

大型铸锻件文集

《第八届国际锻造会议论文集》特辑

第二十六集

第一重型机四厂

1980年3月

目 录

1. 汽轮发电机转子的目前和未来要求 (西德)	1
2. 目前重型转子锻件用钢锭的各种生产方法在操作、冶炼和经济方面的比较 (奥地利)	38
3. 化学成分和残余元素对CrMoV钢汽轮机转子韧性和蠕变性能的影响 (美)	48
4. 反应堆压力容器重型锻件要求、设计、检验 (西德)	69
5. 高强度钢锻件特殊冶金工艺的应用 (东德)	89
6. 自由锻造拔长时钢锻件内凹材料的不均匀流动和内凹缺陷的焊合 (捷)	94
7. 采用亚临界热处理方法改善转子能工业用碳钢和低合金钢锻件的切口韧性 (美)	109
8. 重型锻件锻造用的设备和自动化 (日)	129
9. 采用250吨操作机和计算机控制的自由锻造水压机自动化的发展 (西德)	149
10. 世界最大的水轮机转轮 (美)	161
11. 水利机械制造用铬钢铸件 (奥地利)	164
12. 大型13%铬钢铸件的生产 (英)	173
13. 大型卡普兰式转轮叶片的铸造 (西德)	179
14. 对含微量碳的13%铬钢的转变行为的研究 (东德)	188
15. 应用铬钢生产水轮机铸件 (奥地利)	195
16. 高炉料钟和料斗用粉末带极堆焊 (苏)	198
17. 高炉设备零件的电芯应堆焊强化 (苏)	200
18. 高炉料钟的制造 (日)	203

汽轮发电机转子的目前和未来要求

(西德) U·史费尔斯泰因 W·怀曼

提 要

近些年来,以及在最近一次锻造师会议上,发电厂联盟(KWU)(1~4)及其锻件供应者(5~12),就大型汽轮机和发电机转子锻件的制造、试验和性能,以及它们今后发展的要求和设想,反复地作了报告。有些报告集中论述了交货重为172~247吨的直径1800毫米级的四级发电机转子(2、3、6、7),亦即包括了迄今生产过的最大型转子锻件(3、7)。

这些报告对所需锻件的性能、尺寸和数量提出了具体问题。本文试图(当然是从发电厂联盟的角度)提供一些能回答这些问题的情报。为此,我们先回顾一下迄今的发展情况,并展望未来的要求。可以看到,由于采用空体转子,一个包括对空体横截面进行检验的发展规划已付诸实行,以便有计划地改善锻件性能。

本报告将要论述试验结果所显示的锻造比对转子材料使用性能的影响。通过这些转子的试验结果可以验证,能否采用1%CrMo(Ni)V钢,为今后的大型汽轮发电机生产高压和中压转子。

1、电力需要量

近些年来,民用和工业用电量日益增大,这就要求提高汽轮机制造厂的生产能力。这样作导致的结果是:发电机组平均功率不断提高,每年安装机组台数不断减少。

对于很多汽轮机制造者来说,这种趋势必

将成为现实。这种趋势和对全世界的未来电力需要量所能作出的全判断是完全一致的。

图1是对2000年所作的许多估计中的一个例子(13)。这些估计是各不相同的,但有一点是一致的,即电力需要量增长如此之高,以致只有生产大功率的汽轮机组才能满足电力需要。

2、汽轮发电机及其转子 锻件的型式

具有不同初始蒸气参数的各种蒸汽发电系列,要求设计相应的汽轮机组。在汽轮发电机设计中形成的两个主要系列是:

a、具有高的(过热)初始蒸气参数的汽轮发电机系列(标准参数:主管和再热蒸气温度540℃,主蒸汽压力250巴),如图2的KWU—HMN系列(KWU—HMN译为发电厂联盟—高压、中压、低压汽轮机)。

b、具有低的(饱和)初始蒸气参数的汽轮发电机系列(标准参数:主蒸汽温度265℃,再热蒸气温度225℃,主蒸汽压力60巴),如图3的KWU—SN系列(KWU—SN译为发电厂联盟—饱和蒸汽低压汽轮机)。

根据额定功率,每种系列可以制成全速机组(50~60转/秒)或半速机组(25~30转/秒)。当然,HMN和SN两种系列的汽轮机组皆可按双轴串列混合式排列,但发电厂联盟认为,采用这种方法在经济上没有优点。采用单轴或双轴排列方式,对汽轮机转子锻件的需要量没有影响。

HMN系列的汽轮机(图2)包括一台高压汽轮机、一台中压汽轮机和一至三台低压汽轮机。

高压和中压转子采用1%CrMo(Ni)V钢制造,因为它们具有高的运转温度(图2中划阴影线者)。

图4所示为高压转子,图5为中压转子,图中的H15—250和M15—250型转子计划用在以后的HMN电机上(额定功率在25转/秒转速下约为250万千瓦)。SN系列的汽轮机(图3),由一台S—汽轮机(使用饱和主蒸汽参数的高压汽轮机)和两台或三台低压汽轮机组成。

