

百万千瓦发电机转子的分区热处理

■ 彭亚敏，张超

摘要：通过对相关辅具的设计及在热处理过程中监控调温，利用我厂非专用分区热处理设备，成功制造出了有分区性能要求的超长百万千瓦发电机转子。为以后百万千瓦发电机转子的成功研制奠定了基础。

关键词：发电机转子；分区热处理；辅具

大型核电发电机转子锻件，属于典型的长轴类电站锻件，一直以来，其制造的关键技术都被国外企业所垄断。为打破国外企业对百万千瓦核电机组发电机转子的技术垄断，我厂依据已有的电站锻件技术基础和生产经验，与国内科研院所联合开展工艺基础研究，先后攻克了高纯净钢液冶炼及铸锭、特大型钢锭中心压实锻造、超大截面锻件的细化晶粒热处理等诸多关键技术难关，最终研制成功百万千瓦核电常规岛半速发电机转子锻件。

因转子尺寸超长，在转子精加工尺寸上加上热处理余量及冷加工要求的两端各加吊夹头余量，很多方面已达我厂长轴类锻件热处理极限。同时，还需要满足发电机转子分区性能的要求，这点尤其在调质热处理方面对我厂提出了较大挑战。

1. 技术要求

(1) 化学成分要求 发电机转子材质为25Cr2Ni4MoV钢，采用LVCD+VCD方式进行冶炼，化学成分要求如表1所示。

(2) 力学性能要求 核电发电机转子的力学性能试验取样位置见图1，转子力学性能要求见表2。

2. 制造难点

(1) 因为没有专用的分区热处理设备，只能利用现有设备对转子进行分区加热处理，所以要设计隔热板对炉体及锻件进行隔热达到分区要求。

(2) 由于热处理炉超长，炉温均匀度为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，让炉内温度保持均匀本就难以控制，再加

表1 核电发电机转子化学成分要求（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
≤ 0.33	0.15~0.35	0.20~0.40	0.020	0.020	1.40~1.70	2.80~3.10	0.30~0.50	≤ 0.15

表2 发电机转子力学性能要求

位置和方向项目		外表面			中心			
		I 区		II 区	I 区		II 区	
		A, B	C, D	J	E, F, G, K		H	
		径向	径向	径向	径向	纵向	径向	纵向
屈服强度0.2%	MPa	≥ 550	≥ 550	≥ 650	≥ 500	≥ 500	≥ 650	≥ 650
抗拉强度	MPa	640~800	640~800	740~900	≥ 600	≥ 600	740~900	740~900
0℃冲击值	单值/J	≥ 40	—	≥ 40	—	≥ 24	—	—
	平均值/J	≥ 56	—	≥ 56	—	≥ 36	—	—
FATT	℃	—	≤ 0	≤ 0	—	$\leq +25$	—	$\leq +20$

上此转子锻件为当时我厂生产最大钢锭（535t）的转子锻件，可能会存在成分偏析，所以在热处理过程根据成分偏析情况再进行调温更加难以控制。

3. 发电机转子调质热处理过程

核电发电机转子的粗加工尺寸如图2所示。

（1）热处理炉的选定 根据转子尺寸，选定我厂在热处理车间可实现分区控制的开合电炉和大型立式喷淬设备进行调质热处理。

井式开合炉的有效加热区为18m，有效加热直径为2.2m，且温度可以实现分区控制，符合此发电机转子的热处理加热要求。大型立式喷淬设备可以实现喷水、喷风、喷雾三种淬火冷却功能，且自上而下喷出介质的流量、压力、方向均可按工艺要求方便调整，完全满足此发电机转子的淬火要求。

（2）底座的选定 由于开合炉的炉膛尺寸为19760mm高，而有效加热区只有18m高，发电机转子粗加工总长度15481mm，所以要把锻件完全放在开合炉的

有效加热区18m内部，就需要有底座作为支撑，且上端轴颈处还要有扶手加固，让锻件坐稳在底座上。

开合炉自身配有炉外支座和炉内支座一、炉内支座二、炉内支座三，如图3所示。为配合炉子和转子的长度，选用炉外支座（高1230mm）、炉内支座一（高1420mm）和炉内支座三（高5880mm）设计成组合底座。

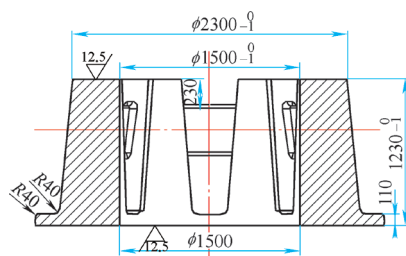
（3）吊具 淬火加热装炉采用大型U形吊具，淬火装炉采用大型旋转吊具。由于大型U形吊具的侧壁开口长度为890mm，吊钩内圆最大直径为1400mm，而转子Ⅱ区轴颈 $\phi 860\text{mm}$ ，Ⅰ区轴颈 $\phi 900\text{mm}$ ，所以在热处理时，转子在炉内只能Ⅱ区朝上Ⅰ区朝下放置。大型旋转吊具侧壁开口长度900mm，吊钩内圆最大直径1400mm。

