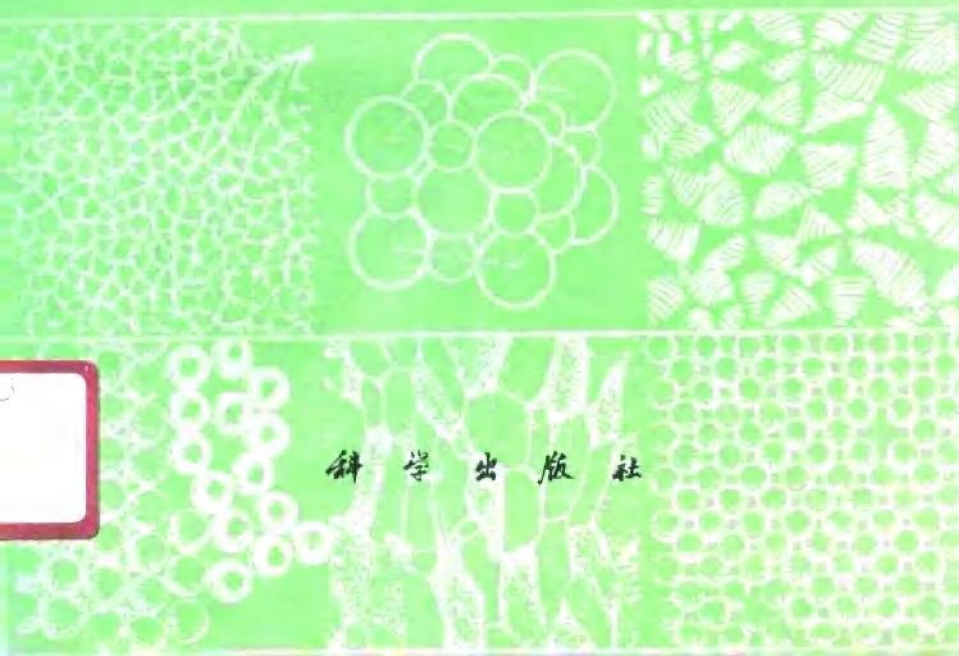


材料科学及测试技术丛书



# 贝氏体相变与贝氏体

徐祖耀 刘世楷 著



科学出版社

材料科学及测试技术丛书

# 贝氏体相变与贝氏体

徐祖耀 刘世楷 著

科学出版社

1991

北京图书馆藏

B770454

## 内 容 简 介

本书系统地论述了贝氏体相变的基本原理、现代进展及应用前景。全书共七章,前三章描述了贝氏体相变的一般特征,介绍了钢中和有色合金中贝氏体的组织、形态、性能及应用;后四章阐述了贝氏体相变的热力学、动力学、晶体学及相变机制。

本书可供从事材料科学、固体物理学等方面研究的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

材料科学及测试技术丛书

### 贝氏体相变与贝氏体

徐祖耀 刘世楷 著

责任编辑 杨家福 何舒民

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1991年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/32  
1991年6月第一次印刷 印张: 9 7/8  
印数: 0 001—1 300 字数: 221 000

ISBN 7-03-002235-1/TG·7

定价: 10.10元

# 材料科学及测试技术丛书

## 编辑委员会

**主 编:** 严东生

**副 主 编:** 柯 俊 颜鸣皋

**编辑委员:** 冯 端 刘嘉禾 孙珍宝 师昌绪  
许顺生 肖纪美 沈华生 李恒德  
吴人洁 范 棠 柯 成 徐祖耀  
钱人元 殷之文 郭可信 郭慕孙  
章守华 葛庭燧 程继健

## 材料科学及测试技术丛书

### 出版说明

材料科学是现代科学技术的基础,是属于全局性的重要科学技术领域。由于许多材料的局限性会影响国民经济和国防现代化的进程,因此,为了提高我国材料科研工作的理论水平和材料生产的技术水平,为各个部门提供充足和优质的材料,我们出版了这套材料科学及测试技术丛书。本丛书分为材料科学与测试技术两部分,材料科学部分主要介绍金属、非金属及其他新型材料的研究成果、原理与理论;测试技术部分主要介绍上述材料的微观组织与结构及其观测技术,也介绍有关性能测试和过程机理。我们力求本丛书能反映我国材料科学研究工作者和材料工程技术人员的实践经验与成就,以及他们在发展材料科学与技术方面的见解,同时也反映国外的最新经验和成果。读者对象为从事材料科学的科研工作者和从事材料测试的工程技术人员以及高等院校的有关专业师生。

我们不仅期望本丛书能对我国的材料科学与技术的发展起到一定的推动作用,并且希望它对材料科学与技术领域内的科技工作者有所启发,从而进一步写出反映我国科学技术水平和发展方向的专著,以满足广大读者的需要。

材料科学及测试技术  
丛书编辑委员会

• iii •

## 前 言

本书作为《马氏体相变与马氏体》(科学出版社,1980年第一次印刷,1981年第二次印刷)的姊妹篇,从写作的酝酿至完稿,达八年之久.1987年国际贝氏体委员会(Morris Cohen教授任主席,徐祖耀在委员之列)成立,同年我国召开了首次贝氏体相变讨论会,1988年在美国召开了首次国际贝氏体会议,这些充分说明贝氏体相变及贝氏体已引起国际及国内学术界和工程界的高度重视.贝氏体相变及贝氏体的组织和性能本身相当复杂,目前对贝氏体相变的基体特征和贝氏体的定义尚存在很大分歧.在国内,研究、开发和应用贝氏体的高潮正在兴起,因此出版一本贝氏体相变与贝氏体的专著很有必要.但撰写此书的任务却分外艰巨,恰似“谁知盘中餐,粒粒皆辛苦”.

