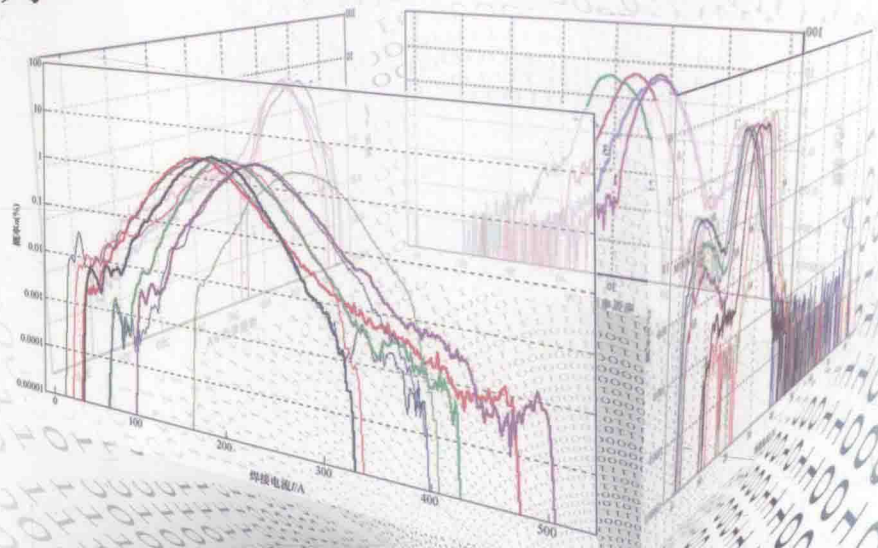


先进焊接技术系列



王 宝 宋永伦 著

焊接材料工艺性的 信息化技术

焊接材料工艺性数字化、信息化的具体实践

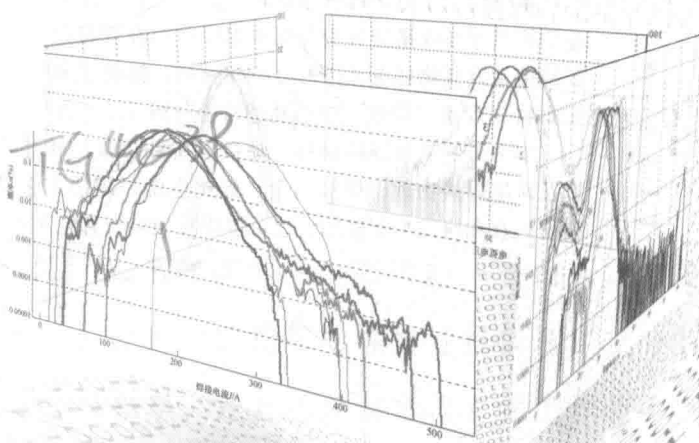


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



扫码观看
熔滴和电弧行为视频

先进焊接技术系列



王 宝 宋永伦 著

焊接材料工艺性的 信息化技术

焊接材料工艺性数字化、信息化的具体实践

本书讨论了电弧焊焊接材料工艺性问题。作者采用电弧-熔滴行为高速摄影技术和汉诺威分析仪获取焊接材料在焊接过程中的数字信息,并对其特征量及其物理意义进行分析和解读,提出了基于数据信息的电弧焊焊接材料(焊条、焊丝)电弧物理特性分析及工艺性定量评价方法。

本书可供从事焊接材料、焊接设备和焊接结构生产制造的科技人员,以及从事焊接物理、焊接冶金、焊接电源、焊接工艺及焊接材料的教学、科研人员和研究生等使用,也可供焊接领域信息化工程科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接材料工艺性的信息化技术/王宝,宋永伦著. —北京:机械工业出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-111-59386-7

I. ①焊… II. ①王… ②宋… III. ①信息技术-应用-焊接材料-材料工艺 IV. ①TG42-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第047837号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐

责任校对:肖琳 封面设计:鞠杨

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22.5印张·8插页·571千字

0 001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-59386-7

定价:89.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

序

本书是作者继《焊接电弧现象与焊接材料工艺性》一书的新篇，是对具有材料、工艺、焊接电源等多因素耦合特征的焊接过程信息实现分解和定量评估的一个持续探讨与知识分享，是对焊接制造信息化工作的一个积极推动。

本书的内容及成果源于作者几十年来专业研究和工程实践的积累，源于从经验感知到科学定量的认识提升，源于对焊接事业的热爱和职业的责任。这是本书中所反映的一种人生精神及意义。

应该充分注意到，我国焊接制造的信息化、数字化将是一个长期的任务，仍需要焊接界各方面的专家学者做出不懈努力，并寄希望于青年一代能够锲而不舍、一步步地开拓这一人类智慧之路。

宋天虎

前 言

计算机、电子、信息等新技术的迅速发展与应用,促进了包括焊接在内的传统制造业向以信息为基础的数字化、智能化方向转型,对产品制造过程和质量的信息获取与处理是焊接制造信息化的重要组成部分,其中金属熔滴的过渡和与之相关联的电弧行为及焊接电参数特征,是应用于焊接信息化技术的最直接的信息源。本书主要以获取这两个方面的特征信息为认识基础,展开对焊接材料工艺性分析和定量评价的研究和讨论。

