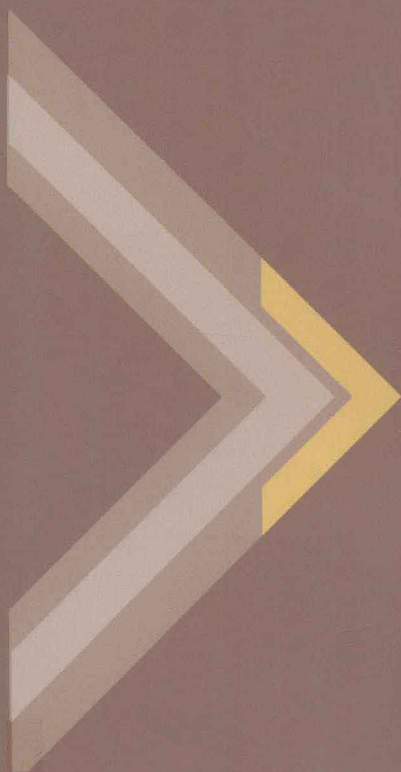


钢中夹杂物与 钢的性能及断裂

李静媛 章为夷 魏成富 李平 等著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

钢中夹杂物与钢的性能及断裂

李静媛 章为夷 魏成富 李 平 等著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2012

内 容 提 要

本书分上下两篇。上篇讲述夹杂物与钢的性能,主要介绍在只有夹杂物一种变量的情况下,测试钢中夹杂物的含量对钢性能的影响,包括测定冲击韧性、拉伸性能、断裂韧性以及低温冲击韧性等。下篇讲述夹杂物与钢的断裂,介绍裂纹在夹杂物上形核、长大与扩展的规律,通过所采用的准动态方法,可以了解到夹杂物影响性能的内在因素,对解释夹杂物造成钢的断裂过程大有帮助。

本书可供生产现场技术人员学习使用,也可供高等院校冶金专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢中夹杂物与钢的性能及断裂/李静媛等著. —北京:

冶金工业出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-5024-6031-0

I. ①钢… II. ①李… III. ①钢—非金属夹杂(金属缺陷) ②钢—性能 ③钢—断裂 IV. ①TG142.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 225508 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 廖 丹 程志宏 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 刘 倩 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6031-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2012 年 10 月第 1 版, 2012 年 10 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 35 印张; 849 千字; 542 页

99.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



中国科学院院士用笺

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

序

李静媛教授是我在上世纪五十年代从美国回国后，在沈阳中口种子院全面研究所共同工作的第一批年轻学者，那时她就从事钢中夹杂物的研究工作。如所周知，钢的质量主要决定于两个外界因素：一个是钢中的气体，一个是夹杂物含量，全面所于1953年建所，就抓住了这两个关键因素，并做出了开拓性的工作，推广到东北各钢厂乃至全国。

一般人的工作都是转来转去，一个领域做烦了，又换一个领域，^{1952年调}而李静媛教授1952⁰年大学毕业^{回国}，到全面所就开始了“钢中夹杂物的分析”工作，后来调到成都科技大学（现为四川大学的一部分），她又开始了夹杂物对钢性能和断裂的影响，



中国科学院院士用笺

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

特别对超强度钢 (D₁AC) 和
一些别的钢种。

她的实验结果翔实可靠, 她
所创建的试验分析方法对从事
高强度钢研究与教学人员有参
考价值, 因此, 推荐出版以飨
读者: 科学方法与科学精神。

师昌绪

2012.6.18

两院院士师昌绪亲笔为本书作序。

序

李静媛教授是我在上世纪五十年代从美国回国后，在沈阳中国科学院金属研究所共同工作的第一批年轻学者，那时她就从事钢中夹杂物的研究工作。如所周知，钢的质量主要决定于两个外界因素：一个是钢中的气体，一个是夹杂物含量。金属所于1953年建所，就抓住了这两个关键因素，并做出了开拓性的工作，推广到东北各钢厂乃至全国。

一般人的工作都是转来转去，一个领域做烦了，又换另一个领域，而李静媛教授1950年大学毕业，1952年调到金属所就开始了“钢中夹杂物的分析”工作，后来调到成都科技大学（现为四川大学的一部分），她又开始了夹杂物对钢性能和断裂的影响，特别对超高强度钢（D₆AC）和一些别的钢种。

