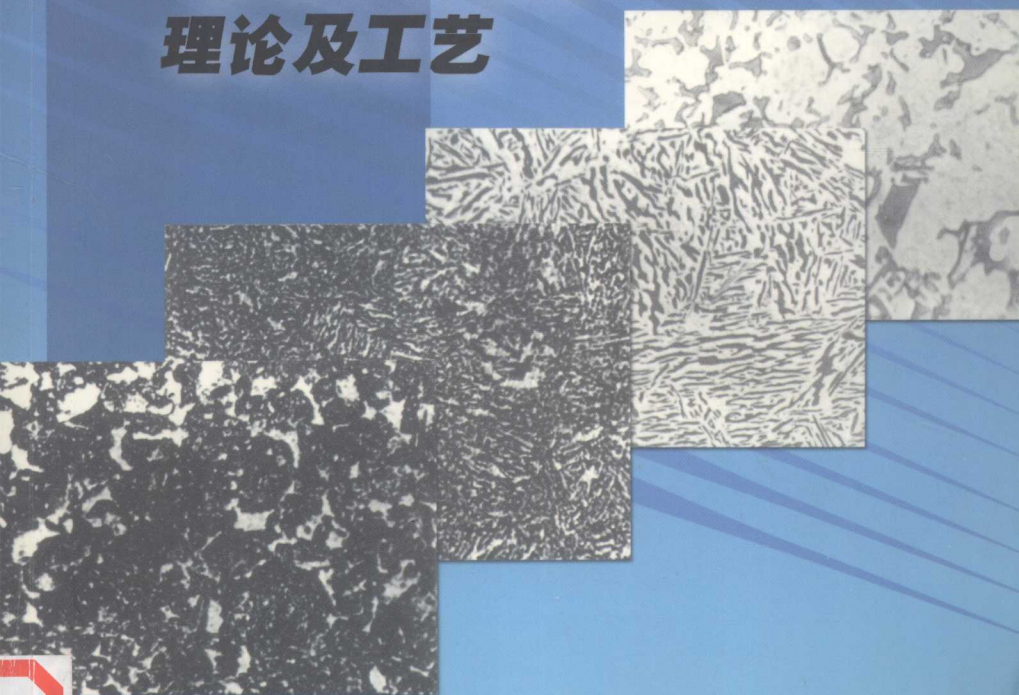




钢的亚温处理

——临界区双相组织
超细化强韧化
理论及工艺

王传雅 著



中国铁道出版社

铁路科技图书出版基金资助出版

钢的亚温处理

——临界区双相组织超细化强韧化理论及工艺

王传雅 著

中国铁道出版社

2003年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书主要为从事热处理工作的科技人员提供有关钢的亚温处理强韧化和复合强韧化理论及工艺方面的知识。书中系统地阐述了亚温处理的分类、钢在临界区的加热转变和冷却转变、临界区加热后钢的淬透性、亚温处理所得各种典型双相复合组织等。全面介绍了亚温处理在各方面改善和提高钢材性能的内容,包括提高钢的强韧性、抑制钢的可逆回火脆性、改善钢材冷脆行为、减小钢的淬火变形和开裂等。并介绍了亚温淬火在化学热处理(渗碳和渗氮)中的应用效果、渗扩氮亚温淬火的复合强韧化作用等。分析了亚温处理的强韧化和复合强韧化机制以及亚温处理后钢的断裂过程。最后还列举了许多单位采用亚温处理解决生产难题或延长工件使用寿命的具体实例。

本书可作为高等院校有关专业本科生和研究生的教学参考书或供从事金属材料、热加工和其他相关学科的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢的亚温处理:临界区双相组织超细化强韧化理论及工艺/王传雅著. —北京:中国铁道出版社,2002.11
ISBN 7-113-04939-7

I. 钢… II. 王… III. 钢—热处理 IV. TG161

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 083935 号

书 名:钢的亚温处理——临界区双相组织超细化强韧化理论及工艺

作 者:王传雅

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:田京芬 陈若伟

封面设计:冯龙彬

印 刷:北京市彩桥印刷厂

开 本:850×1168 1/32 印张:9.125 字数:243 千

版 本:2003年6月第1版 2003年6月第1次印刷

印 数:1~2 000 册

书 号:ISBN 7-113-04939-7/TG·26

定 价:18.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:(010)51873018 发行部电话:(010)63545969



