

大型铸锻件文集

HEAVY CASTINGS AND FORGINGS COLLECTED WORKS

(超临界机组大型铸锻件制造技术专辑)

第 二 期

一 九 九 〇 年

机械电子工业部重型机械科技情报网
大 型 铸 锻 件 制 造 分 网
德 阳 大 型 铸 锻 件 研 究 所

内部刊物 注意保存

大型铸锻件文集

DAXING ZHU-DUANJIAN WENJI

一九九〇年

第 二 期

编 辑：德阳大型铸锻件研究所

出 版：德阳大型铸锻件研究所

地 址：四川德阳市

邮政编码：618013

印 刷：四川省德阳报社印刷厂

出版日期：1990年12月

目 录

制造·开发

- 高铬铁素体系耐热钢的最新发展.....藤田利夫(1)
- 12%Cr钢电渣重熔转子的试制及转子轴颈部的堆焊.....森田益夫等(5)
- 超超临界压汽轮机用12%Cr耐热铸钢件的制造与质量评定.....中村裕交等(14)
- 大型汽轮机中压转子用12%Cr钢锻件.....Norio Morisada等(21)
- 先进汽轮机的12%Cr转子锻件的改进.....F. Ito等(26)
- 用电渣重熔法制造12%Cr转子用钢锭.....冈村正义等(34)
- 12%Cr钢蒸汽汽轮机转子的制造方法.....角田英治(40)
- 高温用蒸汽汽轮机转子.....藤田利夫等(41)
- 12%CrNi合金钢.....渡边修等(48)
- 超超临界压火力发电设备用12%Cr耐热铸钢缸体.....岩渊义孝等(50)

组织·性能

- 超临界汽轮机缸体铸件用12%Cr耐热铸钢的性能.....Y. Iwabuchi等(56)
- 低Si-12Cr耐热钢的蠕变断裂强度和显微组织.....朴翌旻等(63)
- 铬含量对高铬铁素体耐热钢蠕变断裂性能的影响.....刘兴阳等(75)
- δ 铁素体对12%Cr耐热铸钢的冶金特性及机械性能的影响.....岩渊义孝(82)
- 耐热钢的金属学研究.....Ekkehard Schnabel等(88)
- 12%Cr钢的热处理和机械性能的关系.....Kikuo Morita等(95)
- 在650℃下工作的耐腐蚀的马氏体钢.....M. Ф. Алексеев等(97)
- 电力工业用铁基耐热合金A286锻件的开发与制造.....S. Shikano等(100)
- 铁基高合金A286钢的倒V型偏析和脆性相的生成条件.....櫻井隆等(108)

高铬铁素体系耐热钢的最新发展

日本东京大学工学博士 藤田利夫

一、前言

高铬(8~14%Cr)铁素体系耐热钢的开发始于1940年。当时,英国率先研究出了用于燃气轮机涡轮盘、蒸汽轮机叶片的性能优良的高铬铁素体系耐热钢。其化学成分、热处理条件和蠕变断裂强度如表1所示。

笔者从1953年开始对高铬铁素体系耐热钢进行研究,于1956年开发出了TAF钢^(3,4),其600~650℃×10⁶小时下的蠕变断裂强度为H46钢⁽¹⁾的2~3倍。其后,

对TAF钢进行了进一步改进,开发出了焊接性能和加工性能优良的TB9、TB12钢,在此基础上又继续开发出了特别适于作汽轮机转子的TR1000、TR1150、TR1200钢⁽²⁾。目前,世界各国正对这种高铬铁素体系耐热钢进行研究。可以预料到,它将广泛地用于蒸汽轮机的转子、缸体、动叶片,燃气轮机的转子、涡轮盘,高温螺栓,锅炉管道以及用作高速增殖堆的燃料保护管、堆芯围板、蒸汽发生器的材料和核聚变堆的材料。

表1 高铬铁素体系耐热钢的化学成分、热处理条件和蠕变断裂强度

钢 号	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Nb	其它	热处理条件	10 ⁶ h时的蠕变 断裂强度(MPa)	
											600℃	650℃
H46(SUH600)	0.16	0.6	0.4	11.5	0.65	—	0.3	0.25	0.05N	1150℃油冷 650℃空冷	63	30
FV448	0.13	1.0	0.5	10.5	0.75	—	0.15	0.45	0.05N	1150℃油冷 650℃空冷	40	—
C422(SUH616)	0.23	0.6	0.4	13.0	1.0	1.0	0.25	—	0.7Ni	1060℃油冷 650℃空冷	70	30
HT-9	0.20	0.55	0.25	11.5	1.0	0.5	0.3	—	0.55Ni	1050℃空冷 760℃空冷	63	30
EM-12	0.10	1.0	0.4	9.5	2.0	—	0.3	0.4	—	1080℃空冷 785℃空冷	85	37
TAF	0.18	0.5	0.3	10.5	1.5	—	0.2	0.15	0.03B	1150℃油冷 700℃空冷	170	85

二、超超临界压火力发电设备用钢

在美国,估计2020年以前的电力资源开

发将主要依赖于燃煤火力发电而不是核电。因此,目前正在研究能够有效地提高热效率的超超临界压火力发电设备,预计蒸汽参数

为593℃、31.6MPa的600~800MW超超临界压火力发电设备将于1993年开始运行。

在日本,已经对用于593℃、31.6MPa以及650℃、35MPa蒸汽条件的火力发电设备进行了研究。模拟1000MW的蒸汽条件为593℃、10.2MPa的50MW火电设备已于1987年4月开始运行;蒸汽条件为650℃、10.2MPa的50MW火电设备于1989年10月开始运行。这些规划对决定世界上今后的发电设备的发展方向具有非常重要的意义。

