

预防热处理 废品的措施

〔日〕吉田亨等著

机械工业出版社

预防热处理废品的措施

吉田亨

〔日〕 齐田義幸 著

野村並樹

张克俭 译 费云亮 校



机械工业出版社

本书内容包括热处理的基本知识、钢的材料缺陷、热处理件的组织缺陷、常见的热处理缺陷、淬裂和热处理变形六个部分。书中对各类热处理缺陷的产生原因作了理论分析，讲述了热处理缺陷的检查试验方法并介绍了防止缺陷的措施。

本书可供从事热处理生产和金相分析的工人和技术人员阅读。

熱処理失敗の予防対策

吉田 亨
齐田義幸 著
野村並樹

日刊工業新聞社 1974

* * *

预防热处理废品的措施

吉田 亨
〔日〕 齐田義幸 著
野村並樹

张克俭译 费云亮校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $6\frac{1}{4}$ · 字数 136 千字
1979年11月北京第一版·1979年11月北京第一次印刷

印数 00,001—58,000 · 定价 0.59 元

*

统一书号：15033 · 4585



译 者 序

在热处理生产中，分析热处理缺陷的产生原因并制定预防缺陷的措施，是关系产品质量提高的一项重要工作。为了适应我国机械工业热处理生产发展和提高产品质量的需要，遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，翻译了《预防热处理废品的措施》一书。

本书较系统地介绍了热处理缺陷的产生原因、危害和预防措施，对从事机械工业热处理生产的工人和技术人员有一定参考价值。

原书的图表内使用了一部分英制单位和华氏温度。为了读者阅读时换算方便，在本书用到的范围内，列了英美制换算公制的单位换算表和华氏换算摄氏的温度换算表。对于书中所用的日、美钢号，亦设表列出了我国的对应钢号，无对应钢号的，则注出了主要成分，附在书末，可供查对。

在本书的翻译过程中，曾请中国科技情报所重庆分所蒋国栋同志和北京钢铁学院金相专业叶田田同志解决过几个问题。书稿经费云亮同志细心校订，改正了原译稿中不少错误和不妥之处。校对工作中得到包钢冶金研究所李培良、东北工学院金相专业李见、阎振荣、林琦等同志的帮助，谨表示感谢。

由于译者水平有限、经验不足，本书还难免存在错误，因此诚恳地希望读者批评指正。

译 者

原作者序

人们常说“重蹈覆辙”。但不幸的是有的人就不一定能接受历史的教训，而总是重复过去的失败。我们如果尊重过去的经验，注意从失败中学习，就可能会避免一般的错误。不仅工程技术，科学的发展在本质上也是以这类经验的积累为基础的。

根据这种道理，在热处理及其相关的技术领域，收集整理现场常见的失败事例和克服措施，对提高热处理技术是很有益的。可是，我国（指日本——译者）技术人员往往不肯发表失败的事例，倒想把失败的事实掩盖起来，而充分研究它以预防再次失败的努力是做的不够的。

本书的三位作者同在名古屋工业研究所二十多年，从事金属工艺技术的研究工作，受许多工厂的委托，深入地参与了分析热处理和与其相关技术上的失败与事故原因的工作。本书就是通过这些工作的经验积累，自然写成的。所以，我们认为，书中的内容不仅对热处理工作者，同时对从事机械和设备的设计、制造与使用等多方面的技术人员，也有相当的参考价值。

我们希望本书成为供从事热处理及与其相关技术的工作者能经常翻阅的参考书。

作者

1974年12月

目 录

1 钢热处理的基本知识	1
1.1 钢的转变和平衡图	2
1.2 钢的常化组织 (缓慢冷却时)	7
1.3 球化退火组织 (粒状珠光体)	10
1.4 淬火组织 (快速冷却时)	11
1.5 回火组织	13
1.6 等温转变与S曲线	14
1.6.1 高于 M_s 点的等温淬火	16
1.6.2 低于 M_s 点的等温淬火	17
1.6.3 分级淬火	18
1.7 合金元素的作用	18
1.8 质量效应和淬透性	19
1.9 铸铁的金相组织	21
1.9.1 可锻铸铁 (韧性铸铁)	24
1.9.2 球墨铸铁	25
2 材料缺陷及材料的选择方法	26
2.1 产生在钢锭 $\ominus$ 中的缺陷	26
2.1.1 宏观偏析与显微偏析	27
2.1.2 非金属夹杂物	32
2.1.3 钢锭中产生的其他缺陷	35
2.2 热加工产生的缺陷	37
2.2.1 过烧	38
2.2.2 内裂	40