双流饱和汽轮机转子的运转温度比较低,转子用NiCrMoV钢制造。图6示出饱和汽轮机转子(S—转子)。S15—200型转子计划用在以后的SN机组上,电机额定功率在25转/秒转速下约为200万千瓦。低压汽轮机最好采用双流布置。全速机组的低压转子是歪体转子,其尺寸和重量按需要的出口面积确定(图2和图3上图),采用NiCrMoV钢锻制。半速汽轮机组的低压转子,发电厂联盟制成心轴,叶轮热装在轴上(图2、3下图),转子和叶轮皆用NiCrMoV钢制造。

图7上P所示,系出口面积为5和10米²的歪体转子。图7下P为25转/秒的叶轮型转子,现在使用中的汽轮机多采用这类转子。图8是30转/秒和25转/秒的低压转子比较情况。

发电机转子是采用NiCrMoV钢歪锻而成的。发电机转子的尺寸和重量主要决定于运转速度,其次决定于额定功率(14、15)。图9示出2极和4极发电机转子,两者皆用于50转/秒的发电机。其中最大的转子锻件,直到目前才生产出来。

3、转子锻件的需要量和

供应能力

第二节1~3图中用阴影线表示的设想和目前KWU—HMN和SN系列的汽轮机组标准额定功率数据,只能提供锻件需要量的大致数

量(应考虑制造厂家之间在设计上的差别)。根据额定功率和蒸汽出口参数,一个发电机组内可以采用一台或两台,最多采用3台低压汽轮机。

假如每一机组平均有两台低压汽轮机,就可估计出所需锻件的最低需要量。

上述情况清楚地表明,汽轮机和发电机的制造厂家,不仅要求锻件完全符合技术条件规定的型式,而且还要对材质、性能、尺寸和重量等提出不同的要求。

目前和今后需要的50(60)转/秒、额定功率达150万千瓦和25(30)转/秒、额定功率达200万千瓦的机组所用的转子和叶轮锻件,全世界很多锻造厂都能生产。但最大的锻件,即交货重量为196吨的四极发电机转子,目前只有少数的锻造厂能够生产(19)。

到目前为止,只有一家工厂提出了关于生产250吨锻件的报告(7)。看来,生产这样大型的锻件似乎已有保证。关于该锻件的质量,在表1中列出转身长度内的心轴机械性能,图15示出转身径向机械性能(3)。其它一些锻造厂只能供应装配式发电机转子用的锻件(20)。转子进行装配的可能性始终是存在的。但是,装配转子有一些缺点,因而,今后一旦有可能,就会被取消。

这里需要确定,例如(10)和(11)中论述的特殊工艺,是否能够在生产大型锻件时采用。

4、锻件的试验和评价

为了能够全面地鉴定转子锻件,必须充分地了解:

转子的运转应力;

转子的使用性能。

掌握了这些数据才能进行正确的设计,以使转子在其使用寿命期限内能够达到预期的运转状态。

汽轮机和发电机制造厂主要关心的是锻件达到的性能(22)。锻造厂如何达到这些性能

主要供锻造厂自己解决。订货条件所要求的性能不应高于需要，特别是当要求的进度可能被延误或受到阻碍时。对于每一个大型锻件，至少需要判定以下性能：

强度（屈服强度和抗拉强度）

延性（如NDT温度）

准确的超声波探伤结果

残余应力值。

关于这些性能，后面还将进行补充说明。

在大型锻件的发运及其试验和评价一节中，将以发电机转子(23)为例。通过举例可以看到，目前锻件所进行的上述性能的试验，是怎样考虑的，技术上的可能性如何。我们认为，根据检验中了解到的情况，可以对锻件质量进行连续的评价。

由于锻造生产的充分发运，第一根在发电机转子上于1907年由西门子公司投入运转（额定功率1250千伏安，重3吨，转身直径626毫米，转身長840毫米）。

由于这种锻造方式的出现，园片组合式转子已停止采用。近些年来，由于更大的锻件供应上的困难，又重新需要生产组合式转子。同样，当生产出现代化的大型空体锻件后，又可能改而不用组合式结构。

随着空体转子的引入，汽轮发电机制造中很大一部份责任，已经落在了炼钢者的肩上。目前，转子的额定功率和安全性取决于能否生产出要求尺寸的锻件和保证材料质量。

1911年，一根空锻转子外裂。为此，于1912年1月，就在订货图纸上注明下列要求（图11）：

a、注明最大运转应力部位（迄今，最大运转应力集中，多数发生在线圈槽根部，发生在转身中心孔表面较少）。

b、改用具有更高屈服强度的NiCr钢。

c、取中心孔全长心棒，和转子锻件一起交货。

d、锻件在正火回火后，最终热处理的淬火前进行钻孔。

进行中心孔金相窥视检验。

热处理需用的中心孔，被用于检验转子内下裂纹情况（图12上图）。开始时，采用反射镜和灯泡进行中心孔检验；1927年开始采用中心孔窥视镜进行检验。

各种转子和材料达到锻造和淬火温度的加热速度，当时必须通过实践来确定。在此之前，有一些转子内严重开裂，裂纹横穿到以后在转子上加工出来的线圈槽处（图12下图）。

如果出现所谓的“中心裂纹”，打压试验时（压力50巴），水即通过线圈槽渗漏，从而使转子报废。1952年引进超声波检验技术以后，通孔即被取消。强度和耐久性是通过从盲孔中取出的心料来判定的（1963年开始检验NDT温度，见图20）。

