

课程教学中专业概念的演进——以金属热处理火与组织为例

康慧君*, 陈国清, 齐 民#

大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年12月13日; 录用日期: 2024年1月10日; 发布日期: 2024年1月18日

摘 要

金属热处理是金属材料最重要的加工工艺之一, 通过改变和优化热处理工艺可以获得不同的微观组织和所需要的性能。传统热处理主要包括退火、正火、淬火和回火所谓“四把火”。上述“四把火”最初主要针对钢铁材料, 后来也逐渐扩展到有色金属及其合金, 但是其含义略有差异, 有时差异很大。源于钢铁材料的微观组织概念随着观测仪器的发展也在发生变化, 最初用光学显微镜定义的所谓“马氏体、贝氏体”等微观组织概念的内涵也在不断更新。为了理清这些概念, 本文系统总结了金属热处理的概念、工艺、与组织的关联关系, 以及概念的延伸和拓展, 提出了以不同尺度的材料结构代替材料微观组织的理念。

关键词

金属热处理, 热处理工艺, 淬火, 组织

Evolution of Professional Concepts in Course Teaching—Taking “Firing” and “Structure” in Metal Heat Treatment as Examples

Huijun Kang*, Guoqing Chen, Min Qi#

School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: Dec. 13th, 2023; accepted: Jan. 10th, 2024; published: Jan. 18th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 康慧君, 陈国清, 齐民. 课程教学中专业概念的演进——以金属热处理火与组织为例[J]. 教育进展, 2024, 14(1): 609-613. DOI: 10.12677/ae.2024.141092

Abstract

Metal heat treatment is one of the most important processing techniques for metal materials. Various microstructures and desired properties can be obtained by optimizing the heat treatment process. Traditional heat treatment mainly includes annealing, normalizing, quenching and tempering. That is so-called “Four fires”. The “Four fires” were initially used for steel materials, and then gradually extended into non-ferrous metals and their alloys, but their connotations are slightly different, sometimes very different. With the advancement of observation instruments, the concept of microstructure derived from steel materials is also changing. The connotations of the so-called “martensite, bainite” and other concepts for microstructure defined by optical microscopy have to keep updating. In order to clarify these concepts, this paper systematically summarizes the concept, the process of metal heat treatment, and the relationship between metal heat treatment and microstructure, and the extension and expansion of these concepts are also discussed. The idea of substituting microstructure for structure with various scales is proposed.

Keywords

Metal Heat Treatment, Heat Treatment Process, Quenching, Structure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属热处理是个技术概念，是指将金属在固态下加热到一定温度，然后进行保温，最后以一定的速率冷却，得到人们所期望的组织 and 性能。这里热是技术的核心，即热处理是个热过程(加热、保温和冷却)。固态是一个限制，即整个过程金属材料处于固态，这是热处理与其他金属加工过程(如铸造、焊接等)相区别的关键。热处理还有一个特点：热处理改变材料的性能一般不需要塑性变形，这与锻造、挤压、拉拔等金属加工过程不同。随着技术的发展，热处理过程中增加了环境因素如气氛(氢、碳、氮等)、物理场(电场、磁场、力场等等)，这使得热处理的概念不断拓展。

2. 金属热处理工艺

金属热处理的经典工艺包括退火、正火、淬火和回火等所谓的“四把火”。退火就是将钢加热到奥氏体状态，保温后在加热炉中缓慢冷却，最后得到接近平衡态的珠光体组织；正火就是将钢加热到奥氏体状态，保温后直接拿到空气中冷却，得到屈氏体或者索氏体；淬火则是将钢加热到奥氏体状态，保温后将钢件投放到室温下的液体介质中快速冷却，得到坚硬的马氏体组织。回火是对淬火组织的修正，因为淬火的快速冷却，造成了材料表面和心部之间存在比较大的内应力，容易引起变形和开裂，淬火后再次进行较低温度的加热保温，以去除这部分内应力。

上述四种经典工艺实际上即由某种操作(退、正、淬、回)加上目的(火)两部分组成。“火”一词含有材料内在某种性能的意思，对于钢铁而言，“火”也有“硬”的含义。退火意味着退去硬度，淬火意味着得到硬度，回火有调整硬度的意思。