$\ominus$ 原文为“钢魂”系此误——校者。

2.2.3 边缘缺陷	41
2.3 材料缺陷的宏观组织检查法	43
2.3.1 取样与研磨方法	43
2.3.2 侵蚀剂的选择与侵蚀方法	44
2.4 关于钢材标准	47
3 热处理件的组织缺陷	50
3.1 脱碳	50
3.1.1 脱碳的原因	50
3.1.2 脱碳层深度测定法	52
3.1.3 防止脱碳的措施	55
3.2 气体渗碳的内氧化	57
3.2.1 内氧化的原因及其影响	57
3.2.2 防止内氧化的措施	59
3.3 残余奥氏体	60
3.3.1 残余奥氏体的影响	60
3.3.2 影响残余奥氏体量的因素	61
3.3.3 残余奥氏体的金相定量法	62
3.3.4 减少残余奥氏体的方法	63
3.4 晶粒粗化	64
3.4.1 奥氏体晶粒粗化	64
3.4.2 铁素体晶粒的粗化	70
3.5 带状组织	71
3.5.1 带状组织的成因和影响	72
3.5.2 消除带状组织的方法	74
3.6 碳化物组织缺陷	74
3.6.1 过共析钢中的网状碳化物	75
3.6.2 碳化物的带状偏析	75
3.6.3 低钨工具钢中 WC 的生成	77
3.6.4 渗碳体的石墨化	79

3.6.5 奥氏体不锈钢的碳化物析出	80
4 常见的热处理缺陷及预防措施	83
4.1 热处理设备与工艺标准	83
4.2 热电偶的校正	84
4.3 氧化与脱碳	86
4.3.1 放热式可控气氛	88
4.3.2 吸热式可控气氛	89
4.4 退火与正火	90
4.4.1 常见的完全退火缺陷及其预防	91
4.4.2 球化退火	94
4.4.3 低碳钢退火产生的晶粒粗化	95
4.4.4 常见的正火缺陷及其预防	96
4.5 常见的淬火缺陷及其预防	97
4.5.1 不完全淬火	98
4.5.2 淬裂	101
4.5.3 变形	103
4.6 回火	105
4.6.1 钢的回火脆性	105
4.6.2 合金工具钢的回火	107
4.6.3 时效变形	107
4.7 渗碳	109
4.7.1 过渗碳	110
4.7.2 渗碳不均	112
4.7.3 反常组织	112
4.8 氮化	113
4.8.1 白亮层	114
4.8.2 变形	117
4.8.3 补充氮化	117
4.9 高频淬火与火焰淬火	118

4.9.1	常见的高频淬火缺陷及其预防	119
4.9.2	常见的火焰淬火缺陷及其预防	120
5	淬裂	122
5.1	热应力	122
5.2	相变应力与热应力的重迭	125
5.3	淬火条件与残余应力 (圆柱形试样)	128
5.3.1	冷却速度	128
5.3.2	尺寸效应 (直径大小的影响)	129
5.3.3	化学成分	130
5.4	圆筒形试样的残余应力	130
5.5	淬裂与残余应力的关系	131
5.6	防止淬裂的措施	133
5.6.1	良好的设计	133
5.6.2	除去脱碳层	134
5.6.3	正确的热处理	135
5.6.4	刻印及其他工序中的注意事项	136
5.7	淬裂与防止措施的实例	136
5.8	分析淬裂的方法	138
6	热处理变形及预防措施	140
6.1	热处理变形的种类及其产生原因	140
6.1.1	尺寸变化	142
6.1.2	变形 (外形扭曲)	146
6.1.3	热应变和相变应变的特征	148
6.1.4	渗碳淬火的变形特征	152
6.1.5	高频淬火的变形特征	153
6.2	尺寸变化及其计算	154
6.2.1	钢的组织 and 比容	154
6.2.2	组织转变引起的体积变化	156
6.2.3	高合金钢中的未溶碳化物和尺寸变化	166

6.2.4	材料的方向性对尺寸变化的影响	167
6.2.5	回火引起的尺寸变化	168
6.2.6	尺寸变化的计算值与实测值的比较	169
6.3	热处理变形的控制	169
6.3.1	零件设计	169
6.3.2	残余应力	173
6.3.3	热处理后的精加工	174
6.3.4	淬火引起的变形	176
6.3.5	回火对变形的调整	180
6.3.6	气体渗氮变形的防止	181
6.3.7	稳定化处理	182
6.4	加压淬火及其他	186
6.5	矫直	188
附录		189
一、	单位换算表 (英制换算米制)	189
二、	温度换算表 ($^{\circ}\text{F} \rightarrow ^{\circ}\text{C}$)	189
三、	钢号对照表	191