（4）隔热板的设计 为达到性能分区要求，在加热过程中需要对不同区域进行分区加热处理。由于炉体内存在热循环，所以在Ⅰ区和Ⅱ区分界处需要安装隔热板，以实现在调质回火加热过程中对转子及热处理炉的有效

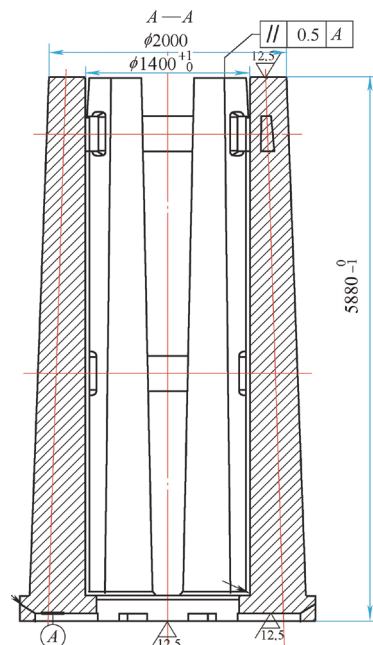
隔热分区，隔热板尺寸如图4所示。图5为转子调质热处理过程的示意。

（5）调质热处理工艺 采用热处理车间可实现分区控制的 $\phi 3\text{m} \times 18\text{m}$ 开合电炉和 $\phi 3.7\text{m} \times 18\text{m}$ 喷雾淬火设备进行调质热处理。

在编制热处理工艺时可以根据传统方式进行，转子轴锻件的材料为传统的25Cr2Ni4MoV钢，根据以往的物理模拟试验和多年积累的经验，Ⅱ区、Ⅰ区相应的回火温度应设定在 $690 \sim 620^\circ\text{C}$ 和 $610 \sim 640^\circ\text{C}$ 范围内。调质热处理工艺曲线如图6所示。



(a) 炉外支座



(b) 炉内支座

图3 开合炉专用底座示意

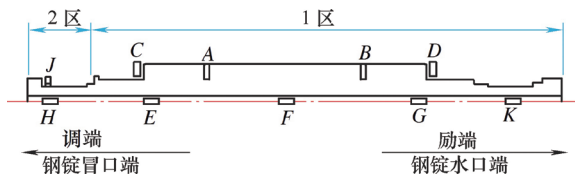


图1 性能试验的取样位置

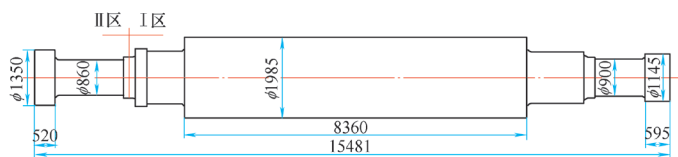


图2 粗加工示意

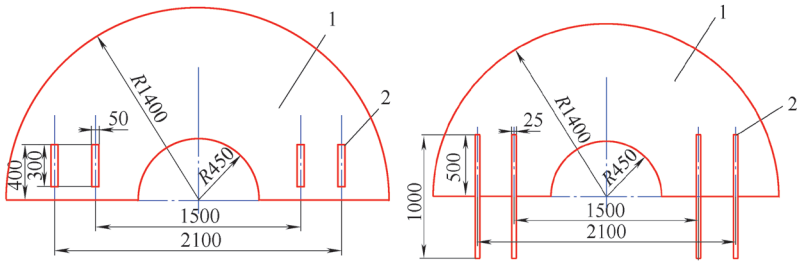
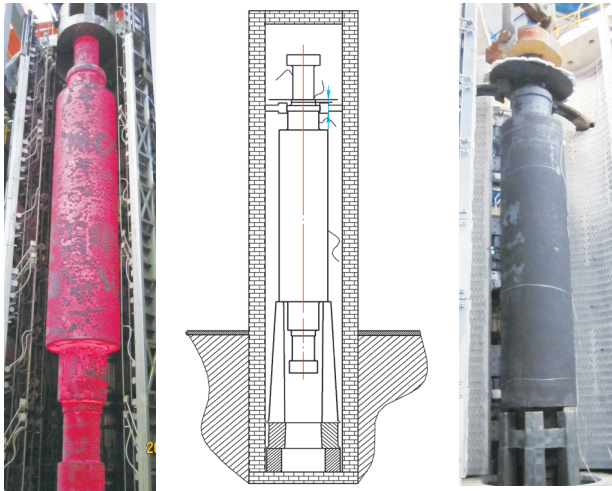