“四把火”中最核心、最重要的是“淬火”。因为它是使钢的性能发生根本性变化的工艺，使钢剑

真正实现了“削铁如泥”。中国最早记录“淬火”概念的是《史记·天官书》，“火与水合为淬”[1]，这里讲的是工艺。《汉书·王褒传》中记载：“巧冶铸干将之朴，清水淬其锋”，指将钢件(干将剑)加热，然后将红热状态的钢件快速投入到清水中，这样处理后的剑就会异常锋利。这与目前的淬火概念更为接近。当时只有少数技师掌握这种技术，限于当时的认知，没人知道隐藏其背后的原因。然而，这种技术一直在有效地运用。直到公元 19 世纪后半叶，英国冶金工程师亨利·索比(Henry C. Sorby)首次将光学显微镜用于观察腐蚀后的金属，发明了金相学[2]，相继很多冶金学家同样用光学显微镜观察了不同含碳量、不同处理条件下得到的显微形貌，因此淬火使钢铁变硬的背后原因逐渐为人们所认识。以光学显微镜观察为基础，发明了“微观组织”的概念，并用微观组织将加工处理工艺与材料的性能之间建立了联系，形成了“材料科学与工程”这门学科。

3. “组织”概念的形成与发展

随着金相学的出现，人们对看到的微观组织进行了命名，如珠光体、贝氏体、马氏体、魏氏组织、莱氏体、索氏体和屈氏体等。其中，除珠光体外，其余几种组织均是以科学家的名字命名的，如贝氏体是为纪念美国科学家 Bain，马氏体对应德国科学家 Marten，魏氏组织对应奥地利科学家 Widmanstätten，莱氏体对应德国科学家 Lederbur，索氏体对应英国科学家 Sorby，屈氏体对应德国科学家 Troost 等。且上述每种以姓氏定义的微观组织均有特定的形貌含义。最初，上述微观组织的界定都是通过光学显微镜观察的形貌来区分的。1939 年，德国西门子公司首先制造出放大倍数 3 万倍、分辨率为 3 纳米的电子显微镜，使人们可以在更深层次观察金属的组织[3]。在此之前，科学家对金属塑性变形的机理一直存在争议，如果按照完整晶体的刚性滑移模型，计算出的金属塑性变形的临界切应力是实际测量值的 3 个数量级[4]。20 世纪 30 年代 Taylor、Orowan 和 Polanyi 三人提出了位错模型，用位错运动计算出塑形变形的临界切应力与实测结果非常接近，但还是缺乏实验的佐证。1956 年，英国剑桥大学的 Hirsch 用电子显微镜观察到了清晰的位错图像和位错的运动[5]。高分辨电子显微镜使科学家可以看到材料纳米尺度的形态，得到了纳观组织，即形成了“nanostructure”的概念。

电子显微学使人们对金属强化理论有了更深的认识，系统而完美地形成了金属及合金的固溶强化、细晶强化、形变强化以及弥散强化等理论。可以看出，“组织”的概念是不断丰富和发展的。

所谓材料的“组织”概念在“材料科学基础”及“工程材料”课程教学中广泛使用。然而，它又是一个比较难于理解的概念，其复杂性在于，“组织”是一个形象概念，同样一个样品，在不同的放大倍数下显示不同的形态。因此，我们在比较材料的组织时，必须在同样的放大倍数下才有意义，否则可能得出谬误。如低碳钢(亚共析钢)在不同的放大倍数下具有不同的形态。在低倍下(光学显微镜)，珠光体呈一团黑色，但在高倍下，珠光体中的铁素体和渗碳体都呈白色。另外，在铁碳合金平衡冷却过程中，对二次渗碳体和三次渗碳体在不同类别合金(如对亚共析钢组织中三次渗碳体的忽略，对莱氏体组织中二次渗碳体的忽略)中的存在与否的解释也比较武断，既不科学，也使初学学生很难理解。

在过去的研究中，用低倍组织、光镜组织和电镜组织来说明同样材料状态在不同放大倍数下的组织差异，但在今天看来，这种描述比较模糊。如珠光体、索氏体和屈氏体都是扩散型相变的产物，只有形貌大小和层片厚度的差异，没有本质的区别，因此也常常归为一类组织；马氏体是非扩散型相变的产物，是碳在 α 铁中所形成的过饱和固溶体畸变相；而贝氏体组织的形成过程既有扩散型相变，也有非扩散型相变。中文的所谓“组织”在英文中为“structure”，实则指“结构”。因此，在对材料性能以及工艺要求日益精细化的今天，显然在教学过程中对核心的概念也要更加精细。

