

大型铸锻件文集

第八集

第二重型机器厂技术情报组编译

第一机械工业部情报所

一九七五年

大型鑄鍛件文集

第八輯

第二重型機器廠技術情報組編譯

康大韜

1977. 春

于东在

第一機械工業部情報所

一九七五年四月

出 版 說 明

本輯选编了第六届国际大锻件会议论文10篇。其中包括：400吨以上巨型钢锭在生产 和冶金方面的发展——工作应力与验收标准，大型锻造钢锭中的不均质性，杂质与合金元素对偏析的影响；偏析对真空铸锻件机械性能的影响，锻造钢锭内夹杂的来源，大型钢锻件中缺陷的主要情况，用电渣重熔钢改进大型高强度汽轮机叶轮的性能，核反应堆大型封头锻件的制造，核高压转子锻件的冶金学评定，以及大型锻件内部缺陷的超声波分类。

收入本辑的还有赴日考察团带回的资料：关于火力发电用汽轮机转子制造及其强度，大型铸锻件的无损探伤及强度和无损探伤的工厂标准等三篇。

以上资料可供从事大型汽轮发电机和核电站的设计、制造人员，有关大专院校和科研机构参考。毛主席说：“我们一定要认真学习外国好的经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒。”我们愿和读者一起按照毛主席的指示，为独立自主地、多快好省地发展我国的电力工业做出我们应有的贡献。

由于我们的政治水平与业务水平较低、翻译中难免有误，尚望读者批评指正，以利改进我们的工作。

编 者

一九七五年四月

大 型 铸 锻 件 文 集

(第 八 辑)

第二重型机器厂技术情报组编译

第一机械工业部情报所出版

四川省德阳印刷厂印刷

印数 1 - 1100

工本费每册3.60元

毛主席语录

列宁为什么說对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

坚持政治挂帅，加强党的领导，大搞群众运动，实行两参一改三結合，大搞技术革新和技术革命。

自力更生为主，争取外援为輔，破除迷信，独立自主地干工业，干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好經驗，也一定研究外国的坏經驗—引以为戒，这就是我們的路綫。

目 录

第一部分 第六届国际大锻件会议论文选编

1. 由直径3550毫米、重400吨的巨型钢锭制造的 锻 件…………… (1)
 第一部份——生产和冶金的发展
2. 由直径3550毫米、重400吨的巨型钢锭制造的 锻 件…………… (37)
 第二部份——工作应力和验收标准
3. 大型锻造钢锭中的不均质性、杂质和合金元素对偏析影响的研究…………… (79)
4. “A” 偏析对真空铸锭锻件的机械性能的影响…………… (91)
5. 锻造钢锭内夹杂的 来 源…………… (101)
6. 大型钢锻件制造中缺陷的主要 情 况…………… (114)
7. 大型高强度汽轮机叶轮性能的 改 进…………… (154)
8. 核反应堆大型封头锻件的 制 造…………… (167)
9. 核高压转子锻件的冶金学 评 定…………… (189)
10. 大型锻件内部缺陷的超声波 分 类…………… (203)

第二部分 赴日考察团带回资料

11. 关于火力发电用汽轮机的制造法及其 强 度…………… (214)
12. 大型铸件的无损探伤及强度…………… (265)
13. 无损探伤的工厂标准 (汽轮发电机与汽轮机转子) …… (269)

由直径3550毫米、重量400吨的巨型钢锭制造的锻件

第一部份——生产和冶金的发展

〔日〕 川口三郎等著

1. 引言

在1970年第5届国际锻造会议时，曾经宣读了几篇论文，都谈到用300吨以上的钢锭来生产大型锻件问题。德福勒斯特先生和纽豪斯先生的报告，预料还需要更大的四极发电机转子锻件，直径和重量要更大而不降低任何质量和可靠性。

