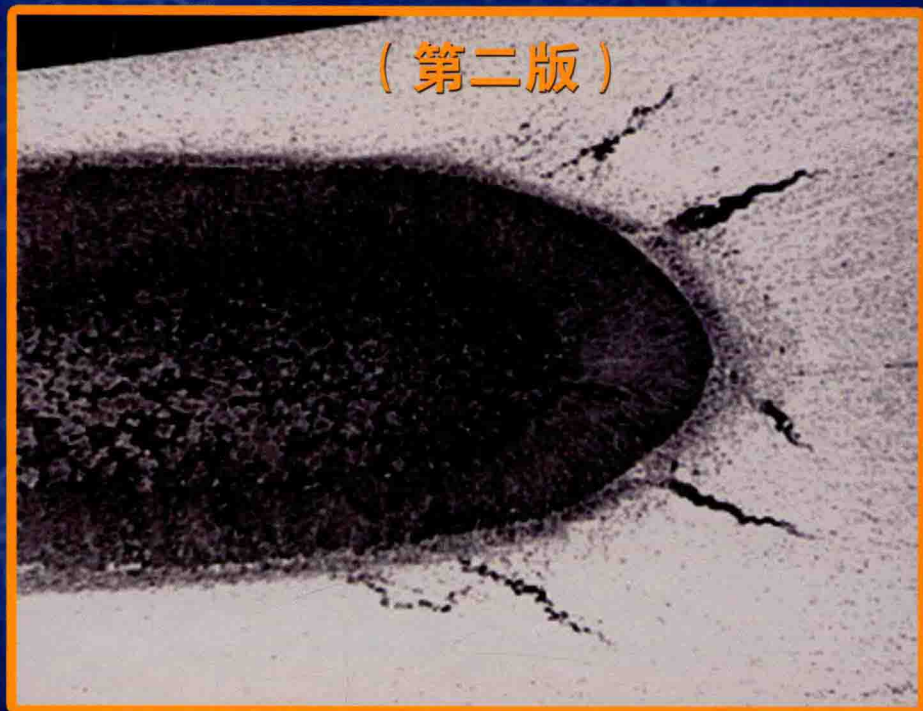


( 第二版 )



# 电阻焊：基础与应用

RESISTANCE WELDING

Fundamentals and  
Applications

张洪延 著



科学出版社

# 电阻焊：基础与应用

(第二版)

张洪延 著

科学出版社

北京

图字：01-2016-8740

Resistance Welding: Fundamentals and Applications/Hongyan Zhang and Jacek Senkara. —2<sup>nd</sup> ed  
Copyright © 2012 by Taylor & Francis Group, an Informa business.  
All rights reserved.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, an imprint of Taylor & Francis Group LLC.

本书封面贴有 Taylor & Francis 集团防伪标签，未贴防伪标签属未获授权的违法行为。

图书在版编目 (CIP) 数据

电阻焊：基础与应用/张洪延著. —2 版. —北京：科学出版社，2016.10  
书名原文：Resistance Welding: Fundamentals and Applications/Hongyan  
Zhang and Jacek Senkara—2nd ed.

ISBN 978-7-03-050233-9

I. ①电… II. ①张… III. ①电阻焊 IV. ①TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253270 号

责任编辑：王艳丽 / 责任校对：贾娜娜

责任印制：谭宏宇 / 封面设计：殷 靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 2 月第 二 版 开本：787×1092 1/16

2017 年 2 月第一次印刷 印张：23 1/2 插页：7

字数：540 000

定价：150.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

# 前 言

电阻焊是一种古老,但至今仍然占据重要地位的材料连接技术。由于它发生在板材内部,无法直接观察,而且焊接过程中焊核的温度很高,升、降温速度极快,平衡态理论只能起一定程度上的指导作用。这使得电阻焊的研究大多是实验性质的,而且通常是针对生产中特定的实际问题进行的。电阻焊过程的复杂性也导致了这方面的研究缺乏系统性。本书著者暨英文专著原作者之一,在参与解决大量的工业实际问题的过程中,特别关注了焊接过程的机理、焊接质量和测试,以及实验结果的分析,对电阻焊进行了系统的研究。在长期的教学和科研实践中,著者深切地体会到电阻焊行业缺乏一部能够提供全面、系统知识的专著。之前的关于电阻焊的著作常以手册的形式出现。它们通常只告诉读者怎么做,而不解释为什么要那么做。如果读者想获得更多的了解,就必须查阅大量的相关文献,既费时又费力。当然这是有其专业原因的。电阻焊过程涉及电气、冶金、热学及力学等诸多方面,很难从单一专业的角度获得对焊接过程的全面了解。更重要的是这些过程之间不是相互独立的,而忽视它们之间的相互作用可能导致完全错误的结论。因此,著者决定根据自己多年来在电阻焊领域的研究体会、与众多合作者的交流及共同的研究成果,以及公开发表的文献编写一部能够全面、系统地介绍电阻焊的基本原理及应用的著作,作为对自己在这方面工作的一个总结,并为从业者提供一个便捷、可靠且可以借以拓展的工具。英文版的第一版、第二版的出版及同行的关注和鼓励证明了这个目的已经达到了。值得一提的是,虽然本书是关于电阻焊的,但其采用的研究方法,如处理类似电阻焊这种复杂工程问题的角度,以及统计分析方法的步骤等有一定的普遍意义,可以应用到其他领域的研究中。