4. “组织”概念的延伸

高分子材料的应用始于 20 世纪 30 年代，在使用体积上目前已经超过金属材料。对于使用越来越多

的高分子材料来说,基本没有所谓“组织”的概念。代之以单体分子结构和大分子结构(链状、网状)等。由于构成材料后往往为非晶体,因此它们不像金属那样可以通过表面抛光并腐蚀后在光学显微镜下呈现不同的花样,即使借助电子显微镜甚至高分辨电子显微镜也难以直接显示出形态的差异性。影响材料性能的主要是原子之间的键合状态,往往需要借助红外光谱、紫外光谱和核磁共振等手段来间接判别其结合键类型(如 C-H、C-O)及分子中所具有的特定集团(如 CH、CH₂ 和 CH₃)。

因此,为避免混乱,采用“结构”概念代替“组织”概念更为准确,为此对于金属材料或陶瓷材料,可以将材料的结构分为以下几个层次:

- 1) 宏观结构(macro-structure), 肉眼可见的尺度, $10^{-2}\sim 10^{-3}$ m;
 - 2) 细观结构(meso-structure), 借助放大镜可见, $10^{-3}\sim 10^{-5}$ m;
 - 3) 微观结构(micro-structure), 借助光学显微镜可见, $10^{-5}\sim 10^{-7}$ m;
 - 4) 纳观结构(nano-structure), 借助电子显微镜可见, $10^{-7}\sim 10^{-9}$ m;
 - 5) 原子排列(atom-arrangement), 借助高分辨电子显微镜可见, 或通过 X 射线衍射间接分析; $10^{-9}\sim 10^{-10}$ m, 也可通过原子力显微镜观察到。
 - 6) 原子结构(atom structure), 指原子核外电子分布, 决定材料的内禀性质。
- 对于高分子材料,无法观察到形态,只能通过间接方法测试其原子排列。

5. “热处理”内涵的拓展

随着工艺的细化,热处理的内涵也在发生变化,如退火不仅单指加热到奥氏体区然后缓慢冷却,还包括了去应力退火、再结晶退火、球化退火和扩散退火等新的概念。

淬火对应的英文 quench 的含义是: to cool (as heated metal) suddenly immersion(as in oil or water) [6],即将加热后的金属快速浸入到油或者水中。从这一概念的源头来看,淬火仅仅是一个工艺概念,即将加热后的金属快速冷却,原始含义并未考虑得到微观组织。由于工业革命后,钢的作用实在太重要,以至于淬火这一工艺概念与钢的马氏体转变密切联系起来。目前,大多数教材都将淬火这一概念定义为:将钢加热到奥氏体区,然后快速冷却,以期得到马氏体组织的过程。

不锈钢的固溶处理及铝合金的固溶处理也是将相应的金属材料加热到高温,然后快速冷却。固溶处理与淬火处理工艺类似,工艺上直接用 Quench [7]或者“淬火”[8]来表述这种工艺,但目的不是为了得到马氏体组织。也就是说,淬火不能与马氏体组织直接挂钩,将马氏体转变与淬火联系到一起会产生一定的混淆。镍钛形状记忆合金在缓慢冷却后,也会产生所谓的马氏体。但是,有色金属及合金的马氏体完全不同于钢铁材料中的马氏体。如镍钛形状记忆合金中的马氏体强度甚至比平衡态的组织还要低。广义上讲,淬火不等于淬硬。

从今天科学认识的角度看,索氏体和屈氏体的概念过于模糊,马氏体的概念也完全脱离了 100 年前的定义。

6. 结束语

材料微观组织概念的提出已经有 150 多年的历史了。今天,金属合金的微观组织以及得到这些微观组织的工艺技术都要进行重新认识,重新归类。用结构概念表征材料不同尺度的状态更为准确。而工艺方面,则有必要跳出昔日依据钢铁材料对工艺概念的约定,使工艺概念的定义更加具有普适性。

参考文献

- [1] 司马迁. 史记,卷二十七: 天宫书第五[M]. 长沙: 岳麓书社, 2021.
- [2] 郭可信. 金相学史话(1): 金相学的兴起[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(4): 2-9.

- [3] 郭可信. 金相学史话(6): 电子显微镜在材料科学中的应用[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(1): 5-10.
- [4] 冯端, 等. 金属物理学, 第三卷: 金属力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] Robert W. Cahn. 走进材料科学[M]. 杨柯, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [6] (1973) Webster's New Collegiate Dictionary. Q & C Merriam Co., Springfield.
- [7] Callister Jr., W.D. (1994) Materials Science and Engineering. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [8] 刘国权. 材料科学与工程基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.