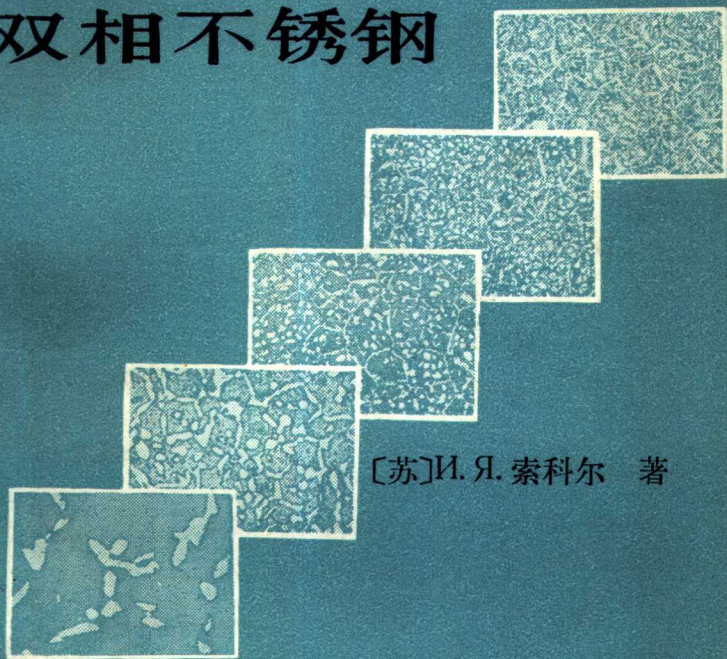


双相不锈钢



[苏]И. Я. 索科尔 著

原子能出版社



双 相 不 锈 钢

[苏]И.Я.索科尔 著

李丕钟 王欣增 译

陆世英 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书概括地介绍了合金元素和热处理对奥氏体-铁素体和铁素体-奥氏体双相不锈钢的组织、机械性能和物理性能影响的实验数据,研究了引起材料强化和脆化过程的机理和动力学。书中注意了双相不锈钢半成品和部件的制造工艺问题,并推荐了许多具体牌号的双相不锈钢的热处理和酸洗制度。

本书可供冶金、机械制造部门的金相、金属物理及特殊钢热处理和压力加工方面的科技工作者和工人参考,对于不锈钢金属学和热处理专业的高年级大学生和研究生亦有助益。

И.Я.Сокол

ДВУХФАЗНЫЕ СТАЛИ

Москва«Металлургия», 1974

双 相 不 锈 钢

[苏]И.Я.索科尔 著

李丕钟 王欣增 译

陆世英 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $7^{1/16}$ · 字数 157 千字

1979 年 1 月北京第一版·1979 年 1 月北京第一次印刷

印数 001—11900 · 定价: 0.95 元

统一书号: 15175·143

译 者 的 话

近年来，随着石油、化工、原子能、宇航、海洋开发、海水淡化等工业部门的迅速发展，不锈钢的应力腐蚀断裂 (Stress Corrosion Cracking) 和点蚀 (Pitting Corrosion) 问题越来越突出。许多统计资料表明：在不锈钢的腐蚀事故中，由于应力腐蚀断裂和点蚀所造成的事故约占三分之二以上。

为了解决这类局部腐蚀问题，国内外均在致力于研制新型的不锈钢。双相不锈钢即属引人注意的发展方向之一。许多研究结果表明，双相不锈钢在一定条件下对于氯化物引起的应力腐蚀具有优良的耐蚀性。其原因是：（1）铁素体与奥氏体两相混合组织具有较高的机械强度，难以引起粗大滑移；（2）铁素体对奥氏体有电化学保护作用；（3）铁素体组织难以引起穿晶裂纹。

