

大型铸锻件文集

太原重型机器厂研究所情报科

第 5 期

国家机械工业委员会大型铸锻件情报网

1987

目 录

特种镍铬钼钢汽轮与发电机轴.....	(1)
X40CrMoV51热作模具钢用钨代钒的可能性.....	(22)
制造带孔叶轮锻件时大型无缝圆长钢锭的应用.....	(41)
提高低合金钢机械零件的强度.....	(46)
多道次延伸时材料机械性能各向异性的影响.....	(54)
片状石墨铸铁(灰铸铁).....	(62)
片状石墨铸铁的年度展望(第21回).....	(87)
片状石墨铸铁的年度展望(第22回).....	(103)
用连铸坯锻轧棒材的新概念.....	(123)
高速圆钢锭和圆坯径向压缩的研究.....	(138)
精锻机在石油机械毛坯制造中的应用.....	(145)
在工作强度测量中使用模拟.....	(150)
多向锻机的研究与发展.....	(165)
火车轮箍及环形件的锻造发展.....	(178)
用精锻机热锻空心长锻件的工艺和装备.....	(191)
卡彭特工艺新精锻机车间.....	(198)
铸造用砂的再生方法和实例.....	(206)
用 ORBIS 旋转检验仪联机测量线材和棒材的外形和尺寸.....	(223)
钢包精炼法.....	(236)
NK—AP 钢包精炼方法的发展.....	(274)
自由锻件质量的保证.....	(288)

特种铬镍钼钢汽轮与发电机轴

Ernst Pottkost

目 标

为了提高发电机的出率研制出了带超导励磁绕组的发电机。电机需要的是在 -269°C 无全无磁性，具有 $350-400\text{ N/mm}^2$ 的 $\sigma_{0.2}$ 和良好韧性的材料。

对地热电站来讲，采用 $\sigma_{0.2}$ 为 640 N/mm^2 高韧性不锈钢。

本文报导的是已经投产的透平发电机的制造情况。

带超导励磁绕组式发电机转子发电机的研究。

对电场透平机讲，高压和中压透平机轴主要用 $1\%\text{CrMoNiV}$ 钢制造，低压轴和电机轴用 $2-3.5\%\text{NiCrMoV}$ 钢制造。特别要求持久强度与耐腐蚀性时，需采用 $12\%\text{CrMoV}$ 钢耐热轴，这类耐热轴采用Arbed Saar钢。用95吨以下的电渣重熔钢锭生产轴身直径为 1350 mm 以下的透平机轴与电机轴。

近几年来，从本质上改进了大锻件钢的使用特性。鉴于不锈钢元素关系，使合金成分达到最佳化。由于冶金方面的进步，锻造工艺与热处理的最佳化，能改善材料的纯度与均匀化，以及减少钢锭的偏析。这样亦促进了透平机技术工作的发展，显著地提高了发电机的出率。进一步的提高透平机的出率，不仅是以改变零件为前提，更重要的是要以新的结构为先决条件。因此，目前世界上制造发电厂设备的重要厂家正在研究带超导

绕组的发电机，或已经制造出模型电机。^{1) 2)}

通用电机轴，其槽内有外绕组，并同时组成了转子铁圈铁芯。它是由冷钢铁磁体钢锻造成的，对它的电流密度约 $14 A/mm^2$ 来讲，通过超导可能提高到 $200 A/mm^2$ 。

材料要求

对目前大家熟悉的固体材料来讲，只有处在很低的温度时才能产生超导，利用液体氮在 $269^\circ C$ ($4K$) 的温度，工厂能使这种发电机达到超导温度。为此所需冷却的先决条件是转子内部安装上超导绕组，其转子是由集中拼行的空心部件同刻有槽沟转子体组装成的。参见图 1。由此对设计材料提出了一系列的要求，特别是对作为超导励磁绕组载体的转子材料更加严格。因磁通由转子内部流过定子绕组，所以转子部件必须是元磁性的。 $-269^\circ C$ ($4K$) 时和切削加工后必须满足这个条件。这种元磁性是由奥氏体组织得到的，其奥氏体是通过低温保温和从室温必须多次冷到很低的温度而获得的。除了组织稳定性外要求 $\sigma_{0.2}$ 最少为 $350-400 N/mm^2$ ，这种屈服强度显著地超过了传统奥氏体铬镍钢的屈服值。这样使可用材料的数量进一步地受到限制。最近一段时期一些奥氏体钢受到重视，如 $X2CrNiMoN1813$ (1.4429)、 $X3CrNiMnNbN19165$ (1.3964)、 $X3CrNiMnMoNbN2317$ (1.3974) 和 $X5NiCrTi2615$ (1.4980)，这在商品名称 A 286 中是很出名的。此外，这些钢是依靠室温下屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 时最