本书第一、二、三、四章由徐祖耀执笔,第五、六章由刘世楷执笔,第七章由徐祖耀和刘世楷合写,全书由徐祖耀作文字的润饰和体例的统一.作者在写作中,力求总结以往研究的重要成果,并尽可能阐明今后的研究趋向,这或许对科技知识的传播会产生有益的影响.作者在笔耕中还自然地流露(有时是很鲜明地表明)自己的学术观点,由此而引起的学术讨论,只要持之以理,论有所据,必将对相变学科的发展以及贝氏体的开发应用起推动作用.这都是作者所冀望的.

本书书稿几经修改,有的章节甚至数易其稿,但难免仍有谬误和疏漏之处,谨希读者指正.

徐祖耀

• v •

# 目 录

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第一章 贝氏体相变综述 .....                                                                                                         | 1   |
| 1-1 概述 .....                                                                                                              | 1   |
| 1-2 贝氏体相变的一般特征 .....                                                                                                      | 8   |
| 1-3 对贝氏体定义及贝氏体相变特征的基本分歧 .....                                                                                             | 20  |
| 参考文献 .....                                                                                                                | 28  |
| 第二章 钢中贝氏体的形态、性质及应用 .....                                                                                                  | 32  |
| 2-1 概述 .....                                                                                                              | 32  |
| 2-2 贝氏体的组织形态 .....                                                                                                        | 33  |
| 2-3 贝氏体的力学性质 .....                                                                                                        | 56  |
| 2-4 贝氏体的应用 .....                                                                                                          | 86  |
| 参考文献 .....                                                                                                                | 91  |
| 第三章 有色合金中的贝氏体 .....                                                                                                       | 94  |
| 3-1 概述 .....                                                                                                              | 94  |
| 3-2 Cu-Zn 及 Cu-Zn-X(X = Au, Ag)合金中的贝氏体 .....                                                                              | 95  |
| 3-3 Cu-Zn-Al 合金中的贝氏体 .....                                                                                                | 112 |
| 3-4 Ag-Cd 合金中的贝氏体 .....                                                                                                   | 115 |
| 3-5 Ag-Zn 合金中的贝氏体 .....                                                                                                   | 121 |
| 3-6 U-Cr 合金中的贝氏体 .....                                                                                                    | 123 |
| 3-7 Cu-Al 和 Cu-Sn 合金中的贝氏体 .....                                                                                           | 124 |
| 参考文献 .....                                                                                                                | 127 |
| 第四章 贝氏体相变热力学 .....                                                                                                        | 130 |
| 4-1 概述 .....                                                                                                              | 130 |
| 4-2 Fe-C 合金中碳和铁的活度 .....                                                                                                  | 131 |
| 4-3 Fe-C 相图上 $\gamma/(\gamma+\alpha)$ , $\alpha/(\alpha+\gamma)$ 和 $\gamma/(\gamma + \text{Fe}_3\text{C})$<br>的相界浓度 ..... | 134 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4-4 Fe-C 合金中 C-C 交互作用能.....    | 139        |
| 4-5 Fe-C 合金相变驱动力计算 .....       | 151        |
| 4-6 Fe-C 合金中新相形核(长大)驱动力 .....  | 161        |
| 4-7 相变驱动力和 Fe-C 合金贝氏体相变机制..... | 168        |
| 4-8 合金钢贝氏体相变热力学 .....          | 171        |
| 4-9 Cu-Zn 合金贝氏体相变热力学.....      | 174        |
| 参考文献 .....                     | 177        |
| <b>第五章 贝氏体相变动力学</b> .....      | <b>179</b> |
| 5-1 概述 .....                   | 179        |
| 5-2 长大动力学 .....                | 182        |
| 5-3 $B_s$ 温度与不完全转变现象.....      | 192        |
| 5-4 合金元素对动力学的影响 .....          | 204        |
| 5-5 奥氏体化温度对动力学的影响 .....        | 232        |
| 参考文献 .....                     | 234        |
| <b>第六章 贝氏体相变晶体学</b> .....      | <b>237</b> |
| 6-1 概述 .....                   | 237        |
| 6-2 贝氏体铁素体的取向关系与惯习面 .....      | 239        |
| 6-3 贝氏体铁素体与渗碳体间的取向关系 .....     | 252        |
| 6-4 贝氏体铁素体的界面结构 .....          | 258        |
| 参考文献 .....                     | 273        |
| <b>第七章 贝氏体相变机制</b> .....       | <b>275</b> |
| 7-1 概述 .....                   | 275        |
| 7-2 贝氏体相变孕育期内的预相变 .....        | 277        |
| 7-3 切变学说 .....                 | 289        |
| 7-4 扩散机制 .....                 | 295        |
| 参考文献 .....                     | 302        |