概括说来，双相不锈钢具有如下一些特点：

- （1）屈服强度高，约为奥氏体不锈钢的二倍；
- （2）具有优良的耐应力腐蚀、晶间腐蚀、点腐蚀和缝隙腐蚀性能；
- （3）虽然 Cr 含量一般均在 18—25% 以上，但稀缺的 Ni 含量较低，属于节 Ni 钢种，具有经济意义；
- （4）导热系数大，膨胀系数小；
- （5）具有磁性；
- （6）在适当温度下具有超塑性；
- （7）高温强度介于铁素体钢和奥氏体钢之间；
- （8）可焊性良好，热裂倾向小，焊后不需热处理；

- (9) 仍具有高铬铁素体不锈钢的各种脆性倾向(475℃脆性, σ 相析出脆性, 高温晶粒粗化脆性), 因此, 使用温度受到限制;
- (10) 仅在低应力下具有优异的耐应力腐蚀性能, 在高应力下并不如此。

目前, 许多国家的冶金工作者均致力于研制以耐应力腐蚀和点蚀为目标的新型双相不锈钢。如: 美国的 AISI 329, 1N-744, ASP-11, Uniloy 326; 苏联的 ЭИ 811, ЭП 53, ЭП 54, КО-3; 日本的 SUS 329 J₁, NTK R-4, NTK C-1, NAS 45 M, DSD1H, STW, DP₃; 法国的 Uranus ST-Si; 西德的 UHB Stainless 44L 以及瑞典的 3RE 60, 10RE 21 等等。

И.Я.索科尔所著《双相不锈钢》一书, 较全面地介绍了有关双相不锈钢的知识。本着毛主席“洋为中用”的教导, 我们翻译了这本书, 供有关同志参考。

本书第一、二、三、四、五、七章由李丕钟同志译出, 第六章由王欣增同志译出。全书最后经陆世英和李丕钟两同志校阅。由于译校者水平所限, 错误之处在所难免, 敬希读者批评指正。

译者 1977.9.10

目 录

第一章 相组成

- § 1 不锈钢组织图..... (1)
- § 2 加热温度对相组成和相比例的影响..... (11)
- § 3 合金元素在各相间的分布..... (15)
- § 4 奥氏体-铁素体钢冶炼过程的控制特点..... (18)

第二章 相变及其对双相不锈钢性能的影响

- § 1 二次奥氏体的形成..... (22)
- § 2 二次奥氏体对机械性能的影响..... (27)
- § 3 碳化物的析出..... (29)
- § 4 σ 相形成过程的机理..... (33)
- § 5 σ 相形成过程的动力学..... (40)
- § 6 淬火温度和冷塑性变形对 δ 铁素体分解动力学的影响..... (45)
- § 7 合金元素对 σ 相形成过程的影响..... (53)
- § 8 σ 相溶解过程的动力学..... (56)
- § 9 双相不锈钢组织的金相研究..... (57)
- § 10 含钼奥氏体-铁素体钢中的 χ 相..... (59)
- § 11 双相不锈钢中奥氏体的稳定性..... (60)

第三章 弥散硬化

- § 1 时效钢的强化机理..... (69)
- § 2 分解的特点..... (72)
- § 3 铁素体基体中的析出..... (74)
- § 4 钛的影响..... (74)
- § 5 铝的影响..... (76)
- § 6 钛和铝合金化的高铬铁素体的时效..... (77)
- § 7 钼的影响..... (80)
- § 8 铜的影响..... (81)
- § 9 其它元素的影响..... (83)
- § 10 马氏体和铁素体钢中时效过程的动力学特征..... (83)

第四章 高铬铁素体的脆性

- § 1 475℃脆性、机理和动力学..... (87)
- § 2 高温淬火后铬钢的脆化..... (97)
- § 3 双相不锈钢低温强化和脆化本质的研究..... (99)

第五章 塑性和生产工艺

- § 1 成分和组织对双相不锈钢热塑性的影响..... (106)
- § 2 双相不锈钢的超塑性..... (113)
- § 3 双相不锈钢的热处理..... (114)
- § 4 酸洗..... (117)
- § 5 半奥氏体和马氏体钢中的 δ 铁素体..... (122)
- § 6 钢的主要缺陷与质量控制..... (124)

