



研究生课程教学大纲

课 程 名 称：	焊接冶金		
	Metallurgy of Welding		
课 程 编 号：	ZX14135T		
开 课 单 位：	材料科学与工程学院	开 课 学 期：	春季
课 内 学 时：	32	学 分：	2
适 用 学 科 专业及层次：	材料与化工专业硕士、材料科学与工程学术硕士、		
授 课 语 言：	中文		
先 修 课 程：	材料科学基础、材料力学、材料成型原理		
负 责 人：	韩涛	团 队 成 员：	韩涛 李美艳

一、课程简介

本课程为专业硕士材料与化工专业材料焊接新技术方向的专业选修课，主要讲述焊接热影响区组织转变与脆化、硬化、氢致裂纹与开裂的机制，强韧性以及焊缝与母材的优化匹配等，重点探讨焊接热裂纹、冷裂纹、再热裂纹、层状撕裂与应力腐蚀裂纹等的形成机理。通过本课程的学习，使学生掌握金属材料焊接接头的组织、性能的变化和焊接缺陷产生的原因，探明材料焊接物理冶金和微观变化行为，为进一步提高焊接质量、防止各种焊接缺陷（尤其是焊接裂纹）提供理论依据。

二、课程大纲

（一）课程目标

目标 1：掌握焊接冶金领域基本概念和专业知识，能综合焊接冶金相关的基本概念与基础知识，进行焊接热影响区、焊缝、焊接裂纹等的性能分析。

目标 2：掌握焊接热影响区的“四化”、焊缝的强韧机制、焊接裂纹的形成机制，

能运用相关知识，对实际焊接问题进行分析、评判，提出解决措施。

（二）课程内容

绪论

本章重点难点：

焊接物理冶金发展概况。

第一章 焊接热影响区的物理冶金

本章重点难点：

1.1 焊接热循环的特点及数学解析

焊接热循环；焊接热循环参数计算。

1.2 焊接热影响区的组织转变

焊接过程的特殊性；加热时的组织转变；冷却时的组织转变。

1.3 焊接热影响区的硬化

硬化计算公式；影响因素；

1.4 焊接热影响区的脆化

常见的脆化类型；粗晶脆化；析出脆化；热应变脆化；M-A 组元脆化；

1.5 焊接热影响区的软化

调质钢的软化；热处理强化合金软化；加工硬化引起的软化；管线钢的软化；

1.6 焊接热影响区的韧化

提高韧性途径

第二章 焊缝金属的强韧性

本章重点难点：

2.1 焊缝金属的化学不均匀性

焊缝凝固的晶界；显微偏析、区域偏析和层状偏析；影响偏析的因素；熔合区的化学不均匀性；异种钢接头；晶界预熔及机理；偏析的防止措施

2.2 焊缝金属组织形态

一次组织；结晶形态；焊接条件对结晶形态的影响；焊缝凝固组织的改善；

2.3 焊缝金属性能

二次组织及改善措施；针状铁素体的形成及影响因素；改善焊缝金属显微组织和性能的途径

2.4 焊缝成分及性能优化设计

焊缝金属力学性能的预测；焊缝强韧性的优化设计

2.5 焊缝金属与母材的强韧匹配

强度匹配类型；低强匹配及对接头性能的影响；强度匹配对氢的影响；强度匹配对残余应力影响；强度匹配对断裂韧性的影响；无预热焊接技术

第三章 焊接时氢的行为

本章重点难点：

3.1 氢在金属中的溶解及扩散

氢的表面吸附理论；氢的溶解；氢的扩散；氢在金属中的位置和扩散途径；氢在致裂过程中动态行为；

3.2 位错陷阱对氢致脆化的作用

电解充氢试验；高温充氢试验；

3.3 不均匀微区应变与氢的聚集

Fick 扩散定律；位错密度对氢扩散的影响；不均匀微区应变对氢的影响

3.4 焊接区氢瞬态分布的测试

有限元法计算；电化学法测定；电视录像法

3.5 氢脆的本质；

氢脆的特征；氢脆的各种学说

3.6 氢致开裂的力学条件

氢致裂纹源的失稳条件；吸附氢时表面能的变化；

3.7 氢脆的断裂形态及断口特征

无氢延性断口特征；氢脆断口特征；影响氢脆断口的因素

第四章 焊接时的力学行为

本章重点难点：

4.1 焊接接头的应力状态

不均匀加热及冷却过程中的热应力；结构自身拘束条件造成的应力；

4.2 拘束度及拘束应力

拘束度；拘束应力；临界拘束应力与临界拘束度；弹塑性拘束度和拘束应变；弯曲拘束度