自1969年以来，日本制钢所使用了真空除气的400吨钢锭，成功地生产整体的四极发电

图 1

从真空室取出的400

吨钢锭

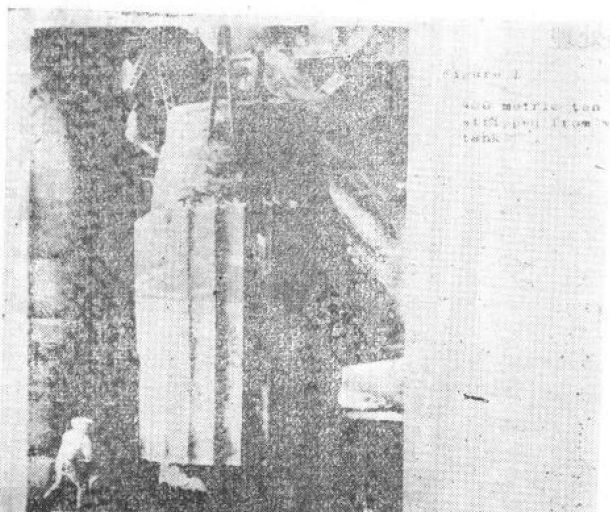


图 2

巨型发电机锻件的锻造

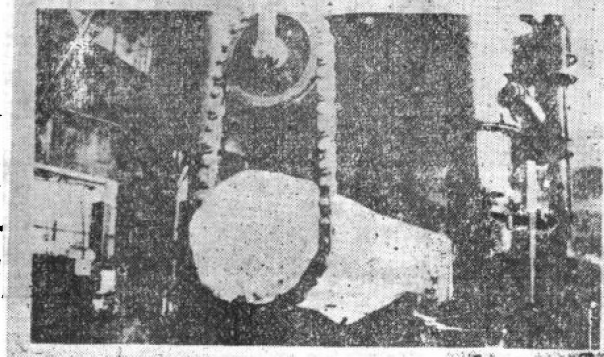


图 3

预先热处理

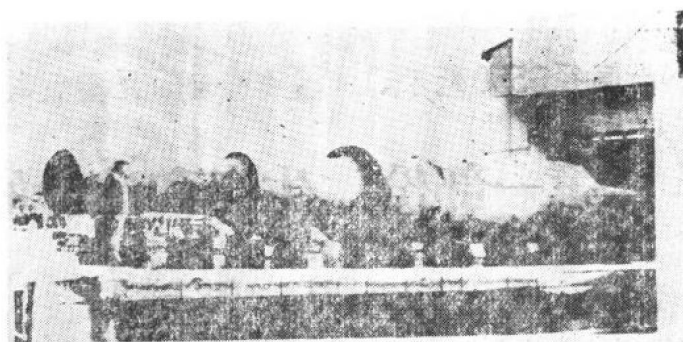


图 4

质量热处理

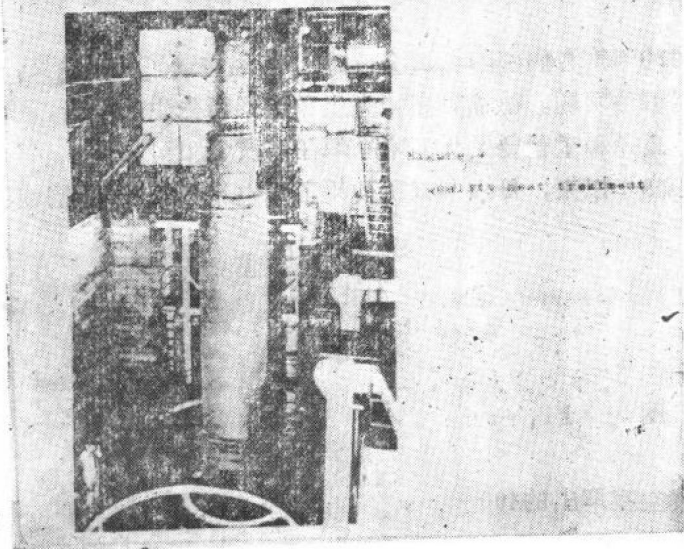
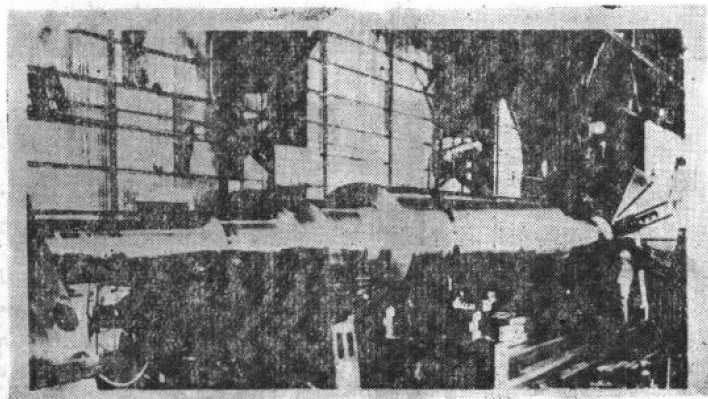


图 5

巨型发电机锻件的机械加工



机转子，特厚板轧机的支承辊和30000吨锻压机的锻件，其中大多数是发电机转子。

钢锭由5台炉子连续浇注，然后由第6台炉子补浇，图1。钢锭的主要尺寸如下：

平均直径：3,550毫米（140吋）

锭身长度：4,180毫米（164吋）

总重：约400吨（881,000磅）

H/D比值：1.2

锻造用10000吨水压机进行，如图2所示。图3说明预先热处理炉（卧式）和成品锻件。在机械粗加工和检查之后，锻件在新的热处理设备中用喷水淬火和回火，图4。在精加工后，如图5所示，锻件就送交用户。