# 第一章 贝氏体相变综述

## 1-1 概 述

Robertson<sup>[1]</sup> 以及 Davenport 和 Bain<sup>[2]</sup> 首先发现钢在中温相变的产物具有独特的组织形态,当时称为针状屈氏体。Bain 及其合作者于 1939 年,在美国联邦钢铁公司的 Kearny 实验室第一次正式印成放大一千倍的贝氏体显微照片(后陈列在 Bain 实验室)。Bain 初次摄得的钢中贝氏体组织如图 1-1 所示。在多年以后(40 年代下叶至 50 年代初),为了纪念 Bain 的功绩,才将奥氏体在珠光体温度以下、马氏体形成温度以上、经等温或连续冷却分解所形成的组织命名为贝氏体,以代替旧名屈氏体<sup>[3]</sup>。以后 Mehl 将钢中贝氏体分为羽毛状的上贝氏体和片状的下贝氏体<sup>[4]</sup>,普遍沿用至今。

在碳钢的  $TTT$  图( $C$  曲线)上,贝氏体相变的  $C$  曲线和

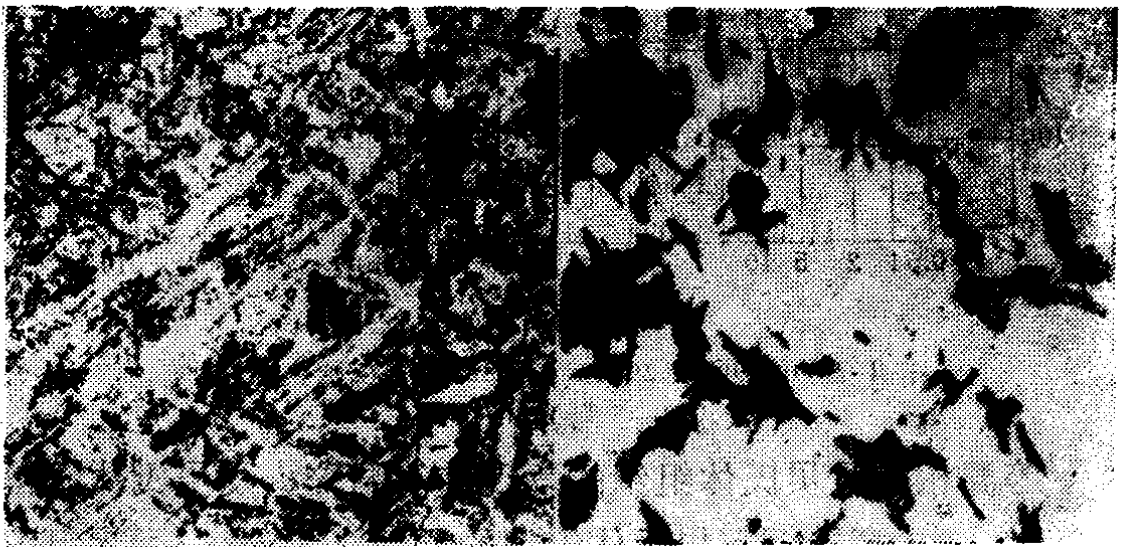


图 1-1 Bain 初次摄得的钢中贝氏体组织( $\times 500$ ,  
左图为全部贝氏体,右图为部分贝氏体)

珠光体重叠,如图 1-2 所示的 T 10 钢的  $TTT$  图<sup>[5]</sup>.在合金钢的  $TTT$  图上,贝氏体相变有单独的  $C$  曲线,如 0.33C-1.05Cr-1.07Mo-0.84Mn-0.26V 钢的  $TTT$  图,见图 1-3<sup>[6]</sup>.在图 1-2 中人们找不到明确的贝氏体相变开始温度  $B_s$ ,而图 1-3 却具有明显的  $B_s$  温度(接近 500℃的水平线温度),并显示出大致的贝氏体相变终了温度  $B_f$ (约 380℃).有的钢,如高碳钢、高速钢和热模具钢,其贝氏体相变可以延伸至  $M_s$  温度以下,即在马氏体形成温度等温也发生贝氏体相变,这些分别如图 1-4<sup>[7]</sup>, 1-5<sup>[8]</sup>和 1-6<sup>[9]</sup> 所示.