1 钢热处理的基本知识

通常通过加热和冷却来改变金属材料性能，使之变成适于使用的良好状态，这样的工艺过程，叫热处理。钢淬火硬化，也是一种热处理操作，这项技术很早以前就为人类所了解。可以说，发现并在各方面应用了铁，人类文化才发展到今天这样的高度。

在日本，本来钢这个词意思是“刃金”，即用作刀具刃口的金属。这可以说明人类从古代就了解了钢的淬火，好象特别是在刀剑类的制造中应用了它。

然而，这以后直到十九世纪，在热处理技术上并没有显著进步。可以认为，这是由于这项技术不外传，或作为家传而秘密传授的缘故。到了十九世纪，随着社会的变革，人们才揭开了这种技术上的秘密，有关金属材料技术的各个方面，活跃地开展起了技术公开和研究活动。由法国的勒·夏特利埃(Le Châtelier)设计了高温计，英国的索比(Sorby)发明了金相显微镜。利用这些仪器，奥斯蒙德(Osmond)和马顿斯(Martens)等人通过对金属组织的观察实验和系统化，奠定了所谓金相学^[1](Metallography)的基础。

进入二十世纪后，发明了X射线衍射技术与电子显微镜，实验技术日益发展，这样，随着理论研究的进展，创造了很

[1] 例如在 C. S. Smith 所著的《A History of Metallography》，Chicago Press, 1960，一书中，就对金相学发展的历史作了详细的说明。

多有用的金属材料，与之相关的热处理理论和工艺方法也就丰富多采起来。这些成果，主要是在第一次世界大战前后获得的。由于多种合金钢的逐渐应用，产量也就大大增加，使热处理技术有了大的发展，并迅速普及于一般工业中。

发展到现在，要想在短短的一章中归纳整个金属学与热处理技术是不合适的。因此，本章是专为不熟悉热处理的人写的，目的是介绍热处理的最基本的知识和重要的名词术语，为以后各章的学习提供些方便。同时，对已经掌握了热处理基本知识的读者，本章也许有复习整理已有知识的作用。

1.1 钢的转变和平衡图

固态钢铁被加热，就发生转变，因此，用热处理方法能使钢铁材料的性质发生多种变化。工业上常用的金属材料是由许多晶体组成的，叫做多晶体。图 1.1 是纯铁的显微组织。各晶粒内，构成晶粒的金属原子，按这种金属固有的原子间距，整整齐齐地排列着，如图 1.2 所示[⊖]。如果加热和冷却，在一定温度下原子的排列就会发生变化，这就是转变。



