

焊接金相图谱

中国机械工程学会焊接学会 编著

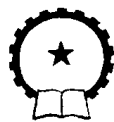


机械工业出版社



焊接金相图谱

中国机械工程学会焊接学会 编著



机械工业出版社

本书是中国焊接学会编著的一本具有本国特色的专业工具书。它是采用国产钢材和焊接材料，由各种焊接方法制备的成套金相接头图谱，全书共有图片1342幅，331套。

本书既反映了我国当前焊接生产的水平，也反映了我国焊接金相的发展水平。它是焊接生产与科研中鉴别组织的不可缺少的工具。它的出版是我国焊接学会为生产服务的具体体现。它为确保焊接质量，提高焊接结构的可靠性提供了依据，也充实了焊接金属学的理论内容。它对我国焊接事业的发展必然会起到积极的推动作用。

本书可供科研单位、高等院校与工厂企业从事焊接、金相的科技人员参考。

焊接金相图谱

中国机械工程学会焊接学会 编著

*

责任编辑 金晓玲

封面设计 田淑文

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 34·插页 4·字数 836千字

1987年7月北京第一版·1987年7月北京第一次印刷

印数 0,001—5,900·定价：19.70元

*

统一书号：15033·6718

《焊接金相图谱》编委会成员

主编 斯重遥

编委 周振丰、张延生、张修智
田万钰、王 钡、包芳涵、
陈 炜、郝世海。

序

建国以来，我国焊接事业得到迅速的发展，目前已广泛应用到各个工业部门。随着现代工业的发展，对焊接质量的要求也越来越高。焊接接头金相与其性能密切相关，是评定质量的依据。通过焊接金相的观察分析，可以推测焊接接头的性能与采用的焊接工艺是否符合要求，从而提出改进焊接工艺的途径。由于我国材料与焊接工艺迅速发展，焊接接头的金相组织的鉴别也越加困难。焊接与金相的科技工作者迫切希望国内有一套符合我国实际的焊接金相图谱作为鉴别组织之用。为了满足上述要求，中国机械工程学会焊接学会于1981年编辑出版规划会议上，决定由焊接学会第Ⅸ专业委员会（“受焊金属的行为”专业委员会）负责编写一本具有我国特色的《焊接金相图谱》。

在全国焊接界同行的关心、支持下，经过三年的努力，终于完成了全书的编写。

编写《焊接金相图谱》是从形态学研究出发，揭示焊接接头这个不均匀实体中金属组织特征的变化。它有助于人们领会由于不同焊接工艺而发生的组织形态的演变，并深入理解焊接工艺条件与焊接接头各区域组织性能变化的关系。本书内容广泛，不仅为确保焊接质量，提高焊接结构的可靠性提供依据，也充实了焊接金属学有关形态学的理论内容。

《焊接金相图谱》的出版是我国焊接学会为生产服务的具体体现。它是编写人员与参加图片制备的工程技术人员辛勤劳动的结晶。他们在完成本职工作的同时，不辞辛劳，不计得失，精益求精地完成了图片的制备。因之，它的出版也是全国焊接界大协作的结果。标志着我国焊接金相已发展到一个新的水平。对提高我国焊接水平与焊接质量以及促进我国整个焊接事业的发展必然会起到积极的推动作用。

中国机械工程学会焊接学会理事长

靳重造

前 言

中国机械工程学会焊接学会第Ⅸ专业委员会受学会的委托，负责编写一本结合我国材料与焊接工艺实际情况的《焊接金相图谱》。为了很好地开展工作，第Ⅸ专业委员会于1982年4月1日成立了以斯重遥研究员为主编，周振丰教授、张延生高级工程师、张修智副教授、田万钰高级工程师、王轶副教授、包芳涵副教授、陈炜工程师、郝世海工程师为编委的编辑委员会。在编委与负责各章节编写人员、责任编辑金晓玲工程师的共同努力下，经过大约三年时间，完成了全书的编写。

由于我国新材料与焊接新技术不断地发展，除了征集一些典型的焊接接头金相图片外，还收集了科研单位、高等院校最新焊接金相科研成果，作为鉴别各种材料在不同焊接工艺条件下形成接头的金相组织以及一些典型的焊接缺陷。

