

基本館藏

274138

鋼的相變

В. Д. 薩多夫斯基教授
在南京大學的演講記錄

5
江苏人民出版社

钢 的 相 变

B.Д.薩多夫斯基教授在南京大学的演講記錄

尹道乐等譯

江 苏 人 民 出 版 社

鋼 的 相 變

B. Л. 薩多夫斯基教授

在南京大学的演講記錄

尹道樂等譯

*

江苏省書刊出版業許可証出〇〇一號

江 蘇 人 民 出 版 社 出 版

南 京 湖 南 路 十 一 號

江苏省新华书店发行 江苏新华印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印張 7 5/8 字數 281,000

一九六〇年四月第一版

一九六〇年四月南京第一次印刷

印數 1—1,000

前 言

本書是 B.Д. 薩多夫斯基教授于1958年春在南京大学关于鋼的加热相变、馬氏体相变、奧氏体的等温分解及回火脆性等問題的演講記錄。

本書可作为高等工业学校、科学研究机构或綜合性大学的参考書，也可以供冶金及机器制造工厂等工程技術人員参考用。

演講由尹道乐同志担任翻譯。記錄曾經尹道乐、郑正毅、戚正风、俞德剛、陈南平、楊讓、吳兵、賴和怡、徐紀楠、吳頤、陈天雄、馮端、洪永炎、刘永銓、徐游及周衡南等同志整理。

周志宏 同 識
施士元

1958年4月

目 录

第一講	馬氏体轉变	1
第二講	鋼在加热时的相和組織的轉变	71
第三講	过冷奧氏体的等温轉变	142
第四講	等温淬火对鋼的力学性能的影响	172
第五講	鋼的回火脆	190
第六講	研究鋼在加热和冷却时相和組織的轉变的 实际意义	207
附录一	二十四种滿足庫久莫夫—薩克斯方案 的位相关系的說明与图示	214
附录二	有关馬氏体相变講課所提問題的回 答	225
附录三	有关加热时相和組織轉变講課所提 問題的回答	236

第一講 馬氏體轉變

(一)

70多年前，天才的俄國工程師 Д.К.切爾諾夫於1885年在彼得堡發表了一篇“穿甲彈的生產”的論文。在這篇論文中 Д.К.切爾諾夫第一個指出了淬火的基本要素有以下四個：

1. 加熱到淬火所必須的溫度。
2. 為獲得所需的淬火狀態必須冷卻到一定的溫度。
3. 為獲得淬火狀態所必須的冷卻速度。
4. 鋼在淬火時體積改變的大小與方向。

Д.К.切爾諾夫最先指出，為了獲得淬火狀態，必須把已經加熱到高溫的鋼樣迅速的冷卻到某一個臨界溫度以下。切爾諾夫用“d”來代表這個臨界溫度，對於含有 0.8% 碳的鋼料來說，這一溫度約為 200°C。

這裡我們所要討論的就是在“d”點以下所進行的轉變的特徵與本質。

三十年前，謝良柯夫(Семяков)，庫久莫夫(Курдюмов)與古德錯夫(Гудцов)等三人用 X 光結構分析的方法，研究了淬火鋼的結構。他們証實了淬火到“d”點以下所得到的馬氏體組織，實質上就是碳在 α 鐵中的過飽和固溶體。這就使我們了解到在淬火的过程中所發生的是從含碳的 γ 固溶體轉變為含碳的 α 固溶體的过程。因為轉變是在低溫下進行的，所以在轉變的時候，碳未能從固溶體中析出，固溶體的成份沒有發生改變，而只是點陣的結構有了改組，從面心立方的 γ 相結構轉變成了四方的 α 相結構。



淬火所得的馬氏體具有四方點陣，其四方性決定於馬氏體本

身的含碳量。

对这一转变过程的进一步研究结果指出，马氏体相变还有着系列的特征。

已经证实必须冷却到某一个温度以下才能发生马氏体相变，这一马氏体相变的温度上限被称为马氏体点。切尔诺夫用“ d ”来代表这一点，通常用 M 或 T_M 来代表。不同成份的钢有着不同的马氏体点，并且马氏体点的位置与冷却速度无关。