(图看略)

图 1 超导型发电机转子草图

低值来分类的：320 N/mm^2 ，380 N/mm^2 ，450 N/mm^2 和 600 N/mm^2 3)4)。

电机轴的制造

KWU公司1000 MVA模型设备⁵⁾，其 $\phi 820 \times 3550$ mm转子是用X3CrNiMnMoNbN19165 (1.3964) 钢制造的。这种钢的平均化学成分是0.02% C，0.40% Si，5.2% Mn，19.5% Cr，3% Mo，16% Ni，0.30% N 和0.17% Nb。KWU技术条件规定，室温时除切向最低值是，屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为380 N/mm^2 ，抗张强度为700 N/mm^2 。延伸率为40%，断面收缩率为55%，冲击值100 焦耳。

对锻件均匀性提出特殊要求时，用最大直径为5 mm的代用反射镜能证实最小缺陷尺寸的大小。先决的条件是先在一个狭窄的温度范围内进行5倍的延伸变形，像用试探性试验求值一样。

对奥氏体钢锻件使用特性来讲，加工和变形程度的温度规范是很重要的，只有掌握了这种规范才能获得均匀的组织。

首先以直径5 mm，长度60 mm圆柱形试棒作热拉力试验，确定1.3964钢的热变形特性。⁶⁾

氢气气氛保护下在管形电炉中把试棒加热到最高温度，10分钟保温后冷却到要求的研究温度，再用每分钟6%的延伸速度将其拉断。就在这个温度点上标上破坏断面收缩率，并把这一破坏断面收缩率当成测量变形能的尺寸。当断面收缩率低于30%时，按一般的经验来说，就认为它没有热变形可能性。当断面收缩率处在30和50%之间时，变形能就受到显著的

~ 3 ~

限制。那么它就有生成裂纹的危险性。大于50%的话，热变形时就不会遇到什么困难的。

为了确定锻造时的最佳炉温，需研究牌号 1.3964 这种钢由 1300°C 、 1200°C 和 1170°C 冷却到 1000°C 时的变形能。从图2的曲线上可看出：从炉温 1300°C 的温度出炉后，冷却到 1000°C 时的破坏断面收缩率 27%，显然这种钢此时的变形能是很低的。降低炉温能提高变形能，这样一直降到 1200°C 时，断面收缩率仅能适当地提高， 1000°C 的变形能为 42% 的话，这亦还是很危险的。通过连续地降低炉温到 1100°C ，才能决定性地改善变形能。

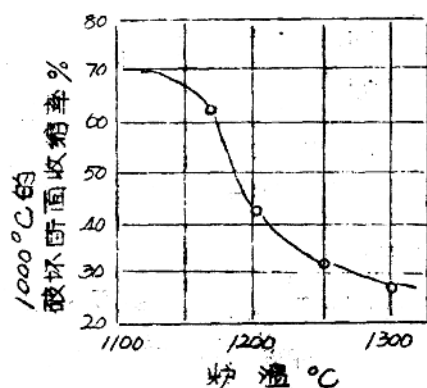


图2 X3CrNiMnMoNbN 19165 钢的热变形图

1000 $^{\circ}\text{C}$ 蠕变试验时，炉温对破坏断面收缩率的影响

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	N
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.012	0.39	5.82	0.007	0.006	19.6	3.07	15.9	0.007	0.16	0.31

