

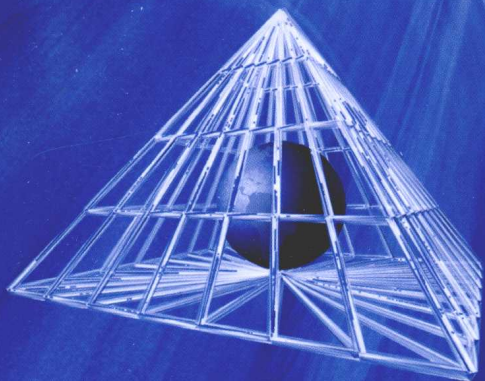


材料科学与工程综合实验教学系列教材

连接成形综合实验



华中科技大学 刘顺洪 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

材料科学与工程综合实验教学系列教材

连接成形综合实验

刘顺洪 编



机械工业出版社

本书编入了“材料成形原理”、“材料成形工艺”、“材料成形装备及自动化”课程的有关焊接的实验以及“材料表面工程”课程的有关实验共8个。每个实验都系统地介绍了实验的背景知识、实验原理和实验方法,还对实验结果的整理与分析提出了要求,并留有思考题。

本书可供高等院校材料加工工程专业的本科生和专科生使用,也可供研究生和从事金属连接生产与科研开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

连接成形综合实验/刘顺洪编. —北京:机械工业出版社,2010.5
(材料科学与工程综合实验教学系列教材)
ISBN 978-7-111-30807-2

I. ①连… II. ①刘… III. ①工程材料—成型—实验—教材
IV. ①TB3-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第097640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:冯春生 责任编辑:白刚 版式设计:张世琴
责任校对:纪敬 封面设计:张静 责任印制:杨曦
北京双青印刷厂印刷

2010年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·7印张·145千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30807-2

定价:14.00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

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

序

材料是重要的。材料的进步是科学技术进步的先导。可以说,没有材料就没有世界。材料的研究、制备与加工是影响国家竞争力的关键领域,许多关系到国计民生的重大工程和核心装备的限制性环节往往归结到材料及材料加工上。然而,从本质上讲,这些问题能否科学合理地解决,取决于从事该领域人才的水平与能力。因此,如何培养合格的材料学科人才,特别是培养具有创新精神、实践能力、高素质的材料学科人才是高等学校面临的一个重要课题。

近些年来,华中科技大学材料科学与工程学院在实践教学方面进行了有益的探索,先后承担了教育部“人才培养模式创新实验区”、湖北省“材料学科综合性、开放性实验平台建设的研究与实践”等教学改革项目,目的是研究建立适合新形势下的材料学科创新性、综合性实践教学体系,探索行之有效的实施办法,提高人才培养质量。而提高教学质量是高等学校面对的主要课题。

改革的主要措施之一是在本科实验教学中,建立专门的本科实验教学中心,科学合理地整合本科课程的教学实验,形成了10门独立的综合性实验课程,独立考核、单独记学分。这些独立设课的实验课程涵盖了数门理论课程,使传统依附在理论教学的演示性实验转变为以培养学生动手能力、分析及创新能力的综合性实验,显著地提升了实验教学的地位,体现了实验教学在人才培养中的重要作用。

在上述背景下,华中科技大学材料科学与工程学院与机械工业出版社合作,编写出版了本套材料科学与工程综合实验教学系列教材,目的是更好地服务于实验教学,不断提高实践教学质量。该系列教材最大的特点就是将材料学科的某一领域(如材料连接、塑料注射成型、金属塑性成形等)的相关实验项目进行提炼,形成各自独立又彼此相关的综合性实验。在编写过程中,还特别注意基础性实验与创新性实验相结合,在切实保障学生达到基本要求的前提下,尽量为培养学生的创新精神与锻炼学生的动手能力提供条件。

我相信,该套综合实验教学系列教材的出版,有助于有效地提高学生的创新、实践能力,对深化材料学科的教学改革、提升人才培养质量具有重要的意义。当然,任何一事物,不可能完美无缺,我也和作者一样,希望读者能对本系列教材的不足之处提出批评与建议。

谨为之序。

中国科学院院士

杨叔子

前 言

焊接技术是先进制造技术的一个重要组成部分，它在汽车、铁路机车、船舶、拖拉机、航空航天、军工、家用电器、微电子等产品的零部件制造业中得到了广泛的应用。因此，在制造业领域内，对这方面的技术和人才的需求十分迫切，且数量很大。

本书是按照材料成形及控制工程专业系列教材——《材料成形原理》、《材料成形工艺》、《材料成形装备及自动化》以及《材料表面工程》中涉及焊接部分的要求编写的，力图反映焊接技术的新发展，并注重专业基础知识的传授。本书充分考虑了课程和实验配合的需要，注重学生实践能力的培养。

本书共列入了材料成形原理、材料成形工艺、材料成形装备及自动化、材料的激光加工焊接部分的内容以及表面工程学等内容的 8 个实验。实验课可单独设课。实验课总学时为 40 学时。

书中所列的实验内容大部分是综合性实验，要求学生综合运用若干课程的知识以及实验的背景和理论知识，通过实验来培养分析问题和解决问题的能力。实验中，学生可自行设计实验方案，在教师的指导下单独进行实验，也可几组学生共同完成系统设计的实验，数据共享，加深对理论知识的理解。

书中参考了一些资料，引用了一些文献，在此一并表示感谢。

限于编者的水平，书中会有不少疏漏和错误，恳切希望读者给予批评指正。

编 者

目 录

序

前言

概述	1
一、设置连接成形综合实验课程的作用与意义	1
二、实验教学目标	1
三、实验教学的基本思路	1
四、主要实验教学内容	2
实验一 焊缝金属中扩散氢的测定	3
一、实验基本理论	3
二、实验目的及内容	15
三、实验所用设备、材料、工具	15
四、实验步骤	15
五、实验报告内容	16
六、思考题	17
实验二 工业机器人运动编程及自动 CO ₂ 焊	18
一、实验基本理论	18
二、实验目的及内容	27
三、实验所用设备、材料、工具	27
四、实验步骤	28
五、实验报告内容	28
六、思考题	28
实验三 电阻点焊实验	29
一、实验基本理论	29
二、实验目的及内容	38
三、实验所用设备、材料、工具	39
四、实验步骤	39



五、实验报告内容	40
六、思考题	40
七、实验操作要求及其他	41
实验四 连续激光焊接实验	42
一、实验基本理论	42
二、实验目的及内容	54
三、实验所用设备、材料、工具	54
四、实验步骤	54
五、实验报告内容	54
六、思考题	55
实验五 脉冲激光焊接实验	56
一、实验基本理论	56
二、实验目的及内容	68
三、实验所用设备、材料、工具	68
四、实验步骤	68
五、实验报告内容	69
六、思考题	69
实验六 激光熔敷实验	70
一、实验基本理论	70
二、实验目的及内容	76
三、实验所用设备、材料、工具	76
四、实验步骤	76
五、实验报告内容	76
六、思考题	76
实验七 激光相变强化实验	77
一、实验基本理论	77
二、实验目的及内容	92
三、实验所用设备、材料、工具	92
四、实验步骤	92
五、实验报告内容	92
六、思考题	92



实验八 焊接残余应力的盲孔法测定	93
一、实验基本原理	93
二、实验目的及内容	98
三、实验所用设备、材料、工具	99
四、实验步骤	99
五、实验报告内容	100
六、思考题	100
参考文献	101

概 述

一、设置连接成形综合实验课程的作用与意义

“材料成形原理”、“材料成形工艺”、“材料成形装备及自动化”是“材料成形及控制工程”专业本科的几门重要的必修课程。它包括教材建设、课堂教学、实验教学、电子教案、网络课程、习题与试题库、教学参考书（资料库）、在线视频等内容。而金属连接成形是材料成形工艺的重要组成部分之一。

华中科技大学“材料成形及控制工程”专业的培养目的是：培养具备材料成形与控制学科及相关专业学科的基础理论知识与应用能力，能够在工业生产第一线从事材料成形工艺技术研究与发展、设计与制造、应用与运营管理等各方面工作并富有创新精神的综合素质高的人才。

综合素质高的人才，一是要具有较为扎实的专业理论基础和较宽的专业知识面；二是要具有较强的实践与动手能力即实际工作能力；三是具有较高的外语和计算机应用水平；四是具有一定的人文素质和团队精神等。

实践与动手能力是当代大学生及研究生最为缺乏和不足的能力，实验课和实习则是大学生在学习过程中培养实践与动手能力的重要环节，尤其是实验课更显重要。

二、实验教学目标

- 1) 掌握实验仪器设备的使用及操作技能和实验方法，培养学生的实践及动手能力。
- 2) 深化教材和课堂理论知识的理解，促进学生综合技术素质和创新能力的培养。

三、实验教学的基本思路

1) 实验教学的内容应当与教材及课堂理论教学的内容保持一致，相互协调呼应，但应将实验由单纯验证书本理论知识转变为验证和分析研究相结合的复合型设计，对理论教材没有涉及的内容有所扩展，使学生加深了解实验的背景和理论知识。本书所设实验大部分都可扩展为综合性实验，以加强学生对实践环节的兴趣和对理论知识的深刻理解。

2) 将实验设计为课内必做实验和课外选做创新实验两种类型，以课内必做实验为主，同课外选做创新实验相结合。参加课外选做创新实验的学生，本着“学有余力，不影响正常教学安排，确有兴趣，自愿参加”的原则，避免创新实验流于形式或走过场，确保参加创新实验的学生其实际动手能力和技术创新能力都得到进一步的提高。



3) 全部实验教学内容与教材和课堂教学内容一样,以连接原理及工艺为重点,以设备为辅,使所开的全部单个实验形成一个有机的完整体系,彼此关联,体现所有实验的整体综合性,而不是各自独立、互不相关,这样有利于培养学生成套技术的完整思维和集成创新的能力。

四、主要实验教学内容

本实验教学材料主要与普通高等教育“十一五”国家级规划教材《材料成形工艺》(第2版)以及《材料成形原理》(第2版)、《材料成形装备及自动化》和《材料表面工程学》中有关连接成形部分的知识内容相呼应。

本书所设置的主要实验共分为8个教学实验,其目的是供使用者根据自己的教学内容与实验条件进行选择。本书强调了实验的基本理论和背景,是为了适应实验课程单独设课的需要而准备的。

实验一 焊缝金属中扩散氢的测定

一、实验基本理论

氢对焊接接头的影响极大。氢不仅能在焊缝中生成气孔，而且是产生冷裂纹的主要原因之一。氢致裂纹常带有延迟性，往往使焊件在工作一段时间以后开裂，因而其危害性更大。氢也能引起金属的微裂和发裂等。虽然这些微观缺陷不至于直接导致焊件的破坏，但却能明显地降低金属的抗拉强度、屈服强度、冲击韧度、伸长率、断面收缩率，尤其对疲劳强度有较大的影响。

大量生产实践和理论研究证明，高强钢焊接时产生延迟裂纹的原因主要有：钢种的淬火倾向；焊接接头的含氢量及其分布；焊接接头的拘束应力。三个因素在一定条件下是相互联系、相互制约和相互促进的。其中氢是引起高强钢焊接时延迟裂纹的重要因素之一，使裂纹具有延迟的特征，因此把氢引起的延迟裂纹称为“氢致裂纹”或“氢致诱发裂纹”。

高强钢焊接接头的含氢量越高，则裂纹倾向越大，当含氢量超过某一临界值时，便开始出现了裂纹。以后随着含氢量的增多，裂纹的尺寸和数量也在不断地增加。

某钢种产生延迟裂纹时，临界含氢量 $[H]_{cr}$ 与母材化学成分、预热温度以及冷却速度等有关。如图 1-1 所示，随着碳当量 CE 的提高，则产生裂纹的临界含氢量 $[H]_{cr}$ 将降低。

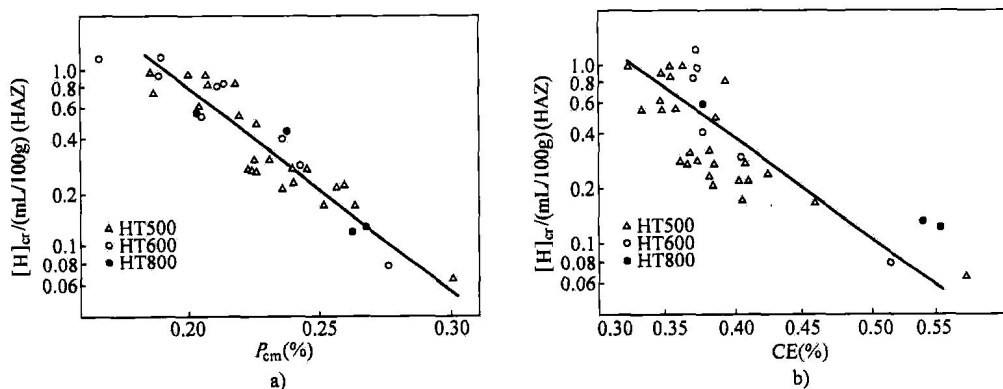


图 1-1 碳当量与临界含氢量的关系

a) P_{cm} 与 $[H]_{cr}$ b) CE 与 $[H]_{cr}$

图 1-2 是抗拉强度为 586N/mm^2 (60kgf/mm^2) 和 782N/mm^2 (80kgf/mm^2) 的高强钢产生根部裂纹与含氢量和预热温度的关系。

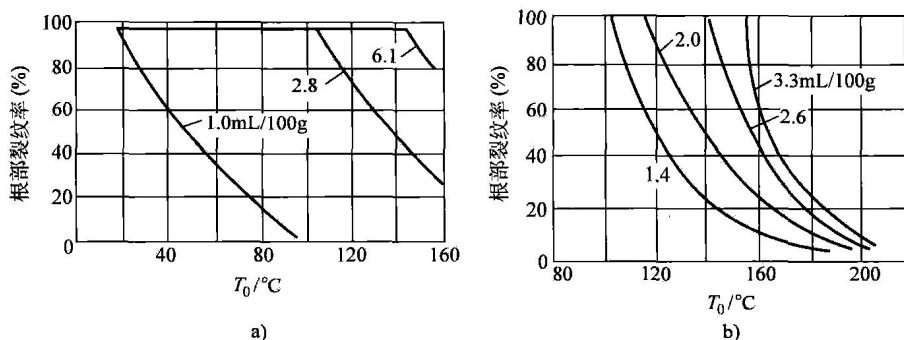


图 1-2 高强钢产生根部裂纹与含氢量和预热温度的关系

a) $\sigma_b = 586 \text{ N/mm}^2$ b) $\sigma_b = 782 \text{ N/mm}^2$

(一) 氢在焊缝金属中的溶解及扩散

在焊接条件下,焊接材料中的水分,焊件坡口附近的油污、铁锈,以及空气中的湿气都是使焊缝金属中富氢的主要原因。一般情况下,母材和焊丝中的含氢量是极少的(约 0.2 mL/100g 以下),可以忽略不计。

焊条药皮中水分含量越多,空气中的湿气浓度越大,则焊缝中的扩散氢含量越多,如图 1-3 所示。

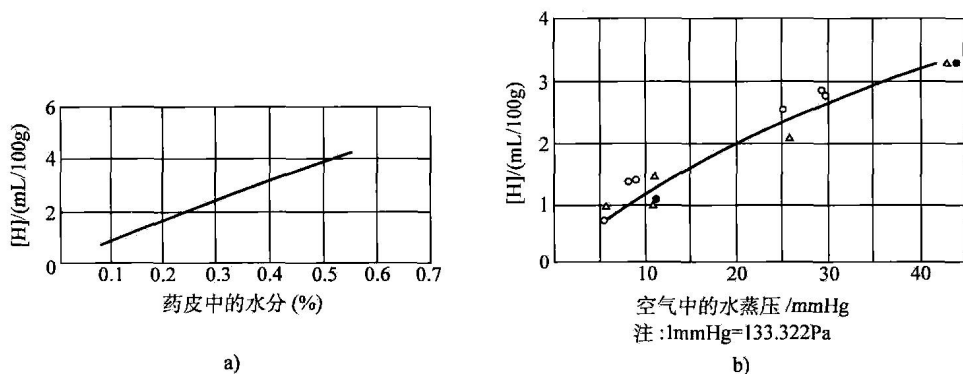


图 1-3 药皮中的水分和空气中的湿气对焊缝中含氢量的影响

a) 焊条药皮中水分的影响 (甘油法, L-80, $\phi 4\text{mm}$ 焊条)b) 空气中湿气浓度的影响 (甘油法, L-80, $\phi 4\text{mm}$ 焊条)(焊条烘干: $\circ$ —430°C/h $\triangle$ —400°C/h $\bullet$ —375°C/h)

在焊接过程中,由于电弧的高温作用,氢分解成原子或离子(即质子)状态,并大量溶解于焊接熔池中。在随后冷却和凝固的过程中,由于溶解度的急剧下降,氢极力向外逸出。但在焊接条件下冷却得较快,使氢来不及逸出而残存在焊缝金属的内部,使焊缝中的氢处于过饱和状态。焊缝中的含氢量与焊条的类型、烘干温度以及焊后的冷却速度有关。图 1-4 是采用两种焊条(纤维素焊条和碱性焊条)在厚度为 10mm 的钢板上

V形坡口对接焊接，焊后在冰水中和空气中进行冷却后测定的扩散氢含量的结果。

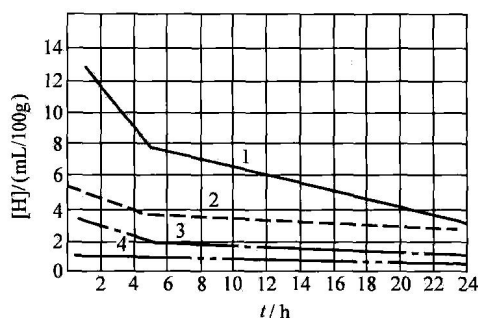


图 1-4 不同类型焊条及冷却条件对焊缝扩散氢含量的影响

1—纤维素焊条，冰水中冷却 2—纤维素焊条，空气中冷却
3—碱性焊条，冰水中冷却 4—碱性焊条，空气中冷却

由图 1-4 可以看出，用纤维素焊条焊接的焊缝，当在空气中冷却时，时效 1h 后，焊缝金属的扩散氢只有 5mL/100g 左右，而在相同条件下，用碱性焊条焊接的焊缝含氢量只有 1.5mL/100g。但是，如果焊接后把试件放在冰水中急冷，则测得焊缝金属的含氢量是比较高的（纤维素焊条为 13mL/100g，碱性焊条为 3mL/100g），因此冷却条件不同，含氢量会发生较大的变化。这主要是因为温度低时不利于氢的扩散，有更多的氢保留在焊缝中，以后随着时间的延长，氢不断向外扩散，而且随着预热温度的不同，扩散的能力也不同。

有人曾用低碳钢和 2.25Cr-1Mo 钢进行试验，结果如图 1-5 所示。由图 1-5 可以看出，预热温度越高，氢越易于扩散。应注意，由于低碳钢和 2.25Cr-1Mo 钢彼此使用的

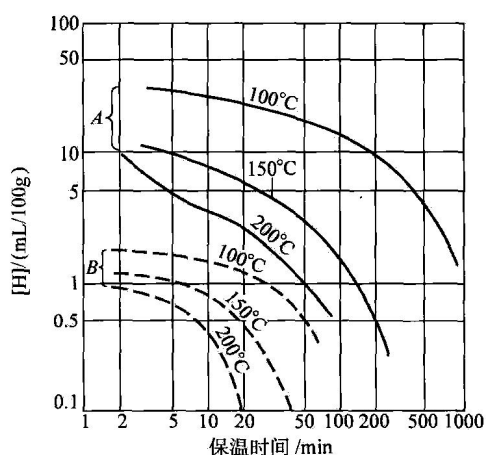


图 1-5 焊缝残余扩散氢含量与时间的关系

（试样 25mm × 25mm × 130mm）

A—低碳钢 B—2.25Cr-1Mo 钢



焊条不同,因此二者不能进行比较,但在图 1-5 中说明的问题都是一致的,即焊缝中残余的扩散氢含量都是随时间和预热温度的增高而降低。

(二) 金属相变对氢的扩散及聚集

在不同温度下,不仅氢在奥氏体和铁素体中的溶解度发生急剧的变化,同时氢在不同的金相组织中的扩散能力也有显著的不同。如图 1-6 所示,氢在奥氏体中的溶解度大,在铁素体中的溶解度小。因而在焊接时由奥氏体向铁素体转变的过程中,氢溶解度发生突然降低(图 1-6a)。与此同时,氢的扩散速度恰好相反,在奥氏体向铁素体转变时突然增加(图 1-6b)。

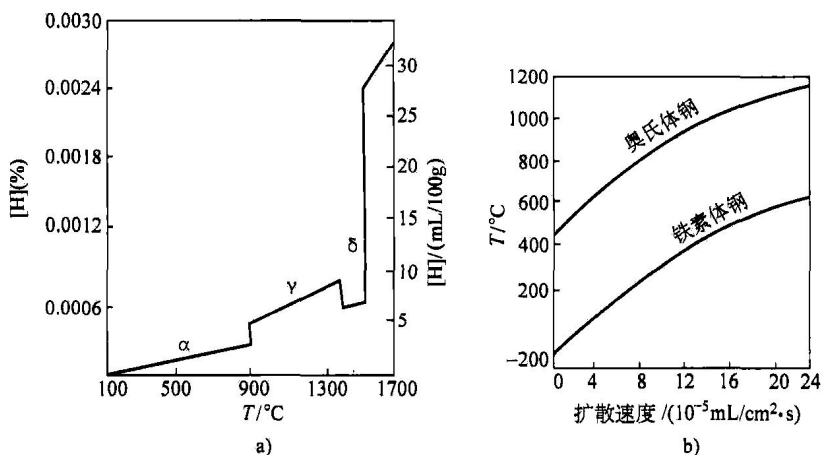


图 1-6 氢在铁中的溶解度及在钢中的扩散速度

a) 氢在铁中的溶解度 b) 氢在钢中的扩散速度

氢在不同组织中的扩散速度主要取决于氢在不同组织中的扩散系数 D 。根据实验,氢在 $w_c = 0.54\%$ 中碳钢不同组织中的扩散系数及表面饱和浓度见表 1-1。

表 1-1 氢在 $w_c = 0.54\%$ 中碳钢不同组织中的扩散系数及表面饱和浓度

项目 \ 组织	珠光体、铁素体	索氏体	托氏体	马氏体	奥氏体
扩散系数/(cm^2/s)	4.0×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.2×10^{-7}	2.5×10^{-7}	2.1×10^{-12}
表面饱和浓度/($\text{mL}/100\text{g}$)	40	32	26	24	—

根据氢在不同组织中具有不同扩散能力的特点,可以分析氢在形成延迟裂纹过程中的作用。

从前面的讨论可以知道,含碳量较高的李晶马氏体对裂纹和氢脆有很大的敏感性,基于这点出发,总是控制焊缝金属的含碳量低于它的母材。实践也证明了这一点,当焊接一般低合金高强度钢时,延迟裂纹往往出现在焊接热影响区内。

这种热影响区裂纹是怎样形成的?与氢有什么关系?这一问题可以根据热影响区的



热过程和相过程来进行分析。

焊接时焊缝金属溶解了较多的氢，冷却过程中又极力进行扩散，氢原子从焊缝金属向母材热影响区扩散的情况如图 1-7 所示。

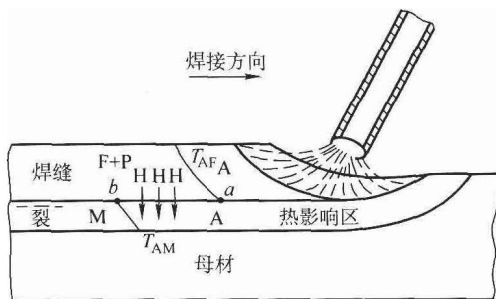


图 1-7 高强钢热影响区延迟裂纹的形成过程模型

焊接高强钢时，由于焊缝金属的含碳量通常较低，因此焊缝在较高的温度就发生了相变，即由奥氏体分解成为铁素体、珠光体、贝氏体等，个别情况下也部分地转变成为低碳马氏体。此时，母材热影响区的金属尚未开始奥氏体分解（因含碳量较焊缝为高，故主要转变为马氏体）。当焊缝金属发生有奥氏体向铁素体、珠光体转变时，氢的溶解度突然降低，同时氢在铁素体、珠光体中的扩散速度比较大，此时氢就很快地从焊缝穿过熔合区 ab 向尚未发生分解的奥氏体的热影响区中扩散。而氢在奥氏体中的扩散速度较小，还来不及扩散到距离熔合区较远的母材方面去，因此在熔合区附近就形成了富氢带。当滞后相变的母材热影响区发生奥氏体向马氏体转变时（即焊缝相变温度界面 T_{AF} 超前于热影响区相变温度 T_{AM} ），氢便以过饱和状态残存于马氏体中，并聚集在一些晶格缺陷里，或者应力集中处。当氢的含量不断增高和温度下降时，一方面有些氢原子结合成氢分子，在这些有缺陷的地方和应力集中处造成很大的局部应力，另一方面还有焊接热应力和相变的组织应力的共同作用，就造成了这个地区产生裂纹的条件。

如果此时氢的含量足够高时，就能使马氏体进一步脆化，可以看到所谓焊道下裂纹。如果氢的含量稍低，仅在有应力集中的地方才出现裂纹，此时可以看到所谓根部裂纹或焊趾裂纹。

也可能有这样的情况，由于焊缝的合金成分复杂和所受应力的状态不同，母材热影响区的转变先于焊缝区（即图 1-7 中 T_{AF} 滞后于 T_{AM} ）。此时，氢就相反地从热影响区向焊缝扩散，使焊缝中熔合区附近的氢处于过饱和状态。同时，当焊缝的转变产物是脆硬的马氏体组织时（如孪晶马氏体），延迟裂纹就会在焊缝中发生。

关于高强钢焊接时氢在熔合区的聚集与时间的关系，可以参见图 1-8 所示。由图看出，焊后 1min 开始聚集，经 5d 可达到最高值，比焊缝初期的氢含量要高近 5 倍之多，经预热之后可以降低氢的聚集。

（三）氢致裂纹延迟开裂的机理

很早以来，人们对氢引起的裂纹延迟现象的机理就十分重视，现已实验证明，焊接

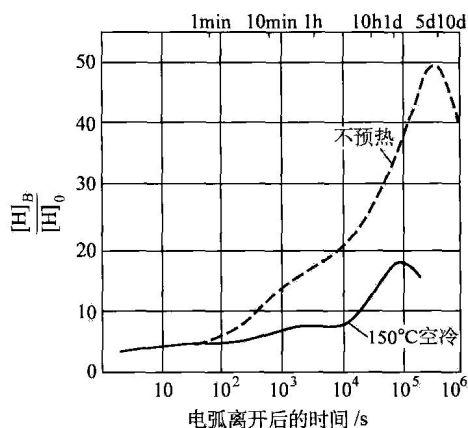


图 1-8 熔合区氢含量的聚集

(板厚 50mm, $E = 29.7 \text{ J/cm}$) $[H]_B$ —熔合区附近的氢含量 $[H]_0$ —焊缝中氢的原始含量

时氢引起裂纹延迟形成的特点与充氢钢的定载拉伸试验所表现出的延迟断裂特征是一致的。

关于充氢钢的加载延迟断裂,早在 20 世纪 50 年代就进行了详尽的研究,并为后来的许多实验证实。

图 1-9 为充氢钢延迟断裂时间与拉伸应力的关系曲线。由图 1-9 可以看出,充氢钢加载断裂时,存在一个上临界应力 σ_{Uc} ,超过此应力值,试件很快断裂,不产生延迟破坏的现象(相当于该钢种的抗拉强度 σ_b)。另外还存在一个下临界应力 σ_{Lc} ,低于该应力值时,氢是无害的,不管加载时间多久,试件都不会断裂。

