

# 材料成形与失效

● 王国凡 主编 赵中魁 周琦 王吉岱 副主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

# 材料成形与失效

王国凡 主编

赵中魁 周琦 王吉岱 副主编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

材料成形与失效/王国凡主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.9

ISBN 7-5025-4012-1

I. 材… II. 王… III. 工程材料-成型 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 061753 号

---

**材料成形与失效**

王国凡 主编

赵中魁 周琦 王吉岱 副主编

责任编辑: 任文斗

责任校对: 顾淑云

封面设计: 于兵

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 435 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4012-1/TB·20

定 价: 38.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

材料成形与失效是一门理论和实践性较强的综合性技术，它的研究与发展引起各国的重视。尽管人们不断发现新材料、新工艺、新方法来更新与完善产品的设计，但产品失效事故仍时有发生，一些重大失效事件带来的人员伤亡和财产的损失及造成的社会影响是无法挽回的。所以，一些国家将产品失效分析作为一门独立的学科，对产品的失效原因、鉴别失效的类型、制造工艺等进行系统地研究。十一届三中全会以来，我国对产品的失效分析也非常重视。为了提高我国失效分析的水平，扩大失效分析的队伍，从1980年中国机械工程学会在北京召开第一次全国机械产品失效分析学术会至今，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，对我国失效分析工作规范化，减少和杜绝失效事故的发生起到了积极的作用。

材料成形与控制工程包括金属材料焊接工艺与设备、铸造工艺与设备、锻压工艺与设备、机械加工工艺与设备等专业方向。材料成形工艺与失效分析是材料成形与控制工程的重要内容，它包括焊接成形、铸造成形、塑性加工成形、粘接成形、机械加工成形，以及金属脆性断裂与疲劳失效分析、检验方法和防止措施。为提高材料成形的成品率，防止失效，就要全面、系统地掌握材料成形工艺与失效知识，但是，目前全面、系统地介绍这方面知识的书籍较少，给从事该项工作和学习的人员带来很大不便。为此，本书对材料成形与失效进行系统、全面的介绍，并结合具体实例，介绍了防止失效的方法和措施。

本书对材料成形与失效进行了理论分析，并与实践密切结合，重点突出，逻辑性强，实例丰富，图文并茂，对不同失效进行准确分析、判断，并妥善解决。在编写中力求通俗易懂，深入浅出，避免繁杂的计算。本书可做为相关企业技术人员指导生产的工具书，同时可做为本科院校材料成形专业研究生选修课，本科生、高等职业教育、中等职业教育相关专业的必修课教材。

本书的第1章由王国凡编写，第3章和第4章第1节由赵中魁编写，第4章第2节由冯立明编写，第2章、第5章由王吉岱编写，第6章、第7章由周琦编写，第1章第9、10节由周英勤编写，全书由王国凡统稿，由邹增大教授审稿。

参加编写的还有孙清洲、初福民、刘喜俊、王胜辉、任光福、孙静、钱保光、董雪梅、陈鹭滨、王新民、郇建中、李建刚。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，敬请各界读者批评指正提出宝贵意见。