本书共分 10 章。第 1 章,焊接冶金。主要描述电阻焊涉及的金属材料的冶金特性,包括钢、铝、镁和铜及它们的熔化/凝固和固体相变过程。着重分析它们与焊接过程、焊点结构及焊接质量的关系。这一章对理解其他章节中的各种过程和现象提供了必要的知识储备。第 2 章,焊接中的电、热过程。电阻焊实际上就是一个加热-冷却过程。各种焊接参数对焊接过程的影响体现在它们在焦耳加热过程和冷却中所起的作用。从焊件各部分的电阻入手,对电阻焊中电流特性和热量的产生进行全面的介绍,并以此为基础,对钢、铝材焊接的电极寿命进行详细的探讨,并介绍各种基于电-热考虑的焊接过程的控制方法。第 3 章,焊点缺陷。电阻焊实践中一个相当重要的目的是控制焊件中各种缺陷的产生。这一章详细地介绍电阻点焊中可能出现的各种(肉眼可见的和内部的)缺陷、它们的形成机理,以及抑制它们产生的方法。着重分析铝合金焊接中常见但经常忽视的一种在热影响区内出现的裂纹的生成机理,并描述减少以至于消除这种裂纹的办法及实验验证。第 4 章,力学试验。电阻点焊的特点决定其质量检测在很大程度上是通过力学试验来完成的。这一章系统地介绍在生产环境和实验室条件下对电阻焊件所进行的各种试验,包括准静态试验(拉伸-剪切、拉伸、剥离等)和动态试验(疲劳和冲击)。第 5 章,电阻焊接过程的监控。详细介绍用于电阻焊过程监测的各种方法,包括电信号、力学信号、声学信号等,以及它



们与焊点形成过程之间的关系。由此导出控制电阻焊的各种离线和在线方法。除了一些传统的方法，如通过电流、电压信号等的监测和控制，还系统地介绍一些先进的方法，如基于人工神经元的控制过程等。第6章，焊接质量和检测方法。基于焊件的几何特征、力学性能和焊接的过程特征等几个方面与焊接质量的关联对焊接质量进行定义。系统地介绍用于焊接质量检测的破坏性试验（如凿子分离试验）和无损检测方法（如超声波检测等）。第7章，电阻点焊过程中的飞溅现象。人们常常把飞溅作为一种焊接缺陷对待。由于它对焊接过程、电极和焊接质量的负面影响，专门使用一章的篇幅来探讨飞溅的机理、对焊接过程和焊接质量的影响及控制方法。系统地总结、比较各种飞溅模型的机理、优缺点和适用范围。对较易出现飞溅且对质量影响较大的铝、镁的焊接过程进行详细介绍。

第8章，焊机机械特性的影响。由于电阻焊的主要过程——焦耳生热是焊接电流和时间的直接结果，人们常常忽略焊机的机械结构对焊接过程的影响。这一章考虑对焊接过程有潜在影响的机械因素，如运动部件的质量、摩擦等。通过对焊机进行改造，确定这些因素对焊接过程和焊点质量的影响。最后，详细分析点焊机的机械特性导致的焊接参数的输入和实际量值之间的差别。第9章，电阻焊的数值模拟。系统地比较用于电阻焊模拟的主要数值方法，即有限元法和有限差分法。着重介绍模拟力学、热、电过程的算法，尤其是它们之间耦合关系的处理。最后，用大量的实例介绍焊接过程、焊接条件、接触电阻等对焊点的形成过程的影响。

第10章，电阻焊研究的统计学设计、分析和推理。由于焊接过程中有很多不定因素，必须使用统计学的方法进行处理。这一章结合实际焊接实验，针对焊接过程、焊接质量检测的特点，系统地介绍统计学的实验设计过程、分析过程及推论过程。最后还详细介绍针对计算机实验的统计学设计和分析。

本书的部分插图保留了英文名称，以方便读者查阅参考文献及利用网络进行查询。

本书的英文版是著者和著者的老朋友，华沙理工大学的 Jacek Senkara 合著的。英文版的第一版出版（2006年）以后，著者便有把它翻译成中文在国内发表的想法。但由于繁重的教学、科研任务，这个想法一直停留在构思阶段。直到英文版的第二版出版（2012年）以后，翻译工作才列入个人的工作计划。但由于没有系统地学过焊接，而且焊接中很多习惯用词在英汉字典或翻译软件里找不到合适的翻译，著者的努力并没有走太远。终于在与科学出版社的王艳丽见面商定出版计划，且得到《汽车工程学报》编辑段樱提供必要的文字帮助的承诺以后，翻译工作才真正启动。经过近两年的努力，不计其数的修改，许多人的各种方式的投入，本书终于可以与读者见面了。

将英文版（第二版）翻译成中文并不是一个单纯的翻译过程。在翻译过程中著者发现原版有一些说法不够准确，一些章节需要对背景进行进一步的说明，还有一些研究方向在英文版（第二版）出版后又有了新的进展。这些因素决定了这本书的翻译不是一个简单地将中、英文一一对应的过程，而是一个再创作的过程。这些“额外”的工作及著者不尽如人意的汉语水平使得翻译工作成为一个巨大的“包袱”。在一些图表的翻译中，为了保证术语的准确性，防止引起混淆，本书保留了某些没有对应成熟中文名词的英语称谓。在过去的一年里，著者几乎把所有的业余时间都投入这项工作。即使这样，也难以保证现在与读者见面的版本没有疏漏与不足。