图1.1 纯铁、铁素体组织（含碳0.03%）（×100）

⊖ 在实际金属的原子排列中，有些部位存在空位和位错等晶体缺陷。

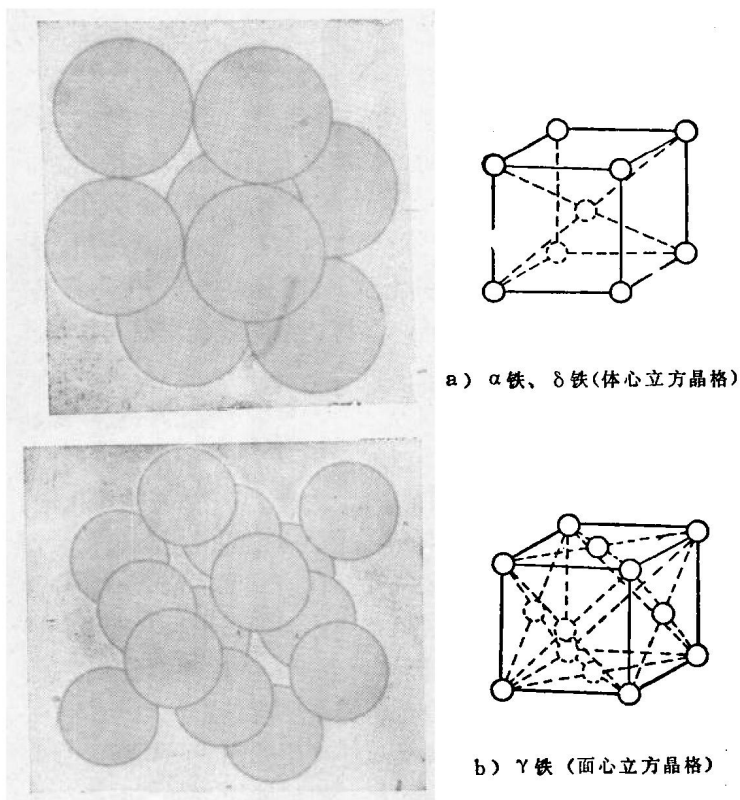


图1.2 铁的晶体结构

以纯铁为例，在接近熔点的高温区，铁原子以图 1.2 中 (a) 所示的方式排列着，而当温度降到 1400°C ，就会变成如 (b) 所示的排列方式。温度继续下降到 910°C ，铁原子的排列又将再次变成 (a) 所示的形式。原子按 (a) 形式排列的铁，高温时的叫 δ 铁，低温时的叫 α 铁。而原子按 (b) 所示方式排列的铁，叫 γ 铁。

即是说，纯铁在熔点至 1400°C 时叫 δ 铁， 1400°C 到 910°C 叫 γ 铁， 910°C 至室温叫 α 铁。这样，由 δ 铁变成 γ 铁，由 γ 铁变成 α 铁，这种晶体结构 $\ominus$ 的变化，就是转变。对于纯铁，上述转变通常在一定的温度下发生，但在纯铁中加了少量其他元素（比如碳 $\ominus$ ），发生转变的温度就会变化。不仅纯铁如此，一般纯净物质的熔点也都是有一定的。比如，冰的溶化温度为 0°C ，而且溶化过程中总是保持在 0°C 。但是，若冰中混入了某种其他物质，其溶化温度就会随混入物的多少发生程度不同的改变。

金属也一样，和纯金属相比，大多数合金的熔点降低，而且产生一个熔化温度范围。纯铁约在 1500°C 熔化，但如果加入4.3%的碳，熔点就下降，大约在 1100°C 开始熔化。同时，与纯金属不同，合金不是在一个确定的温度下熔化，而是在某个温度开始熔化，如果保持在该温度，就有一部分合金以固态形式残留下来，结果在固体与液体混合状态下保持平衡。如果温度继续升高，液体部分所占的比例则逐渐增加，不久，在某个温度下整个合金将完全变成液态。

表示合金的状态随温度变化而变化的图线，叫做合金的平衡图。平衡图能给使用金属材料的技术人员提供有关合金物理和化学性质的基本知识。

图1.3是某种合金平衡图的一部分。图中横座标表示二元合金的成分比例。即B点相当于A成分为零，B成分占100%的B金属， N_1 点表示A、B二组元之比例为 $N_1\text{B}/N_1\text{A}$ 的合金，其余 N_2 、 N_3 点也同样看成代表相应成分比例的合金。

$\ominus$ 原文误为“原子构造”——校注。

$\ominus$ 碳是对钢铁性质影响最大的元素，因此，人们根据碳含量的多少，一般把钢铁分成低碳钢、高碳钢和铸铁等。

A点所代表的纯金属在一定温度下由固态变成液态。而成分为 N_1 的合金是先在 C_1 温度开始熔化,在 B_1 温度完全熔化。就是说,和纯金属不同,合金的熔化温度为一定的范围。此外,平衡图也表明由固体逐渐转变成液体的多少,一定温度下液体量和固体量的比例,以及它们各自的成分。

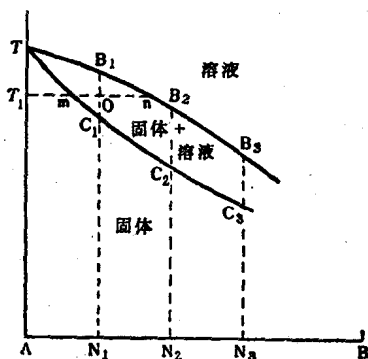


图1.3 平衡图之一端

比如,将成分为 N_1 的合金加热到 T_1 温度,在该温度下固相与液相共同存在,以 m 点表示固体的成分,以 n 点表示液体的成分。 m 点所代表的固体量与 n 点所代表的液体量的比分别为 on/mn 与 om/mn 。

以上讲的是固体与液体构成熔融状态时的情形,在固体溶于其他固体的情况下(这种固体叫做固溶体 $\ominus$),上述关系也是适用的。比如,对碳溶于铁的状态也适合。

铁-碳二元平衡图(图1.4)表示碳溶于 α 铁与 γ 铁时的状态。从这个平衡图可以看出,在 727°C (叫做 A_1 转变点)以下温度区,钢的组织是由固溶少量碳的 α 铁(金相组织称为铁素体)与铁和碳的化合物 Fe_3C (金相组织称为渗碳体)混合而成的。这两者的重量比,不用说是受钢中所含的碳量支配。