编 者

2002年3月

# 目 录

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 第 1 章 焊接成形与失效                           | 1  |
| 1.1 焊接概念与失效分类                           | 1  |
| 1.1.1 焊接概念                              | 1  |
| 1.1.2 焊接成形失效分类                          | 1  |
| 1.1.2.1 焊接裂纹                            | 2  |
| 1.1.2.2 焊缝中的气孔与夹杂物                      | 5  |
| 1.1.2.3 焊接结构的变形与应力                      | 6  |
| 1.2 焊接热裂纹                               | 7  |
| 1.2.1 结晶裂纹的主要形貌特征                       | 7  |
| 1.2.1.1 结晶裂纹的形成机理                       | 8  |
| 1.2.1.2 防止结晶裂纹的措施                       | 15 |
| 1.2.2 近缝区液化裂纹的主要形貌特征                    | 19 |
| 1.2.2.1 液化裂纹的形成                         | 19 |
| 1.2.2.2 液化裂纹与脆性温度区间                     | 19 |
| 1.2.2.3 影响液化裂纹的因素                       | 20 |
| 1.2.2.4 防止液化裂纹的措施                       | 21 |
| 1.2.3 多边化裂纹                             | 21 |
| 1.2.3.1 多边化裂纹的形成机理                      | 22 |
| 1.2.3.2 防止措施                            | 22 |
| 1.3 焊接冷裂纹                               | 22 |
| 1.3.1 一般特点                              | 22 |
| 1.3.2 冷裂纹分类及形貌                          | 23 |
| 1.3.2.1 焊道下裂纹                           | 23 |
| 1.3.2.2 焊趾裂纹                            | 23 |
| 1.3.2.3 焊根裂纹                            | 23 |
| 1.3.2.4 横向裂纹                            | 23 |
| 1.3.3 冷裂纹的形成机理                          | 23 |
| 1.3.3.1 氢在开裂中的作用                        | 24 |
| 1.3.3.2 钢材的淬硬倾向                         | 26 |
| 1.3.3.3 焊接接头的应力                         | 27 |
| 1.3.4 冷裂纹敏感性的判据                         | 28 |
| 1.3.4.1 碳当量 ( $C_{eq}$ 或 $C_E$ ) 与硬度的关系 | 28 |
| 1.3.4.2 冷裂敏感指数                          | 29 |
| 1.3.4.3 临界冷却速度                          | 30 |
| 1.3.4.4 拘束度与临界拘束度                       | 30 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1.3.5 防止冷裂的途径               | 32 |
| 1.3.5.1 冶金方面                | 33 |
| 1.3.5.2 工艺方面                | 33 |
| 1.3.6 焊接冷裂纹失效案例             | 34 |
| 1.4 再热裂纹                    | 36 |
| 1.4.1 再热裂纹的形貌特征             | 36 |
| 1.4.2 再热裂纹产生的机理             | 37 |
| 1.4.2.1 晶内二次硬化理论            | 38 |
| 1.4.2.2 晶界脆化理论              | 38 |
| 1.4.3 防止再热裂纹的措施             | 39 |
| 1.4.4 焊接再热裂纹失效举例            | 41 |
| 1.5 层状撕裂                    | 41 |
| 1.5.1 层状撕裂的特征及形貌            | 41 |
| 1.5.2 层状撕裂的分类及形成机理          | 42 |
| 1.5.3 影响层状撕裂的因素             | 43 |
| 1.5.3.1 夹杂物的影响              | 43 |
| 1.5.3.2 氢的影响                | 43 |
| 1.5.4 防止层状撕裂的措施             | 44 |
| 1.5.4.1 选用抗层状撕裂好的钢材         | 44 |
| 1.5.4.2 从工艺和设计上使 Z 向的拘束应力最小 | 44 |
| 1.6 焊缝中的夹杂和气孔               | 44 |
| 1.6.1 焊缝中夹杂的分类及形貌           | 44 |
| 1.6.1.1 氧化物夹杂               | 45 |
| 1.6.1.2 氮化物夹杂               | 45 |
| 1.6.1.3 硫化物夹杂               | 45 |
| 1.6.2 防止焊缝中夹杂物的措施           | 45 |
| 1.6.3 焊缝中气孔的分类及形貌           | 46 |
| 1.6.3.1 氢气孔                 | 46 |
| 1.6.3.2 氮气孔                 | 47 |
| 1.6.3.3 一氧化碳气孔              | 47 |
| 1.6.4 气孔形成的机理               | 47 |
| 1.6.4.1 气泡的生核               | 47 |
| 1.6.4.2 气泡的长大               | 48 |
| 1.6.4.3 气泡的上浮               | 48 |
| 1.6.5 影响生成气孔的因素及控制措施        | 48 |
| 1.6.5.1 冶金因素对气孔的影响          | 48 |
| 1.6.5.2 工艺因素对气孔的影响          | 49 |
| 1.7 焊接应力与变形                 | 50 |
| 1.7.1 焊接应力与变形的产生            | 50 |
| 1.7.1.1 长板条不均匀加热时引起的应力与变形   | 50 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1.7.1.2 焊接应力与变形的产生原因      | 50 |
| 1.7.2 焊接残余应力              | 52 |
| 1.7.2.1 纵向应力              | 52 |
| 1.7.2.2 横向应力              | 53 |
| 1.7.2.3 厚板中的残余应力          | 54 |
| 1.7.2.4 管板焊接的残余应力分布       | 54 |
| 1.7.3 调节焊接残余应力的措施         | 55 |
| 1.7.3.1 设计方面              | 55 |
| 1.7.3.2 工艺方面              | 55 |
| 1.7.4 焊后消除焊接残余应力的方法       | 56 |
| 1.7.4.1 热处理               | 56 |
| 1.7.4.2 锤击消除法             | 56 |
| 1.7.4.3 振动消除法             | 57 |
| 1.8 焊接接头应力腐蚀裂纹及形貌特征       | 57 |
| 1.8.1 应力腐蚀裂纹的形貌特征         | 57 |
| 1.8.2 产生应力腐蚀裂纹的机理         | 59 |
| 1.8.2.1 电化学理论             | 59 |
| 1.8.2.2 机械破裂应力腐蚀机理        | 60 |
| 1.8.2.3 应力腐蚀裂纹的扩展         | 60 |
| 1.8.3 防止应力腐蚀的措施           | 61 |
| 1.8.3.1 正确选择钢材            | 61 |
| 1.8.3.2 降低残余应力            | 61 |
| 1.8.3.3 焊件表面进行防腐处理        | 62 |
| 1.8.3.4 采用阴极保护            | 62 |
| 1.8.3.5 制定合理的焊接工艺         | 62 |
| 1.8.3.6 采用合理的结构和接头设计      | 62 |
| 1.8.4 应力腐蚀裂纹引起的失效举例       | 62 |
| 1.9 不锈钢焊接接头的腐蚀失效          | 64 |
| 1.9.1 不锈钢焊接接头腐蚀分类及形貌特征    | 64 |
| 1.9.1.1 一般腐蚀（均匀腐蚀）        | 64 |
| 1.9.1.2 点蚀                | 64 |
| 1.9.1.3 晶间腐蚀              | 64 |
| 1.9.1.4 应力腐蚀裂纹            | 64 |
| 1.9.1.5 缝隙腐蚀              | 65 |
| 1.9.2 奥氏体钢焊接接头的晶间腐蚀       | 65 |
| 1.9.2.1 奥氏体钢焊接接头产生晶间腐蚀的条件 | 65 |
| 1.9.2.2 产生晶间腐蚀的原因         | 65 |
| 1.9.3 防止晶间腐蚀的措施           | 66 |
| 1.9.4 焊接接头的刀蚀             | 66 |
| 1.9.4.1 刀状腐蚀的形貌特征         | 66 |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 1.9.4.2 刀蚀产生的原因·····               | 67        |
| 1.9.4.3 刀蚀的防止措施·····               | 67        |
| 1.10 设计不合理造成的失效·····               | 67        |
| 1.10.1 焊接接头性能达不到要求造成的失效·····       | 67        |
| 1.10.2 应力集中造成的失效·····              | 70        |
| 1.10.2.1 应力集中的概念·····              | 70        |
| 1.10.2.2 焊接结构中的应力集中和减小应力集中的措施····· | 70        |
| 参考文献·····                          | 73        |
| <b>第2章 铸造成形与缺陷</b> ·····           | <b>74</b> |
