

高等学校交流讲义

鋼鉄热处理讲义

哈尔滨工业大学热处理教研室編譯

只限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校交流讲义



鋼鉄热处理讲义

哈尔滨工业大学热处理教研室編譯

(学校内部用书)

中国工业出版社

本讲义是根据苏联专家米·米·扎米亚特宁1954年在哈尔滨工业大学讲授“金属及合金的热处理”的讲稿编译的，讲义中包括：合金成分与结构对合金性能的影响；热处理时的加热和冷却；加热和冷却时钢内的各种转变过程；钢的退火和正火；钢的淬火；钢的回火；钢的化学处理；钢铁热处理等八章。

本讲义可作为金相专业的学生学习热处理课程时的主要讲义，亦可供有关的工程技术人员之参考。

钢铁热处理讲义

哈尔滨工业大学热处理教研室编译

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行，各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $10 \frac{1}{4}$ · 字数 236,000

1961年8月北京第一版 · 1961年8月北京第一次印刷

印数 0,001—3,533 · 定价 (10-6) 1.25 元

统一书号: 15165 · 644 (—Ⅰ—128)

目次

緒論	5
----------	---

第一章 合金的成分与結構对合金性能的影响	7
----------------------------	---

§1 金属与合金的化学成分及其在热处理中的作用	7
-------------------------------	---

§2 各种冶炼因素对于所获性能的影响	9
--------------------------	---

第二章 热处理时的加热及冷却	12
----------------------	----

§1 概述	12
-------------	----

§2 薄件的加热与冷却	13
-------------------	----

§3 厚件的加热和冷却	20
-------------------	----

§4 鋼件热处理时的加热	23
--------------------	----

§5 热处理过程中的冷却	26
--------------------	----

§6 加热与冷却的计算数据和实验数据之比較	30
-----------------------------	----

第三章 加热和冷却时鋼内的各种轉变过程	33
---------------------------	----

§1 碳鋼加热时的各种轉变过程	33
-----------------------	----

§2 合金鋼加热时的各种轉变过程	38
------------------------	----

§3 在空气炉內和盐炉內加热时的轉变	38
--------------------------	----

§4 氧化和脱碳	40
----------------	----

§5 鋼在冷却时的轉变	43
-------------------	----

§6 奥氏体的等溫轉变	45
-------------------	----

§7 連續冷却时的轉变	43
-------------------	----

§8 合金鋼在冷却时的轉变	49
---------------------	----

§9 在实际冷却条件下的轉变特征	50
------------------------	----

第四章 鋼的退火和正火	52
-------------------	----

§1 鋼的退火和正火	52
------------------	----

§2 退火和正火的应用	55
-------------------	----

§3 退火和正火时結構和性能的变化	58
-------------------------	----

第五章 鋼的淬火	61
----------------	----

§1 鋼的淬火	61
---------------	----

§2 鋼在淬火时的馬氏体轉变	64
----------------------	----

§3 淬火鋼的組織	66
-----------------	----

§4 淬火鋼的性能	69
-----------------	----

§5 淬火液(淬火介质)	73
--------------------	----

§6 鋼的淬透性	78
----------------	----

§7 淬火时的应力和变形	81
--------------------	----

§8 阶段淬火和等溫淬火	86
--------------------	----

§9 淬火应用举例	86
-----------------	----

§10 鋼的表面淬火	87
------------------	----

§11 高周波表面淬火	93
-------------------	----

§12 表面快速加热时的轉变	97
----------------------	----

§13 表面淬火件的組織和性能	101
-----------------------	-----

第六章 鋼的回火	105
----------------	-----

§1 鋼的回火的一般概念	105
--------------------	-----

§2 回火时鋼的組織的轉变	108
---------------------	-----

§3 回火时鋼的性能的改变	110
---------------------	-----

§4 鋼的調质	113
---------------	-----

§5 生产中某些工作的回火和調质处理的实例	116
-----------------------------	-----

§6 鋼的某些特殊热处理方法	120
----------------------	-----

第七章 鋼的化学热处理	124
-------------------	-----

§1 鋼的化学热处理的一般概念	124
-----------------------	-----

§2 鋼的渗碳	128
---------------	-----

§3 渗碳工件的热处理及其組織和性能	131
--------------------------	-----

§4 渗碳的几个工艺問題	135
--------------------	-----

§5 渗碳在生产中的应用	137
--------------------	-----

§6 鋼的渗氮	142
---------------	-----

§7 鋼的氰化	145
---------------	-----

§8 鋼件的渗鋁、渗鋅、渗硅及其他元素的表面渗入法	147
---------------------------------	-----

第八章 鑄鉄的热处理	153
------------------	-----

§1 灰口鉄的热处理	153
------------------	-----

§2 白口鉄轉变为可鍛鑄鉄的热处理	156
-------------------------	-----

§3 鑄鉄中各种轉变过程的理論基础	159
-------------------------	-----

§4 鑄鉄热处理举例	162
------------------	-----

緒 論

在“鋼鐵熱處理”課程內，包括了金屬與合金熱處理學中的理論與實踐的基本知識及其在工業中的應用。

本課程的目的在於教導學生將已有的金屬學知識應用到熱處理實踐中去，並熟悉各種典型的熱處理工藝過程。

長時期以來，熱處理只是一種技術，沒有任何理論基礎。而今天，隨著熱處理在實際應用方面的不斷的擴展，熱處理本身也已成爲一門龐大的科學。但目前還未能很好的將實踐與理論緊密聯繫起來。在資本主義國家內，熱處理這一門科學的發展，在許多情況下是與實踐脫離的。