在本书中文版出版之际著者诚挚地向在各个环节中提供了帮助、鼓励的同行、朋友表示感谢。中国汽车工程学会的韩镭、哈尔滨工业大学的赫晓东、浙江师范大学的鄂世举和汪彬的鼓励使得将本书翻译成中文从一个想法变成事实。《汽车工程学报》编辑段樱在翻译过程中给予了很多帮助，提出了很多有益的建议。还有一些同事、朋友，如众泰集团马红、科力远集团张洪涛、吉林大学吴柏生、《汽车知识》总编刘成芳等均提供了各种形式的支持和帮助。

张洪延

2016年7月于杭州

# 目 录

第 1 章 焊接冶金	1
1.1 电阻焊的凝固过程	1
1.2 金属的冶金特性	4
1.2.1 钢	4
1.2.2 铝合金	14
1.2.3 镁合金	19
1.2.4 铜合金	24
1.3 焊件的脆化	30
1.3.1 液态金属的脆化	32
1.3.2 氢脆	36
1.3.3 金属间化合物导致的脆裂	37
1.4 裂化	40
1.4.1 凝固裂化	40
1.4.2 熔融裂化	41
1.4.3 腐蚀裂化	42
参考文献	43
第 2 章 焊接中的电、热过程	46
2.1 电阻焊的电学特性	46
2.1.1 体电阻	47
2.1.2 接触电阻	47
2.1.3 总电阻	50
2.1.4 分流	51
2.2 电阻焊的热学特性	51
2.3 电极寿命	53
2.3.1 镀锌钢板的焊接	53
2.3.2 铝合金的焊接	56
2.4 热平衡	63
2.4.1 热相似律	64
2.4.2 热平衡定律	65
2.4.3 改进的热平衡理论	66
2.4.4 实验验证	69
2.5 电流波形	71
2.5.1 单相交流电	72

2.5.2 单相直流电	78
2.5.3 三相直流电	80
2.5.4 中频直流电	80
参考文献	84
<b>第3章 焊点缺陷</b>	<b>86</b>
3.1 焊点缺陷的分类	86
3.1.1 外部缺陷	86
3.1.2 内部缺陷	93
3.2 焊核内孔洞的形成	95
3.2.1 气泡	96
3.2.2 体积收缩效应	99
3.3 铝合金 AA6111 中的焊接裂化	100
3.4 铝合金 AA5754 中的焊接裂化	102
3.4.1 铝合金中的液相裂化	103
3.4.2 裂化机制	106
3.4.3 抑制裂化	112
参考文献	116
<b>第4章 力学试验</b>	<b>118</b>
4.1 引言	118
4.2 车间测试	120
4.2.1 凿子分离试验	120
4.2.2 剥离(滚筒)试验	120
4.2.3 弯曲试验	121
4.3 使用仪器对焊点进行测量	122
4.3.1 静态测试	122
4.3.2 动态试验	132
4.3.3 扭转试验	146
参考文献	147
<b>第5章 电阻焊接过程的监控</b>	<b>149</b>
5.1 引言	149
5.2 数据采集	150
5.3 焊接过程的监测	151
5.3.1 焊接过程中通常采集的信号	152
5.3.2 自适应噪声消除	161
5.3.3 监测信号和焊接工艺之间的关系	164
5.4 焊接过程的控制	170
5.4.1 叶形图	170



5.4.2 恒功率密度控制	176
5.4.3 人工神经网络模型	181
5.4.4 电流分级递进	185
参考文献	187
<b>第 6 章 焊接质量和检测方法</b>	<b>189</b>
6.1 焊接质量	189
6.1.1 焊点特征	189
6.1.2 焊接质量要求	190
6.1.3 焊点属性和强度之间的关系	194
6.2 破坏性试验	200
6.2.1 剥离试验	201
6.2.2 凿子分离试验	201
6.2.3 金相检验	201
6.3 无损评价	203
6.3.1 A 型超声波扫描	203
6.3.2 B 型超声波扫描	210
6.3.3 使用 B 超系统检测各种焊点	213
6.3.4 冷焊点的鉴定法	215
6.3.5 焊点特征和焊接强度之间的关系	219
参考文献	220
<b>第 7 章 电阻点焊过程中的飞溅现象</b>	<b>223</b>
7.1 飞溅对焊点质量的影响	224
7.2 飞溅的机理和检测	227
7.3 飞溅的预测与避免	228
7.3.1 几何比较模型	229
7.3.2 力平衡模型	230
7.3.3 通过 HAZ 内的熔融液态网络的飞溅	239
7.3.4 飞溅的统计模型	245
7.3.5 总结	248
7.4 实例	249
7.4.1 力平衡模型的应用	249
7.4.2 统计模型的应用	254
参考文献	264
<b>第 8 章 焊机机械特性的影响</b>	<b>266</b>
8.1 引言	266
8.2 典型焊机的机械特性	266
8.3 焊机刚度的影响	268