| 2.1 铸造成形方法·····                    | 74        |
| 2.1.1 重力作用下的铸造成形·····              | 74        |
| 2.1.1.1 砂型铸造·····                  | 74        |
| 2.1.1.2 金属型铸造·····                 | 75        |
| 2.1.1.3 熔模成形工艺·····                | 76        |
| 2.1.2 外力作用下的液态成形·····              | 77        |
| 2.1.2.1 离心力作用下的液态成形·····           | 77        |
| 2.1.2.2 压力作用下的液态成形·····            | 77        |
| 2.2 铸件缺陷分类·····                    | 79        |
| 2.2.1 铸件质量检验·····                  | 79        |
| 2.2.2 铸件缺陷的分类·····                 | 80        |
| 2.3 铸件的缩孔和缩松·····                  | 85        |
| 2.3.1 铸件缩孔、缩松的形貌特征·····            | 85        |
| 2.3.2 铸件缩孔、缩松的形成机理·····            | 86        |
| 2.3.2.1 合金收缩的三个阶段·····             | 86        |
| 2.3.2.2 缩孔的形成机理·····               | 87        |
| 2.3.2.3 缩松形成的机理·····               | 88        |
| 2.3.3 铸件缩孔、缩松产生的原因·····            | 88        |
| 2.3.4 防止铸件产生缩孔、缩松的措施·····          | 90        |
| 2.4 铸造应力、变形及裂纹·····                | 91        |
| 2.4.1 铸造应力的产生原因及特点·····            | 91        |
| 2.4.2 铸件变形产生的原因及防止措施·····          | 91        |
| 2.5 铸造裂纹·····                      | 93        |
| 2.5.1 铸造热裂纹·····                   | 93        |
| 2.5.1.1 热裂纹的形貌和特征·····             | 93        |
| 2.5.1.2 热裂纹形成的原因·····              | 93        |
| 2.5.1.3 热裂纹的防止措施·····              | 94        |
| 2.5.2 铸造冷裂纹·····                   | 95        |
| 2.5.2.1 冷裂纹的形貌和特征·····             | 95        |
| 2.5.2.2 冷裂纹形成的原因·····              | 95        |
| 2.5.2.3 冷裂纹的防止措施·····              | 96        |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| 2.6 铸件气孔               | 97         |
| 2.6.1 气孔的形貌特征及种类       | 97         |
| 2.6.2 气孔形成的原因          | 98         |
| 2.6.2.1 侵入气孔的形成原因      | 98         |
| 2.6.2.2 卷入气孔的形成原因      | 100        |
| 2.6.2.3 析出气孔的形成机理      | 100        |
| 2.6.2.4 反应气孔的形成原因      | 102        |
| 2.6.3 防止气孔产生的措施        | 103        |
| 2.7 铸件夹杂               | 104        |
| 2.7.1 铸件夹杂缺陷的分类        | 104        |
| 2.7.2 铸件夹杂的形貌及产生的原因    | 104        |
| 2.7.3 防止夹杂类缺陷的措施       | 107        |
| 2.8 铸造组织缺陷             | 107        |
| 2.8.1 铸造组织缺陷的形貌及产生的原因  | 107        |
| 2.8.2 防止铸造组织缺陷的措施      | 108        |
| 参考文献                   | 108        |
| <b>第3章 塑性成形工艺与失效</b>   | <b>110</b> |
| 3.1 塑性成形概念与失效分类        | 110        |
| 3.1.1 塑性成形概念           | 110        |
| 3.1.2 塑性成形失效分类         | 112        |
| 3.2 中小型拉深件成形工艺与失效      | 112        |
| 3.2.1 拉深变形的特点          | 113        |
| 3.2.2 中小型拉深件的主要失效形式    | 115        |
| 3.2.3 防止拉深件失效的措施       | 121        |
| 3.2.4 中小型拉深件失效举例       | 122        |
| 3.3 大型覆盖件成形工艺与失效       | 123        |
| 3.3.1 大型覆盖件的成形工艺与特点    | 123        |
| 3.3.2 大型覆盖件的失效形式及防止措施  | 126        |
| 3.3.2.1 破裂             | 126        |
| 3.3.2.2 成形表面形状不良       | 129        |
| 3.3.2.3 尺寸精度不合格        | 130        |
| 3.3.3 大型覆盖件失效举例        | 130        |
| 3.4 弯曲成形工艺与失效          | 132        |
| 3.4.1 弯曲变形过程           | 132        |
| 3.4.2 变曲成形常见的失效形式及防止措施 | 132        |
| 3.4.2.1 回弹             | 132        |
| 3.4.2.2 弯曲裂纹           | 133        |
| 3.4.2.3 挠曲和扭曲变形        | 134        |
| 3.4.2.4 偏移             | 135        |
| 3.4.3 变曲成形件失效举例        | 135        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 3.5 翻边成形工艺与失效 .....               | 136        |
| 3.5.1 翻边成形的特点 .....               | 137        |
| 3.5.2 翻边成形主要失效形式 .....            | 137        |
| 3.5.3 防止翻边成形失效的措施 .....           | 137        |
| 3.5.4 翻边成形失效举例 .....              | 138        |
| 3.6 胀形成形工艺与失效 .....               | 139        |
| 3.6.1 胀形成形的特点 .....               | 139        |
| 3.6.2 胀形的失效形式 .....               | 140        |
| 3.6.3 防止胀形失效的措施 .....             | 140        |
| 3.6.4 胀形失效举例 .....                | 141        |
| 3.7 锻造成形与失效 .....                 | 142        |
| 3.7.1 影响锻件质量的因素 .....             | 142        |
| 3.7.2 锻造过程中常见的失效形式与防止措施 .....     | 144        |
| 3.7.3 锻造失效形式举例 .....              | 152        |
| 3.8 挤压成形与失效 .....                 | 154        |
| 3.8.1 挤压成形 .....                  | 154        |
| 3.8.2 挤压成形常见的失效形式与防止措施 .....      | 156        |
| 3.8.3 挤压成形失效举例 .....              | 159        |
| 参考文献 .....                        | 161        |
| <b>第4章 零件铆接、胶接(粘接)工艺与失效 .....</b> | <b>162</b> |
| 4.1 零件铆接工艺与失效 .....               | 162        |
| 4.1.1 铆接工艺 .....                  | 162        |
| 4.1.2 铆接失效类型、形成原因及解决办法 .....      | 164        |
| 4.1.3 零件铆接失效举例 .....              | 166        |
| 4.2 零件胶接工艺与失效 .....               | 167        |
| 4.2.1 胶接原理 .....                  | 167        |
| 4.2.1.1 粘接力的形成 .....              | 167        |
| 4.2.1.2 粘接理论 .....                | 168        |
| 4.2.2 胶接工艺 .....                  | 169        |
| 4.2.2.1 胶接前处理 .....               | 169        |
| 4.2.2.2 胶接接头设计 .....              | 169        |
| 4.2.2.3 胶粘剂的配制与涂敷 .....           | 170        |
| 4.2.2.4 胶粘剂的固化 .....              | 170        |
| 4.2.3 胶接失效 .....                  | 171        |
| 4.2.3.1 胶接接头的破坏力学 .....           | 171        |
| 4.2.3.2 影响粘接破坏的因素 .....           | 172        |
| 4.2.4 常见的粘接失效形式及防止措施 .....        | 172        |
| 4.2.5 胶接强度检验 .....                | 175        |
| 4.2.5.1 胶接强度检验的一般要求 .....         | 175        |
| 4.2.5.2 剪切强度试验 .....              | 176        |

