

# 目 录

## 出版者的话

## 第一章 碳钢和低合金钢 ... 1

焊接分类法 ..... 1

一般原理 ..... 2

氢致裂纹 ..... 2

热循环的中断 ..... 8

层状撕裂 ..... 9

碳钢 ..... 11

概述 ..... 11

焊接性的考虑 ..... 14

低碳钢 ..... 17

软钢 ..... 19

中碳钢 ..... 20

高碳钢 ..... 22

电弧焊 ..... 22

电渣焊和气电立焊 ..... 25

氧乙炔焊 ..... 26

电阻焊 ..... 27

电子束和激光束焊接 ..... 33

摩擦焊 ..... 33

硬钎焊 ..... 33

热切割 ..... 35

低合金高强度钢 ..... 35

概述 ..... 35

成分和性能 ..... 37

焊接 ..... 41

硬钎焊 ..... 48

热切割 ..... 48

调质钢 ..... 48

概述 ..... 48

成分和性能 ..... 49

焊接冶金学 ..... 52

接头设计 ..... 54

预热 ..... 56

焊接方法 ..... 57

线能量 ..... 59

焊接材料 ..... 61

焊接工艺 ..... 64

焊后热处理 ..... 65

热切割 ..... 66

硬钎焊 ..... 67

可热处理低合金钢 ..... 67

概述 ..... 67

成分和性能 ..... 67

焊接冶金学 ..... 70

预热 ..... 71

电弧焊方法 ..... 72

闪光焊 ..... 77

点焊 ..... 77

电子束焊 ..... 77

焊后热处理 ..... 78

硬钎焊 ..... 78

铬-钼钢 ..... 79

概述 ..... 79

成分和性能	79	电阻焊	130
热处理	82	其它焊接方法	131
焊接冶金	82	铁素体不锈钢	131
接头设计	84	成分	131
预热	84	冶金特性	133
焊接方法	85	焊接性	134
电弧焊焊接材料	86	电弧焊	135
电阻对焊	88	电阻焊	139
电渣焊	89	其它焊接方法	139
焊后热处理	89	奥氏体不锈钢	139
预镀层钢	91	成分	139
概述	91	性能	140
镀铝钢	91	冶金特性	143
镀锌钢	94	铁素体	145
富锌镀层	107	高温下停留	148
安全措施	108	电弧焊	153
补充阅读资料	109	氧乙炔焊	167
第二章 不锈钢	110	电阻焊	167
概述	110	其它焊接方法	177
定义	110	焊后热处理	178
分类	111	析出硬化不锈钢	180
性能	111	成分、种类和性能	180
一般的焊接特性	112	为焊接而进行的	
焊接方法	113	热处理	185
防止氧化	114	焊接性	186
焊前和焊后清理	114	填充金属	186
填充金属	115	电弧焊	187
马氏体不锈钢	123	电阻焊	189
成分	123	硬钎焊和软钎焊	190
冶金特性	124	硬钎焊	190
焊接性	126	软钎焊	197
电弧焊	127	热切割	200

氧-燃气切割.....	200	母材 .....	232
等离子弧切割 .....	201	钎料 .....	233
空气碳弧切割 .....	202	接头设计 .....	233
安全措施 .....	203	设备 .....	233
补充阅读资料 .....	204	表面制备 .....	233
第三章 工具钢和模具钢.....	205	钎剂和气氛 .....	233
概述 .....	205	工艺技术 .....	234
分类 .....	205	安全措施 .....	235
水淬类 .....	210	补充阅读资料 .....	235
耐冲击类 .....	210	第四章 高合金钢 .....	236
冷加工类 .....	210	概述 .....	236
热加工类 .....	211	超高强度钢 .....	237
高速钢类 .....	212	定义和一般特性 .....	237
模具钢类 .....	213	镍-钴合金钢.....	238
特殊用途钢类 .....	213	铍-铝-钒钢 .....	250
冶金 .....	213	马氏体时效钢 .....	255
热处理 .....	215	概述 .....	255
完全退火 .....	217	冶金学 .....	256
消除应力 .....	217	物理性能 .....	258
奥氏体化 .....	218	机械性能 .....	259
淬火 .....	218	用途 .....	259
回火 .....	218	焊接冶金 .....	259
电弧焊 .....	219	电弧焊 .....	262
应用 .....	219	电子束焊 .....	268
方法的选择 .....	219	锰奥氏体钢 .....	271
填充金属 .....	220	概述 .....	271
表面准备 .....	221	冶金 .....	271
预热 .....	221	合金 .....	275
修复工艺 .....	222	物理性能 .....	277
双金属结构 .....	228	机械性能 .....	278
高速钢切削工具 .....	230	用途 .....	281
闪光焊和摩擦焊 .....	232	焊接 .....	282
硬钎焊 .....	232	补充阅读资料 .....	289

