

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 工艺—1

焊接工艺与失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社



机械产品失效分析丛书

(工艺—1)

焊接工艺与失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

张文钺 杜则裕 秦伯雄 编著



机械工业出版社

本书系统地讨论了焊接结构发生失效的各种形式及其危害性，从机理上探讨各种影响因素和防治措施，并对国内一些典型焊接产品的失效进行了案例分析。

本书可供从事焊接结构设计、制造和进行失效分析的人员以及大专院校师生参考。

机械产品失效分析丛书

(工艺—1)

焊接工艺与失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

张文钺 杜则裕 秦伯雄 编著

责任编辑：武江

封面设计：郭景云

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号楼)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

小崔各庄乡印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $12^{1/8}$ · 字数 314 千字

1989年4月北京第一版·1989年4月北京第一次印刷

印数 0,001—4,160 · 定价：9.20元

ISBN 7-111-01022-1/TG·237

前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性技术，在一些国家中已将它作为一门新的独立学科加以研究和发展。这是因为尽管人们所掌握的机械设计、材料、工艺、管理等知识不断地丰富与深化，所运用的技术手段不断地更新与完善，但机械产品的失效事故仍经常发生，一些重大的失效事件往往会招致生命和财产的巨大损失。所以必须系统地研究机件的失效类型、鉴别失效类型的技术、预测及监控失效的方法、改进与预防失效的措施等。这方面的知识不仅对专业失效分析工作者是不可缺少的，就是对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员也都是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式、发生的条件、控制及预防措施等有深刻的理解，才可望在创造优质产品方面获得成功。

为了在我国开展失效分析工作，中国机械工程学会于1980年在北京召开了第一次全国机械产品失效分析学术会议，随后，中国机械工程学会材料学会又组织过多次全国性的失效分析学术会议。为了广泛开展失效分析工作，普及失效分析的基本知识，提高失效分析的技术水平，扩大失效分析工作队伍，进一步促进失效分析工作在机械工业中的深入发展，使失效分析工作在国民经济的发展中发挥更大的作用，材料学会决定组织编写《机械产品的失效分析》丛书，并责成材料学会编辑出版委员会负责组织丛书的编写工作。

丛书共分三大部分：第一部分为失效分析的基础知识；第二部分为常用机械零件的失效分析，第三部分为工艺失效分析。

丛书编写的特点是讲求实用性，强调综合分析，引导读者如何正确地进行失效分析工作，因此用较多的篇幅介绍近期的应用

AAR 21/07 -

实例，反应我国失效分析的技术水平、主要成果和经验，同时适当地引入国外先进经验以资借鉴。

在丛书编写过程中，中国机械工程学会秘书长许绍高，中国机械工程学会出版编辑委员会主任陈元直给予了极大的关注和指导。在此对参加丛书编写人员所在单位的领导对本丛书编写所给予的大力支持表示感谢。

这套丛书是供从事机械产品设计、制造、使用、维修的具有中专以上程度的工程技术人员及技术管理人员使用，也可供科研人员和大专院校师生参考，并可做为组织失效分析训练班的教材使用。

由于编著者水平有限，缺点错误之处在所难免，望各界读者批评指正，以便进一步修改补充

中国机械工程学会材料学会

1988

中国机械工程学会材料学会

机械产品失效分析丛书编委会成员

主任委员：王仁智

副主任委员：钟群鹏

委员（按姓氏笔划序）

王仁智 方婉莹 刘民治 陈玉民 陈南平 张绪江

赵 坚 钟群鹏 唐汝钧 涂铭旌 虞 鹏 栗 滋

顾问：周惠久 张协和 陶正跃

编者的话

本书比较系统地讨论了焊接产品（包括部件及整体的焊接结构）发生失效的各种形式及其危害性。在讨论中力图用通俗的语言阐述焊接产品失效的本质，从机理上探讨各种影响因素和防治措施，使读者掌握焊接产品各类失效的基本规律，从而正确地分析产生失效的原因和不断提高焊接产品的质量。

本书还收集了国内某些焊接产品的典型失效实例在相应的各章最后进行案例分析，采用现代金属学、冶金学、强度学、断裂力学以及焊接工艺学等方面的知识深入探讨失效的原因。

本书从内容上分为四大部分，共十二章。

第一部分：即第一章，主要概述了焊接产品的各种缺陷引起的失效，在焊接生产中造成的巨大危害，以及国内外的研究现状。

第二部分（本书重点）：包括第二、三、四、五、六章。主要讨论当前造成焊接产品失效的最普遍、最严重的工艺缺陷——焊接裂纹。

第三部分：包括第七、八、九、十、十一章，主要讨论焊接结构由于焊接工艺本身的特点在工作环境和承载条件下而造成的各种类型的失效。例如，不锈钢焊接接头的晶间腐蚀；异种钢焊接接头的不均匀性；焊缝中的夹杂和气孔；焊接结构的残余应力和变形；焊接结构的脆断及疲劳破坏等。