由于电弧焊的工艺现象大多与电弧过程中熔滴行为相联系,因此讨论弧焊材料工艺性时首先要研究焊接材料在电弧过程中的物理现象,其中熔滴过渡现象是电弧物理现象中最重要的表现。本书以对焊接材料焊接时电弧现象的大量细致的观察为基础,以影响电弧物理特性的主要因素——金属过渡为切入点,对熔化极电弧焊(焊条电弧焊、 CO_2 气体保护焊、混合气体保护焊等)焊接材料(焊条、实心焊丝、药芯焊丝等)焊接过程的熔滴过渡现象与工艺性之间的具体联系、信息特征和物理属性进行数字化分析和解读,由汉诺威分析仪提取反映焊接材料某种工艺状态对应的电弧现象的数据信息,用电弧物理参数加以描述,进一步建立工艺性判据,提出一种基于统计的定量分析和评估的方法,实现焊接材料工艺性数字化评价,这是本书的特色。

焊接材料工艺性的定量分析与评价,是信息化技术在焊接领域中具体应用的范例。

本书在2002年出版的《焊接电弧现象与焊接材料工艺性》一书的基础上增添了一些新的内容,引用了许多具有代表性的熔滴和电弧行为的高速摄影的视频资料,增强了信息的可视化效果。

本书共9章,在第1章引入焊接工程信息化的理念,阐明焊接制造信息的特征与属性,阐述熔化焊过程金属过渡信息的特征和弧焊过程信息的统计特征,指出熔化极电弧焊时金属熔滴过渡现象反映了焊接过程的稳定性、电弧行为的特征、熔化效率、焊接烟尘、飞溅等工艺特性及焊接冶金特性等信息,其特点是具有直观性和可视性,高速摄影技术的采用是获取这一信息的主要手段和途径。以焊接过程电弧电压、焊接电流为信息源,实时采集大量数据,采用概率密度统计法提取焊接过程质量信息的特征值,并且用统计分布图形的方式显示,用以分析和评价熔化极电弧焊过程的固有物理属性,基于计算机和信息技术的自动化、知识化和可视化为特征的汉诺威分析仪是实现这一目标的有效手段。

第2章是讨论焊条电弧焊的电弧现象与对焊条工艺性问题。在这一章中引用对电弧现象观察的实物照片阐述焊条熔滴过渡的基本形态及特征、熔滴过渡形态的波形特征、熔滴过渡形态的电弧物理特性参数的描述、熔滴过渡形态与焊条工艺性的关系、焊条电弧焊熔滴过渡形成机制及焊条工艺性设计等。

第3、4章分别讨论钛钙型、低氢型、高纤维素型及不锈钢四大类焊条的电弧物理特性,在此基础上介绍用焊接质量分析仪对钛钙型、低氢型、高纤维素型及不锈钢四大类焊条提出工艺性定量评价问题。对每一类焊条都按以下思路进行论述:该类焊条熔滴过渡形态—体现最佳焊接工艺性状态的熔滴过渡形态—描述这一熔滴过渡形态电弧物理指数—建立焊条工艺性评价判据—说明工艺性评价方法的实例。

由于四大类焊条电弧物理特性的显著差异,对每一类焊条的电弧物理特性的分析便是这两

章最主要的内容,这两章最能体现焊接电弧物理现象与焊接冶金和焊接工艺性的渗透与融合。

第5章以近年来作者对药芯焊丝 CO_2 气体保护焊(以常用的钛型药芯焊丝为对象)电弧物理现象的试验观察为基础,引用较多的高速摄影实物照片对药芯焊丝熔滴过渡形态、飞溅现象、熔渣的滞熔现象、焊接过程的烟尘、电弧行为等电弧物理现象进行描述、分析和总结,提出了若干学术观点。

第6章分别讨论药芯焊丝和实心焊丝电弧焊物理特性及工艺性评价问题。以钛型药芯焊丝为例讨论了在不同的焊接参数下(即小参数、中等参数和大参数下)药芯焊丝工艺性的评价问题,提出了以短路周期均匀性(即短路周期变异系数)为判据评价药芯焊丝工艺性的方法。

第7章讨论碱性药芯焊丝电弧物理现象,碱性药芯焊丝药芯成分含有多量的氟化物和碱性氧化物,这一渣系组成决定了碱性渣具有较大的表面张力并使其具有粗熔滴过渡的基本属性。文中分别讨论了碱性药芯焊丝的熔滴的排斥过渡和细熔滴过渡现象,在此基础上提出可以用焊接电弧电压和焊接电流的变异系数作为判据,评价焊丝的工艺性。

第8章讨论金属粉芯焊丝和自保护药芯焊丝的电弧物理特性和工艺性问题。试验表明适用于富氩气体保护焊的金属粉芯焊丝在正常的焊接参数下熔滴为射流过渡,焊接过程进入稳定状态,指出对于可用于 CO_2 气体保护焊的金属粉芯焊丝与普通熔渣型的药芯焊丝一样,可以采用短路周期变异系数为判据对金属粉芯焊丝进行工艺性评价,而对于适用于富氩气体保护焊的焊丝则采用焊接电流变异系数为判据对其进行工艺性评价。本章对自保护药芯焊丝焊接时的熔滴与熔渣行为进行描述和分析,指出高氟化物碱性熔渣成就了自保护药芯焊丝特殊的熔滴行为,并基于自保护药芯焊丝特殊的电弧物理特性,提出了以焊接电流变异系数为判据,通过比较焊接电流变异系数值的大小,定量地判断和评价同类型不同厂商产品的工艺性差异。