在制造这些整体锻件过程中，我们曾碰到几个冶金问题；其中有二个问题将在本文中第一部份加以讨论：

“由各种成份合金钢所制成的大型四极发电机转子的性能及其冶金评价”。

“整体锻件的合金偏析和内部均质性以及制造过程的有关发展”。

在本文的第二部份，欣恩博士和希福斯坦将讨论1500和1800转/分的汽轮发电机组的发展并着重于发电机转子锻件上。

2. 大型锻件的性能

2-1 总 论

自从在1969年头一次生产400吨钢锭以来，制造发电机转子整体锻件已使用了四种钢号。在本章中，将讨论每种钢号的性能。表1列出了这四种钢号的典型成份。

表 1

材 料	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
2%Ni-Cr-Mo-V	0.26	0.25	0.40	2.0	1.25	0.4	0.1
2.8%Ni-Cr-Mo-V	0.26	0.05	0.40	2.8	1.70	0.4	0.1
3.5%Ni-Cr-Mo-V	0.24	0.05	0.30	3.5	1.70	0.4	0.1
3.5%Ni-Mo-V	0.22	0.25	0.35	3.5	-	0.3	0.1

这些钢号的一般特性如下：

2%Ni-Cr-Mo-V钢——在欧洲通常使用这种钢，用来生产直径约在1000毫米以下的发电机转子，具有良好的强度和延性。

2.8%Ni-Cr-Mo-V钢——这种钢也用于欧洲，强度和延性有所改进，比2%Ni-Cr-Mo-V钢高。

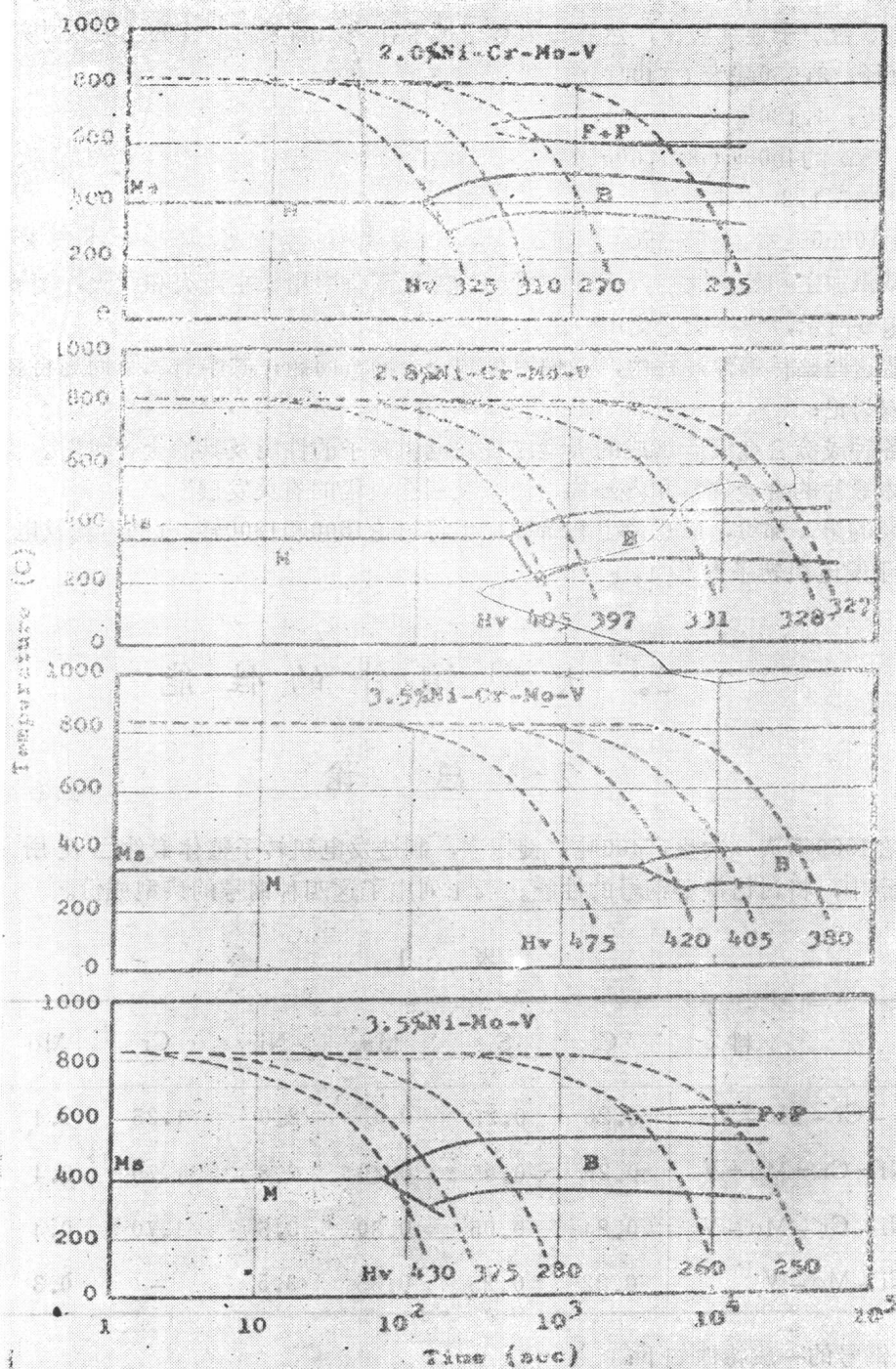


Figure 6 C-C-T diagrams of four steels

图 6 四种钢的C-C-T图

