

冶金科技消息

马氏体时效不锈钢

(内部资料·注意保存)

39

上海钢铁研究所技术情报资料室

一九七八年六月

前 言

马氏体时效不锈钢是60年代后期在马氏体时效钢的基础上发展起来的新型的控制相变不锈钢，它具有马氏体时效钢热处理工艺简单而机械性能优异，耐腐蚀性能良好和易于焊接的综合性能。这种钢种可用于化工、机械、宇航、原子能等工业中的结构件和压力容器。近年来世界各国均有较大的重视与发展，特别到目前为止，无论在钢的炉容量和使用方面均有迅速的增长和扩大。

本着对于世界上先进的科学技术，要认真学习，拿来为我所用的“洋为中用”的方针。结合具体科研工作的需要，由中南矿冶学院金属物理教研室及上海钢铁研究所第一研究室、第七研究室、技术情报室共同选译10篇有关资料，汇编成册，供有关部门参考。由于时间仓促及我们编译水平有限，译文中难免有错误之处。希读者批评指正。

编 者

1978年5月

目 录

一	真空电弧炉和电渣重熔马氏体时效不锈钢冷轧钢板的生产	1
二	焊接压力容器用马氏体时效不锈钢	12
三	提高大段面00Cr11Ni10Mo2Ti钢的韧性和塑性	29
四	论马氏体时效不锈钢强度与结构的关系	36
五	在00Cr13Ni8Cu2TiMo钢中形成稳定奥氏体的条件	45
六	高强度不锈钢00Cr11Ni10Mo2Ti的相变	49
七	马氏体时效不锈钢(00Cr11Ni10Mo2Ti)的热脆性	55
八	马氏体时效不锈钢的热脆性	61
九	00Cr12Ni8MoTiAl马氏体时效钢在氯化物溶液中腐蚀裂纹的研究	66
十	马氏体时效钢的辐照稳定性	70
十一	可焊马氏体时效不锈钢	73

真空电弧炉和电渣重熔马氏体时效 不锈钢冷轧钢板的生产

包括马氏体时效不锈钢在内的马氏体时效钢具有高强度、高塑性和高韧性的综合性能。由于这些钢的钢板，带钢和锻件本身的性能，使它们广泛地应用于制造在复杂应力条件下工作的制品。这些高合金钢在非金属夹杂方面应该有高的纯洁度及尽可能低的含碳量。上述两个条件致使轧材的价格提高。因而，寻找一种在费用最低的情况下保证每吨钢锭具有最高冶金产品合格率的生产工艺是极其重要的。

曾相应地由 $4.2 \sim 5.6 \times 2000 \times 2000$ 毫米规格的宽板不锈钢马氏体时效钢 $\Theta \Pi 678$ ($00Cr 11Ni 10Mo 2Ti$) 的冷轧钢板的生产解决了这个问题。

塑性计 (ИЛЛАТОМЕТР) 的特殊研究曾得出：在热轧的温度和速度方面， $\Theta \Pi 678$ 具有接近 $Cr18Ni10Ti$ 钢的性能 (图1)。