本书的实用性体现在第9章,本章用了较大篇幅列举了焊接质量分析仪多个方面的应用实例,包括焊条电弧焊、药芯焊丝 CO_2 气体保护焊和自保护药芯焊丝工艺性的评价实例、“焊接材料工艺质量分析与评估”专业版软件及应用、焊接材料制造企业用于产品质量的监测和信息化管理的案例、焊接过程质量监测的实例、焊接质量分析仪在焊接电源和焊接过程优化方面的应用实例等,体现了本书研究成果的工程应用。著作本身的目的在于使读者共享其成果并且能够应用,这些实例对读者实际应用焊接质量分析仪起着引导作用。

本书仅反映作者的某一阶段学术研究和实际工作成果。由于作者的水平以及试验工作的局限,书中存在诸多不足。近年来,随着测试技术的不断提高,作者期待对焊接电弧物理等工艺理论问题的研究在更多专业工作者的广泛关注和参与下,在深度和广度方面取得更大进展,为焊接工程的应用提供更为坚实有效的理论支持。

本书撷取了不少描述熔滴和电弧行为的高速摄影照片和视频资料,得益于太原理工大学王勇博士,中北大学张英桥博士出色的工作,在本书出版之际,作者谨向他们表示感谢。

应该特别提到,本书引用了杨林、高俊华、戴军、孟庆润和李海明等众多研究生们的工作成果,是本书内容的重要组成部分,本书的出版是对他们工作成果的赞许。

作者

目 录

序

前言

第1章 熔焊过程信息及数字化特征	1
1.1 焊接制造由经验向信息化和数字化的转变	1
1.2 焊接制造信息的特征与属性	2
1.3 熔化焊过程金属过渡信息的特征	4
1.4 弧焊过程信息的统计特征	7
1.5 焊接制造的信息化与数字化	13
参考文献	14
第2章 焊条电弧焊的电弧现象与焊条工艺性	16
2.1 焊条电弧焊粗熔滴短路过渡与渣壁过渡	16
2.1.1 焊条电弧焊粗熔滴短路过渡	16
2.1.2 焊条电弧焊熔滴的渣壁过渡	22
2.1.3 粗熔滴过渡与渣壁过渡的形成机制	25
2.2 焊条电弧焊熔滴的爆炸过渡与喷射过渡	29
2.2.1 焊条电弧焊熔滴的爆炸过渡现象	29
2.2.2 焊条电弧焊熔滴的喷射过渡现象	31
2.2.3 焊条电弧焊爆炸过渡与喷射过渡形成机制	33
2.3 焊条熔滴过渡形态的电弧物理特性数字化信息	40
2.3.1 焊条熔滴过渡形态电弧电压、焊接电流概率密度分布图	41
2.3.2 焊条典型熔滴过渡形态数字化信息的解读	42
2.4 焊条熔滴过渡形态对焊条工艺性的影响	43
2.4.1 熔滴过渡形态对电弧稳定性的影响	43
2.4.2 焊条熔滴过渡形态对飞溅的影响	46
2.4.3 熔滴行为对电弧热效率的影响	46
2.4.4 熔滴过渡形态与焊条工艺性的关系	48
2.5 焊条工艺性设计	49
2.5.1 焊条熔滴过渡的主导力与 $P' - P''$ 关系图	49

2.5.2 焊条工艺性设计原则	52
参考文献	53
第3章 结构钢焊条的电弧物理特性与工艺性	55
3.1 钛钙型结构钢焊条的电弧物理特性与工艺性	55
3.1.1 钛钙型结构钢焊条熔滴过渡形态	55
3.1.2 钛钙型结构钢焊条的飞溅现象	61
3.1.3 钛钙型结构钢焊条的波形特征	62
3.1.4 钛钙型结构钢焊条的工艺性评价	69
3.2 低氢型结构钢焊条电弧物理特性与工艺性评价	74
3.2.1 低氢型结构钢焊条熔滴行为的一般特征	74
3.2.2 低氢型结构钢焊条的“弧桥并存”现象与工艺性	81
3.2.3 低氢型结构钢焊条的电弧物理特性	84
3.2.4 低氢型结构钢焊条工艺性判据的建立	87
3.2.5 低氢型结构钢焊条工艺性分析与评价案例	87
3.3 高纤维素焊条的电弧物理特性及工艺性评价	90
3.3.1 高纤维素焊条的熔滴过渡现象及工艺性	90
3.3.2 高纤维素焊条电弧物理特性的数字化信息	95
3.3.3 高纤维素焊条工艺性评价判据	98
参考文献	99
第4章 不锈钢焊条的电弧物理特性与工艺性	101
4.1 不锈钢焊条的工艺稳定性及试验方法	101
4.1.1 不锈钢焊条工艺稳定性的概念	101
4.1.2 不锈钢焊条工艺稳定性的测试方法	101
4.2 不锈钢焊条的电弧物理特性	109
4.2.1 钛钙型不锈钢焊条熔滴行为的可视化信息	109
4.2.2 高钛型不锈钢焊条熔滴行为的可视化信息	113
4.2.3 不锈钢焊条电弧物理特性的数字化信息	119
4.3 不锈钢焊条工艺稳定性的影响因素及不锈钢焊条的设计	125
4.3.1 不锈钢焊条工艺稳定性的影响因素	125
4.3.2 提高不锈钢焊条工艺稳定性的根本途径及不锈钢焊条的设计	129
4.4 不锈钢焊条工艺稳定性评价	132
4.4.1 以短路电压概率评价不锈钢焊条工艺稳定性	132
4.4.2 以短路频率评价不锈钢焊条工艺稳定性	132
参考文献	134
第5章 药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊的电弧现象	135
5.1 药芯焊丝 CO ₂ 气体保护焊的熔滴过渡形态	135