發展和應用技術科學，並使理論與實踐相結合將是我們的重要任務。僅僅知道理論或者僅僅知道實際，都是不夠的。因此必須既掌握理論又掌握實際，必須善於運用現代的一切科學知識來解決工廠的實際問題。

將熱處理科學應用到實踐中去，是一個艱難的、但卻是光榮的任務。“鋼鐵熱處理”課程就是爲了研究與解決這方面的問題的。

在學習本課程之前應具有一定的“金屬學”知識。在熱處理的實踐中除理論與工藝問題外，設備也起着很大的作用。有關設備的知識將在“加熱爐”，“爐溫儀”，“熱處理車間設備”等課程內討論。

熱處理的目的在於改變金屬與合金工件的性能而不改變工件的形狀。這種改變是借助於加熱與冷卻時金屬內部結構的變化來實現的。

機器製造工作者向熱處理與熱處理工作者提出的要求是要獲得具有一定的，而且是性能很高的工件，特別是機械性能。

在現代機器製造業中，熱處理有着重大的作用。在所生產的全部金屬中，須要進行熱處理的只占着不大的比重，但這一部分恰好是用來製造最重要的零件：如工具、汽車、拖拉機、飛機、渦輪機及其他重要機器上的最重要部分的零件。很難設想，在現代的機器製造業中和現代的機器上，沒有熱處理將是怎樣的狀況。熱處理可以提高零件的硬度及強度，同時也大大地減少了各個零件和整個機器的尺寸和重量。熱處理可以大大減少零件的磨損，熱處理還可以使工件易於進行機械加工。

在蘇聯，拖拉機製造業、汽車製造業、飛機製造業、重型機器製造業、儀表製造業及其他機器製造業都正蓬勃成長，因而要求廣泛地發展和完善熱處理方法。

現在，中華人民共和國正在大規模地建設冶金廠和機器製造廠。因此也就要求迅速地發展熱處理科學與熱處理生產技術，要求有大量的有高度熟練技術的專業人材，要求製造生產熱處理設備，建立設計機構與科學研究機構。

中華人民共和國政府創造了一切必要條件來廣泛地發展工業，其中也包括熱處理事業。

黑色金屬鋼和鐵在現代冶金業和機器製造業中占着特殊的地位。黑色金屬的生產量大

大地超过了所有其他金屬生产量的总和。

在黑色金屬中鋼的作用特別大。鋼是机器制造业、建筑业及运输业中的主要材料。

鋼材应用热处理的机会最多，所以对鋼的热处理的理論与实践的研究也最广。因此本课程对鋼的热处理給予了最大的注意。

現在簡略地叙述一下热处理的发展史。

很久以前，鋼的热处理，只是一种技艺而已，它沒有任何科学基础。最早經受热处理的工件是刀子，它是在埃及金字塔內被发现的。这把刀子大約是在 5000 年以前制成和淬火的。

根据已有的考古学的資料，可以断定数千年以前在中国、阿拉伯各国就已对鋼进行了热处理。

最早描写热处理的是欧洲中古时期对于淬火和渗碳工序的記載。

17~18 世紀以来，許多学者都在探寻热处理工艺的秘密。特别是物理学家 Реомюр 进行了許多的試驗。但是，直到 19 世紀以前，热处理还只是一种父子相傳的秘密手艺。

在 19 世紀以后，热处理才逐渐由技艺演变成科学。

1831 年俄国工程师兼学者 П. П. 阿諾索夫 (П. П. Аносов) 首先在世界上第一次用显微镜研究了大馬士革鋼。他研究了許多热处理的問題，大胆地抛弃了古老的方法，創造了新的热处理方法并将它記載于文献中。

1868 年以前，阿諾索夫及世界上許多学者的工作，可以被认为是建立热处理理論的准备工作。

1869 年俄国学者切尔諾夫 (Д. А. Чернов) 沒有借助任何高溫仪表，而全凭观察发现了临界点，奠定了近代热处理的理論基础。

临界点的发现，帮助人們了解热处理时鋼內变化的各种过程，热处理学說的不斷发展是世界科学界許多学者共同努力的結果。参与这一工作的有俄国惹少塔夫斯基 (А. А. Ржев-шотарский) 巴依可夫 (А. А. Байков)，庫尔納可夫 (Н. С. Курнаков)，英国的索拜 (Сорби)，和罗別尔特氏-奧司丁 (Р. Аустен)，法国的奧史蒙特 (Осмонд)，美国的索威尔 (Совер)。