4.3 焊接接头的拘束度计算

拘束度计算；

4.4 焊接时的相变应力及残余应力

相变应力；残余应力的危害；残余应力与氢；残余应力测定

4.5 缺口效应及应力集中。

局部应力状态；

第五章 焊接冷裂控制因子

本章重点难点：

5.1 力学控制因子；

应力场因子；力学控制因子；氢的静压应力场因子；

5.2 焊接时氢的热扩散因子

H₁₀₀；氢的热扩散因子 M 及计算；

5.3 焊接时的硬化因子

HAZ 的最大硬度 H_{\max} ; H_{\max} 的测量及计算;

5.4 断裂时的临界拘束度

临界拘束度的计算

第六章 焊接冷裂判据

本章重点难点:

6.1 冷裂判据的发展过程

冷裂判据的发展; 常见冷裂纹试验的目的及应用;

6.2 碳当量公式的发展及其应用

碳当量公式及应用;

6.3 临界冷却时间判据

冷裂敏感指数; $(t_{100})_{cr}$

6.4 临界应力判据

临界拘束应力及公式;

6.5 确定预热温度的依据

预热温度的确定。

第七章 焊接冷裂的微观本质

本章重点难点:

7.1 金属的理论强度

金属的理论强度与实际强度的差异;

7.2 裂纹源的位错理论

裂纹源的位错理论

7.3 冷裂纹的起源

Zener 模型; 位错堆积理论; 氢聚集脆化理论;

7.4 冷裂纹的扩展

塑性对裂纹扩展的影响; 裂纹的扩展速度; 氢对裂纹扩展的影响; 钢种淬硬倾向对裂纹扩展的影响

第八章 焊接热裂纹的物理冶金

本章重点难点:

8.1 焊接热裂纹的形成机理

结晶裂纹的形成机制;

8.2 焊接热裂纹的萌生形核

结晶裂纹的形核模型; 亚固相裂纹的形核模型;

8.3 焊接热裂纹的产生、介稳及扩展

结晶裂纹的产生和扩展条件; 亚固相裂纹的产生和扩展条件

8.4 焊接热裂纹形成时的能量平衡

形成裂纹所需的能量；晶界结合能；相界结合能；形成裂纹时的表面能；裂纹开口时的变形功；

8.5 焊接热裂纹的多边化与晶界迁移

多边变化裂纹的形成机理；多变化裂纹的主要特征；多变化裂纹的产生条件

第九章 焊接再热裂纹

本章重点难点：

9.1 再热裂纹的主要特征

再热裂纹的主要特征；再热温度；再热时间；

9.2 再热裂纹产生条件

再热裂纹产生的条件；

9.3 再热裂纹的微观机理

晶界杂质析集弱化理论；晶内二次强化理论；蠕变开裂理论；再热裂纹实验

9.4 再热裂纹的冶金因素及工艺因素

冶金因素；工艺因素；

9.5 再热裂纹与回火脆性的关系

第一类回火脆性；第二类回火脆性；再热裂纹与回火脆性的关系

第十章 层状撕裂

本章重点难点：

10.1 层状撕裂的特征

特征；层状撕裂条件及分类；层状撕裂形态的影响因素

10.2 层状撕裂的机理

产生机理；

10.3 层状撕裂的力学行为

受力类型；裂纹尖端的应力场和应力强度因子；临界裂纹长度

10.4 氢的诱发行为

氢对层状撕裂的影响；层状撕裂敏感性判别公式

10.5 夹杂物的致裂作用

夹杂物的分类及对层状撕裂的影响；

10.6 粗晶脆化对厚向断面收缩率的影响

晶粒粗化的影响；

第十一章 焊接区的应力腐蚀裂纹

本章重点难点：

11.1 应力腐蚀裂纹的特征

SCC 宏微观特征；

11.2 应力腐蚀裂纹的产生机理 电化学机制；机械破裂开裂机制； 11.3 应力腐蚀裂纹的扩展机制 SCC 扩展途径；扩展形态； 11.4 焊接接头的应力腐蚀 奥氏体不锈钢焊接接头 SCC；低合金高强钢焊接接头 SCC；SCC 失效分析 第十二章 焊接裂纹的断裂形式及断口形态 本章重点难点： 12.1 裂纹的断裂形式 焊接裂纹的断裂形式；修正应力强度因子 K_I ；裂纹张开位移（COD）； 12.2 焊接裂纹的开裂途径 穿晶断裂与沿晶断裂的一般特征；解理断裂和剪切断裂；解理断裂的影响因素； 准解理断裂；沿晶断裂；韧窝断裂；疲劳断裂 12.3 焊接五大裂纹的断口形态 焊接裂纹的断裂形式及断口形态 12.4 疲劳裂纹断口 疲劳裂纹断口特征。

