

目 次

はじめに..... i

I 材料中の水素の存在状態

1 水素の固溶状態 2

- 1.1 高温での水素固溶度 2
- 1.2 低温での水素固溶度 6
 - 1.2.1 低温における水素固溶度のばらつき 6
 - 1.2.2 気相水素雰囲気における水素透過法 7
 - 1.2.3 電気化学的水素透過法 10
- 1.3 結晶格子中での水素の位置 13
- 1.4 固溶水素の電子状態 15
- 引用文献 16

2 水素のトラップ状態 19

- 2.1 応力場における水素濃度の高まり 20
- 2.2 転位による水素のトラップ 21
 - 2.2.1 水素と転位の相互作用 21
 - 2.2.2 水素と転位の相互作用の測定 22
 - 2.2.3 塑性変形効果の作用因子 27
- 2.3 原子空孔による水素のトラップ 29
 - 2.3.1 空孔密度 29
 - 2.3.2 空孔の移動と消滅・クラスター化 30
 - 2.3.3 水素と空孔との結合エネルギー 32

2.4	析出物の水素のトラップ	36
2.5	結晶粒界の水素のトラップ	40
2.6	内部き裂, ボイドへの水素のトラップ	41
2.7	いろいろなトラップへの平衡分布	42
	参考文献	45
	引用文献	45
3	材料中水素の状態解析法	48
3.1	水素分布の可視化	48
3.1.1	オートラジオグラフィと水素マイクロプリント法	48
3.1.2	走査型質量分析器の利用	52
3.2.	水素昇温脱離分析法	55
3.2.1	原理	55
3.2.2	解析法	55
3.2.3	解析例	60
3.3	水素の状態解析における注意	65
	引用文献	66
II	材料中の水素の移動	
4	トラップがある場合の水素拡散	70
4.1	水素の拡散係数	70
4.2	拡散方程式	71
4.2.1	McNabb-Foster の式	71
4.2.2	Oriani の式	73
4.3	拡散の統計熱力学的な扱い	76
	参考文献	79
	引用文献	80

5	非定常的な水素移動	81
5.1	非可逆トラップがある場合の拡散方程式の解	81
5.2	水素トラップの速度論	83
5.2.1	トラップへの水素集積速度	83
5.2.2	トラップパラメータの推定	88
5.3	転位による水素の輸送	89
5.3.1	水素放出	89
5.3.2	電気化学的水素透過試験における塑性変形の効果	90
5.3.3	割れ発生との関わり	94
	引用文献	94
III	環境から材料への水素侵入	
6	気体水素の金属表面への吸着	98
6.1	材料表面の特徴	98
6.1.1	再構成と吸着原子の規則配列	98
6.1.2	表面張力と表面組成	100
6.1.3	表面拡散	102
6.2	表面吸着状態の測定	103
6.2.1	吸着状態	103
6.2.2	昇温脱離分析による測定	104
6.2.3	仕事関数による測定	107
6.3	等温吸着式と吸着速度	109
6.4	水素吸着に及ぼす合金元素, ガス不純物の影響	112
6.4.1	合金元素の影響	112
6.4.2	ガス不純物の影響	113
	参考文献	115
	引用文献	115

7 液相からの水素侵入反応 117

- 7.1 基本電極反応 117
- 7.2 電極反応の電気化学的測定 119
 - 7.2.1 電気化学的水素透過試験法 119
 - 7.2.2 平衡状態 120
 - 7.2.3 定常水素透過状態 121
 - 7.2.4 平衡からずれた水素透過の一般的な扱い 128
- 7.3 腐食による水素侵入 132
 - 7.3.1 腐食反応の環境依存性 132
 - 7.3.2 FIP 試験法 135
- 7.4 界面と吸着状態 136
 - 7.4.1 電気二重層 136
 - 7.4.2 アンダーポテンシャル析出 138
- 参考文献 140
- 引用文献 140

8 水素侵入に影響する因子 142

- 8.1 水素侵入の促進材 142
 - 8.1.1 促進材の種類と効果 142
 - 8.1.2 水素侵入促進効果の機構 148
- 8.2 H₂S の効果 151
- 8.3 材料の不均一性および環境変動の効果 154
 - 8.3.1 局部腐食 154
 - 8.3.2 環境変動の効果 158
- 8.4 水素侵入に及ぼす応力の影響 162
- 引用文献 163