王传雅教授简介

1934年10月生。1951年毕业于大连海事大学俄文专修科；1960年毕业于哈尔滨工业大学金属材料及热处理专业。先后任教于大连海事大学、哈尔滨工业大学、大连铁道学院。1982年升副教授，1987年升教授。历任辽宁省政协第五、六届委员及第七、八届常委，中国农工民主党大连市委副主委，辽宁省热处理学会常务理事、中国铁道学会铁道材料工艺委员会委员、美国金属学会国际部会员。

多次为研究生和本科生讲授“X射线金属学”、“钢的成型与精炼”、“钢的物理冶金”、“钢的强韧化及设计”、“数据处理”、“金属学”、“热处理原理”、“金属的研究方法”、“物理性能”、“金属材料及热处理”等课程。指导历届本科生毕业论文百余项。指导研究生十余名。两次获院教学优秀一等奖及院优秀班主任称号。

发表科研论文120余篇，其中50余篇次获部、省级优秀论文奖，12篇为国际会议宣读论文。代表性著作作为《金属的结构分析》一书及《钢的亚温处理》论文集。科研成果获国家教委科技进步二等奖、三等奖及国家发明四等奖。

1984年起三次被评为大连市三八红旗手，并获辽宁省三八红旗手及大连市劳模称号。1990年获国家级有突出贡献的中青年科技专家称号及铁道部有突出贡献的中青年科技专家称号，1991年起享受政府特殊津贴，同年获全国铁路优秀知识分子称号。1997年获大连市优秀专家称号。1999年获大连市发明精英称号。事迹被收入《英国IBC国际名人传记词典》第24集，《世界妇女名人录》第13集，《中国妇女儿童事业成就大典》，《中国当代学者大词典》，《当代中国科学家与发明家大词典》，《中国高等教育专家名典》，《科技专家名录》，《大连科技精英》，《大连发明精英专辑》等。

本书由

大连市人民政府资助出版

**The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government**

前 言

亚温处理系指将具有平衡态或非平衡态原始组织的亚共析钢加热至铁素体加奥氏体双相区的一定温度区间保温一定时间后进行淬火并回火、等温淬火、正火或退火的热处理,是一种新型的利用强韧相和复相显微组织超细化的强韧化热处理工艺。

采用亚温处理可以大幅度地提高钢的室温和低温韧度,抑制可逆回火脆性,降低冷脆转折温度,防止变形开裂,解决油淬不透而水淬又开裂的大件淬火困难问题。

本书的主要特色在于:

1. 在国内最先提出只要结构钢中无大块铁素体存在,就可获得亚温处理的强韧化效果,从而打破了传统热处理不允许结构钢在临界区淬火加热的禁区。

2. 最先系统研究、综述并补充了影响亚温处理效果的诸因素和机制,为深入进行亚温处理研究和推广应用提供了理论依据及工艺规范。

3. 用调整预处理规范和亚温处理加热规范的纯热处理方法,而无需如国外采用改变钢的化学成分的冶炼方法,在一系列结构钢中获得3种典型的双相复合组织,并从诸方面证实了针状铁素体的最佳效果。

4. 对亚温淬火提出了合理的分类法:结构钢高温亚温淬火及双相钢低温亚温淬火。

5. 为亚温淬火与化学热处理相结合提出了依据,开辟了一类复合强韧化新领域。

6. 将亚温处理发展至一系列能获得针状形态铁素体的其他亚温处理:亚温等温淬火、亚温正火及亚温退火。

本书的内容包含作者曾获国家教育委员会科技进步二等奖的

科研成果“亚温淬火双相组织超细化提高钢的强韧性、抑制其可逆回火脆性、改善其冷脆行为的理论及工艺”和曾获国家教育委员会科技进步三等奖的科研成果“两相区加热对过冷奥氏体转变动力学、钢的淬透性、淬火变形和断裂机制的影响”。还有许多内容选自作者在第三届国际材料热处理大会(上海),英国1984年金属学年会(伦敦),第四届国际材料热处理大会(柏林),第三届国际碳化物、氮化物、硼化物大会(波兹南),第一届国际表层及涂层科技大会(瓦尔纳),第五届国际材料热处理大会(布达佩斯),第六届国际材料热处理大会(芝加哥),第四届国际碳化物、氮化物、硼化物大会(波兹南)及第七届国际材料热处理大会(莫斯科)的宣读论文以及作者围绕所完成的题为“渗扩氮亚温淬火复合强韧化”的国家自然科学基金项目所发表的一些有关论文。书中亦引入了国内外其他有关论著的相关内容。

