

印有胜 编著

金属焊接缺陷及其防止

HJ

黑龙江科学技术出版社

金属焊接缺陷及其防止

印有胜 编著

黑龙江科学技术出版社

(黑)新登字第2号

责任编辑:张坚石

封面设计:张秉顺

版式设计:王莉

金属焊接缺陷及其防止

印有胜 编著

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街41号)

黑龙江省教育委员会印刷厂印刷

黑龙江省新华书店发行

850×1168毫米 32开本 22.75印张 6插页 585千字

1995年6月第1版·1995年6月第1次印刷

印数:1—2000册

定价:24.90元

ISBN 7-5388-2651-3/TG·35

前 言

本人在长期从事高等学校焊接专业的教学和科研工作中，了解到许多工程技术人员、生产管理干部和生产第一线的工人非常渴望能有一本比较全面系统地讲述防止金属焊接缺陷方面的书籍。为了满足这方面的需求，特编写了这本书。

该书共分五章：第一章金属焊接缺陷概论；第二章金属焊接方法常见焊接缺陷的防止；第三章金属材料焊接常见缺陷的防止；第四章焊接裂纹敏感性主要试验方法；第五章焊接检验。

本书在编写的内容上始终坚持实用性的原则，既面向生产实际的需要，又有一定的理论高度和深度；既重点突出，又注意知识的系统性与完整性；既通俗易懂，又注意知识的科学性；从解决生产中的实际问题出发，既有传统的经验，又注意吸取了国内外最新科学技术成果，并考虑到今后的发展和提高。

本书可供焊接生产工人、工程技术人员、生产管理干部和大、中专院校焊接专业师生学习参考使用。

由于本人水平有限，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 著 者

目 录

第 一 章 金属焊接缺陷概论.....	(1)
第一节 金属焊接缺陷与焊接性.....	(2)
一、焊接缺陷与金属焊接性.....	(2)
二、焊接缺陷与工艺焊接性.....	(2)
第二节 影响焊接缺陷的因素.....	(3)
一、材料因素.....	(3)
二、工艺因素.....	(4)
三、结构因素.....	(5)
四、使用条件.....	(5)
第三节 焊接缺陷的分类.....	(6)
第四节 焊接缺陷的一般特征.....	(7)
一、焊缝尺寸不符合要求.....	(7)
二、咬边.....	(7)
三、焊瘤.....	(8)
四、焊穿.....	(9)
五、弧坑.....	(10)
六、内凹(塌腰).....	(10)
七、严重飞溅.....	(10)
八、电弧擦伤.....	(11)
九、坡口和装配缺陷.....	(11)
十、夹渣.....	(12)
十一、未焊透.....	(12)
十二、未熔合.....	(13)
十三、夹钨.....	(13)
十四、白点.....	(14)
十五、偏析.....	(14)

十六、气孔	(15)
十七、裂纹	(16)
十八、焊接残余变形	(29)
十九、焊接接头性能不符合要求	(32)
第五节 焊接缺陷产生的原因及防止措施	(32)
一、焊缝尺寸不符合要求	(32)
二、咬边	(32)
三、焊瘤	(33)
四、焊穿	(33)
五、弧坑	(34)
六、内凹(塌腰)	(34)
七、严重飞溅	(34)
八、电弧擦伤	(35)
九、坡口和装配缺陷	(35)
十、夹渣	(40)
十一、未焊透	(40)
十二、未熔合	(41)
十三、夹钨	(41)
十四、白点	(42)
十五、偏析	(42)
十六、气孔	(44)
十七、裂纹	(46)
十八、焊接变形	(101)
第三章 金属焊接方法常见焊接缺陷的防止	(143)
第一节 手工电弧焊常见缺陷的防止	(144)
一、咬边	(144)
二、未熔合	(151)
三、焊瘤	(154)
四、未焊透	(156)

五、夹渣	(159)
六、烧穿	(162)
七、气孔	(163)
八、裂纹	(166)
第二节 埋弧焊常见缺陷的防止	(167)
一、气孔	(168)
二、裂纹	(172)
三、未熔合	(178)
四、未焊透	(179)
五、咬边	(185)
六、焊穿	(187)
七、夹渣	(190)
八、焊缝表面成形不良	(192)
第三节 电渣焊常见缺陷的防止	(199)
一、裂纹	(201)
二、未焊透	(210)
三、夹渣	(218)
四、气孔	(219)
第四节 氩弧焊常见缺陷的防止	(220)
一、钨极氩弧焊常见缺陷	(220)
二、熔化极氩弧焊常见缺陷	(245)
第五节 CO ₂ 气体保护焊常见缺陷的防止	(254)
一、气孔	(255)
二、飞溅	(265)
三、其他缺陷	(270)
第六节 等离子弧焊接常见缺陷的防止	(275)
一、咬边	(277)
二、未焊透	(279)
三、气孔	(285)

四、焊缝表面成形不良	(286)
五、烧穿(切割现象)	(287)
第七节 气焊常见缺陷的防止	(289)
一、过烧和焊穿	(290)
二、未焊透和未熔合	(297)
三、气孔和焊缝金属氧化	(301)
四、裂纹	(304)
五、咬边	(309)
六、焊瘤	(310)
七、焊缝成形不良	(310)
八、夹渣	(312)
第八节 电阻焊常见缺陷的防止	(312)
一、点焊和缝焊常见缺陷	(319)
二、对焊常见缺陷	(351)
第九节 堆焊常见缺陷的防止	(367)
一、手工堆焊常见缺陷	(375)
二、粉末等离子弧堆焊常见缺陷	(403)
第十节 金属喷涂常见缺陷的防止	(411)
一、涂层碎裂、疏松和脱落	(413)
二、涂层不耐磨	(432)
三、涂层分层	(433)
四、涂层粗糙	(433)
五、涂层变色	(433)
第十一节 钎焊常见缺陷的防止	(437)
一、钎焊接头中的缺陷	(438)
二、钎焊常见缺陷	(440)
第三章 金属材料焊接常见缺陷的防止	(472)
第一节 碳素钢焊接常见缺陷的防止	(472)
一、低碳钢焊接常见缺陷	(472)

二、中碳钢焊接常见缺陷	(477)
三、高碳钢焊接常见缺陷	(479)
第二节 合金结构钢焊接常见缺陷的防止	(481)
一、热轧及正火钢焊接常见缺陷	(481)
二、低碳调质钢焊接常见缺陷	(493)
三、中碳调质钢焊接常见缺陷	(501)
四、珠光体耐热钢焊接常见缺陷的缺陷	(508)
五、低温钢焊接常见缺陷	(514)
六、低合金耐蚀钢焊接常见缺陷	(519)
第三节 不锈钢和耐热钢焊接常见缺陷的防止	(523)
一、奥氏体不锈钢焊接常见缺陷	(524)
二、铁素体不锈钢焊接常见缺陷	(535)
三、马氏体钢焊接常见缺陷	(537)
第四节 高温合金焊接常见缺陷的防止	(541)
一、焊接热裂纹	(542)
二、应变时效裂纹	(548)
第五节 铸铁焊接常见缺陷的防止	(551)
一、灰口铸铁焊接常见缺陷	(553)
二、球墨铸铁焊接常见缺陷	(570)
第六节 铝及铝合金焊接常见缺陷的防止	(574)
一、焊缝中的气孔	(575)
二、焊接热裂纹	(579)
三、焊接接头的不等强性	(590)
四、焊接接头的抗蚀性能降低	(592)
第七节 铜及铜合金焊接常见缺陷的防止	(593)
一、气孔	(593)
二、热裂纹	(606)
三、难熔合和易变形	(608)
四、焊接接头塑性及导电性能降低	(608)

第八节 钛及钛合金焊接常见缺陷的防止	(609)
一、接头脆化和冷裂纹	(610)
二、气孔	(618)
第九节 异种金属焊接常见缺陷的防止	(619)
一、珠光体钢与奥氏体钢焊接常见缺陷	(620)
二、钢与铜及其合金的焊接常见缺陷	(633)
第四章 焊接裂纹敏感性主要试验方法	(638)
第一节 焊接冷裂敏感性试验方法	(638)
一、斜Y坡口对接裂纹试验 (小铁研式试验)	(638)
二、插销试验	(641)
三、拉伸拘束裂纹试验 (TRC试验)	(645)
四、刚性拘束裂纹试验 (RRC试验)	(646)
五、十字形接头裂纹试验	(648)
六、受控热流程度裂纹试验 (CTS试验)	(649)
七、冷裂敏感性的间接评价方法	(651)
第二节 热裂敏感性试验方法	(655)
一、刚性固定对接裂纹试验	(655)
二、窗形拘束对接裂纹试验	(655)
三、横向可变拘束试验	(657)
四、FiSCO试验	(658)
五、指形裂纹试验	(659)
六、递增应变速率热裂纹试验	(660)
第三节 再热裂纹敏感性试验方法	(662)
一、改进里海 (Lehigh) 拘束试验	(662)
二、H型拘束试验	(663)
三、BWRA管子环缝再热裂纹试验	(664)
四、多层对接焊控制拘束程度再热裂纹试验 (反面拘束焊道再热裂纹试验)	(664)
五、利用不同热膨胀系数的再热裂纹试验	(666)

六、U形弯曲试验·····	(667)
七、缺口试棒应力松弛试验·····	(668)
第四节 层状撕裂敏感性试验方法·····	(668)
一、Z向窗口试验·····	(668)
二、Cranfield试验·····	(669)
三、Z向拉伸试验·····	(670)
第五节 应力腐蚀裂纹敏感性试验方法·····	(671)
一、试验介质·····	(671)
二、试样形式·····	(672)
三、加载方法·····	(672)
四、 <i>K₁</i> 的测定方法·····	(675)
第五章 焊接检验 ·····	(679)
第一节 焊接检验的内容·····	(679)
一、焊前检验·····	(680)
二、生产过程中的检验·····	(684)
三、焊后成品的检验·····	(687)
第二节 焊接检验方法·····	(688)
一、外观检查和测量·····	(688)
二、致密性检验和水压强度试验·····	(688)
三、无损探伤检验·····	(694)
四、焊接接头机械性能试验·····	(703)
五、焊缝金属化学成分分析·····	(710)
六、焊接接头金相组织检验·····	(710)
参考文献 ·····	(714)

第一章 金属焊接缺陷概论

金属作为最常用的工程结构材料，往往要求具备如高温强度、低温韧性、耐腐蚀性以及其他一些基本性能，并且要求在焊接之后仍能保持这些基本性能。但是人们通过长期的生产和科研实践发现，某些具有良好强度、塑性、耐腐蚀等性能金属材料，在焊接时可能出现裂纹、气孔等缺陷，或者虽然能够得到完整的接头但性能却达不到要求，常常由这些焊接缺陷给焊接结构造成各种破坏事故。例如，1979年12月18日我国吉林市煤气公司液化石油气站 $102^{\circ}400\text{m}^3$ 球罐由于焊趾部位存在裂纹，在使用过程中这些裂纹进一步扩展导致球罐破裂，喷漏出大量液化石油气迅速向北蔓延，在球罐西北方向约 200m 处遇明火引起燃烧，导致其它储罐燃烧和爆炸。火焰高达几十米，燃烧面积达 42万m^2 ，六个球罐、六个卧罐全部爆炸、裂开或烧毁，造成经济损失达 600 万元。对 102° 球罐破裂事故进行了分析，球罐的破裂属于低应力脆性断裂。断裂的起因主要是由于焊接时预热温度不足，热影响区产生对氢致裂纹敏感的组织，加之严重的咬边和强制装配引起的应力集中，在扩散氢的作用下使球罐焊趾部位产生裂纹。这些裂纹在使用中进一步扩展，达到临界值后导致球罐破裂。

关于各类焊接结构如桥梁、船舶、管道、压力容器等因焊接缺陷引发的各种破坏事故国内外曾有过许多报道实例。

为什么有些性能良好的金属材料在焊接时可能会出现这样或那样的缺陷，或焊后使用中会出现问题呢？这些都与焊接性密切相关。

第一节 金属焊接缺陷与焊接性

焊接性包括两个概念，一个是金属焊接性，另一个是工艺焊接性。它们与焊接缺陷的形成有着密切的联系。

一、焊接缺陷与金属焊接性

所谓金属焊接性就是指金属是否具有适应焊接加工，以及在焊接加工以后是否能在使用条件下安全运行的能力。也就是说，它包含两层意思，第一是焊接时金属是否具有能够形成完整无缺陷的焊接接头的能力；第二是已焊成的焊接接头在使用条件下是否具有安全运行的能力。前者可认为是结合性能，后者可认为是使用性能。例如，低碳钢采用焊接加工时很容易获得完整而无缺陷的焊接接头，而不需要复杂的工艺措施，所以说低碳钢的结合性能很好。如果用同样的工艺来焊接铸铁，则往往会发生裂纹、断裂、剥离等严重的缺陷，而得不到完整的焊接接头。所以说铸铁的结合性不好或不如低碳钢。要使铸铁获得完整的焊接接头，就得使用特殊的焊接材料并采取高温预热、缓冷、锤击等工艺措施。

另一方面，完整的焊接接头并不一定具有满足要求的使用性能。例如，铬镍奥氏体钢是比较容易获得完整焊接接头的，但如果焊接方法和工艺措施不合适，则焊接接头可能不耐腐蚀，造成使用性能不合格。焊接铸铁时，即使接头未发生裂纹等缺陷，也常常会因为熔合线附近存在硬脆的白口组织，不能进行切削加工而无法使用。

可见，在一定的工艺条件下金属焊接缺陷能否形成以及焊接接头能否达到要求的使用性能取决于金属焊接性。

二、焊接缺陷与工艺焊接性

工艺焊接性包括冶金焊接性和热焊接性。它们同样与焊接缺陷有直接的关系。

1. 焊接缺陷与冶金焊接性

冶金焊接性是指由母材和焊接材料共同组成的熔池金属在高温液态下与熔渣和气相之间发生物理化学反应、成分偏析以及随后的凝固结晶等过程中所引起的焊接性的变化。

在上述的冶金过程中，由于合金元素的氧化、还原、蒸发等，易造成焊缝金属化学成分、金相组织和各种性能的改变；氧、氮、氢等杂质气体溶入、析出，可能造成气孔或影响焊缝金属的性能；熔池结晶时的成分偏析及结晶方向等还可能导致发生热裂纹。

可见，焊接缺陷与冶金焊接性有着直接的关系。

2. 焊接缺陷与热焊接性

焊接时对金属形成加热和冷却的过程，这对靠近焊缝的热影响区金属会造成显微组织的变化，从而引起机械性能、硬度、耐腐蚀性能等的变化，这些都属于热焊接性的问题。

工程上使用的结构材料大都是合金，它们经过焊接热循环后都会有组织和性能的变化，例如，过热区因产生粗大晶粒而脆化，熔合区因从高温急冷而淬硬脆化，以及回火区的软化等。即使是没有相变的单相奥氏体钢或一些纯金属如纯铝等，也可能由于晶粒长大、形变硬化作用消失或晶界一些微量元素的扩散迁移而使其性能发生明显的变化。由于脆化及应力会造成裂纹等缺陷；由于脆化、硬化、软化等会造成焊接接头使用性能不符合要求等缺陷。

可见，焊接缺陷与热焊接性同样有着直接的联系。

第二节 影响焊接缺陷的因素

一、材料因素

所谓材料因素是指被焊的母材和所使用的焊接材料，如焊丝、焊条、焊剂、以及保护气体等。所有这些材料在焊接时都直

接参与熔池或熔合区的物理化学反应，其中，母材本身的材质对热影响区的性能起着决定性的影响。显然，所采用的焊接材料对焊缝金属的成分和性能也是关键的因素。如果焊接材料与母材匹配不当，则不仅可能引起焊接区内的裂纹、气孔等各种缺陷，而且也可能引起脆化、软化或耐腐蚀等性能变化。所以，为保证获得质量良好的焊接接头，必须对材料因素予以充分的重视。

二、工艺因素

大量的实践证明，同一种母材，在采用不同的焊接方法和工艺措施的情况下，其焊接质量会表现出很大的差别。

焊接方法对焊接质量的影响主要可能在两个方面：首先是焊接热源的特点，也就是功率密度、加热最高温度、功率大小等，它们可直接改变焊接热循环的各项参数，如线能量大小，高温停留时间、相变温度区间的冷却速度等。这些当然会影响接头的组织和性能，其次是对熔池和接头附近区域的保护方式，如熔渣保护、气体保护、气—渣联合保护或是在真空中焊接等，这些都会影响焊接冶金过程。显然，焊接热过程和冶金过程必然对接头的质量和性能会有决定性的影响。

例如，纯铝焊接时若采用气焊方法，由于热源温度低、热量分散以及保护不良等原因，很难避免气孔、未焊透等缺陷，其接头性能很差；如果采用氩弧焊方法，则接头质量可完全满足使用要求。某些对过热十分敏感的低合金高强钢，为了降低焊接时的线能量，宜于选择电子束焊、等离子焊和脉冲电弧焊之类的方法。与此相反，对于容易产生白口组织的铸铁来说，却需要加大焊接线能量而减缓冷却速度，采用电渣焊、气焊等功率密度低、加热较为分散的方法，对防止铸铁焊接时产生白口组织有利。由此可见，可利用各种焊接方法的不同特点来防止焊接缺陷的发生，以求改善焊接质量。

在各种工艺措施中，采用最多的就是焊前预热和焊后热处理，这些措施分别对降低焊接残余应力，减缓冷却速度以防止热

影响区淬硬脆化，避免焊缝热裂纹或氢致冷裂纹等都是比较有效的。此外，严格烘干焊条、焊剂，清洗焊丝及坡口，合理安排焊接顺序，控制焊前冷作变形，保证坡口形状尺寸及装配间隙、正确选择焊接规范、掌握正确的操作方法以及施工的环境等因素，都必须予以充分的重视。

三、结构因素

焊接接头的结构设计影响其受力状态，这里所指的是接头处的刚度、应力集中和多轴应力等方面的因素。这些因素既可能影响焊接时是否发生缺陷，又可能影响焊接后接头的强度、韧性等承载能力。当然，设计焊接结构时，应尽量使接头处于拘束度较小、能够较为自由地伸缩的状态，这样有利于防止焊接裂纹。存在缺口、截面突变、堆高过大、焊缝交叉等都应尽量避免，否则会造成应力集中，不利于使用性能。母材厚度或焊缝体积很大时会造成多轴应力状态，实际上影响承载能力，易于造成接头过早地破坏。

四、使用条件

焊接结构必须符合使用条件的要求。因而，使用条件是否严酷，也必然影响到接头的使用性能。载荷的性质、工作温度的高低、工作介质有无腐蚀性等都属于使用条件。

焊接接头在高温下承载，必须考虑到某些合金元素的扩散和整个结构发生蠕变的问题；承受冲击载荷或在低温下使用时，要考虑到脆性断裂的可能性；接头如需在腐蚀介质中工作或承受交变载荷的作用时，又要考虑应力腐蚀或疲劳破坏的问题……。总之，使用条件越是苛刻，实际上就是对接头的质量提出了更高的要求，接头的使用性能就越难保证。

综上所述，影响焊接缺陷的因素是多方面的，如材料、工艺、结构和使用条件等，必须综合考虑上述因素的影响。

第三节 焊接缺陷的分类

焊接生产中产生焊接缺陷的类型是多种多样的,按其在焊接接头中所处的位置和表现形式的不同,可以把焊接缺陷大致分为两类:一类是外部缺陷;另一类是内部缺陷。外部缺陷指的是用肉眼或用简单的方法便可以从外部检查出来的缺陷,如焊缝尺寸不符合要求、咬边、弧坑、焊穿、焊瘤、严重飞溅、电弧擦伤、塌腰、表面裂纹、表面气孔以及接头变形等。内部缺陷只能通过破坏性检查或无损探伤的方法来发现,如内部气孔、内部裂纹、杂渣、杂钨、未焊透、未熔合、偏析、白点以及接头的组织和性能不符合要求等。

焊接缺陷的详细分类如下所示:

