

新型 微合金钢的 焊接

许祖泽 著



新型微合金钢的焊接

许祖泽 著



机械工业出版社

这是一本介绍新型微合金钢及其焊接和实际生产应用相结合的书。
内容有：钢的焊接性，焊接对板材、型钢和轻型结构钢的影响，新型含 Ti 微合金结构钢的焊接性和焊接性试验，大热输入焊后的韧性，新型高强度结构钢（TMCP+AcC 钢）的焊接，石油天然气输送管线用钢的焊接性及焊接材料，微合金化铁路重轨钢的焊接性及其评定，微合金结构钢的焊接性与焊接工艺参数的制定。

本书可作为开发应用微合金结构钢的研究院所、焊接结构设计部门、生产加工和使用厂家、大中院校材料和焊接专业师生的参考书。
此外，还对从事结构钢焊接生产、使用的技术人员具有参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

新型微合金钢的焊接/许祖泽著. —北京：机械工业出版社，
2004.4

ISBN 7-111-14212-8

I. 新... II. 许... III. 低合金钢—焊接 IV. TG457.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 022161 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：吕德齐、武江、高金牛

封面设计：王伟光

责任印制：李 妍

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

1 000mm×1 400mm B5·11.5 印张·3 插页·436 千字

0 001—4 000 册

定价：38.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

序

微合金钢发展的主线是保证结构的完整性，因而在不同类型的环境中得到优化应用。使力学性能强化的新方法标志了结构钢发展的新阶段。但是从其发展中可以看到完善结构钢的焊接性也是一项决定性的因素，其标志是在提高结构钢强度的同时，碳当量不断降低，管线钢的含碳量从 20 世纪 60 年代的 $w(C)=0.22\%$ 时高强度低合金钢 (HSLA 钢) 发展到 20 世纪 90 年代的 $w(C)=0.05\%$ 的热力学控制工艺 (TMCP) 钢就是一个典型的例子。近代的重大破坏事故，如 1980 年发生在英国北海油田的 Alexander Kielland 井架倒塌事故，几千吨的井架在 20min 内倒塌，123 人死亡，而事故起源于一条 6mm 角焊缝过热区的氢致裂纹；日本阪神大地震中大量断裂起源于焊接区。这些都说明结构的薄弱环节是在焊接区，焊接性应是保证结构完整性的一条主线。但是在我国结构钢的开发中，由于至今仍把焊接性当作一个附带的性能来解决，而走了弯路。

许祖泽教授在本书中把焊接性的改善作为新一代结构钢发展的动力和目标，是一个针对上述问题提出的催人思索的观点。这个观点已部分被过去钢种的开发证明，也必将对新钢种的开发产生积极的影响。

许祖泽教授在新钢种研制、焊接材料开发，尤其是在焊接性评定中热模拟试验的开发和应用有多年的研究经验和成果，他在特定钢的开发中获得过宝贵的实践经验。本书的特点是从改善焊接性的角度论述现代结构钢的发展，并对广为关心的热力学控制工艺 (TMCP) 钢、铁路重轨钢及管线钢作了详尽的焊接性分析，具有很强的指导意义。

作者结合在国外工作和学习的经历，介绍了国外钢铁冶金企业及焊接研究的发展，也对读者有很好的参考价值。

希望本书的出版会对广大焊接工作者有所帮助，对工作在钢铁领域的专家学者也会有较大的启发。

中国焊接学会理事长

许祖泽

前 言

作者本人 40 多年以来,特别是改革开放 20 多年以来,在钢铁研究总院金属焊接研究室主要从事焊接领域的实际工作,即热模拟技术的研究、开发和应用,国产铁路重轨钢焊接性评定,新型微合金结构钢及其焊接性的研究开发、石油天然气输送管线用钢的焊接性及其埋弧焊丝的研究开发,最后 3 年参加了北欧国家钢铁冶金企业在我国交流技术改造经验的工作;曾经有近 4 年的时间参加过北欧高校、研究院所和钢铁冶金企业技术中心有关新型微合金结构钢的研究开发工作。此外,先后多次考察、访问了美国、英国、北欧和日本的焊接、材料、钢铁冶金企业并参加了有关的国际会议。积累的经验 and 资料,在钢铁研究总院院长干勇院士和副院长田志凌教授的鼓励和支持下,编写了本书。