第六章 结构材料用双相不锈钢

- § 1 晶间腐蚀..... (129)
- § 2 机械性能..... (131)
- § 3 X21H5T (ЭИ811) 钢..... (136)
- § 4 0X22H6T (ЭП53) 钢..... (139)
- § 5 X17H12M2T和X17H12M3T 钢..... (141)
- § 6 0X21H6M 2 T (ЭП54) 钢..... (143)
- § 7 0X18H8 H 2 T (КО-3) 钢..... (145)
- § 8 0X20H 6 МД 2Т (ЭП 309, ВНС-4) 钢..... (148)
- § 9 1X18H2 АГ5 (ЭП 26) 钢..... (152)
- § 10 X25 H 20 С 2 (ЭИ283) 钢..... (157)
- § 11 15X 18H 12 С 4 ТЮ (ЭИ654) 钢..... (162)
- § 12 X32H8 (ЭП263) 和 0 X 32 H8 (ЭП535) 钢..... (166)
- § 13 0X 17 H7ГТ (ЭИ814) 钢..... (171)

第七章 焊丝和焊带用双相不锈钢

- § 1 C_B-07X25H12Г2Т (ЭП75) 和C_B-06X25H12ТЮ (ЭП87) 钢..... (177)
- § 2 C_B-06X20H11 М3 БТ (ЭП89) 钢..... (188)
- § 3 C_B-08X19H9Ф2С2 钢..... (192)
- § 4 C_B-08X20H9 С2 БТЮ (ЭП 156) 钢..... (196)
- § 5 C_B-1Г36Ю6 М2 (ЭП 181) 钢..... (203)
- § 6 国外工业生产的双相 不锈 钢..... (205)

参考文献

第一章 相 组 成

§1 不锈钢组织图

与大家熟知的1X18H10T型奥氏体不锈钢相比，双相不锈钢的铁素体与奥氏体形成元素之比一般较高，因而在金属组织中出现一定量的 δ 铁素体。目前，最有实际意义的是Fe-Cr-Ni系和Fe-Cr-Ni-Mn系不锈钢。对于这些系统曾进行过一系列的研究工作，以确定不同温度下相边界与合金化学成分的关系（图1）。

在特殊钢的生产实践中，若能根据任何一个新钢种的化学成分来正确估计它的相组成则具有非常重大的意义。因此，很早以前就已着手试图建立反映钢的组织（亦即性能）与其合金元素之间关系的组织图。谢弗莱尔（Schaeffler）组织图^[9]得到最广泛的应用，这一组织图最初是根据焊缝金属而确定的，后来推广到可变形的钢中（图2a）。当初就是根据谢弗莱尔公式来计算铬当量和镍当量：

$$\text{Cr当量} = \text{Cr}\% + \text{Mo}\% + 1.5 \times \text{Si}\% + 0.5 \times \text{Nb}\%;$$

$$\text{Ni当量} = \text{Ni}\% + 30 \times \text{C}\% + 0.5 \times \text{Mn}\%。$$

随后，许多研究者进一步确定了表征其它元素对金属组织影响的系数，从而使谢弗莱尔公式更加精确。这样，根据比杜利亚（П.Н.Бидуля）、约德科夫斯基（С.А.Иодковский）和萨希欣（Н.Н.Сашихин）^[12]的数据，确定铬和

