_{\text{r}}$ ，不允许其屈服强度的10%，即 $\leq 45\text{MPa}$ 。两支转子的残余应力检测值分别为 $\sigma_{\text{r1}}=34.75\text{MPa}$ 、 $\sigma_{\text{r2}}=24.2\text{MPa}$ ，均合格。

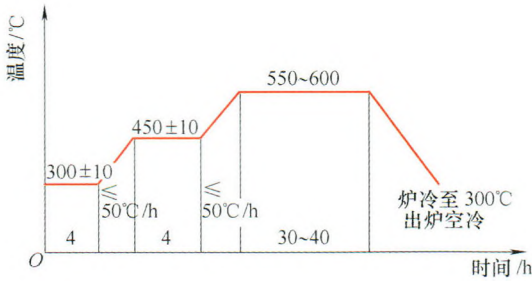


图4 转子的去应力工艺曲线

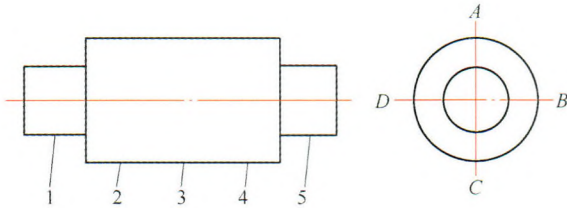


图5 转子的硬度检测示意

表5 34CrNi1Mo钢锭的化学成分（质量分数）（熔炼分析）结果（%）

| 元素  | C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo   | Cu   |
|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| 实测值 | 0.40 | 0.62 | 0.24 | 0.008 | 0.011 | 1.61 | 1.59 | 0.25 | 0.04 |

表6 实测力学性能

| 取样位置<br>项目 | $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | $\sigma_b/\text{MPa}$ | $\delta_4$ (%) | $\psi$ (%) | $A_{KV}/\text{J}$ |
|------------|---------------------------|-----------------------|----------------|------------|-------------------|
| 径向         | 617                       | 840                   | 20.2           | 52.5       | 67、40             |
| 纵、切向       | 636                       | 831                   | 17.7           | 57         | 37、32             |
| 中心孔纵向      | 598                       | 831                   | 18.4           | 47         | —                 |

表7 转子调质后的硬度

| 测试位置 | 调质后的硬度测量值HBW |     |     |     |     |
|------|--------------|-----|-----|-----|-----|
|      | 1            | 2   | 3   | 4   | 5   |
| A    | 295          | 290 | 285 | 289 | 293 |
| B    | 290          | 285 | 292 | 280 | 290 |
| C    | 292          | 287 | 280 | 275 | 295 |
| D    | 296          | 300 | 291 | 285 | 290 |

4. 结语

我公司采取了下列措施来保证转子各方面性能满足其苛刻的工况环境。

（1）严格控制转子化学成分偏差、有害气体含量及夹杂物含量。

（2）锻造采用两锻两拔，足够的压下量在充分焊合钢锭内部缺陷、打碎铸态组织的前提下保证其心部为压应力。

（3）为保证后续的力学性能，调质过程中选择合适的冷却方式，机加工时尽量减小轴颈间的尺寸差距，所有直角按 $R40\sim 60\text{mm}$ 加工。调质过程中采用预冷→水淬→油冷的冷却方式确保淬火不开裂，且保证后续的力学性能。采用比调质回火温度低 $30\sim 50^\circ\text{C}$ 的温度进行去应力。通过这些过程控制使得转子的各项力学性能指标及残余应力值均达标。

通过我公司前期精心的工艺准备以及精确的过程控制，生产出各项指标均满足用户要求的产品，顺利交付用户使用，产品质量得到了用户的认可。

参考文献

[1] 康大韬，叶国斌. 大型锻件材料及热处理[M]. 龙门书局.  
[2] 东北重型机械学院. 大锻件热处理[M]. 北京：机械工业出版社，1974.  
[3] 上海电机厂. 汽轮发电机转子与护环的受力情况和对材料的设计要求[A]. 科学技术报告，1979.

作者简介：王慧、甄志亮、曹薇、张晓芳、彭元飞，中冶陕压重工设备有限公司。

MW 20170628