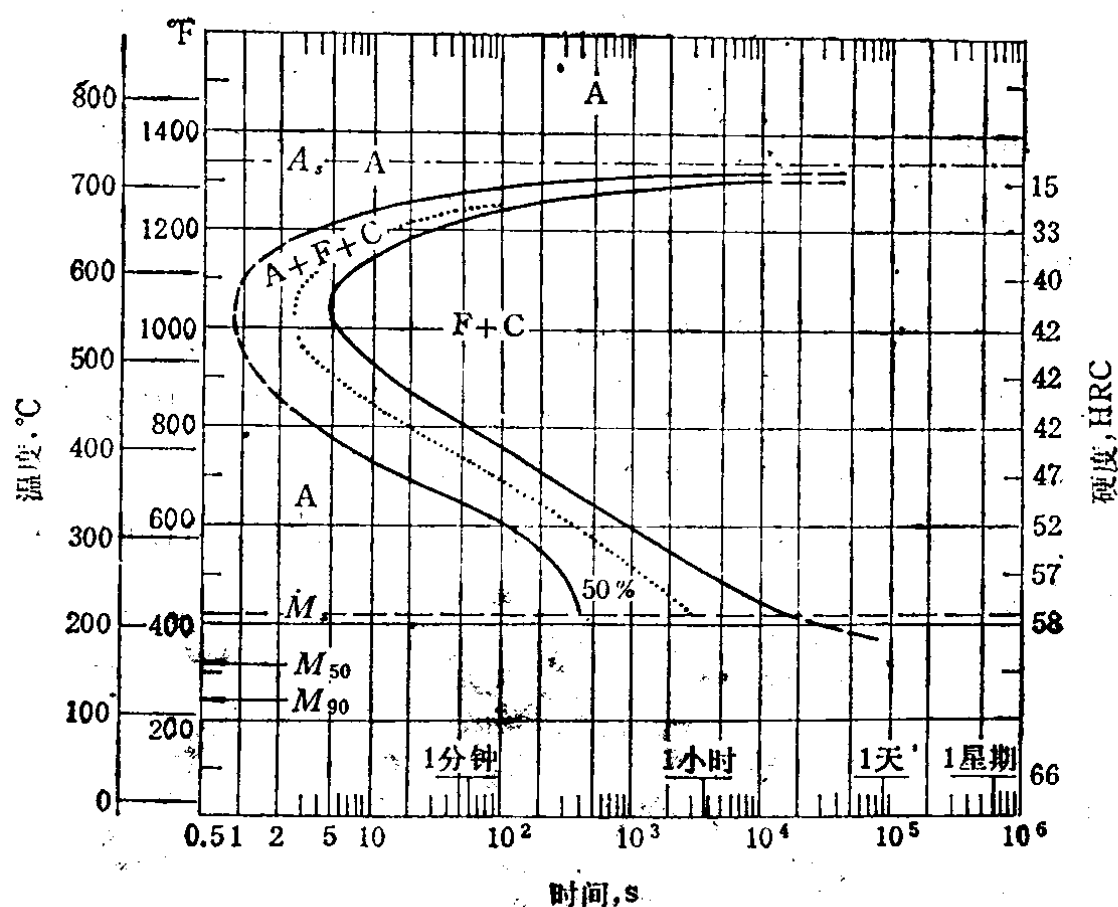


图 1-2 0.89C-0.29Mn 钢 (885℃奥氏体化,晶粒大小 4—5 号)的  $TTT$  图

等温相变及贝氏体组织的发现使等温淬火及贝氏体钢得以问世.中、高碳钢下贝氏体组织的韧性高于淬火-回火组织的,因此应该用等温淬火代替淬火-回火来得到较高冲击韧性

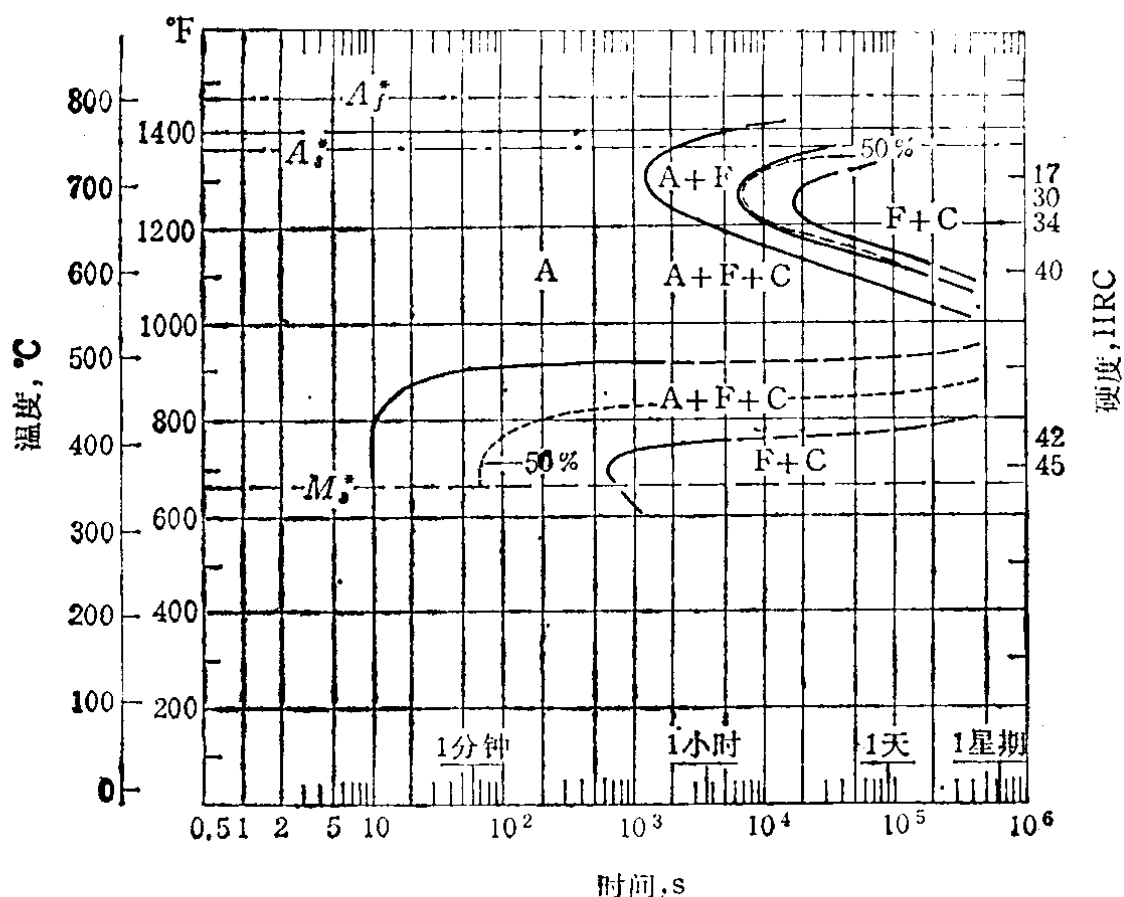


图 1-3 0.33C-1.05Cr-1.07Mo-0.84Mn-0.26V 钢 (1010℃奥氏体化,晶粒大小 7 号)的 TTT 图

的工具钢.像高碳 Cr-W-Mn 钢工件,经 830℃加热,在 240℃ (此钢的  $M_s \approx 216^\circ\text{C}$ ) 等温 8h 后,其硬度为 54.5HRC,冲击韧性约  $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$  (含 8.55% 残余奥氏体);而经 830℃淬火及 320℃回火 1h 后,其硬度为 54HRC,冲击韧性仅  $220\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 60Si2Mn 弹簧钢经 850℃油淬及 430℃回火后,工件的屈服强度为  $1800\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,冲击韧性仅  $26.5\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;而经 850℃加热、在 270℃等温 20min,工件的屈服强度为  $1800\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,冲击韧性达  $70.6\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ .具有回火脆性的中碳钢,如 30CrMnSi,采用等温淬火,显示出贝氏体组织的一定强度和较好韧性.中碳贝氏体在静载荷或交变载荷下,与淬火加中温回火或调质处理相比,均有较低的缺口敏感性,在冲击载荷下有较低的裂纹萌生或扩展的敏感性<sup>[10]</sup>.合金球墨铸铁经