她的实验结果翔实可靠，她所创建的试验分析方法对从事高强度钢研究与教学人员有参考价值，因此，推荐出版以飨读者：科学方法与科学精神。

师昌绪

2012. 6. 18

前 言

早在 100 多年前，人们就发现夹杂物对金属材料的性能有危害作用。夹杂物对钢的性能的影响程度受多种因素的影响，这些影响因素既包括钢的属性，也包括夹杂物本身的属性。研究夹杂物对钢性能的影响比研究钢本身属性对钢性能的影响要复杂得多，而且耗时、耗力。同一种夹杂物对不同钢的影响可能完全不同，因此国内外研究夹杂物对钢性能影响的文献十分分散且无系统性。如 W. M. Garrison 等研究了 HY180 钢中三种夹杂物 (MnS 、 $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ 和 Ti_2CS) 对钢断裂韧性和延性的影响，Y. Tomita 研究了夹杂物形态对淬火和回火的 0.4C-Cr-Mo-Ni 钢机械性能的影响，Y. Munrakami 研究了夹杂物对高强度钢疲劳强度的影响等，而系统研究夹杂物的类型、含量、尺寸、尺寸分布、夹杂物间距等参数对钢性能影响的文献并不多。有鉴于此，作者撰写了本书，以期为该领域的研究不断完善，从而改善钢材质量，为钢材的生产消除或减少夹杂物的有害影响提供科学依据。

作者从事钢中夹杂物与钢的性能和断裂方面的研究超过 50 年，运用科研成果处理过许多因夹杂物造成的钢的断裂事故，如直升机坠毁事故、潜艇部件因存在夹杂物导致报废事故等。这些事故的处理愈发突显了钢中夹杂物研究对事故分析和解决问题的重要性。我国冶金行业对夹杂物评级标准多年来一直沿用旧标准，所用夹杂物的图片均为手工描绘，缺乏真实性和科学性，而本书的出版将对相关标准起到参考和补充的作用。

本书分上、下两篇。上篇讲述夹杂物与钢的性能，主要介绍采用双真空冶炼方法制备只含一种夹杂物的试样，然后在相同的热处理条件下回火成索氏体，在保证试样的组织、晶粒度相同，只有夹杂物一种变量的情况下，测试夹杂物的含量系统变化，测定冲击韧性、拉伸性能、断裂韧性以及低温冲击韧性等。下篇讲述夹杂物与钢的断裂，所用试样与上篇相同，介绍裂纹在夹杂物上形核、长大与扩展的规律，属国内首创，国外文献也不多见。所采用的准动态方法，可以得出裂纹在夹杂物上成核的应力-应变条件、裂纹成核和夹杂物类型

与尺寸的关系、裂纹成核率与夹杂物含量的关系，通过对断裂韧性 (K_{IC}) 试样的一步加载和逐步加载的实验方法得出裂纹长大和扩展与夹杂物间距的关系，通过大量的实验观察工作所得出的大量数据，可了解到夹杂物影响性能的内在因素，对解释夹杂物造成钢的断裂的过程大有帮助。

本书可供生产现场技术人员学习使用，也可供高等院校冶金专业的师生阅读参考。

参加本书撰写工作的主要有：章为夷（3.1 节和 17.1 节），高惠俐（3.2 节和 17.2 节），马红（第 4 章和第 18 章），李亚琴（第 8 章和第 19 章），唐正华（第 9 章和第 25 章），陈赛克（10.1 节和第 20 章），严范梅（10.2 节和第 21 章），魏成富、钱新民（第 11 章和第 22 章），李平（第 12 章和第 24 章），黄智刚（第 15 章），其余章节主要由李静媛撰写。李静媛负责全书的统稿工作。参加本书实验和撰写工作的还有谷文革、罗学厚、梁扬举、王嘉敏、陈继志、陈派明等同志。此外，纪红为本书下篇全部照片的扫描和全书曲线图的描绘以及文稿的打印做了大量工作。本书的出版还得到了绵阳师范学院（魏成富）、哈尔滨工程大学（李平）以及大连交通大学（章为夷）的相关资金资助，在此一并表示感谢。此外还特别向资深两院院士师昌绪和冶金材料学专家董履仁、沈保罗教授表示最诚挚的谢意。