本书内容有:第 1 章钢的焊接性及其发展;第 2 章焊接对板材、型钢和轻型结构钢发展方向的影响;第 3 章焊接在新型结构钢开发中的作用;第 4 章新型含 Ti 微合金结构钢的焊接性;第 5 章新型含 Ti 微合金结构钢的焊接性试验与评定;第 6 章新型含 Ti 微合金钢焊接时的沉淀物和其稳定性的特征;第 7 章新型高强度结构钢的焊接;第 8 章微合金结构钢大热输入焊后的韧性;第 9 章石油天然气输送管线用钢的焊接材料;第 10 章石油、天然气输送管线用钢焊接性的评定试验;第 11 章新型微合金化铁路重轨钢的焊接性及其评定;第 12 章微合金结构钢的焊接性与焊接工艺参数的制定。总而言之,本书各章内容介绍的主要目的都是在宣传钢铁冶金企业技术改造和市场需求的新型低碳、微合金化、细晶粒、高强度、高韧性、洁净和均质、易变形、易焊接的结构钢应在我国研究、生产、推广和应用。

全书由田志凌教授主审,中国焊接学会理事长陈剑虹教授为本书作序,马成勇博士参加了本书部分章节的审阅,苏勇博士后审阅了全书。作者对他们表示由衷的感谢。

作者对曾在研究微合金结构钢及其焊接性时先后给予合作和帮助的美国热模拟技术专家 H.S.Forguson 博士、瑞典金属研究所力学冶金研究室主任 B.Hutchinson (英籍)教授、瑞典皇家工学院焊接工艺和焊接性教研室主任 N. Hannerz 教授、瑞典钢铁集团公司材料开发部 P.Hansson 高级工程师、芬兰奥鲁大学材料工程系主任 L.P.Karjalainen 教授和芬兰罗德洛基跨国钢铁集团公司技术中心主任 D.Porter (英籍)博士等表示由衷的感谢。