为了有助于热处理理论及工艺的发展,特将本人在亚温处理强韧化领域内的一些工作撰写成册,献给广大的热处理工作者,以期对工作有所裨益。有错误与不当之处,敬请提出批评和指正意见,不胜感激!

作者
王传雅

目 录

第一章 钢的亚温处理概述	1
第二章 钢在亚温处理时的转变	7
第一节 钢在临界区加热时的转变	7
第二节 钢经临界区加热后的冷却转变	15
第三章 亚温处理对提高钢的强韧性的贡献	28
第一节 亚温处理的强韧化效果(一) ——亚温淬火提高中碳结构钢的冲击韧度和 疲劳性能	28
第二节 影响亚温处理强韧化效果的因素	33
第三节 亚温处理的强韧化效果(二) ——亚温淬火提高低碳结构钢的冲击韧度和 疲劳强度	59
第四节 亚温处理的强韧化效果(三) ——亚温退火、亚温正火和亚温等温淬火改善低、 中碳结构钢的性能	68
第五节 亚温处理的强韧化机制综述	82
第四章 亚温处理后钢的断裂过程	93
第一节 亚温淬火加高温回火态	96
第二节 亚温淬火加低温回火态	104
第三节 亚温淬火后回火温度效应对比	111

第五章 钢的回火脆性	114
第一节 第一类回火脆性.....	114
第二节 第二类回火脆性.....	127
第六章 亚温处理对抑制钢的可逆回火脆性的作用	156
第一节 亚温淬火对钢的可逆回火脆性的影响.....	157
第二节 亚温淬火对回火缓冷脆化和回火等温脆化抑制 效果不同的原因探讨.....	164
第三节 杂质和晶粒边界效应程度对亚温淬火抑制钢的 可逆回火脆性效果的影响.....	167
第四节 杂质和晶粒边界效应程度对亚温淬火 抑制钢的可逆回火脆性效果的影响机制.....	175
第七章 亚温处理对改善钢材冷脆行为的效果	180
第一节 亚温淬火对冷脆状态下钢材低温性能的影响.....	180
第二节 亚温淬火对钢材冷脆转折温度的影响.....	184
第三节 亚温淬火对回火脆化状态下钢材低温性能的 影响.....	186
第四节 亚温淬火降低钢材冷脆转折温度和改变低温 断裂的机制.....	193
第八章 亚温淬火对减小钢的淬火变形和开裂的影响	196
第一节 临界区加热减小结构钢淬火变形的研究.....	196
第二节 临界区加热对防止结构钢淬火开裂的影响.....	205
第九章 亚温淬火在化学热处理中的应用	210
第一节 亚温淬火在渗碳中的应用.....	210
第二节 亚温淬火在渗氮中的应用.....	218

第十章 渗扩氮亚温淬火复合强韧化 ·····	238
第一节 30CrMnSiA 钢平衡态原始组织渗扩氮高温淬火 和渗扩氮亚温淬火研究 ·····	238
第二节 30CrMnSiA 钢非平衡态原始组织 渗扩氮亚温淬火 ·····	250
第十一章 亚温处理的生产应用和其他相关内容 ·····	258
第一节 亚温处理的生产应用 ·····	258
第二节 亚温处理的其他相关内容 ·····	266
附录 亚温处理部分实验技巧 ·····	273

第一章 钢的亚温处理概述

一、亚温处理的定义

将具有平衡态或非平衡态原始组织的亚共析结构钢加热至铁素体与奥氏体共存的两相区，即临界区温度区间保温一定时间后进行淬火、等温淬火、正火和退火的热处理工艺均属于亚温处理，分别称为亚温淬火、亚温等温淬火、亚温正火和亚温退火。