夹杂物对钢性能的影响比较复杂，涉及的影响因素较多，知识范围也较广，本书中若有不足，恳请读者指正。

作 者

2012 年 3 月

目 录

上篇 夹杂物与钢的性能

第 1 章 夹杂物与钢的性能研究文献简介	3
1.1 夹杂物对钢力学性能的影响	3
1.2 夹杂物对钢疲劳性能的影响	5
1.3 夹杂物对应力腐蚀等性能的影响	5
1.4 补充文献介绍	6
第 2 章 实验方法	11
2.1 试样的冶炼锻造和热处理	11
2.1.1 母体钢的冶炼和锻造	11
2.1.2 夹杂物试样的冶炼、锻造和热处理	11
2.2 测试方法	12
2.2.1 试样基体组织及晶粒度评定	12
2.2.2 试样中夹杂物的定性和定量	12
2.3 性能测试	13
2.4 断口分析	14
第 3 章 TiN 夹杂物对 D ₆ AC 钢性能的影响	15
3.1 TiN 夹杂物 510℃ 回火	15
3.1.1 试样成分与基体组织	15
3.1.2 夹杂物定性和定量	17
3.1.3 性能测试结果	20
3.1.4 分析与讨论	22
3.1.5 小结	34
3.2 TiN 夹杂物 550℃ 回火	34
3.2.1 实验方法与结果	34
3.2.2 讨论与分析	39
3.2.3 小结	42
3.3 TiN 夹杂物 600℃ 回火	43
3.3.1 实验方法和结果	43

3.3.2	讨论与分析	47
3.3.3	小结	52
3.4	TiN 夹杂物与 D ₆ AC 钢性能关系的总结	52
3.4.1	数据的整理与归纳	52
3.4.2	TiN 夹杂物含量与拉伸性能的关系	53
3.4.3	TiN 夹杂物含量、间距与韧性的关系	54
第 4 章	ZrN 夹杂物对 D ₆ AC 钢性能的影响	56
4.1	实验方法与结果	56
4.1.1	试样成分与热处理	56
4.1.2	基体组织与晶粒度	56
4.1.3	ZrN 夹杂物的定性和定量	57
4.2	性能测试	60
4.3	分析与讨论	61
4.3.1	ZrN 夹杂物参数与韧性的关系	61
4.3.2	ZrN 夹杂物含量与拉伸性能的关系	64
4.3.3	K _{IC} 试样的断口形貌与韧性的关系	64
4.4	不含有与含有 ZrN 夹杂物试样的韧性对比	65
第 5 章	氮化物夹杂物对 D ₆ AC 钢性能的影响	66
5.1	氮化物夹杂物含量、间距与韧性的关系	67
5.1.1	氮化物夹杂物含量与韧性的关系	67
5.1.2	氮化物夹杂物含量、间距共同对韧性的影响	67
5.1.3	各含 TiN 和 ZrN 试样的夹杂物间距与断裂韧性的关系	67
5.2	回火温度和夹杂物类型、夹杂物含量等不同的试样的韧性对比	69
5.2.1	回火温度和夹杂物类型不同的试样的韧性对比	69
5.2.2	夹杂物含量相近时回火温度和夹杂物类型对试样韧性影响的对比	69
第 6 章	硫化物夹杂物对高强度和超高强度钢性能的影响	70
6.1	文献综述	70
6.2	45 钢中 MnS 夹杂物对钢性能的影响	75
6.2.1	实验方法和结果	75
6.2.2	讨论与分析	79
6.2.3	含 S 量与 45 钢纵横向性能的关系	86
6.2.4	含 S 量与 45 钢性能关系线性回归总结	89
6.2.5	回归方程验证	92
第 7 章	MnS 夹杂物对 D ₆ AC 钢性能的影响 (600℃ 回火)	95
7.1	实验方法	95