應該指出，“金屬热处理”这一門实用科学的发展是与技术和机器制造业的发展密切有关的。

可以說这門科学的蓬勃成长是与二十世紀，特别是近三十年代机器制造业的飞跃发展有着密切关系。在这个时期內許多国家的学者、工程师和工人們在热处理方面都作出了許多新的貢獻。

第一章 合金的成分与结构对合金性能的影响

§1 金属与合金的化学成分及其在热处理中的作用

如前所述热处理的目的是改变金属与合金的性能，使获得预期的性能。热处理结果的好坏，是以热处理后工件之性能来鉴定的。但是，金属与合金性能之好坏，不仅与热处理有关，而且也与其他因素有关。

金属与合金的化学成分是影响工件性能的重要因素。工业上应用的并不是纯金属，而是含有少量各种杂质的金属与合金。

在进行热处理生产及鉴定其结果时，一般应该首先考虑金属与合金的化学成分。

完善的化学分析方法，可以证明无论何种金属与合金中，均有着大量的各种不同形态的杂质。假若应用最灵敏的分析方法，就一定会发现在所谓“化学纯金属”中，也含有各种别的元素，每一种元素的量约为万分之几、十万分之几、百万分之几或者更少的数量。因此可以推断，无论在何种金属或合金中，都几乎存在着各种化学元素。

实际上，对所有这些元素都须考虑，并要准确地知道它们对金属或合金性能的影响。并给它们划出一定的数量界线，例如认为某元素含量，不得小于0.1%或0.01%，因为各种元素的作用是各不相同的。

在大多数情况下，实际上可以不考虑它们的存在，例如钢内含0.1~0.2%Ni就可以不予考虑，但是，假若含有几万分之几的氢，就会产生很大的影响。

随着金属学和热处理的发展，在鉴别金属和合金的性能时，就不能不考虑到各种元素的影响了。

有些元素只在极个别情况下才对金属性能有所影响，例如微量的铋、铝和铌在高温时能降低耐热合金的强度。

现就最重要的工业合金—钢—中的杂质及其对合金的结构和性能的影响来加以研究。

根据古德诺夫 (Н. И. Гуднов) 的分类，钢内最重要的杂质可以分为下列四类：

- a) 常存杂质——碳、硅、锰、硫和磷；
- b) 潜存杂质——氧、氮和氢；
- в) 偶存杂质——镍、铬、铝、铜和砷；
- г) 特殊杂质——钨、钼、钨、钽、钒、铜、铝、钴、钛、铌，也包括硅和锰。

常存杂质在普通碳钢和普通合金钢内是经常存在的（沸腾钢的硅含量极微）。

潜存杂质也是经常存在于钢内的，但是较难测出，一般对这些元素不予测定。

偶存杂质有时又称地域杂质，在钢内不经常存在。这些杂质一般是由矿石或废料（废钢）中带来的。

特殊杂质是特意加入钢内的合金元素，一般是根据特定的目的以改变合金的某一性能而加入的。但应记住，特殊杂质在改变某一性能的同时也改变所有其他性能，而且这种改变经常是不利的。

現在來詳細研究各種雜質的數量及其對鋼的影響的問題。

碳是鋼內最主要的元素，現在一般將含碳量從百分之零點幾到1.7~2.5%的合金稱為鋼。

所謂軟鐵只是指某些產品——屋頂用鐵皮，有時也指變壓器軟鋼而言，有時對含碳為0.01~0.02%的鐵碳合金也稱為鋼。

鐵碳合金之上限等於2.0% C，但是在合金鋼內碳量還可以再高一些，在個別情況下可達2.5%。

將鑄鐵煉成鋼時，有意使部份碳留於鋼內。但是，這並不意味着任何含量都是有益的。對於各種不同的目的，鋼要求的含碳量也各不相同。結構鋼含碳量應該是0.1~0.5%，含碳量過高則脆性大。工具鋼的含碳量為0.7~1.2%，含量過低則不能保證淬火時得到必須的硬度和耐磨性。

有時在碳鋼內加硅以脫氧，用硅脫氧可提高鋼的塑性，強度也略有提高。故在鎮靜鋼內常有0.15~0.50%的硅。硅量在上述範圍內是有益的。但若含量太多，特別是在高碳鋼中，則在熱處理時會引起石墨化現象。

鋼內也可加錳以脫氧，普通碳鋼內的錳量為0.1%~1.8%。用錳脫氧可提高鋼的塑性和強度。錳對熱處理的影響很大。鋼內含錳量提高0.1~0.2%就會大大增加鋼的淬透性，同時也易使鋼件在淬火時形成裂縫。因此應該根據不同要求，嚴格控制錳的含量。一般低碳鋼和中碳鋼內錳量可稍高，而高碳鋼內則應低些。