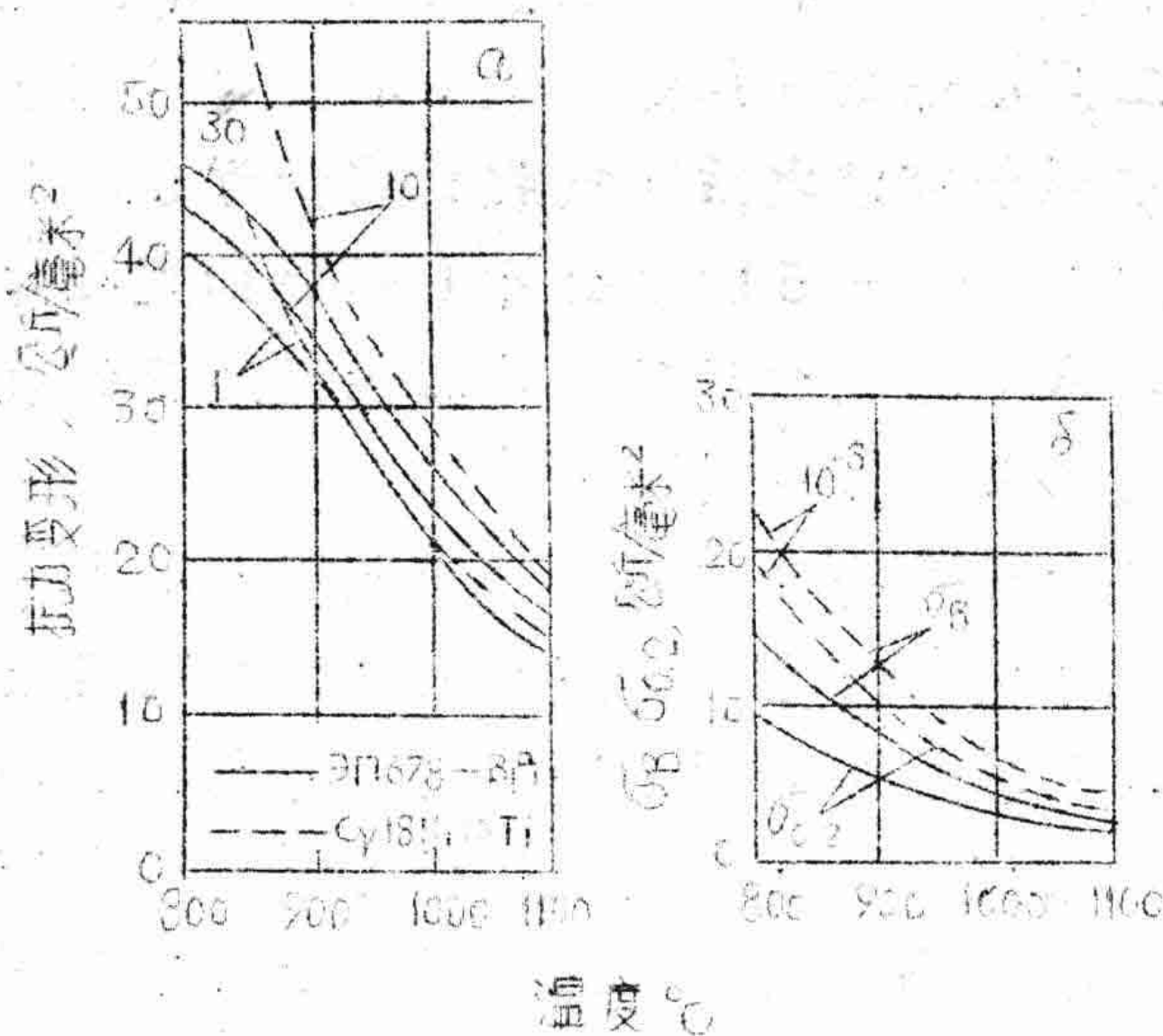


图1： $\Theta \Pi 678$ (BHH) 和 $Cr18Ni10Ti$ 钢的变形抗力依赖于变形温度和速度

(曲线数字 —— C^{-1}):

a — 塑性计上的试验 ($\varepsilon = 10\%$) ;

σ — 应力机上的试验。

因此，这两种钢的钢锭和钢坯的加热与轧制可按同样的工厂传统工艺来进行。

本文曾对两个基本冶炼制度进行了研究：(1)真空电弧炉重熔（柱形结晶口容量大约6吨重的钢锭），将大约6吨重的钢锭在初轧机上轧制成 $120 - 140 \times 580 - 600 \times 1700$ 毫米的板坯，然后在2300的轧机上热轧成 $6.5 - 8.6 \times 1680 \times 1700$ 毫米的钢板以及最终于2800轧机上进行冷轧；(2)电渣重熔（矩形结晶口容量为13吨钢锭），将13吨重的钢锭在板坯初轧机上轧制成 $105 \times 1370 \times 2100$ 毫米的板坯，然后在1680继续轧机上轧制成 $10.2 \times 1350 \times 2100$ 毫米的钢板，最终，这些钢板在2800轧机上进行冷轧。

通常采用锻造的方法将真空电弧炉重熔的柱形钢锭锻成板坯。而本文作者用齐拉宾斯基工厂的1180初轧机轧制柱形钢锭取得板坯的方法进行了试验研究，真空电弧炉熔炼的钢锭是在ЗЛАТОУСТОБ-СКНИ冶金工厂冶炼的。原始钢锭（非真空熔炼）重量大约为7700公斤，真空电弧炉重熔之后，钢锭的重量为5100 - 6000公斤，而剥皮之后则为3800 - 5100公斤（钢锭的直径为550 - 580毫米）。为了把钢锭装入均热坑时运输的可靠性以及把钢锭从均热坑移送到初轧机，在钢锭的头部刨成斜面。

在初轧机上要求将这些钢锭轧成宽度不小于580 - 600毫米的板坯，这是为了它们有可能在两辊的2300轧机上进行轧制。

钢锭在均热坑中加热到 1250°C ，并保温5小时。为了保证钢锭在均热坑中的稳定位置，把钢锭搁置在锯齿形的园周上，这种锯齿形的物体直接按在均热坑的侧壁上。依照下面的压下制度（第8道及第9道之后为反钢，第10道为空转），在I和IV两个孔型中进行轧制。（图2）。