目前,具有较高强度的蒸汽轮机转子用铁素体系钢是美国GE公司于20多年前开发出的11%Cr钢(GE)钢,但这种钢制造的转子的最高使用温度约为570℃左右;要使

蒸汽温度提高到593~650℃,必须开发出与此相应的新的低合金铁素体系耐热钢。

美国电力研究所(EPRI)将超超临界压的蒸汽参数定为593℃,即使再进一步改进11%Cr钢,也不能达到这个使用温度。笔者从1978年开始研究转子材料,现在已得到能够在650℃下工作的材料,其化学成分、热处理条件和蠕变断裂强度如表2所示。由表2可知,新研究出的TR1100~1200钢具有比GE钢更优良的高温强度;但因TR1150、TR1200钢的钨含量较高,因此有必要研究这种材料的转子在长时间使用中产生的脆化问题。

表2 超超临界压汽轮机转子的化学成分、热处理条件和蠕变断裂强度

钢号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Al
GE	0.19	0.65	0.3	<0.6	10.5	1.0	—	0.20	0.085	0.06	—
TR1100	0.14	0.5	0.05	0.6	10.5	1.5	—	0.17	0.050	0.04	0.002
TR1150	0.13	0.5	0.05	0.6	10.5	0.4	1.8	0.17	0.060	0.05	<0.005
TR1200	0.13	0.5	0.05	0.7	11.0	0.1	2.4	0.20	0.080	0.055	<0.005

钢号	热处理条件	10 ⁵ h时的蠕变断裂强度 (MPa)		备注
		600℃	650℃	
GE	1050℃油冷、570℃空冷、620℃空冷	70	—	566℃下使用20年
TR1100	1050℃油冷、570℃空冷、680℃空冷	120	65	593℃下使用
TR1150	1050℃油冷、570℃空冷、700℃空冷	160	85	621℃下使用
TR1200	1020℃油冷、570℃空冷、720℃空冷	200	100	650℃下使用

迄今为止,我们对转子材料已做了大量的开发研究,下面进行简要介绍。

由于GE钢的碳、氮含量较高,会使转子在长时间下的蠕变断裂强度降低,因此我

们在TR1100钢中,将碳含量从0.19%降至0.13%;将钼含量从1.0%增加到1.5%以稳定析出的 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 碳化物并达到固溶强化;将硅含量调整到0.05%以抑制碳化物

的析出减少偏析。这样使 TR1100 钢的使用温度比 GE 钢提高了 20~30℃。另外，我们在积极地添加比钼更能提高高温强度的钨的同时，将钼当量 ($Mo + 1/2W$) 控制在 1.2~1.5% 范围内，由此得到的 TR1100 钢的高温强度及常温下的韧性值如图 1 所示。从图中可以看出，钨含量在 3% 时蠕变强度最高，但常温下的韧性值降低。对于 TR1200 钢，考虑到其使用温度比 GE 钢高 80℃，故将回火温度从 GE 钢的 620℃ 提高到 720℃。

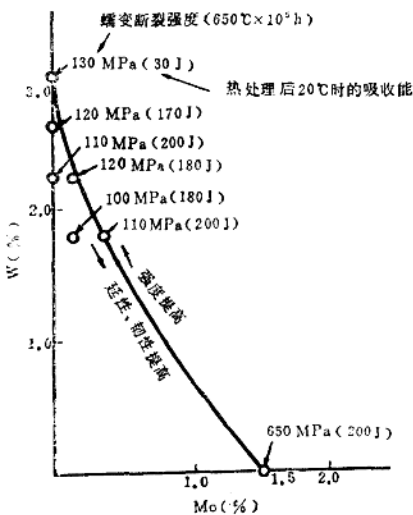


图 1 钨、钼含量与 TR1100 钢蠕变断裂强度和 20℃ 时的吸收能的关系

钢锭重量: 100kg~1000kg

热处理条件: 1020℃×5h→100℃/h→室温

空冷
710℃×20h→室温

另一方面，正在研究中的在 650℃ 下工作的转子用钢还有奥氏体耐热合金 Mod. A286 (15Cr-26Ni-1.5Mo-1.8Ti-0.2Al-0.3V) 和 Discaloy (13.5Cr-25Ni-3Mo-1.75Ti) 等。但由于奥氏体耐热合金钢的热膨胀系数大，热传导率小，因此材料产生的热应力大；

另外还有屈服强度低、容易引起热疲劳等缺点，因此我们认为 A286 合金不是需要每日开停的火力发电设备最合适的材料。

超超临界压火力发电设备比目前一般火电设备的温度参数高 50~100℃，因此我们对用于超超临界压汽轮机缸体、叶片、螺栓的各种铁素体钢、奥氏体钢也进行了研究。总之，若汽轮机转子为高铬铁素体钢，则缸体应用高铬铁素体钢；若汽轮机转子为奥氏体耐热钢，则缸体也必须采用奥氏体钢。

如前所述，由于奥氏体耐热合金钢不利于设备的频繁启动，因此对于重视经济效益的发电厂来讲，即便稍微降低一些蒸汽条件也宁愿采用高铬铁素体钢。笔者目前尚未对缸体、阀门、叶片、螺栓的高铬铁素体钢材料进行深入研究，仅就其成分和热处理条件进行了初步探讨。用于缸体等部件的高铬铁素体耐热钢的化学成分、热处理条件及用外推法计算出的蠕变断裂强度见表 3 所示。