## Ⅷ

### 第五章 铸铁 ..... 290

概述 ..... 290

白口铸铁 ..... 291

灰口铸铁 ..... 291

可锻铸铁 ..... 293

球墨铸铁 ..... 294

蠕虫状石墨铸铁 ..... 295

用途 ..... 296

焊接注意事项 ..... 297

应用 ..... 297

焊接性 ..... 297

预热 ..... 299

表面准备 ..... 301

焊后热处理 ..... 302

填充金属的选择 ..... 302

电弧焊 ..... 304

接头设计 ..... 304

手工电弧焊 ..... 304

熔化极气体保护电弧焊 ..... 307

药芯焊丝电弧焊 ..... 308

过渡层堆焊 ..... 308

氧乙炔焊 ..... 308

接头设计 ..... 309

填充金属 ..... 309

熔剂 ..... 309

焊接工艺 ..... 310

钎接焊 ..... 310

硬钎焊 ..... 311

钎料和钎剂 ..... 311

硬钎焊方法 ..... 312

接头间隙 ..... 312

硬钎焊工艺 ..... 312

钎焊后的清理 ..... 312

其它连接方法 ..... 312

软钎焊 ..... 312

热剂焊 ..... 313

切割 ..... 313

氧-燃气切割 ..... 313

电弧切割 ..... 314

补充阅读资料 ..... 314

### 第六章 镍合金和钴

合金 ..... 315

金属的性能 ..... 315

镍合金 ..... 316

固溶合金 ..... 316

沉淀硬化合金 ..... 320

弥散-强化镍 ..... 322

铸造镍合金 ..... 322

微量元素对焊接性的

影响 ..... 323

钴合金 ..... 325

主要合金元素 ..... 325

次要合金元素 ..... 327

锻造合金 ..... 327

铸造合金 ..... 327

表面准备 ..... 327

电弧焊 ..... 328

适用的方法 ..... 329

填充金属和焊剂 ..... 329

接头设计 ..... 332

预热温度和层间温度 ..... 334

线能量的限制 ..... 334

钨极气体保护电弧焊 ..... 334

等离子弧焊 ..... 336

熔化极气体保护电

弧焊 .....	337
手工电弧焊 .....	338
埋弧焊 .....	341
焊后热处理 .....	342
应变-时效裂纹 .....	342
机械性能 .....	343
氧乙炔焊 .....	344
火焰调节 .....	344
熔剂 .....	344
镍合金 .....	345
钴合金 .....	346
电阻焊 .....	346
点焊 .....	346
缝焊 .....	350
凸焊 .....	350
闪光对焊 .....	351
电子束焊 .....	353
激光束焊 .....	354
硬钎焊 .....	355
钎料 .....	355
钎剂和气氛 .....	357
应力裂纹 .....	359
钎焊后的热处理 .....	360
软钎焊 .....	360
注意事项 .....	360
软钎料 .....	361
表面准备 .....	361
方法 .....	361
钎剂 .....	361
接头形式 .....	361
后处理 .....	362
热切割 .....	362