8.3.1	对电极力的影响	269
8.3.2	对电极位移的影响	269
8.3.3	对电极与板材接触过程的影响	270
8.3.4	对焊点形成的影响	271
8.3.5	对焊接强度的影响	271
8.3.6	对电极对中度的影响	271
8.3.7	焊机刚度和阻尼的估计	272
8.4	摩擦的影响	276
8.4.1	对电极力的影响	277
8.4.2	对电极位移的影响	278
8.4.3	对微观结构的影响	278
8.4.4	对拉伸-剪切强度的影响	279
8.5	运动部件质量的影响	280
8.5.1	动态力的分析	280
8.5.2	对焊接质量的影响	282
8.6	焊接周期内电极的跟进	283
8.6.1	热膨胀	283
8.6.2	气缸的影响	284
8.7	电极挤压时间和夹持时间的测量	289
8.8	其他因素	292
8.8.1	电极的对中及工件的结合	292
8.8.2	电极力	294
8.8.3	材料	295
	参考文献	297
<b>第9章</b>	<b>电阻焊的数值模拟</b>	<b>298</b>
9.1	简介	298
9.1.1	有限差分法和有限元法之间的比较	298
9.1.2	模拟电阻焊过程的方法	300
9.2	电-热-力的耦合分析	302
9.2.1	通用(三维)的有限元模型	302
9.2.2	电气过程的公式	302
9.2.3	热传导过程的公式	303
9.2.4	边界条件	303
9.2.5	热-力分析的框架	304
9.2.6	熔化和凝固的模拟	304
9.2.7	有限元公式	304
9.2.8	二维有限元分析	305

9.2.9 轴对称问题	307
9.3 接触性质和接触面积的模拟	307
9.4 其他因素的模拟	310
9.4.1 锌涂层的影响	310
9.4.2 电流波形的影响	310
9.5 模拟焊点微观结构的演变	311
9.5.1 冷却速度的影响	311
9.5.2 HAZ 中的微观结构演变	312
9.5.3 焊核微观结构的模拟	313
9.5.4 模拟点焊焊件内微观结构演变的实例	314
9.6 电阻焊过程的数值模拟实例	315
9.6.1 案例一: 电极表面几何形状的效应	315
9.6.2 案例二: 使用耦合与非耦合算法之间的差异	317
9.6.3 案例三: 电极轴向错位的影响	317
9.6.4 案例四: 球面电极的角偏心的影响	319
参考文献	321
<b>第 10 章 电阻焊研究的统计学设计、分析和推理</b>	<b>324</b>
10.1 引言	324
10.2 基本概念和步骤	325
10.2.1 数据采集	325
10.2.2 统计建模和数据分析	326
10.2.3 推断或决策	326
10.3 具有连续响应的实验	327
10.3.1 统计设计	327
10.3.2 分析与建模	330
10.3.3 推理和决策	333
10.3.4 两级滑动层次实验	340
10.4 分类响应实验	347
10.4.1 实验设计	348
10.4.2 分析与建模	348
10.4.3 推理和决策	349
10.5 计算机模拟实验	355
10.5.1 实验设计	356
10.5.2 分析与建模	356
10.6 总结	363
参考文献	363

# 第1章 焊接冶金

焊接过程的各个方面都或多或少地涉及基材和电极材料的冶金特性,所以焊接从本质上讲是一个冶金过程。鉴于此点,业界出版了许多焊接冶金方面的著作<sup>[1-7]</sup>。尽管大部分这类著作是关于熔焊方面的,但其一般性的冶金原理也适用于电阻点焊(resistance spot welding, RSW, 简称电阻焊)。本章对与电阻焊密切相关的冶金原理进行讨论,这对理解电阻焊焊点结构的形成过程、缺陷的形成机制,以及它们对焊接质量的影响起着至关重要的作用,还对与电阻焊密切相关的基材和电极材料进行分类,并对它们的冶金特性进行讨论。首先,讨论直接参与焊接过程、决定焊接质量的基材(钢、铝合金和镁合金等)的冶金特性。由于轻质金属在汽车轻量化中所起的作用和日益广泛的应用,本章除了点焊中常用的钢材等“常规”材料,还重点介绍铝合金和镁合金的焊接相关的材料性质。其次,虽然电极材料对电阻焊的影响已得到业界的广泛认可,且对这种影响的理解也有助于对焊接过程的控制,但在已发表的文献中这方面的信息相当有限。事实上,电阻焊过程的许多重要方面都取决于电极的形貌和冶金状态。例如,在电极-工件界面间产生的电阻热会导致许多负面变化,如合金化等,影响电极的寿命和性能,以及焊点质量。因此,铜作为最广泛应用的电极材料也包含在本章内。最后,讨论焊接中裂纹产生的冶金机理。更多与这些电阻焊相关材料的冶金方面的信息可参考本章后的参考文献。