三、教学安排及要求

内容	课内学时	教学方式	课外学时	课外环节	课程目标
绪论	2	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/案例分析/专题调研	目标 1
1.1	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/案例分析/专题调研	目标 2
1.2	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/案例分析/专题调研	目标 1
1.3	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/案例分析/专题调研	目标 2
1.4	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/案例分析/专题调研	目标 1
1.5	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/案例分析/专题调研	目标 2

1.6	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
2.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
2.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
2.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
2.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
2.5	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
3.1	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
3.2	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
3.3	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
3.4	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
3.5	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
3.6	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
3.7	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
4.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1

4.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
4.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
4.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
4.5	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
5.1	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
5.2	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
5.3	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
5.4	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
6.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
6.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
6.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
6.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
6.5	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
7.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1

7.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
7.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
7.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
8.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
8.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
8.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
8.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
8.5	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
9.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
9.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
9.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
9.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2
9.5	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 1
10.1	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专 题调研	目标 2

10.2	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
10.3	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
10.4	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
10.5	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
10.6	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
11.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
11.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
11.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
11.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
12.1	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
12.2	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2
12.3	0.5	理论讲授/案例研讨	2	文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 1
12.4	0.5	理论讲授/案例研讨		文献阅读/ 案例分析/专题调研	目标 2

四、考核内容、方式及评分标准

（一）考核环节

考核环节		总成绩占比	支撑课程目标
平时作业	1. 共布置若干道题目, 平均每周 1 道题。 2. 成绩采用百分制, 根据作业完成准确性、是否按时上交、是否独立完成评分。 3. 考核学生对基本知识的掌握能力, 综合运用所学知识分析问题、解决问题的能力, 题型主要有分析计算、调研报告、案例分析报告、文献综述等。	30%	目标 1、2
课堂表现	1. 本课程要求每个学生有 2 次课堂报告(专题报告/案例分析报告), 每次占比 50%。 2. 成绩采用百分制, 主要根据 PPT 准备、讲述表现、综合应用知识分析问题解决问题的能力、创新性等评分。	20%	目标 2
期末考试	1. 成绩采用百分制, 卷面成绩总分 100 分。 2. 主要考核学生综合运用所学知识分析问题、解决问题的能力, 题型主要有简答题、作图题、分析题、计算题等。	50%	目标 1-2

(二) 评分标准

考核环节	<60	60-75	75-90	90-100
平时作业	不按时提交作业, 问题分析和方案设计存在严重问题, 作业完成不认真。	按时提交作业, 问题分析基本正确、方案设计基本合理, 文献查阅不足。	按时提交作业, 问题分析正确, 方案设计合理, 能够查阅相关文献。要点有, 但分析不足。	按时提交作业, 问题分析正确, 方案设计合理, 能够查阅相关文献并进行分析。书写认真、逻辑清楚。
课堂表现	缺勤 3 次及以上, 不主动参与讨论, 被动参与时不能提出解决方案。	缺勤 2 次以内, 能够主动参与讨论, 但所提出的方案存在问题; 或者被动参与讨论, 所提出的方案基本合理。	缺勤 1 次以内, 能够参与讨论, 所提出的方案合理。	不缺勤, 能够主动参与讨论, 所提出的方案合理。
期末考试	问题分析和方案设计存在严重问题。	问题分析基本正确、方案设计基本合理。	问题分析正确, 方案设计合理。	问题分析正确, 方案设计合理。

	题。	本合理。	要点有，但分析不足。	分析合理
--	----	------	------------	------

五、教材与参考资料

（一）教材

- 1.张文钺.焊接物理冶金.天津大学出版社，1991
- 2.杜则裕. 焊接科学基础. 机械工业出版社，2012

（二）主要参考资料：

- 1.Sindo Kou. Welding metallurgy. John Wiley & Sons, Inc.,2003
- 2.John C.Lippold. Welding metallurgy and weldability. John Wiley & Sons, Inc., 2015

六、其它说明

无。

大纲执笔人：韩涛

审核人（学位点负责人）：

分管院长签字：