全书分成十章，共有图片1342幅，内容广泛。除了第一章概论，第二章焊接金相技术外，其余各章均为焊接金相图谱。各章按材料划分为碳钢、低合金钢、高合金钢、铸铁、常用有色金属（铝、镁、铜、镍、钛及其合金）、难熔金属（钨、钼、钽、铌、锆及其合金）、异种金属与堆焊。第一章由斯重遥编写；第二章由易蕴琛、姜晓霞编写；第三章由田万钰、王轶编写；第四章由张让二、田万钰编写，其中第二节由王兆清、陈炜编写；第五章由陈炜、于尔靖编写；第六章由彭高峨编写；第七章由张延生、张修智编写，其中第一节由雅文萃、张修智编写，第二、四节由钟祖桂编写，第三节由刘世肖编写，第五节由张延生、郝世海编写；第八章由郝世海、陈晓风编写；第九章由包芳涵编写；第十章由金恒昀编写。各章在以材料分类的基础上，再按不同焊接工艺划分。由于篇幅所限，各章节不能对接头组织的形成与相变机制进行详细地论述，而只作一般概述。为了便于参照图片，对每张图片所属材料成分或牌号、接头形式与部位，经历的焊接工艺、采用的填充材料、浸蚀剂以及组织特征等均有说明。本书可供科研单位、高等院校与工厂企业从事焊接、金相的科技人员参考之用。

国内很多科研单位、高等院校、工厂企业提供了大量图片资料。为了基本补全图片品种并保证图片质量，不少单位对图片进行了反复制备，特别是哈尔滨焊接研究所、金属研究所、北京钢铁研究总院、广州有色金属研究院、宝鸡有色金属加工厂、北京航空材料研究所、上海交通大学、吉林工业大学、北京材料工艺研究所、清华大学、哈尔滨工业大学、广东省焊接学会、江苏省焊接学会及南京市焊接技术开发服务公司等单位在人力、物力上给了大力的支持。在编写过程中，易蕴琛做了大量的图片审理与组织联系工作。对此表示深切的感谢。

本书最后经全国焊接学会第Ⅸ专业委员会组织审查会定稿。由于编者水平及时间所限，难免存在一些缺点与错误，敬请读者不吝指正，以便再版时校正。

《焊接金相图谱》编委会

1985年

目 录

序	
前言	
第一章 概论	1
第二章 焊接金相技术	4
第三章 碳钢焊接	8
§3.1 碳钢焊接	10
3.1.1 A3钢埋弧焊	10
3.1.2 A3钢多层埋弧焊	16
3.1.3 A3钢双面埋弧焊	22
3.1.4 A3钢水下CO ₂ 气体保护焊	24
3.1.5 A3F 钢双面手弧焊	28
3.1.6 A3钢CO ₂ 气体保护焊	32
3.1.7 A3钢筋闪光对焊	36
3.1.8 20钢咬边平焊	38
3.1.9 20钢氩弧焊	42
3.1.10 20钢管手弧焊	44
3.1.11 20钢等离子弧焊	46
3.1.12 20钢双面埋弧焊	48
3.1.13 20钢脉冲等离子弧焊	50
3.1.14 45钢摩擦焊	52
3.1.15 A3-45 A3钢闪光对焊	54
3.1.16 45锻钢真空扩散焊	56
3.1.17 45铸钢真空扩散焊	56
第四章 低合金钢焊接	58
§4.1 低合金高强度钢焊接	62
4.1.1 铜-磷钢CO ₂ 气体保护焊	62
4.1.2 控轧10Ti 钢手弧焊	64
4.1.3 SM-53C 钢手弧焊	66
4.1.4 09MnNb 钢手弧焊	68
4.1.5 16Mn 钢手弧焊	74
4.1.6 16Mn 钢手弧焊(角焊缝)	76
4.1.7 16Mn 钢双丝半自动多层埋弧焊	78
4.1.8 16Mn 钢双丝半自动多层埋弧焊 (大线能量)	82
4.1.9 16Mn 钢水下半自动焊	84
4.1.10 16Mn 桥钢自动埋弧焊	86
4.1.11 16Mn 钢气电垂直自动焊	90
4.1.12 19Mn 5 钢手弧焊	92
4.1.13 19Mn 5 钢自动埋弧焊	96
4.1.14 20MnMoNiNb 钢手弧焊	98
4.1.15 15MnVR 钢手弧焊	102
4.1.16 15MnV 钢多层手弧焊	104
4.1.17 15MnV 钢多层埋弧焊	108
4.1.18 15MoV 钢埋弧焊	112
4.1.19 15MnVN 钢手弧焊(角焊 缝)	114
4.1.20 15MnVN 钢手弧焊(结507)	116
4.1.21 15MnVN 钢调质板手弧焊	118
4.1.22 15MnVN 钢手弧焊 (结507MoV)	122
4.1.23 15MnVN 钢单道埋弧焊	124
4.1.24 15MnVN 钢单道埋弧焊 (大线能量)	128
4.1.25 15MnVN 钢气体保护焊	130
4.1.26 20MnSi 钢筋自动接触电渣焊	132
4.1.27 20MnSi 钢先堆焊后半自动 氩弧焊	136
4.1.28 09MnCuPTi 钢CO ₂ 气体保护焊 (角焊缝)	138
4.1.29 10CrMo 910钢管手弧焊 (吊焊)	142
4.1.30 10CrMo 910钢管手弧焊 (横焊)	144
4.1.31 BHW-38 钢手工对接双面焊	146
4.1.32 BHW-35 钢手工单道堆焊	150
4.1.33 BHW-35 钢电渣焊	156
4.1.34 12CrNiMoV 钢埋弧焊	160
4.1.35 12CrNiMoV 钢热模拟试件	164
4.1.36 12Cr 2 Ni 4 MoV 钢手弧焊 (斜)型抗裂试件	168
4.1.37 14MnMoVN 钢手弧焊(斜V型 抗裂试件, 结507)	168
4.1.38 14MnMoVN 钢手弧焊(斜V型 抗裂试件)	172