1913年，第一次在发电机转子上（额定功率7500千伏安，转速25转/秒，重18.6吨，转身直径1206毫米，长1460毫米—见图13）取出四个径向心棒（直径40毫米），测定了最高运转应力部位（线圈槽根部）的强度和延性。

试验结果（1914）未能满足下列技术条件要求：

	0.2%屈服极限 (牛顿/毫米 ²)	抗拉强度 (牛顿/毫米 ²)	延伸率(%)	冲击值 (焦耳/厘米 ²)
技 术 条 件	275—295	490—540	20—18	(29.5)
试 验 结 果	230/233	440/435	0/3.4	17.5/15.5

抗拉试样直径16毫米，园柱部份长160毫米，却氏氏冲击试样30×30×160毫米，缺口深15毫米，缺口半径2毫米。

径向心棒的余料，用铜铵氯化物腐蚀显示了轴向偏析。由于试验结果不好，就在加工完的转子上，将各线圈槽用铁填满，然后进行超

速运转。该转子经受住了这次试验，并实现了安全运行，直到1937年，才因其它原因被停用。

从1924年开始，取径向心棒试验的方法已被普遍采用，并从1928年起，锻件供货人已承认它为交货验收主要试验方法。目前，是把径向心棒（图14）加工成长的径向抗拉试样。试样在其最弱点自动断裂。断面收缩率的变化情况，做为判断偏析存在的最灵敏准则，在图15曲线中举例示出。

从1914年开始，在径向心棒上取样进行延迟性试验的方法得到了进一步发展（图16）。1928年，采用西门子（siemens）试样，1955年引入国际标准协会（ISO）V型试样。图16下图举例示出横截面上延迟性的分布情况。

径向和轴向心棒取样试验，可以提供大型转子锻件的强度和延迟性数据。径向心棒取样试验通常只用于发电机转子，在特殊情况下，也用于检验低压汽轮机转子。在一些例子中，特别是在本例情况下，虽然发电机转子当时已达到了锻件的上限标准，但是根据径向心棒取样试验的结果（见图15曲线图），对于锻件生产者的能力问题仍有很多值得议论的地方。进行这样的分析研究，能帮助制造者根据试验结果，有选择地提高其钢锭质量。

引进超声波检验方法，可以检查锻件整个体积内的不均匀性。1951年，第一次按照超声波探伤讯号确定取径向心棒的位置（图14）。取出心棒以后，探伤讯号就可能消除。从心棒加工的抗拉试样经过试验以后，可以对超声波讯号进行仔细研究。超声波检验方法推广的结果，最初是对过去作出的使用性能不均匀性的鉴定引起了怀疑。因为用老的检验方法鉴定合格的转子锻件，于1951~1952年重新进行检验时带有明显的超声波讯号。但在超速试验室内进行分阶段加载试验前后，主要的讯号没有显示出差别。转子判定合格投入使用。全副转子运转正常，一部份目前还在使用。

自1952年起，这种套取径向心棒和检验的方法已作为验收条件明文规定下来，同时，停

止了打中心孔。这样，就防止了小的不均匀性缺陷暴露出来，不然，这种暴露的缺陷以后可能就成为裂纹的起源。此外，转子中心线处的应力几乎只有中心孔表面应力的一半。

采用扫描电子显微镜后，超声波讯号可以得到更充分的研究（图17）。可以看到，导致径向抗拉试样在低收缩率下断裂的低塑性区总是局部的一块，嵌在一个塑性基体内（2、4）。

采用打中心孔的方法，是为了降低转子热处理产生的残余应力（1912年，锻件在调质热处理前打中心孔， $\sigma_{0.2} > 350$ 牛顿/毫米²）。

从1920年起，发电机转子按线圈槽深度予先加工出轴向槽，由于有效直径的减小，降低了残余应力。1944年，某厂成功地对直径1200毫米汽轮机转子进行了油淬，部份转子甚至采用了水淬。

1914年开始进行残余应力的定性测量，作法是环绕发电机转子转身开出一些槽（图18上图）。开槽后，经常看到整个转身能收缩数毫米。此后，汽轮机NiCr钢中增添了钨、钼合金元素（1928年，表2），使回火冷却速度显著降低，从而使残余应力大大减小。从1930年开始，已不需要开这些槽。