亚温处理是针对结构钢开发的一类新型强韧化工艺。目前，结构钢的强韧化工艺已有许多，诸如：

1. 获得板条马氏体(位错马氏体)的强韧化工艺；
2. 超细化热处理工艺；
3. 真空热处理；
4. 形变热处理工艺；
5. 复相热处理——利用韧性相(铁素体、奥氏体或下贝氏体)的强韧化工艺^[1-11]。

亚温处理与一般强韧化工艺不同，它是利用韧性相以及几种相的复合组织超细化产生的综合强韧化热处理。

以往，结构钢淬火组织中不允许有未溶铁素体存在，理由是未溶铁素体会使钢的性能变坏，故其淬火工艺必须采用完全淬火，即加热至单相奥氏体区进行淬火。

二、亚温处理的分类

(一) 按加热温度分类

亚温处理中的亚温淬火可按钢在临界区中的加热温度不同区分为高温亚温淬火和低温亚温淬火^[12]。前者的加热温度处于接近 Ac_3 的某一温度区间，后者的加热温度处于接近 Ac_1

的某一温度区间。前者适用于中碳结构钢,后者适用于低碳双相钢。

(二) 按原始组织分类

亚温处理按钢的原始组织不同可归纳为平衡态组织亚温处理和非平衡态组织亚温处理。前者包括亚温处理前为退火态、正火态以及淬火加高温回火态的原始组织,后者包括淬火态及等温淬火态的原始组织^[10,13]。

(三) 按加热速度和加热方式分类

亚温处理的加热速度可分为中速(约 350 °C/h)和慢速(0.5~2.0 °C/min),其加热方式可分为连续加热和阶段加热。阶段加热系以中速加热至略高于 A_{c1} 的温度保持较长时间后再进行中速加热至最终的亚温加热温度,其整个加热过程亦相当于慢速加热,可达到慢速加热的效果^[10,14]。

(四) 按冷却方式分类

亚温处理按其加热后的冷却方式不同可分为亚温淬火、亚温等温淬火、亚温正火及亚温退火^[15~17]。

三、亚温处理的前提条件

亚温处理的原始组织中不允许有大块铁素体存在。为此,亚温处理前常需进行一定的预处理。只有对于正常的原始组织或者对于亚温处理后所得组织形态无特殊要求时才允许采用“直接亚温处理”^[14]。

四、亚温处理后的正常显微组织

(一) 亚温淬火后的正常显微组织^[18]

亚温加热后所得组织应为以下三类双相组织:

1. 小颗粒状双相组织 $\alpha_g + \gamma_g$
2. 针状双相组织 $(\alpha_a + \gamma_a)$
3. 有晶粒边界效应的针状双相组织 $(\alpha_a + \gamma_a) + \gamma_g$

冷却后所得组织相应为以下三类复合组织:

1. $F_g + M$
2. $F_a + M$
3. $(F_a + M) + M$

其相组成相应为：

1. $\alpha_g + \alpha'$
2. $\alpha_a + \alpha'$
3. $\alpha_a + \alpha'$

(二) 亚温等温淬火后的正常显微组织^[15~17]

亚温等温淬火加热后所得组织应为双相组织 $\alpha_a + \gamma_a$ 。

冷却后所得组织为复合组织 $F_a + B_L + M$ ，其相组成为 $\alpha_a + \alpha' + C$ 。

(三) 亚温正火后的正常显微组织^[15~17]

亚温正火加热所得组织应为双相组织 $\alpha_a + \gamma_a$ 。

冷却后所得组织为复合组织 $F_a + P$ ，其相组成为 $\alpha_a + C$ 。

(四) 亚温退火后的正常显微组织^[15~17]

亚温退火加热所得组织应为 $F_a + P$ ，其相组成为 $\alpha + C$ 。

五、亚温处理对钢的性能的影响

(一) 对强韧性的影响

亚温淬火能够在不降低钢的强度或提高钢的强度的前提下提高其室温及低温冲击韧度。诸如对 12Ni3、12CrNi3、16Mn、20SiMn、22CrMnSiMo、35CrMo、30CrMnSi、40Cr、40CrNi、42CrMo、45、60Si2、60Si2Mn 以及 Cr-Si-Ni 等钢，其提高幅度可达 83%~200%^[5,6,14]。亦可在不降低钢的塑性和韧性的前提下提高其强度，如对 16Mn 等钢^[14~17]。

(二) 对可逆回火脆性的影响

亚温淬火能够抑制或减小钢的可逆回火脆性，诸如对 $2\frac{1}{4}\text{Cr-Mo}$ 、25Cr2Ni4MoV、30CrMnSi、35CrMnSi、40CrNi、40CrMnSi 等钢^[6,14]。

(三) 对冷脆行为的影响

亚温淬火能够降低钢的冷脆转折温度, 诸如对 12Ni3、35CrMnSi、35CrMo、低碳锰钢 (0.15% C、0.38% S、1.13% Mn、0.25% Cr、0.03% V、0.07% Al) 以及 3.5% Ni-Cr-Mo-V 转子钢等^[6,14]。

(四) 对淬火变形及开裂的影响

亚温淬火能够明显减小钢的变形及防止开裂, 诸如对 18CrMnTi、18Cr2Ni4W、20Cr、30CrMnSi 以及 45 钢等^[14]。

(五) 对淬透性的影响

亚温淬火加热所得不同的组织形态对钢的淬透性的影响亦不同。针状双相组织能够提高钢的淬透性, 颗粒状双相组织则不能提高其淬透性, 反而略使其降低^[19,20]。

六、亚温处理在化学热处理中的应用

(一) 在渗碳中的应用

钢经渗碳后, 采用亚温处理可使其心部获得含有韧性相的细化双相组织 ($\alpha + \gamma$), 从而使其强韧性得到提高。在表层, 由于亚温淬火的加热温度低于完全淬火的加热温度, 一方面使碳化物溶解量少, 另一方面使奥氏体晶粒细小, 故淬火后所得马氏体脆性小, 而且残余奥氏体量少, 从而可减小变形及抑制开裂^[21-23]。

(二) 在气体渗氮中的应用

调质态的钢经气体渗氮后产生明显的脆性。若渗氮前采用亚温淬火取代调质以获得细小的双相复合组织作为原始组织, 则因更多地提供了氮原子的扩散通道及氮化物的形核部位, 加之由于合金元素含量较低的 α 相存在, 从而增加了渗氮后渗氮层中的氮化物 (ϵ 及 γ') 含量, 使渗氮层硬度升高而不增加其脆性。将亚温淬火用于气体渗氮还能提高渗氮件整体及心部的韧性, 并增加其渗层深度^[24]。

(三) 在离子渗氮中的应用

亚温淬火对离子渗氮与对气体渗氮有类似的影响规律和机

制,能够增加工件经离子渗氮后的强韧性,提高其整体的室温及低温冲击韧度,并增加其渗层深度^[25]。

(四) 渗扩氮亚温淬火复合工艺的应用

渗氮后进行亚温淬火可使渗层中的氮化物进行部分或完全溶解,使氮原子向心部扩散,从而形成由工件表层至心部的较理想的氮浓度梯度曲线及显微硬度分布曲线,由此获得较理想的显微组织和性能以及二者沿截面的理想分布^[26,27]。

参 考 文 献

- 1 Сазонов Б. Г. МНТОМ. 1957(4):30
- 2 哈尔滨工业大学热处理专业. 淬火工艺的发展方向. 哈尔滨工业先进技术交流馆, 1977
- 3 肖纪美. 初化原理和工艺(续 1)——提高金属强度的途径. 国外金属材料, 1977(3):1~46
- 4 戚正风. 谈谈调质处理. 金属热处理, 1978(1):2~12
- 5 王传雅. 结构钢亚温淬火—北京型内燃机车万向轴低温脆性的研究. 金属材料及热处理论文集. 北京:中国铁道出版社, 1980:1~15
- 6 王传雅. 钢的亚温淬火. 金属热处理, 1980(2):1~15
- 7 肖纪美, 编著. 金属的韧性与初化. 上海:上海科学技术出版社, 1982
- 8 雷天同. 复合组织的应用与钢的综合性能. 金属热处理, 1983(8):55~59
- 9 徐佐仁. 钢的复相热处理的发展. 金属热处理, 1985(1):6~16
- 10 戚正风, 主编. 金属热处理原理. 北京:机械工业出版社, 1987
- 11 俞德刚, 编著. 钢的强初化理论与设计. 上海:上海交通大学出版社, 1990
- 12 王传雅, 等. 低碳钢亚温淬火. 金属热处理, 1983(6):27~34
- 13 戚正风, 等. 原始组织对钢加热转变的影响. 中国机械工程学会第三届全国热处理年会论文选集. 北京:机械工业出版社, 1985:9~19
- 14 王传雅, 编著. 钢的亚温处理. 大连:大连铁道学院出版社, 1990
- 15 王传雅. 高强度薄板钢 16Mn 亚温处理后的组织与性能的研究. 大连铁道学院学报, 1985(3):74~84
- 16 Wang Chuanya. The Structures and Properties of High Strength Sheet Steel 16Mn after IHT. Heat Treatment '84. Proceedings. 8. 1~8. 6