3.5%Ni-Cr-Mo-V钢——自1960年代初期以来,这种钢,因为它在低温下高强度和好延性的结合非常突出,而被广泛用于低压汽轮机转子。在目前,在美国、欧洲和日本,大部份低压汽轮机转子和一些发电机转子都是用这种钢制造的。

3.5%Ni-Mo-V钢——在美国和日本广泛采用这种钢,它具有高的强度和良好的延性。

在图6中比较了这四种钢的C-C-T特性曲线。一般说来,大型转子锻件中心部份的微观组织完全是贝氏体,但有时候有少量铁素体。有铁素体是不好的,因其对机械性能有不利影响。3.5%Ni-Cr-Mo-V和2.8%Ni-Cr-Mo-V钢,用于大型转子锻件材料,具有良好的相变性能,因为如C-C-T特性曲线所示,以通常使用的从奥氏体化温度的冷却速度,可认为是没有铁素体的。另一方面,2%Ni-Cr-Mo-V钢被认为是一种质量大小与横断面积对冷却速度的影响很敏感的材料。

为了取得冷却速度的数据,曾将一个试验的转子锻件,直径1800毫米,在其喷水淬火时,用一些热电偶插在表面以下的不同深度处测量它的温度分布情况。这些试验结果示于图7。在该图中,也表明了1020和1370毫米直径的转子锻件的冷却曲线。用喷水淬火,这是最有效的冷却方法,在直径为1800毫米的转子锻件的心部,冷却速度大约只有63°C/时

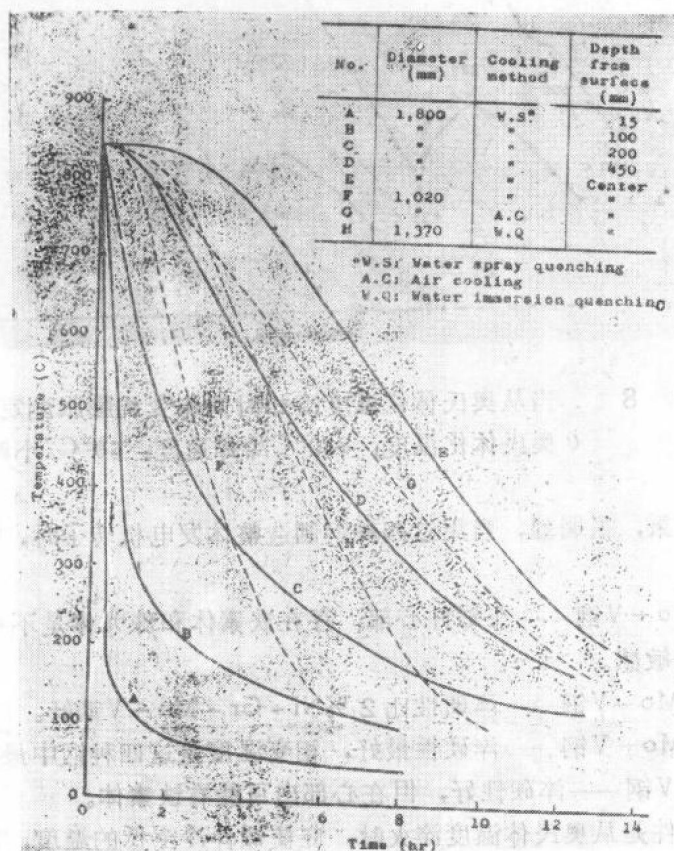


图 7 直径1800毫米转子锻件的冷却曲线

($800-300^{\circ}\text{C}$)。而直径为1020毫米的锻件(传统的、用旧式燃料的火力发电机转子的典型代表)的心部冷却速度则约为 $167^{\circ}\text{C}/\text{时}$ ($800-300^{\circ}$)。这个冷却速度相当于1800毫米直径的转子锻件表面以下200毫米处所发生的冷却速度。在1800毫米直径喷水淬火的锻件心部的冷却速度,差不多相当于1020毫米直径空冷转子锻件心部的冷却速度。