由于转子尺寸增大，对大型转子的延迟性要求日益提高，从而促成了锻件的鼓风冷却。从此开始，要求对残余应力进行定量测量。在五十年代中期，解剖了两根转子，并对整个横截面残余应力的分布进行了测量。测量结果证实了予先的估计和计算（图18中图）。同时，开始以适当的方法，在测量残余应力时少破坏转子表面（24）。1959年，我们开始采用延伸计（图18下图），作法是在转身端加工出基准球面，取试样后通过测量基准球面间距离的变化即可测出转子残余应力的大小。

为使残余应力测定的方法可以广泛采用，经过研究于1970年提出了KWU环芯法（KWU ring core method），这种方法至今仍在采用（图19）（25、26、27）。每个大型锻件测得的残余应力，提供设计计时参考。

5、锻件材料性能的现有

测定方法

取样位置

通常,只能在几个位置测定锻件的性能。取样的位置,最好是在那些运转应力高,而材料性能又可能不好的地方。因此,这项工作必须与计标工程师合作进行。根据目前转子的通用直径,临界应力区多数是在转子心 π ,对于发电机转子,多数情况下是在线圈槽根 π 。线圈槽根 π 的应力,位于A偏析和V偏析之外。但是,转子心 π 产生的应力,可能位于钢锭的偏析区,在一些情况下,可能是未焊合的疏松区。

测定转子心 π 使用性能的重要性也增大了。按照通常的概念,好的淬硬性标志着转子内 π 和外 π 的抗拉性能近乎相同(比较图15下图示出的结果)。但是,转子心 π 的延迟性(FATT、NDTT、 K_{Ic})不如外 π 令人满意。图16示出的延迟性分布,到目前为止,基本上仍符合目前生产的转子。

测定转子性能所用的试料,其体积是受到限制的。图20是低压转子按照通用方式进行的试验示例。

断裂韧性和疲劳裂纹增长速度的测定

不能按每个锻件个别测定的材料性能,必须借助于试样,按材料型号进行测定。这些性能包括:(图21、22)

断裂韧性(K_{Ic})

疲劳裂纹增长速度(da/dn)

特别从图21可以看见,由于所需试样尺寸的原因,不能分别测定每个锻件的断裂韧性 K_{Ic} 。但是,采用塑性断裂力学的方法,就可以减小试样尺寸(28、29)。

非破坏性检验和残余应力的测定

为了对锻件进行评价,必须准确地了解超

声波讯号的位置和大小。超声波检验结果应制图记录。转子残余应力采用KWU环芯法测定(25、26、27)。

锻件的评价

如果残余应力高于通常允许值、超声波讯号大于设计中正常考虑的大小,或者抗拉试验结果与要求值之间出现差值,在此任一情况下,就需要对锻件单独重新计标。与标准设计计标之间的差值,应在每种情况下分别进行评价。比如,低的强度可以借低的残余应力来补偿,而高的断裂韧性,证明允许存在较大的超声波讯号。但是,一个锻件即使未能全百达到技术条件要求,只要在其整个使用寿命期间内能够在各自条件下的操作应力作用下安全地运行,这个锻件即可被验收。如果不能保证安全运行,锻件必须报废。如果延迟性未能达到要求,也按同样方式处理。但是,延迟性低于技术条件规定的最低值时,通常多半不能被验收,因为延迟性降低,将大大减小不连续性缺陷的允许尺寸。对于一个专用构件,要求的断裂韧性最低值能否达到,可以通过NDT温度试验结果来证实,在 K_{Ic} 与NDTT之间可以获得很多比较数据。

高温性能

对于在高温下运转并用耐热材料制成的转子,有很多问题需要我们认识,其中包括蠕变破坏性能(1)和低周波应变疲劳性能(30)。

对此不准备进一步讨论,只是要指出,上述两种性能,只能在尽可能近似于使用条件的情况下,在长期的试验中进行分析研究。因此,耐热转子要求采用的材料和热处理方法,均有比较严格的规定。这样,就能保证在转子的蠕变性能和韧性之间达到充分的协调。

关于KWU—HMN机组的运转问题,以及如何考虑运转中产生的应变和应力问题,在本届会议上另有报告(31)。

更大功率的发电机组在本世纪最后廿年的发已趋势是能够预计到的。这里提出一个问题,即具有目前尺寸的汽轮机和发电机转子所

达到的性能,能否在今后更大机组的大型转子上达到,对此讨论如下。

6、试验结果

6.1 锻造比影响

由于转子尺寸越来越大,锻造比通常能够达到的效果正在减小。根据到目前为止的普遍看法,认为能否获得足够的机械性能和延迟性在很大程度上决定于锻造比。铁路上采用的低压转子(32),已经制造成功,其直径达到2700毫米。在制造中所采用的小锻造比,已足以使转子锻件达到良好的性能。