- 4.1.39 14MnMoNbB 钢手弧焊(斜y型
抗裂试件) 176
- 4.1.40 14MnMoNbB 钢手弧焊
(角焊缝) 180
- 4.1.41 14MnMoNbB 钢多层手弧焊 182
- 4.1.42 12Ni₂CrMoVB 钢双面多层
自动埋弧焊 184
- 4.1.43 34CrNi3Mo 钢氩弧焊(斜y型
抗裂试件) 188
- 4.1.44 14MnMoB-30CrMnSi 钢管
摩擦焊 190
- 4.1.45 12Cr1MoV 钢管气焊 194
- 4.1.46 12Cr1MoV 钢管手弧焊 194
- 4.1.47 12Cr2MoWVTiB 钢管氩弧焊 196
- 4.1.48 40Si2MnV IV级螺纹钢筋
闪光焊 198
- 4.1.49 3.25%硅钢熔化极氩弧焊 200
- 4.1.50 Q112B高取向变压器钢激光焊 204
- §4.2 低合金超高强度钢焊接 206
- 4.2.1 GC-4 钢手弧焊 206
- 4.2.2 GC-4 钢手弧焊(焊后处理) 208
- 4.2.3 GC-4 钢手弧焊热影响区液化
裂纹 210
- 4.2.4 GC-4 钢摩擦焊 210
- 4.2.5 37SiMnCrMoV 钢脉冲钨极自动
氩弧焊 212
- 4.2.6 30Cr3SiNiMoVA 钢钨极自动
氩弧焊 214
- 4.2.7 30Cr3SiNiMoVA 钢钨极自动
氩弧焊(焊后强化处理) 216
- 4.2.8 45CrNiMoV (D6AC) 钢钨极
自动氩弧焊(板厚2.5mm) 216
- 4.2.9 45CrNiMoV (D6AC) 钢钨极
自动氩弧焊(板厚2.5mm,
焊后处理) 218
- 4.2.10 45CrNiMoV (D6AC) 钢钨极
自动氩弧焊(板厚1.5mm) 220
- 4.2.11 45CrNiMoV (D6AC) 钢钨极
自动氩弧焊(板厚1.5mm,
焊后处理) 220
- 4.2.12 35SiMnCrMoV 钢钨极自动
氩弧焊 222
- 4.2.13 35SiMnCrMoV 钢钨极自动
氩弧焊(焊后处理) 224
- 4.2.14 ZG-28铸钢手弧焊 226
- 第五章 高合金钢焊接** 228
- §5.1 铁素体高合金钢焊接 232
- 5.1.1 00Cr18Mo2 不锈钢钨极氩
弧焊 232
- 5.1.2 0000Cr26Mo1 超纯铁素体不锈
钢钨极氩弧焊 232
- §5.2 奥氏体高合金钢焊接 234
- 5.2.1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢手弧焊 234
- 5.2.2 1Cr18Ni9Ti 不锈钢真空钎焊
(钎料BNi-7) 236
- 5.2.3 1Cr18Ni9Ti 不锈钢真空钎焊
(钎料BNi-4) 236
- 5.2.4 00Cr18Ni9Ti 不锈钢自动埋
弧焊 238
- 5.2.5 00Cr18Ni9Ti 不锈钢钨极氩
弧焊 238
- 5.2.6 00Cr18Ni8 与 0Cr18Ni5Nb 钨
极氩弧焊 238
- 5.2.7 1Cr18Ni9Ti 不锈钢真空电子束
焊 238
- 5.2.8 00Cr18Ni12Mo2 不锈钢熔化极
氩弧焊 240
- 5.2.9 1Cr18Ni12Mo2Ti 不锈钢手弧焊 240
- 5.2.10 1Cr18Ni12Mo3Ti 不锈钢手弧焊 242
- 5.2.11 00Cr20Ni24Si4Nb 不锈钢氩
弧焊 244
- 5.2.12 4Cr28Ni48W5 奥氏体铸造耐
热合金钨极氩弧焊 246
- 5.2.13 00Cr20Ni25Mo4.5Cu 不锈钢
手弧焊 248
- 5.2.14 Ni37CrTiAl 合金脉冲微束等
离子弧焊 248
- 5.2.15 15Mn26Al4 低温钢手弧焊 250
- §5.3 铁素体-奥氏体双相高合金钢焊接 250
- 5.3.1 0Cr17Mn12Mo2N 不锈钢手弧焊 250
- 5.3.2 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈
钢手弧焊 252
- 5.3.3 00Cr18Ni5Mo3Si2Nb 双相不
锈钢钨极氩弧焊 254