三、高铬铁素体系耐热钢的热处理

用高铬铁素体钢制造直径达 1000~1200mm 的大型汽轮机转子时，转子心部的淬火冷却速度控制在 100℃/h。由于在淬火冷却中要析出相当多的碳化物，因此将碳含量控制在 0.12~0.13%，作为补偿，将氮含量增加至 0.05~0.06%，以提高材料的高温强度。由于降低了碳含量，淬火温度由以前的 1050~1100℃ 降至 1000~1030℃，为稳定高温强度，回火温度也由以前的 620~650℃ 增加到 700~720℃。

对于汽轮机叶片等较小的部件来说，增加碳含量可以提高高温强度。但碳含量在 0.2% 以上时，在工作时材料中的碳化物容易聚集长大。因此，将 $(C + 1.5N)\%$ 控制在 0.20~0.24%，即 0.18%C + 0.06%N 范围内。另外，选择在 1080℃ 淬火，750℃ 回火的热处理条件比较恰当。

表3 用于缸体等部件的高铬铁素体耐热钢的成分、热处理条件及蠕变断裂强度

钢 号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	B
TF1	0.10	0.5	0.2	<0.1	9	0.6	1.6	0.2	0.06	0.05	0.003
TF2	0.18	0.5	0.05	<0.1	11.0	0.2	2.4	0.2	0.06	0.025	0.010
TF3	0.18	0.5	0.05	<0.1	10.5	0.2	2.4	0.2	0.06	0.025	0.010

钢 号	热处理条件	10 ⁵ h时的蠕变断裂强度 (MPa)			备 注
		550℃	600℃	650℃	
TF1	1050℃空冷、730℃空冷	280	150	80	缸体、阀门用
TF2	1080℃油冷、750℃空冷	350	220	120	动叶片用
TF3	1080℃油冷、700℃空冷	350	220	120	螺栓用

为了提高高铬铁素体耐热钢长时间下的蠕变断裂强度和韧性、延性,在进行热处理时,加热至1020~1080℃(加热时间由温度决定)以便在淬火时留下百分之几的碳化物。为了尽可能地细化晶粒,提高韧性和延性,应在比使用温度高130~150℃的条件下回火2~3小时。

四、结 语

近年来用于超超临界压火电设备、高速增殖堆、核聚变堆的高铬铁素体耐热钢的发展引人注目,今后还需要对这种钢进行进一步研究,使之更加完善。以前认为,由于高铬铁素体耐热钢利用了回火马氏体的高强度、高韧性,只能在600℃以下使用,但经过我们的研究和改进,高铬铁素体耐热钢已能在650℃左右的温度下使用。笔者认为,如何发展高铬铁素体耐热钢,是决定未来的发电设备(超超临界压火力发电

机、高速增殖堆、核聚变堆)实际应用的关键。目前,日本对高铬铁素体耐热钢的研究已领先10~20年,我们期望能更深入、广泛地研究和开发高铬铁素体耐热钢,为世界电力开发技术的发展作出贡献。

参考文献

- (1) J.Z.Briggs and T.D.Parkdr: The Super 12%Cr Steels, Climax Moly Molybdenum CO., 1965
- (2) T.Fujita: Mgtal Progress, 130, 1986(2), 33~40
- (3) 芥川 武、藤田利夫: 学报第123委员会研究报告, 1960, 1(1), 17~43
- (4) T.Fujita: Trans.of JIM, 1968(9), 167~169

赵晓辉摘译自《热处理》,1987,Vol. 27, No1, 4~9

王 孜校

12%Cr 钢电渣重熔转子的试制

及转子轴颈部的堆焊

富士电机 森田益夫 小串泰三 吉江耕也

神户制钢所 木下修二 有田幸司 森田喜久男

前言

近年来,为了提高汽轮机的热效率,日本正在设计和建造中的大多数火力发电站都采用了566℃的再热蒸汽温度,而且,蒸汽温度和压力等参数还有进一步提高的倾向。另一方面,随着核电的比例的增加,对于火电设备的要求也相应提高,甚至要求大容量机组也要适应每日开停(Daily Start Stop)的工作条件以及具有良好的负荷跟踪性以承受峰值负荷的冲击。为此,我们开发了用于超超临界压火力发电设备的汽轮机高中压转子的12%Cr钢。12%Cr钢与现行的CrMoV钢相比,具有高温蠕变强度、高温低周疲劳强度及韧性更为优良的特点,可以说是更为合适的汽轮机用耐热材料。

但是,如果用电炉熔炼12%Cr钢,则存在两个问题⁽¹⁾:

(1)在钢锭底部容易析出以铬系氧化物为主的夹杂物,超声波探伤时会被检出。这类夹杂物作为一种缺陷存在会造成材料强度的降低;

(2)在钢锭底部出现碳的负偏析区,使该部位不能获得足够的强度。

对于这些问题,现在已经有了很多解决方法,其中最有效的一种就是电渣重熔(ESR)法。

另外,用12%Cr钢制造的转子在使用时

轴颈部还存在着容易粘结的问题。对此,可采用往轴颈部热装其它材质的套筒和对轴颈表面进行堆焊等方法。堆焊法能够保证转子的整体制造,使用的可靠性更高。

西德和美国曾报道过用ESR法制造12%Cr钢和CrMoV钢汽轮机转子的实例^(1,2),西德还报道过对12%Cr钢转子轴颈表面进行堆焊的实例。

为了确立用ESR法制造12%Cr钢转子的技术和12%Cr钢转子轴颈区的堆焊技术,保证制造出的转子和堆焊层的质量,我们用12%Cr钢模拟试制了1000MW的中压转子。试制转子的化学成分与机械性能见表1,转子的外形简图见图1。转子重30t,轴身直径为1270mm。

