

金属的可焊性试验

吴世初 编 著

海科学技术文献出版社

出版者的话

本书介绍了目前国内外在工业生产和科研工作中鉴定结构金属材料的可焊性时应用的直接与间接的试验方法 141 种。作者对每种方法作了简要的评价,并提出了我国工业生产的应用范围;至于可焊性的评定标准,有的明确了,有的则举例说明,尚需在实际应用中通过对比方法作出恰当的评定依据。

本书可供从事焊接生产和科研工作的广大焊接工作者和大专院校焊接专业师生参考。

金属的可焊性试验

吴世初 编著

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路二号)

新华书店上海发行所发行
浙江德清洛舍印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 12.5 字数 302,000

1983 年 12 月第 1 版 1983 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—8,800

书号: 15192·279 定价: 1.55 元

《科技新书目》60-271

序 言

1961年, 中国工业出版社出版了拙著《金属的可焊性试验方法》一书。该书的出版, 深得广大焊接工作者的关注和鼓励, 但出版至今已过去十九个年头了, 国内外的科学技术又有了很大的进步, 特别是随着我国四个现代化建设事业的发展, 工业生产上使用的各种金属材料的品种和数量日益增多, 为了了解各种新型金属材料的特性和产品在焊接时以及使用过程中可能出现的问题, 有选择地介绍近十多年来在世界范围内相继出现的许多新的可焊性试验方法是有现实意义的。通过可焊性试验就能达到这样三个目的: 一、能有效地选择适用于母材的焊接材料; 二、能确定合适的焊接工艺参数; 三、能有的放矢地研究和试制应用新材料的焊接构件。基于以上考虑, 本人以尝试的心情把积累多年的资料又勉力编著了此书, 愿奉献给活跃在各条工业战线上的焊接工作者参考应用。倘若本书能对我国焊接技术的发展起到促进作用, 那就无限欣慰了。

由于水平有限, 在本书的取材和内容的安排上很可能有欠妥或谬误之处, 本人竭诚欢迎广大读者给予帮助和指正, 对此将表示衷心的感谢。

最后, 谨向本书中所引用的文献的作者们致以深切的谢意。

编著者于上海
一九八二年十二月

目 录

序言

第一章 引论	1
第一节 可焊性定义和分类	1
第二节 焊接裂纹	4
1. 裂纹的分类	4
2. 高温裂纹(热裂纹)	7
(1) 焊接金属的凝固裂纹	7
(2) 热影响区裂纹	16
3. 焊缝的低温裂纹(冷裂纹)	17
(1) 对接缝	17
(2) 填角焊缝的焊根裂纹和焊趾裂纹	18
(3) 焊缝金属中的冷裂纹(微裂)	19
(4) 变形裂纹	21
(5) 氢与冷裂纹	22
(6) 冷却速度和与之有关的各种因素	26
(7) 坡口形状对焊接裂纹的影响	32
(8) 拘束度	34
4. 再热裂纹	43
(1) 影响因素	44
(2) SR 裂纹防止方法	45
(3) 试验方法的特征	45
(4) 堆焊层下回火裂纹	46
(5) 奥氏体型不锈钢及 Ni 合金应力消除回火裂纹	47

5. 层状撕裂	47
(1) 层状撕裂产生原因	49
(2) 层状撕裂的评价方法	50
第三节 环境脆化裂纹	51
1. 环境脆化裂纹的分类	53
2. 材料与焊接接头中的环境脆化裂纹	53
第四节 脆性破坏概论	56
1. 钢材的脆性破坏	56
2. 脆性破坏的特征	57
3. 缺口	59
4. 钢材的延性破坏和脆性破坏	59
5. 脆性破坏的机理	60
(1) 从延性到脆性的破坏形式的转变	60
(2) 在缺口底部产生的三轴拉应力	61
(3) 脆性裂纹的发生、扩展和停止	61
6. 冷脆性转变温度	65
7. 冶金各个因素对缺口脆性的影响	67
(1) 化学成分	67
(2) 脱氧方式	68
(3) 细化晶粒	68
(4) 热轧	68
(5) 热处理	69
(6) 钢板的方向性	70
(7) 冷加工时效	71
(8) 疲劳	72
8. 焊接对缺口脆性的影响	72
(1) 焊着金属	72
(2) 焊条类型的影响	72