从上述数据看来,十分明显,巨型转子锻件的质量大小对热传导的影响,要比较小的一般发电机转子锻件的大得多。使用表1所示的钢种的整体发电机转子锻件的相变性能可从图6所示的C-C-T特性曲线和图7所示的冷却曲线近似求得。但是,在实际的大型转子锻件中,微观合金偏析对相变性能的影响也必须加以考虑。因此进行了一系列的实验,模拟巨型转子锻件心部的相变性能,以便预测这个关键位置的有关微观组织。这些实验是用实际的大型转子锻件上取下的试样进行的。

上述实验的结果,例如关于1800毫米直径的转子锻件的冷却曲线,都概括在图8中。2%Ni-Cr-Mo-V和3.5%Ni-Mo-V钢有二个相变阶段,而其它的二种钢则只有一个相变阶段。

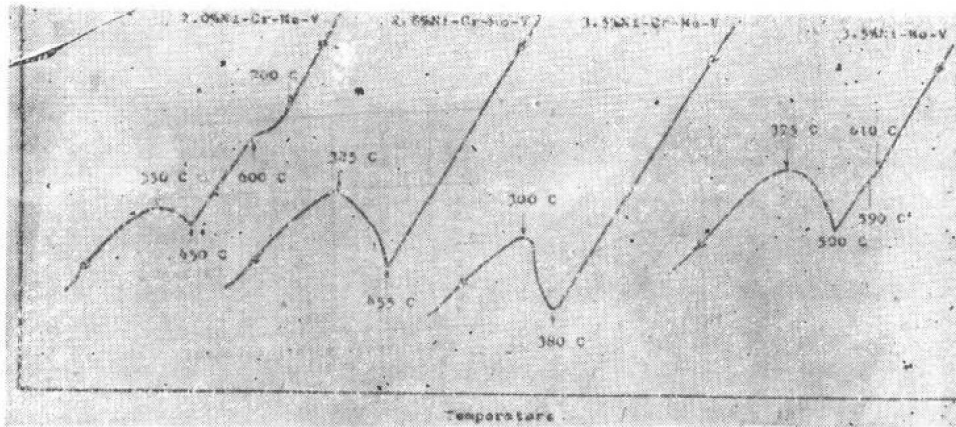


图 8 当从奥氏体化温度冷却时对相变的膨胀测定研究
(奥氏体化温度: 840°C 冷却速度: $60^{\circ}\text{C}/\text{小时}$)

根据上述试验结果,很明显,当用这四种钢制造整体发电机转子时,必须考虑它们下面的一般特性:

2%Ni-Cr-Mo-V钢——在锻件心部,存在铁素体和珠光体是不可避免的,因此,这种钢对合金偏析很敏感。

2.8%Ni-Cr-Mo-V钢——淬硬性比2%Ni-Cr-Mo-V钢好。

3.5%Ni-Cr-Mo-V钢——淬硬性最好,相变温度是这四种钢中最低的。

3.5%Ni-Mo-V钢——淬硬性好,但在心部内可能有铁素体。

如果整体转子锻件是从奥氏体温度淬火时,应使锻件冷至低的温度,以免发生裂缝,然后再加热,以便回火。在这种情况下,相变必需在回火之前完成。表2表明了镍含量对于Bf和Ms之间的温差的影响。为了实现完全相变起见,锻件中心一定要冷却到Bf和Ms之间

的温度并在该温度下保温。因此, 如果Bf与Ms之间的温差比较大, 那么保温温度的选择就比较容易。按照这个观点, 从表2可明显看出, 对于3.5%Ni-Cr-Mo-V钢所需的保温温度就限于很窄的范围内。在2.0%Ni-Cr-Mo-V钢和3.5%Ni-Mo-V钢的情况下, 由于Bf与Ms之间的温差很大, 保温温度的选择就十分容易。