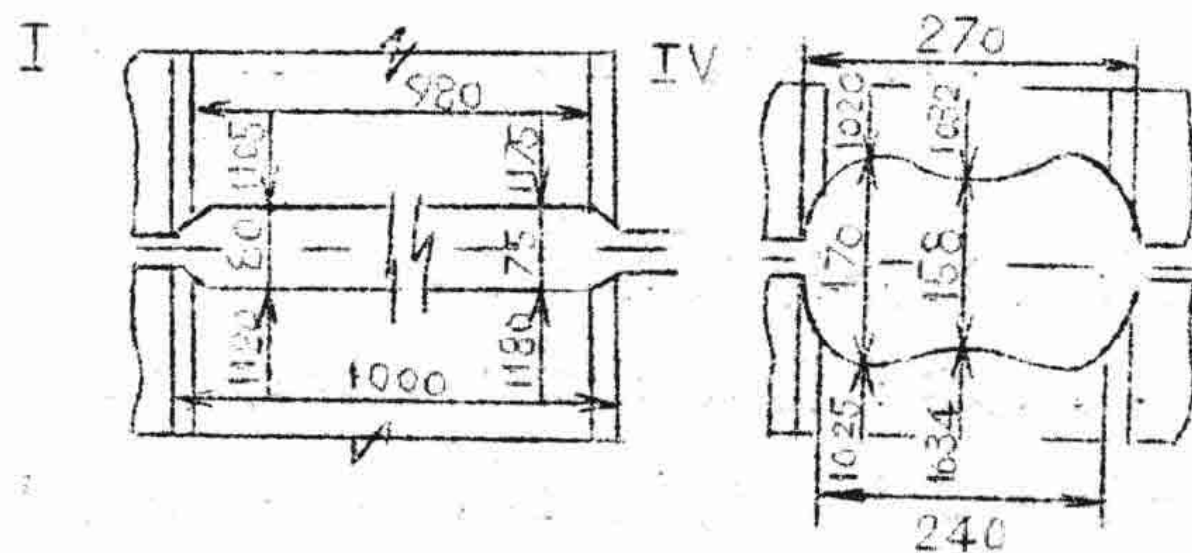


图2 在齐拉宾斯克冶金工厂的初轧机上，把直径为550 - 580毫米的真空电弧炉熔炼的3Л678圆柱形钢锭轧制成140×590毫米截面的板坯时的第I道和第IV道的孔型形状。

580毫米圆锭			550毫米圆锭		580毫米圆锭				550毫米圆锭		
道次	H	Δh	H	Δh	道次	H	B	Δh	H	B	Δh
1 (I)	520	60	490	60	7 (I)	270		40	200		40
2 (I)	470	50	440	50	8K (I)	240	610	30	160	600	40
3 (I)	430	40	390	50	9 (IV)	570	250	40	580	150	20
4 (I)	390	40	340	50	11 (I)	240	—	40	140	585	20
5 (I)	350	40	290	50	12 (I)	170	—	40	—	—	—
6 (I)	310	40	240	50	13 (I)	140	590	30	—	—	—

每支钢锭（轧材）认为可得到四块板坯。实际上由于真空电弧炉钢锭的剥皮消耗大量的金属，通常不满三块半板坯，从而致使消耗系数大大地增加。

板坯的实际宽度为575 - 585毫米。把它们在2300轧机上轧

制成厚 6.5 - 8.6 毫米，宽 1680 - 1700 毫米的钢板。

轧制时，宽板轧机和万能轧机的主马达的电流值没有超过允许值。从这些板坯得到的钢板带为 2100 毫米长的钢板毛坯 3 - 4 的倍尺。

热轧钢板不同厚度的分析表明，8.6 毫米厚的钢板大约有 98% 的厚度差不超过 0.6 毫米（图 3，a），即等于 ГОСТ 5681 - 57 的总的厚度公差的一半。95% 的钢板轧制后的厚度差均在 0.5 毫米以下。用新辊轧制的大部分钢板（约 70%）的厚度差（ a_1 ）比中期轧辊的厚度差（ a_2 ）显著的减小。因为，这些钢板在翻新的轧辊上轧制的。当利用废轧辊生产时厚度差明显增大，有 10% 的厚度差超过厚度公差的一半。6.5 毫米厚的钢板厚度差的分布特点是相似的（图 3 6）。在科穆纳尔斯基冶金工厂的二机架四辊轧机上试验用锻坯轧制