又经确定，马氏体点 M 是相变开始的温度，相变是在一个很宽的温度范围内进行的，相变必须在不断的冷却过程中才能进行，温度停止下降，则相变很快发生停滞，并终止。

转变和温度的关系可以用图1的曲线来表示。转变的特征是转变量仅决定于温度，而与冷却速度以及等温停留的时间无关。如图1所示冷却到 300°C 时，大约有20%的奥氏体转变成了马氏体，在 300°C 下等温停留并不能增加马氏体的量。如要使转变继续进行，则必须继续降低温度。但即使冷到室温，也还不能认为马氏体相变已经结束了，此时还

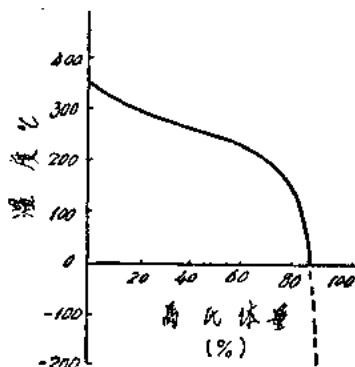


图1. 马氏体转变与温度的关系

有未转变的奥氏体，这部分奥氏体通常被称为剩余奥氏体。如果把温度继续降到零度以下，剩余奥氏体还可以继续转变为马氏体。图1只是表明了马氏体转变的一种情况，随奥氏体中的碳与合金元素含量的不同，马氏体转变曲线的位置和形状均可能发生变化。

到目前为止还没有搞清楚的是，为什么转变量仅与冷却到的温度有关而与在该温度下停留的时间无关。不错，在最近也发现了马氏体的等温转变，但是转变很快就发生了停滞。

从图2可以看到，在冷却到 200°C 后，如在該温度下停留一段

時間，則有等溫轉變發生。實驗證明，等溫轉變的量是有限的，轉變很快就發生了停滯，延長等溫停留時間並不能使轉變進行到底。而且由於等溫停留的結果，使得在以後的冷卻過程中的轉變變得困難，使冷卻到室溫時的轉變量

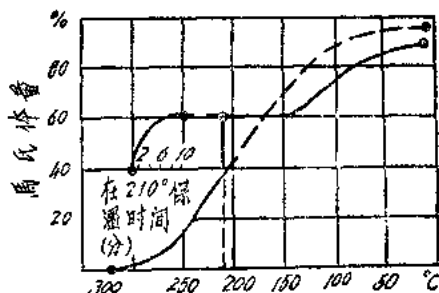


圖2. 馬氏體的等溫形成示意圖

反而減少了。圖2中的虛線部分表示沒有等溫停留時的轉變曲綫，實綫表示在200°C等溫停留以後的轉變曲綫。

如果在冷到低於 M_s 點的某一溫度形成了一定量的馬氏體之後，再加熱到某一個溫度進行低溫回火(150—200°C)，也能使在以後冷卻時的馬氏體相變發生困難，轉變的溫度有了滯後，轉變的

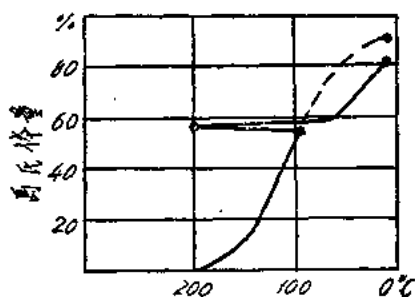


圖3. 奧氏體的陳化穩定的示意圖

量有了減少(圖3)。這種現象被稱為奧氏體的陳化穩定。有許多人對此現象進行了研究，但到現在為止，還不能認為是已經解決了的。

在比較早期的一些研究工作中(也包括我的工作)，曾認為奧氏體的穩定化現象是由于馬氏體的回火所引起的

(包括自然回火與人工回火)。

如以含碳1.2%的碳鋼為例，加熱到1100°C在油中淬火到室溫，可以得到20%的剩餘奧氏體。如淬火後立即投入液體氮中冷卻到-183°C，則可使奧氏體量減少到4.7%。如果在冷到室溫後，先加熱到50°C，100°C，150°C及200°C進行回火，然後再放入液體氮中冷卻到-183°C，則奧氏體量分別為7.4%，12.1%，14.1%，14.7%(圖4)。這是陳化穩定現象的一個典型例子。