表2 镍含量对Bf和Ms温度的影响

钢 号	Bf (C)	Ms (C)	Bf-Ms (C)
2.0%Ni-Cr-Mo-V	409	361	48
2.8%Ni-Cr-Mo-V	348	340	8
3.5%Ni-Cr-Mo-V	336	340	-4
3.5%Ni-Mo-V	464	376	88

注: a、化学成份: 如表1所示

b、Bf和Ms的计算: 按斯蒂文和海涅斯

2-2 2%Ni-Cr-Mo-V钢巨型发电机转子锻件的性能

曾用这种钢制造了四个巨型发电机转子锻件。所有这些转子锻件都是用初期生产的400吨钢锭制造的。所以, 要研究与400吨钢锭生产有关的基本问题, 同时也精细地估计2%Ni-Cr-Mo-V钢的冶金特性。

在1960年代, 生产一般的2%Ni-Cr-Mo-V钢转子锻件共同做法都想达到含碳量0.3%或者更高一些。在1969年, 已规定含碳量为0.3%或者更低一些, 以便改善转子锻件的韧性。由巨型钢锭制成的转子锻件含碳量的标准是重要的, 经验表明, 在这种钢中, 如果含碳量超过0.4%, 在热处理时, 开裂的趋势就会增加。另一方面, 为了保证满足规定的屈服强度, 转子锻件底部负偏析区的含碳量必需够高。应当指出, 2%Ni-Cr-Mo-V钢转子锻件的内部屈服强度大大受到碳偏析的影响。通常, 钢锭顶端的碳含量最高, 从而导致达到最高的屈服强度, NDTT(无延性转变温度)也达到最高值。因此, 为了降低NDTT, 钢锭顶端的含碳量就必须维持低的实用标准。

基于上述考虑并结合其它的一些基础研究, 用于整体发电机转子锻件的含碳量, 其最低值选定为0.2%, 以保证满足规定的屈服强度。同时也规定含碳量不得超过0.4%。所以, 根据西德电站联合公司(Kraftwerkunion AG)所规定的含碳量(0.24~0.30%), 钢水包的最終含碳量选定为0.26%。

如前所述, 2%Ni-Cr-Mo-V钢整体转子锻件的心部, 出现铁素体和珠光体是不可避免的, 这就对NDTT产生不利影响。为了改善NDTT, 曾试用了一些处理方法, 诸如把奥氏体晶粒大小细化和维持屈服强度的最低要求。经验表明, 大型转子锻件的奥氏体晶粒大小要

受到最终热处理，以前的热过程（例如锻后的退火工艺）的影响。因此，在把锻件提交最终热处理之前采取了正确的处理方法。最终热处理的奥氏体化温度会选定在允许的下限上，以避免不必要的晶粒长大。