图4 隔热板的示意



(a) 淬火现场图 (b) 回火装炉示意 (c) 回火装炉现场图

图5 转子调质时在炉中位置的示意

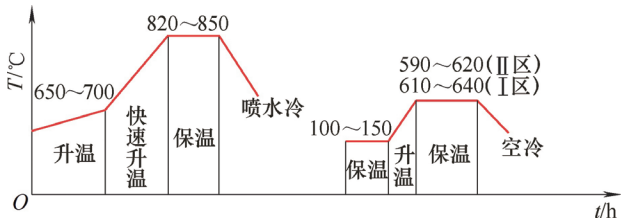


图6 发电机转子调质热处理工艺曲线

表3 化学成分分析

元素名称	熔炼分析 (%)	成品分析 (%)							
		外表面				中心			
		A	B	D	J	E	H	F	G
C	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23	0.31	0.31	0.31	0.28
Si	0.06	<0.05	<0.05	0.07	0.06	0.08	0.08	0.08	0.07
Mn	0.28	0.27	0.27	0.27	0.26	0.29	0.29	0.29	0.28
P	0.003	0.006	0.0022	0.006	0.006	0.008	0.007	0.007	0.008
S	0.002	0.0032	1.64	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Cr	1.56	1.65	3.01	1.66	1.64	1.66	1.66	1.66	1.65
Ni	2.91	3.03	0.38	3.03	3.03	3.12	3.12	3.11	3.11
Mo	0.39	0.38	0.38	0.37	0.43	0.43	0.44	0.42	0.42
V	0.10	0.10	0.10	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11

在装炉前检查炉子、喷水系统、控制系统等设施应良好，装炉时确保转子竖直，隔热板上铺上耐火石棉毡。淬火加热时转子坐在组合底座上，转子停喷半小时后测各部分表面温度应 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ 。

4. 检验结果

根据粗加工取样图进行取样进行化学成分分析和力学性能试验，成品化学成分见表3，力学性能结果如表4、表5所示。

由表3可以看出，各部位的化学成分均在要求范围内，不存在成分偏析。由表4、表5明显可以看出，各部位的力学性能均符合要求。说明此类有分区性能要求的长轴类锻件，通过开合炉进行分区调控加热式热处理的方式是可行的。

表4 外表面不同位置的力学性能

取样位置	不同温度下的冲击吸收能量/J								FATT50/℃	20℃ 屈服强度/ MPa	20℃ 抗拉强度/ MPa
	+30℃	+20	+15℃	0℃	-20℃	-40	-60	-80			
A径向	222	—	222	186	219	—	—	—	—	675/675	785/785
	217	—	215	216	223	—	—	—			
	204	—	210	221	233	—	—	—			
B径向	209	—	203	216	220	—	—	—	—	690/675	795/800
	208	—	215	211	243	—	—	—			
	204	—	202	230	236	—	—	—			
C径向	—	216	—	220	221	161	188	28	-75.3	715/720	825/825
	—	202	—	233	191	186	132	13			
	—	216	—	228	208	171	103	98			
D径向	—	186	—	205	215	161	107	138	-49.5	680/690	795/800
	—	214	—	219	209	166	63	6			
	—	207	—	230	230	182	133	55			
J径向	—	187	—	215	228	176	96	32	-43.4	730	835
	—	187	—	221	218	82	9	54			
	—	150	—	232	220	171	118	46			

表5 心部不同位置的力学性能

取样位置		0℃ 下的冲击吸收能量/J	FATT50/℃	20℃ 下屈服强度/MPa	20℃ 下抗拉强度/MPa
H	径向	137/147/137	-45.4	780	920
	轴向	142/152/139		795	915
E	径向	94/67/50	—	710	855
	轴向	121/94/85		705	855
F	径向	128/123/87	-13.2	680	825
	轴向	97/97/131		680	820
G	径向	145/119/114	—	685	820
	轴向	137/161/151		685	820
K	径向	194/212/190	—	730	845
	轴向	223/221/245		725	840

5. 结语

在开合炉温度均匀度为±5℃，且因炉体超长导致内部上下的温差更大的情况下，通过设计隔热板及在实际操作过程中监控调温，可以确保炉温在工艺要求的温

度范围内，以达到锻件性能满足要求的目的。此百万千瓦核电常规岛半速发电机转子锻件的成功研制，为今后此类长轴类锻件的再制造奠定了坚实的基础。

作者简介：彭亚敏、张超，中国一重天津重型装备工程研究有限公司。

MW 20170429