从这一例子可以看出,目前在工业中所采用的冷处理,其效果与在淬火后是否进行回火或室温停留有关系的。

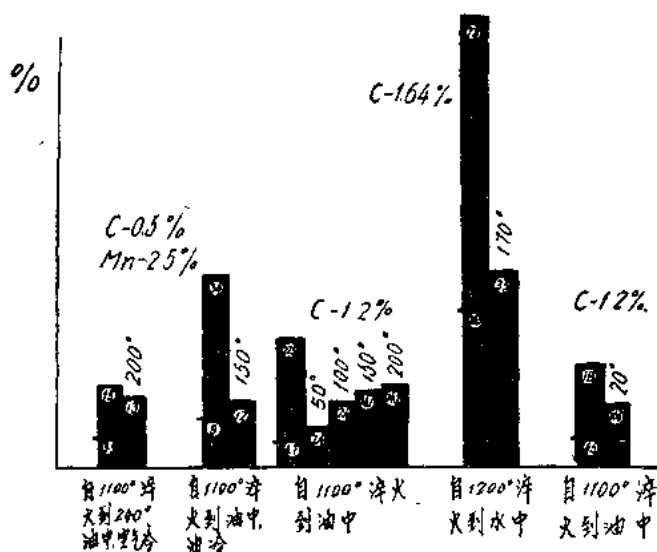


图4. 低温回火产生的奥氏体稳定化

如仍以含碳 1.2% 的碳钢为例,在 1100°C 油淬后,如在室温下停留一个时期然后再进行冷处理,则奥氏体的量仅能减少到 10% (图 4)。

但现在的更多的实验结果证明,奥氏体稳定化的现象并非由于马氏体的回火所引起的,而是与等温停留时在奥氏体内部所发生的某种变化有关。

毕格也夫 (Бигеев) 研究了含碳量对马氏体点及转变曲线的影响,结果指出碳能降低马氏体点,并使整个马氏体转变曲线朝向低温方向移动 (图 5 与图 6)。

尤静 (Зюзин), 萨多夫斯基 (Садовский) 与巴朗楚克 (Баранчук) 曾研究了合金元素对马氏体点的影响,指出 Mn, Cr, Ni, Mo 等合金元素使 M 点下降。Co 与 Al 提高 M 点, Si 单独存在时对 M 点没有影响,但与其他元素共同存在时,也能使 M 点下降。

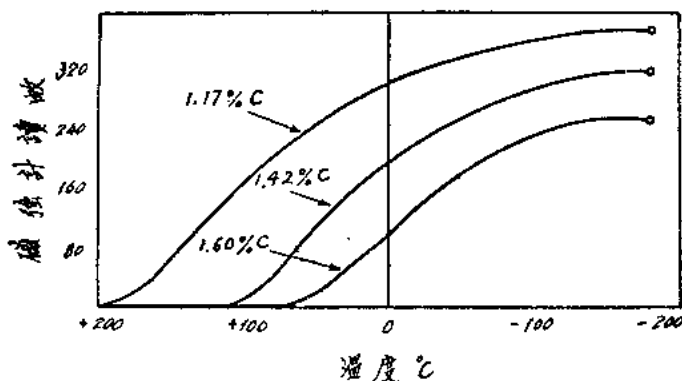


图5. 碳含量对馬氏体曲线的影响

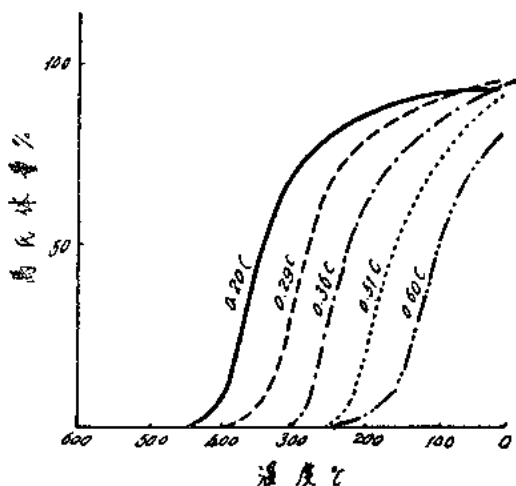


图6. 碳含量对馬氏体曲线的影响

例如在 Ni—Cr 鋼中加入 Si 就能使 M 点降低(图 7)。

很多人提出过根据鋼的化学成份計算 M 点的經驗公式。这里介紹一下烏拉尔工业大学波波夫 (Попов) 教授所提出的公式:

$$M = 520^\circ - 320\%C - 50\%Mn - 30\%Cr - 20(\%Ni + \%Mo) - 5(\%Cu + \%Si)。$$

需要指出的是这一公式仅适用于含碳在 0.2%—0.8% 之間的鋼料。这一点很重要, 因为含碳量不同时, 合金元素以及碳本身的

含量的改变对 M 点的影响是不一样的。例如对含碳 0.8% 的钢来讲, 增加 0.1% 的碳可使 M 下降 20°C , 而对含碳 0.1% 的钢来讲, 当碳的变化为 0.1% 时, 则 M 点的变化可达 100°C , 当含碳量低于 0.05% 时, 就很难计算 M 点。

十年前, 柯亨 (M. Cohen) 指出, 在奥氏体的化学成份相同的情况下, M 点还决定于淬火的加热温度。但是大量的实验资料

都证明 M 点的位置以及剩余奥氏体的量仅取决于奥氏体的化学成份 (这里暂不考虑奥氏体晶粒大小的影响)。

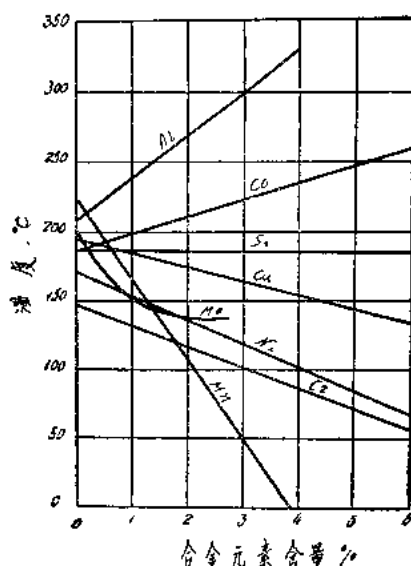


图7. 合金元素对马氏体点的影响

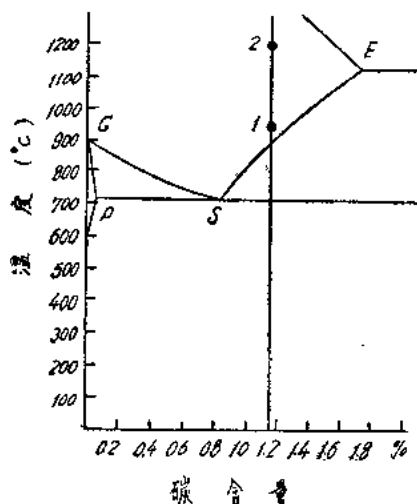


图8. 铁碳平衡图

哈里斯 (Harris) 和柯亨在他们的工作中指出, 从点 2 直接淬火下来要比先从点 2 冷到点 1, 然后再从点 1 淬火到室温具有更多的剩余奥氏体 (图 8)。柯亨所用的钢料含 1.1% C, 5.4% Ni, 将此钢加热到 1050°C 直接淬火下来可以得到 80% 的剩余奥氏体; 假如在加热到 1050°C 以后先冷到 850°C , 然后再淬至室温, 则剩余奥氏

体仅有60%，而1050°C及850°C均在 γ 区域之内。柯亨認為这是因为在奥氏体内部的結構上发生了某种变化，因而就使得奥氏体易于轉变为馬氏体了。

这样一种看法是不正确的。

薩多夫斯基与鮑加契娃(Богачева)認為在柯亨等所用的高Ni 碳鋼中在850°C停留时很可能有石墨析出,因为Ni能促进石墨化。由于石墨的析出,改变了奥氏体中的含碳量,因此就改变了奥氏体的轉变能力。薩多夫斯基与鮑加契娃用同样的鋼重复了柯亨的实驗,証明在850°C停留时确有石墨析出。这就說明了剩余奥氏体的减少是由于碳的析出,使得奥氏体的化学成份有了改变(表1)。