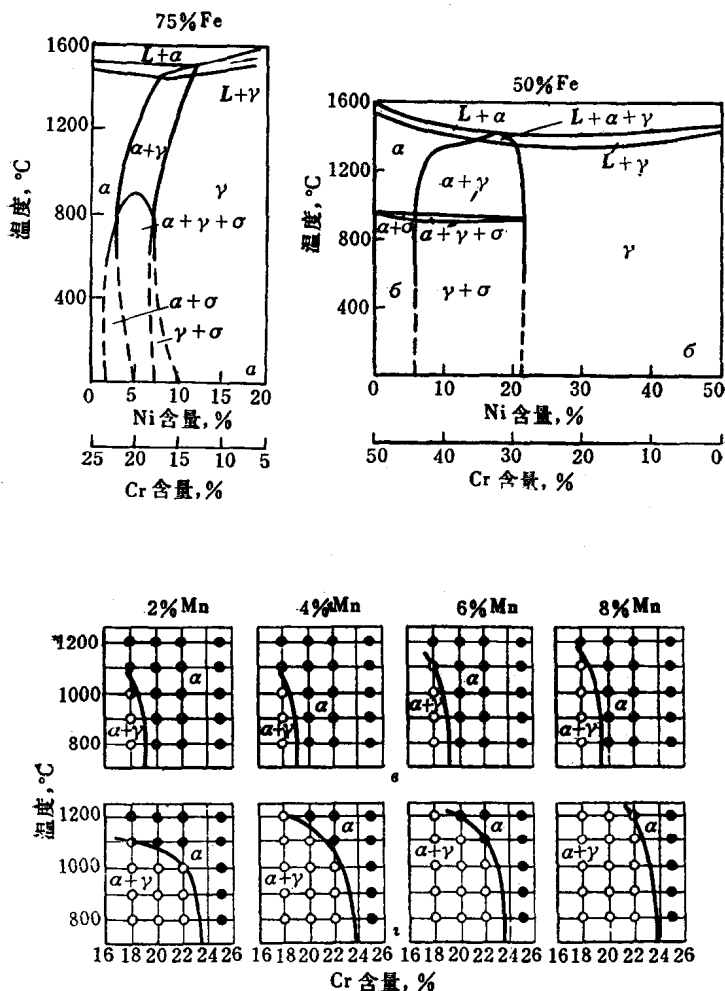


图1 Fe-Cr-Ni系(a, σ), Fe-Cr-Mn系(b)和 Fe-Cr-Ni-Mn系(2%Ni时)(γ)状态图的变温截面

镍当量的公式可写成如下的形式：

$$\begin{aligned} \text{Cr当量} = & \text{Cr}\% + \text{Mo}\% + 1.5 \times \text{Si}\% + 1.5 \times \text{V}\% \\ & + 0.8 \times \text{W}\% + 0.5 \times \text{Nb}\% + 4 \times \text{Ti}\% + \\ & 3.5 \times \text{Al}\% ; \end{aligned}$$

$$\text{Ni当量} = \text{Ni}\% + 20 \times \text{C}\% + 0.1 \times \text{Mn}\%。$$

（式中合金元素的含量为重量百分数）

作者们^[2]曾在含 δ 铁素体达15%的钢中验证过这些公式。

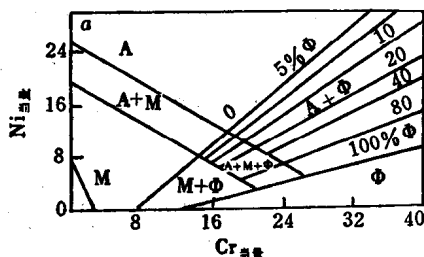


图2a 谢弗莱尔组织图

关于氮对形成奥氏体的作用问题文献中曾有着十分矛盾的报道。根据尤费罗夫 (B. M. Юферов) 及其合作者^[3]的意见，对于马氏体-铁素体钢组织，其镍当量应按如下公式确定：

$$\text{Ni当量} = \text{Ni}\% + 30 \times \text{C}\% + 0.5 \times \text{Mn}\% + 12 \times \text{N}\%。$$

当氮不是作为合金元素而是在冶炼过程中从炉料和空气中进入金属，因而缺少关于它的含量的数据时，为了补偿它对钢组织的影响，作者们建议把锰的系数用1.5代替0.5^[3]（当Mn在钢中含量达1%时）。随冶炼方法和浇注条件的不同，氮在不锈钢中的含量通常为0.020—0.040%。