(3) 热影响区	72
(4) 焊接规范	73
(5) 预热和后热处理	74
(6) 时效	74
(7) 其它	74

第二章 可焊性直接试验方法.....76

第一节 施工可焊性试验方法.....76

1. 裂纹试验方法的选择及其与生产联系的问题76

2. 焊缝和热影响区的裂纹试验方法(不需特殊的试验装置).....78

(1) y 型坡口对接裂纹试验(标准型, 又称铁研式)	79
(2) y 型坡口对接裂纹试验(小铁研式)	81
(3) 沟槽拘束对接裂纹试验(手冢式)	84
(4) 可变拘束长槽对接裂纹试验	85
(5) 拘束对接初层焊接裂纹试验	85
(6) Lehigh 拘束裂纹试验	86
(7) U 型坡口对接裂纹试验	88
(8) 斜边拘束对接裂纹试验	89
(9) N. R. R. T. 可变拘束对接裂纹试验	91
(10) H 型对接裂纹试验	94
(11) 巴东拘束对接裂纹试验	94
(12) 窗形拘束对接裂纹试验	96
(13) Fisco 试验.....	97
(14) V. R. C. 裂纹试验	100
(15) 船用钢材焊接裂纹的试验.....	102
(16) 环形镶块裂纹试验.....	105
(17) 撕裂试验.....	106
(18) I. I. W. 最高硬度试验.....	107
(19) 渐变厚度硬度试验.....	109

(20) 焊层下裂纹试验	113
(21) 基洛夫工厂试验	115
(22) 金兹布尔格(Гинцбург)和特拉仁什多克 (Драйзенштук)裂纹试验	116
(23) 手工电弧焊焊缝金属抗显微裂纹敏感性试验(低碳钢和 低合金钢)	117
(24) 环形堆焊试验	118
(25) G-BOP 焊缝金属裂纹试验	119
(26) Huxley 试验	122
(27) Varestraint 试验	125
(28) 横向 Varestraint 试验	129
(29) 击破试验	131
(30) 非拘束角焊缝裂纹试验	132
(31) T 字形热裂纹试验	133
(32) I. I. W. T 字形热裂纹试验	135
(33) 巴东电焊研究所角焊缝裂纹试验	136
(34) 刚性节点角焊缝试验	137
(35) 可变拘束角焊缝裂纹试验(C. R. F.)	138
(36) 仰焊位置角焊缝裂纹试验	141
(37) 抗磨性低合金高强度钢的角焊缝裂纹试验	143
(38) 十字形接头裂纹试验	144
(39) 双 T 字形裂纹试验	146
(40) 模拟结构物拘束角焊缝裂纹试验(Box Restraint Test) ...	147
(41) 十字形接头(框架)试验	148
(42) 框架十字接头角焊缝裂纹试验	150
(43) T 形接头刚性角焊缝试验	151
(44) Hind 填角焊缝裂纹试验	153
(45) C. T. S. 裂纹试验	154
(46) N. C. F. W. 环形角焊可焊性试验	162
(47) 超厚板焊接金属裂纹试验(埋弧自动焊)	163