5.1.1	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊熔滴的排斥过渡	136
5.1.2	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊熔滴的表面张力过渡	147
5.1.3	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊细熔滴过渡	157
5.2	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊时熔渣的滞熔现象分析	164
5.2.1	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊时渣柱的形成及特征	164
5.2.2	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊时渣柱行为对熔滴过渡的影响	167
5.2.3	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊时熔渣的行为对飞溅的影响	172
5.3	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊的飞溅现象	173
5.3.1	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊熔滴电爆炸飞溅	174
5.3.2	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊再引弧飞溅	180
5.3.3	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊的熔滴中气体逸出飞溅	184
5.3.4	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊的熔池中气体逸出飞溅	185
5.3.5	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊的熔滴飘离飞溅	186
5.3.6	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊熔滴过渡形态对飞溅的影响	188
5.3.7	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊焊接过程不稳定时的飞溅现象	189
5.3.8	焊条电弧焊与 CO_2 气体保护焊时飞溅现象的总结	191
5.4	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊时的电弧行为	193
5.4.1	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊排斥过渡时的电弧行为	193
5.4.2	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊细熔滴过渡时的电弧行为	194
5.5	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊时的烟尘	195
5.5.1	药芯焊丝 CO_2 气体保护焊烟尘的形成	195
5.5.2	影响烟尘的电弧物理因素分析	197
5.5.3	药芯焊丝烟尘异常析出现象	200
参考文献		200
第6章 CO_2 气体保护焊焊丝的工艺质量分析与评价		203
6.1	CO_2 气体保护焊熔滴行为与工艺性分析	203
6.1.1	熔滴行为的观察和分析	203
6.1.2	汉诺威分析仪的测试结果	206
6.2	CO_2 气体保护焊药芯焊丝工艺质量评价	210
6.2.1	小焊接参数下药芯焊丝工艺性的评价	210
6.2.2	较大焊接参数下药芯焊丝工艺性的评价	213
6.2.3	大焊接参数下药芯焊丝工艺性的评价	217
6.2.4	采用信号分析方法评价大参数下药芯焊丝工艺性	221
6.3	CO_2 气体保护焊实心焊丝电弧物理特性和工艺性评价	223
6.3.1	CO_2 气体保护焊实心焊丝工艺性及电弧物理特性试验	223
6.3.2	CO_2 气体保护焊实心焊丝工艺性的评价	229
参考文献		230

第7章 碱性药芯焊丝的电弧物理特性及焊接工艺性	231
7.1 碱性药芯焊丝的电弧物理特性	231
7.1.1 碱性药芯焊丝的熔滴行为及电弧电压、焊接电流波形分析	231
7.1.2 碱性药芯焊丝的 PDD 图和 $U-I$ 图分析	233
7.2 碱性药芯焊丝的熔滴排斥过渡现象	239
7.2.1 碱性药芯焊丝熔滴排斥过渡的一般特征	239
7.2.2 碱性药芯焊丝熔滴排斥过渡的飞溅现象	241
7.2.3 碱性药芯焊丝熔滴排斥过渡对电弧稳定性的影响	246
7.3 碱性药芯焊丝的细熔滴过渡	248
7.3.1 碱性药芯焊丝的细熔滴过渡特征	248
7.3.2 碱性药芯焊丝细熔滴过渡时的飞溅现象	253
7.4 焊丝的药芯成分对熔滴行为的影响	256
7.5 碱性药芯焊丝工艺质量的评价	258
参考文献	260
第8章 金属粉芯焊丝和自保护药芯焊丝的电弧物理特性	261
8.1 金属粉芯焊丝的电弧物理特性	261
8.1.1 金属粉芯焊丝 CO_2 气体保护焊的电弧物理特性	261
8.1.2 金属粉芯焊丝混合气体保护焊和 Ar 弧焊的电弧物理特性	271
8.2 自保护药芯焊丝的电弧物理特性	279
8.2.1 自保护药芯焊丝的一般概念	279
8.2.2 自保护药芯焊丝的电弧物理特性	280
8.2.3 自保护药芯焊丝焊接参数对焊接过程稳定性的影响	290
8.2.4 自保护药芯焊丝焊接过程稳定性的评价	297
8.3 焊接材料熔滴过渡形态的形成机制和工艺性评价判据	300
参考文献	303
第9章 焊接信息化在焊接材料技术中的应用	305
9.1 焊接材料工艺质量分析与评价	305
9.1.1 焊条工艺性的测试实例	305
9.1.2 自保护药芯焊丝工艺性的评价实例	308
9.1.3 CO_2 气体保护焊药芯焊丝工艺性的测试实例	310
9.1.4 关于分析仪参数的设置	318
9.1.5 焊接电源的性能对焊接材料测试结果的影响	321
9.2 “焊接材料工艺质量分析与评估系统”软件介绍及应用	327
9.2.1 “焊接材料工艺质量分析与评估系统”软件介绍	327
9.2.2 应用系统软件评估 CO_2 气体保护焊药芯焊丝工艺性的实例	328
9.2.3 应用系统软件评估焊条工艺性的实例	329

9.3 焊接材料产品质量信息化管理	331
9.3.1 焊接产品质量信息化的基本概念	331
9.3.2 焊接信息化在焊接材料产品质量管理中的应用	332
9.3.3 焊条产品质量稳定性评价案例	333
9.3.4 药芯焊丝产品质量稳定性评价案例	335
9.3.5 焊接材料产品工艺质量的定量评估与定位	341
9.4 焊接信息化在焊接电源和焊接工艺方面的应用实例	343
9.4.1 焊接过程的监测	343
9.4.2 弧焊电源的工艺性分析与评价	346
9.4.3 自动化焊接熔深信息的提取与焊接参数优化	347
参考文献	350
附录 焊接材料信息化图谱	351
附录 A 焊条电弧焊结构钢焊条信息化特征	351
附录 B 不锈钢焊条信息化特征	356
附录 C 几种典型焊条的短路频率分布图	359
附录 D 药芯焊丝 CO ₂ 气体保护焊信息化特征	359
附录 E 碱性药芯焊丝熔滴行为信息化特征	362
附录 F 金属粉芯焊丝气体保护焊信息化特征	363
附录 G 自保护药芯焊丝电弧物理信息化特征	365