## 1.1 电阻焊的凝固过程

和大多数工程金属材料一样,电阻焊所使用的板材已非最初的铸造结构。通过冷/热加工改性,如轧制和热处理,金属板材的结构与冶炼后的凝固结构有很大区别。在材料改性的过程中,可以通过冷加工、回复或再结晶来细化晶粒,而结构的均匀化则可通过固溶退火或淬火再回火得以实现。然而,这样的加工过程很难在焊接中实现,尤其是在电阻焊中,因为熔化和凝固均在极短的时间内发生在两块板材之间。通过调整焊接参数,如改变断电后电极的夹持时间和后加热时间,可在一定程度上改变焊件的微观结构。但由于焊接过程中焊接部位的陡峭的温度梯度、极高的冷却速度,以及非常短的操作时间,上述的处理过程与可控的基材热处理工艺没有可比性。因此,焊点在微观结构和材料性质方面通常不如基材。焊接中,液态焊核的凝固过程与金属铸造过程类似,也包括两个阶段:固相成核及随后的晶体生长。它的结晶过程是通过基材和电极的热传导来控制的。除了基材的合金成分,散热方向和冷却速度也决定着结晶的类型、大小和所形成的晶体的取向。在液态焊核的凝固过程中,析出晶体的合金成分与原合金成分相比会发生变化。对一个液态焊核来说,切断电流以后,它经历了一个非常快的冷却过程。它阻碍了各种元素在已经成核的固体和残余液体中及在它们之间的扩散。这种效应及多数元素在固态和液态下溶解度的差异,通过微观偏析的过程,产生了一些元素分布上的尖锐梯度。晶体核心层与外层之间的成分差异随着相图中液相线和固相线之间距离的增加而变大,随着凝固时的扩散速度及凝

固时间的增加而变小。除了在晶体尺度范围发生的微观偏析，凝固过程中固-液相界面的推进也会导致剩余的合金元素熔化物的浓度富集。主要在焊核的中心附近会有一些合金元素形成熔融温度较低的共晶体，在焊核温度冷却至低于其基材的合金固相线但高于共晶的熔融温度后，它们仍处于液态，如铝合金中的 Al-Cu、Al-Mg 和 Al-Mg-Si 共晶体，以及某些化合物如钢材中的硫和磷的共晶体。由于固相和液相的溶解度不同，冷却过程中各种合金元素由固体向液体转移，导致了合金元素的分布不均匀。在合金元素浓度比较高的地方，如晶界，这样的高浓度有效地降低了液态化合物的凝固温度，使得这部分液体成为最后凝固的部分。固体晶粒之间的液态金属没有机械强度，因此这种结构可能会在两种情况下被撕开，一种是当它受到外部拉伸载荷时，另一种是在热应力的作用下。后一种的过程与熔焊中热应力导致的裂纹相似。如果采用合适的电极和焊接工艺参数，冷却过程中电极的压力可以有效地防止拉伸应力的产生。因此，上述晶粒裂化现象在电阻焊中并不常见。焊核凝固以后，可能会发生固体相变，使得焊点的显微组织形态发生变化，结果可能与刚凝固的结构完全不同。例如，焊接某些钢材时有可能发生马氏体相变，从而产生比液体凝固时形成的奥氏体更复杂的结构。

各种晶体（树突、球状、蜂窝晶体）的形成，是由液-固界面处的金属成分和热传导控制的。当液态焊核温度达到合金液相温度时凝固便开始了，此时液体内会产生净热损失，即液体的散热量大于被其吸收的热量。在焊接过程中，水冷下的电极起到类似于一个大型散热器的作用。同时，一部分热量通过液态焊核周边的基材金属散发掉。对焊接材料的冶金和热力学性质及铸造过程的了解有助于对焊接中焊点的凝固过程的理解。点焊焊核的凝固始于焊核内靠近热影响区（heat-affected zone, HAZ）的部分熔化或“糊状”区域内的固体晶粒。进一步冷却使柱状晶粒长大，其长大的方向大致垂直于熔融线，同时固-液界面向焊核中心移动。当液体体积随着凝固的持续进行而逐渐变小时，焊核中心部分的剩余熔融金属最后凝固并形成等轴晶粒。在此过程中如果产生收缩裂纹或孔洞，则常分布于最后凝固的焊核中心部位。焊核的最终凝固结构很大程度上取决于焊接工艺流程和其他相关条件的影响。图 1.1 显示了一个相变诱发塑性（transformation induced plasticity, TRIP）钢的焊点。这个认真制造出来的焊点清晰而明确地显示了 HAZ 的结构和焊核内的柱状结构。

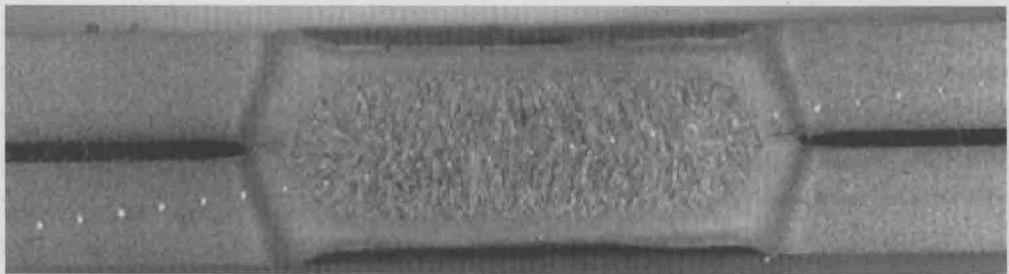


图 1.1 一个 780MPa TRIP 钢的焊点<sup>[8]</sup>

图 1.1 中的等距白点是在显微硬度试验中形成的压痕。最后凝固的液体通常靠近板材的原始接合面，此时的体积不足容易造成裂纹或孔洞。一般来说，凝固过程中液态金属的体积不足是因施加在焊件上的电极压力不足、熔融金属的量不足，以及过快的冷却速度造