5.3.4	00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢 钨极氩弧焊·····	256	6.1.14	锰镍黄铜氧乙炔焰钎焊HT 15-32 铸铁·····	298
5.3.5	00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢 手弧焊·····	258	6.1.15	闪光对焊HT 20-40 铸铁·····	298
5.3.6	00Cr25Ni6Mo3WCuN 双相 不锈钢手弧焊·····	258	6.1.16	铸铁焊接缺陷·····	298
§ 5.4	马氏体高合金钢焊接·····	260	§ 6.2	球墨铸铁焊接·····	302
5.4.1	9 Ni 钢手弧焊·····	260	6.2.1	铸铁芯球墨铸铁焊条手 弧焊QT 60-2 球墨铸铁·····	302
5.4.2	20Ni9Co5MoCrTi 马氏体时 效钢钨极氩弧焊·····	262	6.2.2	低碳钢芯球墨铸铁焊条手弧焊 QT 60-2 球墨铸铁·····	304
5.4.3	1Cr11Ni2W2Mo2V 马氏 体热强钢钨极氩弧焊·····	264	6.2.3	低碳钢芯球墨铸铁焊条手弧焊 QT 50-5 球墨铸铁·····	304
5.4.4	0Cr13Ni5Mo 高强度耐蚀不锈 钢手弧焊·····	266	6.2.4	低碳钢芯球墨铸铁焊条手弧焊 QT 42-10 球墨铸铁·····	306
5.4.5	00Ni18Co9Mo5Ti18Ni (250级) 马氏体时效钢钨极氩弧焊·····	268	6.2.5	球墨铸铁气焊丝组织·····	308
5.4.6	00Cr13Ni6MoNb 钢钨极氩 弧焊·····	272	6.2.6	气焊QT 60-2 球墨铸铁·····	308
第六章	铸铁焊接·····	274	6.2.7	镍铁芯焊条手弧焊QT 42-10 球墨铸铁·····	310
§ 6.1	灰口铸铁焊接·····	278	6.2.8	高钒钢焊条手弧焊QT 50-5 球墨铸铁·····	312
6.1.1	钢芯石墨化焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	278	6.2.9	普通低碳钢焊条手弧焊球 墨铸铁·····	312
6.1.2	铸铁芯石墨化焊条手弧焊 HT 20-40 铸铁·····	282	6.2.10	闪光对焊QT 50-5 球墨铸铁·····	314
6.1.3	气焊冷焊HT 20-40 铸铁·····	282	6.2.11	电阻对焊QT 50-5 球墨铸铁·····	314
6.1.4	气焊热焊HT 20-40 铸铁·····	284	§ 6.3	其它铸铁焊接·····	316
6.1.5	板极电渣焊HT 20-40 铸铁·····	286	6.3.1	普通低碳钢焊条手弧焊KT 35-10 可锻铸铁·····	316
6.1.6	普通低碳钢焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	286	6.3.2	镍铁芯焊条手弧焊KT 35-10 可锻铸铁·····	316
6.1.7	纯镍芯焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	288	6.3.3	氧乙炔焰钎焊可锻铸铁·····	318
6.1.8	镍铁芯焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	290	6.3.4	铸铁芯蠕墨铸铁焊条手弧焊 蠕墨铸铁·····	318
6.1.9	镍铜芯焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	290	6.3.5	低碳钢芯球墨铸铁焊条手弧 焊蠕墨铸铁·····	320
6.1.10	高钒钢焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	292	6.3.6	铸铁芯焊条手弧焊钒钛合金 铸铁·····	320
6.1.11	铜钢焊条手弧焊HT 20-40 铸铁·····	294	第七章	常用有色金属焊接·····	322
6.1.12	二氧化碳气体保护焊HT 20-40 铸铁·····	294	§ 7.1	铝及铝合金焊接·····	326
6.1.13	黄铜氧乙炔焰钎焊HT 15-32 铸铁·····	296	7.1.1	L2 工业纯铝钨极氩弧焊·····	326
			7.1.2	L1 与LF21 铝合金真空钎焊 (角焊缝)·····	328
			7.1.3	LF21 铝合金气焊及交流	