第四部分：即第十二章，以压力容器的失效分析为对象综合前面各章的内容进行讨论。

本书由张文钺教授主编，其中第一、二、四、六、十、十二章由张文钺执笔；第三、七、十一章由杜则裕执笔；第五、八、九章由秦伯雄执笔。全书经王仁智、彭日辉高级工程师审定。

在编写本书的过程中得到上海交通大学、钢铁研究总院、装

甲兵技术学院、渤海船厂、沈阳金属研究所等有关单位和同志的大力支持，提供了许多宝贵的资料及照片，在此表示衷心感谢。

1988年1月

目 录

第一章 焊接工艺与焊接结构的失效类型	1
第一节 焊接工艺简介	1
一、焊接过程的物理本质	2
二、焊接的发展及其分类	5
第二节 焊接结构的失效类型及其危害性	7
一、焊接裂纹	7
二、焊缝中的夹杂与气孔	15
三、焊接构件的腐蚀与泄漏	16
四、焊接构件的应力与变形	19
五、焊接结构的脆性破坏	21
六、焊接结构的疲劳破坏	22
参考文献	23
第二章 焊接冷裂纹	24
第一节 冷裂纹的危害性及其一般特征	24
一、冷裂纹的危害性	24
二、冷裂纹的一般特征	24
第二节 焊接冷裂纹(延迟裂纹)的形成机理	29
一、钢种的淬硬倾向	29
二、氢的作用	32
三、焊接接头的拘束应力	43
第三节 延迟裂纹的影响因素	50
一、钢种化学成分的影响	50
二、结构类型对拘束应力的影响	52
三、氢的有害作用	59
四、焊接工艺过程对冷裂纹的影响	63
第四节 防止冷裂纹的措施	71
一、冶金措施	71

二、工艺措施	74
第五节 高强钢焊接冷裂纹的检测及其判据	75
一、定性的方法	75
二、冷裂倾向的定量试验方法	82
第六节 焊接冷裂纹引起失效的案例分析	91
一、失效事故的概况	91
二、球罐的原始条件及表面裂纹的分类	91
三、球罐表面裂纹的分析	92
四、失效原因讨论	94
五、结论	96
参考文献	97
第三章 焊接热裂纹	100
第一节 概述	100
一、热裂纹的危害性	100
二、热裂纹的分类及特征	101
第二节 焊接结晶裂纹的形成条件	107
一、熔池的结晶过程	109
二、焊接结构中的应力	111
三、结晶裂纹的产生条件	113
四、近缝区结晶裂纹	114
第三节 焊接热裂纹的检测及判据	115
一、T型热裂纹试验	115
二、I、I、W、T型热裂纹试验	116
三、FISCO试验	118
四、Cr-Ni不锈钢裂纹试验	120
五、Varestraint试验	120
第四节 焊接接头热裂纹失效案例分析	122
一、失效事故概况	122
二、失效分析的步骤	122
三、结论	125
参考文献	125
第四章 厚板焊接结构的再热裂纹	126
第一节 再热裂纹的危害性及其主要特征	126

一、概况及再热裂纹的危害性	126
二、再热裂纹的主要特征	126
第二节 再热裂纹的形成条件	129
一、晶界杂质富集弱化作用	129
二、晶内沉淀强化作用	131
三、蠕变断裂理论	133
第三节 再热裂纹的影响因素及其防治	135
一、冶金因素	135
二、焊接工艺因素	137
三、降低残余应力避免应力集中	141
第四节 再热裂纹的判据及其测试方法	141
一、自拘束方法	141
二、外载方法	145
三、热模拟法	147
第五节 焊接再热裂纹失效事故的案例分析	147
一、现场检验	148
二、微观分析	148
参考文献	150
第五章 层状撕裂	152
第一节 层状撕裂的特征、分类及其危害性	152
第二节 层状撕裂的原因及其影响因素	155
一、层状撕裂机理	155
二、影响层状撕裂的因素	156
第三节 层状撕裂的判据及检测方法	159
第四节 防止层状撕裂的措施	160
一、钢材选用	161
二、设计及工艺措施	162
参考文献	163
第六章 焊接构件的应力腐蚀裂纹	164
第一节 应力腐蚀裂纹的危害性及其特征	164
一、应力腐蚀裂纹的危害性	164
二、应力腐蚀裂纹的特征	165
第二节 产生应力腐蚀裂纹的机理	170