$\ominus$ 固体金属中溶解了其他金属或非金属元素,就成为固溶体。固溶体分置换型固溶体与间隙型固溶体。前者由溶入的金属原子在晶格结点上替换了部分基体金属原子而构成,后者由其他小直径的原子强行挤入基体金属晶格间隙而构成。

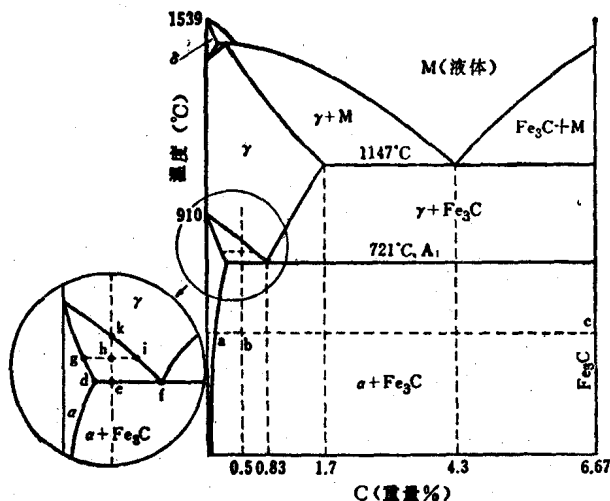


图1.4 铁-碳二元平衡图（亚稳态）

作为例子，让我们看看含碳0.5%的钢。图1.4中，在虚线abc所示的温度，钢中共同存在着比例为 bc/ac 的铁素体与比例为 ab/ac 的渗碳体。随着温度升高，铁素体中固溶碳的浓度沿曲线 α 逐渐增加，渗碳体量相应地则有极微小的减少。温度升到 A_1 转变点，即 721°C 时，钢中的渗碳体就发生分解而生成 γ 铁（金相组织称为奥氏体）和铁素体。此时，奥氏体所占的比例为 de/df ，铁素体为 ef/df 。

温度再升高，则奥氏体量增加，相反铁素体量减少。到了ghi所示的温度，奥氏体量和铁素体量分别变成 gh/gi 与 hi/gi 。该温度下，奥氏体的成分，即奥氏体中的碳含量由 i 点表示，铁素体的碳含量由 g 点表示。温度进一步上升到达 k 点，铁素体就从钢中消失，而成为全部奥氏体的组织。钢的组织全部转变成奥氏体的温度，即图中 kf 线，叫做 A_c 转

变点。上面讨论的是钢在加热时的转变，而从奥氏体状态降温时的组织变化过程，可以按相反的方向作同样的考虑。

1.2 钢的常化组织(缓慢冷却时)

由铁-碳平衡图可知，随着碳含量增加，奥氏体区域将显著扩大，但铁素体区域扩展很少。碳在奥氏体中的最大固溶量为 1.7%[⊖]，而在铁素体中只不过 0.03%。在 A_1 转变点以下温度，奥氏体消失，而变成铁素体与渗碳体。

在用极缓慢的冷却速度，比如炉冷或稍快一点的冷速，例如空冷的情况下，从铁-碳平衡图上能大体上估计出碳钢的组织。就是说，对于含碳低于 0.83%[⊖] 的钢(比如含碳 0.5% 的碳钢)，按前面所讲的道理，冷到温度 k 时，开始从奥氏体中析出铁素体，随着温度的下降，铁素体逐渐增多，相反奥氏体量逐渐减少。冷到 A_1 转变点，就从剩下的奥氏体中同时析出铁素体和渗碳体。最初析出的铁素体是从奥氏体晶界上产生的，因而成网状保留下来(图 1.5 中白色部分)，而在 A_1 点与渗碳体同时析出的铁素体，变成薄片状构成珠光体(图 1.5 中黑色部分)。在更高

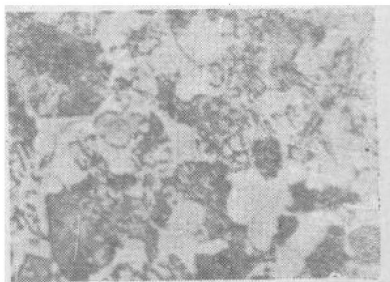


图1.5 铁素体与珠光体的混合组织 (0.44% C 碳钢)
($\times 400$)

⊖、⊙ 图1.4是根据早期研究结果所作的平衡图。据最新的研究，在纯粹的铁-碳二元平衡图上，碳在奥氏体中的最大固溶量是 2.14%。而且共析成分也不是 0.83%，而是 0.765%。但是，普通使用的材料与旧图上的值相符，因此，本书仍选用旧图。