|              |                            |            |
|--------------|----------------------------|------------|
| 4.2.5.3      | 均匀扯离强度试验 .....             | 176        |
| 4.2.5.4      | 不均匀扯离强度试验 .....            | 176        |
| 4.2.5.5      | 剥离强度试验 .....               | 177        |
| 4.2.5.6      | 持久强度试验 .....               | 177        |
| 4.2.5.7      | 疲劳强度试验 .....               | 177        |
| 参考文献         | .....                      | 177        |
| <b>第 5 章</b> | <b>零件设计及机械加工失效</b> .....   | <b>178</b> |
| 5.1          | 机械零件设计失效类型 .....           | 178        |
| 5.1.1        | 机械零件的失效形式和设计准则 .....       | 178        |
| 5.1.2        | 由载荷引起的零件失效分析 .....         | 180        |
| 5.1.3        | 结构设计不合理造成的失效 .....         | 186        |
| 5.2          | 金属零件切削加工缺陷与失效 .....        | 191        |
| 5.2.1        | 金属切削加工表面质量对零件使用性能的影响 ..... | 191        |
| 5.2.2        | 零件已加工表面的缺陷及原因 .....        | 192        |
| 5.2.3        | 提高零件加工表面质量的措施 .....        | 193        |
| 5.3          | 金属零件的磨削加工缺陷与失效 .....       | 196        |
| 5.3.1        | 金属零件磨削加工缺陷的种类 .....        | 196        |
| 5.3.2        | 提高零件磨削加工表面质量的措施 .....      | 198        |
| 参考文献         | .....                      | 199        |
| <b>第 6 章</b> | <b>金属脆性断裂与疲劳失效</b> .....   | <b>200</b> |
| 6.1          | 金属脆性断裂 .....               | 200        |
| 6.1.1        | 断裂的类型 .....                | 200        |
| 6.1.2        | 脆性断裂失效现象及特征 .....          | 201        |
| 6.1.2.1      | 脆性断裂失效现象 .....             | 201        |
| 6.1.2.2      | 脆性断口宏观形貌特征 .....           | 203        |
| 6.1.2.3      | 脆性断口微观形貌特征 .....           | 204        |
| 6.1.3        | 脆性断裂的裂纹萌生与扩展 .....         | 206        |
| 6.1.3.1      | 脆性裂纹的萌生机理 .....            | 206        |
| 6.1.3.2      | 脆性裂纹的扩展 .....              | 209        |
| 6.1.4        | 脆性断裂失效原因分析 .....           | 209        |
| 6.1.4.1      | 应力分布 .....                 | 209        |
| 6.1.4.2      | 温度 .....                   | 210        |
| 6.1.4.3      | 尺寸效应 .....                 | 210        |
| 6.1.4.4      | 焊接质量 .....                 | 210        |
| 6.1.4.5      | 环境 .....                   | 210        |
| 6.1.4.6      | 材料化学成分与组织 .....            | 211        |
| 6.1.5        | 防止脆性断裂失效的途径 .....          | 212        |
| 6.1.5.1      | 材料的设计与制造 .....             | 212        |
| 6.1.5.2      | 调整化学成分 .....               | 212        |
| 6.1.5.3      | 细化晶粒 .....                 | 213        |