借此机会，作者由衷地感谢郭育琴高级工程师，她为本书的完成付出了辛勤的劳动。

本书的出版，得到国家重点基础研究资助项目（973 项目）“新一代钢铁材料重大基础科研基金”的资助，作者对此表示衷心的感谢。

最后，书中仍难免有不当和错误之处，敬请读者批评指正。

作者 许祖泽

目 录

序 前言

第 1 章 钢的焊接性及其发展 1

1.1 概述 1

1.2 焊接和结构钢及其焊接性 的发展 1

1.3 模拟施焊系统 2

1.3.1 模拟施焊系统的构成 和功能 2

1.3.2 模拟施焊系统的应用 3

1.4 焊接性评估工艺学的发展 4

1.5 焊接热模拟技术的发展 6

1.6 钢的焊接性与材料的结合性 7

参考文献 9

第 2 章 焊接对板材、型钢和轻型 结构钢发展方向的影响 10

2.1 概述 10

2.2 焊接对炼钢与轧制发展方向 的影响 10

2.3 焊接结构钢的冷裂纹 11

2.4 焊接热影响区韧性 15

2.4.1 影响热影响区 (HAZ) 韧性的因素 16

2.4.2 对 HAZ 韧性要求的 发展趋势 18

2.5 焊接结构钢的层状撕裂 18

2.6 焊接结构用轧制型钢 20

2.7 压力容器和锅炉用低合金钢厚板 对洁净性和均质性的要求 22

2.8 轻型焊接结构钢 24

参考文献 25

第 3 章 焊接在新型结构钢 开发中的作用 26

3.1 新型结构钢产品的开发应用 26

3.2 关于预制品和预处理服务 28

3.3 新型易焊结构钢 28

3.4 热-力学工艺轧制的带材和板材 29

3.5 高强度结构钢 32

3.6 高强度和超高强度造船钢 33

3.7 海上采油平台钢 34

参考文献 36

第 4 章 新型含 Ti 微合金结构钢 的焊接性 37

4.1 概述 37

4.2 影响 Ti、Nb 和 V 微合金钢 焊接性的主要因素 38

4.2.1 化学成分的影响 38

4.2.2 钢的化学成分与碳当量 42

4.3 焊接条件下的沉淀特征 43

4.3.1 概述 43

4.3.2 焊接期间奥氏体晶粒 的长大 44

4.3.3 焊接热循环期间沉淀物 的溶解 45

4.4 钢的 HAZ 显微组织分类 48

参考文献 55

第 5 章 新型含 Ti 微合金结构钢的

焊接性试验与评定 57

5.1 概述	57
5.2 试验用钢材	58
5.2.1 成分与性能	58
5.2.2 钢板的焊接	59
5.3 奥氏体晶粒粗化特征	60
5.3.1 峰值温度对奥氏体晶粒 长大的影响	60
5.3.2 加热速度对奥氏体晶粒 尺寸的影响	61
5.3.3 对奥氏体晶粒长大 的控制	63
5.4 焊接连续冷却转变图	64
5.5 硬度试验	67
5.5.1 试样的硬度	67
5.5.2 HAZ 的显微组织和硬度 ...	69
5.6 韧度试验	77
5.6.1 夏比 V 形冲击试验	77
5.6.2 HAZ 的 CTOD 韧度	85
5.7 含 Ti 微合金钢插销试验 和冷裂纹敏感性	90
5.7.1 插销试验	90
5.7.2 冷裂纹敏感性与插销 试验的关系	93
参考文献	93

第 6 章 新型含 Ti 微合金钢

**焊接时的沉淀物和其
稳定性的特征 95**

6.1 概述	95
6.2 焊接沉淀特征	95
6.2.1 CMn 钢中的沉淀特征	95
6.2.2 含 Ti 微合金钢中的 沉淀特征	101

6.2.3 TiNb 微合金钢中的 晶粒特征	109
6.2.4 TiV 微合金钢的沉淀 特征	117
6.2.5 TiNbV 微合金钢中 的沉淀特征	126
6.2.6 低碳 TiNb 微合金钢中 的沉淀特征	132
6.3 沉淀物稳定性特征	142
6.3.1 含 Ti 微合金钢中 TiN 的稳定性	146
6.3.2 TiNb 微合金钢中沉淀物 的稳定性	146
6.3.3 TiV 微合金钢中颗粒 的稳定性	147
6.3.4 TiNbV 沉淀物的 稳定性	148
参考文献	148

第 7 章 新型高强度结构钢

的焊接 150

7.1 概述	150
7.2 冷裂纹的危险性	153
7.2.1 低 CE 值	153
7.2.2 低硫	153
7.3 HAZ 的韧性	154
7.3.1 粗晶粒热影响区 (CGHAZ)	155
7.3.2 临界温度间热影响区 (ICH AZ)	157
7.3.3 临界温度间粗晶粒热影响 区 (ICCGHAZ)	157
7.3.4 亚临界温度粗晶粒热 影响区 (SCCGHAZ) ...	158
7.3.5 微合金化	158

VIII

7.3.6 局部脆化区 (LBZ)	
防止	159
7.3.7 设计	160
7.4 软化	161
7.5 焊缝金属的韧性	163
参考文献	168

第 8 章 微合金结构钢大热输入

焊后的韧性	172
8.1 概述	172
8.2 普通热轧钢和热-力学	
工艺钢的成分、厚度、	
力学性能和焊接性	172
8.3 大热输入焊接条件下 CGHAZ	
的冲击吸收功	175
8.4 大热输入焊接条件下 CGHAZ	
的显微组织	176
8.5 碳当量对大热输入焊接	
(单道焊和多道焊) 时	
CGHAZ 韧性的影响	181
8.6 Ti 和 N 含量和 CGHAZ	
韧性的关系	181
8.7 Nb 含量在 CGHAZ 韧性中	
的作用	183
参考文献	184

第 9 章 石油、天然气输送管线

用钢的焊接材料	186
9.1 概述	186
9.2 石油、天然气输送管线	
用焊条	190
9.2.1 石油、天然气输送管线	
现场施工焊接	192
9.2.2 焊缝的评定	192
9.3 石油、天然气输送管线用	
埋弧焊丝	196

9.3.1 油、气输送管用高韧性	
埋弧焊丝的成分设计	197
9.3.2 对于管线用埋弧焊丝配用	
的焊剂的要求	202
9.3.3 微合金化埋弧焊丝的	
研制开发和应用	203
参考文献	209