熔焊过程信息及数字化特征

计算机、电子、信息等新技术的迅速发展与应用促进了包括焊接在内的传统制造业向以信息为基础的数字化、智能化方向转型，从而进入了信息驱动的现代制造时代。从信息的技术角度看，数字是用于表示事物与事物之间定量关系的符号，是信息的载体及其物理意义的表达形式，并可通过网络实现数字信息的有效传递，是驱动制造活动的一种技术途径。因此以信息技术为基础的数字化装备以及具有相关数字资源支持的制造环境，是数字化制造技术构成的基础，从而使传统的制造经验逐步变为可记录、可保存、可定量分析和可对比评估的现代智能化制造技术。

随着焊接产品对高品质、高效率和精细化要求的提高，对产品制造过程和质量信息的获取与处理已成为焊接制造业信息化的重要组成部分。本书是以焊接电弧物理现象的观测认识为基础，对熔化极电弧焊（焊条电弧焊、CO₂气体保护焊、氩弧焊和混合气体保护焊等）焊接材料（药皮焊条、实心焊丝、药芯焊丝等）的焊接过程的特征信息、物理属性进行数字化解析，对焊接材料的工艺性提出基于统计的定量的分析和评估方法。

1.1 焊接制造由经验向信息化和数字化的转变

我国焊接制造能力提升的瓶颈较突出地表现为焊接工艺依赖于经验类比和繁衍，焊接装备缺乏工艺知识库的支持，焊接材料的研发与工艺效果有的难以用数据精确表达，焊接工程的数字化模拟仿真技术与工艺优化脱节，焊接成形过程中对形状、性能、质量等特征参数缺乏实时检测手段，基于网络的焊接生产环节协同能力弱以及产品制造过程和质量管理的信息量不足等。焊接产品性能的高端化、结构的大型化、复杂化、精细化和功能的多样化，尤其是现代重大装备的服役正趋向各类“极限”工作环境，以及对大型、超大型装备和结构提出的长寿命、高可靠要求，从而使产品所包含的设计信息、工艺信息、制造过程的信息量显著增加，使焊接生产和焊接设备所需要的信息支持增加，同时对焊接制造过程工艺、质量和管理工作信息需求也必然增加，因此也成为促使传统焊接制造向提高制造信息处理能力、效率及规模方向发展的原动力，即由传统的能量驱动型转变为信息驱动型。在多元的市场需求和激烈竞争环境下，要求制造系统表现出更高的灵活和敏捷，以及产品的更高性能和生产的更高效率，并在现代工业的发展需求和相关技术的支撑下，逐步形成新的制造理念，实现焊接制造的信息化、数字化，以至未来的智能化。

图 1-1 所示为依赖经验的生产方式与基于信息的现代制造之间的联系与区别，其中包括事物本体和认识主体的不对称及固有差异，制造信息由定性到定量、由“个性”向“共性”的转化，反映了从传统经验到现代智能的四个发展层次。

图 1-2 所示为制造信息的内涵形成与其发展轨迹，为数字化、智能化制造提供了基础和资源。

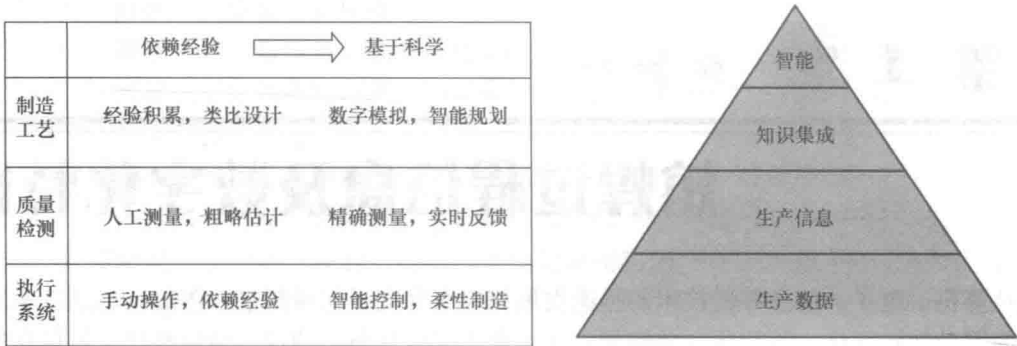


图 1-1 传统生产方式与基于信息的现代制造之间的关系及其四个发展层次^[1]