- 钨极氩弧焊(角焊缝).....328
- 7.1.4 LF3 铝合金交流钨极氩弧焊.....330
- 7.1.5 LF21 真空接触反应钎焊.....332
- 7.1.6 LD10CS 铝合金熔化极直流
脉冲氩弧焊.....332
- 7.1.7 LD10CS 铝合金高频直流脉
冲氩弧焊.....334
- 7.1.8 LD10CS 铝合金钨极直流氩
弧焊.....336
- 7.1.9 LD10CS 铝合金熔化极脉冲
氩弧焊.....338
- 7.1.10 LY12CZ 铝合金交流自动等
离子弧对焊.....340
- 7.1.11 LY12CZ 铝合金交流手工钨
极脉冲氩弧焊.....342
- 7.1.12 LY12CZ 铝合金三层点焊.....344
- 7.1.13 Al-Mg-Mn-Cr-Ti 铝合金交流
钨极氩弧焊.....346
- 7.1.14 Al-Zn-Mg 合金连续闪光对焊.....348
- 7.1.15 LD11R 铝合金真空电子束焊.....350
- 7.1.16 Al-Cu-Mn 铝合金半熔化极
氩弧焊.....350
- 7.1.17 ZL101 铸造铝合金钨极氩
弧焊.....352
- 7.1.18 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金钨极
手工氩弧焊.....354
- 7.1.19 ZL1201 铸造铝合金交流钨
极氩弧焊.....356
- §7.2 镁合金焊接.....358
- 7.2.1 MB3 镁合金交流钨极氩弧焊.....358
- 7.2.2 MB8 镁合金钨极氩弧焊.....358
- 7.2.3 ZM-5 铸造镁合金钨极氩弧焊.....360
- §7.3 铜及铜合金焊接.....362
- 7.3.1 T2 紫铜氧乙炔焊.....362
- 7.3.2 T2 紫铜埋弧焊.....364
- 7.3.3 T2 紫铜熔化极氩弧焊.....364
- 7.3.4 T1 紫铜钨极脉冲氩弧焊.....366
- 7.3.5 T2 紫铜真空电子束焊.....368
- 7.3.6 T1 紫铜真空钎焊.....368
- 7.3.7 TU2 无氧铜扩散焊(氢保护).....370
- 7.3.8 T2 紫铜点焊.....372
- 7.3.9 H62 黄铜点焊.....372
- 7.3.10 H62 黄铜缝焊.....372
- 7.3.11 H62 黄铜等离子弧焊.....374
- 7.3.12 H62 黄铜熔化极氩弧焊.....376
- 7.3.13 B20 白铜钨极氩弧焊.....376
- 7.3.14 QA19-4 铝青铜钨极氩弧焊.....378
- 7.3.15 QSn4-3 锡青铜熔化极氩弧焊.....378
- 7.3.16 ZQA19-4 铸造铝青铜钨极
氩弧焊.....380
- 7.3.17 ZQA12-8-3-2 铸造铝青铜
钨极氩弧焊补焊.....380
- §7.4 镍及镍合金焊接.....382
- 7.4.1 纯镍钨极氩弧焊.....382
- 7.4.2 GH30 镍基合金缝焊.....384
- 7.4.3 GH140 铁镍基合金缝焊.....386
- 7.4.4 00Ni78Cr7Mo12Ti 合金熔化
极氩弧焊.....388
- 7.4.5 GH18 镍基合金钨极氩弧焊.....390
- 7.4.6 GH150 铁镍基合金钨极氩
弧焊.....392
- 7.4.7 GH99 镍基合金钨极氩弧焊.....392
- 7.4.8 GH99 镍基合金钨极氩弧焊.....394
- 7.4.9 K6C 铸造镍基合金钨极氩弧
补焊.....396
- 7.4.10 K6C 铸造镍基合金钨极氩弧
补焊接头热裂纹.....398
- 7.4.11 K18 铸造镍基合金钨极氩弧
焊.....400
- 7.4.12 K18 铸造镍基合金真空扩散
焊.....402
- 7.4.13 K3 铸造镍基合金真空扩散
钎焊.....402
- §7.5 钛及钛合金焊接.....404
- 7.5.1 TA7 钛合金熔化极氩弧焊.....404
- 7.5.2 TA2 工业纯钛钨极脉冲氩弧焊.....404
- 7.5.3 高纯钛钨极脉冲氩弧焊.....406
- 7.5.4 TA2 工业纯钛等离子弧焊.....408
- 7.5.5 TA1 工业纯钛钨极氩弧焊.....410
- 7.5.6 TA7 钛合金点焊.....412
- 7.5.7 TC1 钛合金钨极氩弧焊.....414
- 7.5.8 TC4 钛合金钨极氩弧焊.....414
- 7.5.9 TC4 钛合金微束等离子弧焊.....416
- 7.5.10 TC4 钛合金等离子弧焊.....418