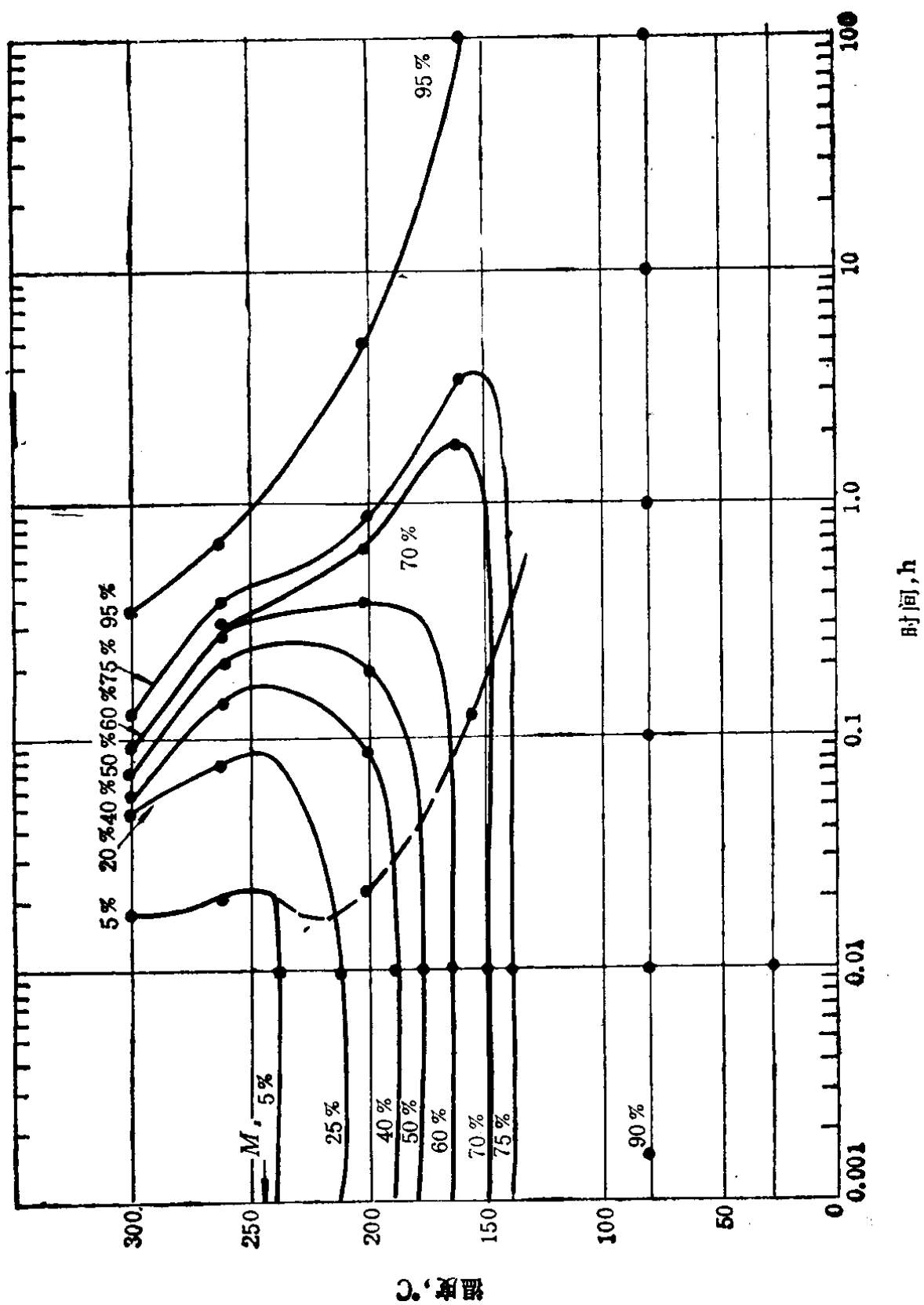


图 1-4 0.75C 钢的 TTT 图

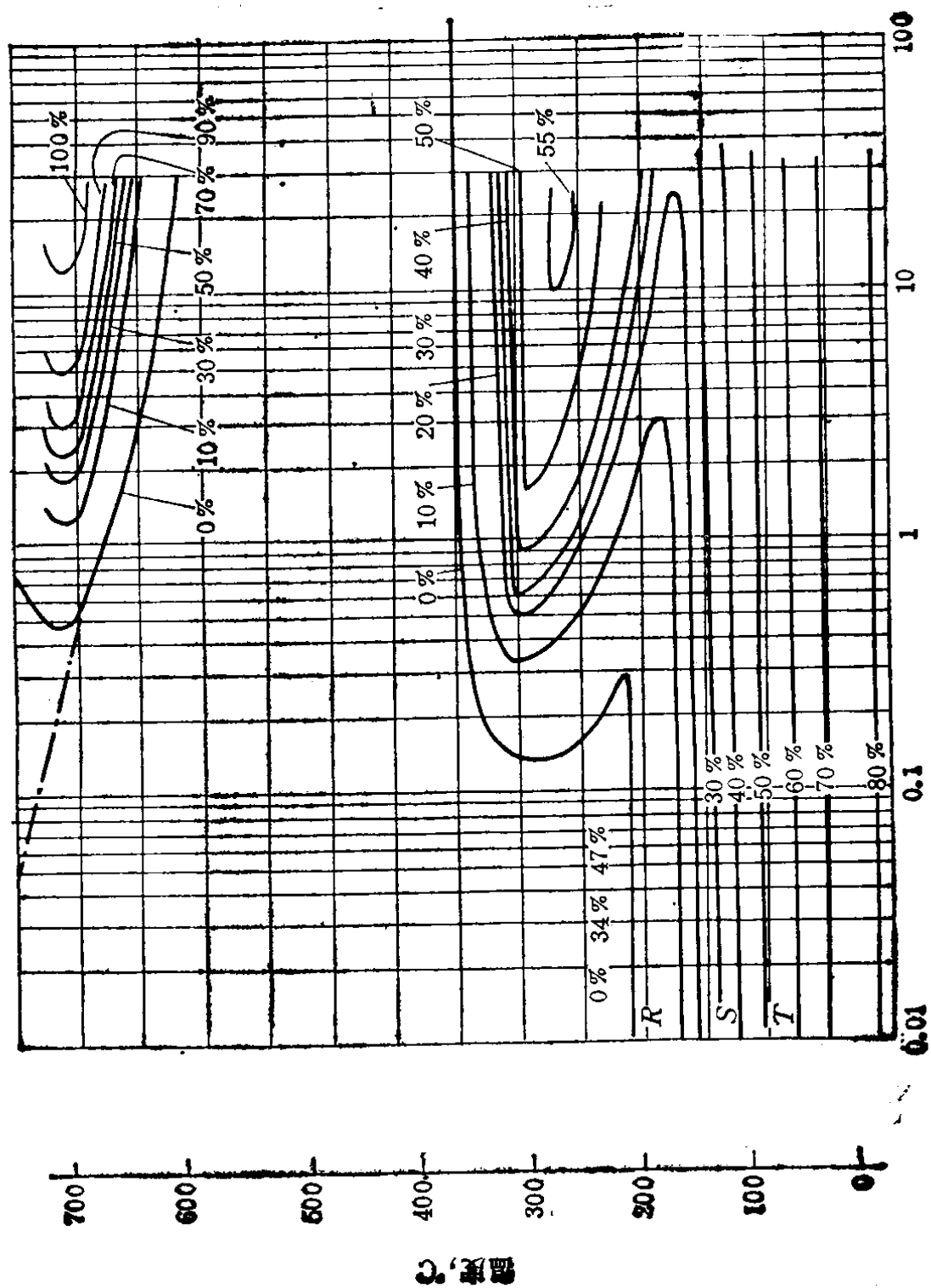


图 1-5 6-5-4-2 高速钢的 TTT 图

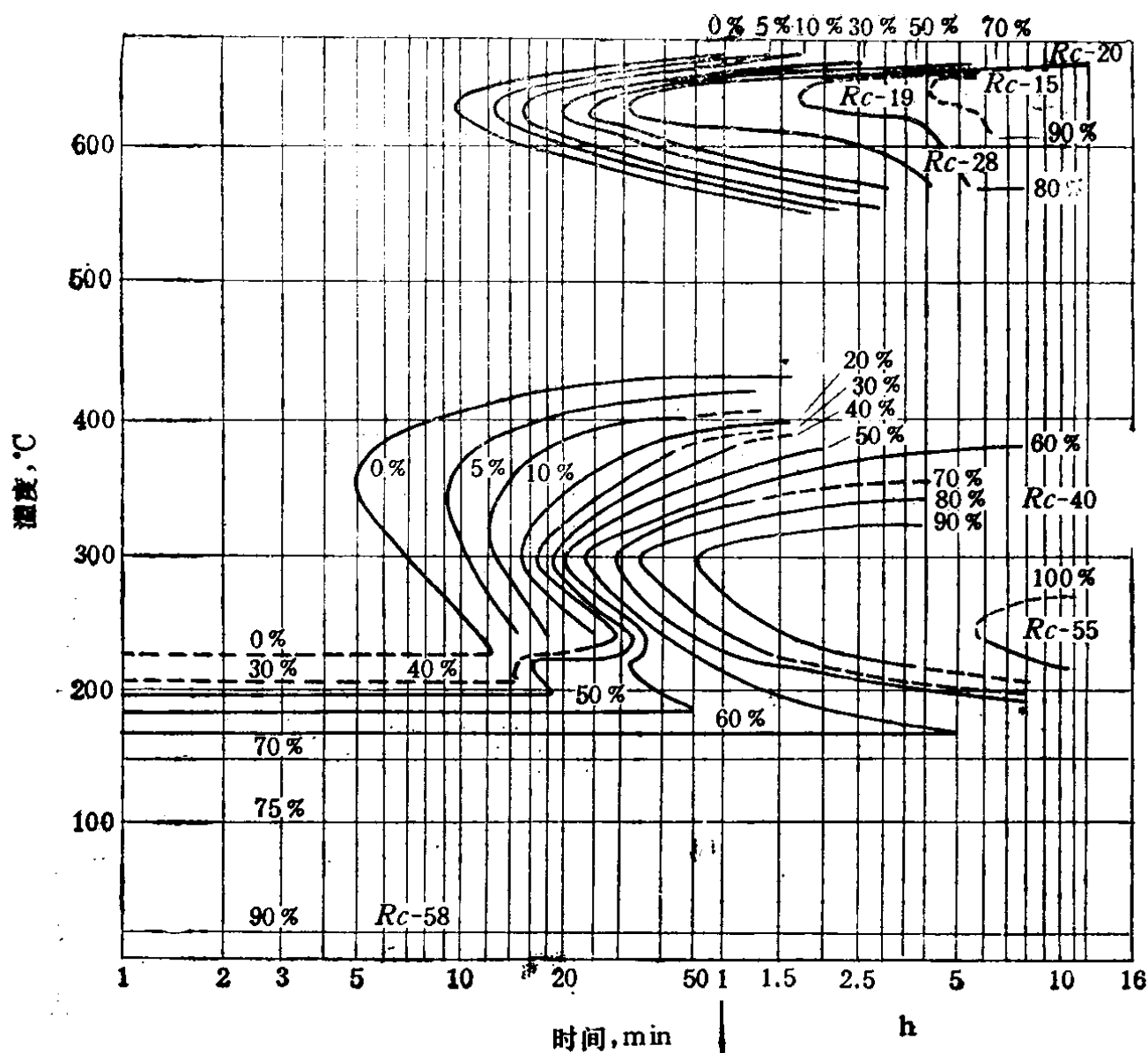


图 1-6 0.5C-3Ni-1.9Cr 热模具钢 (850℃奥氏体化, 晶粒大小 8 号) 的 TTT 图

等温淬火、得贝氏体组织后,其疲劳强度和冲击韧性均较正火或调质的优越,它已应用于拖拉机曲轴及凸轮轴,也可望用于内燃机车的曲轴。

一些高碳钢、工模具钢,在  $M_s$  温度以下等温也形成贝氏体,如图 1-4,1-5 和 1-6 所示.因此将这些钢的工件先淬火至  $M_s$  温度以下,再进行等温,使先形成一部分马氏体,再获得一部分下贝氏体.这种组织较完全等温淬火的具有更高的强度,