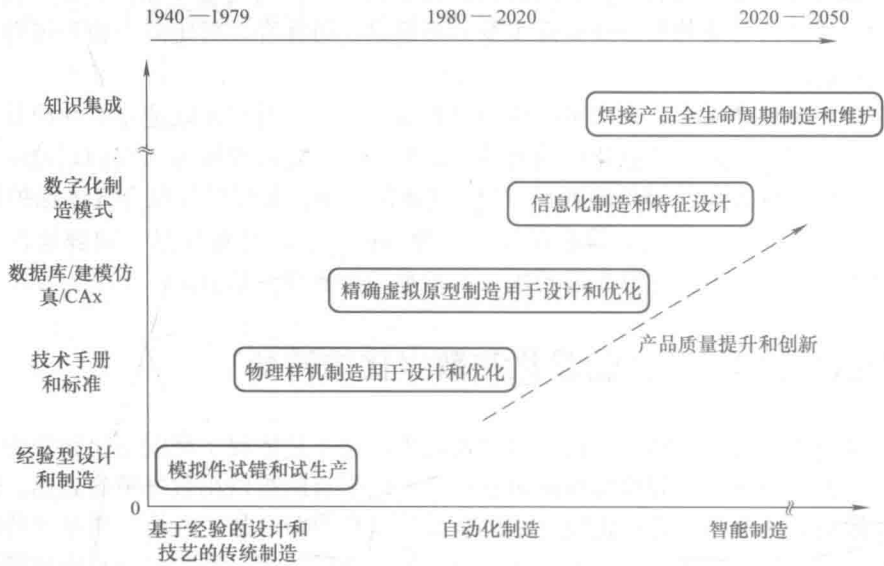


图 1-2 制造信息的内涵形成与其发展轨迹^[1]

1.2 焊接制造信息的特征与属性

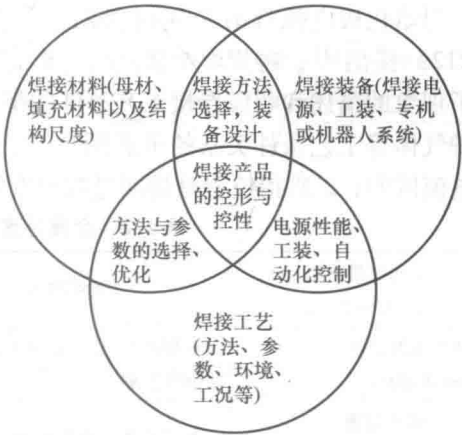
“信息”自古以来就受到人们的重视，我国的“孙子兵法”中尤其强调信息的重要性，如“知己知彼，百战不殆”，说的就是为了减少决策风险，一定要充分获取有关的信息。近代控制论把信息定性为“认知主体与外部环境之间的相互联系、相互作用过程中相互交换的内容”。包括焊接在内的制造信息是一种专业领域信息，它的本质和属性与信息有共性的一面，同时又具有其本领域自身的特征。焊接制造过程不仅具有信息的多领域、学科跨度大的一面，还表现为参数的耦合性强且带随机干扰的一面。当前以手工、经验型作业为基础的焊接制造信息的构成表现为三个方面：一是主观的、实践的且分散在人们头脑中的经验知识，以及以标准、规范、手册或各种教材汇总形成的资料形式的知识；二是逐步开发中的专



用数据库、专家系统、仿真预测软件等，力求信息表达的精度、延伸其规律性；三是在焊接制造过程中通过传感器在线获取的以电量和非电量、数字信号和图像等形式表达的有关焊接参数、接头质量、产品服役等信息。焊接数字化系统的基本功能之一就是把这些分散的和规范化的、定性和定量的、模拟和数字的以及不同程度可视的信息进行汇总、分析、集成、优化和适量利用。同时，作为智能制造发展所依赖的基础，信息的质量始终是被关注的重点，对焊接信息要求真实、清晰、时间和空间的分辨、一致性程度、可重构程度、安全性及包容性、二次开发程度以及信息的可表达、可视形式等。

随着计算机与信息处理技术的工程化能力的日益增强，焊接制造信息软件与新一代硬件的共同演化将不断生成一种基于数字化的物质形态，即以软件技术为动力，在互联设备的网络、云服务及大数据等支持下，为用户提供高度知识化分析与专业化决策，从而成为焊接数字化、智能化制造的重要特征。在这一技术背景下，信息化形式将不断提高，信息化内涵和外延将不断丰富，信息化从点到面、从内到外的发展和应用使企业的生产方式、管理方法、企业间协同、营销手段等产生巨大变化。

焊接制造信息是一种专业信息，具有多领域、多因素的特征，涉及焊接材料、焊接装备及焊接工艺三大板块，具有方法、参数、工况、环境等各因素的强耦合、难以量化、带随机干扰等特点^[1]。图1-3为焊接制造信息的多领域、多因素特征的示意图。



焊接信息的属性一般可分为三大类：一是确定性的可定量表达的，如焊接速度、送丝速度、气体流量等；二是具有随机性的信息，如熔滴短路时间、短路频率、焊接过程的电流、电压等，需要借助于统计方法来分析、提取其特征值；三是大量不确定的非结构化数据，如

图1-3 焊接制造信息的多领域、多因素特征^[1]
焊件的装配间隙、散热条件、各态温度场、残余应力分布、热源能量的分配等，这些信息大部分难以用传统的传感技术获取和处理。

熔化极电弧焊过程在时间与空间方面的特征及工程应用的意义见表1-1。其中金属熔滴的过渡和与之相关联的电弧行为以及焊接电参数特征，是应用于焊接信息化技术的最直接的信息源。本书主要以获取这两个方面特征信息为认识基础，展开焊接材料工艺性分析和定量评价的研究和讨论。

表 1-1 熔化极电弧焊过程的主要信息、特征及工程应用意义

焊接过程信息	时间分辨（要求）	空间分辨（要求）	工程应用意义
电弧状态与金属过渡	ms, μ s	mm	电弧宏观形貌、几何尺度；熔滴过渡类型、频率、均匀性和稳定性等
焊接电参数 (焊接电流、电弧电压)	μ s	—	焊接参数调整与优化，焊接过程稳定性，热输入等
电弧热物理量以及相应的“力效应”	ms, μ s	mm	能量密度与分布，焊缝成形与质量