- 17 王传雅. 低碳 16Mn 钢亚温处理后的组织及性能研究. 兵器材料科学与工程, 1985(6):9~19
- 18 王传雅, 等. 亚温淬火时 α 相形态和 α 相量对钢的强韧性的影响. 金属热处理学报, 1984, 5(1):52~65
- 19 王传雅, 等. 两相区加热对过冷奥氏体转变动力学及钢的淬透性的影响. 金属热处理学报, 1988, 9(1):21~33
- 20 Wang Chuanya, et al. The Influence of Intercritical Heating on the Kinetics of Super Cooled Austenite Transformation and Hardenability of Steel. Heat Treatment and Surface Engineering. New Technology and Practical Applications. 6th ICHTM. 1989:257~261
- 21 王传雅, 等. 亚温淬火在渗碳中的应用. 大连铁道学院学报, 1986(1):79~88
- 22 Wang Chuanya, et al. The Application of IHT to the Carburizing. 2th International Conference on Surface Layers and Coatings Proceeding. Varna. 1986:42
- 23 王传雅, 等. 18Cr2Ni4WA 钢渗碳后亚温淬火的研究. 机车车辆工艺, 1986(3):13~21
- 24 周书范, 等. 亚温淬火在气体氮化中的应用. 铁道学报, 1985(2):101~112
- 25 王传雅, 等. 亚温淬火在离子氮化中的应用. 大连机械, 1984(2):16~22
- 26 王传雅, 等. 30CrMnSiA 钢渗扩氮高温淬火及渗扩氮亚温淬火研究. 热加工工艺, 1994(2):6~10
- 27 徐维. 结构钢渗扩氮亚温淬火规律的研究. 大连铁道学院学报, 1994(4):8~12

第二章 钢在亚温处理时的转变

第一节 钢在临界区加热时的转变

一、亚共析钢平衡态原始组织临界区加热等温转变动力学

关于共析钢平衡态组织的奥氏体等温形成动力学已在《金属热处理原理》一书^[1]中有详细阐述。与共析钢不同,亚共析钢的平衡组织中有先共析相铁素体存在,故当亚共析组织转变为奥氏体后,尚存在先共析相铁素体转变为奥氏体的问题。由于中碳结构钢亚温淬火工艺和低碳双相钢的发展,近年来对亚共析钢的加热转变已进行了较深入的研究^[1~21]。在弄清等温转变后则对连续加热转变不难理解。

平衡态原始组织不同的亚共析钢在临界区的等温转变过程也不同。

(一) 退火态组织临界区加热等温转变过程及动力学

文献[3]将亚共析钢退火态组织在临界区的等温转变过程划分为3个阶段:

1. 奥氏体核在铁素体与珠光体交界面形成后,快速长进珠光体,直至珠光体全部转变为奥氏体为止。

2. 奥氏体向先共析铁素体慢速长进。由于是在两相区,故先共析铁素体不能全部转变为奥氏体。转变停止后得到双相组织,等温温度越高,未转变的铁素体量越少。

3. 奥氏体与铁素体的最后平衡。

文献[12]认为,在奥氏体与铁素体达到平衡的过程中,随奥氏体中碳不断向边界扩散,奥氏体还会不断长入铁素体,直至碳达到平衡浓度为止,故上述第三阶段可与第二阶段合并。