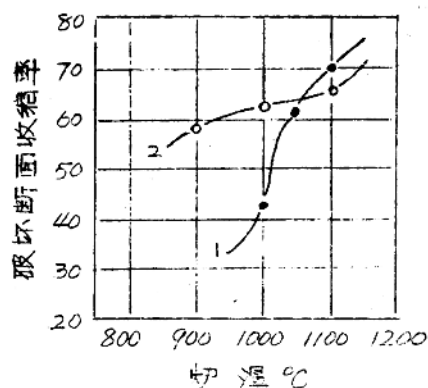


图3 X3CrNiMnNbN19105 钢热变形图

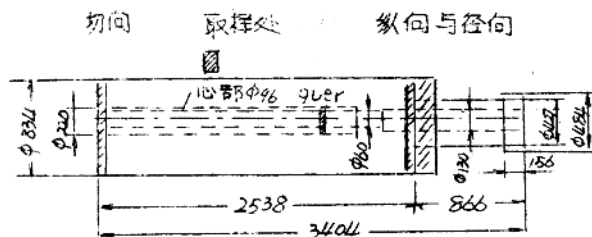
试验 1. $1200^{\circ}\text{C}/10' \rightarrow \text{T}/\text{蠕变试验} (\dot{\epsilon} \approx 6\%/分)$

2. $1170^{\circ}\text{C}/10' \rightarrow \text{T}/\text{蠕变试验} (\dot{\epsilon} \approx 6\%/分)$

C	Si	Mn	P	S	Cr	NiO	Ni	Al	Nb	N
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.012	0.39	5.82	0.007	0.006	19.6	3.07	15.9	0.007	0.16	0.31

第二组试验是由 1200°C 和 1170°C 出炉, 在 1100°C 和 900°C 之间热变形范围内试验变形能。

图3曲线1和曲线2指出了这种试验结果。炉温 1200°C 到 1050°C 以下使变形显著地下降, 当炉温在 1170°C 时, 直至 900°C 断面收缩率缓慢地下降到约30%左右。对锻造转子部件来讲, 规定炉温为 1170°C 而终锻温度为 850°C 。



熔炼化学成分%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Nb
0.030	0.15	5.25	0.014	0.002	19.3	3.00	16.3	0.28	0.17

生产条件

电渣重熔 $\phi 1300\text{ mm}$ 钢锭；32吨；2次酸粗；锻造比5.4；热处理 1070°C 11.5小时/水 + 550°C 8时/空冷

图4 X3 CrNi2MnMoNbN19165钢转子的工艺特性

20吨重的转子是用一枝直径 1300 mm 32吨重的电渣重熔钢锭锻造成的。预延成 1200 mm 8方后将锻坯酸蚀成 $\phi 1450\text{ mm}$ 并再延成 $\phi 1200\text{ mm}$ 。这儿需指出的是，当时使用的 40 MN —压力机的压力是不足的。进一步的轧变形是由 Fa. Klöckner Osnabrück 公司在 85 MN —压力机上完成的。酸粗到 $\phi 1650\text{ mm}$ 后，延伸成 $\phi 1060\text{ mm}$ 。最后酸到轴身直径为 $\phi 900\text{ mm}$ 之前把锻件放到空气中高速转动。

粗加工后进行热处理，即在立式炉中加热到 1070°C 进行奥氏体化保温，然后水淬， 550°C 作消除应力处理。图4中绘出了这根轴的调质尺寸。热处理后打深孔中心先打 $\phi 220$ 到 $\phi 60$ 的孔然后再打 $\phi 130\text{ mm}$ 的孔。此外图4还说明了转子锻件的化学成分和室温 (295 K) 和 -196°C (77 K) 试验求得的技术特性。

表1 X₃CrNiMnMoNbN 19165 钢转子锻坯的热处理试验与内部应力

奥氏体转化温度对技术性能的影响					
热处理	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %	z %	180-V (J)
1000°C/水	448	744	40	64	167-170-171
1080°C/水	430	755	33	59	204-184-165
1100°C/水	406	753	47.6	64	213-217-180

热处理后转子锻坯的内应力

热处理	切向 N/mm ²	轴向 N/mm ²
1070°C/水	-395	-408
1070°C/水	-415	-444
1070°C/水	-436	-451
1070°C/水 ⁺	-150	-158
550°C-8时/空	-152	-169
	-159	-174
打孔后	-120	-140

机械性能

试验情况 试验温度	R _{p0.2}	R _m	A ₅	z	180-V
--------------	-------------------	----------------	----------------	---	-------