等离子弧切割 .....	362
空气碳弧切割 .....	363
激光束 .....	363
安全措施 .....	363
补充阅读资料 .....	364
第七章 铜合金 .....	365
性能 .....	365
合金 .....	365
分类 .....	365
冶金学 .....	367
主要合金元素 .....	369
次要合金元素 .....	371
焊接性因素 .....	372
铜和高铜合金 .....	372
铜-锌合金(黄铜) .....	374
铜-锡合金(磷青铜) .....	374
铜-铝合金(铝青铜) .....	375
铜-硅合金(硅青铜) .....	375
铜-镍合金 .....	376
铜-镍-锌合金(镍银) .....	376
连接方法的选择 .....	377
电弧焊 .....	377
氧乙炔焊 .....	377
电阻焊 .....	378
硬钎焊 .....	378
软钎焊 .....	378
其它焊接方法 .....	378
焊接 .....	379
填充金属 .....	379
装夹 .....	382
表面准备 .....	382
预热 .....	382

# X

铜	384	铜-镍-锌合金(镍银)	420
高铜合金	391	异种金属	420
铜-锌合金(黄铜)	393	软钎焊	420
铜-锡合金(磷青铜)	396	软钎料	421
铜-铝合金(铝青铜)	398	钎剂	422
铜-硅合金(硅青铜)	401	表面准备	422
铜-镍合金	403	有镀层的铜合金	422
铜-镍-锌合金 (镍银)	406	钎剂的去除	423
电阻焊	406	机械性能	423
点焊	406	安全措施	426
缝焊	407	补充阅读资料	427
闪光焊	408	第八章 铝合金	428
铸件	408	特性	428
准备	408	铝合金	429
焊补	409	型材	429
焊后热处理	409	锻造合金	430
要求	409	铸造合金	432
消除应力	410	连接方法的选择	433
退火	410	焊接用填充金属	439
硬钎焊	411	分类	439
设计	411	光焊丝和焊条	440
钎料	412	焊条	441
钎剂和气氛	414	填充金属的选择	442
表面准备	414	连接工作的准备	450
铀	415	接头边缘的准备	450
高铜合金	416	清理	451
铜-锌合金(黄铜)	418	焊缝衬垫	452
铜-锡合金(磷青铜)	419	预热	454
铜-铝合金(铝青铜)	419	定位焊	454
铜-硅合金(硅青铜)	419	电弧焊接	456
铜-镍合金	419	接头几何形状	456
		钨极气体保护电弧焊	457

熔化极气体保护电	扩散焊 .....	498
弧焊 .....	摩擦焊 .....	499
手工电弧焊 .....	焊件的性能和特性 .....	499
等离子弧焊 .....	冶金的影响 .....	499
等离子-熔化极气体保护	抗拉强度和塑性 .....	501
电弧焊 .....	剪切强度 .....	503
弧坑的填满 .....	抗腐蚀性能 .....	504
电子束焊接 .....	硬钎焊 .....	504
激光束焊接 .....	可钎焊的合金 .....	504
氧-燃气焊接 .....	钎料 .....	505
可燃气体 .....	钎剂 .....	507
焊剂 .....	钎剂残余物的清除 .....	508
接头设计 .....	设计注意 .....	508
焊前清理 .....	软钎焊 .....	510
填充金属 .....	软钎焊性 .....	510
预热 .....	软钎料 .....	511
焊接技术 .....	钎剂 .....	512
铸件的焊接 .....	接头设计 .....	513
螺柱焊 .....	表面准备 .....	513
电弧螺柱焊 .....	无钎剂软钎焊 .....	514
储能螺柱焊 .....	软钎焊方法 .....	515
电阻焊 .....	接头性能 .....	515
点焊 .....	粘接 .....	516
滚点焊和缝焊 .....	与其它金属的连接 .....	517
焊缝质量 .....	铝与钢的连接 .....	517
质量控制 .....	铝与铜的连接 .....	517
闪光焊 .....	腐蚀 .....	517
高频电阻焊 .....	电弧切割 .....	518
固态焊接 .....	等离子弧切割 .....	518
冷压焊 .....	碳弧气刨 .....	519
超声波焊 .....	安全措施 .....	520
爆炸焊 .....	补充阅读资料 .....	521