1.3 熔化焊过程金属过渡信息的特征

熔化极焊接时金属熔滴过渡现象反映了焊接过程的稳定性、电弧行为的特征、熔化效率、焊接烟尘、飞溅等工艺特性及焊接冶金特性等信息，其特点是具有直观性和可视性，是熔化焊信息化技术中主要的信息获取来源，高速摄影技术的采用是获取这一信息的主要手段和途径。对熔化极电弧过程金属过渡现象观测与机理的探讨可追溯到 20 世纪三、四十年代，最初的认识是从对焊条电弧焊熔滴过渡形态的观察和研究开始，然后逐步发展到对熔化极实心焊丝气体保护焊、药芯焊丝气体保护焊以及近年来对可控的熔滴过渡形态的研究。

在熔化极气保焊中，焊丝和药皮的类型及化学组分、保护气体成分、焊接参数以及电源特性和极性等冶金因素和物理因素的综合作用，直接影响焊丝末端的熔滴向熔池过渡的模式、尺寸大小、过渡频率，飞溅等熔滴行为特征，并由此影响焊接冶金过程、焊缝成形质量和焊接过程的稳定性。

对熔化极电弧焊时金属过渡的分类在 1976 年由国际焊接学会焊接物理专委会（IIW SG212）提出^[2]，将焊丝金属过渡的形态分为三类十种，见表 1-2。表中对不同的过渡形态做了现象的描述和相应焊接工艺条件的举例^[2-5]。图 1-4 是各种熔滴过渡形态与焊接电流、保护气体等工艺条件关系的示意图^[6]。图中 1 所指的位置是熔滴过渡形态第一次发生变化的电流区间；2 所指位置是熔滴过渡形态第二次变化的电流区间。

表 1-2 金属过渡形态的分类及现象描述^[2-5]

金属过渡形态 的分类	现象描述	焊接工艺条件举例 (焊材, 气体, 电流)
1. 自由飞落过渡 Free flight	在焊丝熔化末端与熔池之间无机械性接触	—
1.1 球滴过渡 Globular	熔滴生长大于焊丝直径	—
1.1.1 球滴状过渡 Globular drop	熔滴有序脱离并通过弧柱自由过渡	实心焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ , 小到中等电流 酸性焊丝 (药芯焊丝), 80% Ar + 20% CO ₂ , 小电流 金属芯焊丝 (FCW), 80% Ar + 20% CO ₂ , 小电流
1.1.2 球状排斥过渡 Globular repelled	熔滴无序地在一侧脱离并通过弧柱自由过渡	实心焊丝, CO ₂ , 中到大电流 酸性焊丝 (药芯焊丝), CO ₂ , 中到大电流 金属粉芯焊丝, CO ₂ , 中到大电流
1.2 喷射过渡 Spray	熔化的焊丝末端变尖, 具有很大的电流密度, 熔滴通过弧柱过渡, 尺寸小于焊丝直径	—
1.2.1 滴状喷射过渡 Projected	焊丝末端变尖, 具有很大的电流密度, 熔滴脱离的频率较高	实心焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ , 中等电流 酸性焊丝 (药芯焊丝), 80% Ar + 20% CO ₂ , 小到中电流 金属粉芯焊丝, CO ₂ , 小到中电流 直流正接含稀土实心焊丝, CO ₂ , 中到大电流

(续)

金属过渡形态的分类	现象描述	焊接工艺条件举例 (焊材, 气体, 电流)
1.2.2 轴向射流过渡 Streaming	焊丝末端具有很大的电流密度且有明显的指向, 细小、连续的熔滴如金属的流体	实心焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ , 大电流 酸性焊丝 (药芯焊丝), 80% Ar + 20% CO ₂ , 大电流 金属粉芯焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ , 大电流
1.2.3 旋转射流过渡 Rotating	焊丝末端具有很大的电流密度、有明显的指向且不停旋转	实心焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ , 很大的电流 金属粉芯焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ , 很大的电流
1.3 爆破过渡 Explosive	熔滴一脱离焊丝末端就形成各种形状的细小颗粒向熔池过渡	直流正接碱性焊丝 (药芯焊丝), CO ₂ , 中到大电流 焊条电弧焊
2. 桥接过渡 Bridging transfer	熔化的焊丝末端与熔池接触	—
2.1 短路过渡 Short circuiting	熔化的焊丝末端与熔池接触形成短路	实心焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ /CO ₂ , 小电流 酸性焊丝 (药芯焊丝), 80% Ar + 20% CO ₂ /CO ₂ , 小电流 金属粉芯焊丝, 80% Ar + 20% CO ₂ /CO ₂ , 小电流 直流正接含稀土实心焊丝, CO ₂ , 小电流
2.2 无间断桥接模式 Bridging without interruption	—	外加填充丝
3. 渣保护过渡 Slag protected transfer	金属熔滴沿焊剂的液柱流动并进入熔池	—
3.1 渣一壁导向过渡 Flux wall guided	—	埋弧焊 酸性焊丝 (药芯焊丝), 80% Ar + 20% CO ₂ /CO ₂ , 小电流 高钛型不锈钢焊条
3.2 其他过渡 Other modes	—	药皮焊条、药芯焊丝、电渣焊等