7.1.1 试样的冶炼和热处理	95
7.1.2 试样规格	96
7.1.3 测试方法	96
7.2 实验结果	99
7.2.1 MnS 夹杂物定量结果	99
7.2.2 电子探针与 X 射线衍射鉴定夹杂物的结果	103
7.2.3 性能测试结果	105
7.2.4 试样的断裂韧性与冲击和拉伸性能	107
7.3 讨论与分析	108
7.3.1 D ₆ AC 钢中 MnS 定量结果对比	108
7.3.2 MnS 夹杂物定性结果	108
7.3.3 MnS 夹杂物与性能的关系	109
7.4 总结	113
7.4.1 夹杂物的物理定量方法对比	113
7.4.2 MnS 夹杂物、回火温度与钢性能的关系	113
7.4.3 MnS 夹杂物与韧性的关系	113
7.5 断裂韧性与断裂参数	113
7.5.1 断裂模型中的断裂参数	113
7.5.2 实验测定断裂参数的方法和结果	114
7.5.3 计算、测量的断裂参数与金相法测定的夹杂物间距对比	118
7.5.4 断裂参数与韧塑性	118
7.5.5 讨论与分析	119
第 8 章 MnS 夹杂物对 D₆AC 钢性能的影响 (550℃ 回火)	122
8.1 实验方法与结果	122
8.1.1 试样的制备	122
8.1.2 试样组织、夹杂物定性和定量	122
8.1.3 性能测试	124
8.2 讨论与分析	127
8.2.1 MnS 夹杂物定量结果的对比	127
8.2.2 MnS 夹杂物含量和间距与韧塑性的关系	128
8.2.3 MnS 夹杂物的参数与韧塑性的关系	129
8.3 总结	133
8.3.1 化学法与金相法测定 MnS 夹杂物含量的对比	133
8.3.2 夹杂物参数与断裂韧性的关系	133
8.3.3 夹杂物参数与冲击韧性的关系	133
第 9 章 硫化钛和稀土夹杂物对 D₆AC 钢性能的影响	134
9.1 实验方法	134

9.1.1	试样冶炼和成分	134
9.1.2	试样热处理及试样规格	134
9.1.3	试样组织和夹杂物鉴定	134
9.2	实验结果	135
9.2.1	金相组织、晶粒度及夹杂物定性结果	135
9.2.2	夹杂物定量结果	136
9.2.3	性能测试结果	139
9.3	讨论与分析	140
9.3.1	硫化物含量与韧塑性的关系	141
9.3.2	硫化物含量和间距与钢性能的关系	143
9.3.3	夹杂物尺寸分布与钢性能的关系	147
9.4	总结	149
9.4.1	TiS 含量与韧性的关系	149
9.4.2	稀土硫氧化物含量与韧性的关系	150
9.4.3	夹杂物含量和间距共同对韧塑性的影响	150
9.4.4	TiS 夹杂物尺寸分布与韧性的关系	150
第 10 章	硫化物与氮化物夹杂物共存时对 D ₆ AC 钢性能的影响	151
10.1	MnS 和 TiN 夹杂物共同对钢性能的影响	151
10.1.1	实验方法与结果	151
10.1.2	讨论与分析	156
10.1.3	总结	163
10.2	MnS 和 ZrN 夹杂物共同对钢性能的影响	163
10.2.1	实验方法与结果	163
10.2.2	数据归纳	175
10.2.3	讨论与分析	176
10.2.4	对比分析	202
10.2.5	总结	204
第 11 章	高强度钢中夹杂物与钢性能的关系	206
11.1	42CrMoA 钢中夹杂物与钢的性能	206
11.1.1	实验方法与结果	206
11.1.2	讨论与分析	216
11.1.3	总结	230
11.2	4145H 钢中夹杂物与钢的性能	233
11.2.1	实验方法与结果	233
11.2.2	夹杂物定性和定量	237
11.2.3	讨论与分析	238

第 12 章 低强度钢中夹杂物对钢延韧性的影响	242
12.1 实验方法与结果	242
12.1.1 试样的冶炼、锻轧和热处理	242
12.1.2 金相组织、晶粒度和夹杂物定性与定量	243
12.1.3 钢性能测试	245
12.2 讨论与分析	246
12.2.1 夹杂物含量和间距与拉伸塑性的关系	246
12.2.2 夹杂物含量和间距与冲击韧性的关系	247
12.2.3 夹杂物含量和间距共同对韧塑性的影响	250
12.2.4 夹杂物尺寸与韧塑性的关系	252
12.3 对线性回归方程的总结	255
12.3.1 按相关系数检验	257
12.3.2 按方程计算的性能值与实验值对比检验	257
12.4 总结	260
第 13 章 夹杂物类型对钢性能的影响	261
13.1 试样的冶炼锻造和热处理	261
13.1.1 试样的冶炼	261
13.1.2 试样的锻造	262
13.1.3 热处理及试样规格	262
13.2 试样的金相组织和晶粒度	262
13.2.1 试样的金相组织	262
13.2.2 试样的晶粒度	263
13.3 夹杂物定性和定量	264
13.3.1 夹杂物定性	264
13.3.2 夹杂物定量	267
13.4 钢性能测试	270
13.5 讨论与分析	272
13.5.1 夹杂物含量和类型与钢性能的关系	272
13.5.2 夹杂物间距和类型与钢性能的关系	275
13.5.3 夹杂物平均自由程和类型与钢性能的关系	279
13.5.4 伸张区平均宽度和夹杂物类型与钢性能的关系	281
13.5.5 曲线图观察试样韧性与夹杂物参数的关系	283
13.5.6 各类夹杂物含量相近的各试样的韧性对比	286
13.5.7 断裂模型的验证	286
13.5.8 本章总结	288
第 14 章 夹杂物类型与钢性能关系总结	289
14.1 含量相近夹杂物类型不同的试样的韧性对比	290