IV 変形挙動**9 変形応力に及ぼす水素の影響** 166

- 9.1 弾性定数 166
- 9.2 塑性変形応力 168
- 9.3 応力緩和 173
- 9.4 クリープ 176
- 9.5 表面電気化学反応が変形応力に及ぼす影響 179
- 引用文献 182

V 水素脆性破壊の特徴**10 水素脆性における破壊形態** 186

- 10.1 破面形態 186
 - 10.1.1 へき開破面 186
 - 10.1.2 縞状模様破面 187
 - 10.1.3 デンプルおよび擬へき開破面 191
 - 10.1.4 粒界破面 193
 - 10.1.5 破面形態の応力依存性 196
- 10.2 水素脆性における破壊過程 197
 - 10.2.1 延性破壊の基本事項 197
 - 10.2.2 R 曲線 199
 - 10.2.3 安定延性き裂の発生 201
 - 10.2.4 延性き裂進展抵抗 203
 - 10.2.5 R 曲線に及ぼす水素の影響 207
 - 10.2.6 水素ガス環境におけるき裂進展 209
- 10.3 変形の局所化と塑性不安定性 211

10.3.1	塑性不安定性	211
10.3.2	水素による塑性不安定性の助長	212
	引用文献	215

11 遅れ破壊 219

11.1	遅れ破壊特性の作用因子	219
11.2	遅れ破壊における微小塑性変形	225
11.2.1	応力緩和特性との対応	225
11.2.2	遅れ破壊潜伏期	227
11.3	遅れ破壊寿命に及ぼす環境変動の効果	228
11.4	水素侵入の経時変化	231
11.5	遅れ破壊特性の評価法	234
	引用文献	242

12 相変態に伴う水素脆性 244

12.1	準安定オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆性	244
12.1.1	オーステナイト系ステンレス鋼の基本特性	244
12.1.2	水素添加に伴うオーステナイトの相変化	246
12.1.3	水素脆化特性	250
12.1.4	破壊の様相	254
12.1.5	まとめ—積層欠陥および塑性変形との関係—	258
12.2	水素化物生成を伴う水素脆性	259
12.2.1	V および Nb	259
12.2.2	Ti および Ti 合金	262
12.2.3	Ni-Ti 合金の水素脆性	263
	引用文献	269

VI 水素脆性機構

13 脆性破壊としての扱い 274

13.1	分子状水素の析出—内圧理論—	274
13.1.1	先在き裂の不安定化	274
13.1.2	脆性破壊起点の生成	276
13.2	表面エネルギー低下理論	277
13.3	格子脆化理論	279
13.3.1	破壊条件式	279
13.3.2	数値的検討	280
13.3.3	破壊力学的表現	281
	引用文献	285

14 局所塑性変形に関わり 286

14.1	水素助長割れ理論	286
14.2	水素助長局所塑性変形理論	286
14.3	局所せん断変形とボイド生成の自己触媒理論	291
14.4	吸着水素誘起転位放出理論	292
14.5	応力腐食割れとの関係	294
14.5.1	金属の陽極溶出に伴う局所塑性変形理論	294
14.5.2	水素脆性と応力腐食割れとの関係	296
	引用文献	298

15 ナノ損傷蓄積 299

15.1	水素助長歪み誘起空孔理論	299
15.2	水素による歪み誘起空孔の生成助長	300
15.2.1	塑性誘起格子欠陥の検出	300
15.2.2	歪み誘起格子欠陥の実体	303

15.3. 歪み誘起空孔と水素脆化感受性との対応	306
15.3.1 Mn 添加マルテンサイト鋼の粒界割れ	306
15.3.2 マルテンサイト鋼の細粒化	309
15.3.3 面心立方合金の水素脆性	312
15.4 疲労と遅れ破壊との関係 —ナノ損傷蓄積—	314
15.4.1 水素添加材の疲労	314
15.4.2 予疲労材の遅れ破壊	316
15.5 水素脆性における水素量の意味	318
15.5.1 水素脆性に関与する水素	319
15.5.2 水素トラップ欠陥の経時変化	323
15.6 水素脆性機構のまとめ	325
引用文献	327
あとがき	329
欧字先頭語索引	331
総索引	333