按照德朗 (De Long) ^[4] 的数据, 氮形成奥氏体的能力与碳相似, 因此, 确定Ni当量的公式应写成如下形式:

$$\text{Ni当量} = \text{Ni}\% + 30 \times \text{C}\% + 30 \times \text{N}\% + 0.5 \times \text{Mn}\%.$$

在文献[5]中曾提出了氮的近似系数 ($26 \times \text{N}\%$), 然而, 作者在估计钼的铁素体形成能力 ($3 \times \text{Mo}\%$) 时却与其他研究者迥然不同。为了确定X18H10T钢在1150℃时的 δ 铁素体数量, 普赖斯 (Pryce) 和安德外斯 (Andwers) ^[6] 提出稍微变动一下谢弗莱尔组织图 (图26), 按如下公式计算当量:

$$\text{Cr当量} = \text{Cr}\% + 3 \times \text{Si}\% + 10 \times \text{Ti}'\%;$$

$$\text{Ni当量} = \text{Ni}\% + 0.5 \times \text{Mn}\% + 21 \times \text{C}'\%.$$

式中 $\text{Ti}'\%$ 和 $\text{C}'\%$ 为固溶体中元素的含量。

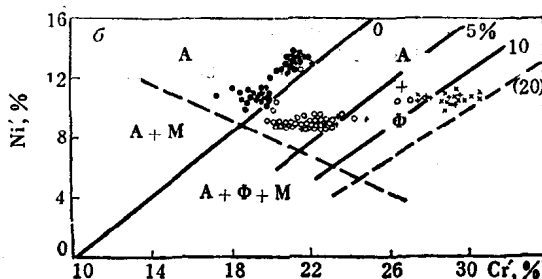


图26 普赖斯组织图

- 0或痕量;
- ≤5%;
- +—5-10%;
- ×—10%.

在X18H10T钢中, $\text{C}'\% = 0.03\%$; 而 $\text{Ti}'\%$ 是钢中的总钛量与结成氮化物和碳化物的钛量之差。

文献中还有一些关于合金元素对不锈钢中 δ 铁素体含量影响的其它数据。例如, 按照特鲁缅 (Дж.Е.Трумен) ^[7] 的结果, 对于含有10—17%Cr和4—10%Ni的钢, 应该采用一

定的系数值。

对于促进形成 δ 铁素体的元素，其系数值如下：

元素……	Cr	Si	Mo	Al	Nb
系数……	1	0.5	0.7	5	2

对于抑制形成 δ 铁素体的元素：

元素……	Ni	N	C	Mn	Co	Cu
系数……	1	20	17	0.2	0.5	0.4

从上面所列的数据可以看到，这些元素中分歧最大的是硅、铌^①、钼和铝。显然，这在某种程度上是由于难以精确计算氮的影响以及不可能准确计算出固溶体中个别元素的含量之故。

按照我们的数据，采用比杜利亚等人^[2]的公式计算铬当量，而用德朗^[4]公式计算镍当量，则双相可变形钢中的 δ 铁素体的计算含量与实验含量能很好地符合起来，即：

$$\text{Cr}_{\text{当量}} = \text{Cr}\% + \text{Mo}\% + 1.5 \times (\text{Si} + \text{V})\% + 0.8 \times \text{W}\% + 0.5 \times \text{Nb}\% + 4 \times \text{Ti}\% + 3.5 \times \text{Al}\%;$$

$$\text{Ni}_{\text{当量}} = \text{Ni}\% + 30 \times (\text{C} + \text{N})\% + 0.5 \times \text{Mn}\%。$$

这些数据与铸态试样中的 δ 铁素体含量相符合；当然，热变形和淬火之后会使 δ 铁素体的平衡数量增加。

除谢弗莱尔组织图之外，为了确定 1X18H10T 型奥氏体不锈钢中的少量 δ 铁素体，以前经常利用各种线解图。最近，有一些工作正在运用与谢弗莱尔有某些不同的见解来建立组织图。例如，按照沙拉波夫和古里亚耶夫^[8, 128页]的数据，对于 δ 铁素体含量达 20% 的 1X18H9TJI 铸钢，奥氏体基体中第二相的数量与其化学成分的关系用如下的方程式表达：