有時為了獲得特殊性能，特意把硅和錳加到鋼內，因此含量高於上述範圍。然而當鋼含硅在0.5%以上，錳——1.8%以上時，已被稱為合金鋼。

鋼內的硫是由鑄鐵帶來的，而鑄鐵內的硫，則是由焦炭和礦石內來的。硫的含量為0.01~0.1%。

優質鋼的含硫量不得超過0.02~0.03%。

硫会降低鋼的塑性，在大多數情況下，硫是有害雜質。

鋼內的磷也是由鑄鐵帶來的，其含量是0.01~0.1%，磷可增加鋼的脆性，也可促使形成淬火裂縫。在大多數情況下，磷是有害的。磷的最大含量與鋼的用途有關，優質鋼的含磷量不得超過0.02~0.03%。

凡進行熱處理的鋼，其含硫含磷量各不得超過0.045%。

有時為了便於機械加工，特意於鋼內加入硫磷，此種鋼稱為機削鋼（автоматная сталь）。

鋼內氧的含量在0.04%左右，大多數情況下，它對鋼的性能起不良影響。

氮的含量在0.01%以下，在有些情況下，是產生不良影響的元素。

氫之含量極微，在0.001%以下，但作用甚大，含量過高時，常引起特殊缺陷——鋼內白點。要消除這一缺陷，必須對鋼材進行特種熱處理。

由於雜質對鋼的性能有影響，因此只能利用一定成分範圍內的鋼。可惜由於不能獲得準確的化學成分，因而成分的范围是相当寬的。熱處理工作者應該經常記住，在相同的鋼號內，例如45或Y10鋼內，鋼的化學成分在頗大程度上可能是不同的。

根據蘇聯國家標準，優質碳素結構鋼含碳量平均相差0.05%（例如45號鋼內有0.40

~0.50% C); 硅——0.17~0.37%; 錳——0.2~1.8% (範圍——0.35~0.65; 0.5~0.8%; 0.7~1.0%; 0.9~1.2%; 1.2~1.6%; 1.4~1.8%); 硫磷各在0.040~0.045%以下; 鉻和鎳各自不多于0.3%。

如果所用元素不在規定的化學成分範圍內; 即使是一種元素, 也常常是熱處理時產生廢品不能獲得所需要的性能的原因。因此必須經常地仔細地注意鋼的化學成分。

甚至當化學成分是在規定範圍內時, 在某些情況下進行熱處理時也必須加以考慮。例如在規定的牌號範圍內不同的含碳含錳量, 對硬度, 淬火後的淬透性和形成淬火裂縫的趨勢有很大影響。各種不同的含磷量, 可使鋼具有不同的韌性。

所以在熱處理時必須注意的不仅是牌號, 和相應的化學成分, 而且要注意一定爐號的個別化學成分。接收材料時必須標有爐號, 附加說明書, 記載化學成分。這樣就可利用化學分析來解決和查出產生廢品的原因。

無論在什麼時候都不應對不知名的材料進行熱處理。

§2 各種冶煉因素對於所獲性能的影響

(熔煉方法, 原始晶粒, 鑄錠結構, 壓力加工及壓力加工的方法)

除化學成分對合金性能有影響外, 金屬與合金的結構的某些特徵對熱處理條件及熱處理時產生缺陷的傾向也有影響, 金屬與合金的結構特徵與其生產和加工方法有關, 熱處理不能改變這些結構特徵。

熱處理工作者應該知道這些特徵, 並善於考慮和調整它們的影響。

熔煉方法對金屬性能會產生一定的影響。

根據橫向試件的機械性能試驗結果表明, 在酸性馬丁爐內熔煉的鋼優於鹼性馬丁爐熔煉的鋼。電爐熔煉的鋼在大多數情況下優於馬丁爐熔煉的鋼。

進行比較時必須是化學成分相同, 壓力加工與熱處理條件相同才較正確。

性能的不同與潛存雜質——氣體的含量以及夾雜物的形狀有關。例如酸性鋼內的非金屬夾雜物一般是球形的, 因此適用於須要塑性較高的工件。

大部分差異可以用“奧氏體本質晶粒”大小的不同來解釋。“奧氏體本質晶粒”的概念是不夠明確的。當談到“奧氏體本質晶粒”時實際上所指的是奧氏體晶粒長大的趨勢。

根據熔煉條件及液體鋼脫氧條件的不同, 可以得到具有各種不同“本質晶粒”的鋼, 即具有各種奧氏體晶粒長大趨勢的鋼。

圖1-1是本質細晶粒A與本質粗晶粒B的兩種爐號鋼料之奧氏體晶粒度與加熱溫度的關係曲線。

應該指出, A爐鋼只在加熱溫度不高時才是細晶粒, 而在溫度很高時, 所得到的晶粒度甚至比B爐鋼所得到的晶粒度還要大。

熱處理時(指淬火, 正火及800~900°C的滲碳) A爐鋼的晶粒比B爐鋼小, 因而在性能上也產生了差別。

在熔煉時加入少量的鋁(約0.01~0.05%)脫氧, 可達到控制“奧氏體本質晶粒”的目的。

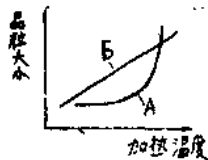


圖 1-1

因为仔細研究晶粒大小与加热温度的关系曲线是比较困难的，所以一般均在一定的温度（通常是925°）及一定的保温时间下（通常是0.5~8小时）来测定奥氏体晶粒的大小。保温时间对晶粒大小的影响不大。