第 10 章 石油、天然气输送管线 用钢的焊接性

评定试验	211
10.1 概述	211
10.1.1 对材料化学成分的要求	212
10.1.2 碳当量	212
10.1.3 和焊接性有关的力学	
性能	213
10.1.4 断裂韧度	213
10.1.5 夏比冲击韧度	213
10.1.6 维氏硬度	213
10.2 石油、天然气输送焊管的	
母材和焊接接头	214
10.3 国产油气输送管线用钢的	
焊接性评定	215
10.3.1 焊管钢连续冷却	
转变图	216
10.3.2 焊管钢 CGHAZ 的	
硬度 (HV ₁₀)	218
10.3.3 焊管钢的 CGHAZ	
的组织	218
10.3.4 两种 X52 焊管钢母材	
和 CGHAZ 的夏比冲击	
韧度比较	222
10.3.5 焊管钢模拟 CGHAZ 的	
低温冲击 (CVN)	
韧度	225

10.3.6 焊管钢的焊接冷裂纹 敏感性试验	227	11.6.3 HAZ 硬度分布和 焊接性	263
10.3.7 焊管钢的焊接热裂纹 敏感性试验	230	11.6.4 重轨钢的奥氏体转变 行为和焊接性	264
10.3.8 焊管钢的落锤 撕裂试验	233	11.6.5 HAZ 的力学性能 和焊接性	265
10.3.9 焊管钢焊接接头的裂纹 尖端张开位移 (CTOD) 试验	234	11.7 微合金元素 V 对重轨钢 焊接性的影响	272
10.3.10 焊管钢焊接接头的疲劳 裂纹扩展速率试验	241	11.8 国产微合金化重轨钢 P74 的焊接性	277
10.3.11 焊管钢焊接接头应力 腐蚀 (SCC) 试验	245	11.8.1 热模拟技术在重轨钢 焊接性研究中的应用	277
10.3.12 焊管钢成形性 (包辛 格效应) 试验	247	11.8.2 连续冷却转变图	278
10.4 焊管钢埋弧焊接接头焊缝 成分、硬度分布及金相 组织评定	248	11.8.3 硬度试验	279
第 11 章 新型微合金化铁路重轨钢 的焊接性及其评定	253	11.8.4 HAZ 的韧性	281
11.1 概述	253	11.8.5 疲劳强度试验	281
11.2 国外铁路重轨钢的化学 成分和力学性能	253	11.8.6 热塑性试验	282
11.3 新型重轨钢焊接工艺特点	254	11.9 我国生产的重轨钢主要 焊接性能和国外的比较	283
11.4 高强高速耐磨重轨钢 的焊接性	256	11.9.1 焊接连续冷却转变图	283
11.5 重轨钢焊接热循环的特征 及其对材质的影响	257	11.9.2 重轨钢焊接粗晶热影响区 (CGHAZ) 的金相 组织比较	292
11.6 重轨钢的焊接性	260	11.9.3 重轨钢焊接模拟热影响区 的硬度分布	294
11.6.1 母材成分、合金元素 和冶金因素等对焊接性 的影响	261	参考文献	297
11.6.2 重轨钢金相组织和 焊接性	262	第 12 章 微合金结构钢的焊接性与 焊接工艺参数的制定	298
		12.1 概述	298
		12.2 国外各种微合金结构钢	299
		12.2.1 通用结构钢	299
		12.2.2 EX 细晶粒钢	304
		12.2.3 可成形 EX HR/HS /HSF 钢	304

12.2.4 耐候钢	305	12.12.1 热切割	330
12.2.5 可淬火 EXB 硼钢	305	12.12.2 预制板	331
12.2.6 热-力学工艺的 EX (细晶粒) M 钢	306	12.13 焊后热处理	332
12.2.7 压力容器用钢	307	12.14 变形的控制	333
12.2.8 造船用钢	307	12.14.1 变形类型	333
12.3 焊接性	308	12.14.2 火焰矫正	334
12.4 焊接接头组织和性能	309	12.15 焊接结构的疲劳强度	336
12.5 电弧焊热输入和冷却 时间 $t_{8/5}$	313	12.16 冷成形	338
12.6 焊接工艺的选择	317	12.17 修复焊	339
12.7 焊接材料的选择和使用	318	参考文献	341
12.8 焊接热输入的限制	320	附录	343
12.9 预热和层间温度	322	附录 A 新型微合金钢产品 分类	343
12.10 层状撕裂	328	附录 B 对最常见的欧盟钢种推荐 的填充材料	344
12.11 结晶裂纹	329	附录 C 新型微合金钢的 碳当量	357
12.12 焊前准备	330		