表1 在 γ 区域的保温引起碳的析出

起始的加热		降温的保温		剩余奥氏体含量	碳的含量	
温度(°C)	保温时间(分)	温度(°C)	保温时间		一般的	自出的(石墨)
845	30	沒有进行		33.4		
845	300	沒有进行		39.0	1.23	0.38
1050	30	沒有进行		89.0	1.15	0.039
1050	30	845	1 分	67.0	1.19	0.22
1050	30	845	15 分	56.8	1.16	0.22
1050	30	845	1 小时	53.9	1.09	0.26
1050	30	845	2 小时	48.7	1.17	0.27
1050	30	845	4 小时	44.5	1.18	0.28
1150	30	沒有进行		89.0	1.14	0.039
875	30	沒有进行		67.2	1.13	0.24
1050	30	875	30 分	72.5	1.25	0.27

从而可以得出結論,只要奥氏体的化学成份不发生改变,淬火前的温度对于M点的位置以及剩余奥氏体的量沒有影响。

我完全同意柯俊教授的意見,晶粒大小对M点的影响是比較复杂的,而且还存在着矛盾的現象。在某些情况下,晶粒大小对M点的影响是很明显的,对于M点高于室温的鋼料来說,奥氏体晶粒

大小对 M 点没有影响。但对于 M 点低于室温的鋼料来講，奥氏体晶粒大小的影响就比较显著。晶粒愈大，M 点的位置愈高。

盖都可夫 (Гандуков) 和我曾用三种 Ni—Cr 鋼研究了晶粒大小对 M 点位置的影响，鋼料的化学成份及結果見表 2，可以看到奥氏体的晶粒愈粗大，則 M 点越高，粗晶粒的奥氏体約較細晶粒的高出 20°C 。

表 2 晶粒度对馬氏体轉变的影响

鋼	自 1000°C 淬火		自 1200°C 淬火	
	晶粒度按全苏标准 5639—51	馬氏体点 ($^{\circ}\text{C}$)	晶粒度按全苏标准 5639—51	馬氏体点 ($^{\circ}\text{C}$)
0.83%C 11.72%Ni 1.36%Cr	4—5	-40	1	-20
0.81%C 14.20%Ni 1.52%Cr	7—8	-135	3	-110
0.79%C 18.32%Ni 1.58%Cr	6—7	低于-196	1	-180

現如取一样品，加热到 1000°C 进行淬火，得到細晶粒的奥氏体組織。在样品上用凿子打一缺口，然后再加热到 1000°C ，由于形变量不同，经过再结晶，在加热到 1000°C 后，在缺口附近就得到了不同大小的奥氏体晶粒。將此样品再由 1000°C 淬到室温，則可以发现在大晶粒中已有馬氏体出現，而在小晶粒中还没有发生馬氏体相变。图 9 和图 10 是缺口附近的低倍組織，可以清楚的看到在再结晶以后出現了大小不同的奥氏体晶粒，并且在粗晶粒中已有了馬氏体相变。图 11 是放大到 130 倍的显微組織照片，从这里可以更清楚的看到，在粗晶粒中已出現了很粗大的馬氏体，而在細晶粒中則沒有馬氏体出現。



图9. 鋼的試样經過再結晶后的顯微組織(放大 4 倍)