测定晶粒大小的几种方法在金属学内业已詳細叙述。这里只談談渗碳方法。

用渗碳法时，将鋼件放入活性渗碳剂内进行渗碳，渗碳温度为925°C，时间为8小时。缓冷后在碳饱和层内沿奥氏体晶界会得到网状渗碳体。将試件制成試片，浸蝕，并在显微镜下测定晶粒的大小。

根据标准来鉴别晶粒大小。一般是将晶粒分为8級，其中以1級的晶粒最大。表1所列是晶粒的几何尺寸。

表 1

晶 号	平 均 面 积	平 均 晶 粒 数	平 均 晶 粒 尺 寸
N	μ^2	1毫米 ²	毫米
№ 1	64000 (0.064 毫米 ²)	15.5	0.26
№ 2	52000	31	0.175
№ 3	16000	62	0.125
№ 4	8000	124	0.088
№ 5	4000	347	0.063
№ 6	2000	490	0.044
№ 7	1000	992	0.032
№ 8	900	1984	0.022

1毫米²内的平均晶粒数可按下式計算：

$$n = 15.52^{N-1}$$

目前，許多牌号的鋼都在熔炼过程中注意控制本质晶粒度。知道本质晶粒的大小，就便于进行热处理，并可获得比較均匀的性能。

影响金属性能的还有鑄造，軋制，鍛造，冲压等加工方法。当化学成分相同，而加工方法不同时，則虽用同样的热处理，但所得性能依然不同。

鋼鑄件有許多特点——縮孔，不同的结构区域，有时也有气泡、疏松、裂縫。

軋制坯件、鍛件及冲压件均由鑄錠制成，鑄錠也具有鑄造金属的特征。但是軋制、鍛造、冲压改变了鑄錠结构，消除了某些缺陷，形成了某些新的结构上的特征。

一般鋼鑄件就其性能來說較鍛軋件为低，但在纵向及横向性能上没有差别，此为其优点。

对于軋制坯件、鍛件及冲压件而言，当載荷沿纖維向分布时，其机械性能最高，但当沿橫断纖維方向时則机械性能大大降低。

为了正确鉴别热处理后鋼件的性能，必須完全了解工件的粗晶組織，并于一定部位选择試样，进行試驗。

鑄件的粗晶組織完全由其結晶条件确定，而加工件的粗晶組織，則与鑄錠結晶条件有关。

所以鋼錠和鑄件的結構，大大影响工件的性能。因此在热处理后評定其性能时，應該考虑到这点。

鑄錠和鑄件的粗晶組織與它們的尺寸、形狀、鑄造和結晶條件有關。為了得到最好的粗晶組織，必須選擇有利的鑄錠形狀及其結晶條件。

研究鑄錠構造必須切開鑄錠，獲得試片。因而是一個很繁複的工作。

任何鑄錠或鑄件均具有某些不能去除的缺陷以及許多可以設法消除的缺陷。圖 1-2 是切開，並經過浸蝕的鑄錠的粗晶組織。

鑄錠上部的空處是縮孔。縮孔是不可避免的，而且必須將它与鑄錠上部，即錠頭一起用機械法切掉。

鑄錠各部分的粗晶組織是不同的。表層附近的晶粒最細，往內是有向晶區或垂直于表面的柱狀晶區。鑄錠中心是无向晶區，這一區的中心部分最易受浸蝕，為偏析區。從鑄錠截面來看不僅在結構上，而且在化學成分上（偏析）也有不同。特別是在中心部分有較多的有害雜質，即硫和磷。



圖 1-2 鑄錠構造的圖式。

圖 1-3

表層金屬的性能與中心處的不同，表層金屬的機械性能較高。這種差別在軋制和鍛造時有減小，但仍要保留一些。所以在鑒別性能時，應該考慮到截面上的差別，同時必須盡力保留這部分最好的金屬表面區，尽可能不在機械加工時把它變成鉄屑。