第 1 章 钢的焊接性及其发展

1.1 概述

自古以来,人们都要把材料结合成一种结构才能更好地使用。这样材料和结合手段就一直密不可分,而且彼此相互促进,不断发展着。20 世纪初,将电弧技术用到了钢铁产品上,焊成焊接结构,这促使焊接和结构钢都出现了质的飞跃。从此以后,焊接和结构钢对人类生活不断作出不可估量的贡献。

“焊接性”的词义一直不断发展着。本章从焊接和结构钢及其焊接性、模拟施焊系统、焊接性评估工艺学、焊接热模拟技术、微合金结构钢的焊接与焊接性等方面来说明焊接和焊接性、微合金结构钢的开发和钢铁冶金企业技术改造三者一直联系在一起,相互促进、相互发展。

1.2 焊接和结构钢及其焊接性的发展

自从 1936 年美国工程基金会创立了“焊接研究学会”以后,许多和结构钢及钢铁冶金有关的“钢的焊接性”研究计划就开始了,研究内容包括结构钢母材的焊接性、焊缝金属和焊接热影响区等。由于用于焊接结构的高强度、高韧性材料和焊接材料及设备的不断发展,新的焊接方法也在不断出现,所有这些都要求开发微合金结构钢。20 世纪 80 年代末,三位世界知名的材料专家:英国剑桥大学的 R.W.卡恩教授(中国科学院外籍院士)、德国哥丁根大学的 P.哈森教授和美国卡乃尔大学的 E.J.克雷默教授共同在所著的《焊接的重要性》中提出:“在第二次世界大战及其前期的军备扩展中,焊接起到了重要的作用。正是那个时期,即 1935~1945 年,开发了机械化电弧焊,因为需要得紧急,焊接的优势(尤其是降低重量和加快生产速度)被一个又一个例子所证实。由于二次世界大战期间焊接的成功应用,在 1945 年以后的一个时期进行了大量的研究开发,出现了许多能够产生局部热量的新方法,并在世界范围内通过不懈的努力,将科学、冶金和工程用于焊接技术的开发和应用。研究的主要问题包括大型焊接结构的灾难性的韧性断裂、热影响区氢致裂纹和焊接接头的疲劳破坏。”

有关焊接作用的共识问题还表现在充分理解“焊接”和“焊接性”两词的含义。“焊接性”是从英文“weldability”得来的,它复杂和深刻的含义把焊接、结构材料自身的性能(材料、力学、冶金、物理、化学等性能)和钢

铁冶金企业的不断改造结合起来了。

焊接性的含义还可追溯到“一战”时期，开始运用焊接大量生产各种焊接结构，例如：机器、工程结构和装备等。而在“二战”时期，美国在制造钢船结构时用焊接大量代替了铆接，以至于“二战”结束以后，美国海军部长接到的总结报告中说：“若没有焊接，就不能在这样短的时间内建设一支赢得这场战争起到重要作用的庞大舰队”。这句赞誉焊接使用的话还可引伸到其他装备，例如：坦克、载重车、飞机等。但是，有几条运送战略武器的焊接船舶发生裂纹，造成船身突然断裂，引起海难。从而引起对当时大量使用的低碳钢自身性能的怀疑，开始对焊接和低碳钢自身的性能互相联系进行大量的研究，最后专家们总结出了焊接和结构钢自身焊接性相互不可分的新含义。从此以后，结构钢要想占领更多的市场，就必须使所生产的结构钢体现出自身焊接性的优良，特别是在最近 20 多年的钢铁冶金、结构钢的金属加工中显示出越来越重要的作用，这在很大程度上是由于开发了微合金结构钢所致。因为它具有低碳（超低碳）、均质、洁净、微（低）合金化、（超）细晶粒、针状铁素体（贝氏体）、控轧控冷（TMCP+AcC）、高强度（超高强度）、高韧性、易变形、焊接性好、易加工、无污染、加工制造速度快、成本低，及各种焊接结构工作安全可靠等优点。掌握新型工程结构的性能，特别是了解影响焊接结构性能的因素，对于钢铁冶金企业能及时生产出这种性能的微合金结构钢，并进行必要的技术改造，争取销售市场是非常必要的。