单位	K	°C	N/mm^2	N/mm^2	%	%	(黑耳)
纵向	295	22	≥ 380	≥ 700	≥ 40	≥ 55	≥ 120
横向	77	-196	≥ 380	≥ 700	≥ 40	≥ 55	≥ 60
轴纵	295	22	≥ 360	≥ 650	≥ 35		≥ 80
轴横	77	-196	≥ 750	≥ 1150	≥ 20		≥ 40
有效值							
轴身纵向	295	22	433	749	46.6	67.5	197-214-202
轴身纵向	77	-196					104-102-136
轴身切向	295	22	423	760	41.6	65.8	175-210-187
轴身切向	77	-196					90-96-94
轴身径向	295	22	439	754	43.6	61.6	147-146-153
轴身径向	77	-196					78-72-78
轴横	295	22	365	721	45	45	112-106-93
轴横	77	-196	905	1280	38	36	70-82-75
轴横	973	500	196	523	46	65	14

经对比后得出，肯是是逆子技术特性的，例如空温时的屈服强度约 $370-420 N/mm^2$ 提高到 $-196^\circ C$ ($77 K$) 时的 $900 N/mm^2$ ，并且还具有良好的韧性。因为这种钢的技术特性取决于固溶退火温度是大象熟知的，所以在探索性试验时查明了适合的奥氏体化温度。转子轴身上的扇形片，在试验室中经 $1000^\circ C$ 、 $1080^\circ C$ 和 $1100^\circ C$ 1 小时奥氏体化处理，水中淬火。用此校核奥氏体转化温度时，屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 只降低了 $40 N/mm^2$ ，对其它值没有明显的影响。表 1。此外表中值

出，转子在淬火后表面上 $400-450 \text{ N/mm}^2$ 较高的压应力，只有通过 550°C 的消除应力回火才能消除掉。这样应力值能降低到 $150-200 \text{ N/mm}^2$ 。不能采用提高消除应力温度的方法来进一步地消除应力，因为晶界上急速地析出钼金属和相应地降低韧性是紧密相连的。通过堵塞轴向孔能减小心部的拉应力，同时亦能降低表面的压应力。能消除约 $10-20\%$ 的应力。

图5表示的是热处理后正在进行超声波探伤的轴，鉴别缺陷特性时，能鉴别出心部平均 $3-4 \text{ mm}$ 的缺陷，并能保证轴的优良特性。

地热电站用的透平机轴

材料要求

地热电站在能量生产方面具有广泛的特性。在十六个国家中已经有总发电量为 2400 MW 的成套设备投入生产，而且还有 2000 MW 的设备正在安装。但这对地热能的利用来讲，还仅仅是开头。将来总发电设备预料能达到约 13000 MW 。

地热的利用是通过热水和热气来实现的。水气混合成分含有 CO_2 、 H_2S 、 H_2 、 CH_4 、 N_2 和 NH_3 ，这都对部件提出了高度防锈和防腐蚀的要求。为此透平机轴必须是用不锈钢制造的。含铬 13 至 17% 的马氏体不锈钢有足够的耐腐蚀性，同时亦有相当高的强度，但它的韧性受到一定的限制。奥氏体铬镍钢确实有良好的耐腐蚀性，但过低的强度限制了它的应用范围。

(省略照片)

图5 超声波检验 X3CrNiMnMoNbN 钢转子坯

~9~

X5CrNiMo126钢的优点。

此处提供的是软马氏体不锈钢。近几年来它取得了重要的地位。在化学机械制造方面，机械制造方面，以及原子技术设备上多方地被采用。它具备下列特性：

- 高屈服强度
- 高韧性
- 特别优良的调质性
- 良好的焊接性能，厚截面的亦好
- 不锈
- 高度的耐气蚀性

由软马氏体钢的大多数，以及X5NiCrMo126制作地核电站的透平机转子。这种钢的平均化学成分为0.05%C, 12%Cr, 6%Ni, 1.6%Mo。它处在马氏体——奥氏体——铁素体的相变极限范围内。

普通马氏体钢的相变特性是延迟珠光体区域的相变，下压转变区，显示马氏体区域的转变。使用参入镍的软马氏体钢时，因为完全下压了珠光体的相变，所以空冷时，也仅能实现马氏体区域的相变。合金元素强烈地影响着相交点的位置。在下列情况下选择分析位置：淬火时在壁温以上实现要求的马氏体相变，不能出现奥氏体或铁素体。这(0.05%C)低含微量实现了一种软马氏体。500°C以上回火时，在回火马氏体中析出微量弥散的奥氏体。这二次奥氏体提高了韧性，极端稳定，并直到-200°C低温时，亦不会发生自动地发生相变。化学成分对组织的形成和工艺特性有很大的作用，这就要求遵守最狭窄分析间隔，而对大部件来讲要求进一步地减小偏析。