第九章 镁合金 ..... 523

性能 ..... 523

    化学性能 ..... 523

    物理性能 ..... 523

    机械性能 ..... 524

    应用 ..... 524

镁合金 ..... 525

    合金系统 ..... 525

    牌号编制方法 ..... 525

    工业用合金 ..... 526

    主要合金元素 ..... 531

    热处理 ..... 533

    焊接性 ..... 533

表面准备 ..... 534

电弧焊 ..... 536

    可采用的焊接方法 ..... 536

    接头设计 ..... 536

    填充金属 ..... 537

    预热 ..... 542

    钨极气体保护电弧焊 ..... 544

    熔化极气体保护电  
    弧焊 ..... 547

    消除应力 ..... 549

    焊后热处理 ..... 552

    焊缝性能 ..... 553

电阻焊 ..... 555

    点焊 ..... 555

    缝焊 ..... 562

    闪光焊 ..... 562

氧-燃气焊接 ..... 564

    燃气 ..... 564

    熔剂 ..... 564

    焊接技术 ..... 564

其它焊接方法 ..... 565

    电子束焊 ..... 565

    螺柱焊 ..... 565

硬钎焊 ..... 566

    硬钎料 ..... 566

    硬钎焊前的清理 ..... 566

    硬钎剂 ..... 567

    硬钎焊工艺 ..... 567

    硬钎焊的焊后清理 ..... 568

软钎焊 ..... 569

    软钎料 ..... 569

    表面准备 ..... 570

    接头形式 ..... 570

    工艺 ..... 570

等离子弧切割 ..... 570

安全措施 ..... 571

补充阅读资料 ..... 572

第十章 钛、锆、铪、钽  
和铌 ..... 573

概述 ..... 573

钛 ..... 574

    非合金钛 ..... 574

    合金化与相的稳定 ..... 575

    钛合金 ..... 578

    热的影响 ..... 579

    热处理 ..... 581

    机械性能 ..... 586

    清理 ..... 586

    焊接用填充金属 ..... 587

    焊接性 ..... 587

    焊后热处理 ..... 594

    焊接或钎焊过程中的  
    保护 ..... 595

    焊缝中的气孔 ..... 597



气体保护电弧焊 .....	598	钼合金 .....	639
钨极气体保护电弧焊 .....	604	热处理 .....	640
熔化极气体保护电		清理 .....	641
弧焊 .....	608	焊接性 .....	641
等离子弧焊 .....	610	硬钎焊 .....	642
电子束焊 .....	612	铍 .....	644
激光束焊 .....	614	一般特性 .....	644
扩散焊和扩散钎焊 .....	616	钍合金 .....	644
摩擦焊 .....	620	热处理 .....	645
电阻焊 .....	621	清理 .....	645
焊缝的耐腐蚀性能 .....	626	焊接性 .....	645
钎焊 .....	626	硬钎焊 .....	648
热切割 .....	630	补充阅读资料 .....	649
安全措施 .....	631	第十一章 其它金属 .....	651
锆 .....	631	铍 .....	651
非合金锆 .....	631	性能 .....	651
合金化和相的稳定 .....	632	表面准备 .....	652
工业用的合金 .....	633	熔焊 .....	652
热处理 .....	633	扩散焊 .....	653
清理 .....	634	硬钎焊 .....	653
焊接用填充金属 .....	634	钎接焊 .....	654
焊接性 .....	634	软钎焊 .....	654
电阻焊 .....	635	安全措施 .....	654
硬钎焊 .....	635	铀 .....	655
异种金属 .....	636	性能 .....	655
安全措施 .....	637	焊接 .....	655
铪 .....	637	软钎焊 .....	657
一般特性 .....	637	安全措施 .....	657
热处理 .....	638	钨和钨 .....	658
焊接性 .....	638	性能 .....	658
与其它金属的相容性 .....	638	合金 .....	659
钽 .....	639	表面准备 .....	659
一般特性 .....	639	焊接 .....	660