钢号近似的铸造材料和锻造材料(GS-17CrMoV511和30CrMoNiV411)经比较表明,两者的延迟性没有明显差别。化学成份和机械性能分别在表3和表4中列出。这些材料首先铸成直径450×450毫米的坯料,以坯料模拟出铸件厚法兰处的调质热处理。从坯料心口取试样,这里的性能可以设想是最低劣的。然后,从靠近转子锻件表面的口位取试样。铸造和锻造的1%CrMo(Ni)V钢,其断裂韧性 K_{Ic} 试验结果如通常情况一样地分散,而且大多数是重迭的。在室温以上,两种材料的最低值曲线是吻合的(图23)。铸钢的试验结果,基本上不劣于锻钢。因而这里不能肯定锻造比的显著优越性。

为了更精确地研究锻造比的影响,我们进行了比较性试验。将一个电渣焊件(ES)和一个未经锻造的电渣重熔钢锭(ESR)的一些口位,和转子进行了比较。其化学成份在表5中列出。表6比较了转子的转身心口、一端轴颈和接轴延长口份的取样试验结果。从试验结果看,主要是FATT和NDTT在所得状态下存在明显差异。不过,从全口三个试件取试样(转子只从接轴端取样)按图24所示方法进行热处理(热处理的目的模拟出直径1800毫米转子心口的情况)后,电渣重熔钢锭的材料强度稍稍高一些,而三种试料的延迟性都在通

常的波动范围内。这里,同样没有发现锻造比的影响,而是看到了热处理的影响。

利用汽轮机叶轮锻件的多余坯料,进行了类似的分析比较。这些锻件是分别用普通钢锭和中心电渣重熔钢锭锻成的。化学成份在表7中列出。表8示出未经锻造的电渣重熔坯料和常规锻造坯料的结果,其差别仅在通常的波动范围之内。在此情况下,经过锻造的材料也不比未经锻造的强。

所能进行的试验结果表明,与目前关于锻件强度和延迟性决定于锻造比的设想相反,而是标志着均质性、致密性和坚实性的钢锭质量,决定着能否采用一定的材料实现其规定的性能。按照这个看法,锻造比即使有影响,它的重要性也只是第二位的。

从例(32)中可看出,采用普通钢锭,以较小的锻造比,也能达到好的结果。这一论断的前提是必须超过最低锻造变形量,以产生重结晶并使晶粒增长率达到最小。

6.2 转子直径的影响

首先,随着机组额定功率,特别是半速机组额定功率的提高,高压和中压转子的直径变得更大。功率约250万千瓦,转速25转/秒的未来发电机所用的高压和中压转子为H15-250型(图4)和M15-250型(图5)。转子重量将要求达到125吨,直径达到2000毫米。所需要的这样大的1%CrMoNiV钢转子,至今尚未生产。这种大型转子的性能,至少应相当于较其小得多的耐热转子的性能。对于心口的延迟性和蠕变强度来说,更是这样。

为了检验该钢号的潜力,我们生产了3根SN电机转子。这种转子通常是用NiCrMoV钢制造,这次是用1%CrMoNiV钢制造的(25)。(采用这种钢号能够不产生问题,因为这种轴和S-转子所受的应力很低,1%CrMoNiV转子的延迟性低一些也无关系要)。转子采用的热处理方法,能使其心口的冷却速度和直径2000毫米转子的冷却速度(油淬)相近。表9列出化学成份,表10为常温机械性能。上述三根转子从轴向心棒取样的试验

结果, 和较小转子的结果进行了比较。关于锻造工艺, 热处理工艺和高倍组织检验的细节, 在这里不进行讨论。

图26表明冲击功、结晶度与温度降之间的关系均在较小转子数据的波动范围内。断裂韧性的结果也是一样, 如图27所示。它们变化于生产检验的转子分别从表百区取样和从心棒取样得出的最低值曲线之间。在延后性方面, 直径2000毫米的锻件心棒也能获得足够的性能。

在三根转子中只有一根转子, 研究了疲劳裂纹增长率。试验结果如图28, 在常温下位于1%CrMoNiV钢的散布带上限的下。如我们所预料的一样, 疲劳裂纹增长速度没有降低。

图29示出了500、530和550℃下的蠕变破坏强度试验结果。破坏点位于30CrMoNiV 411钢相对应的散布带内, 而且缺口试样比光滑试样的寿命长。因此, 也如图30所证实, 试验转子具有良好的有代表性的蠕变破坏性能。图中, 在530℃下负荷128牛顿/毫米²的试样, 其

蠕变曲线处于转子心棒试样通常的数据点散布带内。

最低蠕变速度作为FATT和NDTT的函数, 是和通常的点散布带一致的, 见图31(1,33)。

甚至在转子心棒具有足够的延后性的情况下, 蠕变破坏强度也比30CrMoNiV411类型材料的平均值高。考虑到运转可借性问题, 在保持强度和蠕变破坏强度的情况下改善延后性, 应该是可取的。