① 原文误为钛。——译注

$$\Phi = 2.4 \times \text{Cr}\% + 14.0 \times \text{Ti}\% + 1.4 \times \text{Al}\% + 1.2 \times \text{Si}\% - 41.0 \times \text{C}\% - 2.5 \times \text{Ni}\% - 0.5 \times \text{Mn}\% - 18. \quad (1)$$

式中 Φ 为自1050℃淬火后 δ 铁素体的百分含量。

表达式(1)还可写成如下形式:

$$\Phi = 2.4[(\text{Cr}_{\text{当量}} - \text{Ni}_{\text{当量}}) - 7.5] \quad (2)$$

式中 $\text{Cr}_{\text{当量}} = \text{Cr}\% + 5.8 \times \text{Ti}\% + 0.5 \times \text{Si}\% + 0.6 \times \text{Al}\%$;

$\text{Ni}_{\text{当量}} = \text{Ni}\% + 17.0 \times \text{C}\% + 0.2 \times \text{Mn}\%$ 。

一般情况下,对于含碳量达0.1%而 $\text{Ti}/\text{C} \geq 5.0$ 或 $\text{Nb}/\text{C} \geq 8.0$ 的铸造稳定化不锈钢来说,根据所引用的数据,铬当量和镍当量可按下列式确定:

$$\text{Cr}_{\text{当量}} = \text{Cr}\% + 1.5 \times \text{Si}\% + 5.0 \times \text{Ti}\% + 3.0 \times \text{Nb}\% + 0.8 \times \text{Mo}\%;$$

$$\text{Ni}_{\text{当量}} = \text{Ni}\% + 17.0 \times \text{C}\% + 20.0 \times \text{N}\% + 0.3 \times \text{Mn}\% + 0.1 \times \text{Cu}\%。$$

组织中 δ 铁素体的含量与差值 $(\text{Cr}_{\text{当量}} - \text{Ni}_{\text{当量}})$ 有关,且具有抛物线形式:

$$\Phi = 1.685[(\text{Cr}_{\text{当量}} - \text{Ni}_{\text{当量}}) - 7.5]^{1.36}。 \quad (3)$$

因此,可以认为,所得到的当量差值 $(\text{Cr}_{\text{当量}} - \text{Ni}_{\text{当量}})$ 是表征铸钢的相组成与其化学成分之间关系的基本参数。利用这一参数使作者^[8]能够建立铸造不锈钢在不同温度下的综合性组织图(图2B)。这一组织图对于成分为0.15%C, 0—2%Si, 0—15%Mn, 16—28%Cr, 2—14%Ni, $\leq 2\%$ Mo, $\leq 0.4\%$ Cu, $\leq 0.4\%$ N, $\leq 1.0\%$ Ti和 $\leq 2.0\%$ Nb的钢是正确的。

淬火铸钢的屈服极限(公斤/毫米²)和延伸率与 δ 铁素体数量成正比,并且,1X18H9TJ钢的机械性能与铁素体百分含量(Φ)的关系可用下式表达:

$$\sigma_{0.2} = 25.0 + 0.41 (\Phi), \quad \delta_5 = 47.5 - 0.675 (\Phi)。$$

同时, 根据文献[8]作者的意见, 淬火钢的冲击韧性主要取决于碳化钛的数量和分布并由下式来确定:

$$a_k = 21.5 - 174(\text{Ti}\% \times \text{C}\%) \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2。$$