一、启裂机理	170
二、扩展机理	174
第三节 影响应力腐蚀裂纹的因素	179
一、铬镍奥氏体不锈钢	179
二、铁素体不锈钢	182
三、马氏体不锈钢	183
四、低合金高强度钢	184
第四节 应力腐蚀裂纹的防治	189
第五节 应力腐蚀裂纹引起失效的案例分析	195
一、现场调查及宏观检验	195
二、微观检查	196
三、失效原因的讨论	203
参考文献	205
第七章 不锈钢及异种钢焊接构件的失效	207
第一节 概述	207
一、腐蚀的危害性	207
二、焊接接头的腐蚀类型及特征	213
第二节 焊接接头的晶间腐蚀	214
一、晶间腐蚀的产生条件	214
二、晶间腐蚀的产生原因	215
三、晶间腐蚀的预防措施	216
四、晶间腐蚀的检测	217
第三节 焊接接头的刀状腐蚀	219
一、刀状腐蚀的特征及产生部位	219
二、刀状腐蚀的产生原因	221
三、刀状腐蚀的预防	222
第四节 焊接接头的脆化及热裂纹	222
一、焊接接头的脆化	222
二、不锈钢焊接时的热裂纹	224
第五节 异种钢焊接构件的失效	226
一、异种钢焊接的特点	226
二、异种钢焊接构件的失效分析	228
参考文献	228

第八章 焊缝中的夹杂与气孔	230
第一节 焊缝中的夹杂	230
第二节 焊缝中的气孔	233
一、气孔的危害性及类型	233
二、焊缝中形成气孔的机理	237
三、影响生成气孔的因素及预防	238
参考文献	240
第九章 焊接结构的残余应力及变形	241
第一节 焊接应力与变形的分类、特征及危害	241
一、焊接应力与变形的产生	241
二、焊接变形的分类	243
三、焊接应力与变形的危害	243
第二节 残余应力的分布及其影响因素	244
第三节 焊接残余应力对工程结构失效的影响	247
一、残余应力对断裂的影响	247
二、残余应力对结构稳定性的影响	252
三、残余应力对应力腐蚀裂纹的影响	256
四、残余应力的冶金作用	257
第四节 焊接残余应力的测定	258
第五节 消除焊接残余应力及变形的措施	258
一、消除焊接残余应力的措施	258
二、消除焊接残余变形的措施	259
参考文献	260
第十章 焊接结构的脆性断裂	261
第一节 脆性断裂的危害性及其特征	261
一、焊接结构脆性断裂失效的危害性	261
二、焊接结构脆性断裂失效的特征	268
第二节 脆断的机理及影响因素	273
一、脆性裂纹的产生	274
二、脆性裂纹的扩展	278
第三节 焊接结构脆断的检测及防治	287
一、脆断判据及其检测方法	287
二、防止焊接结构脆断失效的途径	293

参考文献	297
第十一章 焊接结构的疲劳失效	299
第一节 概述	299
一、焊接结构疲劳断裂的特点	300
二、疲劳断裂的断口特征	300
第二节 焊接接头的疲劳强度	301
第三节 提高焊接接头疲劳强度的措施	308
一、降低应力集中	308
二、调整残余应力场	313
三、表面强化处理、改善材料的机械性能	313
四、采取特殊保护措施	314
第四节 焊接构件疲劳失效的案例分析	314
一、概述	314
二、失效分析工作	316
参考文献	318
第十二章 压力容器的失效分析	320
第一节 压力容器失效的概况及其影响因素	320
一、压力容器失效的概况及其危害性	320
二、影响压力容器失效的因素	333
第二节 压力容器的质量控制及其失效分析	345
一、压力容器的质量控制	345
二、压力容器的失效分析技术	353
第三节 压力容器失效案例分析	361
一、概况	361
二、检测方法及其结果	363
三、穿透裂纹的形成原因	371
参考文献	372

第一章 焊接工艺与焊接结构的失效类型

第一节 焊接工艺简介

在现代的工业生产中，焊接已成为一种重要的加工工艺，它广泛地应用于航空、航天、造船、海洋工程、核动力工程、微电子技术、交通、化工、石油、电力、建筑以及机械制造等各工业部门。随着科学技术的不断发展，焊接已发展成为一门独立的学科。

焊接技术的发展比起其他热加工工艺的发展要晚一些，它是从19世纪末20世纪初开始发展的。由于它具有一系列技术上和经济上的优点，所以发展很快。据统计，世界上大约每10年，在焊接领域就有一项新的突破。特别是60年代以后，随着工业规模的扩大，焊接新能源的开发和焊接新工艺的应用已达到了一个新的水平。到目前为止，已有50余种焊接方法不同程度地应用在生产上和工程上。除生产率较高的埋弧自动焊和应用广泛的手工电弧焊以外，高效率的气电焊、电渣焊、真空电子束焊接、等离子焊接，以及激光焊接等也日益广泛地应用到各工业部门。此外，近年来一些工业发达的国家还正在大力研究离子束焊接、太阳能焊接，以及微波焊接等新工艺。