第三根转子(K53120)的化学成份, 没有改变30CrMoNiV411的通用技术条件(表10)。但是, 这根转子的心棒取样试验结果, 还是能敌得上较小转子的性能。因此, 根据提供的试验结果可以说, 对于今后大功率电机所用的大型高压和中压转子, 可以采用通用化学成份的30CrMoNiV411材料制造。但是, 为了提高淬透性, 在新的西德钢铁材料标准中, 已提高了该钢号的铬含量(表9)。目前, 该钢号定为30CrMoNiV511。

表 1 转子长度内的机械性能 (转子重247吨, 用500吨钢锭锻成)

		AXF	AXM	AXK
0.2%屈服强度 牛顿/毫米 ²	轴 向	598~621	588~629	618~640
	径 向	598~621	598~621	608~637
抗拉强度 牛顿/毫米 ²	轴 向	715~737	725~760	755~777
	径 向	715~737	735~760	745~777
延 伸 率 (%)	轴 向	20~22	20~23	21~22
	径 向	19~24	19~20	18~21
断后收缩率 (%)	轴 向	71~75	70~72	70~71
	径 向	69~73	64~66	61~70
FATT (℃)	轴 向	-42~-30	-31~-20	-18~-20
	径 向	-34~	-28~-15	-24~-10
NDTT (℃)	轴 向	-40~-30	-35~-35	-35~-35
	径 向	-35~-45	-35~-30	-35~-45
含 碳 量 (%)		0.22	0.26	0.30

表 2

NiCrMoV钢的发展过程

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	转身 ϕ (毫米)	0.2%屈服强度 (牛顿/毫米 ²)
1914	.44	.19	.28			3.06	1.35	—	—	750	
1924	.35	.21	.31	.028	.018	3.05	.78	.16	—	925	460
1928	.32	.27	.40	.027	.026	2.92	1.02	—	—	925	470
1929	.29	.22	.33	.026	.012	2.38	1.17	.37	.13	925	570
1939	.24	.29	.46	.016	.021	1.80	1.39	.32	—	1005	560
1942 (节约Mo)	.32	.34	.41	.026	.018	2.42	1.21	.07	—	925	540
1956	.34	.25	.62	.015	.017	1.88	1.36	.40	—	1005	540
1972	.25	.08	.39	.009	.014	3.59	1.58	.37	.13	1808	695
1975	.24	.06	.28	.008	.006	2.97	1.62	.38	.10	1808	600

表 3

被比较的铸坯和转子轴化学成份

材 质	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
GS—17CrMoV511	.16~ .19	.36~ .68	.65~ 1.33	.009~ .017	.006~ .016	1.24~ 1.59	.86~ .98	.08~ .55	.13~ .29
30CrMoNiV411	.30~ .43	.07~ .31	.72~ .79	.008~ .012	.010~ .015	1.03~ 1.37	1.05~ 1.21	.51~ .74	.25~ .34

注：从 7 个铸坯和 5 根转子轴取样化验结果

表 4

被比较的铸坯和转子轴机械性能

材 质	试件尺寸	0.2%屈服 强 度 (牛顿/毫米 ²)	抗拉强度 (牛顿/毫米 ²)	延伸率 (%)	断面收 缩 率 (%)	FATT ℃	NDTT ℃
GS—17CrMoV511	铸 坯 $\phi 450 \times 450$ 从铸坯心口取 样	522~601	670~738	11~20	26~65	+60~ +45	+45~ -10
30CrMoNiV411	转子轴 $\phi 500-1315$ 从倍近表口 位取样	550~690	690~800	17~21	55~69	+65~ -30	+40~ -30

表 5 未经锻造的26NiCrMoV115电渣焊和电渣重熔坯料和经过锻造的通用坯料比较

	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	V	Ni
电渣焊钢C	.25		.34	.005	.007	.011	1.55	.41	.06	2.99
电渣重熔钢R	.28		.25	.004	.002	.012	1.67	.43	.05	3.02
普通转子钢K56257	.35	.07	.39	.010	.011		1.52	.40	.11	3.02

表 6 未经锻造的26NiCrMoV115电渣焊和电渣重熔坯料和经过锻造的通用坯料比较

转子轴K-56 257																					
坯料状态	0.2% 屈服强度		抗拉 强度		延伸率		FATT		NDTT		取样位置及坯料 状态	0.2%屈 服强度		抗拉 强度		延伸率		FATT		NDTT	
	牛·顿/毫米 ²		牛·顿/毫米 ²		%		℃		℃			牛·顿/毫米 ²		牛·顿/毫米 ²		%		℃		℃	
※ (1) 纵向 ※ (1) 纵向																					

※未经锻造的坯料

※※ 锻造比: 3.5, 18.2, 12;

(1) 2次回火: 625+640℃/炉冷

调质: 850℃/35小时/水淬+650℃/10小

(2) 原文不译 (译者)