1.3 模拟施焊系统

现在在发达国家开发新型焊接结构钢，评估研制焊接结构件及螺旋研究体制时，主要的一个问题是结构件焊接部位及附近的热量状况的分布，也即焊缝和热影响区状况。几十年来做了大量有关结构钢焊接性的工作，在数据库中积累了大量的数据，可以直接有效地利用数据库中最近建立的焊接数据去确定焊接时形成的各种条件下的热源。研究在各种焊接工艺条件下所形成的各种钢的结构件，能够预测热量分布对其所产生的影响，诸如裂纹、力学性能，特别是韧性等，是非常有意义的。

为了准确预测焊接部位及附近的热量特征，现在已可以利用热传导计算的热量分布去设计和预定热源。这样就有可能定量掌握每种焊接方法的热源特性去研究母材、接头形状等各种因素复合作用的熔化行为。

1.3.1 模拟施焊系统的构成和功能

该系统流程如图 1-1 所示，在显示的图面上选择焊接所需接头的坡口形状，然后表示成截面的形状，用鼠标选择焊接位置和范围。由于该系统可以

算出某种情况下必要的熔化宽度、熔化金属的截面积和熔敷金属的截面积，参考这些数值，从焊接数据库中选择合适的焊接方法和工艺条件。模拟系统根据熔合的基本数据，预测出在被选择的坡口形状内的熔合位置或截面状态，并且显示在显示屏上。图 1-2 是使用小热输入焊条电弧焊模拟系统得出的图 1-1 (4) 的输出结果，可以知道平板上和坡口内的焊缝（道）形状完全不同。图 1-3 是采用大热输入 CO_2 气体保护和埋弧焊时的结果，图 1-3a 表示坡口宽度小而坡口高度过高的场合，其底部未熔化；图 1-3b 表示坡口角度稍大一些时，是合适的焊接位置；图 1-3c 表示扩大根部间隔后，过熔的状况。反复进行坡口形状、焊接方法与工艺条件的选择，以便达到最佳的焊接设计。在最后的坡口形状内完全熔合的基础上，预测熔合部位周围形成热影响区的形状和任意位置的热循环曲线，通过必要的热传导计算，确定热源分布。

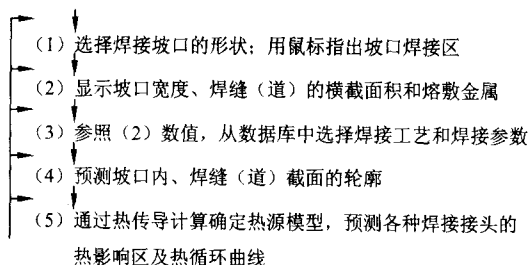


图 1-1 焊接模拟系统流程图

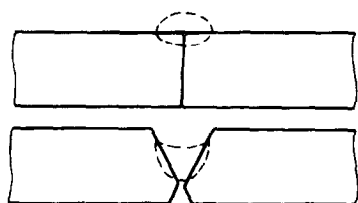


图 1-2 平板上和坡口内焊缝(道)的差别

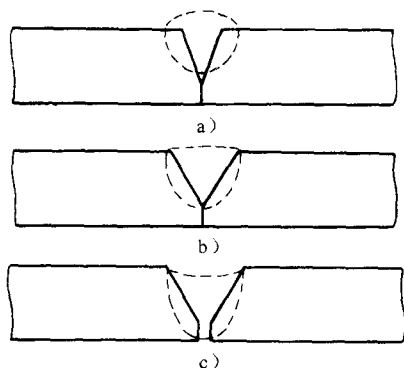


图 1-3 坡口形状对焊缝（道）的影响

a) 底部未熔化 b) 合适的焊接位置 c) 过熔的情况

1.3.2 模拟施焊系统的应用

采用图 1-1 中 (4) 数据库给出的平板上的熔合数据，研究或预测坡口内熔合形状。然后从图 1-1 中 (5) 坡口内熔合形状预测热影响区，确定其热源。图 1-4 为热源模型的示例。假定热源在坡口内的熔化位置接近熔池表面处，