(48) 调质高强度钢热影响区裂纹试验(埋弧自动焊)	165
(49) 埋弧自动焊裂纹敏感性试验	166
(50) 埋弧自动焊焊缝的热裂纹试验	168
(51) 具有矩形孔的热裂纹试验(埋弧自动焊)	169
(52) 埋弧自动焊十字形接头角焊裂纹试验	170
(53) 板边上带有水冷铜板的对接横裂纹试验	171
(54) 窄间隙混合气体保护自动焊接热裂纹试验	174
(55) 插入竖板的 H 型拘束裂纹试验(埋弧自动焊)	176
(56) Lehigh 层状撕裂试验	178
(57) II 式刚性固定 T 型仰角裂纹试验	180
(58) H 型填角焊拘束层状撕裂试验	181
(59) Z 方向窗框拘束裂纹试验	183
(60) Cranfield 层状撕裂试验	186
(61) Z 方向层状撕裂的敏感性评定试验	188
(62) 恒定应变层状撕裂试验	189
(63) 对接接头拘束再热裂纹试验(H 型拘束和 y 型拘束)	190
(64) 填角焊、镶块、填角焊-环形镶块再热裂纹试验	192
(65) T 型和 Y 型坡口再热裂纹试验	194
(66) 施加弯曲应力的再热裂纹试验	195
(67) 圆筒状拘束再热裂纹试验	197
(68) 奥氏体系金属堆焊复合层的再热裂纹试验	198
(69) 复合钢的定恒应变焊接裂纹试验	199
(70) Ni 基耐热铸造合金热裂纹试验	201
(71) 硬质合金堆焊金属裂纹试验	201
(72) 硬质合金堆焊抗裂试验	202
(73) Finger 裂纹试验	204
(74) 圆棒试验	206
(75) X 型裂纹试验	208
(76) 十字形角条裂纹试验	208
(77) B. W. R. A. 铬镍不锈钢裂纹试验	210

(78) 分块环形槽裂纹试验	211
(79) 环形槽裂纹试验	212
(80) 环形镶块裂纹试验	213
(81) 承受二轴应力状态时的薄板环形镶块试验	215
(82) 封闭槽铸件裂纹试验	216
(83) 确定薄钢料气焊时产生热裂纹的倾向试验	218
(84) MIG 熔化点焊裂纹试验	219
(85) 十字形铝合金焊接材料裂纹试验	220
(86) 带有间隙槽的搭接填角焊裂纹试验	222
(87) 厚铝合金斜坡口槽裂纹试验	224
(88) B. W. R. A. 封闭对接裂纹试验	225
(89) 鱼骨状可变拘束裂纹试验	226
(90) Alcan 圆盘刻槽裂纹试验	230
(91) Hollard 铝合金裂纹试验	231
(92) 各种铝合金热裂纹试验方法	231

3. 焊缝和热影响区的裂纹试验方法(使用特殊的试验装置)

(1) Murex 热裂纹试验装置	234
(2) Прохоров 裂纹试验装置	241
(3) T. R. C. 试验(拉伸拘束裂纹试验)	242
(4) R. R. C. 试验(完全拘束裂纹试验)	247
(5) Implant (插销)焊接裂纹试验	250
(6) Z 方向 Implant 试验	253
(7) K. S. L. A. 裂纹试验装置	254
(8) 横向 Varestraint 裂纹试验	257
(9) TIGMAJIG 薄板焊接裂纹试验	260
(10) 弯曲拘束焊接裂纹(B. R. C.) 试验装置	261
(11) 角接头焊接裂纹试验装置(C. J. C. 试验)	264
(12) 近支点弯曲型焊缝金属热裂纹试验装置	267

第二节 使用性能可焊性试验方法	269
1. 焊接热影响区的延伸性试验	269
(1) 纵向焊道弯曲试验	270
(2) T 型弯曲试验	274
(3) 加热敏感性试验	276
(4) 焊道试验	277
(5) 水压膨胀试验	279
2. 焊缝金属和焊接接头的缺口脆性试验	281
(1) 哈别耳卡试验	281
(2) Van Der Veen 试验	282
(3) 乌克兰科学院电焊研究所冷脆性试验	285
(4) Kinzel 纵向焊道缺口弯曲试验	286
(5) Lehigh 纵向焊珠缺口弯曲试验	288
(6) 横向焊珠缺口弯曲试验	289
(7) Delta 试验(三角形试验)	290
(8) Tipper 试验	293
(9) Kahn 焊接缺口撕裂试验	294
(10) ESSO 试验(旧称 SOD 试验)	299
(11) Wells-木原试验	300
(12) 深缺口试验	300
(13) 双重拉伸试验	301
(14) 表面缺口试验	303
(15) K_{Ic} 试验	304
(16) N. R. L. 爆炸膨胀试验	304
(17) 落锤试验	311
(18) 圆筒型爆破试验	316
(19) COD 试验	317
3. 有关使用性能的其它试验	322
(1) 焊缝的晶间应力腐蚀裂纹试验	322

(2) 重复加热试验	324
(3) G. E. 阶段冷却试验	324
第三章 可焊性间接试验方法	327
第一节 以合金元素评定钢的可焊性	327
1. 可焊性指标计算公式的应用	327
2. 可焊性指标计算公式	327
第二节 焊接热模拟试验	344
1. 焊接热模拟试验的意义和应用范围	344
2. 模拟试验的发展过程	344
3. 模拟试验方法的具体应用	345
(1) 再现热影响区的组织试验	345
(2) 热拉伸试验(Battelle 研究所)	347
(3) 延迟裂纹敏感性试验	349
(4) 再热裂纹试验(高温恒应变松弛)	351
(5) 带有加强焊缝试件的再热裂纹试验	355
(6) 铸钢撕裂试验(C. P. T. 试验)	358
(7) C. C. T. 连续冷却转变曲线	359
(8) НИИ 急速热膨胀试验	361
第三节 以硫印法鉴定钢材焊接裂纹敏感性	363
附录 各种裂纹试验方法汇总表	366
参考文献	376

第一章 引 论

第一节 可焊性定义和分类

我们在日常焊接生产中碰到的焊接缺陷很多，一般可分为下述几种：

1. 在焊缝金属中出现的：

- (1) 裂纹(冷裂纹或热裂纹)；
- (2) 气孔；
- (3) 夹杂物；
- (4) 咬边。

2. 在母材及其热影响区中出现的：

- (1) 裂纹(冷裂纹或热裂纹)；
- (2) 晶粒长大；
- (3) 析出脆化。

在焊接结构物使用过程中对其性能有影响的物理和化学方面的因素有：

- (1) 强度；
- (2) 延伸性；
- (3) 缺口脆性；
- (4) 疲劳(包括热疲劳)；
- (5) 蠕变强度；
- (6) 应力腐蚀；
- (7) 耐蚀性、导磁性、加工性等特殊性能。

作为焊接工作者在焊接生产过程中要尽一切办法来保证不产生有害的焊接缺陷,同时应满足该产品的使用性能要求。然而焊接材料可焊性的好坏与焊接缺陷的产生乃至产品的使用性能是有密切关系的,那么“可焊性”究竟有什么含义呢?

各国焊接专家对“可焊性”定下的含义有下述数种:

(1) 所谓可焊性,通俗地说,就是指某种钢材用某种焊接方法进行焊接时,是否能获得无缺陷的、令人满意的焊缝以及焊接接头的性能是否能满足结构物的使用性能的要求^[1]。