一、用电渣重熔法试制12%Cr钢转子

1. 电渣重熔法的特点

电渣重熔法是将用一般熔炼方法熔炼出的钢锭作为电极,另一端电极为用水冷却的铜铸型。两极间加入具有精炼作用的熔渣,通电后利用熔渣所产生的焦耳热对电极进行重熔,其原理如图2所示。

电渣重熔法具有以下特点:

(1)熔融的金属熔滴通过渣渣时,熔渣能够吸收、除去铬系氧化物,同时使其它的非金属夹杂物也明显地减少;

(2)水冷铜铸型使通过渣层的熔融金

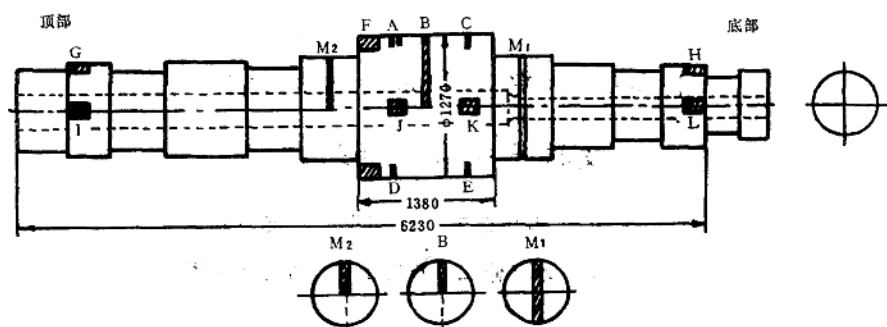


图1 试制转子的形状简图及取试位置

表1 试制转子的化学成分与机械性能

化 学 成 分 (%)									机 械 性 能				
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	0.2%屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	断面收 缩率 (%)	缺口夏氏 冲击值 (J)
0.20~ 0.26	<0.30	0.30~ 0.80	<0.020	<0.010	0.30~ 0.80	11.0~ 12.5	0.80~ 1.20	0.25~ 0.35	600~750	≤950	≥13	≥40	≥24

属迅速凝固，从而使重熔锭的组织变得致密且不容易产生偏析。

因此，用电渣重熔法制造的12%Cr钢转子的清洁度和成分的均匀性都很高。

2. 技术上的难点及其对策

选择12%Cr钢的化学成分时，应注意抑制会导致韧性降低的 δ 铁素体的产生。 δ 铁素体的析出与化学成分有关。我们在试制的转子中添加了一定量的、能够有效提高高温性能的钼和钒。同时，为了避免 δ 铁素体的析出，对其它化学成分也进行了调整。试制转子的包样分析值如表2所示。

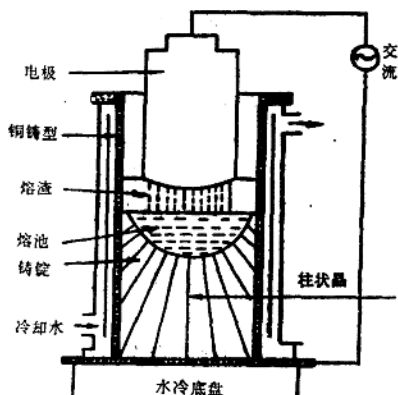


图2 电渣重熔原理图

表2 试制转子的包样分析值 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
0.21	0.25	0.44	0.015	0.008	0.04	0.42	11.60	0.90	0.28	0.002

为得到高质量的钢锭，电渣重熔应能满足三个条件：

- (1) 低氢；
- (2) 能得到均匀的凝固组织；
- (3) 重熔锭表面质量良好。

另外，铝含量是影响转子蠕变性能的重要因素，对于CrMoV钢，铝含量在0.015%以上时，会降低蠕变断裂性能。因此，在重熔过程中应尽量降低12%Cr钢的铝含量。我们对ESR的重熔条件进行研究^[3]，确认了铝含量因熔渣种类的改变而不同。在硅含量一定的情况下，使用含有CaO的熔渣比使用不含CaO的熔渣时的铝含量高，所以在电渣重熔时我们选择了能够降低铝含量的渣。另外，为使钢锭获得良好的表面质量，应该准确地控制重熔速度。

锻造采用大型水压机和上下宽V型砧（双V砧锻造），以保证钢锭内部能得到充分的锻造效果^[4]。

由于12%Cr钢的变形抗力大，因此在锻造前应该对钢锭进行高温加热。但是，如果加热温度达到奥氏体加铁素体的双相温度区域，那么锻后会残存 δ 铁素体，影响转子的机械性能。因此，锻造前的加热温度应选择在1180℃左右。虽然ESR钢锭内部几乎不存在空隙，但通过敏粗和双V砧锻造能够使钢锭获得有效的塑性变形，打碎枝状晶而获得均匀的细晶组织。水压机和操作机应该联动，锻造时使钢锭中心与转子轴心易于重合。

3. 制造过程

用60t电炉熔炼钢水制成电极，再用此电极重熔出直径1500mm、重50t的电渣重熔钢锭。然后将钢锭热送至锻造车间。如前所述，为了防止 δ 铁素体的产生，在严格控制加热温度进行加热后，用大型水压机对钢锭进行敏粗、拔长、精锻，锻成后的转子直径为1300mm，重量约为40t。