~10~

为确定机械性能所作的试验性熔炼

为了试验研究化学成分，变形程度和热处理对机械性能的影响，开始制造大型锻件前首先进行了小型的熔炼试验。⁸⁾

在感应炉中熔炼了两炉，并充注成平均直径为 $\phi 190\text{ mm}$ ，重量为 150 Kg 的钢锭。试验证实了无偏析性，试验熔炼的化学成分见表2。值得注意的是与透平机轴技术规范中规定的铬和镍含量稍有点变化。

在 1150°C 和 850°C 之间，用2到10倍的变形程度，把 150 Kg 重的钢锭锻成 130 mm 和 60 mm 的多边形是没有困难的。

为了弄清金属学的关系，作了膨胀计曲线试验，测量了磁保和。由这两炉熔炼，得出了表2中列出的相变温度。微量的变换铬镍含量，对相变温度有突出的影响，这种变化非常明显。通过对E131炉低铬和镍的试验看出，马氏体形成的温度约提高 55°C 。对马氏体区域完全相变的要求来看，这一结论是很重要的。把奥氏体形成的始点推向较高的温度。

对回火处理来讲是非常有意义的。根据用户的说明，第一次回火时把最低回火温度规定为 580°C 。回火时一部分马氏体又转变成奥氏体；这是通过磁保和测量证实的。 1000°C 时试样淬火，然后再进行两次回火，回火温度和这时测得的马氏体成分见表3。

表2 5CrNiMo 126钢试验熔炼的化学成分和相变温度

化学成分%								
熔炼炉次	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
E 130	0.034	0.13	0.50	0.007	0.005	12.4	1.48	6.87
E 131	0.030	0.15	0.47	0.005	0.004	11.8	1.43	5.74

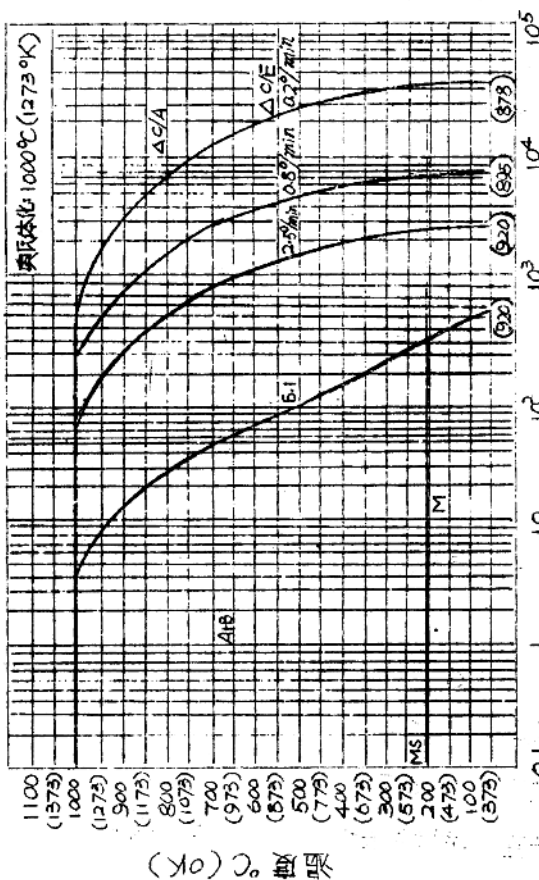
相变温度								
熔炼炉次	A _{cl} A		A _{cl} E		M _s		M _f	
	K	°C	K	°C	K	°C		
E 130	808	535	1023	750	433	100	≤ R _t	
E 131	818	545	1023	750	488	215	≤ R _t	

表3 X5CrNiMo 126试验熔炼钢回火后的马氏体部分;
由磁保和试验求得。

下列温度回火时的马氏体含量

熔炼号	573K (300°C)	773K (500°C)	853+848K (580°C+575°C)	873K (600°C)
E 130	100	99	65	55
E 131	100	100	84	74

冶炼	化	成	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
电	炉	钢	0.080	0.15	0.47	0.005	0.004	11.5	1.53	5.74