特别是焊接大量熔敷金属的场合，则据其数量的多少，可把热源设定在熔池的后半部分。如果能更准确地预测热源，那么采用一般的方法进行热传导计算是没有问题的。

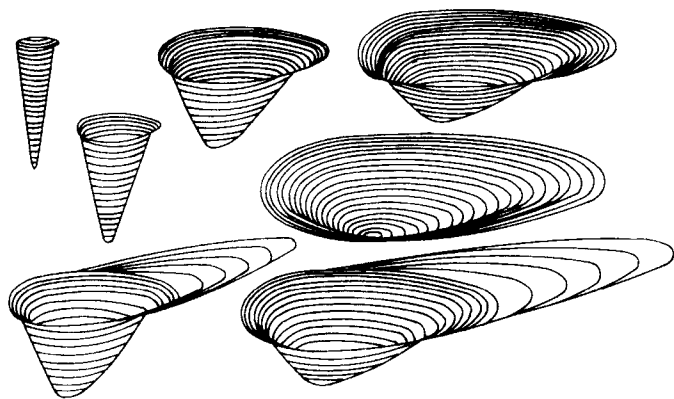


图 1-4 热源模型的示例

目前，日本等国已完成了这一系统的主要研制工作，在某种程度上可以预测近似的热源形状。今后可以与多数实测的示例进行比较，尤其是对图 1-1 中的焊接性的示例进行比较是很有用的，也是很有前景的。

1.4 焊接性评估工艺学的发展

20 世纪 40 年代初从“焊接”观念中派生出“焊接性”的概念以来，这种“焊接性”的概念在结构钢中解决各种焊接裂纹和热影响区（HAZ）的低温韧性等问题发挥了重大作用，促进了结构钢不断发展，也促进了钢铁冶金企业不断地进行技术改造。这已是从 20 世纪 60 年代以来的历史经验中总结出来的客观规律，已得到了发达国家科技学者们的认同。

然而“焊接性”自身的概念也在不断发展。20 世纪末，美国的科技人员又提出了“焊接性评估工艺学”的新概念，从这一新概念产生的新的方法制造的“焊接性评估工艺学万能机构”，见图 1-5。用此机构可以确定结构材料的焊接性，并已取得极好的经济效益。

该试验机的工艺效益有：

- 1) 焊接裂纹的失效分析；
- 2) 改善焊接性的合金和焊接材料的开发；
- 3) 阶段状态转变行为分析；
- 4) HAZ 模拟；
- 5) 防止焊接裂纹的材料、设计和焊接工艺的选择。

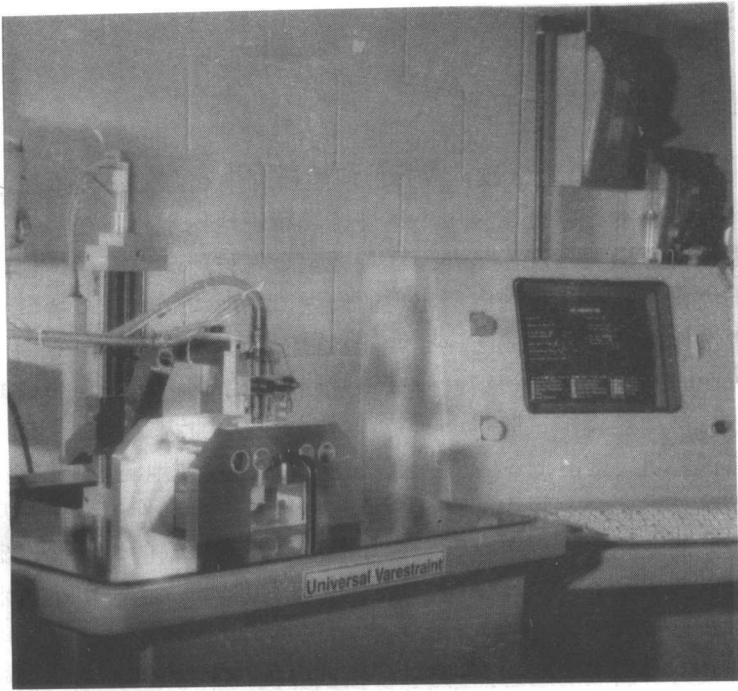


图 1-5 用于评估材料焊接性的万能可调拘束裂纹试验机

由于在上世纪积累了大量有关结构钢和焊接性的研究开发的科学数据和信息，把这种信息和数据编辑到数据库中去，这样数据库中包括了大量的正在广泛使用的工程材料，例如：不锈钢、镍基合金、铝合金、低碳钢和低（微）合金结构钢等。其中特别重要的是焊接结构生产制造厂家在作出决策性评估时，从有关的选择材料和必要的焊接性试验中确定焊接加工工艺，防止各种裂纹产生的可能性。用这种新的方法很容易从焊接性的角度选择材料的试验方法和使用条件，并且可以把新的试验结果不断输入数据库中，开发成为一种可以通用的焊接性试验机构，使各使用单位都可以获得明显的经济效益。