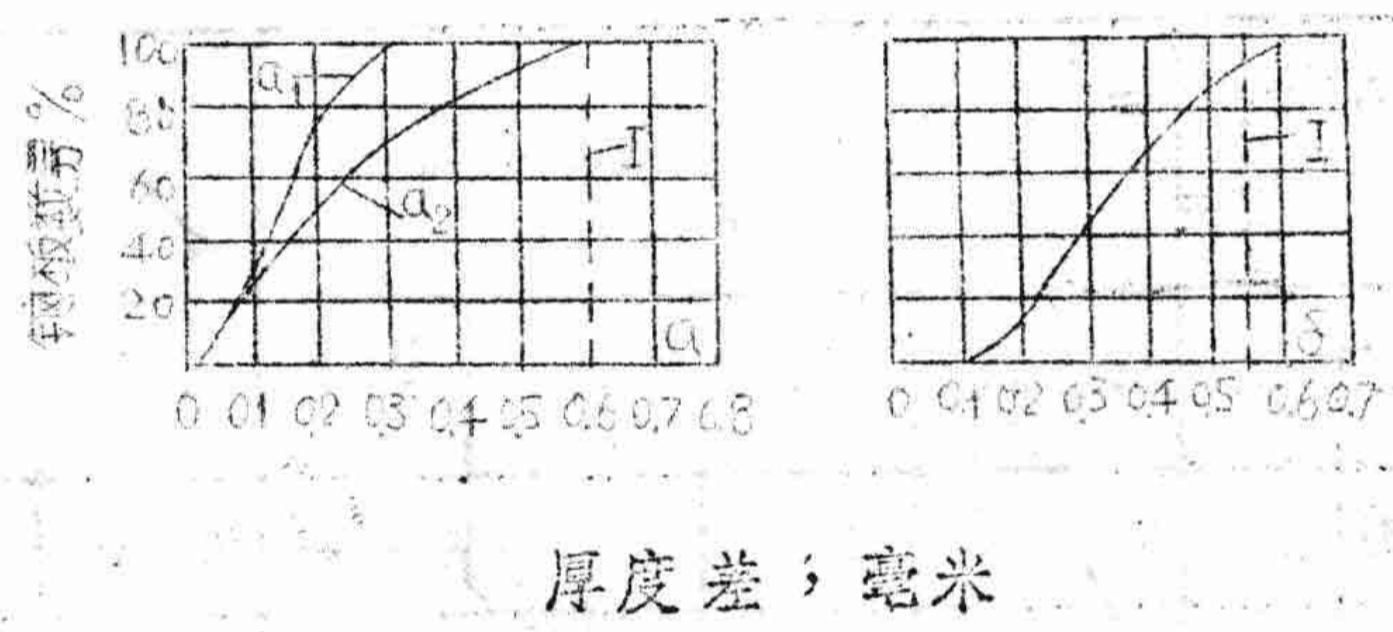


图 3 在齐拉宾斯克冶金工厂的 2300 的两辊轧制 3II 678 钢的热轧钢板的厚度差：

- a — 8.6 毫米的钢板（ a_1 — 新辊 a_2 — 轧制中期的轧辊）
- 6 — 6.5 毫米的钢板；
- I — 按 ГОСТ 5681 - 57 厚度公差的一半。

8 × 1650 ㎜截面的钢板时，厚度差没有超过 0.5 - 0.6 毫米，即同样没超出 ГОСТ 5681 - 57 厚度公差的 $\frac{1}{2}$ 的范围。

热轧空冷后（图4a）金属具有下列机械性能：

σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ_5 %
105 - 115	95 - 110	10-15

如此高强度钢板的冷轧是困难的，因此根据冷轧材的技术条件曾规定要提供 $\sigma_b \leq 100$ 公斤/毫米²， $\sigma_{0.2} \leq 85$ 公斤/毫米² 和 $\delta_5 \geq 13\%$ 的性能指标，即较热轧后的钢板稍软些和塑性更大些。根据文献〔1〕和文献〔2〕中160页所推荐的淬火工艺（860-870℃/30分、空冷）能使3H678钢达到软化。

数批钢板按照此种方法淬火后，金属具有如下的机械性能： $\sigma_b = 94-107$ 公斤/毫米²， $\sigma_{0.2} = 75-102$ 公斤/毫米²， $\delta_5 = 10-14.5\%$ 这样的热处理使热轧后钢板的平均强度性能略有降低。但是在许多场合下抗张强度仍旧超过100公斤/毫米²，而且相对延伸率低于13%。

为了选择能确保所要求的性能达到规定的工艺，曾对工业熔炼和实验室熔炼的钢试样加热到860-1000℃的温度，并在指定的温度下保温10-30分钟，而后在空气或水中进行冷却的淬火试验。热轧状态的试样强度在 $\delta_5 = 12-14\%$ 时约为105公斤/毫米²。试验的结果是：在920℃（或更高的）淬火温度下，在10-30分钟的所有的保温范围内强度稳定地降低到 $\sigma_b \leq 100$ 公斤/毫米² 和塑性 δ_5 的提高不低于13%；在更高的加热温度时保温时间可短些。最合理的淬火工艺应该是加热到920-940℃，保温时间为3-3.5分钟/毫米，在水中或空气中冷却。

从热轧的或淬火的马氏体时效不锈钢板上消除氧化皮是相当复杂的。对于此种钢，不能采用碱—酸法，因为在碱熔化的温度下，钢被时效强化。对于这种不锈钢的酸洗只能在酸中进行，因而要求很长的酸洗时间（30-45分钟），并且金属的损失相当大。

此类钢可以推荐应用喷丸—酸洗的方法〔3〕。破碎处理后不锈钢在酸溶液中的酸洗时间不超过5分钟。

在轧辊直径为 570 - 580 毫米的单机架 2800 毫米的四辊式轧机上以垂直热轧方向进行钢板的冷轧。由于金属的原始强度高而采用小的压下率：在初轧时每道压下量为 0.15 - 0.30 毫米，在终轧时每道压下量不大于 0.1 毫米，把原始强度极限为 100 公斤/毫米² 的轧件轧制成 4.2 - 5.6 毫米厚的成品钢板需要平均轧 20 - 22 道次。而强度极限为 110 公斤/毫米² 的轧件则需要 30 - 32 道次。轧制高强度的金属是很困难的，它同时使主传动的负载提高及钢板翘曲度严重；每道的压下量不应该超过 0.1 毫米。