|         |                          |     |
|---------|--------------------------|-----|
| 6.1.5.4 | 形变热处理 .....              | 213 |
| 6.1.5.5 | 亚温淬火 .....               | 213 |
| 6.1.5.6 | 低碳马氏体强化 .....            | 213 |
| 6.2     | 金属的疲劳失效 .....            | 214 |
| 6.2.1   | 疲劳断裂现象及特征 .....          | 214 |
| 6.2.1.1 | 疲劳断口的宏观形貌特征 .....        | 215 |
| 6.2.1.2 | 疲劳断口的微观形貌特征 .....        | 218 |
| 6.2.2   | 疲劳裂纹的萌生机理 .....          | 219 |
| 6.2.2.1 | 零件加工后疲劳裂纹实际状态的萌生方式 ..... | 219 |
| 6.2.2.2 | 表面不存在应力集中疲劳裂纹的萌生方式 ..... | 220 |
| 6.2.3   | 疲劳裂纹的扩展 .....            | 222 |
| 6.2.3.1 | 疲劳裂纹扩展的宏观规律 .....        | 222 |
| 6.2.3.2 | 疲劳裂纹扩展的微观机理 .....        | 224 |
| 6.2.4   | 疲劳失效原因分析 .....           | 226 |
| 6.2.4.1 | 表面状态 .....               | 226 |
| 6.2.4.2 | 零件的几何形状及尺寸 .....         | 226 |
| 6.2.4.3 | 装配与连接效应 .....            | 226 |
| 6.2.4.4 | 载荷特性 .....               | 226 |
| 6.2.4.5 | 材料的组织和性能 .....           | 226 |
| 6.2.4.6 | 使用环境 .....               | 227 |
| 6.2.5   | 防止疲劳失效的措施 .....          | 227 |
| 6.2.5.1 | 降低作用于零件危险部位上的实际应力 .....  | 227 |
| 6.2.5.2 | 采用滚压或喷丸使表面强化 .....       | 227 |
| 6.2.5.3 | 表面进行热处理 .....            | 228 |
| 6.2.5.4 | 复合强化 .....               | 228 |
| 6.2.5.5 | 减少夹杂物 .....              | 228 |
| 6.2.5.6 | 细化晶粒 .....               | 228 |
| 6.2.5.7 | 其他因素 .....               | 228 |
| 参考文献    | .....                    | 228 |
| 第7章     | 失效分析步骤与检验方法 .....        | 230 |
| 7.1     | 失效概述 .....               | 230 |
| 7.1.1   | 失效与失效类型 .....            | 230 |
| 7.1.1.1 | 过量变形失效 .....             | 230 |
| 7.1.1.2 | 断裂失效 .....               | 231 |
| 7.1.1.3 | 表面损伤失效 .....             | 231 |
| 7.1.2   | 失效的过程性分析 .....           | 231 |
| 7.1.3   | 失效分析的程序及步骤 .....         | 232 |
| 7.2     | 金属断裂失效分析 .....           | 232 |
| 7.2.1   | 现场调查 .....               | 232 |
| 7.2.1.1 | 现场调查的内容 .....            | 232 |