7.5.11	TC4钛合金真空扩散焊	418	9.1	复材1Cr18Ni9Ti不锈钢与 基材A3钢爆炸焊	456	
7.5.12	TC4钛合金摩擦焊	420	9.1.1	4Cr14Ni14W2Mo高合金钢 与40Cr钢摩擦焊	456	
7.5.13	TC4钛合金真空电子束焊	422	9.1.3	4Cr9Si2钢与Cr21Ni4N钢 闪光对焊	456	
7.5.14	Ti-6Al-4V铸造钛合金钨极 氩弧焊补焊	422	9.1.4	45钢与W4Cr4V2高速钢非 真空扩散焊	456	
7.5.15	Ti10Mo8V1Fe3.5Al钛合金 钨极氩弧焊	424	§9.2	异种有色金属焊接	458	
7.5.16	TB-2钛合金钨极氩弧焊	426	9.2.1	紫铜与Ti-6Al-4V钛合金真 空钎焊	458	
第八章 难熔金属及其合金焊接			428	9.2.2	紫铜与GH128镍基合金真空 钎焊	458
§8.1	纯钨焊接	430	9.2.3	Ti-6Al-4V钛合金与镀Pd的 GH128镍基合金真空扩散钎焊	460	
8.1.1	纯钨真空电子束焊	430	9.2.4	复材T2紫铜与基材L6铝爆 炸焊	460	
§8.2	钼及钼合金焊接	432	§9.3	黑色金属与有色金属焊接	462	
8.2.1	纯钼真空电子束焊	432	9.3.1	纯钛与纯铁钨极氩弧焊	462	
8.2.2	Mo-0.5Ti合金真空电子束焊	432	9.3.2	复材QA1-2铝青铜与基材A3 钢爆炸焊	462	
8.2.3	钼脉冲凸焊	434	9.3.3	紫铜与镀Ni的1Cr18Ni9Ti不 锈钢真空钎焊	464	
8.2.4	Mo-Ti-Zr合金钨极脉冲氩弧 焊	436	9.3.4	复材紫铜与基材A3钢爆炸焊	464	
§8.3	钽及钽合金焊接	438	9.3.5	复材B30铜与基材12CrNiMoV 钢爆炸焊	464	
8.3.1	纯钽钨极氩弧焊	438	9.3.6	GH302与GH128高温合金手 工氩弧焊	466	
8.3.2	Ta-10W合金真空电子束焊	438	9.3.7	GH44高温镍基合金与 1Cr18Ni9Ti不锈钢缝焊	468	
§8.4	铌及铌合金焊接	440	9.3.8	GH44高温镍基合金与 1Cr18Ni9Ti不锈钢点焊	468	
8.4.1	纯铌钨极氩弧焊	440	9.3.9	纯镍与1Cr18Ni9Ti不锈钢手 工钨极氩弧焊	470	
8.4.2	Nb-10W-2.5Zr合金真空电 子束焊	442	9.3.10	T2紫铜与A3钢钨极自动氩 弧焊	470	
8.4.3	Nb-10W-2.5Zr合金真空充 氩脉冲自动氩弧焊	442	9.3.11	铜钢复合板混合气体保护焊	472	
8.4.4	Nb-10W-Zr-0.1C合金真空 电子束焊	442	§9.4	其它异种材料焊接	474	
8.4.5	Nb-10W-2.5Zr合金局部保 护钨极自动氩弧焊	444	9.4.1	硬质合金与Ti-6Al-4V钛合 金真空钎焊	474	
8.4.6	Nb-10Hf-Ti合金局部保护 钨极自动氩弧焊	446	9.4.2	复材Ag与基材T3紫铜爆炸焊	474	
8.4.7	Nb-10W-10Ta合金真空充氩 自动焊	448	9.4.3	复材Zr与基材T2紫铜爆炸焊	474	
§8.5	锆及锆合金焊接	448				
8.5.1	纯锆钨极氩弧焊	448				
8.5.2	Zr-2.5Sn合金真空电子束焊	450				
8.5.3	Zr-1.5Sn-0.21Fe-0.12Cr合 金真空电子束焊	450				
8.5.4	Zr-2.5Nb合金真空电子束焊	452				
第九章 异种材料焊接			454			
§9.1	异种黑色金属焊接	456				