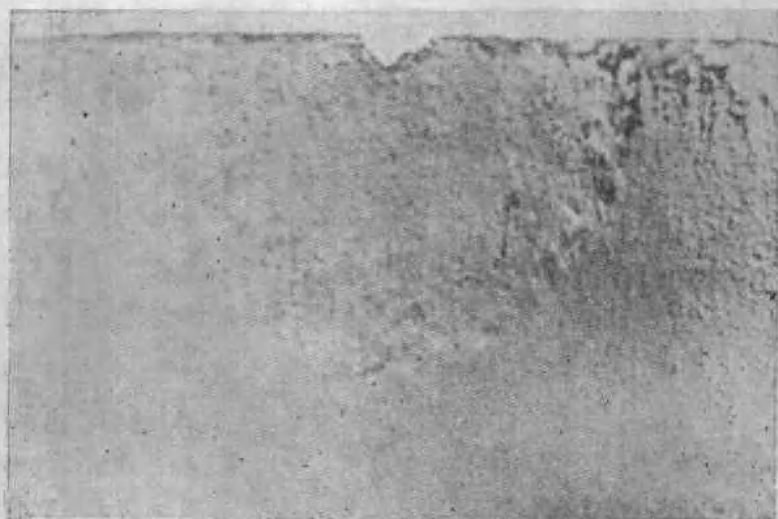


图10. 試样磨光表面上的缺口所引起的粗晶粒区域，在冷却到液氮溫度所形成的馬氏体(放大 4 倍)

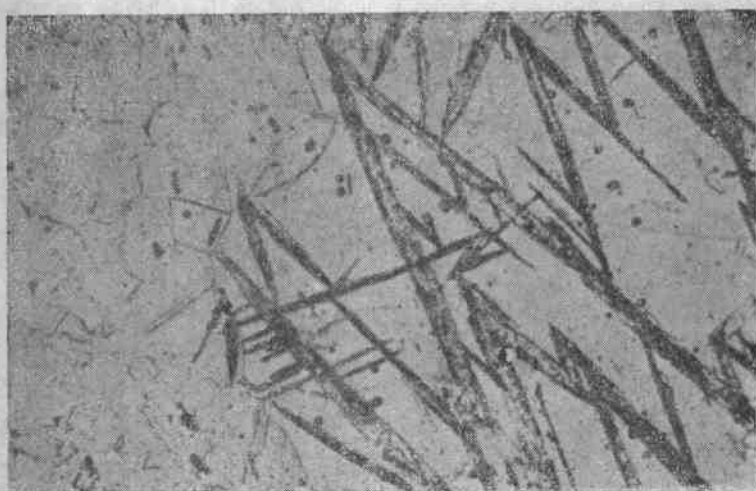


图11. 试样在大晶粒区与小晶粒区交界处的显微组织



图 12.

苏联的庫久莫夫 (Г.В.Курдюмов) 在馬氏体相变理論的研究方面有着卓越的貢獻, 因此他在我們中間享有极高的威信。当庫久莫夫 50 寿辰的时候, 大家都送了很多礼物給庫久莫夫。我們研究所送給庫久莫夫的礼物是一块鋼板, 鋼板的基体是奥氏体, 在奥氏体上面有由馬氏体組成的ГБК—Л等字样(图12)。ГБК是庫久莫夫姓名的縮写, L 是羅馬字母中的50。我們还不知道庫久莫

夫是否已猜出这件礼物是怎样做成的。說穿了也很简单，我們就是利用晶粒大小对馬氏体点的影响而制成的。

鋼板的成份是 18.32% Ni, 1.58% Cr, 0.79% C。將此鋼板先加热到 1000°C, 冷至室温, 使获得細晶粒的奥氏体組織, 然后用洛氏硬度計在鋼板上打出上面的字样, 再將鋼板加热到 1000°C, 取出放入液氮中冷却, 即制成了我們的礼物。

奥氏体的陈化稳定的現象在前面已經提到了, 所謂陈化稳定指的是奥氏体由于內部結構发生了某些变化而影响奥氏体轉变为馬氏体的轉变过程。

前面也已指出, 只要奥氏体的化学成份不变, 在 γ 区内任一温度停留对于以后的馬氏体相变都不会有甚么影响。例如先加热到图 8 中的点 2, 然后冷却到点 1, 停留一个時間再淬火, M 点的位置并不因而发生改变。

但是在低于 γ 区的温度下保温又将如何呢? 前面也已提到在 M 点以下的等温停留是会使得奥氏体变得稳定的。但是在冷却到 M 点以前的等温停留是否也会引起奥氏体的陈化稳定呢? 許多人的工作指出是有的。例如美国的特罗揚諾 (Troiano) 与克里尔 (Klier) 用高铬鋼証实在高于 M 点的温度下等温停留也会使奥氏体变得稳定。