|         |                          |     |
|---------|--------------------------|-----|
| 7.2.1.2 | 现场调查的方法 .....            | 232 |
| 7.2.1.3 | 现场调查的背景资料与注意事项 .....     | 233 |
| 7.2.2   | 残骸分析 .....               | 233 |
| 7.2.3   | 实验研究 .....               | 234 |
| 7.2.3.1 | 宏观检验 .....               | 234 |
| 7.2.3.2 | 微观检验 .....               | 235 |
| 7.2.3.3 | 金相检验 .....               | 235 |
| 7.2.3.4 | 无损检验 .....               | 235 |
| 7.2.3.5 | 化学成分分析 .....             | 236 |
| 7.2.3.6 | 力学性能测定 .....             | 236 |
| 7.2.3.7 | 断裂力学分析 .....             | 237 |
| 7.2.4   | 综合分析 .....               | 237 |
| 7.3     | 断口分析 .....               | 238 |
| 7.3.1   | 金属断口的基本类型 .....          | 238 |
| 7.3.2   | 允许缺陷断口和报废缺陷断口的基本特征 ..... | 238 |
| 7.3.3   | 宏观断口分析 .....             | 240 |
| 7.3.3.1 | 实际构件断口的宏观特征 .....        | 241 |
| 7.3.3.2 | 宏观断口分析 .....             | 241 |
| 7.3.4   | 微观断口分析 .....             | 244 |
| 7.3.4.1 | 断口的产物分析 .....            | 244 |
| 7.3.4.2 | 断口的微观形貌分析 .....          | 244 |
| 7.3.5   | 塑性断口特征 .....             | 244 |
| 7.3.5.1 | 静载荷下的断口宏观特征 .....        | 245 |
| 7.3.5.2 | 冲击断口的宏观形貌 .....          | 246 |
| 7.3.5.3 | 韧性断裂的断口微观特征 .....        | 247 |
| 7.4     | 断口试样的选择、清洗及保存 .....      | 248 |
| 7.4.1   | 断口试样的选择 .....            | 248 |
| 7.4.1.1 | 主断面（主裂纹）的宏观判断 .....      | 248 |
| 7.4.1.2 | 断口试样的截取 .....            | 249 |
| 7.4.2   | 断口试样的清洗 .....            | 250 |
| 7.4.2.1 | 清洗前的检查 .....             | 250 |
| 7.4.2.2 | 断口的清洗 .....              | 250 |
| 7.4.3   | 断口试样的保存 .....            | 251 |
| 7.5     | 金相分析 .....               | 252 |
| 7.5.1   | 失效部位试样的选取 .....          | 252 |
| 7.5.2   | 试样大小及镶嵌 .....            | 253 |
| 7.5.2.1 | 塑料嵌镶法 .....              | 253 |
| 7.5.2.2 | 机械嵌镶法 .....              | 253 |
| 7.5.3   | 试样磨制及抛光 .....            | 254 |
| 7.5.3.1 | 试样磨制 .....               | 254 |

7.5.3.2 试样的抛光 ..... 256

7.5.4 试样的浸蚀 ..... 256

7.5.4.1 化学浸蚀剂 ..... 257

7.5.4.2 化学浸蚀操作 ..... 257

7.5.5 试样的电解抛光及电解浸蚀 ..... 258

7.5.5.1 试样的电解抛光 ..... 258

7.5.5.2 试样的电解浸蚀 ..... 259

7.6 化学分析 ..... 259

7.6.1 母材化学成分分析 ..... 260

7.6.1.1 光谱分析 ..... 260

7.6.1.2 常规湿法化学成分分析 ..... 262

7.6.2 微区化学成分分析 ..... 263

7.6.2.1 电子探针分析 ..... 263

7.6.2.2 离子探针分析 ..... 264

7.6.2.3 俄歇电子能谱分析 (AES) ..... 265

7.6.3 力学性能分析 ..... 266

7.6.3.1 硬度试验 ..... 266

7.6.3.2 拉伸试验 ..... 267

7.6.3.3 冲击试验 ..... 270

参考文献..... 271

# 第 1 章 焊接成形与失效

## 1.1 焊接概念与失效分类

### 1.1.1 焊接概念

焊接指的是两种或两种以上材质（同种或异种），通过加热或加压或二者并用，来达到原子间的结合，形成永久性连接的工艺过程。

对于大多数金属，当原子间的距离  $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{nm}$  时，其结合力最大，当接触的表面达到  $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{nm}$  距离时，原子即可进行扩散、再结晶等物理化学过程，从而形成金属键，达到焊接的目的。然而金属的表面即便是经过精加工，其接触表面也是凹凸不平的，所以，很难使接触表面距离达到  $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{nm}$ 。此外，金属表面易吸附水分、油污、灰尘，同时与空气接触形成氧化膜等，都会阻碍金属之间达到  $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{nm}$  距离。

为了使原子间达到最大结合力，在焊接工艺上应采用以下措施。

第一，对被焊接的材质施加压力。该压力应能使接触表面氧化膜破坏，凹凸不平的表面产生塑性变形，增加有效接触面积，从而使结合力达到最大。

第二，对被焊接金属接触表面或整体加热。该热量能使连接处达到塑性或熔化状态，将接触表面的氧化膜迅速破坏，降低金属变形的阻力，增加原子的振动能，促进扩散、再结晶、化学反应和结晶过程的进行。

图 1-1 是纯铁焊接时需要的温度与压力的关系。ABC 是金属实现焊接时所需温度与压力的关系曲线，曲线上部为焊接区，下部为非焊接区，图中垂直虚线把焊接区又分成三个温度区。从图中可知，金属加热的温度越低，实现焊接所需的压力就越大，当金属的加热温度  $T < T_1$  时，实现焊接所需的压力应在 AB 线的右上方焊接区内；当金属的加热温度在  $T_1 \sim T_m$  之间时，实现焊接所需的压力  $p$  应随温度的升高而逐渐减小，此区为压焊区，焊接方法称压力焊或压焊；当温度  $T > T_m$ （ $T_m$  是金属的熔点）时，金属处于熔化状态，不需要外力即可实现焊接，此区为熔化焊接区，相应的焊接方法称熔化焊或熔焊。