直接冷轧后（即供货状态）金属具有下列机械性能（图 4 6）：

σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ_5 %
125	115	9-10

因此，由于 35 - 40 % 冷变形的结果，使马氏体时效钢大约强化了 25 %。钢板的翘曲度在冷作硬化状态下在 2 - 1.5 毫米/米的范围内，其中 75 % 左右的钢板的翘曲度在 1.0 毫米/米以下。个别缺陷经检查后钢板表面质量符合 ГОСТ 5582 - 61 中的 II - III 级别，经超声波检查没有发现钢板内部的分层缺陷。

冷轧钢板的厚度差（0.06 - 0.22 毫米）为厚度公差（±0.3 毫米）的一半。在 2800 轧机上的冷轧结果，随着轧件原始厚度差的增大厚度差的减小程度增加：例如具有 0.186、0.394 和 0.440 毫米原始厚度差的三批钢板，经冷轧后曾获得同样的冷轧钢板的厚度差 0.14 毫米，从而使厚度差各自相应地降低了 1.33、2、3.1 和 3.12 倍。

经淬火（图 4，A）及时效（图 4，B）后金属具有下列的机械性能水平：

	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ_5 %
B	176-212	168-205	4-9
T	163-192	154-186	

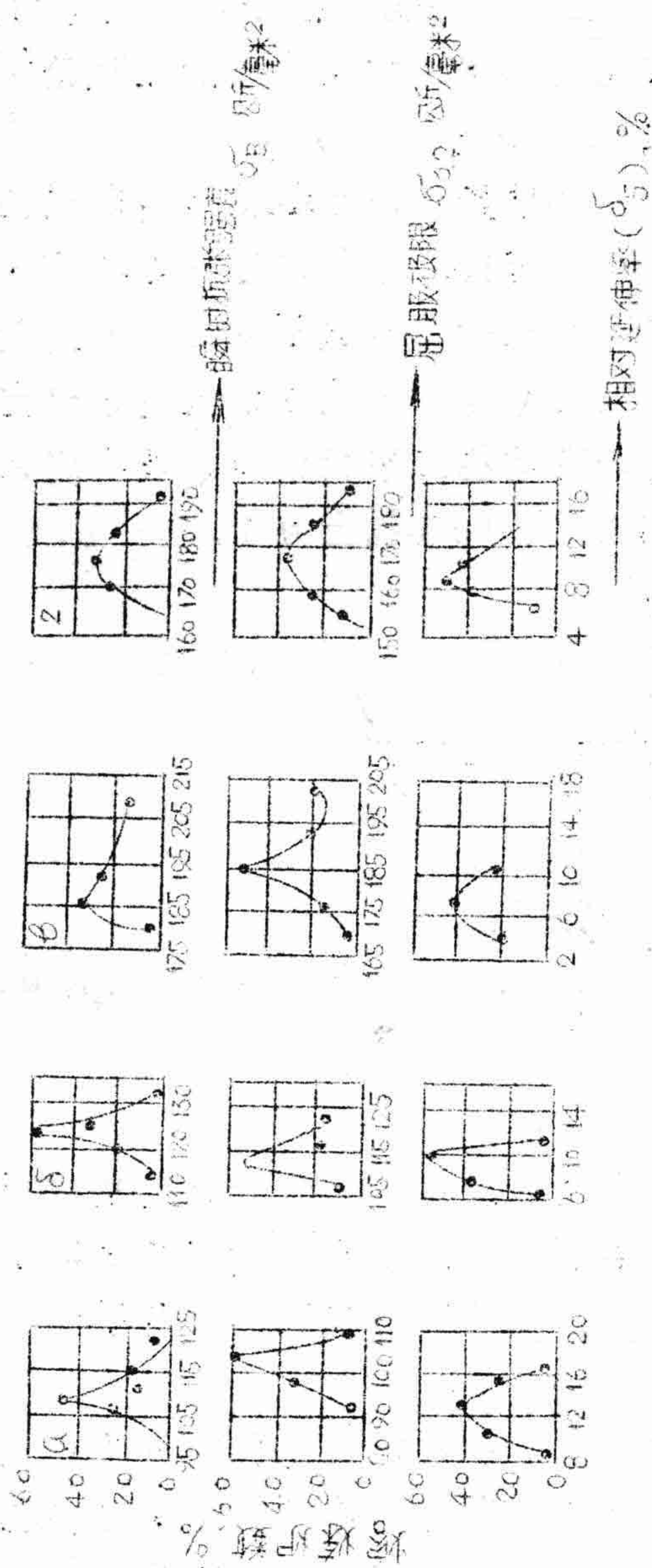


图4：工业熔炼ЭП 678 (BIII) 钢板机械性能的频率曲线：

a——热轧钢板 (29 炉)； 6——冷轧钢板 (26 炉)；

B——冷轧和时效钢板 (500°C, 2 小时, 26 炉)；

E——冷轧、淬火 (900°C, 30 分钟) 和时效钢板 (按和 B 相同工艺制度, 26 炉)