在鑄錠和鑄鋼件中常有氣泡、疏松、裂縫及其他各種缺陷，這些缺陷在范性變形後在某種程度上還是存在的，它們常在熱處理時，或在最後的成品中被發現。

軋制可改變鑄錠的粗晶組織，形成纖維狀組織，如圖 1-3 所示。

粗晶試片上的黑色纖維或細絲是鑄錠內各偏析區拉伸的結果，在偏析區內含有許多有害雜質。纖維組織的機械性能低，金屬沿纖維方向比橫斷纖維方向容易破壞（如木材一樣）。

在製造工件時，要盡力保證最大的應力沿着纖維方向。

在選取變形金屬的機械性能試驗用的試樣時，不僅要考慮試樣與表面（鑄錠區）的距離，而且要考虑試樣的纖維組織的方向。

例如，如果要求的是選擇軸向纖維試件而錯誤地用了徑向纖維，則斷面收縮率和沖擊值可能比標準降低很多，而此時還可能認為是由于熱處理方法的不恰當或某些其他原因引起的。

因此，鋼的熔煉、澆鑄條件及壓力加工條件等各種因素，在鑒定熱處理後的性能時必須給予足夠的注意。

第二章 热处理时的加热及冷却

§1 概 述

我們已熟知，每个热处理工序都包括三个阶段，即：加热，保温和冷却。加热与保温的目的是将工件加热到指定温度并完成其转变。而冷却的目的是将加热好了的工件以一定的冷却速度冷至规定温度，以期获得必需的組織及性能。要想順利地完成热处理的各个工序除了要确定严格的加热温度外，还必须对冷的工件在一定的介质中加热到规定温度所需的时间以及热的工件在一定介质中冷却到室温（或其他温度）所需的时间（冷却速度）加以研究。除此而外，为了避免工件在热处理过程中产生过大的内应力造成变形及裂纹，还往往希望了解在加热及冷却过程中工件表面及中心的温度差，为此必须研究加热及冷却时的傳热过程。

物体的加热及冷却是在傳热学中讲授的。傳热学以付氏（Фурье）微分方程作为基础。在物理学及数学分析中我們已經接触过付氏的两个方程式，即：

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{de} \cdot dF \cdot d\tau;$$

以及

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

在第一式中 dQ ——在時間間隔 $d\tau$ 內通过面积 dF 的热量；

λ ——物体的导热系数；

$\frac{dt}{de}$ ——温度梯度，即热流运动途徑上单位长度上的温度降落。

根据第一式可推导出第二式（其推导过程在一般数学分析教学中都有，此处从略）。

在第二式中 t ——温度；

τ ——時間；

a ——温度傳导系数。

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$$

式中 λ ——导热系数；

c ——比热；

γ ——比重。

付氏方程式的普遍解具有下列形式（当假設 a 不随温度而变化时）：

$$\frac{t_{\text{中}} - t}{t_{\text{中}} - t_{\text{中}}} = F\left(\frac{a\tau}{X^2}, \frac{\alpha X}{\lambda}, \frac{x}{X}\right)$$

式中 $t_{\text{中}}$ ——介质温度；

t ——工件某点的温度，該点距物体中心之距离为 x ；

$t_{\text{中}}$ ——該点的起始温度；

X ——圓柱体或球之半徑或板厚的一半；

α ——給热系数。

其他符号的意义同前。

式中 $\frac{t_0 - t}{t_0 - t_{\infty}}$ ——被称作温度规范数；

$\frac{\pi x}{X^2}$ ——付氏规范数；

$\frac{\alpha X}{\lambda}$ ——皮氏规范数。

函数 F 具有复杂的性质，在某些特定边界条件下的 F 的函数形式是已经求出了的。此时根据上述公式就可以求出在一定的介质温度中，经过一定的时间 τ ，工件中某一距离中心 x 的点的温度 t ，或者解决其他类似的课题。

根据某些特定的边界条件得到的各个规范数之间的关系往往用图表表示出来，这样可以使计算大大简化，这些图表可以从各种文献中找到，比较接近于我们要研究的问题的有下列一些参考文献：索柯洛夫 (В. Н. Соколов) 所著的“热处理车间设备”，依万错夫 (Г. И. Иванцов) 著“金属的加热”以及赫姆钦斯基 (Л. Л. Немгинский) 著“热处理之热计算”。

但是在热处理中我们可以采用一些更进一步简化了的和近似的方法对加热及冷却过程进行计算。为此依万错夫建议将加热与冷却的工件分成“薄件”与“厚件”二类。

工件的“厚”及“薄”是根据工件在加热或冷却过程中表面及中心的最大温度差 $\Delta t_{\max}$ 来进行区分的。根据依万错夫建议，凡 $\Delta t_{\max}$ 小于最终及最初温度之差的十分之一的工件被称为“薄件”，而 $\Delta t_{\max} > 0.1(t_{\infty} - t_0)$ 的工件称为“厚件”。

工件截面上的温差与工件本身的导热性能以及表面的给热条件，亦即加热速度等因素有关。因此，薄件及厚件的尺寸界限就跟材料的导热系数，温度传导系数，加热介质以及加热炉的炉温等有关。

以碳钢为例，薄件与厚件的尺寸界限（直径或厚度）大致如下（单面加热时）：

1. 在气体介质内加热到 400°C —— 200 毫米；
在液体介质内加热到 400°C —— 30 毫米；
2. 在气体介质内加热到 800°C —— 100 毫米；
在液体介质内加热到 800°C —— 20 毫米；
3. 在气体介质内加热到 1100°C —— 50 毫米；
4. 在空气中冷却 —— 400~500 毫米；
5. 在油中冷却 —— 12~15 毫米；
6. 在水中冷却 —— 2 毫米以下。