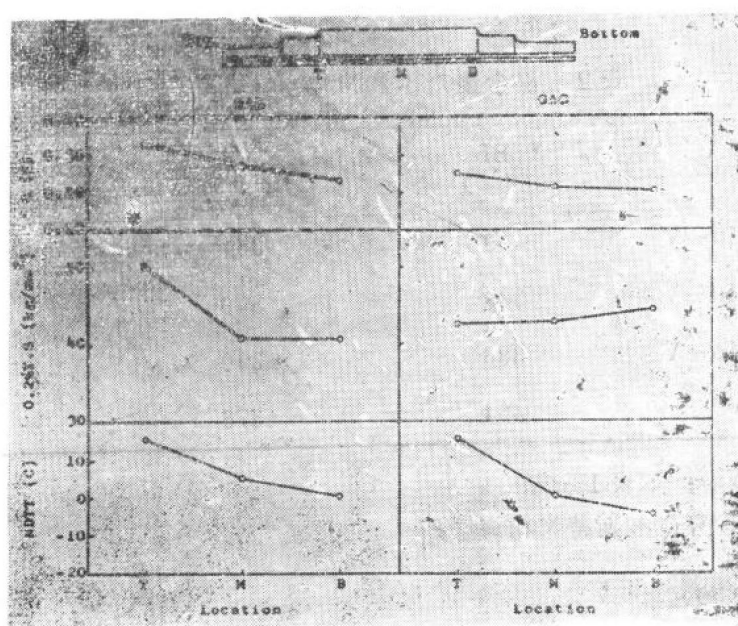


图 9 沿轴向心材偏析对机械性能的影响（纵向试样）

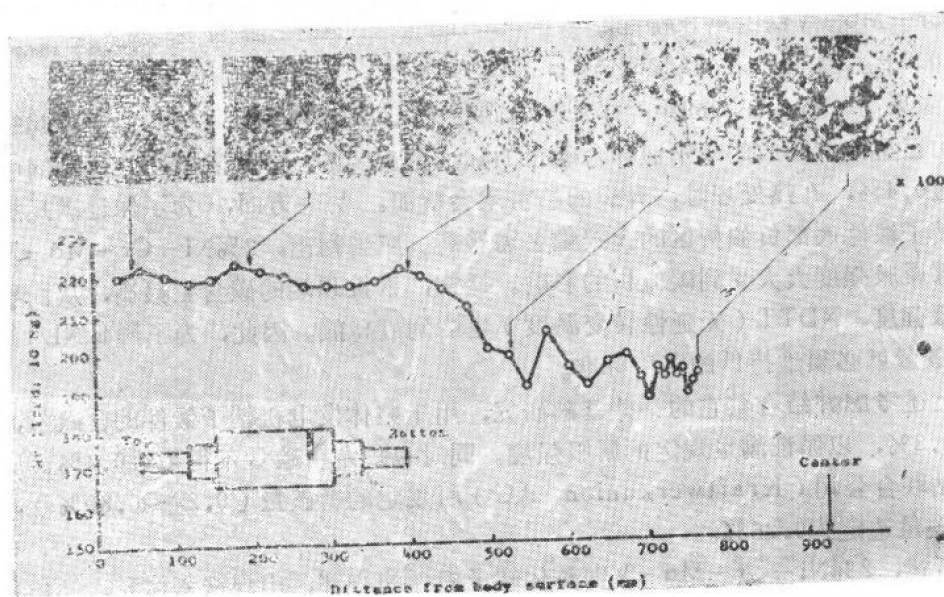


图 10 从表面到中心的硬度分布情况与显微结构距轴身表面的距离

四根2%Ni-Mo-V钢的巨型转子锻件的外形尺寸，化学成份和热处理情况均列于表3中。材料的试验结果均列于表4。这些试验结果都满足了规定要求。本体表面与芯部之间屈服强度的差别（认为与芯部存在铁素体与珠光体有关）是很显著的。底端中心的屈服强度正好在规定值40公斤力/毫米²以上。顶端芯部的NDTT则低于20°C。

图9表示了表3的GAB和GAC转子轴向芯部的性能。GAB转子的碳偏析范围颇大，含碳量的最大值和最小值之间的差为0.11%。因此锻件顶端的屈服强度和NDTT都比较高。GAB和GAC转子的比较清楚表明，这种钢的机械性能明显地受到碳偏析的影响。在微观合金偏析的重大影响下，正如前述模拟冷却试验结果所料，其中心的微观组织都是由贝氏体，铁素体和珠光体组成。

从转子表面到芯部硬度和微观组织的分布情况示于图10。在离表面约400毫米附近，由于铁素体和珠光体的出现，硬度开始急剧下降。

在开始制造2%Ni-Cr-Mo-V巨型转子锻件之前，为了确定正确的热处理周期，考虑了C-C-T特性曲线图和模拟冷却试验所预示的大质量对热传导的影响，进行了很多研究。实际获得的质量优劣几乎和预期的一样。在这些转子锻件的碳偏析略大于400吨钢锭生产初期所期待的碳偏析。此后，减小400吨钢锭的碳偏析方面，已经得到改进，如下列数据所示。

2-3 3.5%Ni-Mo-V钢巨型发电机转子锻件的性能

在美国和日本广泛用3.5%Ni-Mo-V钢制造发电机转子锻件，在台尔尼召开的前一届锻造会议上，史密斯和哈特曼宣读了一篇关于用这种钢的318吨钢锭制造发电机转子锻件的极好论文。

迄今为止，日本制钢所曾用这种钢制造了六根巨型的发电机转子锻件。这些锻件的有关

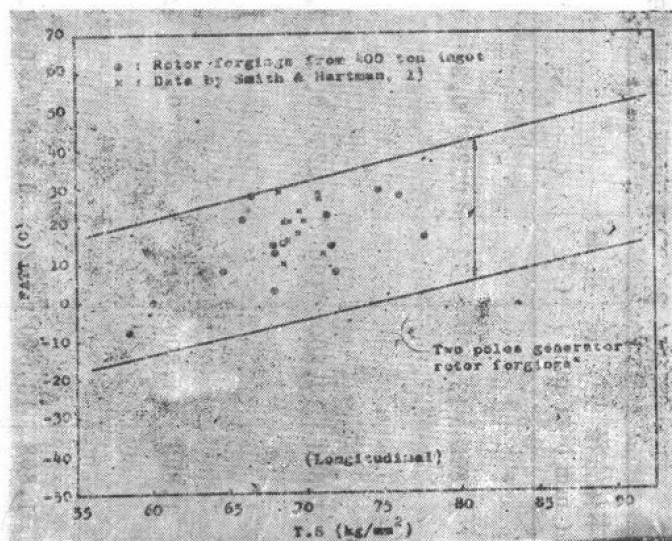


图 11 在3.5%Ni-Mo-V发电机转子锻件的
中心截面上的抗拉强度与冲击性能

代表数据列于表5。表6表明了这些锻件的机械试验结果。这些试验结果完全满足了规定要求。

图11表明了芯部的抗拉强度和FATT之间的关系。也列出了史密斯和哈特曼所报告的数据。在把巨型转子锻件的数据与普通较小的发电机转子锻件的数据相比较时，没有发现重大差别。