14.2	各类夹杂物含量与试样韧性的定量关系	291
14.3	硫化物类与氮化物类夹杂物试样的韧性对比	292
14.3.1	硫化物类夹杂物试样的韧性对比	293
14.3.2	氮化物类夹杂物试样的韧性对比	293
14.4	含 TiN 与含 TiN 和 MnS 以及含 ZrN 与含 ZrN 和 MnS 试样的韧性对比	294
14.5	含量不同夹杂物类型不同试样的韧性对比	295
14.6	夹杂物参数与断裂韧性模型检验	297
14.6.1	文献介绍	297
14.6.2	实验方法	299
14.6.3	各章试样的夹杂物数据	300
14.6.4	讨论与分析	302
第 15 章	42CrMoA 钢中夹杂物生成过程和来源	313
15.1	实验方法	313
15.1.1	试样的冶炼	313
15.1.2	试样热轧和热处理及试样规格	313
15.1.3	取样条件及试样编号	313
15.1.4	试样成分与气体含量变化	314
15.2	实验方法与结果	315
15.2.1	试样组织与晶粒度	315
15.2.2	试样中夹杂物形貌及定性和定量分析	315
15.2.3	夹杂物的显微硬度	339
15.2.4	讨论与分析	341
15.2.5	第二批 42CrMoA 钢中夹杂物生成和来源	348

下篇 夹杂物与钢的断裂

第 16 章	夹杂物与钢的断裂研究文献简介	357
16.1	裂纹成核	357
16.2	金属韧性断裂机理	357
16.3	裂纹扩展条件	359
16.4	空洞的内颈缩	359
16.5	空洞形核的临界应变条件	360
16.6	界面应力	361
16.6.1	球化 1045 钢	363
16.6.2	Cu-0.6% Cr 合金	363
16.6.3	马氏体时效钢	363
16.7	空洞长大模型	363

16.8	结合实际的研究工作文献	366
16.9	总结	366
第 17 章	D₆AC 钢中 TiN 夹杂物与钢的断裂	368
17.1	510℃ 回火试样	368
17.1.1	试样选择	368
17.1.2	裂纹成核与长大观察	368
17.1.3	裂纹扩展观察	385
17.2	550℃ 回火试样	401
17.2.1	试样选择	401
17.2.2	准动态方法观察结果	402
17.2.3	讨论与分析	404
第 18 章	D₆AC 钢中 ZrN 夹杂物与钢的断裂	412
18.1	试样选择	412
18.2	准动态观察结果	412
18.3	宏观应变与局部应变	415
18.4	讨论与分析	416
18.4.1	裂纹成核与夹杂物尺寸的关系	416
18.4.2	裂纹成核率与应变和 ZrN 夹杂物含量的关系	418
18.4.3	裂纹聚合长大、扩展与夹杂物参数和应变的关系	419
18.4.4	夹杂物与碳化物相互作用对断裂的影响	419
第 19 章	D₆AC 钢中 MnS 夹杂物与钢的断裂	423
19.1	试样选择	423
19.2	准动态观察结果	423
19.2.1	准动态观察方法	423
19.2.2	微裂纹在 MnS 夹杂物上成核观察	424
19.2.3	微裂纹长大与扩展观察	425
19.3	讨论与分析	425
19.3.1	MnS 夹杂物开裂方式与 ZrN 夹杂物开裂方式对比	425
19.3.2	应变与 MnS 夹杂物纵横向开裂尺寸的关系	426
19.3.3	回归方程的检验	429
19.3.4	微裂纹成核率与应变的关系	430
19.3.5	颈缩区内微裂纹成核率与夹杂物参数的关系	431
19.3.6	应变相近微裂纹在夹杂物上的成核率与夹杂物含量的关系	432
第 20 章	D₆AC 钢中 MnS 和 TiN 夹杂物与钢的断裂	433
20.1	试样选择	433