锻成后的转子经退火、机加工，用超声

波探伤确认其内部无缺陷后再进行淬火、回火处理。调质是给予材料一定强度和韧性的重要工序，12%Cr钢转子的调质曲线见图3所示。



图3 12%Cr钢转子的调质曲线

转子圆周方向性能的均匀性是非常重要的。为了保证这一点，将转子在井式炉中旋转，均匀加热，在1030℃时完成奥氏体化后油淬。为了促进残余奥氏体的分解，在540℃时进行了第一次回火；为了进一步调整机械性能，在680℃时进行了第二次回火；最后转子从回火温度开始炉冷以降低残余应力。

完成调质后的转子再进行精加工和检查。检查合格后，在转子轴颈部加工出坡口，经无损探伤确认坡口质量后，对转子轴颈部进行了堆焊。

二、转子轴颈部的堆焊

1. 技术上的难点及其对策

为了防止转子轴颈部的粘着和烧结，可在轴颈表面堆焊一层传热性能良好的低合金钢。为使母材（12%Cr钢）熔透，我们采用低碳钢堆焊根部。

堆焊时，应当采取措施防止焊接裂纹和夹渣、气孔等缺陷产生。由于12%Cr钢的相变点低、淬透性好，在低温下容易产生低温裂纹，所以我们尤其担心的是在转子轴颈部的焊接热影响区产生低温裂纹。为了选定能够防止低温裂纹产生的焊前预热及焊后保温温度，我们用与转子材质相同的

25mm厚的12%Cr钢板,按照JIS Z 3158标准进行了斜Y坡口焊缝断面裂纹测定试验。试验结果见图4。图中还给出了焊前预热温度为250℃时的焊后保温温度、保温时间与母材热影响区的焊道断面裂纹高度比的关系。同时我们对堆焊层熔敷金属进行了相同的低温裂纹测定试验。试验用的焊条与实际施焊时采用的焊条材质相同。按JIS Z 3157 U型坡口焊缝裂纹测定方法评定了低温熔化的敏感性。根据试验结果可以断定:选择200℃以上的焊前预热温度和200℃以上的焊后保温温度并分别保温2小时,就能有效地防止母材热影响区及焊缝熔敷金属区产生低温裂纹。

其次,为防止夹渣及气孔等焊接缺陷,在实际施焊时,我们用熔化极活性气体保护焊(MAG)焊机进行了模拟堆焊试验,掌握了能够避免裂纹等缺陷产生的焊接电流、电压、焊炬角度和焊接速度等焊接条件。

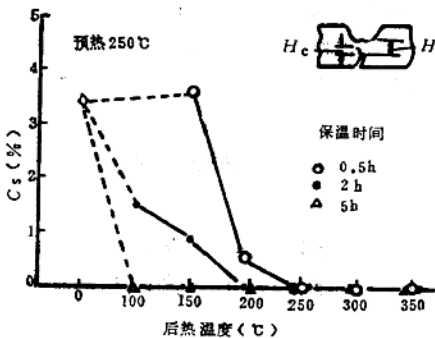


图4 焊后保温温度、保温时间与母材热影响区焊道断面裂纹高度比的关系

$$C_s = \frac{H_c}{H} \times 100\%$$

C_s —试验焊道断面裂纹高度比

H_c —根部裂纹高度

H —试验焊道最小厚度

2. 堆焊方法

对12%Cr钢转子轴颈区堆焊时,将转子置于转胎上转动,在轴颈区保温的条件下进行自动堆焊。焊接装置采用特制的熔化极活性气体保护焊(MAG)焊机。该焊机具有自动升降、伸缩及旋转功能,还装有焊丝供给装置、焊炬自动调整装置以及能完成焊道自动移位的程控编码器。

转子堆焊层的坡口形状见图5,焊接条件见表3。

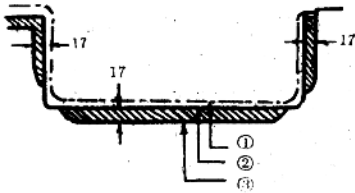


图5 堆焊区形状

- ①—堆焊熔合面
- ②—焊后精加工面
- ③—堆焊坡口面

表3 轴颈区堆焊条件

1	焊接方法: MAG焊接
2	焊丝: 低碳钢(根部) 1.2%Cr钢(中间层、表层)
3	温度: 预热……220~350℃ 层间……220~350℃
4	后热……300℃×2h 焊接条件: 电流……220~270A 电压……28~32V

堆焊完毕后,用电炉将轴颈部加热到300℃,缓冷至80~120℃后,再加热到650℃进行消除应力处理,以降低焊接区的残余应力。

三、转子性能的评定

1. 试验项目

我们对试制出的转子质量及性能进行了评定试验, 试验的项目见表4。化学成分及各种机械性能试样的取样位置如图1所示。

2. 无损探伤及热稳定性试验

从外周及中心孔对试制的转子进行超声波探伤和磁粉探伤。两种探伤所采用的灵敏度级别都很高, 但均未发现有任何缺陷。多次无损探伤检查的结果证明了用ESR法生产的钢锭不易形成氧化物夹杂物。