# XIV

硬钎焊 .....	662	稀释和合金化 .....	682
金 .....	664	熔化温度 .....	685
性能 .....	664	热导率 .....	686
熔焊 .....	665	热膨胀 .....	686
电阻焊 .....	665	预热与焊后处理 .....	687
固态焊接 .....	665	其它焊接因素 .....	688
硬钎焊 .....	666	使用要求 .....	689
软钎焊 .....	667	机械性能与物理性能 .....	689
银 .....	668	显微组织的稳定性 .....	690
性能 .....	668	耐腐蚀和抗氧化 .....	690
熔焊 .....	668	填充金属的选择 .....	691
电阻焊 .....	668	要求 .....	691
冷焊 .....	669	选择准则 .....	692
硬钎焊 .....	669	焊接方法的选择 .....	693
软钎焊 .....	669	具体的异种金属的连接 .....	694
铂 .....	669	不锈钢与碳钢或低合金钢	
性能 .....	669	的焊接 .....	694
焊接 .....	670	镍或钴合金与钢的	
硬钎焊 .....	670	焊接 .....	703
钯 .....	670	铜合金与钢的焊接 .....	707
性能 .....	670	铜合金与镍合金的	
焊接与钎焊 .....	670	焊接 .....	709
其它贵金属 .....	671	铝合金与钢的焊接 .....	710
铅 .....	671	铝合金与有色金属合金	
性能 .....	671	的焊接 .....	712
焊接 .....	671	钛合金与其它金属的	
软钎焊 .....	676	焊接 .....	713
安全措施 .....	678	异种难熔金属的焊接 .....	714
补充阅读资料 .....	679	复合钢的焊接 .....	714
第十二章 异种金属 .....	681	复合钢 .....	714
定义与范围 .....	681	接头设计 .....	716
基本原理 .....	681	填充金属 .....	717
焊缝金属 .....	681	焊接工艺 .....	717
		补充阅读资料 .....	726

# 第一章 碳钢和低合金钢

## 焊接分类法

从焊接性观点出发，根据成分、强度、热处理状态或抗腐蚀性能，可以将碳钢和低合金钢分为六个基本类型或组。因为某些钢是在一种以上的热处理条件下使用的，所以在这些组中存在着某种重复。这些组如下：

- (1) 碳钢；
- (2) 低合金高强度钢；
- (3) 调质钢；
- (4) 可热处理的低合金钢；
- (5) 铬-钼钢；
- (6) 预镀层钢。

碳钢的含碳量约 $\leq 1.00\%$ ，含锰量 $\leq 1.65\%$ ，含硅量约 $\leq 0.60\%$ 。虽然某些碳钢可以在退火或正火状态使用，但是通常是以轧制状态使用。

低合金高强度钢具有比普通碳钢更好的机械性能。这类钢一般是按机械性能而不是按化学成分分类的。它们的屈服强度一般属于 $290\sim 482\text{MPa}$ 范围。这些钢通常以轧制或正火状态焊接。

调质钢是一组碳钢和低合金钢，一般由制造者热处理，屈服强度在 $345\sim 1034\text{MPa}$ 范围内。除此之外，这类钢在热处理状态焊接。除了为减少焊接应力或冷成形应力而进行的消除应力之外，焊件一般不经焊后热处理。这一组中的钢包括用于焊接结构的碳钢和合金钢。

可热处理的低合金钢，从焊接性观点来看，是焊后不能保持所希望性能的合金钢。这类钢必须经过焊后热处理，使钢具有最

好的综合性能。这些钢的含碳量，一般比低合金高强度钢或调质钢的高。因此，这类钢能有较高的机械性能，但缺点是韧性差。

铬-钼钢主要用于约 $\leq 704^{\circ}\text{C}$ 高温下运行的设备，如动力设备和石油精炼设备。这些钢在各种热处理状态，即在退火、正火和回火，或调质下焊接。为改善塑性和韧性，并减少焊接应力，焊接接头在使用之前通常经热处理。

预镀层钢有一薄层的铝、锌或富锌的底涂层，以提高抗大气腐蚀或高温氧化能力。可以用热浸镀、电镀或热喷涂施以金属镀层，这取决于其类型。用辊涂或喷漆施以富锌底涂层。在多数情况下是采用薄板和钢带，但是大量的结构用途是用镀锌板和结构件。在所有情况下，该钢在焊接之前是有涂层的。