为了使部件得到预期的性能和组织, 利用上述公式和组织图可以很方便地选择铸件的化学成分和热处理制度。

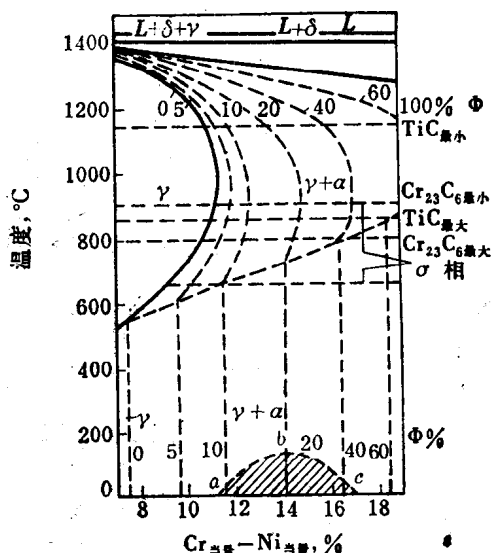


图2b 沙拉波夫(И.М.Шарапов)和古里亚耶夫(Б.Б.Гуляев)组织图

如前所述, 对于不同炉号但同一牌号的钢种, 根据其奥氏体形成元素和铁素体形成元素的比例就完全可以把它们的相组成区别开来。

在钢种成分区间范围内, 含镍较低的X21H5T型钢以及X18H12C4TiO型高硅钢对其化学成分的波动特别敏感。因

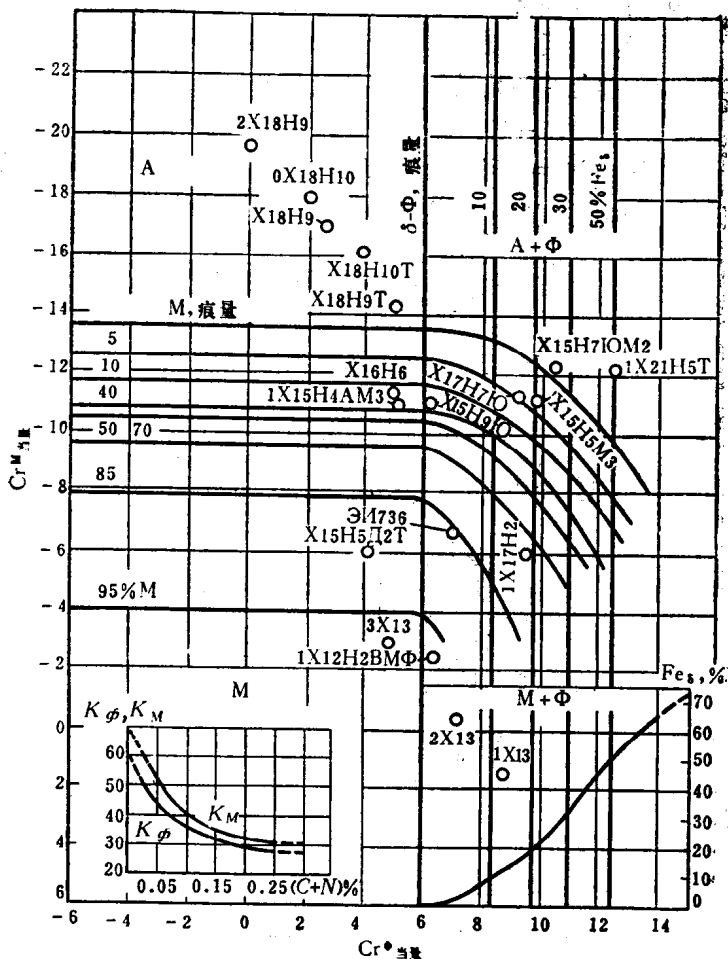


图2г 波塔克(Я.М.Потак)和
萨加列维奇(Е.А.Сагалевиц)组织图

图2 不锈钢组织图

(图2а.б.в.г中:) A—奥氏体; M—马氏体, Φ—铁素体。

此，为了保证所要求的相比例，在冶炼双相不锈钢时应当采取特殊的措施（见本章 § 4）。

应该指出，在所研究的组织图中，所有的合金元素在一定条件下都可以把它们视为或者与铬类似，或者与镍类似。这种情况在很大程度上只是考虑到了它们对钢中 δ 铁素体数量的影响而完全没有考虑到它们对马氏体转变开始温度 M_s 点的影响。例如，按形成铁素体的能力，铝明显地高于铬。然而，与铬不同，铝不能稳定奥氏体^[9]，而能提高 M_s 点。因此，由波塔克和萨加列维奇^[10]提出的可变形不锈钢的组织图就具有很大的意义（图 2 r）。根据这一组织图，可以半定量地确定奥氏体-马氏体，马氏体-铁素体和奥氏体-铁素体钢的相组成。这一组织图最重要的特点是：它把坐标分为形成铁素体的铬当量（横坐标）和形成马氏体的铬当量（纵坐标），而且后者是按所有的合金元素对马氏体转变开始温度的影响来计算的，可按如下公式计算两种铬当量：

$$\begin{aligned} \text{Cr}^\circ_{\text{当量}} = & \text{Cr}\% - 1.5 \times \text{Ni}\% + 2 \times \text{Si}\% - 0.75 \times \text{Mn}\% - \\ & - k_\phi (\text{C}\% + \text{N}\%) + \text{Mo}\% + 4 \times \text{Al}\% + 4 \times \\ & \times \text{Ti}\% + 1.5 \times \text{V}\% + 0.5 \times \text{W}\% + 0.9 \times \text{Nb}\% - \\ & - 0.6 \times \text{Co}\% - 0.5 \times \text{Cu}\%, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cr}^M_{\text{当量}} = & 