### 1.1.2 焊接成形失效分类

焊接作为一种热加工成形，与铸造成形、塑性成形等相比，焊接过程是在热力学不平衡的条件下进行的。由于焊接过程的冶金因素和产品制造所特定的工艺因素，以及焊件设计所构成的结构因素等综合作用，特别是当焊接接头具有复杂的几何形状、应力集中程度高时，焊后焊件变形大，易产生裂纹；冷却速度快易造成气孔、夹杂、局部硬度高于母材、焊缝成分与母材不一致等，从而带来焊接缺陷与失效问题。焊接结构失效是多种因素造成的，如选材问题、设计问题、工艺因素问题、选择焊接方

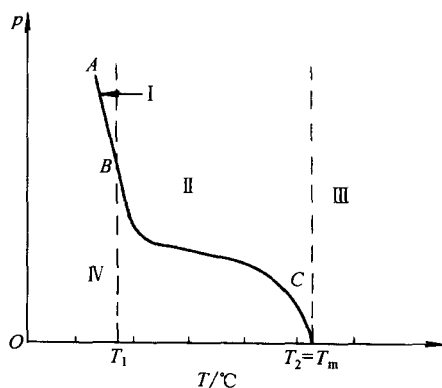


图 1-1 焊接工业纯铁时所需温度与压力之间的关系

I—限压区；II—压焊区；  
III—熔焊区；IV—不能焊接区

法问题等，所以设计焊接结构时要综合考虑。对重要结构要反复论证，做工艺性实验，尤其使用新材料前要严格把好工艺实验关，确保产品结构的安全运行。

焊接结构失效主要讨论因焊接工艺所引起的失效问题，对其他几个方面的问题只作影响因素之一来讨论。

焊接结构失效可能是多种因素共同作用的结果，焊接工艺引起的失效主要有：①焊接裂纹；②焊缝中的气孔与夹杂物；③焊接结构的变形与应力；④焊接接头的腐蚀；⑤焊接结构的疲劳破坏；⑥焊接结构的脆性破坏。⑤⑥放在第6章中讨论，本章对①②③④四种予以介绍。

1.1.2.1 焊接裂纹

焊接裂纹是各种裂纹的总称。据统计，世界上各种焊接结构的失效事故中，除了由于设计的不合理、选材不当和操作上的问题外，多数是由裂纹而引起的，它不仅削弱有效截面，而且可能导致结构的脆断，加速腐蚀，酿成灾难性的事故。

焊接裂纹分类的发展反映了人们在理论和实践上对裂纹的不断认识过程。20 世纪 40 年代只是按裂纹走向分为纵向裂纹、横向裂纹、星形裂纹和弧形裂纹。50 年代按裂纹产生的区域划分为焊缝金属中的裂纹和热影响区的裂纹。60 年代和 70 年代初发展到按裂纹形成条件和机理分为结晶裂纹、液化裂纹、高温低塑性裂纹、孔穴型开裂和氢致延迟裂纹。后来又发现了再热裂纹和层状撕裂。图 1-2 是在焊接生产中由于采用的母材化学成分、焊接结构应力、刚度的不同，可能产生的各种裂纹，有焊缝的表面裂纹、焊根裂纹、焊趾裂纹、焊道下裂纹、弧坑裂纹（火口裂纹）、层状撕裂、纵向裂纹、横向裂纹、宏观裂纹、显微裂纹等。表 1-1 是结构用钢的焊接裂纹的一些分类。在焊接条件下产生的裂纹种类较多，目前按产生裂纹的本质来分，大体可分为以下五大类。

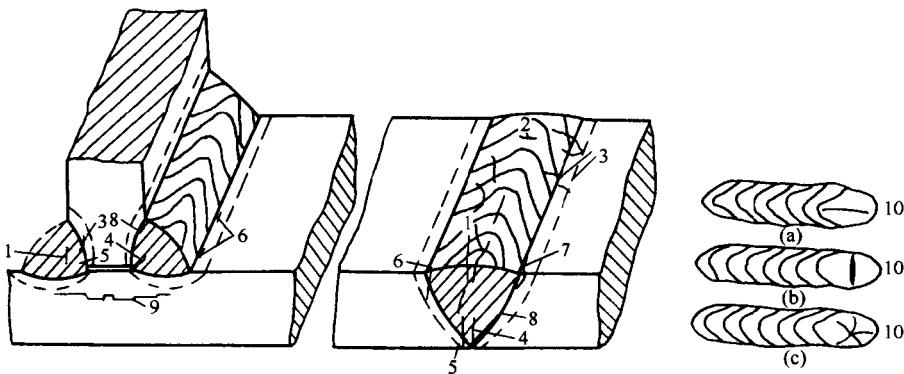


图 1-2 各种裂纹的分布形态

(a) 纵向裂纹；(b) 横向裂纹；(c) 星形裂纹

- 1—焊缝中纵向裂纹；2—焊缝中横向裂纹；3—熔合区裂纹；4—焊缝根部裂纹；  
5—HAZ 根部裂纹；6—焊趾纵向裂纹（延迟裂纹）；7—焊趾纵向裂纹（液化裂纹、再热裂纹）；  
8—焊道下裂纹（延迟裂纹、液化裂纹、多边化裂纹）；9—层状撕裂；10—弧坑裂纹（火口裂纹）