表7表明了表5所示的GBB和GBF转子分段冷却所估计的回火脆性敏感性，这些结果证实了，这种钢对回火脆性不敏感的普遍认识。

表4 2%Ni-Cr-Mo-V钢发电机转子的机械性能

Table 4 Mechanical properties of 2%Ni-Cr-Mo-V generator rotor forgings

Location	Roster	Body surface												Body center											
		ST						SB						CT						GB					
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
0.2%R _p (kg/cm ²)	T ^a	59	-	-	50	59	59	59	59	51	42	-	-	40	42	-	-	41	43	-	-	41	43	-	-
	L ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	56	50	44	-	-	42	43	-	-	42	44	41	-	-	-	-
0.2%R _p (kg-c)	T ^a	16	-	-	10 ^c	15	9 ^b	-	2	5	-	-	3	4	-	-	4	4	-	-	7	7	9	-	-
	L ^b	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	-	-	4	5	-	-	7	7	9	-	-	-	-	-
FATT (°C)	T ^a	-	-	-	-	-	-	-	-	20	5	-	-	5	5	-	-	0	-10	-	-	-	-	-	-
	L ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	10	15	20	-	-	5	0	-	-	0	-5	-	-	-	-	-

a: Tangential specimen, b: Longitudinal specimen, c: At -200

图12表明了GBE转子芯部的合金偏析、机械性能和微观组织等的轴向分布情况。在这种情况下，所得的合金偏析比对2%Ni-Cr-Mo-V钢所看到的偏析要少一些。应该认为，这是根据2%Ni-Cr-Mo-V钢锭生产的初期经验，再加上采用正确的处理方法而得到的成效，顶端和底端之间屈服强度的差别并不那么大，但是FATT的差别是显著的。FATT的这个变动不能单独用合金偏析加以解释。然而，从图11所示的抗拉强度与FATT的关系看来，可以认为这根巨型转子锻件的FATT与普通的发电机转子锻件的FATT几乎相同。受到微观合金偏析影响而出现的铁素体，则和1800毫米直径的锻件心部模拟试验所预示的一样。

2-4 3.5%Ni-Cr-Mo-V钢巨型发电机转子锻件的性能

迄今为止，已生产了二根3.5%Ni-Cr-Mo-V钢整体转子锻件。这种材料曾广泛用于

表5 用400吨钢锭制成的6根巨型的3.5%Ni-Mo-V钢发电机转子锻件

转 子	本体直径 (mm)	总 长 (mm)	重 量 (吨)	化 学 成 份 (%)						质 量 热 处 理		
				C	Si	Mn	P	S	Ni		Mo	V
GBA	1,706	14,200	158	0.21	0.24	0.40	0.008	0.010	4.01	0.46	0.12	900 C.39小时 - 风机冷却
												820 C.41 " - 喷水冷却
												640 C.57 " - 炉冷
GBB	1,632	16,480	155	0.17	0.22	0.27	0.011	0.013	3.62	0.27	0.13	900 C.32小时 - 风机冷却
												810 C.39 " - 喷水冷却
												620 C.54 " - 炉冷
GBC	1,714	14,926	175	0.21	0.06	0.28	0.008	0.008	3.53	0.20	0.11	920 C.40小时 - 风机冷却
												820 C.51 " - 喷水冷却
												630 C.60 " - 炉冷
GBD	1,706	14,550	158	0.20	0.23	0.41	0.009	0.008	3.50	0.36	0.09	900 C.38小时 - 风机冷却
												820 C.47 " - 喷水冷却
												635 C.58 " - 炉冷
GBE	1,651	12,655	127	0.19	0.21	0.43	0.007	0.008	3.54	0.31	0.13	900 C.43小时 - 风机冷却
												820 C.31 " - 喷水冷却
												630 C.58 " - 炉冷
GBF	1,685	15,310	176	0.22	0.23	0.33	0.009	0.008	3.55	0.36	0.12	900 C.35小时 - 风机冷却
												820 C.42 " - 喷水冷却
												635 C.58 " - 炉冷