关于如何计算薄件与厚件的尺寸界限的问题将在后面讨论。下面将先就薄件与厚件的加热与冷却进行讨论。

§2 薄件的加热与冷却

在热处理车间中所碰到的需要热处理的零件大部分都属于薄件。当然也可以利用传热学的一些基本公式对薄件的加热与冷却进行计算。但在一般的热处理中，对于薄件我们只需要用一些近似的方法进行计算就已足够了。

前面已经提到，薄件在加热过程中，截面上的温差不大因而可以忽略。因此，对于薄

件而言，材料本身的导热系数已失去意义。外部介质给予工件的热量被假设在很短的，可以忽略的时间內均匀地分布到工件内部去。根据这一假设，当工件接受外来的热量 dQ 时，工件整体的温度就立即均匀地上升 dt ，而 $dt = \frac{dQ}{c\gamma V}$ 其中 c ——材料比热， γ ——材料比重， V ——加热工件的体积。

根据以上的假设，我们便可对薄件的加热作如下的计算：

设加热介质的温度为 t_f ；工件表面的温度为 t_m ；工件的表面积为 F ；加热介质与工件之间的给热系数为 α ，则在时间 $d\tau$ 内传给工件表面的热量将为：

$$dQ = \alpha F(t_f - t_m)d\tau \quad (1)$$

应该注意 t_m 为一变数。在薄件上假设工件表面的温度与工件整体的温度 t_x 是一致的，亦即 $t_m = t_x$ 。

传入工件的热量 dQ 引起工件温度的上升，升高的温度 dt 将为：

$$dt = \frac{dQ}{c\gamma V} = \frac{\alpha F}{c\gamma V}(t_f - t_x)d\tau = K(t_f - t_x)d\tau \quad (2)$$

移项

$$\frac{dt}{(t_f - t_x)} = K d\tau$$

积分得到

$$\ln(t_f - t_x) = -K\tau + \ln c \quad (3)$$

当 $\tau = 0$ 时， $t_x = t_m$ ，代入上式得到：

$$\ln c = \ln(t_f - t_m) \quad (4)$$

代入前式便可得到：

$$\tau = \frac{c\gamma}{\alpha} \frac{V}{F} \ln \frac{(t_f - t_m)}{(t_f - t_x)} \quad (5)$$

从公式 (5) 中可以看到，对于用同一种材料制成的薄件而言，如 t_f 及 t_m 一定，则自 t_m 加热至 t_x 所需的加热时间 τ 与 $\frac{V}{F}$ 成正比。 $\frac{V}{F}$ 愈大，所需的加热时间也就愈长。对于形状不同的工件而言，只要 $\frac{V}{F}$ 相同，所需的加热时间也就相同。

比较一下薄板、圆棒及球状工件的加热所需的时间是很有意思的。

对于厚度为 d 的薄板而言；如不考虑薄板边缘的影响（当板的长和宽足够大时），则其 $\frac{V}{F}$ 将等于：

$$\frac{V}{F_{(板)}} = \frac{d}{2} \quad (6)$$

对于直径为 d 的圆柱形工件而言，如不考虑二端面对加热的影响（当工件的长度相对于直径 d 而言足够大时，将二端面忽略不计是完全可以的），则其 $\frac{V}{F}$ 将为：

$$\frac{V}{F_{(柱)}} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4} \quad (7)$$

对于直径为 d 的球状工件而言，其 $\frac{V}{F}$ 将为：

$$\frac{V}{F_{(球)}} = \frac{\frac{\pi}{6} d^3}{\pi d^2} = \frac{d}{6} \quad (8)$$

显而易见：

$$\frac{V}{F_{(板)}} = 2 \frac{V}{F_{(柱)}} = 3 \frac{V}{F_{(球)}} \quad (9)$$

也就是說当其他条件完全相同时，如厚度与直径相等，則加热薄板所需的时间为加热圓棒所需的时间的二倍，加热球体所需的时间的三倍。

从公式(5)中可以得到另一个結論，就是对于用同一种材料制成之工件而言，如果 $\frac{V}{F}$ 一定，則加热时间 τ 与給热系数 α 成反比。給热系数 α 的大小决定于所用的加热介质，介质的温度(即炉温)以及工件的温度。

我們知道，給热系数 α 的概念是从公式(1)，亦即 $dQ = \alpha F(t_{介} - t_{表})d\tau$ 中得出的。而从另外一方面看，介质向工件表面輸送的热量 dQ 主要应包括对流及輻射两部分，亦即：

$$dQ = dQ_{对流} + dQ_{輻射} = \alpha_{对流} \cdot F(t_{介} - t_{表}) \cdot d\tau + C(T_{介}^4 - T_{表}^4) \cdot F \cdot d\tau \quad (10)$$