20 - [\text{Cr}\% + 1.5 \times \text{Ni}\% + 0.7 \times \text{Si}\% + \\ & + 0.75 \times \text{Mn}\% + K_M (\text{C}\% + \text{N}\%) + 0.6 \times \\ & \times \text{Mo}\% + 1.5 \times \text{V}\% + 1.1 \times \text{W}\% + 0.2 \times \\ & \times \text{Co}\% + 0.2 \times \text{Cu}\% + 1.9 \times \text{Ti}\% - 0.1 \times \\ & \times \text{Al}\%]. \end{aligned}$$

系数 k_ϕ 和 k_M 的值是可变的，按照组织图左下角所给的曲线随着 $(\text{C} + \text{N})$ 之和的增加而减小。因为，随着 $(\text{C} + \text{N})$ 的增加，这些元素形成奥氏体的能力减小。显然必须记住，

在所有不锈钢中氮含量实际上都在0.015—0.025%范围内，所以，在没有分析氮的情况下，当计算当量时必须考虑到氮的这一含量。

上述组织图适用于从1050—1100℃淬火后钢的组织状态。这个温度范围是不锈钢热处理时最常选择的。因为这时铬碳化物实际上能完全固溶于不含Ti、Nb的非稳定化钢中，而在更高的温度下（1200—1250℃）， δ 铁素体的数量通常会急剧增加。

按照文献[10]作者的数据，当把钢中镍含量增加到5%以上时，它降低 δ 铁素体数量的作用有某些减小。因此，对于含5—10%Ni的钢来说，铁素体形成系数建议采用 $2.5 + \text{Ni}\%$ 。

还必须考虑的是，为了得到更精确的结果，在计算时必须只用从1050—1100℃淬火后处于固溶体内的合金元素数量，尤其是象碳、氮、钛、铝、铌这样一些元素。在文献[10]中，对于含碳约为0.1%的钢，结合到碳化物中的钛量为0.2—0.3%（图2r），而TiC中的碳量为0.25（按照化学计量公式计算）。

在含铌钢中，全部铌含量的一半被结合到碳化物中。在这种情况下，固溶体中的碳含量可用下式确定：

$$[\text{C}\%] = \text{C}\% - 0.5 \times \text{Nb} / 7.5\%$$

在以钛或铝合金化的钢中，过剩的氮（约0.02%）通常形成氮化物或碳氮化物。因此，这些元素在固溶体中的含量应减小到 3.4×0.02 （对于钛）和 2×0.02 （对于铝）。

上述组织图的应用范围如下：

元 素	C+N	Cr	Ni	Si	Mn	Mo
含量，%	0.03—0.2	10—22	≤10	≤1	≤1	≤2