ЭП678 钢的强度和塑性在时效强化状态下具有较宽的分散度，主要是由强化元素（钛）所决定的，钛元素的含量在试验钢中有较大的波动范围——从 0.7 到 1.25 %（图 5）。

27 炉钢的总消耗系数（从原始的熔炼钢锭到冷轧成品钢板）达到最大值——在 3.4 - 5.0 范围内（平均为 4 - 4.3）。当真空电弧炉熔炼的钢锭在初轧之前剥皮较少的情况下，可以达到最小的总消耗数值。真空电弧炉熔炼的钢锭（4 - 5 吨）的大量特查引起总消耗系数很大的波动，以及也导致某些工序的消耗系数有宽的分散度；在初轧机上是 1.7 - 2.6；在 2300 轧机上为 1.2 - 1.8；在 2800 轧机上为 1.27 - 1.55。

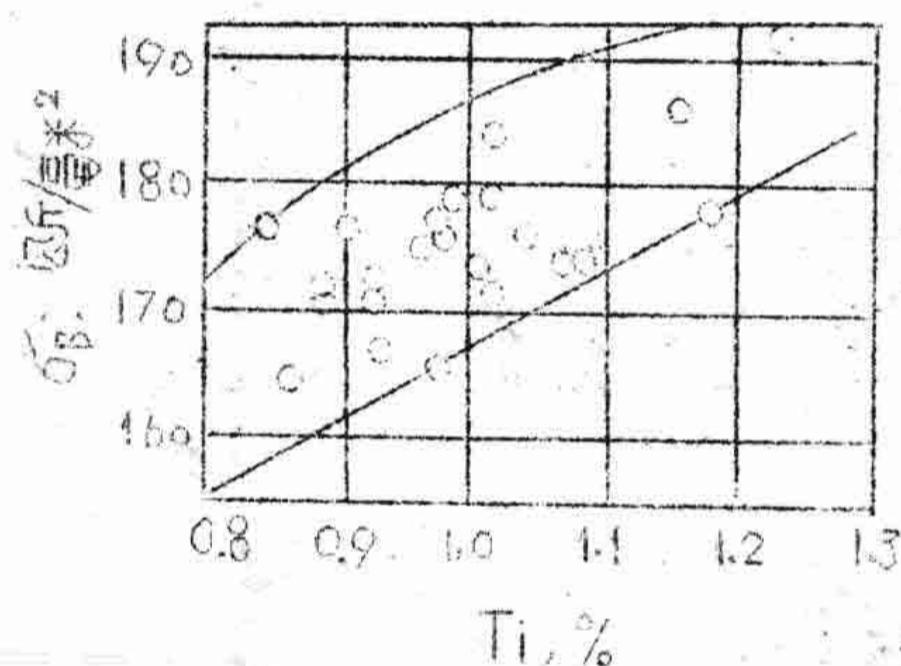


图 5 ЭП 67.8 钢（真空电弧炉重熔）中含钛量的范围对冷轧（40%的压缩率），淬火（900°C/2 小时）和时效（500°C/2 小时）之后瞬时抗张强度的影响

马氏体时效不锈钢真空电弧熔炼钢板的冷轧钢板生产的试验工艺有很大的缺点；协调复杂化，从而引起运输费用大，在初轧机上轧制圆柱形钢锭困难，高的金属消耗系数。因此试验了采用电渣重熔钢锭的工艺，使工厂的协调大大地简易化了。

特涅伯尔特殊钢厂用非真空电炉钢重熔了尺寸为 640×1700-1900 毫米，重达 13 吨的电渣重熔钢锭。从查波罗什钢厂的 1100 板坯初轧机上得到自耗电极。同样在该轧机上把电渣重熔钢锭轧制成

105 × 1370 × 2100毫米的板坯，将板坯在1680连续轧机上轧制成10.2 × 1370 × 2100毫米热轧钢板，以及把这些钢板在2800轧机上轧制成尺寸为5.6 × 2000 × 2000毫米的冷轧钢板。轧件在板坯初轧机上通过使主马达载荷升高的原因，主要是由钢锭加热不够引起的，由于它们在均热炉中在均热阶段保温时间少的缘故。

鉴于较宽的电渣重熔钢锭以及以冷状态装入均热坑，所以应该把均热时间延长到6小时。其中有1支钢锭在1250℃保温5小时45分钟后轧制正常而没有过载。

因此真空电弧炉重熔的钢锭及电渣重熔的钢锭的加热和轧制可以按其他不锈钢钢锭的工艺进行之，但要作相应的修正（视钢锭的尺寸与装料温度而定）。

在1680轧机上连续轧制前，板坯（105 × 1370毫米）在加热炉中的加热工艺与115 × 1250毫米截面的Cr₁₈Ni₁₀Ti钢板坯相同。（加热温度1240 - 1260℃加热时间3小时30分钟）在轧制ЭИ678钢板（10.2 × 1370毫米）时马达的载荷（I_A）短时间没有超过允许电流（I_b），而接近轧制7.8 × 1280毫米尺寸的Cr₁₈Ni₁₀Ti钢板时所产生的载荷I_B。（Δh—按照产品表的压缩率；№1 - 7—机座；在№4机座之后的轧件温度为1065℃，在№10机座之后根据测量轧件温度降低到940℃）：