9.4.4	柯伐合金与99氧化铝陶瓷真空扩散焊	474	10.2.20	堆547焊条在A3钢上手弧焊堆焊	492
第十章	堆焊	476	10.2.21	堆547Mo焊条在A3钢上手弧焊堆焊	492
§10.1	碳素钢堆焊	478	§10.3	合金铸铁堆焊	492
10.1.1	50钢水蒸汽保护振动堆焊		10.3.1	堆667焊条在合金钢上手弧焊堆焊	492
10.1.2	60钢熔嘴电渣堆焊	478	10.3.2	丝101在合金钢上钨极氩弧焊堆焊	492
§10.2	合金钢堆焊	480	10.3.3	丝101在合金钢上等离子弧焊堆焊	492
10.2.1	堆112焊条在A3钢上手弧焊堆焊	480	10.3.4	堆667铸造圈在合金钢上高频感应堆焊	492
10.2.2	堆172焊条在A3钢上手弧焊堆焊	480	10.3.5	堆667焊条在A3钢上手弧焊堆焊	494
10.2.3	堆212焊条在A3钢上手弧焊堆焊	480	10.3.6	堆687焊条在A3钢上手弧焊堆焊	494
10.2.4	堆397焊条在A3钢上手弧焊堆焊	480	10.3.7	NJ-1C粉末在65Mn钢上高频感应堆焊	494
10.2.5	堆337焊条在A3钢上手弧焊堆焊	482	10.3.8	y-1堆焊焊条在A3钢上手弧焊堆焊	496
10.2.6	4Cr2W8V药芯焊丝在16Mn钢上自动埋弧焊堆焊	482	10.3.9	y-1堆焊层经激光表面重熔处理	496
10.2.7	3Cr2W8V焊丝陶质焊剂自动埋弧焊堆焊	484	10.3.10	F-1堆焊层磨蚀表面形貌	496
10.2.8	轧辊堆焊焊条手弧焊堆焊	484	10.3.11	堆642焊条在A3钢上手弧焊堆焊	498
10.2.9	KJ-29堆焊焊条手弧焊堆焊	484	10.3.12	堆642堆焊层磨蚀表面形貌	498
10.2.10	堆327焊条在A3钢上手弧焊堆焊	486	10.3.13	KJ-6堆焊焊条在A3钢上手弧焊堆焊	498
10.2.11	堆507焊条在A3钢上手弧焊堆焊	486	10.3.14	Cr-W-Mo堆焊焊条在A3钢上手弧焊堆焊	498
10.2.12	堆517焊条在A3钢上手弧焊堆焊	486	10.3.15	药芯焊丝电渣重熔组织	498
10.2.13	H3Cr13焊丝自动埋弧焊堆焊	488	§10.4	铁基合金粉末堆焊	500
10.2.14	KJ2-14堆焊焊条在A3钢上手弧焊堆焊	488	10.4.1	Fe-30合金粉末氧乙炔焰喷熔	500
10.2.15	堆256焊条在A3钢上手弧焊堆焊	488	10.4.2	Fe-30A合金粉末氧乙炔焰喷熔	500
10.2.16	堆266焊条在高锰钢上手弧焊堆焊	488	10.4.3	粉325粉末等离子弧堆焊	500
10.2.17	堆277焊条在A3钢上手弧焊堆焊	488	10.4.4	粉305粉末氧乙炔焰喷熔	500
10.2.18	KJ-25焊条在A3钢上手弧焊堆焊	488	10.4.5	50%Fe-Cr-B-Si+50%Ni-Cr-B-Si氧乙炔焰喷熔	502
10.2.19	Cr28Ni11带极在A3钢上自动埋弧焊堆焊	490	10.4.6	Fe-50合金粉末等离子弧堆焊	502
			§10.5	钴基合金堆焊	504