(1) 热裂纹

所谓热裂纹是指焊接过程中焊缝熔合区与热影响区冷却到固相线附近的高温区产生的焊接裂纹。其特征是裂纹沿奥氏体晶界开裂，属于沿晶或晶界裂纹。根据所焊金属的材料不同（低合金高强钢、不锈钢、耐热钢、铝合金等），产生热裂纹的形态、温度区间和主要原因也各有不同。热裂纹可分为结晶裂纹、液化裂纹和多边化裂纹三类。

1) 结晶裂纹 焊缝结晶过程中，在固相线附近，由于凝固金属的收缩，残余液体金属

不足，在应力的作用下沿晶界出现的裂纹，称结晶裂纹。在多数情况下，裂纹表面呈氧化的色彩，说明这种裂纹是在高温下产生的。

结晶裂纹易产生在单相奥氏体钢、镍基合金、一些铝合金、含杂质（S、P、C、Si）偏高的碳钢和低合金焊缝中，个别情况也能产生在热影响区。焊缝中的结晶裂纹形貌见图1-3。

2) 高温液化裂纹 近缝区或多层焊的层间金属，在焊接热循环峰值温度作用下，存在于金属中的低熔点共晶被重新熔化，在拉应力的作用下沿奥氏体晶界发生开裂。

液化裂纹多发生在含铬镍的高强钢、奥氏体钢和一些镍基合金的近缝区或多层焊层间部位，而且随母材焊材中 S、P、C、Si 含量增高，液化裂纹倾向也增高，图 1-4 是液化裂纹形貌。

3) 多边化裂纹 焊接时焊缝或近缝区在固相线稍下的高温区间，由于刚凝固的金属中存在很多缺陷（主要是位错和空位）及严重的物理和化学不均匀性，在一定的温度和应力作用下，由于这些晶格缺陷的迁移和聚集，便形成了二次边界，即“多边化边界”。因边界上堆积了大量的晶格缺陷，所以它的组织性能脆弱，高温时的强度和塑性都很差，只要有轻微的拉应力，就会沿多边化的边界开裂，产生多边化裂纹。

多边化裂纹多发生在纯金属或单相奥氏体合金的焊缝中或近缝区，图 1-5 是镍合金焊缝中的多边化裂纹。

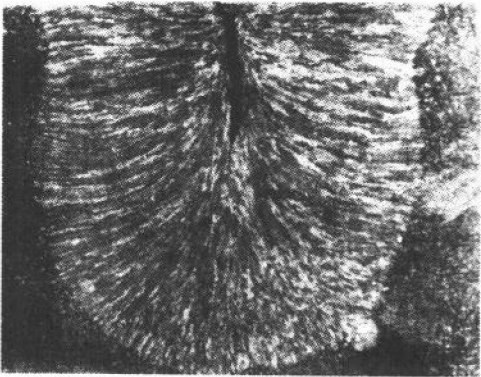


图 1-3 焊缝中的结晶裂纹  
自动焊 15MnVN，焊丝 O6MnMo

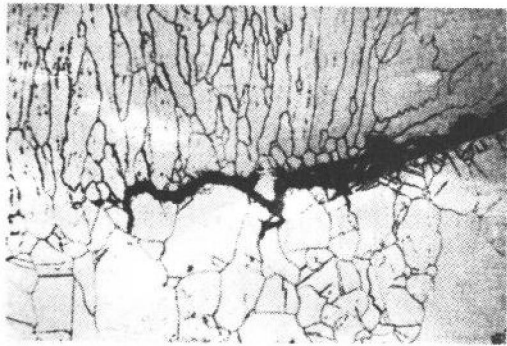


图 1-4 液化裂纹  
TIG 焊因科镍合金 ×500

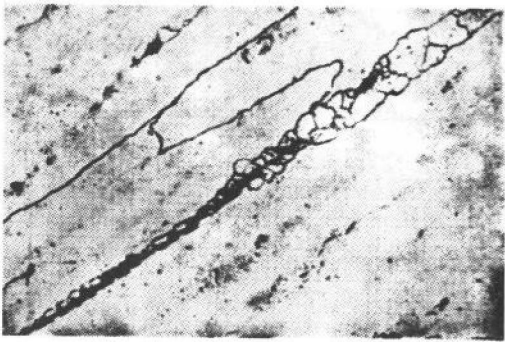


图 1-5 因科镍合金焊缝中的多边化裂纹  
TIG 焊 ×800

表 1-1 结构用钢的焊接裂纹种类

| 发生形态     |                |                 | 焊道下<br>裂纹 | 焊趾<br>裂纹 | 焊根<br>裂纹 | 焊趾<br>裂纹 | 层状<br>撕裂 | 显微<br>裂纹 | 横向<br>裂纹 | 纵向<br>裂纹 | 弧坑<br>裂纹 |
|----------|----------------|-----------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 发生<br>温度 | 热裂纹            | 焊缝金属凝固<br>中或刚结束 |           |          |          |          |          |          | △        | △        | △        |
|          | 冷裂纹（含<br>延迟裂纹） | 200℃～室温         | △         | △        | △        | △        | △        | △        | △        |          |          |
|          | 再热裂纹           | 500～600℃<br>加热中 |           | △        |          |          |          |          |          |          |          |