这六组钢可以各种产品形式供货，包括薄板、钢带、钢板、结构型材、管子、管件、锻件和铸件。不管产品形式如何，为了制订满意的焊接工艺，必须了解其化学成分、机械性能及热处理状态。虽然大多数钢是在锻态下使用的，但是由于焊接性主要是随成分、机械性能和热处理而变的一个特性，所以对锻件和铸件所考虑的问题是相同的。然而，对于大型锻件和铸件，从线能量、冷却速度及拘束条件来看，应考虑尺寸或厚度的影响。同理，也必须考虑铸件中残余元素（这在锻钢中可能是不存在的）及成分局部变化的影响。

## 一般原理

### 氢致裂纹

在某些条件下焊接某些钢时会碰到的一个问题，是氢致裂纹 $\ominus$ 。这种裂纹还有其它一些名称，如焊道下裂纹、冷裂纹，或延迟裂纹。这种裂纹一般在冷却到低于 $93^{\circ}\text{C}$ 的某温度时立刻出现或在焊后几小时之后出现，这个时间取决于钢种、焊接应力的大

$\ominus$  关于补充资料，请参阅美国焊接学会出版的《焊接手册》中译本，第七版，第一卷，1967年，126~193页及 Linnert. G. E. 《焊接冶金》，第三版，第二卷，1976年，250~276页。

小以及钢焊缝和热影响区中的含氢量。延迟裂纹通常在焊件已冷却到环境温度之后产生。在任何情况下，它与热裂纹不同，是冷裂纹，并且是由陷入焊缝金属或热影响区的空穴或错位中溶解的氢所引起的。有时，焊缝金属，当它的屈服强度约在620MPa以下时，可能产生裂纹，不过这种情况是很少出现的。在焊接过程中，氢由焊缝金属向热影响区中扩散，并在此区中引起裂纹。钢的显微组织也是引起裂纹的一个因素。

**引起裂纹的条件** 组织转变硬化产生的应力或接头承受的应力过大，均可引起焊接接头氢致裂纹。这种裂纹与以下三个条件的综合作用有关，即：

- (1) 钢中有氢存在；
- (2) 显微组织为部分的或全部的马氏体；
- (3) 在裂纹敏感区中有拉伸应力存在。

如果这三个条件缺少一个或一个以上，或这三个条件处于低值，则不产生氢致裂纹。

**氢的来源** 氢一般是在焊接过程中带入的。氢的来源可能是填充金属、焊条药皮、焊剂或保护气体中的水分，或者是填充金属或母材表面上的污染物。填充焊丝或焊条，可能在制造过程中被溶解氢污染。

熔融的钢对水蒸气或碳氢化合物在焊接电弧中的分解而可能形成的原子氢，具有很大的溶解度。钢中原子氢处于或接近钢的熔化温度时，扩散速率很高。因此，熔融焊缝金属能很快地从电弧中的热气体中溶入原子氢。氢原子可以很快地从焊缝金属扩散到母材的热影响区中。

在冷却和相变过程中，吸收的氢从铁中逸出，并趋于在显微组织的位错和基体的空穴处集中。这有可能导致铁畸变和产生局部拉伸应力，而应力会累积一起。

**显微组织** 当钢具有马氏体组织时，氢最容易促使裂纹产生。如果有这种显微组织及一定数量的氢存在，只要有比金属正常的结合强度低得多的拉伸应力，就可能引发裂纹。应力的可能

来源，是相变、热收缩、机械拘束或所施加的载荷。一般来说，能在钢中引起裂纹的应力，随含氢量增加而逐渐减小。马氏体对氢致裂纹的敏感性，大多被认为是由于高的局部相变应力所造成的。