式中 $\alpha_{对流}$ ——对流給热系数；

C ——輻射系数；

$T_{介}$ 及 $T_{表}$ ——分别为介质及工件表面的绝对温度。

由此可見，总的給热系数 α 亦应由两部分組成，即

$$\alpha = \alpha_{对流} + \alpha_{輻射} \quad (11)$$

而

$$\alpha_{輻射} = C \frac{(T_{介}^4 - T_{表}^4)}{T_{介} - T_{表}} \quad (12)$$

对流加热是借助于工件表面附近介质质点的运动(对流)以及这些质点对工件表面的傳热进行加热，因此 $\alpha_{对流}$ 与加热介质的种类，状态以及介质的运动速度有关。液体介质比气体介质的傳热作用好得多，因此具有較大的 $\alpha_{对流}$ 。增快气体或液体介质的运动速度，降低液体介质的粘度都可使 $\alpha_{对流}$ 增大。 $\alpha_{对流}$ 可近似地认为与工件的温度无关。在一般空气加热炉中， $\alpha_{对流}$ 可近似地采取 $10 \sim 20 \frac{\text{千卡}}{\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{度}}$ 。

至于 $\alpha_{輻射}$ ，則由于 $T_{表}$ 在加热过程中是一变数，因此即使在介质温度(炉温)以及輻射系数 C 保持恒定时， $\alpha_{輻射}$ 也是一个变数，因此总的 α 也是一个变数。

下表内的数据是根据 $C = 4 \times 10^{-8} \frac{\text{千卡}}{\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot (\text{绝对温度}^4)}$ 及 $\alpha_{对流} = 20 \frac{\text{千卡}}{\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{度}}$ (炉气运动

$\alpha \frac{\text{千卡}}{\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{度}}$	$t_2^\circ\text{C}$	0	200	400	600	800	1000	1200
$t_1^\circ\text{C}$								
0		23						
100		25						
200		29	37					
300		34	43					
400		40	51	69				
500		48	61	81				
600		58	74	94	124			
700		71	87	116	146			
800		86	105	132	169	218		
900		104	124	155	195	247		
1000		125	149	181	214	280	350	
1100		149	176	212	258	316	390	
1200		177	206	245	295	358	436	530
1300		208	241	283	337	404	486	586

速度为3米/秒)而得到的总的 α 值。表中 t_1 代表介质的温度(炉温), t_2 代表工件表面的温度。

表中给出的 α 值用的是实用单位, 即千卡/米²·时·度, 如果要转换成物理单位卡/厘米²·秒·度时只需除以3600即可。

上表的数据在计算工件的冷却时也能应用, 但是 t_1 应代表工件表面的温度而 t_2 ——介质的温度。

由于 α 是一变数, 因此工件加热或冷却所需时间的计算最好采用分段计算然后叠加的办法来进行。例如将起始温度为0°C的工件在800°C炉中加热到接近800°C的温度, 可以分成0°~200°C, 200°~400°C, ……等几段来进行计算, 然后叠加起来。在计算每段所需的时间时, α 值可以采用上表或其他类似图表中相应数据的平均值, 而假设 α 值在进行计算的这一段内近似地不变。显然, 分段越细, 就获得的结果越精确。

这种计算方法不但带来很大的麻烦, 而且由于加热计算方法本身所具有的误差, 因此也是不必要的。为了简化计算, 就认为 α 值在全部加热或冷却过程中都保持不变, 此时的 α 值是一个很近似的数值, 而被称为 $\alpha_{平均}$ 。但是经过生产实践检验的 $\alpha_{平均}$ 能大大简化计算, 而且也能保证一定的精确度, 从而为生产带来好处。下表中列出A. J. 兹姆钦斯基所提供的一些 $\alpha_{平均}$ 的数据。

热 处 理 工 序	加 热 或 冷 却 介 质	介 质 温 度 (°C)	平均传热系数 $\alpha_{平均}$ (千卡/米 ² ·时·度)
低温回火加热	空气或炉气	100~300	30
高温回火加热	空气或炉气	550~700	80
淬火加热	空气或炉气	750~950	130
同上或高压加热	空气或炉气	1200~1300	300
低温回火加热	油	150~250	300
低温回火加热	硝酸盐浴	250~350	300
淬火加热	氯化钠盐浴	1200~1300	1000
冷却	水	20~30	5000~20000
冷却	油	—	1000~300
冷却	空气	—	50~20

因此从公式(5)中我们看出, 薄片加热所需的时间除了与炉温及工件的起始温度有关外, 还与工件的 $\frac{V}{F}$ 以及 α 有关, 因此也与介质的种类, 状态及运动速度有关。至于工件的材料, 则只是比热及比重对加热时间有影响, 而导热系数却没有影响, 这从公式(5)中也可以看出。

对于薄片来讲, 虽然在加热或冷却过程中温差并不大, 但计算出温差来在生产实际中仍是极有意义的。下面就来讨论这一问题。

极易理解, 在加热开始前, 工件截面上的温差等于零; 在加热終了时, 工件截面上的温差又趋于零。只是在加热过程中, 在工件的截面上才有着温差, 随着加热过程的进行, 温差先增后减。要精确计算这种温差, 只有在热传导的微分方程的全解的基础上才有可能。为了解决热处理问题, 用一般的近似解就可以了。

在下述二种假定的情况下, 可以得到比较简单的近似解答: