

**Phase Transformation
and Heat Treatment**

徐祖耀院士中文文选

相变与热处理

徐祖耀 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



上海科技专著出版资金资助

徐祖耀院士中文文选

相变与热处理

Phase Transformation
and Heat Treatment

徐祖耀 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书从多维度论述了如何将相变理论、相变研究成果应用于材料热处理、应用于发展新型材料。书中深入阐述了利用相变研究成果制订新工艺的原理、方法和具体例子,详细介绍了材料成分和组织形态是如何影响材料性质的,从而为挖掘老材料潜力、创制新材料、节约能源、保护环境指明了方向。

本书既可作为材料科学与工程专业的研究生的课外读物,又可作为材料工作者的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

相变与热处理/徐祖耀著. —上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-09864-1

I. ①相… II. ①徐… III. ①热处理—相变理论—文集 IV. ①TG15-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121633 号

相变与热处理

著 者:徐祖耀

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:常熟市文化印刷有限公司

开 本:787mm×960mm 1/16

字 数:290 千字

版 次:2014 年 7 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-09864-1/TG

定 价:48.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:5.5

印 次:2014 年 7 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52219025

前 言

为了读者方便地研读本人发表的主要外文论文,上海交通大学材料科学与工程学院委托科学出版社出版了《徐祖耀文选(*The Selected Works of T. Y. HSi*)》(内载英文 86 篇)及《徐耀祖文选(续)(*The Selected Works of T. Y. HSi (Continued)*)》(内载论文 68 篇),颇受欢迎。

近年,美国政府拨巨款为“材料基因”科研立项。中国科学院准备组织力量,开展这个项目。已知材料的性质决定于成分和组织形态。由此可知材料基因不但决定于其成分,还决定于其经不同相变后的组织形态。可见材料相变和热处理(实行不同相变的处理手段)在材料科学中的重要性。为了向初学材料相变者提供中文参考资料,将本人的有关中文论文稍作文字修改后汇集成册,定名为《徐祖耀院士中文文选——相变导论》,即将由上海交通大学出版社出版。此次又取相变研究成果应用于热处理,发展新型材料,如研制超高强度钢,以及有关《材料形态学》研究综述等已发表的中文论文 16 篇,其中一篇有续篇,共 17 篇,汇编成册,名为《徐祖耀院士中文文选——相变与热处理》,即将出版问世。其中有些论文系几十年前之旧作,希望读者能从中吸取精髓,得到感悟和启发,或温故而知新,在工作中有所创新。希望我国学者日后为祖国的科技事业,为材料的更新作出更大贡献。为了方便中国读者阅读英文资料,特将导言译文放在每章文献后。其中第 2、3、4、9 章由张骥华教授译,戎咏华教授校。

本文选的顺利出版,多承蒙我组戎咏华、金学军和郭正洪等同志支持和匡助,以及上海交通大学出版社余志洪编辑等的精心工作,国家重点基础研究发展计划(973)项目 2011CB706604 的支持,谨此表谢!

作 者

目 录

第 1 章 高速钢的回火	(1)
1.1 概述	(2)
1.2 奥氏体的催化作用	(2)
1.3 奥氏体在回火时的稳定化现象	(6)
1.4 催化作用的机理	(8)
1.5 高速钢回火的新工艺	(10)
1.6 减少工具变形的回火工艺	(13)
参考文献	(14)
导言译文	(17)
第 2 章 提高 GCr15 钢轴承寿命的热处理途径	(19)
2.1 概述	(19)
2.2 马氏体的含碳量和组织形态的影响	(19)
2.3 碳化物的细化处理	(20)
2.4 奥氏体晶粒度和均匀性的影响	(22)
2.5 残余奥氏体量对疲劳寿命的影响	(24)
2.6 残余奥氏体的稳定化处理	(26)
2.7 建议	(31)
参考文献	(31)
导言译文	(33)
第 3 章 特殊钢热处理过程中合金元素的作用	(34)
3.1 概述	(34)
3.2 淬透性	(36)
3.3 合金元素对淬火-回火钢的作用	(39)
3.4 合金元素对正火钢性能的影响	(51)
参考文献	(54)
导言译文	(57)

第 4 章 高强度铁素体钢	(58)
4.1 概述	(58)
4.2 组织细化的原因和措施	(58)
参考文献	(62)
导言译文	(63)
第 5 章 淬火空位对 Fe-Ni 合金马氏体相变的影响	(64)
5.1 概述	(64)
5.2 实验方法	(64)
5.3 实验结果	(66)
5.4 讨论	(70)
5.5 结论	(72)
参考文献	(73)
导言译文	(74)
第 6 章 低碳马氏体形成时碳的扩散	(75)
6.1 概述	(75)
6.2 马氏体相变过程中碳的扩散	(76)
6.3 金相组织及界面结构	(77)
6.4 脱溶驱动力	(78)
6.5 结论	(81)
参考文献	(82)
导言译文	(83)
第 7 章 低碳马氏体形成时碳的扩散(续)	(84)
7.1 概述	(84)
7.2 碳原始均匀分布、表面保持恒值时的扩散	(84)
7.3 马氏体长大时碳向界面位错扩散	(86)
7.4 按上贝氏体长大机制求马氏体的长大速率	(87)
7.5 结论	(87)
附录	(88)
参考文献	(89)
导言译文	(90)
第 8 章 低碳钢中的残余奥氏体	(91)

8.1 残余奥氏体的重要性	(91)
8.2 条间奥氏体的形成	(92)
8.3 残余奥氏体量的表达式	(93)
8.4 淬火低碳钢的成分设计	(96)
参考文献	(97)
导言译文	(99)
第 9 章 材料热处理的进展和瞻望	(100)
9.1 热处理发展的历史	(100)
9.2 材料热处理发展的瞻望	(114)
参考文献	(123)
导言译文	(125)
第 10 章 自主创新发展超高强度钢	(126)
10.1 概述	(126)
10.2 超高强度钢发展简史	(128)
10.3 高强度钢的组织、成分和热处理设计原理	(130)
10.4 Q-P-T 工艺的应用及其功效	(130)
10.5 结论	(132)
参考文献	(132)
导言译文	(135)
第 11 章 钢的组织控制与设计	(136)
11.1 引言	(136)
11.2 H13 模具钢的组织控制	(136)
11.3 高强度钢的组织设计	(143)
11.4 结论	(157)
参考文献	(158)
导言译文	(162)
第 12 章 钢热处理的新工艺	(163)
12.1 概述	(163)
12.2 淬火-分配(Q-P)工艺概述	(164)
12.3 淬火-分配(Q-P)工艺的热力学和动力学介评	(170)
12.4 淬火-分配-回火(Q-P-T)工艺及其他工艺	(178)

12.5 结语	(178)
参考文献	(179)
导言译文	(183)
第 13 章 淬火-碳分配-回火(Q-P-T)工艺浅介	(184)
13.1 概述	(184)
13.2 Q-P-T 工艺的由来	(184)
13.3 高强度钢的组织、成分和热处理设计原则	(187)
13.4 Q-P-T 工艺的初步功效示例	(188)
13.5 Q-P-T 工艺的热力学和动力学	(193)
13.6 推行 Q-P-T 工艺待解决的问题及发展瞻望	(194)
13.7 小结	(194)
参考文献	(195)
导言译文	(199)
第 14 章 材料塑性成形与热处理一体化工程的理论基础	(200)
14.1 概述	(200)
14.2 应力对钢中铁素体和珠光体相变的影响	(201)
14.3 Scheil 相加性原则的讨论及修正	(202)
14.4 应力对贝氏体相变的影响	(203)
14.5 应力对马氏体相变的影响	(204)
14.6 相场理论及其应用	(207)
14.7 结论	(208)
参考文献	(208)
导言译文	(210)
第 15 章 将淬火-碳分配-回火(Q-P-T)及塑性成形一体化技术用于 TRIP 钢的创议	(211)
15.1 概述	(211)
15.2 一体化技术应用于 TRIP 钢的意义	(212)
15.3 建议	(214)
15.4 设想	(214)
参考文献	(215)
导言译文	(218)

第 16 章 相变研究的展望与发展“材料形态学”雏议	(219)
16.1 相变研究的展望	(219)
16.2 发展“材料形体学”雏议	(220)
参考文献	(223)
导言译文	(225)
第 17 章 条状马氏体形态对钢力学性质的影响	(226)
17.1 前言	(226)
17.2 马氏体领域尺寸及束宽对力学性质的影响	(228)
17.3 马氏体条宽对淬火钢力学性质的影响	(233)
参考文献	(235)
导言译文	(238)

第1章 高速钢的回火*

本文论述了高速钢回火时奥氏体的催化作用和稳定化现象的工作,以及根据研究结果所拟定的回火新工艺。奥氏体催化作用的效果以冷却过程中残余奥氏体转变为马氏体的温度 M' 来表示。催化作用的效果决定于回火的温度和时间。

先经高温保温又在较低温度(但在一定温度 T_c 以上)保温(分级回火),则催化作用不但具有迭加性,或和高温同样时间的效果相等,而且有时超过高温保温的效果。高温保温有时还能促进低温时的催化作用。经适当分级回火后(例如先经 560°C 保温又在 550°C 保温),残余奥氏体转变为马氏体的数量能和多次回火后相比拟,但所需总时间却能大为缩短。

M' 温度随钢内残余奥氏体量的增加而降低,并随奥氏体内含碳量变化而改变。

在 T_c 温度以下, M' 温度以上停留,奥氏体的稳定化作用(M' 值的降低)极为显著。稳定化的程度($\Delta M'$)因停留时间的增长而增加,一直达到一定的饱和值。最大稳定化的程度以及稳定化开始时的速度因保温温度的升高而减小。在 M' 温度以下保温,其最大的奥氏体稳定量因保温温度的升高而增加。回火时奥氏体的稳定化现象可能主要是由应力的减小所引起的,这个应力在冷却时有助于马氏体核胚的扩展。

催化作用可认为是稳定化的可逆过程,它应该包括下列过程:无序分布位错的重新排列, $\alpha-\gamma$ 相交界面位错圈的形成,以及空位和溶质原子所形成的气团的消除。

本文作者建议一种高速钢回火的新工艺——分级回火并加一次普通回火,例如先经 590°C 保温 25min,又在 550°C 保温 25min(分级回火)并加一次 560°C 回火 60min。高速钢经这种回火工艺处理后,其奥氏体的转变量、力学性质及切削性能均能和三次经典回火工艺相比拟,但回火的总时间能大为缩短。应用回火时奥氏体稳定化的原理,可以选择适当的回火工艺减少回火时工具的变形,这些工艺所需的时间较现有的工艺缩短很多。

* 原发表于《金属学报》1965, 8(4): 443-453.

1.1 概述

高速钢的回火过程主要包括碳化物自 α 基体中的弥散析出以及残余奥氏体的催化作用。经受催化作用的奥氏体在回火冷却时转变成为马氏体。本文论述作者及其合作者对高速钢中奥氏体的催化作用和经受催化作用奥氏体的稳定化现象的工作^[1-4],以及根据这些研究结果所拟定的回火新工艺^[5,6]。

本文所引述的一般规律不但适用于高速钢,对其他高碳高合金钢也可借鉴参考。

1.2 奥氏体的催化作用

钢内奥氏体在回火温度时催化作用的效果,以冷却过程中残余奥氏体转变成马氏体的温度 M' 来表示。业经指出,催化作用的效果决定于回火的温度和时间^[1,7],当钢内含有 10%~15% 残余奥氏体时,经 550~600℃ 回火 15~60min 时间内,其 M' 温度和回火时间呈直线关系,如图 1 所示^[1]。当回火时间超过 60min 时, M' 温度和回火时间的关系如图 2 所示^[2]。实验指出,无论 W18Cr4V 钢或 W9Cr4V2 钢经 500℃ 回火 3h,其 M' 温度在室温以下。

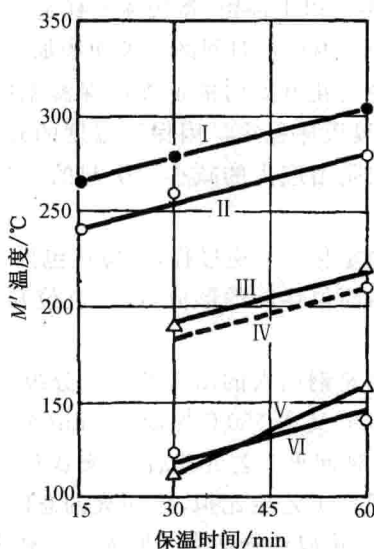
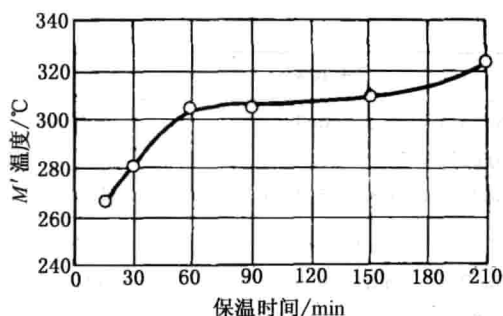


图 1 在 550℃~600℃ 回火, M' 温度和回火时间的关系

I—600℃, W9Cr4V2 钢; II—600℃, W18Cr4V 钢; III—560℃, W9Cr4V2 钢;
IV—560℃, W18Cr4V 钢; V—550℃, W9Cr4V2 钢; VI—550℃, W18Cr4V 钢

图 2 W9Cr4V2 钢在 600°C 回火 M' 温度和回火时间的关系

回火时先经高温保温又在较低温度(但在一定温度 T_c 以上)保温(分级回火),则催化作用的效果不但具有迭加性(表 1 中 3 和 4),或和高温保温同样时间的相等(表 1 中 1),而且在总时间同的情况下,有时超过高温保温的效果(表 1 中 2 和 5)。最有兴趣的情况是:当在低温(如 500°C)保温时即使长达 3h 也不显示催化效果($M' < 25^\circ\text{C}$),但先经高温(如 600°C)保温又在低温(500°C)保温时,则 M' 温度比只在高温保温时为高,显示了高温保温能促进低温时的催化作用(表 1 中 6)。

表 1 经不同回火规程所得的催化作用效果

序号	钢号	回火规程	$M'/^\circ\text{C}$	催化作用效果
1	W18Cr4V	600°C (30 min)	260	$= M'(600^\circ\text{C}, 60 \text{ min})$
		600°C (60 min)	280	
		分级回火:		
		600°C (30 min) $\rightarrow$ 550°C (30 min)	280	
2	W18Cr4V	560°C (60 min)	210	$> M'(560^\circ\text{C}, 90 \text{ min})$
		600°C (90 min)	215	
		550°C (30 min)	123	
		分级回火:		
3	W9Cr4V2	560°C (60 min) $\rightarrow$ 550°C (30 min)	220	迭加
		560°C (30 min)	190	
		560°C (60 min)	220	
		550°C (30 min)	112	
		分级回火:		
		560°C (30 min) $\rightarrow$ 550°C (30 min)	210	

(续表)

序号	钢号	回火规程	$M'/^{\circ}\text{C}$	催化作用效果
4	W9Cr4V2	500 $^{\circ}\text{C}$ (30~120 min) 分级回火: 560 $^{\circ}\text{C}$ (30 min) $\rightarrow$ 500 $^{\circ}\text{C}$ (30 min)	<25 190	迭加
5	W9Cr4V2	600 $^{\circ}\text{C}$ (30 min) 600 $^{\circ}\text{C}$ (60 min) 分级回火: 600 $^{\circ}\text{C}$ (30 min) $\rightarrow$ 550 $^{\circ}\text{C}$ (30 min)	280 304 314	$>M'(600^{\circ}\text{C}, 60 \text{ min})$
6	W9Cr4V2	分级回火: 600 $^{\circ}\text{C}$ (30 min) $\rightarrow$ 500 $^{\circ}\text{C}$ (30 min)	301	高温保温促使低温时的催化作用

但是,当先经高温保温又在低温保温过长时间后, M' 温度出现高峰后,在一段时间内保持不变,如图 3,4 所示。先经高温回火又经 T_c 温度以下的低温保温,则呈现奥氏体在回火时的稳定化现象(见下节)。

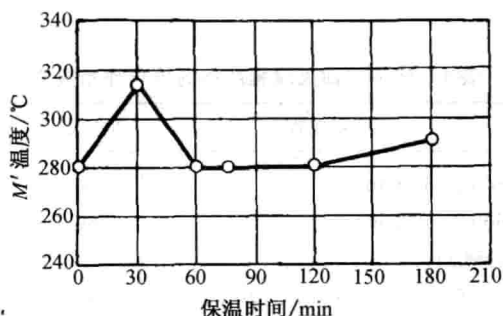


图 3 W9Cr4V2 钢先经 600 $^{\circ}\text{C}$ 保温 30min 又在 550 $^{\circ}\text{C}$ 保温不同时间的 M' 温度

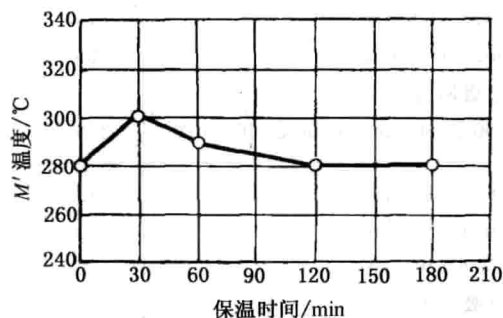


图 4 W9Cr4V2 钢先经 600 $^{\circ}\text{C}$ 保温 30min 又在 500 $^{\circ}\text{C}$ 保温不同时间的 M' 温度

磁性测量的数据显示^[8],适当分级回火后(例如先经 560℃ 保温又在 550℃ 保温),残余奥氏体转变为马氏体的数量可以和多次回火后相比拟,如图 5,6 所示。而处理周期所需的时间却能大为缩短。

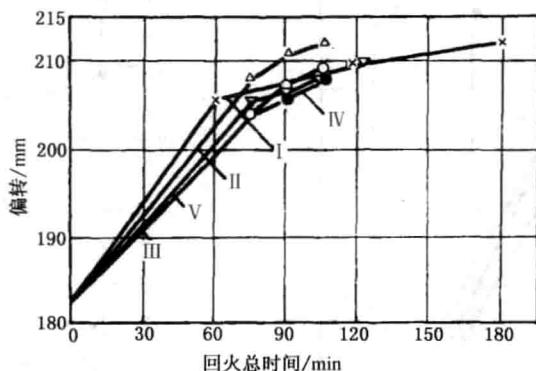


图 5 W18Cr4V 钢经多次回火、长时间回火及分级回火后的磁偏转值

I—560℃ 回火 60min,一、二、三次; II—560℃ 保温 60min,又在 550℃ 保温 15,30,45min;
 III—560℃ 保温 60min,又在 540℃ 保温 15,30,45min; IV—560℃ 保温 60min,又在 530℃ 保温
 15,30,45min; V—560℃ 保温 75,90,105,120min

最近的实验指出,高速钢在冷处理时残余奥氏体的转变^[9]以及在回火时的催化作用^[3]都受钢内残余奥氏体量的控制,图 7 表示残余奥氏体量与 M' 温度的关系。图 8 表示残余奥氏体量及奥氏体内含碳量对 M' 温度的影响。可见, M' 温度随残余奥氏体量的增加而降低;当残余奥氏体量较少时,因奥氏体内含碳量的增高而降低;当残余奥氏体量较多时,因奥氏体内含碳量的增高而升高。

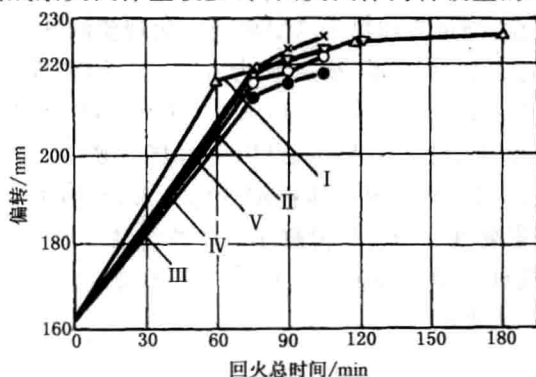


图 6 W9Cr4V2 钢经多次回火、长时间回火及分级回火后的磁偏转值

I—560℃ 回火 60min,一、二、三次; II—560℃ 保温 60min,又在 550℃ 保温 15,30,45min;
 III—560℃ 保温 60min,又在 540℃ 保温 15,30,45min; IV—560℃ 保温 60min,又在 530℃ 保温
 15,30,45min; V—560℃ 保温 75,90,105,120min

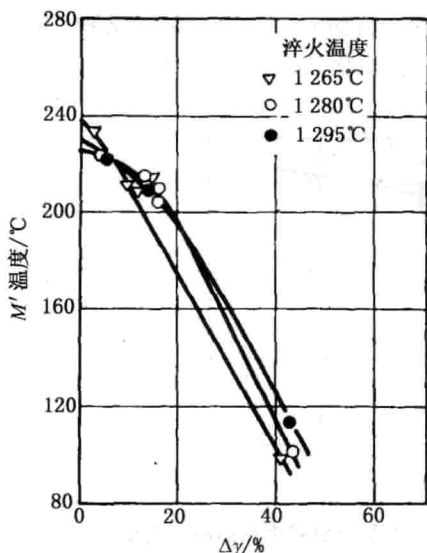


图7 相对残余奥氏体量 $\Delta\gamma$ 与 M' 温度的关系

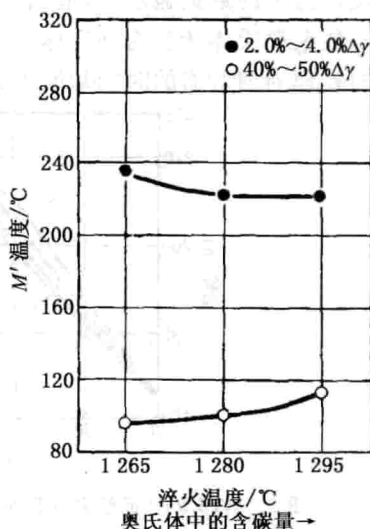


图8 相对残余奥氏体量与奥氏体内含碳量(不同淬火热温度)对 M' 温度的影响

1.3 奥氏体在回火时的稳定化现象

以往的工作中^[7,10,11]虽然已经发现回火时奥氏体转变为马氏体的稳定现象,但未引起应有的注意。陈梦谔^[21]指出,先经 560℃ 保温,再在 250℃ 保温,显示出奥氏体的稳定化,当重新加热至高温后稳定化现象能够消去,因此认为催化是稳定化的可逆过程。本文作者及其合作者^[1,3]的实验指出,在 M' 温度(W18Cr4V 钢经 560℃ 回火 1h 后 $M' = 189^\circ\text{C}$)以上停留,奥氏体的稳定化作用(M' 值的减低)极为显著,稳定化程度($\Delta M'$)_{max}如图 9 所示。图 10 为 M' 温度以上保温温度及保温时间与残余奥氏体稳定量的关系,在图中所示的时间内不发生残余奥氏体的恒温转变。根据恒温膨胀试验的结果^[5],W18Cr4V 钢在回火停留时,开始形成贝氏体的孕育期如表 2 所示。最大稳定化的程度因保温温度的升高而降低,可以下式表示:

$$\Delta M' = 20 \left(\frac{1}{T} \right)^{2/3}$$

从上式可见,稳定化的开始速度也因保温温度的升高而减小,如图 11 所示。这显然和直接淬火时奥氏体稳定化的情况不同。在 M' 温度以下保温,其最大的稳定量因保温温度的升高而增加,如图 12 所示。