钢中的贝氏体对氢致裂纹的敏感性是明显的低。即使贝氏体的硬度接近于显微组织中的任何马氏体的硬度，但是贝氏体中的局部应力是明显的低。

铁素体和高碳马氏体或贝氏体的混合组织，也对氢脆十分敏感。这种显微组织是从奥氏体以一种比钢的临界冷却速度略快些的速度冷却过程中产生的。因此，这样的一种混合显微组织的任何局部区域都易于产生裂纹。因为在热影响区中存在一个冷却速度变化范围，所以在此区中就一定有某一窄区会产生对裂纹敏感的组织。

通过将焊缝金属和热影响区中马氏体的形成减到最小，便可以减小裂纹敏感性。这可以通过控制焊缝的冷却速度来达到。冷却速度取决于板材厚度、预热温度、焊接线能量及焊后热处理。然而，对于某些钢来说，为减少组织中的马氏体而改变焊接工艺，可能会造成焊接接头的某些机械性能的不利的改变。

**应力** 由马氏体相变产生的拉伸应力，可能因以下原因引起的附加应力而加剧：

- (1) 焊缝金属和热影响区的热收缩；
- (2) 焊件结构施予焊接接头上的拘束力；
- (3) 焊接顺序。

通过预热以减慢冷却速度、调整焊接工艺减小线能量，或重新设计焊件或焊接顺序以减小接头的拘束，这样可能会减小这些应力。

**焊道下裂纹** 在淬火钢热影响区中，氢致裂纹是最大的问题。如果所出现的裂纹与焊缝界面有一短距离，在这个特殊部位上的裂纹被称为“焊道下裂纹”，如图 1.1 所示。有时，裂纹始发于热影响区中，但是当它扩展通过未受影响的母材时是沿着某

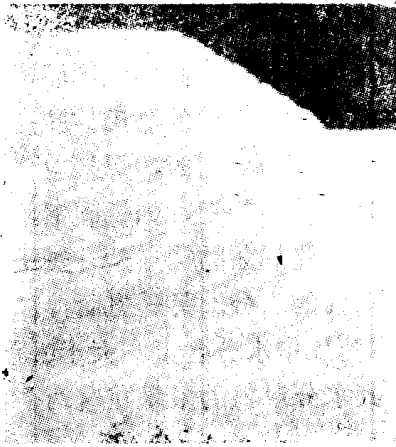


图1.1 在低合金钢焊道中（在钢板焊缝上）的焊道下裂纹  
（10%硝酸腐蚀）（ $\times 8$ ）

些其它的路径。

如上所述，马氏体或贝氏体基体中铁素体的混合组织，似乎对氢脆和氢裂纹具有高的敏感性。随着钢淬硬性的提高，在相距熔合线较大距离的热影响区中易形成这类组织。

**焊缝金属中的裂纹** 焊缝金属中氢致裂纹问题，通常比母材中的要少。这多半是由于一般使用含碳量较低的填充金属的结果。但是，氢会使焊缝金属严重脆化。

在焊缝金属中出现的氢致裂纹的一种形式，是在焊缝金属断裂试样的断口上表现为小的亮点。这些亮点被称为“鱼眼”。鱼眼通常围绕着金属中的某些不连续点，如气孔或非金属夹杂物，其外形就象眼睛中的瞳孔一样。

可以通过采用干燥的低氢焊条或在 $93\sim 704^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内将焊件加热一段时间，使导致在焊缝金属中形成鱼眼的条件减到最小。加热温度较低时，需要的时间就长些。

用药皮中含有纤维素的焊条或用药皮中含水分过多的低氢焊条熔敷的焊缝金属中，可看到微裂纹。这种微裂纹的走向一般横向于焊缝轴线。用干燥的低氢焊条熔敷的焊缝金属不应有微裂纹

存在。

**裂纹的防止** 如果为了获得较高的强度而增加钢中的含碳量或合金含量，因为这时显微组织中的马氏体硬度也提高了，所以钢中容许的氢量就要减少。与此同时，焊接应力趋于提高。例如，含碳量约低于0.15%的某些钢，如低碳钢，可以用E6010或E6011焊条进行焊接。这些焊条的特点是含氢量高，因为其药皮中含有纤维素及3~7%的水分。另一方面，低合金高强度钢，如HY-130<sup>⊖</sup>，必须用药皮中水分含量不大于0.1%的焊条进行焊接。对于药皮焊条，其水分或氢的限量在这两个含量之间变化，这取决于所要焊的钢材。