成的。大的电极压力可有效弥补焊件在冷却过程中的体积收缩，从而抑制孔洞或裂纹的形成。由较低的焊接电流和/或较短的焊接时间引起的加热不足，可能导致较小的熔融金属体积和比较高的冷却速度。在这种情况下，如果施加的电极压力不足，则容易形成孔洞和裂纹。这一点可以清楚地从图 1.2 看出。一个焊点呈现了沿板材原始界面的开裂，并从它的断裂面上可以清晰地看到由于自由凝固而产生的宏观收缩孔洞<sup>[9]</sup>。沿着这个由最后凝固的液体形成的大孔洞的周围，可以观察到它的表面有冷却（凝固）过程中形成的且在样品制备过程中完好无损的枝状晶体。图 1.2 (c) 中，由液态金属体积缺乏导致的孔洞边界附近的开口可能是由机械力产生的。图 1.2 (d) 中的白框显示了富含锌的枝晶，其中的锌可能来自镀锌双相钢板的镀层，这也是焊核熔化不充分的证据。

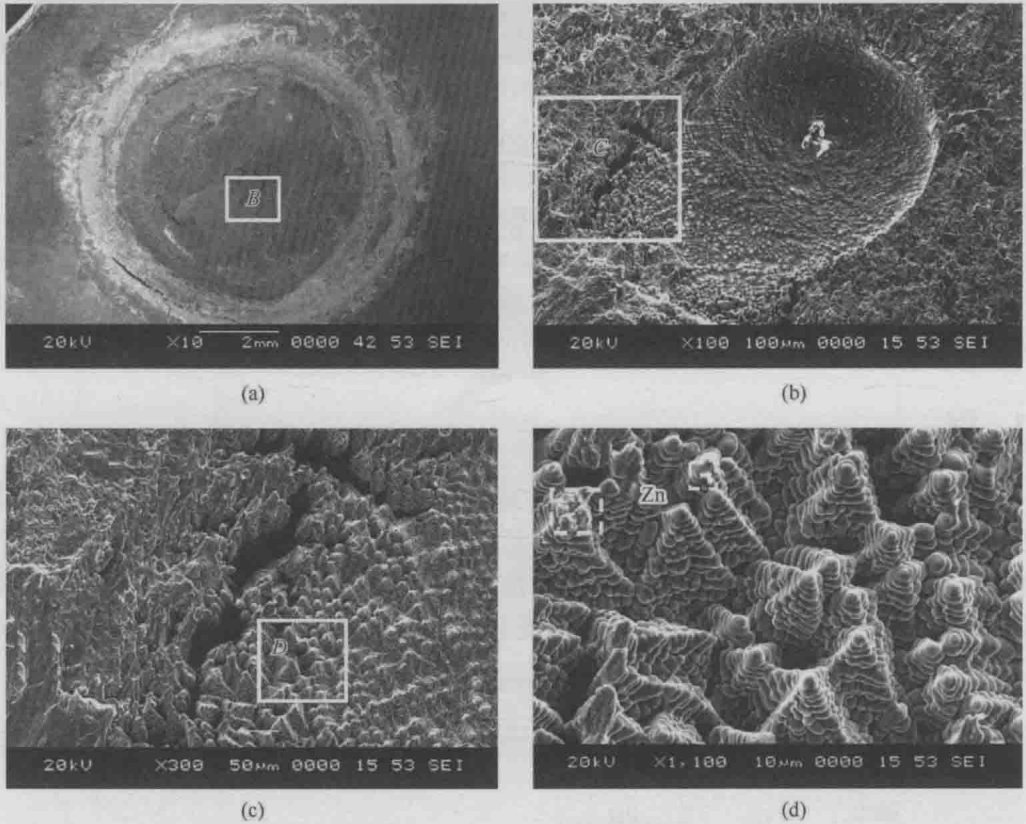
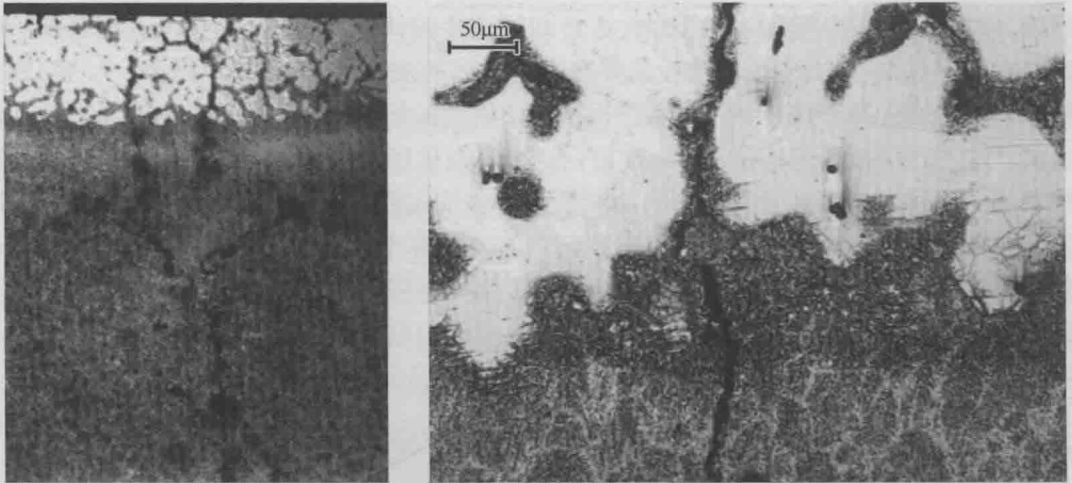