入	水	油	空
0.01	10		
0.03	18		
0.06	35	10	
0.10	35	18	
0.20	50	30	
0.35	70	45	
0.50	85	60	
0.70	105	70	
1.00	135	90	10
2.00	180	130	18
3.00	230	170	25
5.00	300	220	40
7.00	360	250	55
9.0 20°	420	320	65
18 10°	600	500	130
30 30°	900	750	220
72 25°	1300	1150	400
144 125°	1900	1700	700
225 0.5°	2400	2200	1000
450 0.1°	3500	3000	1900

图 6 X5CrNiMo 126 钢的连续冷却曲线

膨胀试验证实了这种结果，低铬和镍钢E13/ 提高回火温度时有较高的马氏体成分。

X5CrNiMo126钢的相变状态由图6中可看出。对E13/ 炉次来讲，冷却速度直至2%/分还是处在铁马氏体相变区域。在直径2000 mm以上的锻件心部，亦能达到这种缓慢的冷却速度。这样对大型透平机轴的冷 过程来讲，不可能出现贝氏体和珠光体相变。

图8和图7是淬火温度为1000°C确立的回火图。图7表示的是抗拉强度和0.2 屈服极限，图8为断裂延伸率，断裂断面收缩率和缺口冲击值。这种结论指出，当有同样良好的韧性时，通过低回火温度有调整高强度的可能性。随着回火温度的提高发现抗张强度和0.2 屈服强度连续地下降，而断裂延伸率和断裂断面收缩率仅有微量的变化。

然而对图8的冲击值来讲，回火温度为500°C时，确认会迅速地提高，即由约100焦耳提高到170焦耳。回火温度为600°C 以上时，会再次产生次奥氏体。这样就会使强度值冲高，冲击能下降。尽管含铬和镍低的E13/ 试验熔炼具有稍高的0.2 屈服强度和相当低的韧性，但这两种试验熔炼钢的机械性能亦只有很微量的差别。

考虑到用户要求，由上述结论选出了下列处理各种试验的方法：

淬火 1000°C/2小时/空冷

第一次回火：580°C/8时/空冷

第二次回火：575°C/8时/空冷

对生产重型锻件来讲，变形程度对工艺特性的影响是非常
~14~

有意义的。这样把试验钢锭作 2, 3.5, 5 和 10 倍的变形, 经热处理后, 作拉力和冲击试验, 但没有确实出变形程度有什么突出的影响。由这两个 150 公斤熔炼试验钢锭作的试验来看, 能导出下列综合认识:

X 5 Cr Ni Mo 12 6 铁马氏体钢的相变状态, 同它的化学成分有着密切的关系。这样就得由狭窄的极限中得出分析结论。但是这也意味着: 采用大型锻造钢锭时, 不可避免的宏观偏析时技术特性有很大的影响。为了避免偏析必须均匀化带钢生产的钢锭, 最好还是通过电渣重熔得到最小偏析。甚至到 2000 mm 直径的大截面, 空气中淬火亦能完全地转变成马氏体组织。

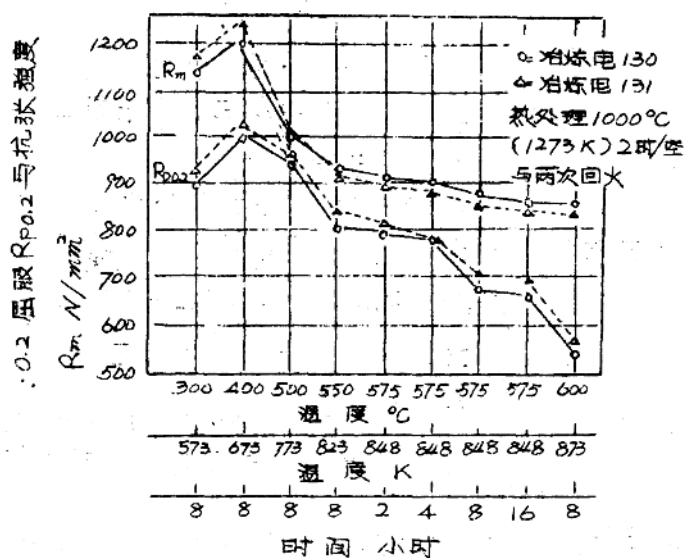


图 7 X 5 Cr Ni Mo 12 6 0.2 屈服强度和
拉力强度同回火温度与时间的关系

~15~