时+830℃/35小时/水淬+150℃

/10小时+630℃/40小时/57小时

达到400℃/32小时达到100℃

表 7

未经锻造的26NiCrMoV145电渣重熔坯料和通用坯料的化学成份

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %	Ni %	Sn %	Sb %	As %
电渣重熔 钢锭心卅 取样	0.30 0.31	0.13 0.09	0.31 0.29	0.006	0.007	1.64 1.65	0.37 0.38	0.09 0.09	3.69 3.74	0.009	0.0016	0.011
叶轮心卅 取样	0.26	0.19	0.28	0.003	0.067	1.61	0.34	0.09	3.54	0.010		0.017

表 8

未经锻造的26NiCrMoV145电渣重熔坯料和常规锻造坯料性能比较

	0.2% 屈服强度 牛顿/毫米 ²	抗拉强度 牛顿/毫米 ²	延伸率 %	断面收缩率 %	FATT ℃	NDTT ℃
未经锻造的电渣重熔钢锭心卅横 向取样	916~855	1016~954	18~17	63~64	-90~ -90	
经过锻造的叶轮心卅横向取样	891	993	16	50	-85	-95

注：电渣重熔钢锭心卅取样及叶轮心卅取样热处理工艺：

淬火温度850℃，保温时间9.5小时，淬火时间35—45分，水淬后温度110/120℃

1、回火温度600℃，保温时间12.5小时，冷却：600℃—440/460℃空冷，冷却速度~17℃/分，
440/460℃—100℃复玻璃棉冷却，冷却速度5℃/时，之后空冷；

2、回火温度610℃，保温时间11.5小时，冷却：610℃—170℃（~10℃/时），之后空冷。

表9

30CrMoNiV411试验转子化学成分 (重量百分比)

代 号	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Sn	Sb	As
KWU交货条件	.26 ~.32	<.30	.35 ~.85	<.015	<.015		.90~ 1.20	1.0~1.2	.50~ .75	.25~ .35				
51496 钢水 (1) 工件中纵向	.29 .33	.20 .20	1.16 1.22	.009 .006	.008 .011	.003 .003	1.08 1.04	1.01 1.17	.90 .94	.23 .31	.18 .18	.012 .011	.003 .004	.021 .022
52038 钢水 (1) 工件中纵向	.29 .34	.10 .09	1.17 1.13	.014 .008	.006 .007	— .003	1.13 1.13	1.17 1.23	.96 1.02	.31 .29	.08 .07	.005 .005	.002 .002	.019 .011
53129 钢 水 工件冒口端纵向	.29 .32	.15 .16	.76 .76	.007 .006	.009 .012	.003 .003	1.18 1.18	1.05 1.04	.77 .74	.24 .93	.17		.017 .003	.021
30CrMoNiV511 钢铁材料标准555	.25 ~.34	<.30	.30 ~.80	<.015	<.015		1.1~1.4	1.0~1.2	.50~ .75	.25~ .35				

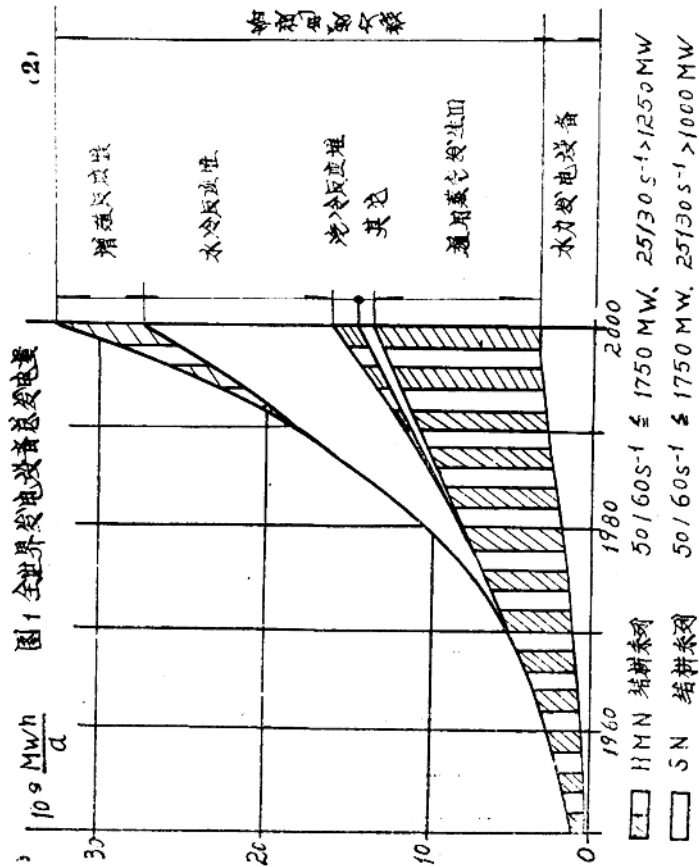
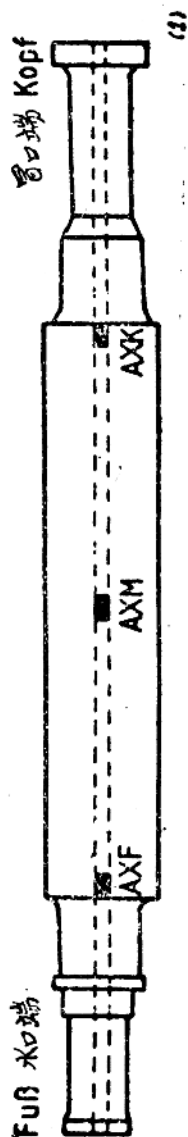
注: (1) 经过孕育处理的钢水