且具有一定的韧性,这种热处理工艺将日益得到推广和发展. 工件经贝氏体等温淬火,可以减少变形、减免产生裂纹或断裂,因此这种工艺受到热处理工作者的青睐. 贝氏体等温淬火的缺点是等温时间往往很长,转变难以完成. 如参照图 1-5,高速钢经  $300^{\circ}\text{C}$  等温 10h,贝氏体的转变量仅 50%,并不得不增加回火次数(4 次或以上)以减低残余奥氏体量. 经完全等温淬火的工件的强度较低,也是贝氏体等温淬火的又一缺点. 先将工件淬火至  $M_s$  温度以下的较高温度,以得到少量的马氏体,再上淬至下贝氏体形成温度进行等温处理,或在应力下进行等温淬火,均能加速贝氏体相变. 在  $M_s$  温度以下具有贝氏体相变的钢件,经  $M_s$  以下等温能得到强度较高、韧性兼具,且疲劳性能较佳的效果. 将结构钢工件先进行等温淬火,得到一部分贝氏体后,再行淬火,得到贝氏体和马氏体混合组织的热处理,不但能减小变形,而且在提高强度和韧性上都有裨益<sup>[11]</sup>. 钢件经热处理后的组织形态直接关系到工件的性质,因此控制贝氏体组织对热处理工作者是十分必要的.

40年代末,低碳硼钼钢 ( $0.12\text{C}-0.5\text{Mo}-0.002\text{B}$  钢)经轧后空冷,不经热处理就具有贝氏体组织. 这种贝氏体具有一定的强度 ( $600\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$ )、良好的韧性和可焊性<sup>[12]</sup>,它的出现开辟了新钢种研制的道路. 我国也发展了含富产元素 ( $\text{Mn}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{B}$  及稀土元素)的低合金高强度贝氏体钢,如  $14\text{MnMoVBRe}$  及  $14\text{CrMnMoVB}$  等压力容器钢,作为探矿、石油钻井及抗氢腐蚀用的  $\text{Mn}-\text{Mo}-\text{V}$ ,  $\text{Mn}-\text{Mo}-\text{Nb}$  或  $\text{Mn}-\text{Mo}-\text{V}-\text{Nb}$  等系列贝氏体钢. 清华大学近年研制的低、中碳  $\text{Mn}-\text{B}$  贝氏体钢具有多种用途.