20.2	实验方法与结果	434
20.2.1	裂纹在夹杂物上成核与长大观察	434
20.2.2	裂纹扩展观察	437
20.3	讨论与分析	440
20.3.1	微裂纹形核应变与夹杂物类型和尺寸的关系	440
20.3.2	微裂纹形核率与应变和夹杂物含量的关系	441
20.3.3	夹杂物类型、含量和间距对裂纹扩展的影响	443
第 21 章	D ₆ AC 钢中 MnS 和 ZrN 夹杂物与钢的断裂	445
21.1	试样选择	445
21.2	实验方法与结果	445
21.2.1	试样的性能数据	445
21.2.2	测定夹杂物的方法与结果	446
21.2.3	裂纹成核与扩展观察	448
21.3	讨论与分析	453
21.3.1	夹杂物对裂纹成核与扩展的影响	453
21.3.2	夹杂物参数与试样的韧性	456
21.3.3	小结	456
第 22 章	42CrMoA 钢和 4145H 钢中夹杂物与钢的断裂	458
22.1	试样选择	458
22.1.1	试样的化学成分和性能	458
22.1.2	与夹杂物有关的参数	459
22.1.3	试样热处理	461
22.1.4	第一批 42CrMoA 钢的断口形貌	461
22.2	准动态观察	463
22.2.1	第一批 42CrMoA 钢的准动态观察	463
22.2.2	第二批 42CrMoA 钢的准动态观察	467
22.2.3	4145H 钢的准动态观察	469
22.3	讨论与分析	470
22.3.1	第一批 42CrMoA 钢中夹杂物参数与应变的关系	470
22.3.2	第二批 42CrMoA 钢中夹杂物参数与应变的关系	477
22.3.3	4145H 钢中夹杂物参数与应变的关系	481
第 23 章	夹杂物与钢的断裂的相关常数计算	486
23.1	概述	486
23.2	裂纹在夹杂物成核的临界应变的计算	487
23.2.1	临界应变简介	487
23.2.2	结合实验数据计算临界应变	488

23.3 裂纹在夹杂物和基体界面上成核的界面应力计算	488
23.3.1 A. R. Argon 法	488
23.3.2 J. D. Eshelby 法	492
23.3.3 计算界面应力方法总结	494
23.4 应力集中系数	495
23.4.1 D ₆ AC 钢中夹杂物的应力集中系数分析	496
23.4.2 42CrMoA 钢和 4145H 钢中夹杂物的应力集中系数分析	496
第 24 章 低强度钢中夹杂物与钢的断裂	497
24.1 相关文献介绍	497
24.2 试样选择	499
24.2.1 试样的化学成分与力学性能	499
24.2.2 试样金相组织、晶粒度和夹杂物参数	500
24.3 裂纹成核与扩展观察方法与结果	501
24.3.1 准动态观察	501
24.3.2 断口观察	502
24.3.3 裂纹在夹杂物上成核观察	502
24.3.4 裂纹与断裂观察	512
24.3.5 夹杂物开裂的临界条件	515
24.3.6 准动态观察总结	516
24.4 讨论与分析	517
24.4.1 裂纹在夹杂物上的成核率与应变的关系	517
24.4.2 临界应变与临界尺寸	521
24.4.3 相同应变时裂纹在夹杂物上的成核率与夹杂物含量的关系	524
第 25 章 断口分形维数与 07 钢的回火脆性	528
25.1 研究概述	528
25.2 实验方法和结果	530
25.2.1 试样制备	530
25.2.2 试样热处理	530
25.2.3 冲击试验	530
25.2.4 测定分形维数	531
25.3 讨论与分析	533
25.3.1 冲击韧性、分形维数与回火温度的关系	533
25.3.2 分形维数值随测定位置的变化	534
25.3.3 分形维数与冲击韧性的关系	535
25.4 总结	536
参考文献	537