表10

30CrMoNiV411试验转子机械性能

代号	取样位置	0.2% 屈服 强度	抗拉 强度	延伸 率	断 百 收缩率	FATT	NDTT	K _{1c} 20℃ 径 向
51496	试环切向	639 ~650	781 ~786	15	46~42			
	冒口端纵向 中下纵向 水口端纵向	纵向 630	805	20	55	95	55	2057—2254
52038	试环切向	635 ~640	805 ~810	16 ~18	48~57		+20~ +25	
	冒口端纵向 中下纵向 水口端纵向	径向 630	805	14	42	+95	+50	2065—2538 2025—2426 2160—2479
53129	试环切向	630 ~635	784 ~776	17	52~60			
	冒口端纵向	径向 620	775	15	44	+80	+45	1188
	中下纵向	" 605	760	16	44	+80	+65	1795
	水口端纵向	" 645	805	16	38	+85	+65	1726

沈恩泉译自《第八届国际锻造会议论文集》

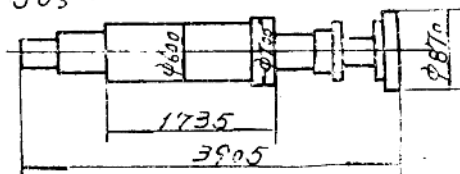


H30-25

$G = 12$ 吨

$50s^{-1}$

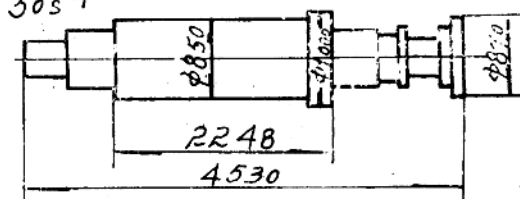
(5)



H30-100

$G = 15$ 吨

$50s^{-1}$



H15-250

$G = 70$ 吨

$25s^{-1}$

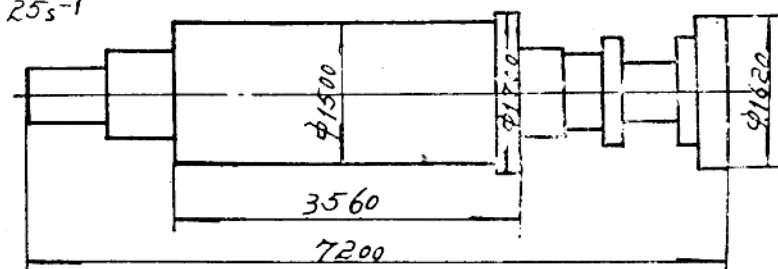
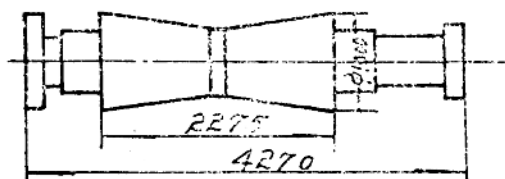


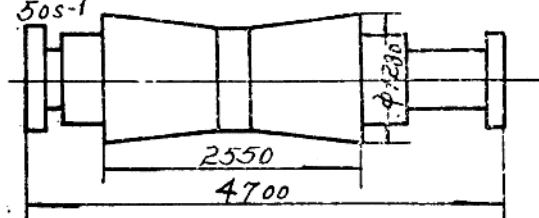
图4：高压转子锻件 (50 和 $25s^{-1}$)

M30-25
 $G=145$ 吨
 $50s^{-1}$

(b)



M30-100
 $G=26.6$ 吨
 $50s^{-1}$



M15-250
 $G=126$ 吨
 $25s^{-1}$

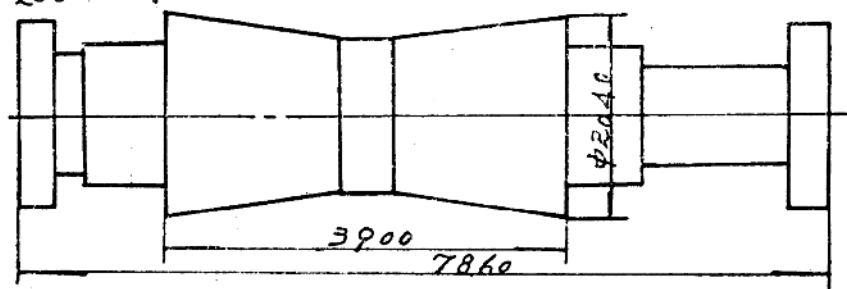


图5: 中压辊子锻件 (50和25s⁻¹)