在650℃持续高温下进行了热稳定性试验, 转子轴心的振摆在测量限度以内, 验证了转子性能的均匀性。

3. 化学成分及组织检查

表5列出了转子各位置的主要成分及检验分析结果, 其取样位置参见图1。转子顶部的碳含量最高, 但整个转子碳含量的偏差没有超过0.04%。在轴身中间部位的偏差最

小, 为0.02%。其它元素的含量因位置不同而产生的偏差更小。

对转子各部位的试样进行金相分析, 结果证明转子各部位都是均匀的回火马氏体组织, 晶粒大小均匀。

表4 试制转子的评定试验项目

项目	试验内容	项目	试验内容
1	外周超声波探伤	12	夏氏冲击试验
2	外周磁粉探伤	13	脆性转变温度测定
3	中心孔超声波探伤	14	高温拉伸试验
4	中心孔磁粉探伤	15	蠕变断裂试验
5	热稳定性试验	16	常温、高温低周疲劳试验
6	残余应力测定	17	常温、高温裂纹扩展试验
7	硫印	18	断裂韧性试验
8	宏观组织检查	19	分段冷却试验(回火脆性试验)
9	微观组织检查		
10	清洁度评定		
11	拉伸试验		

表5 转子各位置的成分分析结果(%)

位 置		符 号	C	Ni	Cr	Mo	V
目标成分			0.20~0.26	0.30~0.80	11.0~12.5	0.80~1.20	0.25~0.35
顶 部 底 部	表 层	G	0.23	0.42	11.51	0.90	0.29
		A	0.23	0.40	11.53	0.90	0.29
		D	0.23	0.41	11.64	0.88	0.29
		C	0.23	0.40	11.66	0.88	0.29
		E	0.23	0.41	11.55	0.87	0.29
		H	0.22	0.40	11.41	0.89	0.28
顶 部 底 部	中 心	I	0.26	0.41	11.50	0.91	0.28
		J	0.25	0.42	11.68	0.90	0.29
		K	0.24	0.41	11.54	0.89	0.29
		L	0.23	0.40	11.50	0.87	0.28

在显微镜下用网格法检查了12%Cr钢的清洁度,没有发现硫化物、氧化铝、硅酸盐夹杂物,也没有发现按ASTM标准的高倍法分类的夹杂物,硅酸盐夹杂物根本不存在,冶金质量明显优于现行的CrMoV钢转子。

对转子截面进行了硫印和宏观组织检查,没有发现硫,这一点明显不同于CrMoV钢转子。也没有发现宏观偏析、宏观夹杂、晶粒不均匀、未锻合的气孔和裂纹等。

4. 机械性能

我们将分别从转子轴身和轴颈部所取的试样进行了拉伸试验和冲击性能试验,试验得出的机械性能见表6,取样位置参见图1。从表6可以看出:转子顶部轴端区的抗

拉强度稍高一些,我们认为这不是锻造、热处理造成的,而是因碳含量的偏差造成的。转子其它部位的抗拉强度的差别较小。转子轴身表层和心部在切向、径向、轴向上的抗拉强度的差别更小,不超过20MPa。转子各部位的0.2%屈服强度为656~687MPa,呈现出与抗拉强度相同的倾向。延伸率为16~20%,断面收缩率为48~56%,其偏差都很小。轴身心部的冲击值稍低。轴身表层的脆性转变温度($FATT$)为42~59℃,心部为65~69℃,偏差较小。

如图7所示,从转子轴身和轴颈部的径向切取长的拉伸试样,按照西德电站联盟(KWU)的检查方法进行了试验。这种方法能够很容易地求出转子截面上由于夹杂、

表6 抗拉试验和冲击试验结果

取试位置 (参照图1)			方向	抗拉试验				夏氏冲击试验	
				0.2%屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击值 (J)	FATT (℃)
轴身	表层	A	R	668	861	18	52	28	50
		C		659	845	16	53	28	59
		D		656	856	18	52	31	42
		E		659	852	18	56	27	55
	心部	F	T	679	868	20	49	31	42
		J		660	844	18	50	26	66
				665	850	18	49	26	65
		K		659	845	18	49	26	68
轴颈	心部		T	687	880	18	51	29	48
				681	885	18	48	29	50
		L	L	661	848	18	52	33	44

注: R—径向; T—切向; L—轴向。

偏析等造成的强度最低点的位置及强度分布情况。从试验结果可以看出转子轴身部拉伸强度最低点的值为800MPa，与表6所示的值大致相同。

以上试验证明：在转子不同位置、不同方向上性能的差异很小，转子心部的性能也能满足表层性能要求。这表明用ESR法制造的转子的性能的均匀性良好。

用从转子各部位取下的光滑试样作蠕变

断裂试验，试验在550℃、600℃温度下进行，试验时间最长约达7000小时。试验结果如图8所示。12%Cr钢的蠕变断裂强度数值都处于CrMoV钢转子的数据分散带内^[6]，而且因取样位置、方向不同而产生的断裂强度的差很小。用缺口试样进行试验得到的断裂强度值更高，没有发现缺口弱化的倾向。因此可以断定：12%Cr钢大型转子内外各部位均能得到足够的蠕变断裂强度。