继续开发这种焊接性评估工艺学，充分利用这种半个世纪中积累的结构钢的焊接性研究成果的知识财富，使结构可以对各种裂纹产生阻力。在加工制造结构时形成的对焊接裂纹产生的力学动力的综合理解，对材料开发、设计和焊接工艺的选择是极为重要的。目前对焊接性的研究和开发领域包括：

- 1) 耐热、耐腐蚀合金和主要的结构钢的焊接性评估；
- 2) 焊接试验技术的标准；
- 3) 焊接性加工制造模型；
- 4) 焊接性数据库的开发；
- 5) 合金元素对焊接性的影响；

6) 订正焊接性。

1.5 焊接热模拟技术的发展

“二战”期间从普通低碳钢焊接性问题研究中起源的热模拟技术是一项很重要的先进技术。它可以利用小试件比较精确地揭示材料在热力学加工过程中的组织与性能变化规律,并预测与评定金属材料高温变形,也即实际热力学加工过程、制造和使用中所出现的问题,从而为研究开发新型结构材料及其焊接性和热力学加工工艺等提供重要的依据。

早在 20 世纪 60 年代初钢铁研究总院就制造了国内第一台热模拟试验机——HRJ—1 型热模拟试验机。改革开放后,又在此基础上研制了 HRJ—2 型热模拟试验机,见图 1-6。利用这种试验机可以简便地测试结构钢 HAZ 中奥氏体晶粒长大、金相组织和性能变化,特别是低温韧性的变化以及材料高温力学性能的变化等。我国在低合金高强度钢、不锈钢的焊接性,耐热钢和铸铁等材料的焊接中一直在使用着这一类型的试验机。由于电子技术、计算机技术及热模拟应用技术的不断发展,美国等发达国家对热模拟应用技术进行研究开发,研制成功动态热-力学模拟试验机,即 Gleeble 系列试验机。从此把热模拟技术从主要应用于结构钢焊接性的研究扩展到材料、钢铁、冶金及加工制造的行业中。1981 年我国钢铁研究总院首先引进了 Gleeble—1500 动态热-力学模拟试验机。从此以后,热模拟技术开始在我国结构钢的焊接性

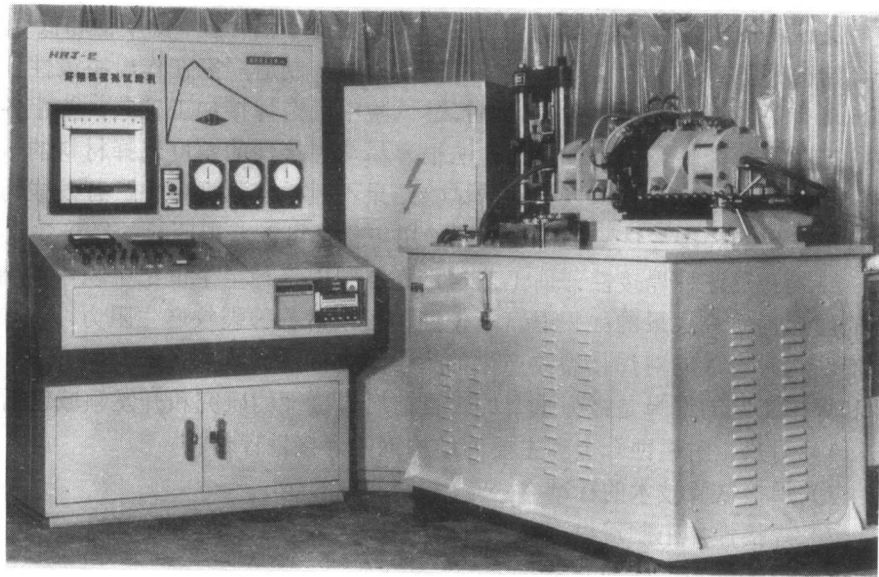


图 1-6 国产 HRJ—2 型焊接热循环模拟试验机