

安徽省高等学校质量工程项目立项一流教材
智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

金属材料焊接工艺 制定与评定

主审◎章友谊 王春香 主编◎张帅谋 王瑞权

JINSHU CAILIAO HANJIE GONGYI ZHIDING YU PINGDING

航空工业出版社

安徽省高等学校质量工程项目立项一流教材
智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

金属材料焊接工艺 制定与评定

主审◎章友谊 王春香 主编◎张帅谋 王瑞权

JINSHU CAILIAO HANJIE GONGYI ZHIDING YU PINGDING

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书依据最新的高等职业教育智能焊接技术专业教学标准和教育部颁布的《高等学校课程思政建设指导纲要》《职业教育提质培优行动计划（2020—2023 年）》，参照最新的焊接工艺评定标准和《特殊焊接技术职业技能等级标准》，构建金属材料焊接工艺体系，选取教学内容。本书充分体现了以学生为中心的理念，力求体现“理论够用，突出实践”，培养学生金属材料焊接工艺制定和实施所需的知识、能力和素质。本书既可作为高等职业院校智能焊接技术专业的核心课程教材，也可作为材料成型与控制工程职业本科专业教材，还可以作为焊工岗位培训的教材及参考书。

图书在版编目（CIP）数据

金属材料焊接工艺制定与评定 / 张帅谋，王瑞权主
编 . — 北京：航空工业出版社，2024.3
ISBN 978-7-5165-3700-8

I . ①金… II . ①张… ②王… III . ①金属材料—焊
接工艺 IV . ①TG457.1

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2024）第 056833 号

金属材料焊接工艺制定与评定 Jinshu Cailiao Hanjie Gongyi Zhiding yu Pingding

航空工业出版社出版发行
（北京市朝阳区京顺路 5 号曙光大厦 C 座四层 100028）
发行部电话：010-85672666 010-85672683

北京荣玉印刷有限公司印刷
2024 年 3 月第 1 版
开本：889 毫米 × 1194 毫米 1/16
印张：17.5

全国各地新华书店经售
2024 年 3 月第 1 次印刷
字数：511 千字
定价：56.00 元



前言

本书以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，落实立德树人根本任务，体现职业教育教学规律，为培养现代产业体系紧缺的智能焊接高技术技能型人才提供有力支撑。

党的二十大报告指出，我国进行中国式现代化建设，走高质量发展的道路。这就需要培养新型技能型人才。智能焊接在工业机器人、新材料、汽车、轨道交通、航空航天、船舰、节能设备等高端装备制造产业是不可替代的加工方法。本书为目前急需的智能焊接紧缺技术技能型人才而开发。

本书依据最新的高等职业教育智能焊接技术专业教学标准和教育部颁布的《高等学校课程思政建设指导纲要》《职业教育提质培优行动计划（2020—2023年）》，结合校企合作制定的《焊接制造岗位职业标准》，参照最新的焊接工艺评定标准规范和《特殊焊接技术职业技能等级标准》，构建金属材料焊接工艺体系，精心选取教学内容。

本书主要介绍常用金属材料的焊接性分析，焊接工艺的制定与实施，根据金属材料的焊接性选择焊接方法、焊接材料、焊接参数、预热和后热等焊接工艺措施等。教材中介绍的每一类金属材料均融入企业行业典型焊接工程案例。本书还为学生提供拓展阅读，挖掘与课程紧密相关的课程思政元素：“榜样的力量”将大国工匠、全国技术能手等高技能人才的敬业精神和刻苦钻研、精益求精的工匠精神传递给学生；“大国工程”编入了我国举世瞩目的超级工程，激发学生对焊接技术的热爱和职业自豪感。

本书分为八个项目，项目一讲述了金属材料焊接工艺基础知识，包括金属材料焊接性、焊接性试验和焊接工艺规程等；项目二到项目七分别讲述了碳钢及低合金高强度钢、不锈钢、常用有色金属和铸铁的焊接工艺制定；项目八讲述了金属材料焊接工艺评定实施过程。每个项目均配有项目实训。每个项目后均附有1+X考证任务训练，兼顾了焊工1+X特殊焊接技术考证需要。

本书建议总学时为54学时，并每个项目的学习导读都给出了学习课时建议。

本书充分体现了以学生为中心、以实践为导向的技能型人才培养的职业教育特色，力求体现“理论够用，突出实践”，培养学生金属材料焊接工艺制定和实施所需的知识、能力和素质，使学生掌握焊接工艺的制定与实施方法。本书理论知识紧贴焊接生产实际，以实际应用为着眼点，注重实用性。本书在编写上考虑了教学规律和教学实践方面的要求，每个项目都明确指出了该项目的知识目标、技能目标和素质目标。

本书的编写专家团队由来自院校的一线教师和来自企业的专家组成。张帅谋副教授和王瑞权教授担任主编。章友谊教授和王春香教授担任主审。刘华副教授和张波讲师担任副主编，其他参与编写的有李国强高级工程师、顾伟副教授、胥锴教授、王立跃副教授、杨化雨高级技师、双良节能系统股份有限公司首席技师周士伟（江苏省劳模）、芜湖点金机电科技有限公司王德伟高级工程师、安徽海螺川崎节能设备制造有

限公司谭言松高级技师。

在编写过程中，编者参考了一些文献资料，以及公众号、文库等公开发表的文章，在此表示真挚的谢意！

本书既可作为高等职业院校智能焊接技术专业的核心课程教材，也可以作为焊工岗位培训的教材及参考书。本书配套有电子课件、教学视频等资源，有需要者可致电 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com。

由于编者水平有限，书中存在的不当之处，敬请各位读者批评指正。

编 者

2023 年 8 月



项目一 金属材料焊接工艺认知 / 1

任务一 金属材料的焊接性认知····· 1	二、焊接工艺方案的编制 ····· 7
一、金属材料的焊接性 ····· 1	三、专用焊接工艺规程的编制 ····· 7
二、金属材料焊接性的影响因素与研究方法 ··· 2	四、通用焊接工艺规程的编制 ····· 9
三、焊接性试验内容简介 ····· 4	五、编制焊接工艺应注意事项 ····· 10
四、常用焊接性试验方法种类及选用原则 ··· 4	项目实训····· 10
任务二 金属材料焊接工艺的编制认知····· 6	拓展阅读——大国工程····· 13
一、焊接工艺的概念 ····· 6	1+X 考证任务训练 ····· 15



项目二 碳钢及低合金高强钢的焊接工艺认知 / 16

任务一 认识常见焊接用碳钢及合金 结构钢····· 16	三、热轧及正火钢的焊接工艺 ····· 34
一、焊接用碳钢 ····· 16	任务五 了解低碳调质钢的焊接工艺····· 38
二、焊接用合金结构钢 ····· 17	一、低碳调质钢的成分与性能 ····· 38
任务二 了解低碳钢的焊接工艺····· 19	二、低碳调质钢的焊接性 ····· 40
一、焊接用低碳钢的成分和性能 ····· 20	三、低碳调质钢的焊接工艺 ····· 41
二、低碳钢的焊接性分析 ····· 22	任务六 了解中碳调质钢的焊接工艺····· 45
三、低碳钢的焊接工艺 ····· 22	一、中碳调质钢的成分和性能 ····· 45
任务三 了解中碳钢的焊接工艺····· 25	二、中碳调质钢的分类 ····· 46
一、焊接用中碳钢的成分和性能 ····· 25	三、中碳调质钢的焊接性分析 ····· 47
二、中碳钢的焊接性分析 ····· 26	四、中碳调质钢的焊接工艺 ····· 48
三、中碳钢的焊接工艺 ····· 26	任务七 了解珠光体耐热钢的焊接工艺····· 50
任务四 了解热轧及正火钢的焊接工艺····· 28	一、耐热钢的分类 ····· 51
一、热轧及正火钢的成分与性能 ····· 28	二、珠光体耐热钢的成分与性能 ····· 51
二、热轧及正火钢的焊接性分析 ····· 31	三、珠光体耐热钢的焊接性分析 ····· 53
	四、珠光体耐热钢的焊接工艺 ····· 54

任务八 了解低温钢的焊接工艺·····	56
一、低温钢的分类、成分与性能·····	57
二、低温钢的焊接性分析·····	59
三、低温钢的焊接工艺·····	59

项目实训·····	61
拓展阅读——榜样的力量·····	67
1+X 考证任务训练·····	70



项目三 不锈钢的焊接工艺认知 / 72

任务一 认识常见焊接用不锈钢·····	72
一、不锈钢的分类及用途·····	72
二、不锈钢的化学成分及组织·····	75
三、不锈钢的特性及用途·····	76
四、不锈钢的焊接问题·····	79
任务二 了解奥氏体不锈钢的焊接工艺·····	83
一、奥氏体不锈钢的焊接性分析·····	83
二、奥氏体不锈钢的焊接工艺·····	84
任务三 了解马氏体不锈钢的焊接工艺·····	92
一、马氏体不锈钢的焊接性分析·····	92
二、马氏体不锈钢的焊接工艺·····	93
任务四 了解铁素体不锈钢的焊接工艺·····	97
一、铁素体不锈钢的焊接性分析·····	97
二、铁素体不锈钢的焊接工艺·····	99

任务五 了解双相不锈钢的焊接工艺·····	100
一、双相不锈钢的成分和性能·····	100
二、双相不锈钢的焊接性分析·····	103
三、双相不锈钢的焊接工艺·····	105
任务六 了解珠光体钢与奥氏体不锈钢的焊接工艺·····	106
一、珠光体钢与奥氏体不锈钢的焊接性分析·····	106
二、珠光体钢和奥氏体不锈钢的焊接工艺·····	109
三、不锈钢复合钢板的焊接·····	114
项目实训·····	114
拓展阅读——大国工程·····	121
1+X 考证任务训练·····	124



项目四 铝及铝合金的焊接工艺认知 / 127

任务一 认识常见铝及铝合金·····	127
一、铝及铝合金概述·····	127
二、铝及铝合金的分类、成分和性能·····	128
任务二 了解铝及铝合金的焊接工艺·····	129
一、铝及铝合金的焊接性分析·····	129

二、铝及铝合金的焊接工艺·····	135
项目实训·····	145
拓展阅读——榜样的力量·····	152
1+X 考证任务训练·····	154



项目五 铜及铜合金的焊接工艺认知 / 155

任务一 认识常见铜及铜合金·····	155	二、铜及铜合金的焊接工艺·····	161
一、纯铜·····	155	项目实训·····	165
二、黄铜·····	156	拓展阅读——大国工程·····	171
三、青铜·····	157	1+X 考证任务训练·····	173
四、白铜·····	159		
任务二 了解铜及铜合金的焊接工艺·····	159		
一、铜及铜合金的焊接性分析·····	159		



项目六 钛及钛合金的焊接工艺认知 / 174

任务一 认识常用的钛及钛合金·····	174	二、钛及钛合金的焊接工艺要点·····	181
一、钛的性能及合金化·····	174	项目实训·····	184
二、钛及钛合金的分类和性能·····	176	拓展阅读——大国工程·····	190
任务二 了解钛及钛合金的焊接工艺·····	179	1+X 考证任务训练·····	192
一、钛及钛合金的焊接性分析·····	179		



项目七 铸铁的焊接工艺认知 / 193

任务一 常见铸铁的认识·····	193	二、灰铸铁的焊接工艺要点·····	196
一、铸铁的成分和性能·····	193	项目实训·····	203
二、铸铁的分类及焊补·····	194	拓展阅读——榜样的力量·····	208
任务二 了解铸铁的焊接工艺·····	194	1+X 考证任务训练·····	210
一、铸铁的焊接性分析·····	194		



项目八 金属材料焊接工艺评定 / 212

任务一 焊接工艺评定初识·····	212	任务三 焊接工艺评定规则·····	221
任务二 焊接工艺评定的总则和一般程序·····	214	一、焊接工艺评定因素及其类别划分·····	221
一、焊接工艺评定的总则·····	214	二、对接焊缝、角焊缝焊接工艺评定规则·····	237
二、焊接工艺评定的一般程序·····	214		

任务四 学习焊接工艺评定方法.....	240	二、焊条电弧焊复合板（20R+0Cr18Ni10Ti） 对接焊工艺评定.....	252
任务五 试件和试样的检验要求.....	241	项目实训.....	256
一、对接焊缝试件和试样的检验要求	241	拓展阅读——榜样的力量.....	263
二、角焊缝试件和试样的检验要求	247	1+X 考证任务训练	266
任务六 焊接工艺评定案例.....	248		
一、氩弧焊 + 焊条电弧焊 20# 管对接焊接 工艺评定.....	248		



参考文献 / 268

项目一

金属材料焊接工艺认知

学习导读

本项目主要介绍焊接性的内涵和影响因素，金属材料焊接性及其影响因素、试验方法，金属材料焊接工艺的编制要点。建议学习课时 2 学时。

学习目标

知识目标

- (1) 掌握金属材料焊接性的概念及其影响因素。
- (2) 掌握焊接性的试验方法及应用。
- (3) 熟悉焊接工艺的编制过程和文件。

技能目标

- (1) 会根据金属材料的化学成分判断其焊接性。
- (2) 具备利用试验方法研究金属材料焊接性的思维。
- (3) 会编制焊接工艺文件。

素质目标

- (1) 提高分析问题、解决问题的能力。
- (2) 激发对智能焊接专业的热爱，提高对焊接职业自豪感和认同感。

任务一 金属材料的焊接性认知

一、金属材料的焊接性

焊接性的定义是，在限定的施工条件下通过焊接工艺方法完成符合设计要求的构件，并满足使用要求的能力。

焊接性是材料对于焊接加工的适应性，用以衡量材料在一定的焊接工艺条件下获得优质接头的难易程度和该接头在使用条件下运行的安全性和可靠性。因此，它包含工艺焊接性和使用焊接性两个方面。

(一) 工艺焊接性

工艺焊接性是指在一定的焊接工艺条件下，获得优良、致密、无缺陷的焊接接头的能力。它不是金属本身所固有的性能，而是根据某种焊接方法和所采用的具体工艺措施进行评定的。所以金属材料的工艺焊

接性与具体的焊接过程密切相关。对于熔焊工艺，被焊材料一般要经历焊接热循环和焊接冶金过程。因此，工艺焊接性又可分为热焊接性和冶金焊接性。热焊接性是指焊接热循环对母材及焊接热影响区组织性能及产生的缺陷的影响程度，用以评定被焊金属对热的敏感性，如晶粒长大（成长）、组织性能变化等。它与金属的材质及具体的焊接工艺有关。冶金焊接性是指在一定冶金过程的条件下，物理化学变化对焊缝性能的影响程度。它包括合金元素的氧化、还原，氢、氧、氮的溶解等对形成气孔、夹杂、裂纹等缺陷的影响，用以评定被焊材料对冶金缺陷的敏感性。

（二）使用焊接性

使用焊接性是指整个结构或焊接接头是否满足产品技术条件的使用要求。使用性能取决于焊接结构的工作条件和设计上提出的技术要求。通常包括一般的力学性能、低温韧性、抗脆断性能、高温蠕变、疲劳性能、高温持久强度、耐蚀性能和耐磨性能等。

理论分析可知，凡是在熔化状态下能形成固溶体或共晶的两种金属或合金，原则上都可以实现焊接，这叫物理焊接性。物理焊接性仅仅为材料实现焊接提供理论依据，并不代表该材料用任何焊接方法，都能获得满足使用要求的优质接头。

在不同的焊接工艺条件下，焊接性差异很大。因此，金属材料的焊接性不仅与材料本身有关，同时也与焊接工艺条件有关。在不同的焊接工艺条件下，同一材料具有不同的焊接性。因此在生产制造中，随着新的焊接方法、焊接材料及焊接工艺的开发和完善，一些原来焊接性差的金属材料，也会变成焊接性好的材料。

二、金属材料焊接性的影响因素与研究方法

（一）金属材料焊接性的影响因素

焊接性受材料、焊接方法、焊接结构和使用要求四个因素的影响。

1. 材料

材料包括母材和焊接材料。在相同的焊接条件下，决定母材焊接性的主要因素是它本身的物理化学性能。

物理性能方面，如金属的密度、熔点、热导率、线膨胀系数、热容量等因素，都会对热循环、熔化、结晶、相变等产生影响，从而影响焊接性。纯铜热导率高，焊接时热量散失迅速，升温的范围很宽，坡口不易熔化，焊接时需要较强烈的加热，如果热源功率不足，就会产生未熔透的缺陷。热导率高的材料熔池结晶迅速，容易产生气孔等缺陷。热导率低的材料焊接时温度梯度大，残余应力大，变形大，并且由于高温停留时间长，热影响区晶粒长大。铝及铝合金密度小，熔池中的气泡和非金属夹杂物不易上浮逸出，容易在焊缝中残留，形成气孔和夹渣等。

化学性能方面，主要考虑金属与氧化合的难易程度。化学活性强的金属，在高温焊接下极易氧化，焊接时必须采取可靠的保护。例如，采用惰性气体保护焊或在真空环境焊接。

对于钢的焊接，影响其焊接性的主要因素是它的化学成分。其中影响较大的元素有碳、硫、磷、氢、氧和氮等，它们容易引起焊接工艺缺陷，降低接头的使用性能。其他合金元素，如锰、硅、铬、镍、钼、钛、钒、铌、铜、硼等都在不同程度上增加焊接接头的淬硬倾向和裂纹敏感性。所以，钢的焊接性总是随着含碳量和合金元素含量的增加而恶化。

此外，钢的冶炼及轧制状态、热处理状态、组织状态等，在不同程度上都对焊接性产生影响。所以近年来研制和发展的各种 CF 钢（抗裂钢）、Z 向钢（抗层状撕裂钢）、TM-CP 钢（控轧钢）等，就是通过精炼提纯、细化晶粒和控轧工艺等手段来改善钢材的焊接性。

焊接材料直接参与焊接过程的一系列化学冶金反应，决定着焊缝金属的成分、组织、性能及缺陷的形成。因此，正确选用焊接材料也是保证获得优质焊接接头的重要条件之一。

2. 焊接方法

焊接方法的种类、装焊顺序、预热、后热及焊后热处理等方面对于焊接性的影响很大，主要表现在热源特性和保护条件两个方面。

不同的焊接方法的热源在功率、能量密度、最高加热温度等方面有很大差别。金属在不同热源下焊接显示出不同的焊接性。例如，电渣焊功率很大，但能量密度很低，最高加热温度也不高，焊接时加热缓慢，高温停留时间长，使得热影响区晶粒粗大，冲击韧性显著降低，必须经正火处理才能改善。

采取预热、多层焊和控制层间温度等其他工艺措施，可以调节和控制焊接热循环，从而改变金属的焊接性。

3. 焊接结构

焊接结构和焊接接头的设计形式，如结构形状、尺寸、厚度、坡口形式、焊缝布置及其截面形状等，都对焊接性有重要的影响。其主要影响是热的传递和力的状态方面。不同板厚、不同接头形式或坡口形状其传热方向和传热速度不一样，从而会对熔池结晶方向和晶粒成长产生影响。结构的形状、板厚和焊缝的布置等决定接头的刚度和拘束度，对接头的应力状态产生影响。设计中减少接头的刚度、避免交叉焊缝及焊缝过于密集、减少应力集中等，都是改善焊接性的重要措施。

4. 使用要求

焊接结构服役期间的工作温度、负载条件和工作介质等工作环境和运行条件，都要求焊接结构具有相应的使用性能。在低温下工作的焊接结构，必须具备抗脆性断裂性能；在高温下工作的结构应具有抗蠕变性能；在交变载荷下工作的结构应具有良好的抗疲劳性能；在酸、碱或盐类介质工作的焊接容器应具有较高的耐蚀性能等。总之，使用条件越苛刻，对焊接接头的质量要求就越高，材料的焊接性就越难以保证。

(二) 金属材料焊接性的研究方法

一些新材料、新结构或新的工艺方法在正式投产之前，必须进行焊接性研究工作，以确保能获得优质的焊接接头。研究的基本方法是先分析后试验，即在焊接性理论分析的基础上再做必要的焊接性试验。焊接性分析可以避免试验的盲目性，焊接性试验可以验证理论分析的结果。

1. 焊接性分析

焊接性分析指运用焊接科学的理论知识和实践经验，对金属材料焊接的难易程度做出判断或预测。进行工艺焊接性方面的分析，主要是考察金属材料在给定的工艺条件下，产生焊接缺陷的倾向性和严重性。首先，从影响焊接性的材料因素、工艺因素和结构因素等方面入手，分析和估计焊接过程中可能会产生什么缺陷，对材料的工艺焊接性进行科学的预测。焊接工艺缺陷很多，分析的重点通常是材料的抗裂性能。按材料中合金元素及其含量间接地评估合金材料的焊接性是最常用的分析方法，如碳当量法和裂纹敏感指数法等。此外，也可利用合金相图判断热裂倾向，利用焊接 CCT 图可以预测有无冷裂的隐患、焊后接头的硬度等大致性能。

使用焊接性方面的分析，主要是考察金属材料在给定的焊接工艺条件下，焊成的接头或整个焊接结构是否满足设计的使用要求，如强度、韧性、塑性、疲劳、蠕变、耐蚀或耐磨等性能要求。对于以等性能原则设计的焊接接头，则以母材性能为依据，分别考察焊缝金属和焊接热影响区在焊接热过程的作用下可能引起不利于使用性能的变化。

进行焊接性分析时，要有重点和针对性，不同金属材料焊接性重点分析内容见表 1-1。

表 1-1 不同金属材料焊接性重点分析内容

金属材料		焊接性重点分析内容
低碳钢		①厚板的刚性拘束裂纹；②热裂纹
中、高碳钢		①冷裂纹；②焊接；③ HAZ（热影响区）淬硬
低合金钢	热轧及正火钢	①冷裂纹；②热裂纹；③再热裂纹；④层状撕裂（厚大件）；⑤ HAZ 脆化（正火钢）
	低碳调质钢	①冷裂纹、根部裂纹；②热裂纹（含 Ni 钢）；③ HAZ 脆化；④ HAZ 软化
	中碳调质钢	①热裂纹；②冷裂纹；③ HAZ 脆化；④ HAZ 回火软化
	珠光体耐热钢	①冷裂纹；② HAZ 硬化；③再热裂纹；④持久强度
	低温钢	①低温缺口韧性；②冷裂纹
不锈钢	奥氏体不锈钢	①晶间腐蚀；②应力腐蚀开裂；③热裂纹
	铁素体不锈钢	① 475℃脆化；②相脆化；③热裂纹
	马氏体不锈钢	①冷裂纹；② HAZ 硬化
P/A 异种钢		①焊缝成分的控制（稀释率）；②熔合区过渡层；③熔合区扩散层；④残余应力
铸铁		①焊缝及熔合区“白口”；②热裂纹；③热应力裂纹；④冷裂纹
铝及铝合金		①氧化；②气孔；③热裂纹；④ HAZ 软化

2. 焊接性试验

焊接性分析是以理论知识和生产经验为依据进行的，一般应在理论分析的基础上有针对性地进行焊接性试验加以验证。特别是对于一些新材料、新开发的产品结构或新工艺，更应进行较为全面的焊接性试验，从而对材料的焊接性做出更为准确和全面的评价，同时也为编制焊接工艺提供可靠的依据。

总之，焊接性的分析与试验是焊接性研究中的两个重要方面。

三、焊接性试验内容简介

焊接性试验主要是测定焊接接头金属的性能是否可靠，其主要内容包括以下几个方面。

- （1）测定焊缝金属抗热裂纹的能力。
- （2）测定焊缝及热影响区金属抗冷裂纹的能力。
- （3）测定焊接接头抗脆性断裂的能力。对于在低温下工作或承受冲击载荷的焊接结构，焊接过程会使接头发生粗晶脆化、组织脆化、热应变时效脆化等现象，造成接头韧性严重下降。因此，对这类焊接结构的用材，需要做抗脆断或抗脆性转变能力的试验。
- （4）测定焊接接头的使用性能。根据焊接结构使用条件对焊接性提出的性能要求来确定试验内容，如焊接接头的耐晶间腐蚀及耐应力腐蚀试验等。厚板钢结构要求抗层状撕裂性能时，需要做 Z 向拉伸或 Z 向窗口试验，以测定该钢材抗层状撕裂的能力。

四、常用焊接性试验方法种类及选用原则

（一）常用焊接性试验方法种类

评定金属材料焊接性的试验方法很多，焊接性试验方法的分类如图 1-1 所示。工艺焊接性和使用焊接性两方面的试验，又分为直接法和间接法两种。直接法有两种情况，一种是仿照实际的焊接条件，通过焊接过程考察是否发生某种焊接缺陷或发生缺陷的严重程度，直接评价焊接性的优劣，即焊接性对比试验。

也可以通过试验确定出所需的焊接条件，即工艺适应性试验，这种情况多在工艺焊接性试验中使用。另一种是直接在产品上进行焊接性能测定的试验，这种情况主要用于使用焊接性的试验。间接法一般不需要焊出焊缝，只需对产品实际使用的材料做化学成分、金相组织或力学性能等方面的试验分析与测定，并对该材料的焊接性进行预测与评估。例如，利用计算出的碳当量数值去判断材料的焊接性。

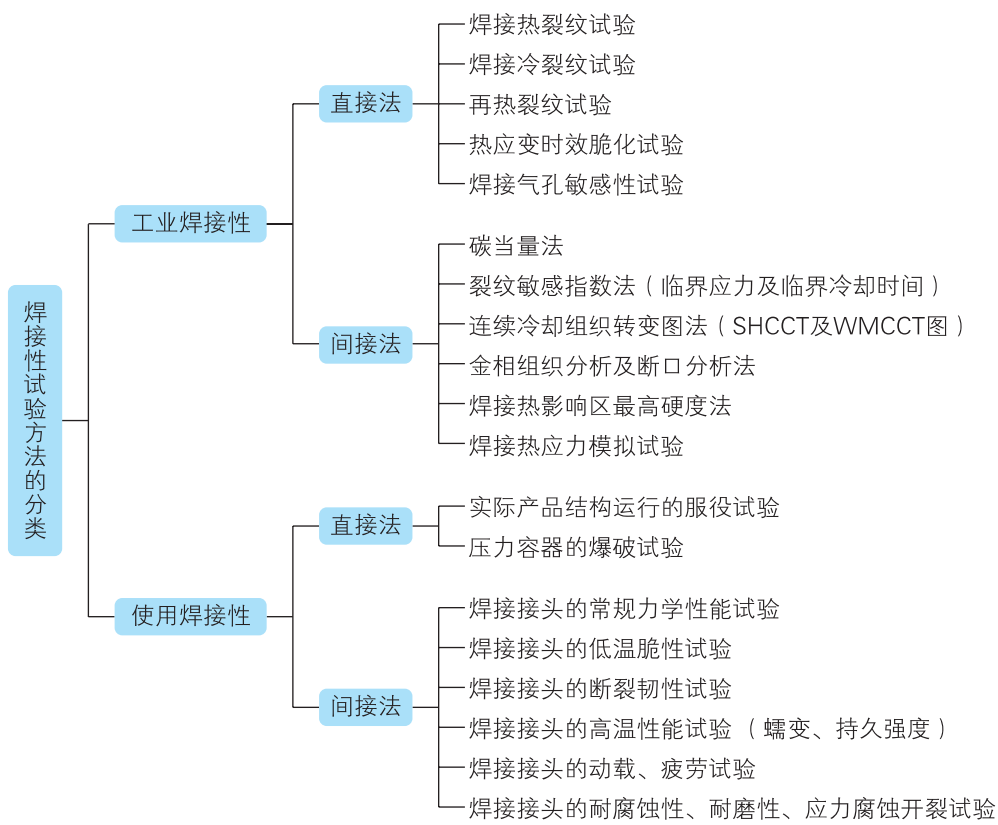


图 1-1 焊接性试验方法分类

(二) 常用焊接性试验方法选用原则

常用焊接性试验方法选用原则主要有以下 4 点。

1. 可比性

只有试验条件完全相同时，两个试验的结果才具有可比性。因此，凡是国家或国际上已经颁布的标准试验方法，应优先选择，并严格按标准的规定进行试验。尚未建立标准的，应选择国内外同行业中较为通用的或公认的试验方法进行。无标准时，须自行设计焊接性试验方法，且应把试验条件规定得明确具体。

2. 针对性

所选择的或自行设计的试验方法，其试验条件要尽量与实际焊接的条件相一致，这些条件包括母材、焊接材料、接头形式、接头受力状态、焊接工艺参数等。只有这样才能使焊接性试验具有良好的针对性，其试验结果才能较准确地显示出实际生产时可能发生的问题。

3. 再现性

焊接性试验的结果要稳定可靠，具有较好的再现性。试验数据不可过于分散，否则难以找出变化规律并总结出正确的结论。试验应尽量减少或避免人为因素的影响，尽量采用自动化、机械化的操作。试验条件和试验程序要严格，防止随意性。

4. 经济性

在获得可靠结果的前提下，力求减少人力、物力消耗，降低生产成本。

任务二 金属材料焊接工艺的编制认知

一、焊接工艺的概念

(一) 焊接工艺与焊接工艺规程

根据《焊接术语》(GB/T 3375—1994)，焊接工艺是指焊接过程中的一整套技术规定，其中包括焊前准备、焊接材料、焊接设备、焊接方法、焊接顺序、焊接操作及焊后热处理等。焊接工艺规程是指制造焊件有关的加工和实践要求的细则文件，可保证由熟练焊工或机器人操作工操作时质量的再现性。

(二) 焊接工艺文件的种类

焊接工艺文件一般有三大类，即焊接工艺方案、通用焊接工艺规程和专用焊接工艺规程，这三大类工艺都应以评定合格的焊接工艺为基础。

1. 焊接工艺方案

焊接工艺方案仅对关键件或关键工艺提出解决问题的工艺路线和工艺原则，是宏观指导的工艺文件，一般用于询价报价阶段的技术投标，也用于工艺分析，即提出多项工艺方案进行比较分析。什么情况下必须做焊接工艺方案没有明确的规定，可依据供需双方的合同、供方的管理规定、产品的复杂程度、制造检验标准的难度等确定。

2. 通用焊接工艺规程

通用焊接工艺规程是反映某一类产品的共同特点和通用操作要求的工艺文件。例如，对于批量生产的承压设备，可以不针对每一台设备编制产品焊接工艺规程，而以通用焊接工艺规程的方式指导焊接生产。通用焊接工艺规程，既可以按不同产品来制定，如空气储罐、换热器、锅炉等通用焊接工艺规程；也可以按零部件编制，如封头拼接、接管与法兰、换热管与管板连接等通用焊接工艺规程。

在承压设备制造厂，通常按各种不同的焊接方法分别制定通用焊接工艺规程，如焊条电弧焊通用焊接工艺规程、CO₂气保焊焊接工艺规程和埋弧焊通用焊接工艺规程等。将各种焊接方法的注意项目列入其中，避免在具体工艺卡中反复罗列，这种通用焊接工艺规程又称为焊接工艺守则，仅作为通用指导性工艺文件，一般不能代替产品焊接工艺。

而有的承压设备制造厂依据不同的母材分别制定通用焊接工艺规程，如碳钢焊接工艺规程、奥氏体不锈钢焊接工艺规程、铝及铝合金焊接工艺规程等。

3. 专用焊接工艺规程

专用焊接工艺规程是某特定范围内使用的焊接工艺文件，多数是针对具体产品。按照产品制定的焊接工艺规程，是在生产过程中使用较普遍的形式。每台产品单独成册，故称为“产品专用焊接工艺规程”，如某压力容器制造厂承接一台或多台空气储罐，其数量少、间隔时间长，这时可逐台编制产品焊接工艺规程。此外，还有支持性的焊接工艺文件，如碳弧气刨工艺规程、返修工艺规程等也属于专用焊接工艺规程。

二、焊接工艺方案的编制

（一）焊接工艺方案的编制原则

焊接工艺方案的制定者应利用编制依据，如产品图样、招标文件、法规标准、订货合同、焊接工艺评定、企业装备及设施条件等，结合制定者的知识、能力和工作经验，找出关键件和关键工艺，并提出相应的工艺路线和工艺原则。为便于择优，应有两个或多个原则或路线的对比，从技术的合理性和制造的经济性做权衡，从中确认一个最佳方案。

（二）焊接工艺方案的编制要点

1. 明确编制目的

编制焊接工艺方案的目的一般来说有两个：

- （1）找出关键产品、关键件和关键工艺；
- （2）找出解决上述关键工艺的工艺原则。

对于一个单元设备，必须找出关键件和关键工艺；对于一个工程项目，必须找出关键设备，这项工作一般由项目负责人或专业人员确定。所谓“关键”，指的是技术上的关键，就是对工程项目成败、对单元设备的制造和使用有决定性的影响。

2. 做好预防焊接缺陷分析

对关键设备焊接，焊接工艺编制人员应分析焊接时容易出现何种缺陷，并分析缺陷产生的原因和预防措施。这是制定焊接工艺方案的重点。

3. 做好结构合理性分析

（1）分析焊缝位置分布是否合理。例如焊缝是否避开截面尺寸突变区，焊缝间距是否满足大于3倍板厚且不小于100 mm，焊缝分布是否有利于组装、焊接和无损检测。焊缝布置应避免构成交叉或集中，如设备壳体挖补应避免直角以防止应力集中等。

（2）分析焊接节点设计是否合理。

焊接节点设计是否合理是指接头形式和坡口形式是否合理。例如，筒体组对环焊缝现场施焊，一般开单V形坡口而不开双V形坡口；8 mm板对接全焊透结构开V形坡口而不开X形坡口等。

4. 合理应用编制依据

编制焊接工艺方案的依据主要有：招标文件、产品图样、法规标准、技术条件、订货合同、焊接工艺评定报告、焊工职业资格证、企业焊接工艺文件、企业装备设施条件及企业的生产组织形式。

三、专用焊接工艺规程的编制

（一）专用焊接工艺规程的定义

产品专用焊接工艺规程是为指导某一设备焊接施工而制定的。专用焊接工艺规程是根据焊接工艺评定报告并结合实践经验而制定的直接用于焊接生产的工艺文件，它包括对焊接接头、母材、焊材、焊接位置、预热、电特性和操作技术等内容进行详细地规定，以保证焊接质量的再现性，一般用图表形式表达。

（二）编制依据

专用焊接工艺规程的编制依据与焊接工艺方案的编制依据类似，随着编制目的不同，编制依据的侧重

点也会不同。客户要求是必须遵守的外来依据，内在依据要服务于外来依据，即达到保证焊接产品安全可靠又满足客户要求的目的。

（三）编制目的

1. 满足客户的要求

满足客户要求，这是基本的目的。客户在满足法规、标准和图样要求之外，往往要附加一些项目的技术质量、交货期、价格等要求。其中的技术质量要求要明确，不能存在疑点或模棱两可的情况。

2. 满足法规、标准和图样的要求

满足法规、标准和图样的要求，这是必须遵守的，特别对承压设备是强制性的要求。

3. 满足第三方监检的要求

满足第三方监检的要求是有条件的。当第三方验收需要以专用焊接工艺规程为依据时，或客户要求专用焊接工艺规程必须由第三方确认时，专用焊接工艺规程必须满足第三方监检的要求。

（四）编制范围

以承压设备为例，下列焊缝必须编制专用焊接工艺规程。

（1）受压元件之间的焊缝。

（2）与受压壳体内、外壁相连接的焊缝，如与内壁相连接的支撑圈、支架、内壁堆焊，与外壁相连接的吊耳、支座弧板、铭牌架、筋板、垫板等。

定位焊技术要求可在专用焊接工艺规程中体现，也可另编。返修焊一般按照原工艺返修，也可编制专用焊接工艺规程。对于重要返修（裂纹返修）和超次返修，在查明原因后，可编制有针对性的专用焊接工艺规程。

（五）编制要求

（1）完整、正确、有效。

（2）尽可能提高效率，降低成本。例如，厚壁容器采用焊条电弧焊效率低，返修率高，成本高，若改用埋弧焊，则效率提高 1～3 倍，成本降低 1/3，若采用窄间隙埋弧焊，则工作量减少 1/3，效率提高 30%，成本再下降 30%。

（3）适合本单位实际，适用可行。要达到这一要求，焊接工艺人员要到车间与焊工商讨，征求一线焊工的意見，这是保证工艺可贯彻实施的基础。

（4）保证焊接质量。焊接工艺规程应避免产生焊接缺陷，或使缺陷减到最低限度。焊接工艺规程还应保证焊接接头的使用性，确保设备运行安全可靠。

（六）编制内容

焊接工艺规程编制内容可以分为通用焊接工艺规程内容和企业根据实际情况自定的工艺规程表格内容。

1. 通用焊接工艺规程内容

参考 NB/T 47015—2011《压力容器焊接规程》所推荐的焊接工艺规程表格共有四页，包括封面、接头编号表、焊接材料汇总表和接头焊接工艺卡。

（1）封面包括单位名称、规程编号、产品编号、图号、版次、修改标记及处数、编制人及日期、审核人及日期等。

（2）接头编号表包括产品结构示意图、接头编号、焊接工艺评定编号、焊工持证项目、无损检测要求。

(3) 焊接材料汇总表列有焊条电弧焊、埋弧焊和气体保护焊三种, 包括母材、焊条及规格、焊丝及规格、烘干温度及时间、保护气体及纯度、容器技术特性等。

(4) 接头焊接工艺卡包括焊接接头名称、接头简图、焊接顺序、焊接方法、填充材料、焊接电流、电弧电压、焊接速度、线能量、焊后热处理等。

2. 企业根据实际情况自定的工艺规程表格内容

不少企业会根据自己企业的生产实际情况对工艺规程表格做相应的修改, 使工艺规程符合本企业的生产实际, 比较实用。

四、通用焊接工艺规程的编制

(一) 编制依据

通用焊接工艺规程的编制依据主要有以下 4 个方面。

- (1) 相关的法规、标准。
- (2) 焊接工艺评定报告。
- (3) 焊接技术资料及经验积累。
- (4) 生产装备条件。

(二) 编制要点

通用焊接工艺规程一般有 3 种类型, 即针对不同产品的焊接工艺规程、针对不同焊接方法的焊接工艺规程和针对不同母材的焊接工艺规程。不管哪种类型都有其共同的编制要点和各自特有的编制要点。

1. 共同的编制要点

- (1) 选定焊接方法。

选定焊接方法是确定通用焊接工艺规程的核心。它关系到质量和生产率。

- (2) 选好焊接材料。

在确定母材和焊接方法之后, 可以参考 NB/T 47015—2011《压力容器焊接规程》或相关资料选定焊接材料, 必要时通过焊接工艺评定加以确认。

- (3) 选择坡口形式。

工艺编制单位应结合本单位的装备条件和生产管理经验, 根据结构形式、接管与壳体连接形式、管—管板的连接形式等, 制定坡口标准。

- (4) 以焊接工艺评定为依据。

编入通用焊接工艺规程的工艺参数, 都要有焊接工艺评定支持, 不能仅查焊接手册、焊接资料确定。

- (5) 明确施焊要点。通用焊接工艺规程的施焊要点及相对应的工艺措施应当明确, 可通过工艺分析确定, 以防止产生焊接缺陷。

- (6) 明确验收的检验要求。

焊后的焊缝外观检验、无损检测、耐蚀性检验、金相检验、焊缝成分检验、力学性能检验等, 都要明确, 并写入通用规程。

2. 特有的编制要点

- (1) 对于产品通用焊接工艺规程, 若产品较为复杂, 应先将产品划分为多个零部件, 然后逐件编制, 而对于结构较为简单的产品, 不用划分部件。

- (2) 对于焊接方法的通用焊接工艺规程, 必须突出该焊接方法的特点, 然后叙述由该特点所决定的坡

口选择、焊材选择、操作要点、工装设备等。例如埋弧焊焊接通用规程，其坡口形式与焊条电弧焊有较大的差别，考虑焊材选择不仅要考虑焊丝和焊剂型号，而且还要考虑两者的搭配；埋弧焊必须考虑焊剂垫、焊剂输送与回收装置、变位机等。规程中还应不同材料、板厚和坡口形式的焊接规范参数表。

(3) 对于母材的焊接通用工艺规程，必须突出母材的焊接性能特点和对应的工艺参数，即要确定好“难不难焊”“如何焊”这两个问题。例如奥氏体不锈钢的通用焊接工艺规程，其工艺焊接性要求预防热裂纹和晶间腐蚀，这就应从冶金和工艺上采取相应的措施，包括焊接材料的选择、焊缝成形系数的控制、采用小电流快速焊、接触腐蚀介质的一侧最后焊等。

五、编制焊接工艺应注意事项

在设备制造中，焊接工艺规程是规定性工艺文件，带有一定的强制性，因此，焊接工艺编制时除注意前述焊接工艺要点外，还应注意以下焊接工艺的一般要求。

(一) 正确性

焊接工艺的正确性是指焊接工艺本身的各项要求，如坡口形式及尺寸、焊接方法选用、焊材选择、焊接顺序、焊接工艺参数、焊前预热、焊后热处理等，均应符合焊接的基本规则与工厂的生产实际。

(二) 完整性

焊接工艺的完整性有两层含义。一是对某一产品来说，受压元件之间的焊缝以及与受压元件相焊的焊缝均应制定焊接工艺，例如承压设备内件与壳体内壁相焊焊缝、铭牌架与壳体外壁相焊焊缝、管板堆焊焊缝等，都要有焊接工艺，而不仅仅限于 A、B、C、D 四类接头；另一含义是对某一工艺卡来说，对该节点所需的焊接工艺参数、施焊要点、工艺装备等均应列出，否则也称为不完整。例如清理方式、氩弧焊背面是否加保护气、层间温度控制、焊接顺序等，均应在工艺卡上标明。



(三) 有效性

焊接工艺的有效性主要是指所编工艺要能起到指导焊接施工的作用。这就要求所编的工艺焊工必须能看得到，看得懂，对于复杂设备和新产品，焊接工艺编制人员还应通过工艺交底让焊工掌握工艺要点，并督促工艺实施。

项目实训

一、实训描述

完成焊接工艺制定与评定的信息收集和归纳理解。

二、实训目标

通过焊接工艺编制及焊接工艺评定信息检索的专门训练达到以下目的。

- (1) 掌握检索智能焊接技术专业相关文献的基本方法。
- (2) 学会常用电子资源数据库的使用方法。
- (3) 掌握编制焊接工艺规程及撰写焊接工艺评定报告的基本思路及方法。
- (4) 懂得如何获得和利用文献情报，提高独立查找所需信息和处理信息的能力，具备独立获取新知识的能力和 分析、整理文献的能力，为后续的毕业论文及走向工作岗位后的技术攻关、科学研究打下良好的基础。

三、实训准备

(一) 设备及文献资源准备

相关网络资源，相关工具书等。

(二) 人员准备

1. 岗位设置

建议三人一组组织实施，设置焊接性分析员、焊接工艺编制员、焊接工艺评定员三个岗位。

2. 岗位职责

- (1) 焊接性分析员主要负责相关焊接性分析相关材料的检索、整理等工作。
- (2) 焊接工艺编制员主要负责焊接工艺编制相关材料的检索、整理等工作。
- (3) 焊接工艺评定员主要负责焊接工艺评定相关材料的检索、整理等工作。
- (4) 小组成员协作互助，共同参与任务实施的整个过程。

四、检索焊接性分析相关文献

焊接性分析员根据母材分析的基本思路搜索相关的文献资源，如不同材料化学成分，不同材料焊接性分析、焊接性试验等，并在表 1-2 中汇总查阅资料出处及对应内容所在位置，文献资源形式不限。

表 1-2 焊接性分析资料检索汇总表

序号	资料出处	标题	主要内容
如	GB/T 700—2006	碳素结构钢	查阅碳素结构钢的牌号、尺寸、外形、重量及允许偏差、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志和质量证明书

五、检索焊接工艺规程相关文献

焊接工艺编制员根据制定焊接工艺规程的基本思路进行检索，如焊接方法、焊接设备、焊接材料、焊缝坡口形式及基本尺寸、焊前准备、焊接技术要求、焊接工艺参数、焊接热处理等相关文献资源，并在表 1-3 中汇总资料出处及对应内容所在位置，文献资源形式不限。

表 1-3 焊接工艺规程资料检索汇总表

序号	资料出处	标题	主要内容
如	JB/T 9186—1999	二氧化碳气体保护焊工艺规程	查阅细丝（焊丝直径不超过 1.6 mm）二氧化碳气体保护焊的基本规则及要求

六、检索焊接工艺评定相关文献

焊接工艺评定员根据焊接工艺评定的基本内容检索相关文献资源，如力学性能试验、金相试验、焊接检验、焊缝缺陷分类及说明、焊缝外观质量等，并在表 1-4 中汇总查阅资料出处及对应内容所在位置，文献资源形式不限。

表 1-4 焊接工艺评定资料检索汇总表

序号	资料出处	标题	主要内容
如	GB/T 2650—2022	金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验	查阅金属材料焊接接头的夏比冲击试验方法，以测定试样的冲击吸收功

七、实训评价与总结

（一）实训评价

各小组针对资料检索的思路及内容进行展示汇报，根据汇报的结果进行小组自评、互评，教师进行点评。

（二）实训总结

小组讨论总结并撰写实施报告，主要从以下几个方面进行阐述。

- （1）我们学到了哪些方面的知识？
- （2）我们的职业素养得到哪些提升？
- （3）通过本次实训我们有哪些收获，在今后对自己有哪些方面的要求？



拓展阅读——大国工程

中国港珠澳大桥荣获国际焊接最高奖“Ug 国际大奖”

2022 年 4 月，中国港珠澳大桥建设工程荣获国际焊接学会“Ugo Guerrera Prize”奖（简称 Ug 国际大奖）。

Ug 国际大奖是国际焊接最高奖项，授予近十年内国际工程建设领域大型的优秀焊接工程技术团队，每三年评选一次。港珠澳大桥工程是继 2010 年北京奥运会主会场国家体育场“鸟巢”工程之后，我国再次获得的国际焊接最高奖项。

港珠澳大桥（见图 1-2）是世界上最长的跨海大桥，地理条件复杂，设计时速 100 千米/小时，跨越珠江口伶仃洋海域，是连接香港、珠海、澳门的大型跨海通道。港珠澳大桥集隧、岛、桥为一体，全长 55 千米，工程规模宏大、条件复杂，备受瞩目。设计者对桥梁制造质量非常重视，提出 120 年寿命要求；采用长度 110 ~ 152.6 米的大节段吊装架设方案；要求 42.5 万吨钢结构在 4 年内完成制造，工期十分紧迫。



图 1-2 中国港珠澳大桥

2018 年 10 月 24 日，港珠澳大桥正式通车。从珠海至香港原本 4 小时的车程缩短至 30 分钟。港珠澳大桥是在“一国两制”条件下粤港澳三地首次合作共建的超大型基础设施项目，大桥东接香港特别行政区，西接广东省（珠海市）和澳门特别行政区。港珠澳大桥建成通车，极大缩短了香港、珠海和澳门三地间的时空距离，在大湾区建设中发挥了重要作用。港珠澳大桥作为中国从桥梁大国走向桥梁强国的里程碑之作，不仅代表了中国桥梁先进水平，更是中国综合国力的体现。

我国中铁山桥集团有限公司、武船重型工程股份有限公司、唐山开元机器人系统有限公司、天津大学等单位，参与板单元自动化焊接技术、免涂装耐候钢焊接技术、高效焊接技术、迷你机器人焊接技术等研究，打破传统的钢桥制造模式，提高自动化焊接水平，实现了“大型化、工厂化、标准化、装配化”的制作要求，全面提高了港珠澳大桥钢箱梁的制造质量。首次将机器人焊接技术应用于国内钢桥制造领域，建成国内首条板单元自动化生产线；首次在我国大跨度钢桥制造上采用免涂装耐候钢焊接技术，并取得多项发明专利，确保港珠澳大桥制造质量和工期，为我国钢桥制造业技术和装备提升起到引领示范作用。部分技术如图 1-3 到图 1-8 所示。



图 1-3 板单元自动化组装系统



图 1-4 板单元自动化焊接系统

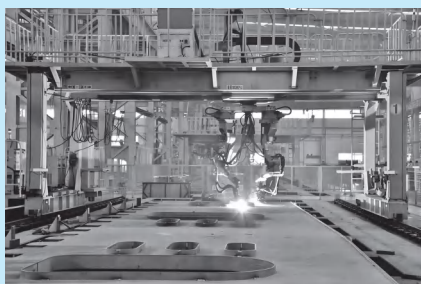


图 1-5 横隔板单元自动化焊接系统



图 1-6 “中国结”拼装



图 1-7 大节段钢箱梁运



图 1-8 大节段钢箱梁海上吊装架设

中国港珠澳大桥工程中的科技创新：

国内首次研制的 U 形肋新型加工机床和组装焊接装备，解决了坡口加工质量和精度不易控制的难题；

研发了 U 形肋、板肋与面板组拼的自动组装机床，实现了自动行走、打磨、除尘、定位、压紧和定位焊的自动化。特别是采用机器人取代人工定位焊，国内外首创；

首次使用焊接机器人配合反变形翻转胎，实现多条加劲肋同步焊接，焊缝质量好，焊接效率高；

开发了焊接质量监控系统，实现了焊接参数的实时监控，确保了焊接质量可追溯性；

建立了国内首条钢箱梁板单元制造自动化生产线，首次实现大批量钢箱梁车间化拼装制造，从根本上避免了日照温差对钢桥制造精度产生不利影响，降低了不良气候对钢梁耐久性的影响；

青州航道桥桥塔采用双柱门形框架塔，为“中国结”造型，高 50.30 米，总宽 28.09 米，重 780 吨，采取整体镶嵌至 163 米高的桥塔，安装高度偏差控制在 2 毫米，倾斜度允许偏差仅为 1/4000，填补了国内外桥梁将横系梁设计成异性结构形式的空白。

（资料来源：微信公众号“中铁山桥集团”）



1+X 考证任务训练

1. 解释下列名词：焊接性；焊接工艺；焊接工艺规程。
2. 金属材料的焊接性的含义是什么？材料焊接性的影响因素有哪些？
3. 常用焊接性试验方法种类有哪些？选用焊接性试验方法遵循的原则是什么？
4. 如何确定焊接工艺方案？焊接工艺方案的编制要点是什么？
5. 焊接工艺文件有哪些？

项目二

碳钢及低合金高强钢的 焊接工艺认知

学习导读

本项目主要学习低碳钢、中碳钢、高碳钢及低合金高强度钢的种类、成分、性能特点、焊接性及焊接工艺要点，学习钢中合金元素的作用及对焊接性的影响。建议学习课时 16 课时。

学习目标

知识目标

- (1) 掌握低碳钢、中碳钢和高碳钢以及低合金高强度钢的种类、成分和性能。
- (2) 掌握低碳钢、中碳钢和高碳钢以及低合金高强度钢的焊接性。
- (3) 熟悉低碳钢、中碳钢和高碳钢以及低合金高强度钢的焊接工艺要点。

技能目标

- (1) 会分析低碳钢、中碳钢和高碳钢以及调质钢、耐热钢、低温钢的焊接性。
- (2) 会制定低碳钢、中碳钢和高碳钢以及调质钢、耐热钢、低温钢的焊接工艺参数。
- (3) 具备防止焊接裂纹等缺陷的能力。

素质目标

- (1) 通过学习榜样的力量，弘扬爱岗敬业、精益求精的工匠精神。
- (2) 树立控制焊接质量的意识。

任务一 认识常见焊接用碳钢及合金结构钢

一、焊接用碳钢

(一) 碳钢的成分

碳钢是以铁为基本成分，碳含量低于 2%，并有少量硅、锰以及磷、硫等杂质的铁碳合金。碳钢又称碳素钢。工业上应用的碳素钢碳含量一般不超过 1.4%，因为含碳量超过此量后，钢表现出很大的硬脆性，并且加工困难，失去生产和应用价值。焊接用碳钢对杂质做了严格限制，另外还限制了铬、镍、铜、氮等元素的含量。

碳钢广泛地应用于船舶、车辆、桥梁、电站、锅炉、压力容器、建筑、家电、机械等行业，是钢材中用量最大、应用范围最广的钢材，也是目前焊接加工量最大、覆盖面最广的钢种。

(二) 碳钢的分类

碳钢有不同的分类方法,按含碳量分为低碳钢(碳含量 $\leq 0.25\%$)、中碳钢(碳含量在 $0.25\% \sim 0.60\%$ 之间)和高碳钢(碳含量 $> 0.60\%$);按钢材脱氧程度可分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢;按品质可分为普通碳素钢、优质碳素钢和高级优质碳素结构钢;按用途可分为结构钢和工具钢。根据某些行业特殊要求及用途,对普通碳素结构钢的成分和性能做调整,从而派生出一系列专业用碳素结构钢。其中与焊接关系密切的有压力容器用碳素钢、锅炉用碳素钢、桥梁用碳素结构钢和船用碳素结构钢等。

在焊接结构用碳钢中,常采用按含碳量分类的方法,因为某一含碳量范围内的碳素钢其焊接性比较接近,所以焊接工艺的制定原则也基本相同。

二、焊接用合金结构钢

用于制造工程结构和机器零件的钢统称为结构钢。合金结构钢是在普通碳素钢基础上添加适量的一种或多种合金元素而构成的铁碳合金。合金钢中除含硅和锰(作为合金元素或脱氧元素)外,还含有其他合金元素(如铬、镍、钼、钒、钛、铜、钨、铝、钴、铌、锆等),有的还含有某些非金属元素(如硼、氮等)。根据添加的元素,并采取适当的加工工艺,合金钢可获得高强度、高韧性、耐磨、耐腐蚀、耐低温、耐高温、无磁性等特殊性能。焊接结构制造中,合金结构钢主要用于制造压力容器、桥梁、船舶、大型金属构架及矿山冶金设备上的大型零部件。

根据国家标准 GB/T 13304.1—2008 和 GB/T 13304.2—2008 中合金结构钢中的低合金钢定义,其合金元素的质量分数一般不超过 5% 。低合金钢的应用领域很广,种类繁多,分类的方法很多。对焊接生产中常用的一些低合金钢来说,综合考虑它们的性能和用途后,分为两大类:一类是高强度钢,主要应用于制造一些要求常规条件下能承受静载和动载的机械零件和工程结构,合金元素的加入是为了在保证足够的塑性和韧性的条件下获得不同的强度等级;另一类是专用钢,主要用于制造一些特殊条件下工作的机械零件和工程结构,它除了满足通常的力学性能外,还必须满足特殊环境下工作的要求,例如,专用钢还必须具有耐高温、耐低温或耐腐蚀等特殊性能的要求,这也就是这类钢的合金化特点。

(一) 高强度钢

屈服点 $R_{eL} \geq 295 \text{ MPa}$ 、抗拉强度 $R_m \geq 390 \text{ MPa}$ 的钢均称为高强度钢。这类钢主要用来制造一些在常规条件下承受静载荷或动载荷的零件或结构。对材料的主要的使用要求是保证产品在预定的工作条件下的力学性能。合金元素的加入是为了在保证足够塑性和韧性的条件下获得不同的强度等级,同时也可改善焊接性能。这类钢根据屈服点级别及热处理状态,一般又可分为三种类型:热轧及正火钢、低碳调质钢和中碳调质钢。

1. 热轧及正火钢

以热轧或正火状态供货和使用的钢称为热轧及正火钢。这类钢的 $R_{eL} = 295 \sim 490 \text{ MPa}$,属非热处理强化钢,通过合金元素的固溶强化和沉淀强化而提高强度,包括微合金化控轧钢、抗层状撕裂的 Z 向钢等。这类钢广泛应用于常温下工作的一些受力结构,如压力容器、动力设备、工程机械、桥梁、建筑结构和管线等。但热轧及正火钢的强度受到强化方式的限制,只有通过热处理强化,才能在保证综合力学性能的基础上进一步提高强度。

2. 低碳调质钢

低碳调质钢的屈服强度 (R_{eL}) $= 441 \sim 980 \text{ MPa}$, $\omega_C \leq 0.25\%$,在调质状态下供货和使用,属于热处理强化钢。这类钢不仅强度高,而且具有优良的塑性和韧性,可直接在调质状态下焊接,焊后不需再进行调质处理。这类钢在焊接结构中得到了越来越广泛的应用,可用于大型工程机械、压力容器及舰船制造等。

低碳调质钢中合金元素的主要作用是提高钢的淬透性，通过调质处理得到低碳马氏体或贝氏体，不但提高了强度，而且保证了塑性和韧性。对同一强度级别的钢来说，调质钢比正火钢的合金元素含量低，从而具有更好的韧性和焊接性。新发展的 $R_{eL} \geq 490 \text{ MPa}$ 的 CF 钢，就属于含碳量极低 ($\omega_c = 0.04\% \sim 0.09\%$) 的微合金化调质钢，它具有很高的抗冷裂纹的性能和低温韧性。

低碳调质钢的缺点是：生产工艺复杂，成本高，进行热加工（成形、焊接等）时对工艺参数限制比较严格。

3. 中碳调质钢

中碳调质钢属于热处理强化钢，在调质状态下使用，这类钢的含碳量较高 ($\omega_c > 0.3\%$)，屈服强度 (R_{eL}) 一般在 $880 \sim 1176 \text{ MPa}$ 以上。它的淬硬性比低碳调质钢高得多，具有很高的硬度和强度，但塑性、韧性相对较低，给焊接带来很大的困难，一般需要在退火状态下进行焊接，焊后进行调质处理。这类钢主要用于制造一些大型的机械零件和要求减轻自重的高强度结构，如汽轮机、喷气涡轮机叶轮、飞机起落架和火箭的壳体等。

近年来这类钢中又开发出一些很有发展前途的新分支，如微合金化控轧钢、焊接无裂纹钢（CF 钢）、抗层状撕裂钢（Z 向钢）和焊接大热输入钢等。这些钢种的出现对进一步提高焊接质量和扩大焊接结构的应用具有重要的意义。

GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》对钢的牌号、质量等级做了新的修订。

（1）原来低合金高强度结构钢仅要求碳（C）、硫（S）、磷（P）、硅（Si）、锰（Mn）的含量保证，而新标准中，要求增加微量元素铌（Nb）、钒（V）、钛（Ti）、铬（Cr）、镍（Ni）、铜（Cu）、钼（Mo）、氮（N）、铝（Al）等合金元素的含量保证，以更益于细化晶粒，提高强度、韧性、抗蚀性、耐磨性和淬硬性。

（2）GB/T 1591—2018 标准中还规定：将钢材下屈服强度改为上屈服强度，提高了名义强度值；系列钢材牌号中以 Q355 钢替代了原 Q345 钢。钢材在原来热轧状态（牌号为 Q355、Q390、Q420、Q460 共 4 种）交货的基础上，增加了正火与正火轧制钢（牌号为 Q355N、Q390N、Q420N、Q460N 共 4 种）、热机械轧制钢（牌号为 Q355M、Q390M、Q420M、Q460M、Q500M、Q550M、Q620M、Q690M 共 8 种）供工程应用。新增工艺类别的产品均具有更好的综合性能。

（3）对不同的钢材牌号规定了不同的质量等级，设计选材时，更适用于工程用材优化细化的要求。各牌号钢材的质量等级如表 2-1 所示。我们应按表 2-1 中的规定正确选用钢材质量等级，不应直接选用 A 级钢。

表 2-1 各牌号钢材的质量等级

钢材牌号	质量等级					
	A	B	C	D	E	F
Q355		√	√	√		√
Q355N		√	√	√	√	√
Q355M		√	√	√	√	
Q390		√	√	√		
Q390N		√	√	√	√	
Q390M		√	√	√	√	
Q420		√	√			
Q420N		√	√	√	√	

续表

钢材牌号	质量等级					
	A	B	C	D	E	F
Q420M		✓	✓	✓	✓	
Q460			✓			
Q460N			✓	✓	✓	
Q460M			✓	✓	✓	

注：1. Q460C 钢仅适用于型材和棒材，不适用于板材。

2. 钢材牌号不带后缀者为热轧状态钢材，带后缀“N”“M”的分别为正火状态钢材和热机械轧制状态钢材。

（二）专业用钢

专业用钢是专用于某些特殊工作条件的钢种的总称，按用途不同分类品种很多，常用于焊接结构制造的有以下几类。

1. 珠光体耐热钢

珠光体耐热钢是以 Cr、Mo 为基础的低、中合金钢，随着工作温度的升高，还可以加入 V、W、Nb、B 等元素，具有较好的高温强度和高温抗氧化性，主要用于制造工作温度在 500 ~ 600℃ 的高温设备，如热动力设备和化工设备等。这种钢根据使用中的需要可以进行包括调质处理在内的各种热处理，焊后一般进行高温回火。

2. 低温钢

低温钢大部分是一些含 Ni 的低碳低合金钢，一般在正火或调质状态使用，主要用于各种低温装置（-40 ~ -196℃）、严寒地区的一些工程结构（如桥梁和管线等）和露天矿山机械。近十几年来，在新能源方面由于液化石油气（≤ -45℃）和液化天然气（-162℃）的开发和应用，需要大量的低温钢来制造存储和运输用的容器。与普通低合金钢相比，低温钢除了要满足通常的强度要求外，还必须保证在相应的低温条件下具有足够强的低温韧性。材料选用的主要依据是产品在工作温度下要求的韧度指标。

3. 低合金耐蚀钢

低合金耐蚀钢主要用于制造在大气、海水、石油、化工产品等腐蚀介质中工作的各种机械设备和焊接结构，除要求钢材具有合格的力学性能外，还应对应的介质有耐蚀能力。耐蚀钢的合金系统随工作介质与腐蚀形式之不同而变化。应用低合金耐蚀钢，可以有效地减少因海水、大气等介质的腐蚀而消耗的钢材，据统计，全世界所有的金属制品中，每年由于腐蚀而报废的重量，大约相当于金属年产量的 1/3，因此，在合金结构钢中发展耐蚀钢具有重大的经济意义。

任务二 了解低碳钢的焊接工艺

低碳钢的含碳量小于 0.25%，塑性好，一般没有淬硬和冷裂倾向，其焊接性良好，一般不需要预热，所有的焊接方法都可以焊接。

低碳钢焊接要求焊缝和母材等强度，并具有良好的塑性和韧性。一般焊缝金属含碳量稍低于母材。适当的提高硅、锰的含量以及焊接时采用较高的冷却速度均可使焊缝金属和母材保持等强度。

一、焊接用低碳钢的成分和性能

焊接用低碳钢主要有普通碳素结构钢（如 Q215、Q235，质量等级分为 A、B、C、D 四级）、优质碳素结构钢（如 GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》中的 08、10、15、20、25 等）、专业用钢（如 GB/T 713—2014《锅炉和压力容器用钢板》中的 20g、Q245R、Q345R，GB/T 6653—2017《焊接气瓶用钢板和钢带》中的 HP245、HP295，GB/T 712—2022《船舶及海洋工程用结构钢》中的一般强度钢，GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》中的 Q235q 等）。

焊接常用低碳钢的化学成分和力学性能如表 2-2 和表 2-3 所示。

表 2-2 焊接常用低碳钢的化学成分

牌号	等级	化学成分（质量分数）/%					标准
		C	Mn	Si	S	P	
					≤	≤	
Q215	A	0.09 ~ 0.15	0.25 ~ 0.55	≤ 0.30	0.050	0.045	GB/T 700—2006
	B				0.045		
Q235	A	0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65	≤ 0.30	0.050	0.045	
	B	0.12 ~ 0.20	0.30 ~ 0.70		0.045		
	C	≤ 0.18	0.35 ~ 0.80		0.040	0.040	
	D	≤ 0.17			0.035	0.045	
08		0.05 ~ 0.11	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.035	0.035	GB/T 699—2015
10F		0.07 ~ 0.13	0.25 ~ 0.50	≤ 0.07	0.035	0.035	
10		0.07 ~ 0.13	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.035	0.035	
15F		0.12 ~ 0.18	0.25 ~ 0.50	≤ 0.07	0.035	0.035	
15		0.12 ~ 0.18	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.035	0.035	
20		0.17 ~ 0.23	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.035	0.035	
25		0.22 ~ 0.29	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.30	0.035	0.035	
20g		≤ 0.20	0.50 ~ 0.90	0.15 ~ 0.30	0.035	0.035	GB/T 713—2014
Q245R		≤ 0.20	0.50 ~ 0.90	0.15 ~ 0.30	0.035	0.035	GB/T 713—2014
船体用碳素结构钢	A	≤ 0.21	≥ 2.5C	≤ 0.50	0.035	0.035	GB/T 712—2022
	B	≤ 0.21	0.80 ~ 1.20	≤ 0.35			
	D	≤ 0.21	0.60 ~ 1.20				
	E	≤ 0.18	0.70 ~ 1.20				
HP245		≤ 0.16	≤ 0.60	≤ 0.35	0.035	0.035	GB/T 6653—2017
HP295		≤ 0.20	≤ 1.00				
Q235q	C	≤ 0.20	0.40 ~ 0.70	≤ 0.30	0.035	0.035	GB/T 714—2015
	D	≤ 0.18	0.50 ~ 0.80	≤ 0.30	0.025	0.025	

表 2-3 焊接常用低碳钢的力学性能

牌号	等级	力学性能				
		屈服点 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A_5/\%$	收缩率 $Z/\%$	冲击吸收功 $/\text{J}$
Q215	A	165 ~ 215 (板厚区别对待)	335 ~ 450	26 ~ 31	—	—
	B					(20℃) 27
Q235	A	185 ~ 235 (板厚区别对待)	370 ~ 500	21 ~ 26	—	—
	B					(20℃) 27
	C					(0℃) 27
	D					(-20℃) 27
08		≥ 195	≥ 325	≥ 33	≥ 60	—
10F		≥ 185	≥ 315	≥ 33	≥ 55	—
10		≥ 205	≥ 335	≥ 31	≥ 55	—
15F		≥ 205	≥ 355	≥ 29	≥ 55	—
15		≥ 225	≥ 375	≥ 27	≥ 55	—
20		≥ 245	≥ 410	≥ 25	≥ 55	—
25		≥ 275	≥ 450	≥ 23	≥ 50	71
20g		225 ~ 245 (16 ~ 60 mm)	400 ~ 520	26 ~ 23 (16 ~ 60 mm)	—	27
Q245R		225 ~ 245 (16 ~ 60 mm)	400 ~ 520	25 (16 ~ 60 mm)	—	31
船体用碳素结构钢	A	≥ 235	400 ~ 520	≥ 22	—	—
	B					(0℃) 27
	D					(-20℃) 27
	E					(-40℃) 27
HP245		≥ 245	≥ 390	≥ 28	—	27
HP295		≥ 295	≥ 440	≥ 26		
Q235q	C	215 ~ 235 (16 ~ 50 mm)	375 ~ 390 (16 ~ 50 mm)	≥ 26	—	(0℃) 27
		205 (50 ~ 100 mm)	375 (50 ~ 100 mm)			
	D	215 ~ 235 (16 ~ 50 mm)	375 ~ 390 (16 ~ 50 mm)	≥ 26	—	(-20℃) 27
		205 (50 ~ 100 mm)	375 (50 ~ 100 mm)			

二、低碳钢的焊接性分析

低碳钢的含碳量在 0.25% 以下，含锰量在 0.25% ~ 0.80% 之间，含硅量小于 0.35%。按国际焊接学会推荐的碳当量计算公式计算，其碳当量（CE）在 0.40% 以下时，焊接性非常优良，一般情况下不必采取预热、控制层间温度和焊后保温措施。但焊接低碳钢时，可能会出现以下问题。

（1）结构刚性过大的情况下，为了防止拉裂，焊前有必要适当预热至 100 ~ 150℃。

（2）当焊件温度低于 0℃ 时，一般应在始焊处 100 mm 范围内预热到手感温暖程度（约 15 ~ 30℃ 之间）。

（3）杂质 S、P 含量严重超标时（沸腾钢中较为多见），易于在晶界形成低熔点共晶产物聚集，导致熔合线附近产生液化裂纹，甚至在焊缝区产生热裂纹。

（4）焊缝扩散氢含量过大时，在厚板和 CE > 0.15% 情况下有产生氢致裂纹的可能性，在厚板 T 形接头和角接接头焊接时还有可能出现层状撕裂。焊缝含氮量超标时（> 0.008%）则会引起接头塑性和韧性的急剧降低。

（5）在焊接过热条件下，有可能在熔合区出现魏氏组织。

（6）用热输入较大的焊接方法（如埋弧焊、粗丝熔化极气体保护焊、电渣焊）会因热影响区晶粒粗大而导致接头塑性和韧性的下降。

三、低碳钢的焊接工艺

（一）焊接方法的选择

低碳钢焊接性优良，是所有钢材中最易于施焊的。而且低碳钢非常适宜熔化焊，工程结构常用的各种熔焊方法，如焊条电弧焊、埋弧焊、电渣焊、各类熔化极或钨极气体保护焊、等离子弧焊、气焊等均可使用。同属熔焊范畴的热剂焊、激光焊和电子束焊，尽管焊接性优良，但一般较少用于低碳钢焊接。熔焊外的其他焊接方法，如电阻焊、摩擦焊、钎焊等也能用于低碳钢的焊接。近年来，各种高效率、高质量的焊接工艺和方法被开发，如单面焊双面成形、高效率铁粉焊条和重力焊条电弧焊、氩弧焊封底 - 焊条电弧焊联合使用法、采用烧结焊剂和快速焊剂的埋弧焊、窄间隙埋弧焊、药芯焊丝气体保护电弧焊、旋转电弧加热焊等。这些高效率、高质量的焊接方法在低碳钢结构中的应用日益广泛。

（二）焊接材料的选择

焊接方法确定后，此种焊接方法对应的焊接材料种类即确定。对低碳钢焊接材料，一般根据其强度和结构的重要性，选用相配套的焊接材料。

所选用或实际使用的焊接材料，应首先保证焊接接头最小强度不低于母材最小抗拉强度。此外还应根据熔敷金属的最低强度级别与母材最小抗拉强度要求做匹配，但焊后焊缝金属的实际强度与母材强度的关系，与熔敷金属和母材金属的 C、Mn、Si 含量差异有关。熔敷金属的合金元素最终进入焊缝中的数量，与参与脱氧的合金元素数量有关，参与脱氧的合金元素越多，最后焊缝金属中的合金元素的量就越少，有可能造成焊缝金属的强度低于母材。

对于重要的低碳钢结构，选择焊接材料时，还应考虑熔敷金属的塑性和冲击韧度要求。选用原则是应使焊接材料熔敷金属的塑性或冲击性能指标尽量达到或接近母材的塑性或冲击性能最低要求。

常用低碳钢的匹配焊条和施焊条件如表 2-4 所示。几种碳钢埋弧焊常用焊接材料选择如表 2-5 所示。

表 2-4 常用低碳钢匹配的焊条和施焊条件

钢号	焊条选用				施焊条件
	一般结构 (包括壁厚不大的中、低压容器)		承受动载荷或复杂的厚板结构，壁厚较大的压力容器低温环境下焊接		
	国标型号	牌号	国标型号	牌号	
Q235	E4303、E4313、 E4301、E4320、 E4311	J421、J422、 J423、 J424、J425	E4316、E4315 (E5016、E5015)	J426、J427 (J506、J507)	一般不预热
Q255					
Q275	E5016、E5015	J506、J507	E5016、E5015	J506、J507	厚板结构预热 150℃以上
08、10、15、20	E4303、E4301、 E4320、E4311	J422、J423、 J424、J425	E4316、E4315 (E5016、E5015)	J426、J427 (J506、J507)	一般不预热
25、30	E4316、E4315	J426、J427	E5016、E5015	J506、J507	厚板结构预热 150℃以上
20g	E4303、E4301	J422、J423	E4316、E4315 (E5016、E5015)	J426、J427 (J506、J507)	一般不预热
Q245R	E4303、E4301	J422、J423	E4316、E4315 (E5016、E5015)	J426、J427 (J506、J507)	一般不预热

注：表中括号内表示可以代用。

表 2-5 碳钢埋弧焊常用焊接材料选择

钢号	埋弧焊焊接材料的选用		
	焊丝	焊剂	
		牌号	国际型号
Q235	H08A	HJ431、HJ430	F4Ax-H08A
Q255	H08A		
Q275	H08MnA		
15、20	H08A、H08MnA		—
25、30	H08MnA、H10Mn2		—
20g	H08MnA、H08MnSi、H10Mn2	HJ431、HJ430	F4A2-H08MnA
Q245R	H08MnA、H08MnSi、H10Mn2	HJ431、HJ430	F4A2-H08MnA

用焊条电弧焊焊接低碳钢时，母材和焊条的匹配有以下几点要求。

- (1) 匹配基础是等强原则。
- (2) 不同强度的低碳钢焊接时，按强度较低一侧的母材选择焊条，即通常所指的“低匹配原则”。
- (3) 同一强度级别的焊条，如无特殊情况应选择交直流两用的焊条。
- (4) 结构刚性过大，承受动载或交变载荷，工作温度较低（低于 0℃）时，应优先选择碱性焊条。

低碳钢埋弧焊应按等强原则进行匹配，一般选用实芯焊丝，如 H08A 或 H08E 焊丝与高锰高硅低氟熔炼焊剂 HJ430、HJ431、HJ433 配合，应用甚广。焊接时，焊剂中 MnO 和 SiO₂ 在高温下与铁反应，还原出 Mn 和 Si 进入溶池。溶池冷却时它们又成为脱氧剂，同时还有足够数量余留下来成为合金剂。焊接时有足够数量的 Mn 和 Si 的过渡，从而保证焊缝良好脱氧和合格的力学性能。所以，如选择无锰型、低锰型或中锰型焊剂，则焊丝应选用 H08MnA 或其他合金焊丝。

二氧化碳气体保护焊用焊丝可分为实芯焊丝和药芯焊丝两大类。用 MIG（熔化极惰性气体保护电弧焊）焊接低碳沸腾钢、半镇静钢，为防止由于钢中氧的有害作用而出现气孔，应选用有脱氧能力的焊丝。

电渣焊的熔池温度比埋弧焊低，焊接过程中焊剂的更新量较少，所以焊剂中的硅、锰还原作用弱。因此低碳钢电渣焊时，若仍按埋弧焊选 H08A 和高锰高硅低氟焊剂，则焊缝中得不到足够数量的硅和锰；另一方面，根据共存原则，锰的过渡与焊剂碱性关系很大，碱度越大，锰的过渡系数越大。为此，低碳钢电渣焊应选用中锰高硅中氟的 HJ360 与 H10Mn2 或 H10MnSi 焊丝配合，也可使用高锰高硅低氟的 HJ430 与 H10MnSi 焊丝匹配。

(三) 焊接工艺要点

为确保低碳钢焊接质量，在焊接工艺方面须注意以下几点。

- (1) 焊前清除焊件表面铁锈、油污、水分等杂质，焊接材料使用前必须按说明书进行烘干。
- (2) 角焊缝、对接多层焊的第一层焊缝以及单道焊缝要避免采用窄而深的坡口形式，以防止出现裂纹、未焊透、夹渣等焊接缺陷。
- (3) 焊接刚性大的构件时，为了防止产生裂纹，宜采用焊前预热和焊后消除应力的措施。
- (4) 在环境温度低于 -10℃ 的条件下焊接低碳钢结构时接头冷却速度较快，为了防止产生裂纹，应采取以下减缓冷却速度的措施。
 - ① 焊前预热，焊时保持层间温度。
 - ② 采用低氢或超低氢焊接材料。
 - ③ 定位焊时加大焊接电流，减慢焊接速度，适当增加定位焊缝截面和长度。必要时预热。
 - ④ 整条焊缝连续焊完，尽量避免中断。
 - ⑤ 不在坡口以外的母材上引弧，熄弧时，弧坑要填满。
 - ⑥ 弯板、矫正和装配时，尽可能不在低温下进行。
 - ⑦ 尽可能改善严寒下的劳动条件。

以上措施可单独采用或联合采用。低碳钢低温下焊接时的预热温度如表 2-6 所示。

表 2-6 低碳钢低温下焊接时的预热温度

环境温度 /℃	焊件厚度 /mm		预热温度 /℃
	梁、柱、桁架	管道、容器	
-30 以下	≤ 30	≤ 16	100 ~ 150
-20 ~ -30	31 ~ 34	17 ~ 30	100 ~ 150
-10 ~ -20	35 ~ 50	31 ~ 40	100 ~ 150
0 ~ -10	51 ~ 70	41 ~ 50	100 ~ 150

任务三 了解中碳钢的焊接工艺

中碳钢的含碳量为 0.25% ~ 0.60%，含锰量为 0.5% ~ 1.2%，含硅量为 0.17% ~ 0.37%。中碳钢除大量用于机器零件外，有些船舶、建筑钢结构也采用中碳钢，在实际工程中经常需要进行中碳钢的焊接。

中碳钢的焊接性随含碳量的增加逐步变差，加上 S、P 的影响，易产生热裂。这就要求焊接人员掌握中碳钢的焊接工艺要点：焊接方法应选用焊接热输入小的焊接方法；焊接材料尽量选用抗裂性好的低氢型焊条，考虑等强度匹配原则。

一、焊接用中碳钢的成分和性能

焊接用中碳钢主要有常用的优质碳素结构钢（如 30、35、45、55）和一般工程用铸钢（如 ZG270-500、ZG310-570、ZG340-640 等）。

焊接常用中碳钢的化学成分和力学性能如表 2-7 和表 2-8 所示。

表 2-7 焊接常用中碳钢的化学成分

牌 号	化 学 成 分（质量分数）/%					标 准
	C	Mn	Si	S	P	
				≤		
30	0.27 ～ 0.34	0.50 ～ 0.80	0.17 ～ 0.37	0.035	0.035	GB/T 699—2015
35	0.32 ～ 0.39	0.50 ～ 0.80	0.17 ～ 0.37	0.035	0.035	
45	0.42 ～ 0.50	0.50 ～ 0.80	0.17 ～ 0.37	0.035	0.035	
55	0.52 ～ 0.60	0.50 ～ 0.80	0.17 ～ 0.37	0.035	0.035	
ZG270—500	≤ 0.40	≤ 0.90	≤ 0.50	0.040		GB/T 11352—2009
ZG310—570	≤ 0.50	≤ 0.90	≤ 0.60			
ZG340—640	≤ 0.60	≤ 0.90	≤ 0.60			

表 2-8 焊接常用中碳钢的力学性能

牌号	力学性能				
	屈服点 (R _{el}) /MPa	抗拉强度 (R _m) /MPa	伸长率 (A ₅) /%	收缩率 (Z) /%	冲击吸收功 /J
30	≥ 295	≥ 490	≥ 21	≥ 50	63
35	≥ 315	≥ 530	≥ 20	≥ 45	55
45	≥ 355	≥ 600	≥ 16	≥ 40	39
55	≥ 380	≥ 645	≥ 13	≥ 35	—
ZG270-500	≥ 270	≥ 500	≥ 18	≥ 25	22
ZG310-570	≥ 310	≥ 570	≥ 15	≥ 21	15
ZG340-640	≥ 340	≥ 640	≥ 10	≥ 18	10

二、中碳钢的焊接性分析

中碳钢 ω_c 范围为 0.25% ~ 0.60%。当 ω_c 接近 0.30% 时，焊接性良好，随着 ω_c 的增加，焊接性逐渐变差，主要的问题是热影响区（HAZ）可能产生硬脆的马氏体组织，使其强度改变、脆化和硬化，冷裂纹敏感性增大。焊接时，因熔化母材中的碳（C）进入熔池，导致焊缝金属碳含量增加，也增加了气孔的敏感性。另外，随着碳含量的增加，增加了焊缝中的 S、P 偏析，焊缝产生热裂纹倾向增大。这种热裂纹在弧坑处较为敏感。

中碳钢既可作为强度较高的结构件，也可作为机械部件和工具。用作机械部件时，要求其强韧性匹配，甚至同时要求具备耐磨性。用作工具时，又要求其坚硬耐磨而非高强度。无论是高强度还是耐磨，常常通过热处理来达到所期望的性能。因此，中碳钢焊接前应已经正火或调质（淬火 + 高温回火），如 45 钢作轴类零件时，是预先经过调质处理的。

若中碳钢焊前为退火状态，焊后可以进行调质处理以达到焊接构件的设计性能要求。焊接时选择的焊接材料十分重要和关键，应该保证焊缝在调质处理后同样能达到母材所期望的强韧性或耐磨性要求。若焊前为调质处理状态，一方面应保证焊接后焊缝的性能达到焊接构件的设计性能要求，另一方面，应保证焊接热影响区不软化，同时也应保证焊接热影响区不出现明显的硬化区和性能脆化区。降低热影响区软化的办法是采用较小的焊接热输入，而防止焊接热影响区硬化的办法是减缓冷却速度，如预热、后热、适当提高焊接热输入。若这些工艺措施仍不能保证焊缝和热影响区性能达到设计指标，可采取整体热处理办法解决。

三、中碳钢的焊接工艺

（一）焊接方法的选择

中碳钢焊接性较差，焊接方法应选用焊接热输入易控制且较小的方法，如焊条电弧焊、 CO_2 气体保护焊、氩弧焊等。

不推荐使用埋弧焊，如必须使用，也只限于 $\omega_c < 0.40\%$ 的中碳钢中薄板，如含碳量处于下限的 35 钢（ ω_c 为 0.32% ~ 0.40%）及 30 钢（ ω_c 为 0.27% ~ 0.35%）。焊接时选用低碳优质焊丝，如 H08A、H08E、H08MnA；匹配硅钙型烧结焊剂，如 SJ301、SJ302。焊前应 150℃ 预热，焊后立即进行去应力处理或去氢处理。

生产中，中碳钢埋弧焊产生裂纹的风险较大，在焊条电弧焊和 TIG 焊可以替代的情况下，慎用埋弧焊。

与埋弧焊相比，电渣焊由于其渣池对焊件良好的预热作用，以及冷却速度缓慢的特点，更适宜于中碳钢的焊接。若焊丝 - 焊剂组合选配恰当，焊接工艺参数合适，则焊缝及热影响区一般不会出现淬硬组织，焊后产生冷裂纹的倾向也小。缺点是只适合于厚板长直焊缝，且焊后应进行正火热处理以细化晶粒。如大型齿轮毛坯、电机底座、压力机机架、压力机轴辊、大型油压机支柱和柱体的焊接，用电渣焊能减少制造时间，节省焊剂消耗。

对于在中碳钢表面堆焊合金层，应选用低氢焊接方法（如 CO_2 气体保护焊）或低氢焊接材料（如埋弧焊），采用碱度较高的焊剂。为防止堆焊层剥离，可采用碳含量低、合金元素少的焊材先堆焊过渡层，再堆焊合金层。

修复厚大的中碳钢铸钢件时，应保证焊前预热温度比钢板预热温度高，焊后应立即进行消除应力处理。

(二) 焊接材料的选择

1. 尽量选用低氢型焊接材料

应尽量选用抗裂性好的低氢型焊条，因为熔敷金属扩散氢量少，去硫能力强，故熔敷金属塑性、韧性良好，抗裂性好。如果选用非低氢型焊条（如钛铁矿型或钛钙型焊条）进行焊接，必须采取严格的工艺措施（如控制预热温度、减少母材熔合比等），才能获得满意的结果。

2. 注意焊缝金属与母材强度匹配

要求焊缝金属与母材等强度时，应选用强度级别相当的低氢碱性焊条；不要求等强时，则选用强度级别比母材约低一级的低氢型焊条，以提高焊缝的塑性、韧性和抗裂性能。例如，焊接母材为 490MPa 的钢，可选用 E4316、E4315 焊条。

3. 在特殊情况下选择合适的焊接材料

如母材不允许预热时，可选用铬－镍奥氏体不锈钢焊条焊接，焊缝金属为奥氏体组织，塑性好，可减少焊接接头应力，避免热影响区冷裂纹的产生。用于中碳钢焊接的铬－镍奥氏体不锈钢焊条有 E308-16（A102）、E308-15（A107）、E309-16（A302）、E309-15（A307）、E310-16（A402）、E310-15（A407）等。

4. 考虑焊前状态

用中碳钢制作的工具、模具，多数要求有较高的硬度和耐磨性，而强度不做高要求，常需要用热处理来满足性能要求。此时，选择焊接材料应考虑：若在热处理前即退火状态下焊接，则选用的焊条必须使焊缝金属成分与母材相近，以使焊后经热处理的焊缝金属达到与母材相同的性能；若在热处理后（一般为调质处理）的部件上焊接，则必须选用低氢碱性焊条，采取相应工艺措施，以防止裂纹和降低热影响区的软化。

(三) 焊接工艺要点

（1）焊前预热。在大多数情况下，中碳钢焊接需要预热，控制层间温度（一般不能低于预热温度），以降低焊缝金属和热影响区的冷却速度，抑制马氏体的形成，提高焊接接头的塑性，减小残余应力。预热温度取决于碳当量、母材厚度、结构刚度、焊条类型和工艺方法，如表 2-9 所示。对于刚度大的大型结构需采取局部预热时，要注意防止由于预热不当引起应力的增加。

表 2-9 中碳钢焊接用焊条、预热及消除应力热处理温度

钢号	焊条						板厚 /mm	预热及层 间温度 /℃	消除应力 热处理温 度 /℃		
	不要求等强度		要求等强度		要求高塑、韧性						
	型号	牌号	型号	牌号	型号	牌号					
30	E4316	J426	—	—	E308-16 E309-16 E309-15 E310-16 E310-15	A102 A302 A307 A402 A407	25 ~ 50	> 100	600 ~ 650		
	E4315	J427									
35	E4303	J422	E5016	J506			50 ~ 100	> 150	600 ~ 650		
	E4301	J423	E5015	J507							
ZG270-500	E4316	J426	E5516	J556						E310-15	A407
	E4315	J427	E5515	J557							

续表

钢号	焊条						板厚 /mm	预热及层 间温度 /℃	消除应力 热处理温 度 /℃			
	不要求等强度		要求等强度		要求高塑、韧性							
	型号	牌号	型号	牌号	型号	牌号						
45	E4316	J426	E5516	J556	E308—16 E309—16 E309—15 E310—16 E310—15	A102 A302 A307 A402 A407	≤ 100	> 200	600 ~ 650			
	E4315	J427	E5515	J557								
ZG310—570	E5016	J506	E6016	J606						≤ 100	> 250	600 ~ 650
	E5015	J507	E6015	J607								
55	E4316	J427	E6016	J606			≤ 100	> 250	600 ~ 650			
	E4315	J426	E6015	J607								
ZG340—640	E5016	J506	—	—			≤ 100	> 250	600 ~ 650			
	E5015	J507										

注：用铬－镍奥氏体不锈钢焊条时，预热温度可降低或不预热。

（2）为减少热裂纹和消除气孔，宜采用 U 形坡口，也可用 V 形坡口，以降低母材熔合比。焊前应将焊补处的缺陷、裂纹、夹渣等彻底清除，清除油污、氧化物等杂质。需要定位焊时，焊缝不宜过小。

（3）第一层焊缝应用小直径焊条，小电流慢速焊接，以减小熔深，防止出现裂纹，但要注意熔透。焊条进行 400℃、2 h 烘干。

（4）焊接时锤击焊缝减少残余应力。

（5）采用直流反接，焊接电流较低碳钢小 10% ~ 15%。

（6）焊后处理。焊后最好立即进行消除应力热处理，至少应在焊件冷却到预热温度或层间温度之前进行，特别是对大厚度工件、大刚度结构件。消除应力回火温度一般为 600 ~ 650℃，焊件在炉中加热和冷却应平缓，以减少截面厚度方向的温度梯度。

（7）后热。若焊后不能立即消除应力，也应当进行后热，便于扩散氢逸出。后热温度视具体情况而定，后热保温时间大约每 10 mm 厚度为 1 h 左右。

工程案例



中碳钢焊接

任务四 了解热轧及正火钢的焊接工艺

一、热轧及正火钢的成分与性能

屈服强度为 295 ~ 490 Mpa 的低合金高强度钢，一般是在热轧或正火状态下供货使用，故称为热轧钢或正火钢，属于非热处理强化钢。典型热轧及正火钢的化学成分如表 2-10 所示，力学性能如表 2-11 所示。

表 2-10 几种典型热轧及正火钢的化学成分

牌号	化学成分 (质量分数) /%											备注
	C	Mn	Si	S ≤	P ≤	V	Nb	Ti	Cr	Ni	其他	
Q295	≤ 0.16	0.80 ~ 1.50	≤ 0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20				
Q345	≤ 0.20	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20				
Q390	≤ 0.20	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20				
Q420	≤ 0.20	1.00 ~ 1.70	≤ 0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20				
18MnMoNbR	≤ 0.22	1.20 ~ 1.60	0.15 ~ 0.50	0.030	0.035		0.025 ~ 0.05				Mo 0.45 ~ 0.65	
13MnNiMoNbR	≤ 0.15	1.20 ~ 1.60	0.15 ~ 0.50	0.025	0.025		0.005 ~ 0.02		0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	Mo 0.20 ~ 0.40	
WH530	≤ 0.18	1.20 ~ 1.60	0.20 ~ 0.55	0.030	0.030		0.01 ~ 0.040					武汉钢铁公司研制
19Mn5	0.17 ~ 0.23	1.00 ~ 1.30	0.40 ~ 0.60	0.050	0.050							
D36	0.12 ~ 0.18	1.20 ~ 1.60	0.10 ~ 0.40	0.006	0.02	0.02 ~ 0.08	0.02 ~ 0.050					Z 向钢
X60	≤ 0.12	1.00 ~ 1.30	0.10 ~ 0.40	0.025	0.030							管线钢

注：Q295、Q345、Q390、Q420 四种钢，以 ω_p 、 ω_s 含量不同分为 A ~ E 五级，表列数据为 B 级。

表 2-11 几种典型热轧及正火钢的力学性能

牌号	热处理状态	力学性能			
		R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A_5/\%$	冲击吸收功 /J
Q295	热轧	≥ 295	390 ~ 570	≥ 23	34 (20℃, 纵向)
Q345	热轧	≥ 345	470 ~ 630	≥ 21	34 (20℃, 纵向)
Q390	热轧	≥ 390	490 ~ 650	≥ 19	34 (20℃, 纵向)
Q420	正火	≥ 420	520 ~ 680	≥ 18	34 (20℃, 纵向)
18MnMoNbR	正火 + 回火	≥ 490	≥ 637	≥ 16	34 (20℃, 横向)
13MnNiMoNbR	正火 + 回火	≥ 392	569 ~ 735	≥ 18	31 (0℃, 横向)
WH530	正火	≥ 370	530 ~ 660	≥ 20	31 (-20℃)
19Mn5	正火 + 回火	≥ 304	510 ~ 608	—	49 (20℃)
D36	正火	≥ 353	≥ 490	≥ 21	34 (-40℃)
X60	控轧	≥ 414	≥ 517	20.5 ~ 23.5	54 (-10℃)

(一) 热轧钢

屈服强度为 295 ~ 390 MPa 的钢, 大都属于热轧钢。热轧钢的合金系统基本上为 C-Mn 系或 C-Mn-Si 系, 主要靠 Mn、Si 的固溶强化作用提高强度, 也可再加入 V、Nb 以达到细化晶粒和沉淀强化的作用。在低碳 ($\omega_c \leq 0.2\%$) 条件下, $\omega_{Mn} \leq 1.6\%$, $\omega_{Si} \leq 0.6\%$ 时, 可以保持较高的塑性和韧性。Si 的质量分数超过 0.6% 后对韧性不利, 使韧脆转变温度提高。C 的质量分数超过 0.3% 或 Mn 的质量分数超过 1.6% 后, 焊接时易出现裂纹, 在热轧钢焊缝区还会出现淬硬组织。因此, 合金元素的用量与钢的强度水平都受到限制。热轧钢的综合力学性能和加工工艺性能都较好, 而且原材料资源丰富, 冶炼工艺简单, 因而在国内外得到普遍应用。

Q345 (2019 年后现行标准规定由 Q355 取代) 是我国于 20 世纪 50 年代 (1957 年) 研制生产和应用最广泛的热轧钢, 用于南京长江大桥和我国第一艘万吨远洋货轮。我国低合金钢系列中的许多钢种是在 Q345 基础上发展起来的。与 Q235 相比, ω_{Mn} 由 0.65% 提高到 1.00% ~ 1.6%。并加入微量 V、Nb、Ti 等元素, 强度提高近 50%。以 Q345 取代 Q235, 可节约材料 20% ~ 30%。按照钢中硫、磷的含量, Q345 又分为 A ~ E 5 个质量等级。其中 Q345A 相当于旧牌号的 16Mn, Q345C 相当于锅炉压力容器用钢中的 16Mng 和 16MnR。

Q390 钢是在 Q345 的基础上提高了钒的含量, 并加入一定量的铬 ($\omega_{Mn} \leq 0.30\%$) 和镍 ($\omega_{Ni} \leq 0.70\%$) 而成的。V 的增加进一步保证了沉淀强化作用和细化晶粒作用。铬 (Cr) 是固溶强化元素, 而且能增加钢中珠光体的相对含量, 少量的 Cr 对钢的塑性无明显影响。镍也是固溶强化元素, 对一般非热处理强化钢, 加入镍 (Ni) 可提高强度而不降低塑性和韧性。

热轧钢的组织为细晶粒铁素体 + 珠光体, 一般在热轧状态下使用。在特殊情况下, 如要求提高冲击韧度和板厚, 也可在正火状态下使用。例如, Q345 在个别情况下, 为了改善综合性能, 特别是厚板的冲击韧度, 可进行 900 ~ 920℃ 正火处理, 正火后强度略有降低, 但塑性、韧性 (特别是低温冲击韧度) 有所提高。

(二) 正火钢

正火钢屈服点一般在 345 ~ 490 MPa 之间, 它在 C-Mn 系或 Mn-Si 系的基础上除添加固溶强化元素外, 再添加一些碳、氮化合物形成元素, 如 V、Nb、Ti 和 Mo 等, 通过正火处理后形成细小的碳、氮化合物从固溶体中沉淀析出, 并同时起到细化晶粒的作用, 从而在提高钢材强度的同时, 改善了塑性和韧性。正火钢中的含钼钢需在正火 + 回火条件下才能保证良好的塑性和韧性。因此, 正火钢又可分为在正火状态下使用的和正火 + 回火状态下使用的两类。

1. 正火状态下使用的钢

这类钢中除 Q390 (15MnTi) 外, 主要是含 V、Nb 钢。利用 Nb 和 V 的碳、氮化物的沉淀强化和细化晶粒的作用来达到良好的综合性能。另外, 利用 Nb 和 V 的强化作用, 可以适当地降低钢的含碳量, 有利于改善材料的焊接性和韧性。属于这种类型的钢有 Q420、WH530 和 WH590 等。Q420 的化学成分与 Q390 相比, ω_{Mn} 和 ω_{Cr} 的上限值略有提高。为了保证碳化物充分析出, 需要进行正火处理。由于碳化物质点的沉淀强化与细化晶粒作用, 在提高强度的同时还能改善韧性。此外, 碳化物的析出降低了固溶在基体中的碳, 使淬透性下降的同时, 焊接性亦有所改善。

WH530 是武汉钢铁公司为了适应市场需要研制的新钢种, 其强度、韧性优于目前应用较广泛的 16MnR, 焊接性良好。该钢的供货牌号为 15MnNbR (WH530)。WH530 钢板的成功研制与生产, 为水电站压力钢管、压力容器 (特别是球形储罐) 用钢提供了新的品种。

WH590 的供货牌号为 17MnNiVNbR, 它是属于 $R_m \geq 590$ MPa 且具有高韧性和优良焊接性的正火型高强度钢。WH590 的研制成功, 将对改变我国液化气体槽车壁厚大、自重系数高、容量比小的现象有明显的

效果,从而有力地促进国产槽车的大型化。

2. 正火 + 回火状态使用的含 Mo 钢

这类钢中一般加入少量 Mo ($\omega_{\text{Mo}} \leq 0.5\%$), Mo 可以提高强度,细化组织,并提高钢的中温耐热性能。但含 Mo 钢在正火后往往得到上贝氏体 + 少量铁素体,韧性和塑性指数不高,必须在正火后进行回火才能获得良好的塑性和韧性。大多数含 Mo 的低合金钢是在 Mn-Mo 系的基础上添加 Ni 或 Nb, Ni 可提高厚板的低温韧性,如 13MnNiMoNb 钢。

13MnNiMoNb 钢是我国在 20 世纪 80 年代末引进国外配方研制而成的。由于含碳量低 ($\omega_{\text{C}} \leq 0.16\%$),合金化配方合理,因此这种钢具有较高的强度和韧性,并具有良好的焊接性,特别是对再热裂纹的敏感性很低。13MnNiMoNb 钢在制造高压锅炉锅筒及其他高压容器中得到广泛应用。

Mn-Mo 系中加入少量的 Nb,可以进一步提高钢的强度。18MnMoNb (Q490) 钢的 $R_{\text{eL}} \geq 490 \text{ MPa}$,主要用于制造高压锅炉锅筒,但由于含碳量较高 (ω_{C} 为 $0.17\% \sim 0.23\%$),焊接性不如 13MnNiMoNb,而且在正火 + 回火状态的力学性能不够稳定。20 世纪 80 年代末,13MnNiMoNb 取代了部分 18MnMoNb。

表 2-10 中的 D36 钢是属于保证厚度方向性能的低合金钢,又称 Z 向(即厚度方向)钢。由于严格控制了含硫量 ($\omega_{\text{S}} \leq 0.006\%$),Z (Z 向断面收缩率)可达 35%,因而具有良好的抗层状撕裂能力。

微合金化控轧钢是 20 世纪 70 年代发展起来的新钢种。利用加入微量 Nb、V、Ti 等元素和控制轧制等新技术来达到细化晶粒和沉淀强化相结合的效果,同时在冶炼工艺上采取降 C、降 S、改变夹杂物形态、提高钢的纯净度等措施,使钢材具有均匀的细晶粒等轴铁素体基体。因此,这种钢在轧制状态下就具有相当于或优于正火钢的质量,具有高强度、高韧性和良好的焊接性等优点。其主要用于制造石油、天然气的输送管线,如 X60 管线钢等。

二、热轧及正火钢的焊接性分析

热轧及正火钢随着强度级别的提高和合金元素含量的增加,焊接难度增大。这类钢焊接的主要问题是热影响区的脆化和各种裂纹的产生。

(一) 热影响区的脆化

热影响区的脆化与所焊钢材的类型及合金系等有很大关系。热轧及正火钢焊接时,热影响区的脆化主要表现为过热区脆化和可能发生的应变脆化(发生在部分合金含量较低的钢中)。

1. 过热区脆化

过热区又叫粗晶区,是指热影响区中熔合线附近母材被加热到 1100°C 以上的区域。由于该区温度高,奥氏体晶粒长大显著,一些难熔质点(如碳化物和氮化物)的溶入导致性能变化,如难熔质点溶入后,在冷却过程中来不及析出而使材料变脆;过热的粗大奥氏体晶粒增加了它的稳定性,随着钢材成分的不同、焊接热输入不同,冷却过程中可能产生有害组织,如魏氏组织、粗大的马氏体、塑性很低的混合组织(即铁素体、高碳马氏体和贝氏体的混合组织)和 M-A 组织等。因此,过热区的性能变化不仅取决于焊接热输入,而且与钢材本身的类型和合金系统有着密切关系。

热轧钢是 C-Mn 系、Mn-Si 系的固溶强化钢,热轧状态下,合金元素可全部固溶,保证了良好的综合性能。这类钢在低合金钢中合金元素含量最低,淬透性也最差,焊接时在过热区发生马氏体转变的可能性较小,仅在焊接接头截面尺寸很大、焊接现场温度偏低,并且焊接热输入较小时,才会出现马氏体。这种马氏体含碳量低,且转变温度较高,冷却过程中发生自回火,其韧性比高碳马氏体高得多。因此热轧钢焊接时淬硬脆化倾向很小。

导致热轧钢过热区脆化的原因是焊接热输入偏高,使该区的奥氏体晶粒严重长大,转变产物(先析出

铁素体和共析铁素体)除沿晶界析出外,还向晶内延伸,形成魏氏体组织及其他塑性低的混合组织,从而使过热区脆化。因此,对于像 Q345 这样固溶强化的热轧钢,焊接时,采用适当低的热输入措施来抑制奥氏体晶粒长大以及魏氏组织的出现,是防止过热区脆化的关键。

正火钢过热区脆化的原因主要是在 1100℃ 的高温下,起沉淀强化作用的碳化物、氮化物质点分解并溶于奥氏体中,而在随后的冷却过程中来不及再析出而固溶在基体中,结果使铁素体的硬度上升,韧性下降。所以正火钢过热区的韧性随热输入的增加而下降,并与沉淀强化元素的含量有关。以相当于 Q390 的 15MnTi 为例,钢中的含钛量增加,过热区冲击韧度急剧下降(图 2-1)。当 ω_{Ti} 一定时,热输入 E 减小到一定程度后,过热区的冲击韧度随 E 的下降而明显提高(图 2-2)。这是由于 E 减小可以减少过热区在高温停留的时间,抑制了碳化钛和氮化钛的溶解,从而有效地防止了脆化。

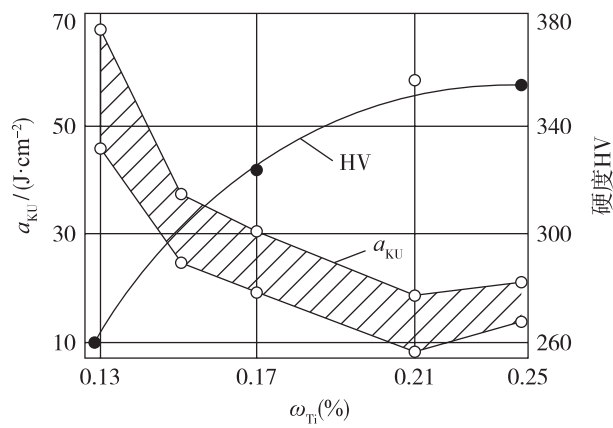


图 2-1 15MnTi 钢过热区的冲击韧度 (-40℃)、铁素体显微硬度与 ω_{Ti} 的关系

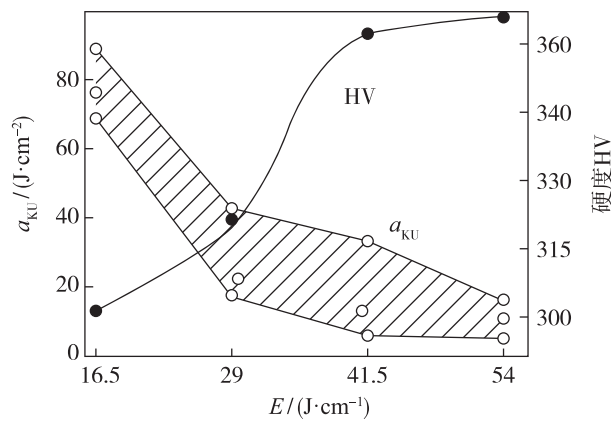


图 2-2 焊接热输入对 15MnTi 钢过热区 (-40℃) 冲击韧度和铁素体显微硬度的影响

2. 热应变脆化

热应变脆化是指钢在 200℃ ~ Ac1 温度范围内,受到较大的塑性变形 (5% ~ 10%) 后,出现断裂韧性明显下降,脆性转变温度明显升高的现象。对于 C-Mn 系热轧钢及氮含量较高的钢,一般认为热应变脆化是由于氮、碳原子聚集在位错周围,对位错造成钉扎作用造成的。一般认为在 200 ~ 400℃ 时热应变脆化最为明显,大多发生在固溶含氮的低碳钢和强度较低的低合金钢中,焊前母材存在缺口时,热影响区的热应变脆化更为严重。若钢中加入足够的氮化物形成元素,可以显著降低热应变脆化倾向。

消除热应变脆化的有效措施是进行焊后热处理,工艺采用 600℃ 左右消除应力退火,材料的韧性可恢复到原有水平。试验数据表明, Q345 (16Mn) 钢焊后,韧脆转变温度比焊前提高 53℃, Q420 (15MnVN) 钢焊后,韧脆转变温度升高 30℃,说明二者都有一定的热应变脆化倾向。Q420 中虽然加入了氮,但因钒 (V) 有固氮作用,故脆化倾向比 Q345 低些。Q345 钢经 600℃ × 1 h 退火处理后,韧性基本恢复正常。

(二) 焊接裂纹

1. 热裂纹

热轧及正火钢的含碳量较低,而含锰量较高, Mn/S 比值较大,因而具有较好的抗热裂性能,正常情况下焊缝不会出现热裂纹。但若母材成分反常,如碳与硫同时居上限或存在严重偏析,则有产生热裂纹的可能。图 2-3 为硫和锰对热裂纹的影响曲线,为防止热裂纹,应在提高焊缝含锰量的同时降低碳、硫的含量。具体措施可选用脱硫能力较强的低氢型焊条,埋弧焊时选用超低碳焊丝配合高锰高硅焊剂,并从工艺上减少熔合比、增大焊缝的成形系数等。

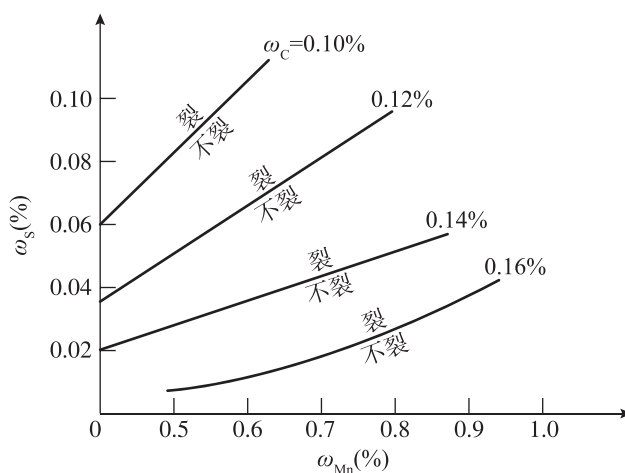


图 2-3 焊缝中 C、Mn、S 含量对角焊缝热裂纹的影响

2. 冷裂纹

导致焊接冷裂纹的三个主要因素是钢材的淬硬倾向、焊缝的扩散氢含量和接头的拘束应力，其中淬硬倾向是决定性的。因此，钢材的淬硬倾向可以作为判断冷裂纹敏感性的标准之一。而淬硬倾向又可以通过碳当量、焊接热影响区最高硬度或焊接热影响区连续冷却转变曲线（SH-CCT）来判断。

热轧及正火钢中由于加入了一定的合金元素，因此淬硬倾向比低碳钢要大些。以 Q345 与 Q235 的对比为例，Q345（以 16Mn 为代表）发生珠光体转变所需的冷却速度比 Q235 要低，更容易发生马氏体转变。在快冷时，Q345 钢在铁素体析出后，余下的奥氏体就有可能转变成高碳马氏体或贝氏体。而当冷却速度降低时，二者组织转变情况差别不大，说明冷却速度较高时，热轧钢的冷裂纹敏感性高于低碳钢。

利用焊道下最高硬度值判断钢材的淬硬倾向是一种简单易行的方法。为了不产生冷裂纹，避免出现不利的淬硬组织，可以把热影响区的最高硬度控制在某一刚好不出现冷裂纹的临界值，即最高硬度允许值。有此控制指标后，就可以对被焊钢材热影响区的最高硬度值进行实测，然后与最高硬度允许值进行比较，即可评定该材料的冷裂倾向，确定焊前预热温度。这个值与钢材的强度级别、化学成分都有关系。

表 2-12 列出的是 16Mn 和 15MnVN 两种材料热影响区最高硬度试验结果，从表中可以看出两者都具有一定的淬硬倾向，其中 15MnVN 比 16Mn 大。

表 2-12 板厚为 36 mm 的 Q345 (16Mn) 和 Q420 (15MnVN) 热影响区最高硬度

序号	预热温度 /℃	最高硬度 /HV	
		Q345 (16Mn)	Q420 (15MnVN)
1	室温	384	468
2	50	373	—
3	100	329	399
4	150	—	394

3. 去应力裂纹

含钼 (Mo) 正火钢的厚壁压力容器结构，在进行焊后消除应力热处理或焊后再次高温加热（包括长期高温使用）的过程中，可能出现另一种形式的裂纹，即消除应力裂纹，也称再热裂纹（简称 SR 裂纹）。此外，沉淀强化的钢或合金（如珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢等）的接头中，也可能产生消除应力裂纹。

4. 层状撕裂

层状撕裂的产生不受钢材的种类和强度级别的限制，它主要与钢的冶炼质量、板厚、接头形式和 Z 向应力有关。一般认为，钢中的含硫量与 Z 向断面收缩率（Z）是衡量抗层状撕裂能力的主要判据。经验表明，当 $Z > 20\%$ 时，即使 Z 向拘束应力较大，也不会产生层状撕裂。因此，焊接有可能产生层状撕裂的重要结构，可采用 Z 向钢（如 D36）或国外的 ZC、ZD 级（ $\omega_s \leq 0.006\%$ 、 $Z > 25\%$ ）钢。D36 钢的 Z 最高可达 55%。但这些钢在冶炼时需要采用特殊的脱硫、脱气（H、N）和控制夹杂物的措施，成本较高。因此，当须采用一般的热轧正火钢制造较厚的焊接结构时，焊前对钢材应作 Z 向（即厚度方向）拉伸实验，尽量选择 Z 值高的钢种；在设计方面应设计出能避免或减轻 Z 向应力和应变的接头或坡口形式；在工艺方面，在满足产品使用要求的前提下可选用强度级别较低的焊接材料或堆焊低强度焊缝作过渡层，并采取预热和降氢等工艺措施。

三、热轧及正火钢的焊接工艺

（一）焊接方法的选择

热轧及正火钢能适应许多焊接方法，选择时主要考虑产品结构、板厚、性能要求和生产条件等因素，生产中常用的焊接方法有焊条电弧焊、埋弧焊和熔化极气体保护焊。钨极氩弧焊通常用于薄板或要求全焊透的薄壁管和厚壁管道等工件的封底焊。大型厚板结构可用电渣焊，其缺点是电渣焊缝及热影响区严重过热；焊后通常需正火处理，导致生产周期长、成本高。20 世纪 70 年代末发展的窄间隙焊具有生产率高、焊接质量好、节约能源及焊接材料等优点。而且由于热影响区窄，窄间隙焊更适用于焊接焊接性较差的钢。窄间隙焊包括气保焊和埋弧焊两种方法，由于窄间隙气保焊存在难以完全消除坡口侧壁未焊透及夹渣等缺点，因此后来又发明了窄间隙埋弧焊。其一般采用 $\Phi 3 \text{ mm}$ 焊丝，15 ~ 35 mm 的间隙。根据生产率要求，可以选用单丝焊丝或双丝焊丝，焊接钢板厚度可达 250 mm。板厚为 100 mm 时，双丝窄间隙埋弧焊比普通埋弧焊的效率提高 1 倍，比单丝窄间隙埋弧焊提高 60%。国内采用双丝窄间隙埋弧焊已成功地焊接了低合金厚壁压力容器。

（二）焊接材料的选择

焊接热轧及正火钢时，焊缝的主要缺陷是裂纹问题。根据对热轧及正火钢的焊接性分析，这类钢焊缝金属的热裂倾向及冷裂倾向在正常情况下是不大的。因此，选择焊接材料的主要准则是保证焊缝金属的强度、塑性和韧性等力学性能与母材相匹配，为此，须注意以下问题。

1. 选择相应强度级别的焊接材料

为了达到焊缝与母材的力学性能相等，在选择焊接材料时应该从母材的力学性能出发，而不是从化学成分出发选择与母材成分完全一样的焊接材料。因为力学性能并不完全取决于化学成分，它还与材料所处的组织状态有很大关系。在焊接条件下，焊缝金属的冷却速度很快，完全脱离了平衡状态，使焊缝金属具有一个特殊的过饱和的铸态组织。如果选用与母材相同成分的焊材，焊缝金属的性能将表现为强度很高，而塑性、韧性都很低，这对焊接接头的抗裂性能和使用性能都是非常不利的。因此，往往要求焊缝的合金元素低于母材的含量，其中 ω_c 不超过 0.14%，其他合金元素往往也低于母材中的含量。例如，适用于焊接 Q420（15MnVN）的焊条 E5515 的化学成分为： $\omega_c \leq 0.12\%$ ， $\omega_{Mn} \approx 1.2\%$ ， $\omega_{Si} \approx 0.5\%$ 。所以从成分上看，含 C 量、含 Mn 量都比 15MnVN 低，而且根本不含沉淀强化的元素 V。但焊缝金属的 R_m 能达到 549 ~ 608 MPa，同时还具有很高的塑性和韧性（ $A = 22\% \sim 32\%$ ， $a_{kv} = 196 \sim 294 \text{ J/cm}^2$ ）。

2. 必须同时考虑熔合比和冷却速度的影响

焊缝的化学成分和性能与母材的熔入量（熔合比）有很大关系，而母材溶入焊缝组织的过饱和度与冷却速度有很大关系。采用同样的焊接材料，由于熔合比或冷却速度不同，所得焊缝的性能会有很大差别。因此，焊条或焊丝成分的选择应考虑到板厚和坡口形式的影响。例如 Q345（16Mn）钢对接不开坡口用埋弧焊，其熔合比大，从母材熔入焊缝金属的元素增多，这时采用合金成分低的 H08A 焊丝配合 HJ431 焊剂，即可满足焊缝金属的力学性能要求。但对于厚板对接开坡口，仍用 H08A 配 HJ431 焊剂，则会因熔合比小，使焊缝的合金元素减少或强度偏低。因此，需要采用含 Mn 高的 H08MnA 或 H10Mn2 焊丝与 HJ431 焊剂配合。

不开坡口的角接焊时，虽然母材的熔入量也不多，但由于冷却速度比对接焊时大，若采用同样的焊接材料焊接，角焊缝的强度比对接焊缝的高，而塑性低于对接焊缝。因此焊接 Q345（16Mn）钢角焊时，应选用合金成分较低的焊接材料（如 H08A 焊丝配合 HJ431 焊剂），以获得综合力学性能较好的焊缝。

3. 考虑焊后热处理对焊缝力学性能的影响

当焊缝强度余量不大时，焊后热处理（如消除应力退火）后焊缝强度有可能低于要求，这时宜选用合金成分稍高的焊接材料。例如焊接大坡口 Q390（15MnV）中厚板，若焊后进行消除应力热处理，须选用 H08Mn2Si 焊丝，若选用 H10Mn2 会导致焊缝强度偏低。对于焊后需冷卷或冷冲压的焊件，应使焊缝具有较高的塑性。

4. 考虑结构因素的影响

对于厚板、拘束度大或冷裂倾向大的焊接结构，以及重要的产品，应选用低氢或高韧性的焊接材料。例如，厚板结构多层焊时，第一层打底焊缝最易产生裂纹，这时应选用强度稍低，但塑性、韧性较好的低氢或超低氢焊接材料。又如核容器、海上钻井平台、船舶等重要焊接结构，为了确保安全使用，必须选用能使焊缝具有较高的低温冲击韧度和断裂韧度的焊接材料。

热轧及正火钢常用焊接材料如表 2-13 所示。

表 2-13 热轧及正火钢常用焊接材料

牌号	强度等级 R_{el}/MPa	焊条电弧焊 焊条	埋弧焊		电渣焊		CO ₂ 气体保护焊 焊丝
			焊剂	焊丝	焊剂	焊丝	
Q295 09Mn2Si	295	E4301 E4303 E4315 E4316	HJ430 HJ431 SJ301	H08A H08MnA	—	—	H10MnSi H08Mn2Si H08Mn2SiA
Q345 Q345 (Cu)	345	E5001 E5003 E5015 E5015-G E5016 E5016-G E5018 E5028	SJ501	薄板 H08A H08MnA	HJ431 HJ360	H08MnMoA	H08Mn2Si H08Mn2SiA YJ502-1 YJ502-3 YJ506-4
			HJ430 HJ431 SJ301	不开坡口对接 H08A 中板开坡口对接 H08MnA H10Mn2			
			HJ350	厚板深坡口 H10Mn2 H08MnMoA			

续表

牌号	强度等级 R_{el}/MPa	焊条电弧焊 焊条	埋弧焊		电渣焊		CO ₂ 气体保护焊 焊丝
			焊剂	焊丝	焊剂	焊丝	
Q390 Q390 (Cu)	390	E5001 E5003 E5015 E5015-G E5016 E5016-G E5018 E5028 E5515-G E5516-G	HJ430 HJ431	不开坡口对接 H08MnA 中板开坡口对接 H10Mn2 H10MnSi	HJ431 HJ360	H10MnMo H08Mn2MoVA	H08Mn2Si H08Mn2SiA
			HJ250 HJ350 HJ101	厚板深坡口 H08MnMoA	—	—	—
Q420 15MnVTiRE 15MnVNCu	440	E5515-G E5516-G E6015-D1 E6015-G E6015-D	HJ431	H10Mn2	HJ431 HJ360	H10MnMo H08Mn2MoVA	H08Mn2Si H08Mn2SiA
			HJ350 HJ250 HJ101	H08MnMoA H08Mn2MoA			
18MnMoNb 14MnMoV 14MnMoNCu	490	E6015-D1 E6015-G E6016-D1 E7015-D2 E7015-G	HJ250 HJ350 HJ101	H08Mn2MoA H08Mn2MoVA H08Mn2NiMo	HJ431 HJ360 Hj250	H10Mn2MoA H10Mn2MoVA H10Mn2NiMoA	H08Mn2SiMoA
X60 X65	414 450	E4311 E5011 E5015	HJ431 HJ101	H08Mn2MoA H08MnMoA	—	—	—

(三) 焊接工艺参数的选择

1. 焊接热输入

热轧及正火钢焊接热输入的依据主要是防止过热区脆化和焊接裂纹两个方面。根据焊接性分析，各类钢的脆化倾向和冷裂倾向是不同的，因此对热输入的要求也不同。

对碳当量 $CE (IiW) < 0.4\%$ 的热轧正火钢，如 Q295 (09Mn2、09MnNb) 钢和含碳偏下限的 Q345 (16Mn) 钢等，其强度级别在 390 MPa 以下，它们的过热敏感性不大，淬硬倾向较小，对热输入基本没有严格的限制。当焊接含碳量偏高的 Q345 钢时，由于淬硬倾向加大，马氏体的含碳量也提高，较小的热输入时冷裂倾向增大，过热区的脆化也变得严重，为防止冷裂纹，焊接时宜用偏大的热输入。

对于含 Nb、V、Ti 等强度级别较低的正火钢，如 Q420 (15MnVN、15MnVTi 等) 为了避免出现由于沉淀相的溶入和晶粒长大引起的脆化，宜选择偏小的焊接热输入。焊条电弧焊推荐用 15 ~ 55kJ/cm，埋弧焊用 20 ~ 50 kJ/cm。这类钢因含碳量偏低，用较小的热输入，快速冷却可得到韧性较好的下贝氏体或低碳马氏体组织。

但对淬硬倾向大、含碳量和合金元素量较高，屈服点高于 490 MPa 的正火钢 (如 18MnMoNb 等)，随着热输入减小，过热区韧性降低，容易产生延迟裂纹。因而一般焊接这类钢时，热输入偏大一些较好。但热输入增大，使冷却速度减慢，会引起过热，为防止过热，应采用偏小的焊接热输入，显然与防止冷裂相矛盾。在这种两者难以兼顾的情况下，采用较大的热输入的效果不如采用较小的热输入加预热工艺更合理。预热温度控制恰当时，既能避免裂纹，又能防止晶粒的过热。对 18MnMoNb 钢焊接时，焊条电弧焊采用

20 kJ/cm 以下的热输入,埋弧焊用 35 kJ/cm 以下的热输入,焊前 150 ~ 180℃ 预热,层间温度在 300℃ 以下,焊后立即进行 250 ~ 350℃ 的后热处理,就可以防止裂纹产生,并获得良好的接头力学性能。

2. 预热温度的确定

预热主要是为了防止裂纹,同时兼有一定改善接头性能的作用。但预热却会恶化劳动条件、延长生产周期、增加制造成本。过高的预热温度和层间温度反会使接头的韧性下降。因此,焊前是否需要预热和预热到多少温度,应慎重考虑。

预热温度的确定取决于钢材的化学成分、焊件结构形状、拘束度、环境温度和焊后热处理等。随着钢材碳当量、板厚、结构拘束度增大和环境温度下降,焊前预热温度也需要相应提高。焊后进行热处理的可以不预热或降低预热温度。

多层焊时掌握好层间温度,本质上也是一种预热。一般层间温度等于或略大于预热温度。表 2-14 为常用热轧及正火钢的预热温度和焊后热处理温度。

表 2-14 常用热轧及正火钢焊接的预热温度和焊后热处理温度

强度等级 R_{eL}/MPa	钢号	厚度 /mm	预热温度 /℃	焊后热处理温度 /℃	
				电弧焊	电渣焊
295	09Mn2 09Mn2Si 09MnV 12Mn	(一般供应的板厚 $\delta \leq 16\text{mm}$)	不预热	不热处理	不热处理
345	16Mn 16MnR 14MnNb EH32 EH36 D36 (36Z)	≤ 40	不预热	不热处理或在 600 ~ 650 回火	900 ~ 930 正火 600 ~ 650 回火
		> 40	≥ 100		
390	15MnV 15MnTi 14MnMoNb EH40	≤ 32	不预热	不热处理或在 530 ~ 580 回火	950 ~ 980 正火 560 ~ 590 或 630 ~ 650 回火
		> 32	≥ 100		
440	15MnVN 14MnVTiRE	≤ 32	不预热	—	—
		> 32	≥ 100		
	CF60 CF62	≤ 25	不预热	—	—
		> 25	50 ~ 100		
490	18MnMoNb 14MnMoV	—	≥ 150	600 ~ 650 回火	950 ~ 980 正火 600 ~ 650 回火

由于影响预热温度的因素很多，因此表 2-14 中推荐的预热温度只能作为参考，工程上应用还必须结合具体情况经试验后才能确定。

3. 后热及焊后热处理

(1) 后热。

后热是指焊接结束或焊完一条焊缝后，将焊件或焊接区立即加热到 150 ~ 250℃，并保温一段时间的热处理工艺；而消氢处理则是在 300 ~ 400℃ 加热温度范围内保温一段时间的处理工艺。两种处理的都是加速焊接接头中氢的扩散逸出，消氢处理效果比低温后热更好。焊后及时后热及消氢处理是防止焊接冷裂纹的有效措施，特别是对于氢致裂纹敏感性较强的 18MnMoNb、14MnMoV 等钢厚板焊接接头，采用这一工艺不仅可以降低预热温度、减轻劳动强度，而且可以采用较低的焊接热输入使焊接接头获得良好的综合力学性能。对于厚度超过 100 mm 的厚壁压力容器及其他重要的产品构件，焊接过程中至少应进行 2 ~ 3 次中间消氢处理，以防止因厚板多道多层焊氢的积聚引发氢致裂纹。

(2) 焊后热处理。

除电渣焊使焊件严重过热而需进行正火处理外，在其他焊接条件下，均应根据使用要求来考虑是否需要焊后热处理。一般情况下，热轧及正火钢焊后是不需要热处理的，但对要求抗应力腐蚀的焊接结构、低温下使用的焊接结构及厚壁高压容器等，焊后都需进行消除应力的高温回火。确定回火温度的原则有以下几点。

① 不要超过母材原来的回火温度，以免影响母材本身的性能，约比母材回火温度低 30 ~ 60℃。

② 对于一些有回火脆性的材料，回火时要避开出现脆性的温度区间。例如，对一些含 V 或 V+Mo 的低合金钢，回火时应提高冷却速度，避免在 600℃ 左右的温度区间停留时间过长，以免因 V 的二次碳化物析出而造成脆化，如 Q420 消除应力处理的温度为 (550 ± 25)℃。

另外，对于 $R_{eL} \geq 490$ MPa 的高强度钢，由于产生延迟裂纹的倾向较大，要求焊后及时进行回火处理，达到在消除应力的同时起到除氢的作用。



任务五 了解低碳调质钢的焊接工艺

一、低碳调质钢的成分与性能

低碳调质钢的屈服强度一般在 450 ~ 980 MPa，这类钢为了保证良好的综合性能和焊接性，要求 ω_c 一般在 0.18% 以下。加入一些合金元素，如 Mn、Cr、Ni、Mo、V、Nb、B、Cu 等，目的是提高钢的淬透性和马氏体的回火稳定性，这类钢由于含碳量低，淬火后会得到低碳马氏体，具有良好的焊接性，因此被广泛应用于一些重要的焊接结构上。低碳调质钢主要应用于工程机械和矿山机械，如推土机、挖掘机、煤矿液压支架、重型汽车及工程起重机等，此外还用于高压管线、桥梁等钢结构、核压力容器、核动力装置、舰船及航天装备等。低碳调质钢的综合性能除了取决于其化学成分外，还取决于热处理是否正确。这类钢的热处理一般为淬火 + 回火，得到的组织是回火马氏体或回火贝氏体。也有少数钢采用正火 + 回火，或双相区淬火（或正火）。

常用低碳调质钢的化学成分如表 2-15 所示，力学性能如表 2-16 所示。

表 2-15 常用低碳调质钢的化学成分

钢号	化学成分 (质量分数) / %										Pcm /%	CE (IIV) /%	备注
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	其他		
14MnMoVN	0.14	0.30	1.41	0.012	0.035	—	—	0.17	—	0.13	N0.0155	0.265	—
14MnMoNbB	0.12 ~ 0.18	0.15 ~ 0.35	1.30 ~ 1.80	≤ 0.03	≤ 0.030	—	—	0.45 ~ 0.7	≤ 0.40	—	Nb0.02 ~ 0.07 B0.0005 ~ 0.0030	0.275	—
15MnMoVNRE	≤ 0.18	≤ 0.60	≤ 1.70	≤ 0.035	≤ 0.030	—	—	0.35 ~ 0.60	—	0.03 ~ 0.08	N0.02 ~ 0.03 RE0.10 ~ 0.20	—	—
WCF60、WCF62	≤ 0.09	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.50	≤ 0.03	≤ 0.02	≤ 0.30	≤ 0.50	≤ 0.30	—	0.02 ~ 0.06	B ≤ 0.003	0.226	国产 低裂 纹钢
HQ70A	0.09 ~ 0.16	0.15 ~ 0.40	0.60 ~ 1.20	≤ 0.03	≤ 0.03	0.30 ~ 0.60	0.30 ~ 1.00	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 0.50	—	V+Nb ≤ 0.1 B0.0005 ~ 0.0030	0.282	国产 工程 机械 用钢
HQ80C	0.10 ~ 0.16	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 1.20	≤ 0.025	≤ 0.015	0.60 ~ 1.20	—	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.50	0.03 ~ 0.08	B0.0005 ~ 0.0030	0.297	
T-1	0.10 ~ 0.20	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 1.00	≤ 0.035	≤ 0.040	0.40 ~ 0.65	0.70 ~ 1.0	0.40 ~ 0.60	0.15 ~ 0.50	0.03 ~ 0.08	—	0.295	美国
HY-130	0.12	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	≤ 0.010	≤ 0.015	0.40 ~ 0.70	4.75 ~ 5.25	0.30 ~ 0.65	—	0.05 ~ 0.10	—	0.317	0.80
WEL-TEN80	≤ 0.16	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 1.20	≤ 0.03	≤ 0.03	0.40 ~ 0.80	0.40 ~ 1.50	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.50	≤ 0.10	B ≤ 0.006	0.299	日本

表 2-16 常用低碳调质钢的力学性能

钢号	板厚 /mm	拉伸性能			冲击性能		
		抗拉强度 (R_m) /MPa	屈服强度 (R_{el}) /MPa	伸长率 (A_5) /%	试验温度 /°C	缺口形式	冲击吸收功 /J
14MnMoVN	18 ~ 40	≥ 690	≥ 590	≥ 15	-40	U	≥ 27
14MnMoNbB	< 8 10 ~ 50	≥ 755	≥ 686	≥ 12 ≥ 13	-40	U	≥ 31
15MnMoVNRE	≤ 16 17 ~ 30	—	≥ 686 ≥ 666	—	-40	U	≥ 27
WCF60	14 ~ 50	590 ~ 720	≥ 450	≥ 17	-20	V	≥ 47
WCF62	14 ~ 50	610 ~ 740	≥ 490	≥ 17	-20	V	≥ 47
HQ70A	≥ 18	≥ 685	≥ 590	≥ 17	-40	V	≥ 29
HQ80C	≤ 50	≥ 785	≥ 685	≥ 16	-40	V	≥ 29
T-1	5 ~ 64	794 ~ 931	≥ 686	≥ 18	-45	V	≥ 27
HY-130	16 ~ 100	882 ~ 1029	895	≥ 15	-18	V	≥ 68
WEL-TEN80	50	784 ~ 931	≥ 686	≥ 16	-15	V	≥ 35

二、低碳调质钢的焊接性

低碳调质钢的 ω_c 实际都在 0.18% 以下，焊接性良好。焊后在热影响区除发生脆化外，还存在软化问题。

(一) 焊接裂纹

1. 焊缝中的结晶裂纹

低碳调质钢一般含碳量都较低，含锰量又较高，且对硫、磷杂质的控制也较严，因此结晶裂纹倾向较小。只要正确选择相应的焊接材料，是会产生焊缝热裂纹的。

2. 热影响区液化裂纹

这种裂纹主要形成于高 Ni 低 Mn 的低碳调质钢中，如果钢中的 C、S 含量较高或 Mn/S 较低时，在热影响区过热区易出现液化裂纹。

液化裂纹的产生倾向主要和 Mn/S 比有关。碳含量越高，要求的 Mn/S 也越高。当碳的质量分数超过 0.2%，Mn/S > 30 时，液化裂纹敏感性较小；Mn/S 比超过 50 后，液化裂纹的敏感性更低。此外，Ni 对液化裂纹的产生起着明显的有害作用。例如 HY-80 钢，由于 Mn/S 比较低，Ni 含量又较高，所以对液化裂纹也较敏感。相反，HY-130 钢的 Ni 含量比 HY-80 更高，但由于碳含量很低 ($\omega_c \leq 0.12\%$)，S 含量也很低 ($\omega_s \leq 0.01\%$)，Mn/S 比高达 60 ~ 90，因此它对热影响区的液化裂纹并不敏感。

总之，避免热裂纹或液化裂纹的关键在于控制 C 和 S 的含量，保证高的 Mn/S 比，尤其是当 Ni 含量高时，要求更为严格。

工艺因素对焊接区液化裂纹的形成也有很大的影响。焊接热输入越大，热影响区晶粒越粗大，晶界熔化越严重，液态晶间层存在的时间也越长，液化裂纹产生的倾向就越大。因此，这类裂纹一般发生在高热输入的焊接方法（如埋弧焊）中，如焊条电弧焊时只有在对液化裂纹很敏感的钢中才有可能出现这类裂纹。为了防止液化裂纹的产生，从工艺上应采用热输入较小的焊接方法，并注意控制熔池形状、减小熔合区凹度等。

3. 冷裂纹

这类钢是在低碳钢的基础上通过加入较多的提高淬透性的合金元素来获得强度高、韧性好的低碳马氏体和部分下贝氏体的混合组织。马氏体虽属淬火组织，但由于含碳量很低，仍保持了较高的韧性，又加上它的转变温度 M_s 较高，如果在此温度下冷却得较慢，生成的马氏体得以自回火，冷裂纹就可以避免。如果马氏体转变时的冷却速度很快，得不到自回火，其冷裂倾向就会很大。因此，在焊接高拘束度的厚板时须防止冷裂纹产生。

低碳调质钢对扩散氢 $[H]$ 比较敏感，当 $[H]$ 控制不严时，冷裂纹敏感性增大。

4. 再热裂纹

再热裂纹又称消应力裂纹，由于 Cr、Mo、V、Nb、Ti、B、Cu 等再热裂纹敏感元素的存在，此类钢的再热裂纹敏感性比正火钢有所增加。V 对再热裂纹的影响最大，Mo 次之，而当二者共存时会更为敏感。一般认为 Mo-V 钢，特别是 Cr-Mo-V 钢对再热裂纹的敏感性最高，Mo-B 钢、Cr-Mo 钢也有一定的敏感性。不同成分的钢对再热裂纹敏感的温度范围不尽相同，焊接时可通过降低退火温度、进行适当预热或后热等措施防止和消除再热裂纹。

(二) 热影响区的性能变化

1. 过热区的脆化

这类钢产生过热区的脆化除了奥氏体晶粒粗化引起外，还会由于形成脆性混合组织（上贝氏体和 M-A 组合）而引起。这些脆性混合组织的形成与合金化程度及 $t_{8/5}$ 时间（指熔池温度从 800℃ 降到 500℃ 的所需时间）的控制有关。低碳调质钢热影响区最理想组织为体积分数 70% ~ 90% 的低碳马氏体 + 体积分数为 30% ~ 10% 的下贝氏体，控制 $t_{8/5}$ 是取得上述组织的关键。研究表明这类钢都有各自最佳 $t_{8/5}$ ，如 HQ70B 钢最佳 $t_{8/5}$ 在 23 s 左右，WEL-TEN80C 钢和 T-1 钢最佳 $t_{8/5}$ 在 11 s 左右。一般情况下，冷却速度过快会引起脆化，过慢则强度和韧性不能保证，但也有冷却速度过慢反而引起脆化的，如 WEL-TEN80C 钢就不能以过大的热输入进行焊接，板厚 $\leq 13\text{mm}$ 时一般不需要预热，否则将因冷却速度过慢（ $t_{8/5}$ 过长）而在粗晶区产生上贝氏体、M-A 组织引起脆化。低碳调质钢的这些特性，在制定焊接工艺时必须引起足够重视。对任意一种低碳调质钢而言，要得到较为理想的过热区组织，就必须有适当的冷却速度，即需要合理的热输入与预热温度的配合。控制焊接热输入和采用多层多道焊接工艺，能避免低碳调质钢热影响区出现高硬度的马氏体或 M-A 混合组织，起到改善抗脆能力的作用，对提高热影响区韧性有利。

2. 焊接热影响区的软化

热影响区的软化是低碳调质钢焊接的一个普遍问题，强度越高，接头软化问题越严重。软化发生的温度区间为热影响区内加热温度高于母材回火温度至 A_{c1} 。由于碳化物的积聚长大而使钢材软化，而且温度越接近 A_{c1} 的区域，软化越严重，因此，焊后不再进行调质处理的低碳调质钢，制定焊接工艺时应该注意在保证不发生脆化的前提下，尽可能降低预热温度，并以较小的热输入施焊。

三、低碳调质钢的焊接工艺

在制定低碳调质钢焊接工艺时，必须注意解决好冷裂纹、热影响区的脆化和热影响区的软化三个问题。为防止冷裂纹的产生，要求马氏体转变时的冷却速度不能太快，让马氏体获得自回火作用。为防止热影响区发生脆化，要求熔池在 500 ~ 800℃ 之间的冷却速度大于产生脆性混合组织的临界速度。热影响区软化的问题可以通过采用较小的焊接热输入等工艺措施解决。

（一）焊前准备

只有合理的接头设计、良好的坡口加工及装配和适当的焊接检验，才能保证低碳调质钢的性能良好。

1. 接头与坡口形式设计

对于屈服点 (R_{eL}) ≥ 600 MPa 的低碳调质钢，焊缝布置与接头的应力集中程度都对接头质量有明显的影响。不正确的焊缝位置会导致截面突变、未焊透、未熔合、咬边或焊瘤并造成缺口，引起应力集中。设计接头时，应避免将焊缝布置在断面突然变化的部位，且应考虑焊接操作和焊后检验是否方便。一般来讲，对接焊缝比角焊缝更为合理，因为后者应力集中系数大，并有明显的缺口效应。同时，对接焊缝更便于进行射线或超声波探伤。坡口形式以 U 形或 V 形为佳，单边 V 形坡口或单边 J 形坡口也可采用，但必须在工艺规程中注明，两个坡口面必须完全焊透。为了降低焊接应力，可采用双 V 形坡口或双 U 形坡口。对接接头焊后，应将余高打磨平以保证接头有足够的疲劳强度。角接接头容易产生应力集中、降低疲劳强度的问题。角焊缝焊趾处的机械打磨、TIG 重熔或锤击强化都可以提高角接接头的疲劳强度，但必须选择合适的打磨、重熔或锤击工艺。

2. 坡口制备

低碳调质钢的坡口可以用气割切割，但切割边缘有硬化层，应通过加热或机械加工消除。板厚 < 100 mm 时，切割前不需预热。板厚 ≥ 100 mm 时，应进行 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 预热。强度等级较高的钢，最好用机械切割或等离子弧切割。

（二）焊接方法的选择

调质状态下的钢材，只要加热温度超过它的回火温度，性能就会发生变化。因此，焊接时热的作用使热影响区强度和韧性下降的情况几乎是不可避免的。强度级别越高，这个问题就越突出。解决的办法：一是采用焊后重新调质处理；二是尽量控制焊接热量对母材的作用。所以，对于焊后不再调质处理的低碳调质钢，应选择能量密度大的焊接方法，如钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、电子束焊等。对于母材屈服强度 $R_{eL} \geq 980$ MPa 的低碳钢，如 10Ni-Cr-Mo-Co 等，采用钨极氩弧焊、电子束焊等可以获得好的焊接质量；对于 $R_{eL} \leq 980$ MPa 的低碳调质钢，焊接方法可以采用焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊等；但对 $R_{eL} \geq 686$ MPa 的低碳调质钢来说，熔化极气体保护焊（如 Ar+CO₂ 混合气体保护焊）是最合适的工艺方法。此外，如果采用多丝埋弧焊和电渣焊等热输入大、冷却速度慢的焊接方法，焊后必须重新进行调质处理。

（三）焊接材料的选择

由于低碳调质钢焊后一般不再进行热处理，故在选择焊接材料时，要求焊缝金属在焊态下具有接近母材的力学性能。在特殊情况下，如结构的刚度或拘束度很大，冷裂纹难以避免时，必须选择比母材强度稍低一些的材料作为填充金属。

由于低碳调质钢有产生冷裂纹的倾向，严格控制焊接材料中的 [H] 就显得十分重要。因此，在焊条电弧焊时应选用低氢或超低氢焊条，焊接要按规定要求进行烘干。焊丝表面要干净、无油污生锈等，保护气体或焊剂也应去水分。表 2-17 为常用低碳调质钢的焊接材料选用示例。

（四）焊接工艺参数的选择

控制焊接时的冷却速度是防止焊接低碳调质钢产生冷裂纹和发生热影响区脆化的关键。快速冷却对防止脆化有利，但对防止冷裂纹不利。反之，减缓冷却速度可防止冷裂纹，却易引起热影响区脆化。因此，必须找到两者兼顾的最佳冷却速度，而冷却速度主要是由焊接热输入决定的，会同时受焊件散热条件和预热等因素影响。

表 2-17 常用低碳调质钢的焊接材料选择示例

钢号	焊条电弧焊		气体保护焊		埋弧焊		电渣焊	
	型号	牌号	气体	焊丝	焊丝	焊剂	焊丝	焊剂
WCF-60 WCF-62	E6015-D1 E6015-G E6016-D1 E6016-G	J607 J607Ni J607RN J606	CO ₂ 或 Ar+CO ₂ 20%	ER55-D2 ER55-D2Ti GHS-60 PK-YJ607	H08MnMoA H10Mn2 H10Mn2Si H08MnMoTi	HJ431 SJ201 SJ101 HJ350 SJ104	H10Mn2MoVA	HJ360 HJ431
	E7015-D2 E7015-G	J707 J707Ni J707RH J707NiW		ER69-1 ER69-3 GHS-60N GHS-70 YJ707-1	HS-70A H08Mn2NiMoVA H08Mn2NiMo	HJ350 HJ250 SJ101	H10Mn2NiMoA H10Mn2NiMoVA	HJ360 HJ431
14MnMoNbB 15MnMoVNRE WEL-TEN70 WEL-TEN80	E7015-D2 E7015-G E7515-G E8015-G	J707 J707Ni J707RH J707NiW J757 J757Ni J807 J807RH	Ar+CO ₂ 20% 或 Ar+O ₂ 1% ~ 2%	ER76-1 ER83-1 H08MnNi2Mo GHS-80B、 80C	H08Mn2MoA H08Mn2Ni2CrMoA	HJ350	H08Mn2MoA H08Mn2Ni2 H08Mn2Ni2CrMo	HJ360 HJ431
	E8015-G	J807RH J857 J857Cr J857CrNi		—	—	—	—	—
T-1	E7015-D2 E7015-G E7515-G	J707 J707Ni J707RH J757 J757Ni	—	ER76-1 ER83-1 GHS-80B、 80C	—	—	—	—
	—	GHH-80		GHQ-80	—	—	—	—
HQ80	—	J956	Ar+CO ₂ 20%	GHQ-100	—	—	—	—
HQ100	—	—	Ar+CO ₂ 20%	Mn-Ni-Cr-Mo 专用焊丝	—	—	—	—
HY-130	E14018	—	Ar+CO ₂ 2%	—	—	—	—	—

1. 焊接热输入的确定

焊接热输入影响焊接冷却速度，如前所述，每种低碳调质钢有一最佳 $t_{8/5}$ （或 $t_{8/3}$ ），在这个冷却速度下，热影响区有良好的抗裂性能和韧性。 $t_{8/5}$ 可以通过试验或借助钢材的焊接 CCT 图来确定，然后确定出焊接热输入。为了防止冷裂纹的产生，通常是在满足热影响区韧性要求的前提下，确定出最大允许的焊接热输入。如果受种种条件限制不能保证接头的冷却速度达到最佳值，也一定要避免采用过大的热输入，可以采取预热来使冷却速度降低，冷却速度以小于不出现裂纹的极限值为宜。

2. 预热温度的确定

焊接低碳调质钢时，为降低马氏体转变时的冷却速度以防止冷裂纹的产生，常常需要采用预热。预热使 $t_{8/5}$ 延长，有助于使马氏体完成自回火，但 $t_{8/5}$ 过长会使冷却速度低于临界冷却速度（出现上贝氏体和 M-A 组织的冷却速度）从而导致热影响区脆化。故在允许的热输入范围内如果可以避免冷裂纹，最好不预热，否则也只采取较低（ $\leq 200^{\circ}\text{C}$ ）的预热温度。也可以通过试验，确定防止冷裂纹的最佳预热温度范围。几种低碳调质钢的最低预热温度和层间温度如表 2-18 所示。

表 2-18 几种低碳调质钢的最低预热温度和层间温度

单位： $^{\circ}\text{C}$

板厚 /mm	15MnMoVN	14MnMoNbB	T-1 ^①	HY-130 ^{①②}	A517
< 13	—	—	10	24	10
13 ~ 16	100 ~ 150	100 ~ 150	10	24	10
16 ~ 19	150 ~ 200	150 ~ 200	10	52	10
19 ~ 22	150 ~ 200	150 ~ 200	10	52	10
22 ~ 25	200 ~ 250	200 ~ 250	10	93	10
25 ~ 35	200 ~ 250	200 ~ 250	66	93	66
35 ~ 38	—	—	66	107	66
38 ~ 51	—	—	66	107	66
> 51	—	—	93	107	93

①最高预热温度不得大于表中温度 65°C 。
② HY-130 的最高预热温度建议：16 mm 65°C ，16 ~ 22 mm 93°C ，22 ~ 35 mm 135°C ，> 35 mm 149°C 。

3. 焊后热处理的确定

低碳调质钢通常在调质状态下进行焊接，在正常焊接条件下焊缝及热影响区可以获得高强度和韧性，焊后一般不进行热处理。反之，如果在 $510 \sim 690^{\circ}\text{C}$ 范围进行退火处理，反而会使缺口韧性恶化。消除应力处理时的冷却速度越低，韧性降低程度越严重。只有在下列情况下才进行焊后热处理。

- （1）焊后（如电渣焊等）焊缝或热影响区严重脆化或软化导致失强过大，这时需要进行重新调质热处理。
- （2）焊后需进行高精度加工，要求保证结构尺寸稳定。
- （3）要求耐应力腐蚀的焊件，工作介质有导致应力腐蚀开裂的可能，需进行消除应力热处理。

为保证材料的强度和韧性，消除应力热处理的温度应比母材原来调质处理的回火温度低 30°C 左右。

工程案例



低碳调质钢焊接

任务六 了解中碳调质钢的焊接工艺

一、中碳调质钢的成分和性能

中碳调质钢的成分对焊接性影响很大，硫元素（S）可以增加热裂敏感性；磷元素（P）可以降低塑性和韧性，增加冷裂敏感性。几种中碳调质钢的化学成分和力学性能如表 2-19 和表 2-20 所示。

表 2-19 几种中碳调质钢的化学成分

单位：%

钢号	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	S	P
30CrMnSiA	0.28 ~ 0.35	0.80 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	0.80 ~ 1.10	≤ 0.30	—	—	≤ 0.030	≤ 0.035
30CrMnSiNi2A	0.27 ~ 0.34	1.00 ~ 1.30	0.90 ~ 1.20	0.90 ~ 1.20	1.40 ~ 1.80	—	—	≤ 0.025	≤ 0.025
40CrMnSiMoVA	0.37 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	1.20 ~ 1.60	1.20 ~ 1.50	≤ 0.25	0.45 ~ 0.60	0.07 ~ 0.12	≤ 0.025	≤ 0.025
35CrMoA	0.30 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	0.17 ~ 0.35	0.90 ~ 1.30	—	0.20 ~ 0.30	—	≤ 0.030	≤ 0.035
35CrMoVA	0.30 ~ 0.38	0.40 ~ 0.70	0.20 ~ 0.40	1.00 ~ 1.30	—	0.20 ~ 0.30	0.10 ~ 0.20	≤ 0.030	≤ 0.035
34CrNi3MoA	0.30 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	0.27 ~ 0.37	0.70 ~ 1.10	2.75 ~ 3.25	0.25 ~ 0.40	—	≤ 0.030	≤ 0.035
40CrNiMoA	0.36 ~ 0.44	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.90	1.25 ~ 1.75	0.15 ~ 0.25	—	≤ 0.030	≤ 0.030
4340（美）	0.38 ~ 0.40	0.60 ~ 0.80	0.20 ~ 0.35	0.70 ~ 0.90	1.62 ~ 2.00	0.20 ~ 0.30	—	≤ 0.025	0.025
H-11（美）	0.30 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	0.80 ~ 1.20	4.75 ~ 5.50	—	1.25 ~ 1.75	0.30 ~ 0.50	≤ 0.010	≤ 0.010
D6AC	0.42 ~ 0.48	0.60 ~ 0.90	0.15 ~ 0.35	0.90 ~ 1.20	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.10	0.05 ~ 0.10	≤ 0.015	≤ 0.015
30Cr3SiNiMoV	0.32	0.70	0.96	3.10	0.91	0.70	0.11	0.003	0.019

表 2-20 几种中碳调质钢的力学性能

钢号	热处理规范	屈服强度 (R_{el}) /MPa	抗拉强度 (R_m) /MPa	伸长率 (A_5) /%	断面收缩 率 (Z) /%	冲击吸收 功 /J	硬度 /HBW
30CrMnSiA	870 ~ 890℃油淬 510 ~ 550℃回火	≥ 833	≥ 1078	≥ 10	≥ 40	≥ 49	346 ~ 363
	870 ~ 890℃油淬 200 ~ 260℃回火	—	≥ 1568	≥ 5	—	≥ 25	≥ 444

续表

钢号	热处理规范	屈服强度 (R_{el}) /MPa	抗拉强度 (R_m) /MPa	伸长率 (A_5) /%	断面收缩 率 (Z) /%	冲击吸收 功 /J	硬度 /HBW
30CrMnSiNi2A	890 ~ 910℃油淬 200 ~ 300℃回火	≥ 1372	≥ 1568	≥ 9	≥ 45	≥ 59	≥ 444
40CrMnSiMoVA	890 ~ 970℃油淬 250 ~ 270℃回火 4 小时空冷	—	≥ 1862	≥ 8	≥ 35	≥ 49	HRC ≥ 52
35CrMoA	860 ~ 880℃油淬 560 ~ 580℃回火	≥ 490	≥ 657	≥ 15	≥ 35	≥ 49	197 ~ 241
35CrMoVA	880 ~ 900℃油淬 640 ~ 660℃回火	≥ 686	≥ 814	≥ 13	≥ 35	≥ 39	255 ~ 302
34CrNi3MoA	850 ~ 870℃油淬 580 ~ 670℃回火	≥ 833	≥ 931	≥ 12	≥ 35	≥ 39	285 ~ 341
40CrNiMoA	840 ~ 860℃油淬 550 ~ 650℃水或空冷	≥ 833	≥ 980	12	50	79	—
4340 (美)	约 870℃油淬 约 425℃回火	~ 1305	~ 1480	~ 14	~ 50	25	~ 435
H-11 (美)	980 ~ 1040℃空淬	~ 1725	—	—	—	—	—
	约 540℃回火	~ 2070					
	约 480℃回火						
D6AC	880℃油淬	≥ 1470	≥ 1570	~ 14	~ 50	25	—
	550℃回火						
30Cr3SiNiMoV	910℃油淬 280℃回火	—	≥ 1666	> 9	—	—	—

二、中碳调质钢的分类

中碳调质钢按其合金系可分成以下几类。

(一) Cr 钢

如 40Cr，钢中加入 $\omega_{Cr} < 1.5\%$ 的 Cr 可以有效提高钢的淬透性，同时增加低温或高温回火稳定性，但会产生回火脆性。40Cr 是一种被广泛应用的 Cr 调质钢，具有良好的综合力学性能，较高的淬透性，高的疲劳强度，常用于制造较重要的、交变载荷下工作的零件，如焊接加工的齿轮和轴类。

(二) Cr-Mo 钢

Cr-Mo 钢是在 Cr 钢的基础上发展起来的中碳调质钢，例如，35CrMoA 和 35CrMoVA 钢都属于 Cr-Mo 钢系。Cr 钢中加入少量 Mo ($\omega_{Mo} = 0.15\% \sim 0.25\%$) 可以消除铬钢的回火脆性，提高淬透性，并使钢具有较好的强度与韧性，同时 Mo 还能提高钢的高温强度。V 可以细化晶粒，提高强度、塑性和韧性，增加高温回火稳定性。这类钢一般用于制造动力设备中的一些承受负荷较高、截面较大的重要零部件，如汽轮机

叶轮、主轴和发电机转子等。由于这类钢的含碳量较高、淬透性较大，因此焊接性较差，一般要求焊前预热、焊后热处理等。

(三) Cr-Mn-Si 钢

30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A 和 40CrMnSiMoVA 钢等都属于 Cr-Mn-Si 钢系。其中，30CrMnSiA 是最典型的，在我国应用较为广泛， $\omega_{\text{C}} = 0.28\% \sim 0.35\%$ ，加入 Si 的作用是提提高低温回火抗力。

(四) Cr-Ni-Mo 钢

40CrNiMoA、34CrNi3MoA 及美国的 4340 钢都属于 Cr-Ni-Mo 系调质钢，钢中加入 Ni 和 Mo 显著提高了淬透性和抗回火软化的能力，对改善钢的韧性也有好处，使钢具有良好的综合性能，如强度高、韧性好、淬透性大等。这类钢主要用于高负荷、大截面的轴类以及承受冲击载荷的构件，如汽轮机、喷气涡轮机轴、喷气式飞机的起落架及火箭发动机外壳等。

三、中碳调质钢的焊接性分析

(一) 焊接裂纹

1. 焊缝中的热裂纹

中碳调质钢含碳量及合金元素都较高，因此液-固相区间较大，偏析也较严重，因而具有较大的热裂纹倾向。热裂纹常发生在多道焊的第一条焊道弧坑和凹形角焊缝中。为防止热裂纹，在选择焊接材料时，应尽量选用含碳量低且含硫、磷杂质少的填充材料。一般焊丝含碳量限制在 0.15% 以下，最高不超过 0.25%，硫、磷含量应该小于 0.03%。焊接时应注意填满弧坑和良好的焊缝成形。

2. 冷裂纹

中碳调质钢对冷裂纹的敏感性比低碳调质钢大，淬硬倾向十分明显，这是由于中碳调质钢的含碳量较高，加入的合金元素也较多，在 500℃ 以下的温度区间过冷奥氏体具有更强的稳定性。而且含碳量越高，淬硬倾向越大，冷裂倾向也越大。

中碳调质钢的马氏体开始转变温度 M_s 较低，在低温下形成的马氏体，难以产生自回火效应，并且由于马氏体中的含碳量较高，有很大的过饱和度，晶格点阵的畸变更严重，硬度和脆性就更大，对冷裂纹的敏感性也就更大。焊接这类钢时，为了防止冷裂纹，除采取预热措施外，焊后必须及时进行回火处理。

(二) 热影响区的性能变化

1. 过热区的脆化

由于中碳调质钢有相当大的淬硬性，因而在焊接热影响区的过热区内很容易产生硬脆的高碳马氏体。冷却速度越大，生成的高碳马氏体越多，脆化也就越严重。为了减少过热区脆化，宜采用较小的焊接热输入，而同时采取预热、缓冷和后热等措施。因为采用较小的热输入可减少高温停留时间，避免奥氏体晶粒的过热，增加奥氏体内部成分的不均匀性，从而降低奥氏体的稳定性；预热和缓冷是为了降低冷却速度，改善过热区的性能。对这类钢采用较大的焊接热输入也难以避免马氏体的形成，反而会增大奥氏体过热，稳定性，形成粗大的马氏体，使过热区脆化更为严重，应尽量避免。

2. 焊接热影响区的软化

中碳调质钢经常在退火状态进行焊接，焊后再调质处理。但有的时候焊后不能进行调质处理，这就必须在调质状态下进行焊接，焊后热影响区的软化现象严重。强度级别越高，软化问题越严重。该软化区是

焊接接头强度的薄弱环节。软化区的软化程度和宽度、焊接热输入、焊接方法有很大关系。热输入越小，冷却速度越快，受热时间越短，软化程度越小，软化区的宽度越窄，但同时要注意过热区的脆化和冷裂问题。从图 2-4 可以看到，30CrMnSi 钢经气焊后，其软化区的 R_m 降为 590 ~ 685 MPa；电弧焊时，软化区的 R_m 则为 880 ~ 1030 MPa，并且气焊时的软化区比电弧焊时的宽得多。可见焊接热源越集中、热输入较小的焊接方法，对减小软化越有利。

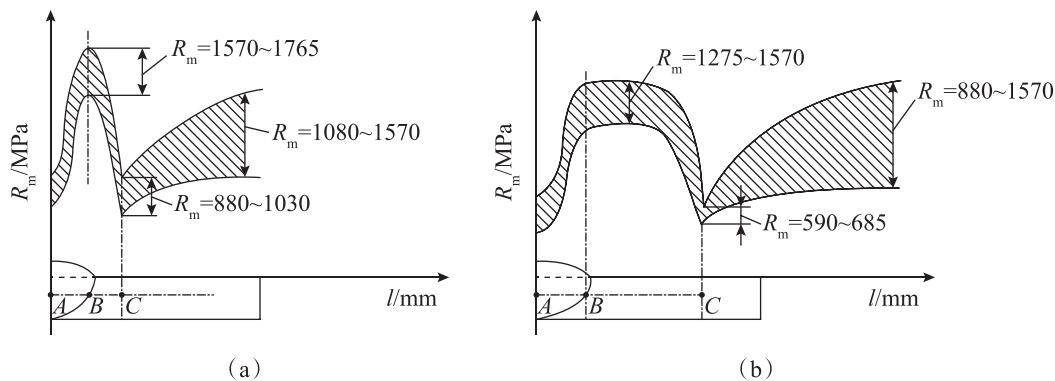


图 2-4 调质状态的 30CrMnSi 钢焊接接头区的强度分布

(a) 焊条电弧焊；(b) 气焊

四、中碳调质钢的焊接工艺

中碳调质钢的淬透性大，焊接性较差，焊后的淬火组织是硬脆的高碳马氏体，不仅冷裂纹敏感性大，而且焊后若不经热处理，热影响区性能达不到原来母材金属的性能。对中碳调质钢的焊接来说，焊前所处的状态是非常重要的，它决定了焊接时出现问题的性质和所需采取的工艺措施。这类钢一般是在退火状态下进行焊接，焊后通过整体调质处理获得性能满足要求的均匀的焊接接头。但有时必须在调质状态下焊接，这时热影响区性能的恶化一直是行业热点研究课题。

(一) 退火状态下焊接的工艺特点

1. 焊接方法的选择

正常情况下中碳调质钢都是在退火（或正火）状态下焊接，焊后再进行整体调质，这是焊接调质钢的一种比较合理的工艺方案。焊接时只需要解决焊接裂纹的问题，热影响区的性能可以通过焊后的调质处理来保证。

在退火状态下焊接中碳调质钢，对选择焊接工艺方法几乎没有限制，常用的一些焊接方法都能采用。例如，焊接 30CrMnSiA 时，可以采用各种焊接方法，但气焊时容易产生裂纹，所以目前一些薄板焊接已逐步被 CO₂ 气体保护焊、钨极氩弧焊和等离子弧焊等取代。

2. 焊接材料的选择

选择焊接材料时，除要求不产生冷、热裂纹外，还要求焊缝金属的调质处理规范与母材的一致，以保证调质后的接头性能也与母材相同。因此，焊缝金属的主要合金成分应尽量与母材相似，但对能引起焊缝热裂倾向和促使金属脆化的元素，如 C、Si、S、P 等，需要严格控制。表 2-21 为常用中碳调质钢焊接材料选用示例。

表 2-21 常用中碳调质钢焊接材料选用举例

钢号	焊条电弧焊		埋弧焊		气体保护焊	
	型号	牌号	焊丝	焊剂	气体	焊丝
30CrMnSiA	E8515-G E10015-G	J857Cr J107Cr HT-1 (H08CrMoA 焊芯) HT-3 (H08A 焊芯) HT-3 (H18CrMoA 焊芯)	H20CrMoA H18CrMoA	HJ431 HJ431 HJ260	CO ₂	H08Mn2SiMoA H08Mn2SiA
					Ar	H18CrMoA
30CrMnSiNi2A	—	HT-3 (H18CrMoA 焊芯)	H18CrMoA	HJ350-1 HJ260	Ar	H18CrMoA
35CrMoA	E10015-G	J107Cr	H20CrMoA	HJ260	Ar	H20CrMoA
35CrMoVA	E8515-G E10015-G	J857Cr J107Cr	—	—	Ar	H20CrMoA
34CrNi3MoA	E8515-G	J857Cr	—	—	Ar	H20Cr3MoNiA
40Cr	E8515-G E9015-G E10015-G	J857Cr J907Cr J107Cr	—	—	—	—

注：HT- x 为航空用焊条牌号；HJ350-1 为质量分数为 80%～82% 的 HJ350 和质量分数为 20%～18% 的粘结焊剂 1 号的混合焊剂。

3. 焊接参数的确定

焊接工艺参数确定的原则是保证在调质处理前不出现裂纹，接头性能由焊后热处理来保证。因此可以采用高的预热温度（200～350℃）和层间温度。

如果用局部预热，预热范围距焊缝两侧应不小于 100 mm。如果焊后不能立即进行调质处理，为了保证冷却到室温后，在调质处理前不致产生延迟裂纹，必须在焊后及时地进行一次中间热处理。中间热处理方式可以根据产品结构的复杂性和焊缝数量而定。结构简单焊缝少时，可做后热处理，即焊后在等于或高于预热温度下保持一段时间，其目的是从两个方面防止延迟裂纹的产生：一是利于去除扩散氢；二是使组织转变为对冷裂敏感性低的组织。或者进行 680℃ 回火处理，既能消氢和改善接头组织，还有消除应力的作用。例如在退火状态下焊接厚度大于 3 mm 的 30CrMnSiA 时，为了防止冷裂纹，应将焊件预热到 230～250℃，并在整个焊接过程中保持该温度。如果产品结构复杂，焊缝数量较多时，应在焊完一定数量的焊缝后，及时进行一次后热处理。必要时，每焊完一条焊缝都进行后热处理，目的是避免后面焊缝尚未焊完，先焊部位已经出现延迟裂纹。中间回火的次数，要根据焊缝的多少和产品结构的复杂程度来决定。对于淬硬倾向更大的 30CrMnSiNi2A 来说，为了防止冷裂纹的产生，焊后必须立即（保证焊缝处的金属不能冷却到低于 250℃）入炉加热到 650±10℃ 或 680℃ 回火，最后按规定进行调质处理。

（二）调质状态下焊接时的工艺特点

当必须在调质状态下进行焊接时，除了要防止焊接裂纹外，还要解决热影响区高碳马氏体引起的硬化和脆化，以及高温回火区软化引起的强度降低问题。高碳马氏体引起的硬化和脆化是可以通过焊后的回火处理来解决的，但对高温回火区软化引起的强度下降，在焊后不能进行调质处理的情况下是无法挽救的。因此，在调质状态下焊接时，主要应从防止冷裂纹和避免热影响区软化出发。

1. 焊接方法

为了减少热影响区的软化，应选择热量集中、能量密度大的方法，焊接热输入越小越好。气体保护焊比较好，特别是钨极氩弧焊，它的热量比较容易控制，焊接质量容易保证，因此经常用它来焊接一些焊接性很差的高强度钢。另外，脉冲钨极氩弧焊、等离子弧焊和电子束焊等一些新的焊接方法，也可以用于这类钢的焊接。焊条电弧焊具有经济性和灵活性，仍然是目前焊接这类钢应用最多的方法，气焊和电渣焊则不宜使用。

2. 焊接材料

由于焊后不再进行调质处理，因此选择焊接材料时没有必要考虑成分和热处理规范与母材相匹配的问题，主要考虑防止冷裂纹。焊条电弧焊经常采用纯奥氏体的铬镍钢焊条或镍基焊条，这两种焊条能使焊接变形集中在焊缝金属上，减小近缝区所承受的应力；焊缝为纯奥氏体，可溶解更多的氢，避免了焊缝中的氢向熔合区扩散。制定焊接工艺时，应尽可能地减小熔合比，尽量减小母材对焊缝金属的稀释。表 2-22 为几种常用中碳调质钢在调质状态下焊接的焊条选用示例。

表 2-22 几种常用中碳调质钢在调质状态下焊接用的焊条选用示例

钢号	焊条电弧焊焊条	
	牌号	焊芯
20CrMnSiA	HT-1	HGH-30
30CrMnSiA	HT-2	HGH-41
30CrMnSiNi2A	HT-3	HICr19Ni11Si4AlTi
30CrMnSiA	A507 (E1-16-25Mo6N-15)	
	A502 (E1-16-25Mo6N-16)	

注：HT-X 为航空用电焊条，HGH-30 和 HGH-41 为镍基合金焊芯。

3. 焊接工艺参数的选择

在调质状态下进行焊接，最理想的焊接热循环应是高温停留时间短和冷却速度慢。前者可避免过热区奥氏体晶粒粗化，减轻高温回火区的软化；后者使过热区获得对冷裂纹敏感性低的组织。为此，应用小的焊接热输入，预热温度低，焊后立即后热。



焊接调质状态的钢材时，必须注意预热温度、层间温度、中间热处理温度、后热温度以及焊后回火处理的温度，一定要控制在比母材淬火后的回火温度低 50℃。例如在调质状态下焊接 30CrMnSiA 和 30CrMnSiNi2A 时，采用镍基焊条 HT-2，焊后可采用约 250℃、2 h（或更长时间）的低温回火处理。在焊接如 30CrMnSiNi2A 这种淬硬倾向很大的调质钢时，除焊后低温回火外，还要采取一定的预热措施，预热温度应低于母材淬火后的回火温度，一般采用的预热温度为 240～260℃。

任务七 了解珠光体耐热钢的焊接工艺

耐热钢，通常在高温下使用，是抗氧化钢和热强钢的总称。抗氧化钢又称不起皮钢或热稳定钢，它在高温下能抵抗氧化和其他介质的侵蚀，并有一定的强度，工作温度可达 900～1100℃；热强钢在高温下具