通过采用以下措施可以控制氢致裂纹：

- (1) 采用产生少量氢或不产生氢的焊接方法或焊条；
- (2) 焊接和热处理相配合，驱氢或产生对氢不敏感的显微组织；
- (3) 采用产生低焊接应力的焊接工艺。

**焊接方法** 采用“低氢”方法可以限制在焊接过程中可能产生的氢。氢的主要来源是手工电弧焊焊条药皮中的纤维素、水分或两者，埋弧焊时焊剂中的水分，以及药芯焊丝或金属芯焊丝的芯部组分中的水分。氢的另外的来源，是吸收了填充金属或母材上的水分、锈或碳氢化合物污染物（油、润滑脂、拉拔丝润滑剂或油漆）。保护气体中混入潮湿的空气或水分，是氢的另一种来源。

用手工电弧焊焊接对裂纹敏感的钢时，推荐采用低氢焊条。但是，必须把焊条的水分含量保持在对焊接某一具体钢种规定的技术条件限度之内。

制作焊条必须将水分限制在允许的范围內，必须与药皮类型和焊缝金属的强度相适应。低氢焊条包装在容器中，此容器具有对药皮类型和用途所必须的防潮条件。

这种焊条如果在相对湿度小于50%的室温下存放，在此容器

⊖ 关于HY-130合金钢的化学成分，请参阅表1.15。



中可以保存数月之久，或在焊条烘箱中放置短的时间。但是，如果包装容器损坏或焊条存放不合适，药皮就可能吸收大量的水分。

为了使焊条药皮中能有最低的含水量，研制了低氢焊条（E××15和E××16）和低氢铁粉焊条（E××18、E××28及E××48）。为保持药皮中的这种低水分水平，密封的容器对熔敷具有552MPa或更高抗拉强度的焊缝金属的焊条是必备的。这种容器也适用于强度级别较低的焊条<sup>⊖</sup>。如果焊条在潮湿气氛中曝露时间很长，就可能吸收大量的水分。曾在大气中曝露过的焊条的水分含量，不能超过相应技术规程规定的极限范围。如果焊条有可能吸入过量的水分，可以通过重新烘干使焊条恢复正常。某些焊条需要在高达427℃温度下再烘干约2h。重新烘干特定焊条所需的合理温度和时间，由焊条曝露于大气中的时间、相对湿度和温度条件来决定。重新烘干需要的合适时间和温度应按焊条制造者的规定。

关于埋弧焊、气体保护电弧焊以及药芯焊丝电弧焊焊丝的现行技术规程，对焊丝或焊剂的水分及氢含量没有规定极限值。焊接法规可对其规定出极限范围，并且可以规定烘干埋弧焊焊剂<sup>⊖</sup>所要求的条件。已被水分或其它含氢物质污染的药芯焊丝，不得用来焊接对氢致裂纹敏感的钢。

热处理 如果在焊接接头中<sup>⊖</sup>有氢致裂纹危险时，应考虑采取预热和后热。在焊接之后，不得有中间冷却，应立即进行后热。后热温度可以采取与预热相同的温度（93~316℃）。后热的保温时间取决于接头的厚度，因为氢扩散到表面的路径长度是一个决

- ⊖ 参阅AWS A5.1-81，“碳钢弧焊焊条的技术规程”，或参阅AWS A5.5-81，“低合金钢弧焊焊条的技术规程”。
- ⊖ AWS D1.1-81，“钢结构焊接法规”，如果包装已损坏，要求最低在121℃下将焊剂烘干1h。在贮料箱中受潮的焊剂上面25.4mm厚的一层和潮湿焊剂必须报废。所有的应用场合都必须遵循这些工艺原则。
- ⊖ 在预热时，必须将金属全截面厚度加热到适当的温度，除非采取了防止裂纹的措施，在焊前或在焊接过程中不得有中间冷却。