烏拉尔金屬研究所的石坦因柏尔格 (С.С.Штейнберг) 与石坦因柏尔格 (М.М.Штейнберг) 也曾对此問題进行过研究。鮑卡契娃与我也曾核对了特罗揚諾等的工作。我們所得的結果如下:

用两种鋼料进行了研究, 他們的化学成份是 a. 0.8% C, 4.5% Mn, 3.7% Ni; 6. 0.8% C, 15% Cr。这两种鋼料的 M 点均在室温以下, 第一种鋼料的 M 点是 -20°C, 第二种是 -70°C。

研究指出, 在冷却到 M 点以前, 在室温停留二个月也未引起奥氏体发生陈化稳定, 在 200°C 等温停留 4 个小时同样也未引起陈氏稳定 (图 13—14)。

但如將样品先冷却到略低于 M 点的温度, 使形成一部分馬氏体, 然后再加热至 M 点以上的温度进行回火 (即等温停留), 发现只

需在室温停留10分鐘就有了陈化稳定,在200°C回火陈化稳定更为显著。在回火以后的继续冷却过程中转变发生了滞后,转变量也显著减少(图15)。

另外还用不含碳的Fe—Ni合金进行了研究,发现当碳含量小于

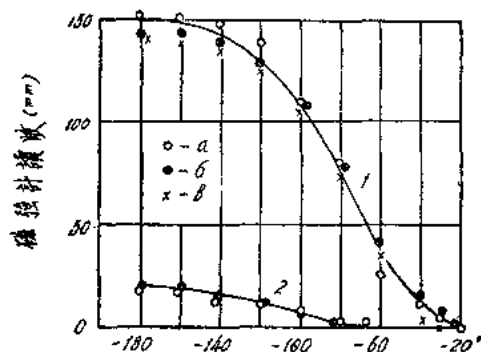


图13. 高于M点的保温对马氏体转变的影响

○-a—自1000°直接淬火 ●-b—在室温停留2个月
×-c—在200°停留4小时

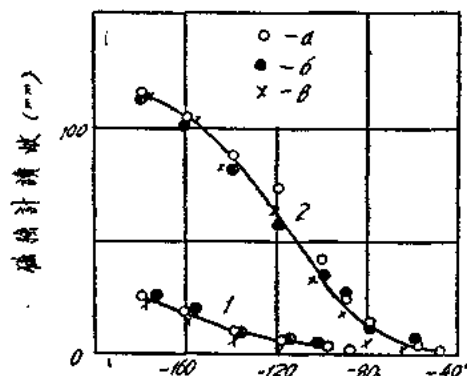


图14. 高于马氏体点的保温对马氏体转变的影响
○-a—自1000°直接淬火 ●-b—在室温停留2个月
×-c—在200°停留4小时

有在在馬氏体存在而且馬氏体有了分解的时候在高于M点的温度下等温停留,才会引起陈化稳定。但后来发现在某些合金中,尤其是含碳少的合金中情况并不是这样的。

0.02% 时,即或有馬氏体存在,在高于M点的温度下等温停留也不产生陈化稳定(图16)。作者注意到了含碳Fe—Ni合金的馬氏体在加热时不发生分解。

根据以上的工作,我曾經在一个时期中認為在M点以上等温停留不会引起陈化稳定,只

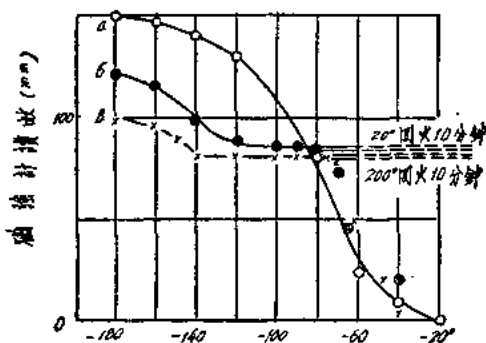


图15. 回火所引起的奥氏体稳定化