	两机架 四辊轧机							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
Δh, MM.....	12.5	32.3	27.2	6.5	8.4	3.9	2.5	2.2
I _A , KA.....	0.21	0.69	0.59	0.515	0.5	5.75	10.0	9.65
I _B , KA.....	0.31	1.0	0.625	0.625	0.625	12.0	12.0	12.0
I _B , KA.....	0.18	0.73	0.54	0.45	0.45	5.2	6.4	8.7

所有的机座（除№6之外）上在轧制这二个钢种时负载差值在-6到14%范围，在第6机座差值是36%。提高和延长不锈钢工

艺规范中所规定的板坯加热温度和时间可以略为降低马达的载荷。钢板在二个中间热处理工序间进行冷轧，中间热处理的工艺为：加热到 980°C ，保温 8 分钟，喷水冷却。

钢板冷轧之前，分别在酸洗溶液（ $20 \sim 23\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ； $2.0 \sim 3.5\% \text{NaNO}_3$ ； $2.0\% \text{NaCl}$ ； $80 \sim 85^{\circ}\text{C}$ ）和漂洗溶液里（ $12\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ； $5\% \text{NaNO}_3$ ； 75°C ）酸洗 20 ~ 40 分钟，淬火后在那些溶液中的酸洗时间是 1.6 ~ 2.4 分钟。

把厚度约 11 毫米（轧件实际厚度）钢板经第一次轧程冷轧到厚度为 9 毫米的钢板，每道压下量为 0.2 ~ 0.25 毫米。在个别钢板的侧面产生了小的裂纹，深度为 3 ~ 5 毫米。在最后轧制时（每道压下量为 0.15 ~ 0.20 毫米）有许多钢板的裂纹深度达到了 30 毫米。

为了防止裂纹的出现，轧件必须在冷轧之前淬火，包括中间淬火。

大部分轧制钢板的翘曲度不超过 1.0 毫米，而厚度差不超过 0.3 毫米；没有出现肉部的分层缺陷。

电渣重熔钢板的机械性能在各种状态下接近真空电弧炉重熔板的性能。

金属状态	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ_5 %
冷轧	131 ~ 136	119 ~ 121	7
900 $^{\circ}\text{C}$ 水冷	175 ~ 177	168 ~ 169	10
500 $^{\circ}\text{C}$ 时效（2小时）			
冷轧和时效 （500 $^{\circ}\text{C}$ ，2小时）	197 ~ 199	192 ~ 197	6~7

原始熔炼的钢锭至冷轧成品钢板的平均总的金属消耗系数为 3.4 其中在板坯轧上（从原始熔炼的钢锭起）为 2.2，在 1680 轧机和 2900 轧机上相应为 1.18 和 1.31。当改善某些电渣重熔的过程（缩短渣的厚度及熔池深度）时，钢锭到板坯的消耗系数将大大地减小。在这种情况下，总的消耗系数能够降低到 2.3 ~ 2.7（平均为 2.5）。

这样，从1吨B II II钢中可平均得到0.240吨冷轧钢板，而在电渣重熔的情况下则平均为0.3吨，并且这个指标实际上可以提高到0.4吨。

根据一些重要工序的工艺性，根据工厂协调的方便，以及根据以1吨熔炼钢中得到更多的成品合格率，电渣重熔的方法有着明显的好处。

结束语：

电渣重熔的工序系统被推荐用来生产宽的冷轧马氏体时效不锈钢的钢板，其中包括非真空电弧炉熔炼的工序，将其钢锭加热到 $1260 \sim 1280^{\circ}\text{C}$ （保温4.5~5小时）于板坯初轧机上轧制成电渣重熔用的电极，电渣重熔的钢锭被铸成直角形的截面，将电渣重熔的钢锭加热到 1250°C （保温5.5~6小时）于板坯初轧机上进行轧制，在1680轧机上轧制需要加热到 $1250 - 1260^{\circ}\text{C}$ （保温4 - 4.5小时）以保证在初轧机机组之后轧件的温度不低于 1100°C ），热轧钢板的淬火工序（ $920 - 940^{\circ}\text{C}$ 的加热温度，保温时间为3.0 - 3.5分/毫米），用喷丸法（具有相应的设备）及随后于酸洗溶液中短时间的酸洗来清除钢板上的氧化皮，以及具有35~45%的总变形量的冷轧工序。

译自《Сталь》1975年5期435-8页

焊接压力容器用马氏体时效不锈钢

一种新的能耐腐蚀耐氢脆的马氏体时效不锈钢具有足够高的强度，可用于压力容器。

前言：

压力容器制造者们，已有一段时间在努力寻找有效的方法，可以经济地得到重量轻，耐腐蚀好的焊接钢制压力容器。奥氏体不锈钢有优秀的抗腐蚀性能，但其屈服强度却局限在40Ksi左右，这样一来压力容器装置必定非常笨重。把奥氏体不锈钢在低温下冷加工，可以提高其力学性能，这是一种特殊的加工技术。