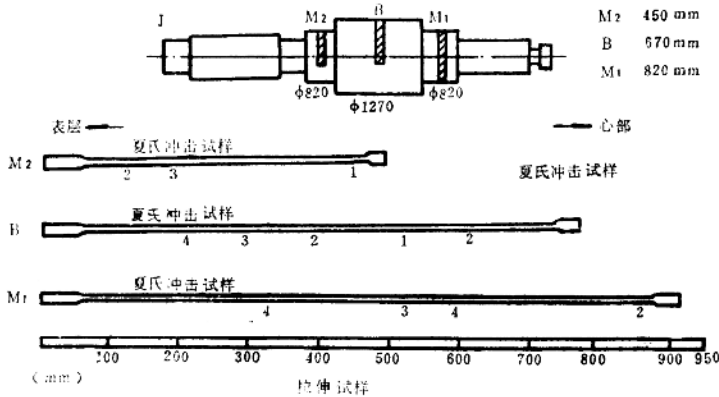


图7 转子径向心部的拉伸试验

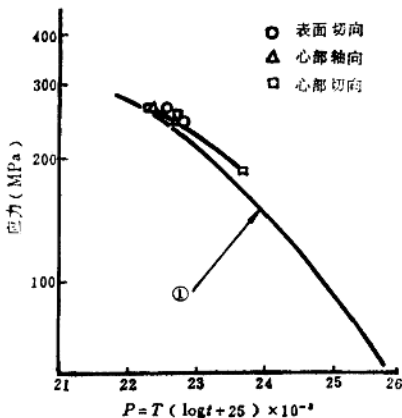


图8 蠕变断裂试验结果

①—CrMoV钢的数据(试验温度为550℃、600℃)；P—时间温度参数

对于开、停机频繁的设备，低周疲劳强度是特别重要的性能。我们从转子表面及心部取样，在常温、550℃、600℃下进行了低周疲劳试验。试验证明，12%Cr钢在高温下特别具有优良的低周疲劳强度。在550℃、600℃下进行的低周疲劳试验的结果见图9。由图9可以看出，12%Cr钢具有优于CrMoV钢的强度性能^[6]。除此之外，断裂韧性试验、裂纹扩展试验都得到了令人满意的结果。

用分段冷却法进行了回火脆化试验。在分段冷却前后，脆性转变温度(FATT)的变化很小，表层部为2℃，轴心部为5℃。这表明转子在高温下长时间服役后的脆化倾向很小。

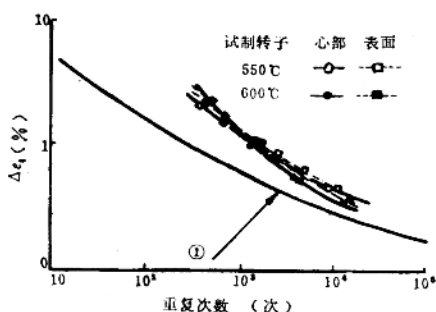


图9 高温低周疲劳试验结果

①—CrMoV钢的数据[6]

试验温度: 510~565℃

保温时间: 0~3h

四、堆焊的评定试验

1. 试验项目

对经过堆焊和焊后热处理的转子,进行了表面磁粉探伤、渗透探伤和超声波探伤。探伤后切断焊缝,检查熔敷金属各部位的成分分布、断面的硬度分布以及宏观、微观组织。另外,对熔敷金属部位和熔合线部位分别进行了抗拉试验、冲击试验以及疲劳试验,并对堆焊层表面及内部的残余应力分布进行了测定。

2. 无损探伤

经磁粉和渗透探伤检查,在堆焊层整个表面均未发现裂纹状缺陷和1.0mm以上的缺陷痕迹。

超声波探伤的频率为3MHz,采用双晶垂直入射法及45°、70°斜入射法,按AVG曲线进行评定。结果在转子母材的热影响区和熔合线均未发现缺陷,熔敷金属部也未检出裂纹状缺陷。

焊接检查结果证明,如果按照如前所述的正确的焊接方法用低合金钢对12%Cr钢转子轴颈部进行堆焊,并采用适当的焊后热处理方法,就能够得到合格的堆焊层。

3. 化学成分、硬度及组织检查

我们对焊缝金属的成分进行了分析。由于母材受热稀释,根部的铬含量增高,但随着覆盖层次的增加,铬含量逐渐降低,在堆焊层表面就能得到0.2%C、1.25%Cr成分的低合金钢。

断面的硬度分布如图10所示。在热影响区为HV230~260,在熔合线区为HV225~265,在熔敷金属区为HV210~250。微观组织检查结果表明,热影响区为回火马氏体组织,熔敷金属区为铁素体和珠光体的混和组织,在熔合线附近没有异常碳化物的聚集,整个焊接区的组织均匀、正常。

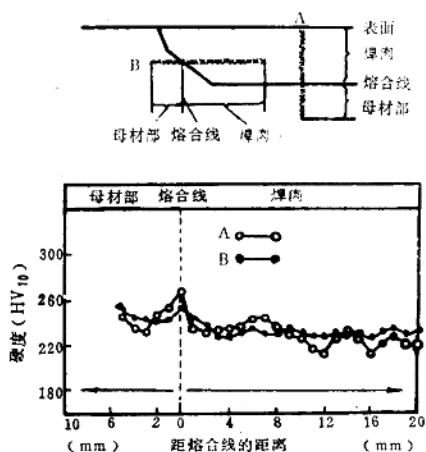


图10 轴颈堆焊层的硬度分布

4. 机械性能

图11列出了抗拉试验和冲击试验的结果。焊缝金属各部位及熔合线区的抗拉强度为699~753MPa, 0.2%屈服强度为577~645MPa, 冲击值为29~45J。