随着生产规模和科学技术的发展，焊接自动化方面的控制系统也有很快的发展。在一些工业发达的国家中已有许多程序控制的焊接自动生产线，有些工业部门，如汽车制造业，水下工程和核电站安装与修复，以及某些属于危险作业的焊接部位已采用电子计算机控制的机械手、机器人或遥控全位置焊接机。

由于生产规模的发展，许多工程装备日益向高参数（高温、高压、高容量），低温深冷，高寿命和大型化的方向发展。因而不断提出具有特殊性能材料的焊接问题，如高强钢、超高强钢、

不锈钢、耐热钢、耐蚀钢、铝合金、钛合金、耐热合金、耐蚀合金、各种难熔金属、活性金属、异种金属，以及金属与非金属的焊接。这就推动了焊接工艺、焊接材料、焊接设备、焊接基础理论，以及焊接质量控制方面的检测和管理系统工程等方面的快速发展〔1,2,3〕。从工程上的应用来看，已采用焊接技术制造了各种现代化的大型、精密的焊接结构和件器，如58万t的巨型油轮，大型海上采油平台、10万m³的大型储罐、120万KW的原子能电站设备、3000atm(300MPa)的高压容器、2.5~3.5马赫(Ma)超音速歼击机、航天飞机、火箭、宇宙飞船、空间站，以及异种金属、金属与非金属的电子器件、极其精密的大规模集成电路等。

可以预测，焊接技术在我国现代化的进程中，将占有重要的地位。

一、焊接过程的物理本质

正确认识焊接的物理本质、对于防止失效和提高焊接质量，以及发展焊接技术都具有重要的意义。

从微观上讲，可以给焊接下如下的定义：两种材料(同种或异种)通过原子或分子间的结合、扩散形成永久性连接的工艺过程叫作焊接。

由此可见，焊接与其他的连接方法不同，通过被连接的材料不仅在宏观上建立了永久性的接头，而且在微观上形成了组织之间的内在结合。

怎样才能实现焊接过程呢？从理论上讲，把被连接的固体材料表面接近到3~5 Å(0.3~0.5nm)，就可以在接触的表面上进行扩散、再结晶等物理化学过程。对于金属来讲，就是形成金属键，从而完成焊接的过程〔4〕。但是，即使金属表面经过精加工，也会出现凸凹不平，况且金属表面不可避免地会存在氧化膜、水和油类的吸附层，这些都会阻碍金属表面紧密接触。

为了克服这种不足之处，在焊接工艺上主要采取以下两种措施：

1. 对被焊金属施加压力，目的是使连接处发生局部塑性变形、破坏连接处表面的氧化膜、增加有效的接触面积，从而达到大面积或全面积地紧密接触。

2. 加热被焊金属的连接处，达到塑性或熔化状态，目的是加速破坏接触面上的氧化膜，降低金属变形的阻力，增加原子的热振动能，促进扩散、再结晶，以及化学反应和结晶过程的进行。

每种金属材料实现焊接所必须的温度和压力，它们之间都存在一定的关系。对于纯铁来讲，这种关系可参见图1-1所示。

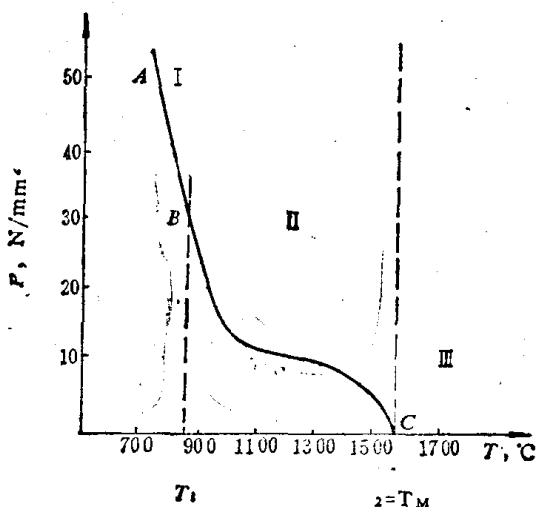


图 1-1 焊接纯铁所必须的温度和压力〔4〕

I—高压焊接区 II—实际应用的电阻焊区 III—熔焊 IV—不能实现的焊接区

由图1-1看出，加热金属的温度越低，实现焊接所需的压力就越大，当金属的温度 $T < T_1$ 时，压力必须在 AB 线以上(I区)才能实现焊接，当温度 T 在 $T_1 \sim T_2$ 之间时，压力应在 BC 线以上(II区)，而当 $T \geq T_M$ (金属的熔化温度)时，实现焊接所需的压力为零，这就是熔化焊的情况。

总括以上，尽管实现焊接的途径很多，然而就其本质而言，都是在母材与焊缝金属的连接处形成共同的晶粒，如图1-2a)所