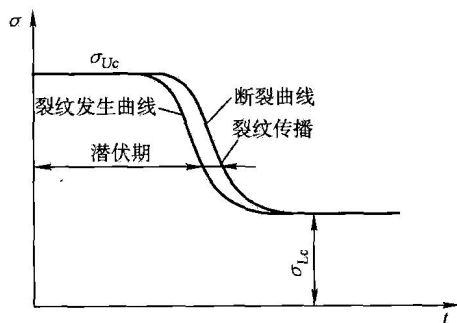


图 1-9 充氢钢延迟断裂时间与拉伸应力的关系

当应力在 σ_{Uc} 和 σ_{Lc} 之间时,不可避免地发生氢引起的延迟断裂。由加载到发生微裂之前要经过一段潜伏期,然后是裂纹的传播期(即扩展),最后达到断裂。

在潜伏期内开裂位置附近氢的含量是变化的,开始时钢中的氢的平均含量并不高,



它低于在开裂位置发生裂纹所需要的临界含量。但是，在三向应力的作用下，氢向缺陷前沿的高应力部位扩散并聚集达到临界氢含量之后，便开始形成微裂。因此，裂纹的发生取决于温度、应力状态和氢的扩散速度。这里，温度的影响是主要的。因为温度改变时，氢的扩散速度和应力分布均发生不同程度的改变。

有人研究证明，钢中延迟破坏只是在一定的温度区间内发生（ $-100 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ）。温度太高则氢逸出，温度太低则氢的活动受到抑制，因此都不会产生延迟现象的断裂。

采用 HT80 高强钢进行焊道下裂纹试验，产生延迟裂纹的温度区间是 $-70 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，这一结果与充氢钢的延迟破坏是完全一致的（图 1-10）。

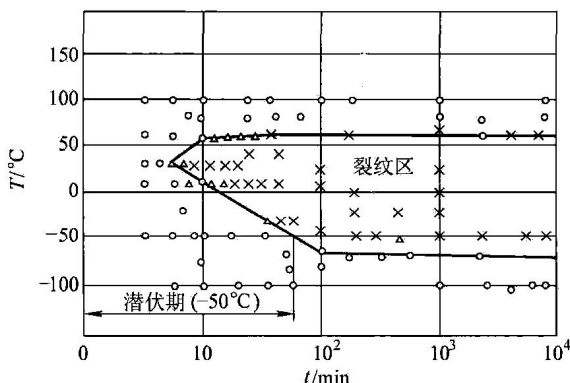


图 1-10 HT80 高强钢产生焊道下裂纹的温度区间和潜伏期
(焊条 D4301, $\phi 4\text{mm}$, $I = 100\text{A}$, $v = 100\text{mm/min}$, $[\text{H}] = 22\text{mL}/100\text{g}$)
○ — 不裂 △ — 微裂 × — 裂

前面已经指出，氢在不同金相组织中的扩散速度不同，因此氢在不同钢中的扩散速度也是不同的。氢在钢中的扩散系数见表 1-2。

表 1-2 氢在钢中的扩散系数 (单位: cm^2/s)

钢种 \ 温度	20 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$
低碳钢	1.5×10^{-5}	4.4×10^{-5}
18-8 不锈钢	2.1×10^{-12}	3.3×10^{-10}
30CrMnSi	3.2×10^{-7}	1.5×10^{-5}

由表 1-2 中的数据可以看出，氢在低碳钢中的扩散速度很大，焊接时大部分氢可以逸出金属，所以不会产生延迟裂纹（当然，低碳钢不能形成脆硬的马氏体也是不会产生延迟裂纹的另一重要原因）。而在高合金钢（如 18-8 不锈钢）中，氢的扩散速度极小，溶解度也较大，因此不易在局部聚集而产生延迟裂纹。只有在高碳钢、中碳钢、中合金钢和部分含碳量较高的低合金钢中，氢的扩散速度既来不及逸出金属，又不能完全受到抑制，因而在金属内发生局部聚集，所以这些钢种的延迟裂纹倾向较大。