图 1.2 DP600 钢焊点的界面断裂表面的微观结构<sup>[9]</sup>

当电极冷却受阻，如因电极偏差或电极磨损导致电极与工件实际接触面积变小时，大部分热量会通过金属板传出去。因此，最后部分的液态的凝固发生在沿着厚度方向的焊核的中心。由于这部分液体的体积较小，还经常伴有体积缺失，所以在焊核中心附近沿着电极轴线常会形成裂纹和空隙。由于这些处于焊核中心的缺陷远离靠近原始板材交界面的 HAZ，它们对焊点强度的影响会很小。不过，这类裂纹常以分叉的方式从焊核中心扩展至焊核边缘（详见第 3 章）。沿着焊核厚度方向凝固裂化的实例如图 1.3 所示。点焊 AZ91D 镁合金时，发现围绕着焊核中心形成的裂纹从原始接合面的位置开始，穿过熔合线（也称熔融线），扩展到电极-板材界面<sup>[10]</sup>。





(a) 从焊核处扩展开的收缩裂纹穿过HAZ，延伸至表面

(b) 熔融线附近裂纹的放大形貌

图 1.3 AZ91D 镁合金焊点裂纹处的形貌<sup>[10]</sup>

## 1.2 金属的冶金特性

本节着重介绍焊接中常用的结构材料（钢、铝合金和镁合金）的冶金特性。由于铜合金是最通用的电极材料，也在此对其进行讨论。

### 1.2.1 钢

基材及焊点部分的特性均由合金的化学成分和制备条件（如热处理和冷/热加工过程）决定。图 1.4 显示了几种常用的使用电阻焊工艺的钢材的力学性能，以及化学成分及工艺过程对这些性能的影响。通常，低碳钢具有拉伸强度低和可塑性高的特点，可塑性会随着强度的增加而减小。图中曲线表明通过改变化学成分和控制相变可以获得期望的合金特

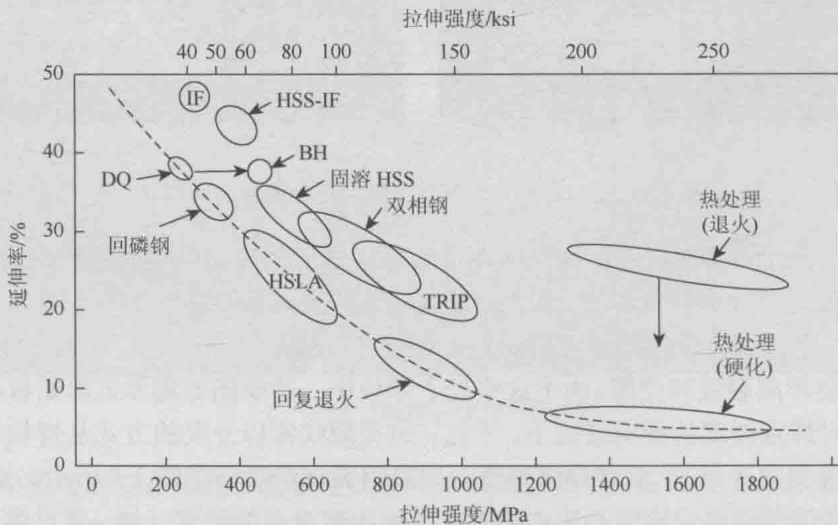


图 1.4 几种钢材的力学性能曲线（由汽车-钢铁联合会提供，1ksi=6.89MPa）

性。然而，在电阻焊中，对发生在焊核和 HAZ 内的相变和材料性能的改变只能进行很有限的干预。因此，板材在制造过程中，通过复杂的冶金过程和机械加工而获得的强度，可能会在焊接金属中消失。

### 1. 钢材中的固相相变

平衡铁-碳相图的左上角如图 1.5 所示。考虑碳含量低于共析成分 (0.77wt.%C) 的钢从高于  $A_3$  温度开始冷却。这个过程与凝固后的焊核或者 HAZ 在冷却时所经历的情况类似。在这个温度下面心立方 (face-centered cubic, FCC) 的奥氏体 (austenite) 是稳定相。当它被缓慢冷却至  $A_3$  温度时，含少量溶解态碳的体心立方 (body-centered cubic, BCC) 的铁素体相开始析出。奥氏体晶粒的体积分数逐渐减小，同时其碳含量逐渐增大。在共析温度 (727°C) 残留的奥氏体转变成铁素体和渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 的层叠共析混合物，称为珠光体。因此得到的钢的结构是铁素体和珠光体的混合物。渗碳体是一种不稳定相，它在长期高温下会分解成铁和石墨，因此它更确切地应该称为亚稳定体。冷却的速度较高时会发生类似的相变，但通常是在平衡相图标记的温度下进行的。虽然相对较软的铁素体和比较硬的渗碳体的混合物是低碳钢的典型结构，但其微观形态却与冷却速度密切相关，该混合物是以珠光体还是贝氏体的形式存在取决于冷却速度。