焊接时金属熔滴的基本过渡模式是焊接技术发展到现在阶段的表现与归纳。近年来, 随着新型弧焊电源的发展及其控制技术的进步, 输出电流的幅值、极性、频率等获得了高的动态特性, 能够通过“源”的能量输出模式的变化赋予“弧”具有新的热特性和力特性。其主要表现在两个方面: 一是产生了可控的熔滴过渡形态、复合过渡形态并在实际工业中得到应用, 促进了对焊接“金属过渡”概念与内涵的

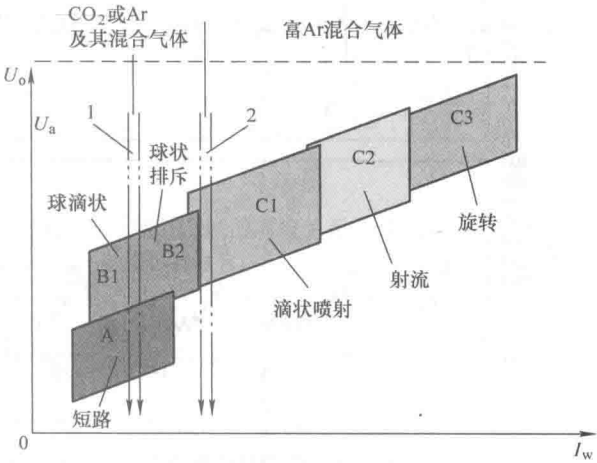


图 1-4 熔滴过渡形态与电流、保护气体等关系的示意图^[6]

扩展；二是增强了电弧能量传递的可控性，能够实现焊缝熔深、焊接接头组织与性能、热变形与工件应力状态等的改善。因此为了满足焊接自动化的发展和焊接产品质量保证的需求，有必要更多地了解并针对不同材料、焊接工况条件选择适用的金属过渡模式。对基本过渡模式的认识仍需要在技术发展中不断深化，熔滴过渡模式分类的不断细化，实际上已成为工程与工艺实施中优化熔滴过渡模式、熔池与焊缝成形和减少冶金性缺陷等问题的一个必不可少的认识与发展的基础。

表 1-3 是对可控的金属过渡的分类^[5-12]。

表 1-3 可控的金属过渡的分类^[5-12]

金属过渡形态	模式细致分类	焊接工艺/条件举例	技术专用名称
受控短路过渡	电流控制的短路过渡	特殊电流波形控制的熔化极气体保护焊电源	表面张力过渡 (SIT)、冷弧焊 (Cold arc)
	送丝可控的短路过渡	机械式往复抽送、脉动送丝	冷金属过渡 (CMT)，可控短路过渡 (CSC)
受控射流过渡	脉冲过渡	可变频率脉冲的滴状射流	超威弧 (Force arc)，双脉冲 (Double pulse)、超脉冲 (Super pulse)，双丝协同 (Tandem)

基于以上认识，焊接的电弧-熔滴行为及其特征，是焊接过程中一个重要的、基本的信息源，它一方面通过电弧能量的控制来优化过渡与过程稳定，另一方面，还为获得优质的焊接接头提供冶金与热循环等条件。图 1-5 所示为在富氩混合气体 (82% Ar + 18% CO₂) 条件下不同熔滴过渡形态与电流、电压信号之间的对应关系，从而有助于建立起熔滴过渡信息与电信号相关过程的认识及其物理模型。然而这仅仅是以直观方式获得定性认识的第一步，将这些信息数字化并分析其特征与规律，才能使传统的“经验定性思维”转变为“数字定量思维”。

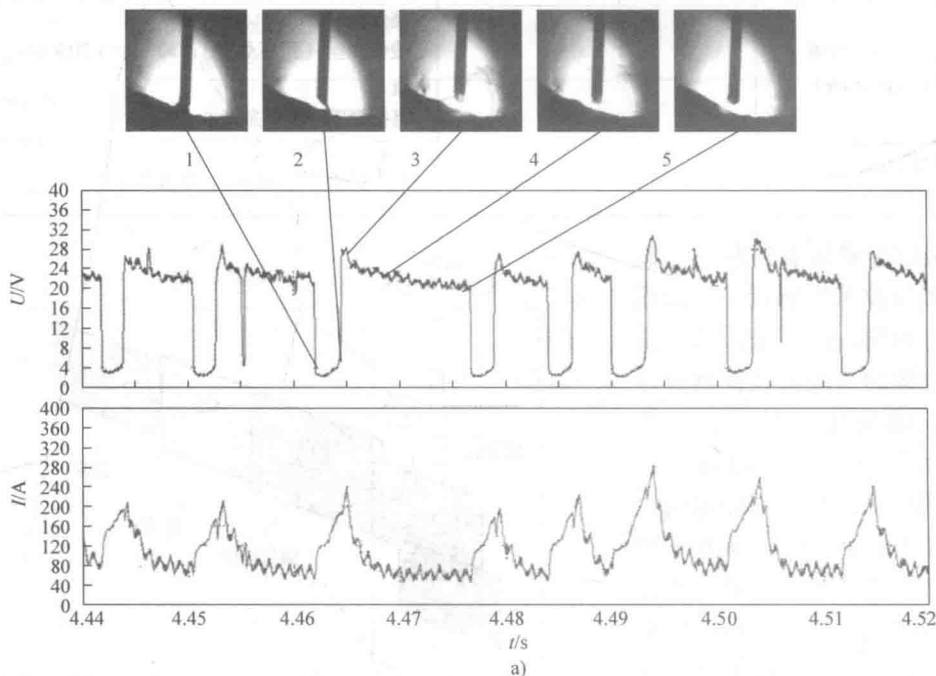


图 1-5 熔滴过渡形态与电流、电压信号之间的对应关系

a) 短路过渡