在目前采用这种途径，压力容器外形要受到某些限制，而且不经济。马氏体不锈钢通过淬火和回火热处理，可以获得高强度，但其成型性，可焊性和抗腐蚀性不如退火奥氏体不锈钢。多种合金钢，特别是最近各种级别的18Ni马氏体时效钢已成功地用作焊接压力容器材料。所有这些钢的缺点是它们的抗腐蚀性差，当用于腐蚀环境时，必须用有机涂面或加金属片作阴极保护，而且这些措施还不一定都能经常起到很好的保护作用。

半奥氏体或沉淀硬化不锈钢的出现，使大多数问题得到了某些改善。但这些钢种在生产工艺上都需要经过仔细控制的多级热处理，其中某些合金的强度还不能充分利用，因为在高强度情况下，抗应力腐蚀可能成为主要问题。

在镍马氏体时效钢基础上发展的一类新型不锈钢能够较好的解决一部分问题。

冶金与热处理

由国际镍公司引入的镍马氏体时效钢已发展成为一类新的冶金钢种，体心立方马氏体的独特的晶体结构对这些低碳马氏体钢的力学性能的影响是明显的，淬火后马氏体的韧性和塑性都相当高，类似于奥

氏体不锈钢。低温时效处理能够提高淬火加回火的马氏体钢的强度和硬度，这种综合性能，使马氏体时效钢能在退火（淬火）状态下加工成型，焊接和机械加工，然后再时效到最终强度和硬度，而尺寸的收缩却很小（0.0005吋/吋）。若说这些钢有什么不足的话，那就是它们的耐腐蚀性差，在使用时需加保护性涂层。

一种Cr—Ni—Ti合金既保留了镍马氏体时效钢的冶金特色，又具有不锈钢的抗腐蚀性能。这种马氏体时效不锈钢具有与镍马氏体时效钢相同的退火（淬火）强度（110,000磅/吋²的0.2%屈服强度和125,000磅/吋²的抗拉强度）良好的韧性（130呎—磅的夏比V型缺口冲击值），优良的成型性以及良好的机械加工性与可焊性能。

这种马氏体通过随后的单级热处理能够硬化到表1所示的强度范围，在900°F时效，能得到最高的强度与硬度，在1125°F时效，能得出最大的韧性，在1000°F时效，能得出韧性与强度最佳配合的综合性能。在几种沉淀硬化不锈钢中，也能获得同样的强度水平。然而，对马氏体时效不锈钢的许多特性的研究表明，应该把它看成真正的马氏体时效钢，而不应将其看成马氏体不锈钢或沉淀硬化不锈钢。

表1 Al_{mar} 362 的性能

各义成份%	C	Cr	Ni	Ti		
	0.03	14.5	6.5	0.8		
最低力学性能						
热处理 °F	R _c	0.2%YS (千磅/吋 ²)	UTS (千磅/吋 ²)	伸长 %	断面收缩 %	
900 °F	38	175	180	10	40	
1000 °F	33	145	155	12	45	
1125 °F	28	105	135	15	50	

韧性：

钢的断裂韧性对压力容器的应用来说是非常重要的。许多制造者们已把压力容器的塑性断裂性能与材料的缺口和非缺口抗张强度的比值联系起来，当应力集中系数约为1.5~2.0时，缺口与非缺口抗张强度之比值，接近于1或更大时，就产生塑性断裂，表2中数据表明退火加时效的材料，当屈服强度大于180,000磅/吋²时，得不到令人满意的缺口与非缺口抗张强度之比值，这个关系已被球形压力容器的实际破裂试验所证实。

大多数钢的冶金组织通过冷加工可得到改善。马氏体时效不锈钢的强度与韧性都可通过冷轧加直接时效而提高（如表3所示）这类处理工序用冷拉后直接时效就可容易达到，对冷拉加时效的压力瓶进行的破裂试验表明，强度直到200,000磅/吋²时还是塑性破坏，这比常用的淬火和回火的低合金钢具有高得多的韧性。（数据见表2所列4130的），此外，与淬火和回火钢所需硬化处理相比较，马氏体

表2 Almar 362 热处理与韧性的关系 0.116吋横向 $K_t > 20$

热 处 理	R_c	0.2% YS (千磅/吋 ²)	U T S (千磅/吋 ²)	N / V_N *
3小时 900°F	46	208	212	0.59
2小时 950°F	43	201	202	0.77
" 975°F	41	179	181	0.99
" 1000°F	40	173	177	1.01
" 1050°F	35	152	163	1.01
" 1125°F	31	112	147	1.01
4130 数据 0.116吋带材，纵向， $K_t > 20$ ，从1700°F淬火				
1小时 850°F	43	186	204	0.85
10,00°F	37	154	170	0.98
12,00°F	26	112	132	1.02