(2) 金属以一定的焊接方法焊接后能达到所要求的性能^[2]。

(3) 综合起来以简单通俗的词句表达,金属的可焊性就是一定条件下能够焊成合理的焊接结构物并能符合使用目的的一切性能^[3]。

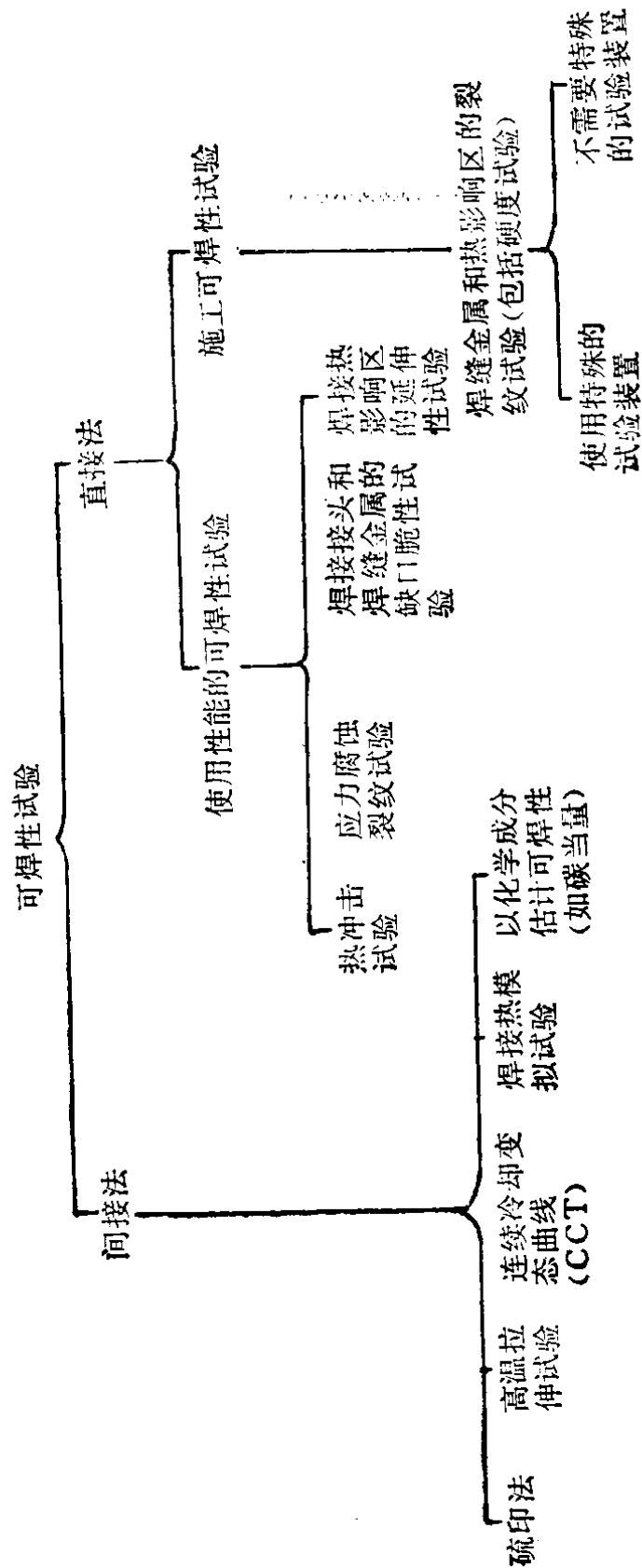
(4) 所谓可焊性,就是在一定材料、工艺和结构条件下材料焊接后,创造出必要质量的焊接接头的性能^[4]。

(5) 所谓金属的可焊性即衡量某种金属具有何种程度的焊接适应性的一种尺度。由于焊接的难、易程度也受焊接方法、施工方法的影响,所以对可焊性作相对比较时,应该采用同样的焊接方法和施工方法。也可以说,该材料需要采用的焊接方法和施工方法越复杂,代价越高,该材料的可焊性也就越低劣。

(6) 作为焊接用金属材料除了在较少产生焊接变形情况下具有无缺陷的焊接性能(焊接适应性)之外,焊接结构物还应能满足设计强度,并从缺口韧性、耐蚀性、气密性以及有时也从高温蠕变强度等方面和长时间耐久的使用性能方面得到满足。

如上所述,国内外焊接工作者对“可焊性”的定义,尽管在词句表达上有所不同,但在其理解上是基本一致的。有的国家为了鉴定钢材,特别是低合金高强度钢或低温钢等的结构钢,除了

表 1 可焊性试验方法分类



对这些钢材作常规强度试验外还规定选择几种可焊性试验方法以进一步保证钢材的焊接施工和结构物的使用安全，并且将比较成熟的和有效的可焊性试验方法列入国家标准使用。

从 40 年代以来，各国使用的可焊性试验方法其种类的丰富程度是令人兴奋的。特别是最近十几年来发展更快，无论直接试验方法或间接试验方法，以往是一般不超出定性概念范围之外，目前由于基础理论工作的充实已稳步地走向定量概念的基础上研究金属材料的可焊性问题。很多专家相信在本世纪末钢的冶金技术能够达到焊接材料发展领域里的目标——钢材具有理想的可焊性。所谓理想的可焊性就是对钢的冷裂纹、热裂纹、再热裂纹、层状撕裂和氢诱发裂纹均不敏感，热影响区无脆化问题（包括热输入量大的焊接方法）。按上述可焊性的概念以及可焊性试验的性质和目的，著者认为可作下述分类（见表 1）。