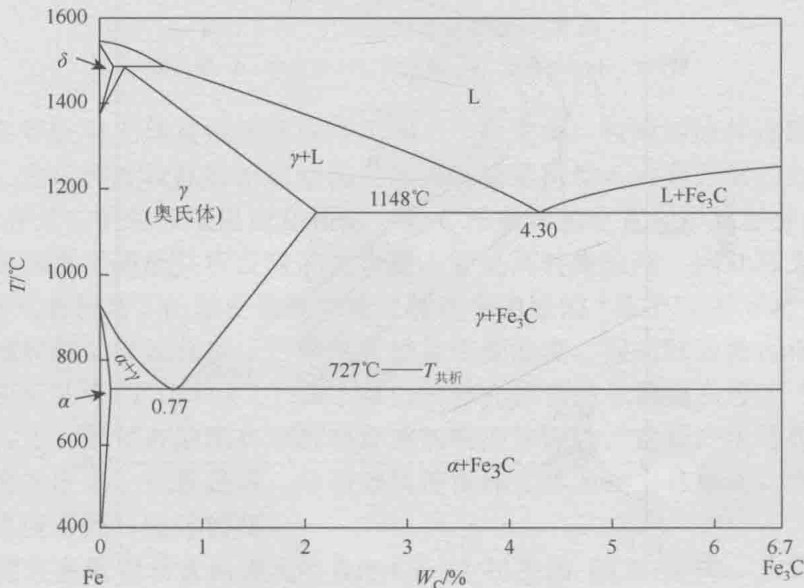


图 1.5 Fe-C 相图<sup>[11]</sup>

等温相图，又称等温度转变 (time-temperature transformation, TTT) 曲线，是认识冷却过程中可能产生的微观结构的一个重要工具。等温度转变曲线的制作是将样品加热后快速浸入一个特定温度下的融盐池，并在恒温下保持一定的时间。然后将样品快速浸入冰盐水中，再检验其组织结构。因此，它表达的是等温条件下相变的规律。这些图表显示了金属的微观结构是如何在给定温度下随时间转变的。典型的铁-碳合金 TTT 图如图 1.6 所示。

它显示了珠光体、贝氏体和马氏体从开始到结束的形成过程。

这些图表是在实际应用中很少见的平衡条件下生成的。尤其是在电阻焊中，加热和冷却速度非常高，相转变发生在远离平衡状态条件下。由于大多数工业热处理工艺采用受控制的冷却而非等温转变，因此连续冷却转变（continuous-cooling transformation, CCT）曲线比等温度转变曲线更实用。电阻焊焊件的冷却也远非在等温条件下进行，因此，连续冷却转变曲线更适合用来了解焊件的微观结构的形成。尽管 CCT 图的相转变发生在一定的温度范围内，而 TTT 图显示的是在恒定温度下的转变，它们的基本形状非常类似。典型的低碳钢的 CCT 图如图 1.7 所示。由图可知，以缓慢的冷却速度连续冷却会生成铁素体和珠光体的混合物；中等冷却速度通常会生成铁素体、贝氏体和马氏体的混合物；快速冷却（高于临界冷却速度）会生成全马氏体结构。虽然采用一些技术，如 CCT 曲线，可以用来分析相变动态特性和动力学现象，但这些特性依赖于所测材料，无法推广到其他材料或系统，而且在文献中基本没有对应于电阻焊中极高速冷却条件下的相变的信息。因此，大多数相图是不适合在电阻焊中以定量方式使用的。但它们可以用来获取点焊过程中可能产生的相变和反应信息。

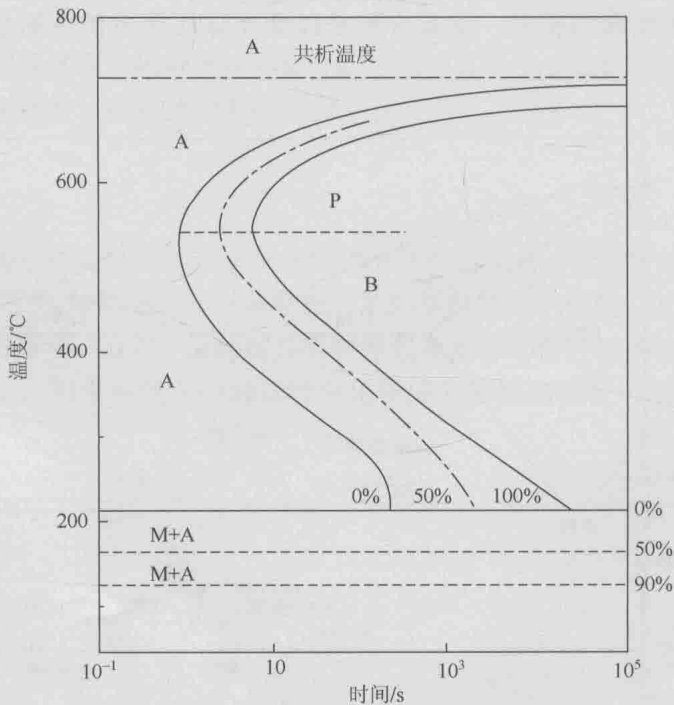


图 1.6 一个共析碳钢的 TTT 图<sup>[11]</sup>

A, 奥氏体; B, 贝氏体; M, 马氏体; P, 珠光体

在特定条件下，如当碳含量（或碳当量）足够高时，一个非常高的冷却速度——电阻焊过程中的常象，也许会在焊点内导致马氏体相变。这种快速冷却不可能引发平衡相变，并且也压低了相变温度。在低温条件下，焊核中成核速率高而晶体生长速率低。因此形成的合成结构（铁素体+渗碳体）呈细针状而非厚层板状。更高的冷却速度会进一步压低相变