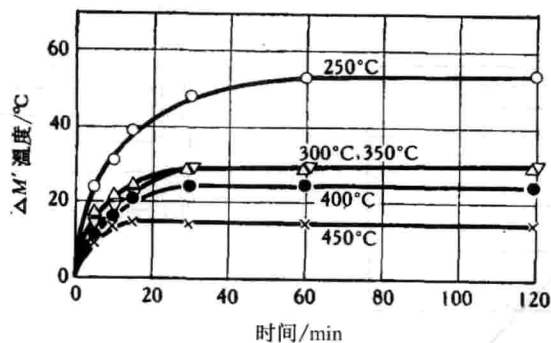


图 9 W18Cr4V 钢经 560°C 回火 1h, 又在 M' 温度的以上的不同温度保温对 M' 温度降低 ($\Delta M'$) 的影响

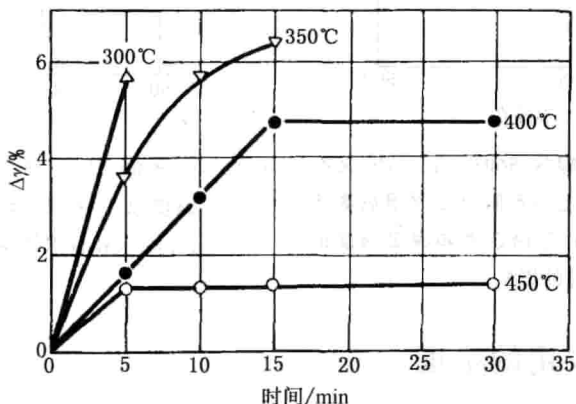


图 10 W18Cr4V 钢经 560°C 回火 1h, 又在 M' 温度的以上的不同温度保温对残余奥氏体稳定量 $\Delta\gamma$ 的影响

表 2 W18Cr4V 钢在回火停留时形成贝氏体的孕育期

保温温度/°C	450	400	350	300	250
残余奥氏体恒温转变的孕育期/min	>30	>30	25	10	5

稳定化的开始速度也因保温温度的升高而降低(见图 11), 因此经回火后奥氏体的稳定化现象可能主要由连续冷却应力的减小所引起的, 这些应力在冷却时有助于马氏体核胚的扩张。在 M' 以上, 保温温度愈高, 应力减少得愈小, 因此稳定化的程度愈小。在 M' 温度附近, 在经催化的奥氏体内, 马氏体的有效胚已大量形成, 因此在 M' 温度附近保温, 其稳定化的效果最为显著。

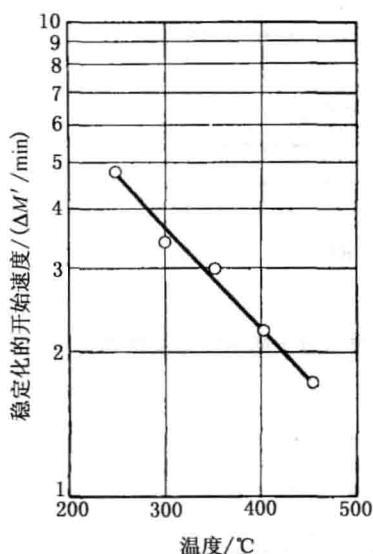


图 11 W18Cr4V 钢经 560℃ 回火 1h, 又在 M' 温度以上的不同温度保温后奥氏体稳定化的开始速度和保温温度的关系 ($\Delta M'$) 的影响

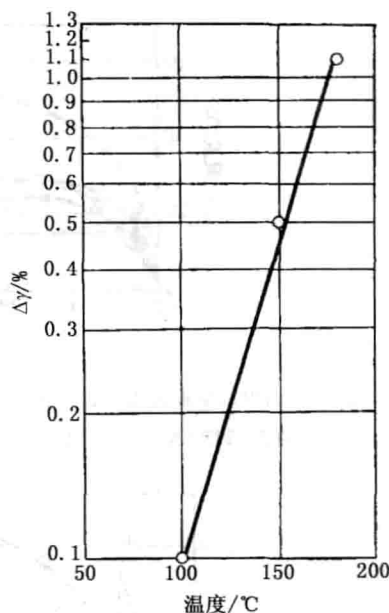


图 12 W18Cr4V 钢经 560℃ 回火 1h, 又在 M' 温度以下保温, 其最大稳定化程度 ($\Delta \gamma$)_{max} 和保温温度的关系

1.4 催化作用的机理

奥氏体催化作用的机理迄未获得定论。多数的作者认为催化作用是由于在回火时奥氏体内析出碳化物使相变温度升高^[7,13-15], 其他的理论如: 相变硬化和碳化物析出^[16-19], 不均匀应力的形成^[11,20], 碳自应变中心离开^[21] 以及碳自位错处挥发, 使之成为马氏体的有效胚(稳定化的可逆过程)^[12]。但这些理论都不能解释上述(见表 1, 图 3~图 8)现象。

只有当回火温度很高(600℃ 以上)或保温时间很长(600℃ 保温 3h 以上, 如图 2 所示), 奥氏体内析出碳化物才是可能的^[2,19,22], 实验并未证实在一般回火过程中在奥氏体中析出碳化物^[23]。有些实验中测得高速钢回火时奥氏体点阵常数减小, 但这和催化作用的效应并不对应^[17,24,25], 奥氏体点阵常数的减小只能使马氏体转变点提高 30~50℃^[24,26], 这就不能解释实验所得的结果——超过 100℃。持碳化物析出理论的作者, 如 Cohen, 后来也认为析出数量不足使 M' 温度提高得如此之高^[27]。