第二节 焊 接 裂 纹

1. 裂纹的分类

一般说来，焊接裂纹是在焊缝中的应力大而该部分的塑性变形能（即延伸性）小的情况下产生的。焊接裂纹产生的主要原因，通常按照发生场所、发生时期及其形态可分若干种。按照发生场所而分类的各种裂纹参见图 1。其中，焊接金属裂纹主要由焊接金属凝固时的收缩应力所引起。此外，有焊缝横向收缩应力所引起的纵向裂纹，纵向应力引起的横向裂纹和两种应力共同引起的弧状裂纹等。弧坑裂纹产生的原因在于急冷及其形状特殊的缘故，有纵向、横向和星形裂纹之分。

大多数热影响区裂纹产生的原因是热影响区的晶粒变粗和急冷而引起的硬化。因此，这种裂纹在高强度钢和低合金钢等

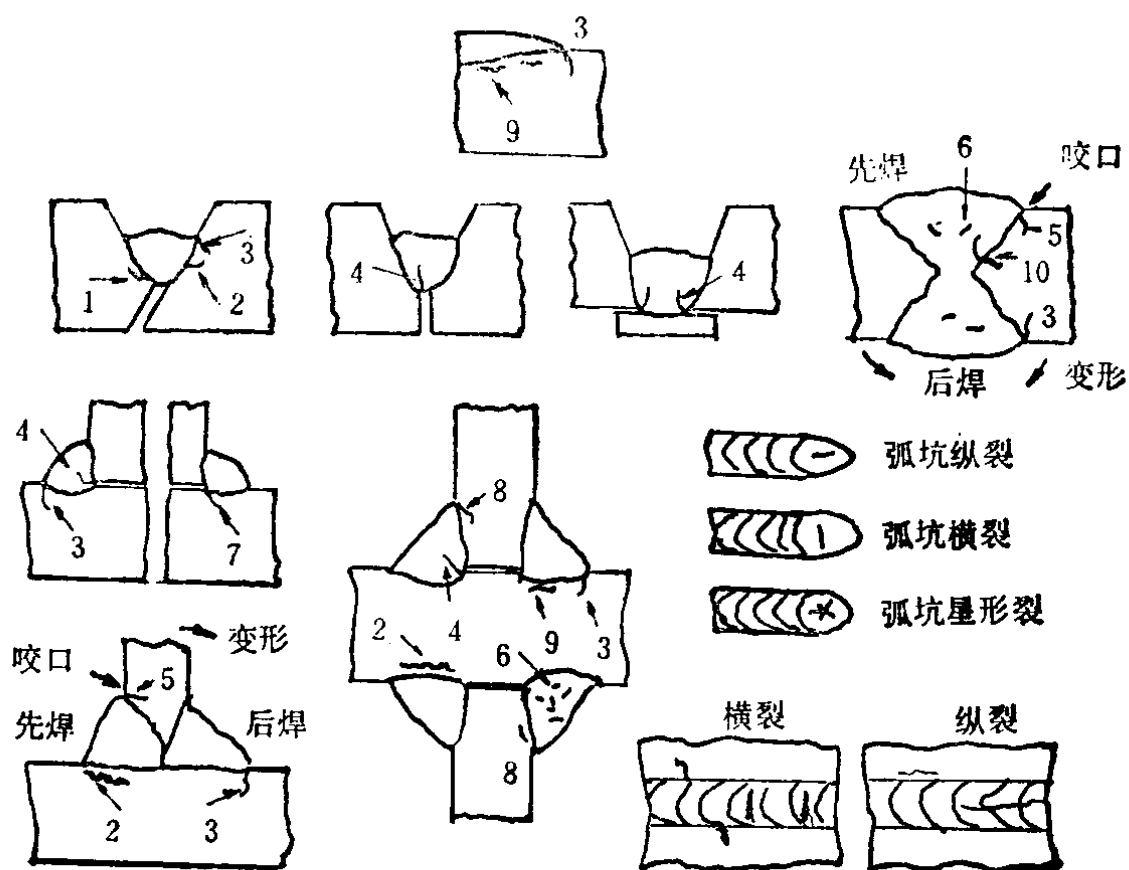


图1 各种焊接裂纹:

- 1—热影响区焊根裂纹; 2—层状撕裂; 3—焊趾裂纹;
 4—焊根裂纹; 5—扭曲变形裂纹; 6—焊接金属微裂;
 7—焊跟裂纹; 8—热影响区微裂; 9—焊层下裂纹;
 10—硫裂纹。

淬硬性大的焊接热影响区中容易产生, 并以焊层下裂纹和趾端裂纹等形态出现。易于结晶生长的金属, 例如镍合金和铜合金或铍金属中所产生的粗晶晶界处的缺口效应会引起缺口裂纹。

在焊缝根部产生焊根裂纹往往与焊缝金属的熔透形状和应力有关, 一般出现在焊缝金属内和热影响区中。上面所说的裂纹均能以肉眼观察, 但多层焊缝中常见的微裂纹 (Micro Fissure) 和在铝合金和镍合金中的晶界液化裂纹等则必须使用显微镜进行高倍数检查才能看出。对硫偏析较严重的钢材进行埋弧自动

焊时常见的硫裂纹,也是属于微裂纹的一种热裂纹。

焊接裂纹,按照其发生的时期,可分为热裂纹和冷裂纹。所谓热裂纹,就是在焊缝的凝固过程中或还在较高温度时产生的裂纹,主要产生在晶界处。其特征是裂纹的表面受到显著的氧化。反之,冷裂纹则无论在晶粒内部或晶界处都会产生,其裂纹表面未被染上氧化色彩。

尽管如此,人们对裂纹发生的温度范围所持的观点却比较模糊,还不能严格地把热裂纹和冷裂纹互相区别开来。笼统地说,冷裂纹与钢的马氏体转变、缺口处应力集中以及氢等有关,在高强度钢或低合金钢等 α 系钢材中容易产生。反之,在 γ 系奥氏体钢、镍合金和铝合金中大都产生热裂纹。

热裂纹可再分为固相线以上温度时和固相线以下温度时产生的二种。在固相线温度以上产生的裂纹可看作为凝固裂纹,主要与固相线温度附近晶界处残余金属液体的状态有关,称为热裂纹的就是指这一种凝固裂纹。

在固相线以下温度范围内产生的裂纹属于一种应变时效裂纹,易产生于凝固后冷却阶段中。其产生原因与晶内和晶界的金属成分偏析和析出物等状态有关,与基体和结晶界之间的强度差,即基体的延伸性下降有关。

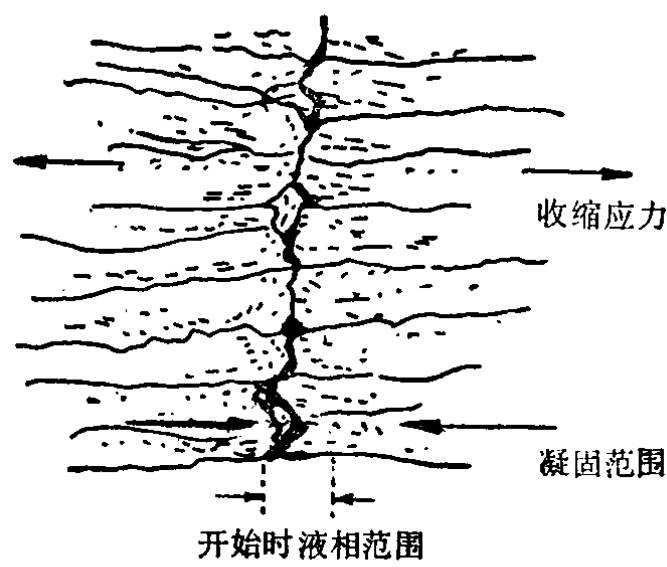


图2 焊接金属的凝固裂纹模式。

此外,在多层焊中,前层受到后层的热影响或在母材热影响区中,由于前述的晶界液化也会引起晶界裂纹。在钢焊缝中残余氢扩散集积