疲劳弯曲试验结果见图12。焊接熔合线附近的疲劳强度没有降低,为320MPa。由此证明焊缝熔敷金属区以及熔合线区都能得到与CrMoV钢转子相同的机械性能。

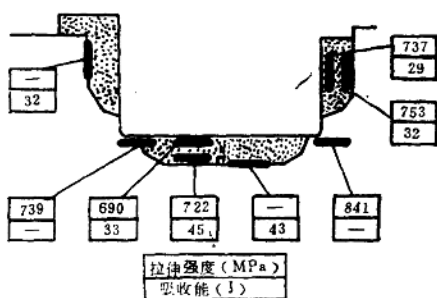


图11 轴颈堆焊层的机械性能

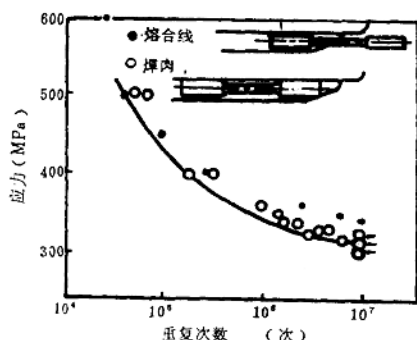


图12 堆焊层疲劳弯曲试验结果

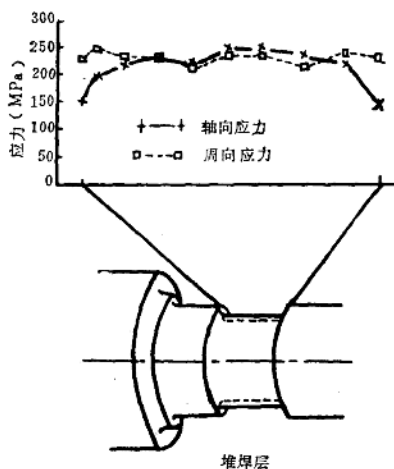


图13 堆焊层残余应力测定结果

5. 残余应力

图13列出了堆焊层表面及内部的残余应力。测定使用应变仪按分段法进行。残余应力在堆焊层表面表现为抗拉应力(250MPa)。这种残余应力是由于在焊后热处理过程中,12%Cr钢转子的母材与堆焊层熔敷金属的热膨胀系数不同而产生的。这个值比0.2%屈服强度值的二分之一还小,完全能够满足要求。

结 语

根据对ESR法试制的12%Cr钢转子所进行的质量评定结果和各种性能试验的结果,验证了ESR制造技术的正确性。ESR 12%Cr钢转子的最大特点是非金属夹杂物极少;从顶部到底部、从心部到外层,整个转子的化学成分和机械性能都很均匀。这是转子可靠使用的保证。另外,对转子轴颈堆焊层所进行的安全性评定、化学成分分析和机械性能测试都得到了良好的结果。

参考文献

- (1) A.Choubhry, R. Jauch, H. Löwenkamp and F. Tince: Stahl u. Eisen 1977 (97), 857
- (2) R.M. Curran, D.L. Newhouse and J.C. Newman: ASME 1982 Joint Power Generation Conference, Denver, October 1982
- (3) 网村, 广濑, 松本, 须永: 铁与钢, 1983, (69), 1028
- (4) 铃木, 木下, 森田, 菊地, 高田: 火力原子力发电 1983(4), 383
- (5) "Ergebnisse deutscher Zeitstandversuche langer Dauer" edited by Verein Deutscher Eisenhuettenleute Duesseldorf, 1969
- (6) "Rotor Forging for KWU-Designed Turbine-Generators" EPRI, 1980

赵晓辉译自《火力原子力发电》, 1984
Vol.35, No.8, 67~76

王 孜校

超超临界压汽轮机用12Cr耐热铸钢件的制造与质量评定

〔日〕 中村裕交 山田政之 角田英治 渡边 修

三室 弘 土原峰雄 岩渊义孝

前 言

目前,世界上正在开发和研究提高大容量火力发电机组热效率的新技术—超超临界压力(以下简称USC)机组^(1~3)。USC机组是在比现行的蒸汽参数(538℃/566℃、24.6MPa)更高的温度和压力条件下工作的。新技术的关键是采用高温特性更为优良的耐热材料制造机组的高温部件。

新技术的第一阶段是制造在566℃/566℃/566℃、31.6MPa蒸汽条件下工作的二段再热式汽轮机,例如正在设计制造中的日本中部电力公司700MW火电机组的1、2号机^(4,5)。

川越700MW火电机组的1号汽机上使用的超高压缸体、高温蒸汽阀、喷嘴室外壳等部件就是采用12Cr耐热铸钢制造的。这些高温部件如果使用1CrMoV铸钢制造,则必须大幅度提高部件的设计厚度。这样一来,由于起动、停止时内外部的温差增大,将引起过大的热应力,使机组承受因频繁起动、停止所产生的热疲劳的能力下降。因此,要将USC汽机铸钢件的壁厚控制在与现有机型相同的水准上,必须采用具有更高蠕变断裂强度的材料。为此,我们选定曾经用于制造中压双流式喷嘴隔板等小型部件的12Cr铸钢作为川越1号机大型结构件用钢。为了确保12Cr耐热铸钢的蠕变断裂强

度、延性和韧性,我们对材料的最佳化学成分和热处理条件进行了研究,并对材料的焊接性能和加工性能进行了试验。基于试验结果,实际试制了缸体、蒸汽阀及喷嘴室外壳,在确立了实际产品制造技术的基础上,对12Cr耐热铸钢的材料特性进行了验证^(6~8)。

本文介绍了为确立12Cr耐热铸钢件的制造技术所进行的开发研究,并对川越1号机铸钢件的健全性及材料特性进行了评定。

一、技术要点

为使12Cr铸钢能用于USC汽轮机,我们对下列技术要点进行了研究。

1. 在保证12Cr耐热铸钢具有与现行的1CrMoV铸钢相同的延性、韧性的基础上,为获得更高的高温蠕变断裂强度,我们对12Cr铸钢的最佳化学成分及热处理条件进行了研究;

2. 确定大型铸钢件的铸造和热处理技术;

3. 确立焊补及结构件的焊接技术、确保焊接接头的质量;

4. 确保铸件质量,特别是确保缸体法兰等厚壁部的质量;

5. 确保大型厚壁铸件各部位材料特性的均匀性。