在低碳、低合金高强度贝氏体钢中,经常出现粒状贝氏体,这引起生产部门的极大关注<sup>[13]</sup>. 如锅炉钢  $15\text{CrMo}$  及  $12\text{Cr/MoV}$  中粒状贝氏体的存在,使钢的常温强度提高,但

使冲击韧性显著降低,而在 12Cr/MoV 钢中的粒状贝氏体组织使高温持久强度明显降低,但经适当控制,粒状贝氏体对钢的韧性有利.这种差别的原因在于成分不同或经不同热处理,钢中的粒状贝氏体内的组织不同.

近年来,国外研制出很低碳(0.06%C)及超低碳(0.02%C)、微合金化控制轧制贝氏体钢,这种钢具有很高的强度(如屈服强度达  $520\text{--}630\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$ ),很好的冲击韧性(如  $-20^{\circ}\text{C}$  冲击能量在  $130\text{--}200\text{J}$ ,脆性转折温度低于  $-80^{\circ}\text{C}$ ),适于制造中厚板钢.我国也应开发利用这种钢<sup>[14]</sup>.

贝氏体的推广应用需要了解贝氏体的组织形态和性能的关系、贝氏体相变动力学及机制等,因此半个世纪来对贝氏体相变的研究经久不衰.50 年代开始,除对钢中贝氏体相变进行了大量的工作外,也对有色合金中贝氏体的形成作过一些探讨,这些工作有助于揭示贝氏体相变的本质.

目前对贝氏体相变的一般特征有了表象的认识,但对贝氏体的定义以及对贝氏体相变的本质尚没有一致的结论<sup>[15,16]</sup>,不同作者按自己所得实验结果,按自己的成见,提出了不同的看法,论争在持续中.

## 1-2 贝氏体相变的一般特征

钢和有色合金中形成贝氏体时都出现表面浮突.在 Fe-8Cr-1C 中,小片的下贝氏体形成时出现的表面浮突,类似马氏体的具不变平面特征,但贝氏体长得较厚时,表面浮突不平直,干涉图像弯曲(由于碳化物的析出)<sup>[17]</sup>.在一些有色合金中,如 Cu-Zn,由于贝氏体片长大时原子有长距离的扩散,浮突面起皱,不变平面应变的迹象消失<sup>[18]</sup>.贝氏体相变与马氏体相变在晶体学上有相似之处,钢中及 Cu-Zn 等合金中贝氏体

相变的晶体学参数也可由马氏体相变晶体学的表象理论给以导出<sup>[17,18]</sup>。但是,在贝氏体相变中存在明显的原子扩散,应用较新的实验技术,在  $\text{Cu-Zn}$ <sup>[19]</sup> 和  $\text{Cu-Zn-Al}$ <sup>[20]</sup> 合金中,在贝氏体形成初期就可测出其成分和基体的不同。贝氏体相变速率远低于马氏体相变速率,在钢中两者相差达一个数量级<sup>[21]</sup>。贝氏体相变的特征比马氏体更为复杂,目前还难以清晰地阐述。

贝氏体相变开始温度,虽然也以一定温度  $B_s$  表示,但它的含义远没有  $M_s$  明确。 $B_s$  温度有称动力学  $B_s$  的,如在图 1-3, 1-5 和 1-6 所示的  $TTT$  图上,贝氏体有自己的  $C$  曲线,且贝氏体的最高形成温度随时间的变化呈水平线,这水平线温度就称为动力学  $B_s$  温度。还有称组织  $B_s$  温度的,此温度就是开始出现贝氏体组织的温度。以物理测试技术测得的贝氏体开始发生相变的温度和金相检视出开始形成贝氏体的温度有时并不一致。图 1-7 表示由膨胀仪测出的 4340 钢(0.4C-Ni-Cr-Mo 钢)的  $B_s$  和  $B_f$ (贝氏体相变基本完成)温度<sup>[22]</sup>,  $B_s$  温

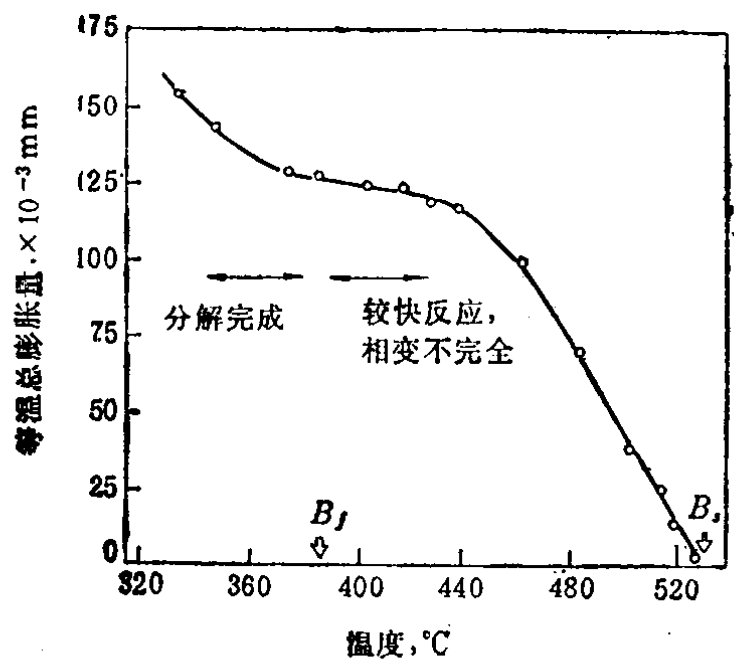


图 1-7 膨胀法测得的 4340 钢(0.4C-Ni-Cr-Mo 钢)的相变温度曲线