10.5.1	堆842焊条在A3钢上手弧焊 堆焊·····	504	乙炔焰喷熔·····	514	
10.5.2	丝111在合金钢上氧乙炔火 焰堆焊·····	504	10.6.7	Ni 35合金粉末在A3钢上氧 乙炔焰喷熔·····	514
10.5.3	Co-Cr-W焊丝在1Cr13钢上 脉冲等离子弧堆焊·····	504	10.6.8	H00Cr15Ni75Fe5焊丝手工 钨极氩弧焊堆焊·····	516
10.5.4	Co-Cr-W堆焊层共晶碳化物 形貌·····	504	10.6.9	Ni-Cr-B-Si加碳化硼粉末氧 乙炔焰喷熔·····	516
10.5.5	Co-Cr-W脉冲等离子弧堆焊 层激光表面处理·····	506	10.6.10	Ni 31粉末在A3钢上氧乙炔 焰喷熔·····	518
10.5.6	Co3合金粉末在3Cr2W8钢 上等离子弧堆焊·····	506	10.6.11	粉102铁在A3钢上氧乙炔 焰喷熔·····	518
10.5.7	堆822焊条在A3钢上手弧焊 堆焊·····	508	10.6.12	NiWC 25粉末在45钢上氧 乙炔焰二步法喷熔·····	518
10.5.8	丝113在45钢上氧乙炔焰堆焊··	508	10.6.13	Ni-Cr-Mn-Mo-Nb镍基 合金带极埋弧焊堆焊·····	518
10.5.9	Co42合金粉末在45钢上等离 子弧堆焊·····	510	§ 10.7	碳化钨堆焊·····	520
10.5.10	Co50合金粉末在45钢上氧乙 炔焰喷熔·····	510	10.7.1	碳化钨氩弧焊堆焊(KJ) 管焊条)·····	520
10.5.11	丝111在M17G铸造叶片上 氩弧焊堆焊·····	512	10.7.2	碳化钨氩弧焊堆焊(TB) 管焊条)·····	520
§ 10.6	镍基合金堆焊·····	512	10.7.3	碳化钨氩弧焊堆焊(KJ) 管焊条)·····	520
10.6.1	Ni-Cr-B-Si合金粉末等离子 弧堆焊·····	512	10.7.4	碳化钨氧乙炔焰堆焊·····	520
10.6.2	Ni 25合金粉末在45钢上氧乙 炔焰喷熔·····	512	§ 10.8	紫铜堆焊·····	524
10.6.3	Ni 35合金粉末在45钢上氧 乙炔焰喷熔·····	512	10.8.1	丝201在A3钢上氩弧焊堆焊··	524
10.6.4	Ni 60合金粉末在45钢上氧 乙炔焰喷熔·····	514	§ 10.9	堆焊合金粉末·····	526
10.6.5	Ni 62合金粉末在45钢上氧 乙炔焰喷熔·····	514	10.9.1	Co50粉末·····	526
10.6.6	Ni 51合金粉末在A3钢上氧		10.9.2	Co42粉末·····	526
			10.9.3	Ni60粉末·····	526
			10.9.4	Fe30粉末·····	526
			附录	图片制作者单位及姓名表·····	527
				彩照图 1 ~ 16	

第一章 概 论

金属材料的性能与其金相组织有密切的联系。为了发挥材料的优异性能，一般通过热处理或冷加工强化工艺使材料的金相组织合乎性能的要求。经过热处理或冷加工强化的材料在焊接过程中，母材性能不可避免地会受到损害。母材在焊接热循环下其组织与性能发生变化的特殊区域称为焊接热影响区。焊接接头，包括焊缝与母材热影响区的性能与其金相组织密切相关，而接头的金相组织决定于母材成分与采用的焊接工艺。人们往往从接头金相组织来推测接头的性能并判断选用的焊接工艺包括焊接方法、焊接参数与焊接材料是否合理。正确的焊接工艺应该尽量不损害或少损害母材的性能。

熔焊在各个工业部门中应用最广也是最主要的焊接工艺。熔焊形成的焊接接头金相组织也较其他焊接工艺复杂。掌握熔焊接头组织及其形成过程将有助于了解其他焊接工艺形成接头的金相组织。现以熔焊为例，对焊接接头即焊缝金属、熔合区与热影响区的形成过程及其组织作一概略的论述。

一、焊缝金属

熔焊形成的焊接熔池的凝固过程是通过晶体成核与长大的机制进行。熔池边界的母材晶粒表面成为新相晶核生长的基底。焊缝金属柱状晶与母材晶粒相联接。这种与母材晶粒共同形成的结晶称为联生结晶。柱状晶相当于熔池边界的母材晶粒的外延生长，因之与联生结晶相联的母材的晶粒尺寸，也就是焊缝柱状晶的尺寸。在焊接热循环下，对过热敏感的母材必然产生粗大的焊缝柱状晶。选择合适的焊接热循环是防止母材晶粒过热粗化，获得较细的焊缝柱状晶的关键。

晶核的成长是通过二维成核的方式长大。形成二维成核的几率与组分过冷度、熔池边界母材的晶粒取向有关。二维成核只有在原子排列最密的晶面上最易形成。在焊缝边界作为晶核的母材晶粒是各向异性的。结晶柱轴背向最大散热方向的晶粒最利于成核生长。

平面晶为平滑界面，只生成在极纯的液态金属或温度梯度大于平衡凝固温度曲线，不形成组分过冷情况下的液态合金。

胞状晶是在较大温度梯度，较小组分过冷度以及界面成长速度相当慢的情况下生成的。它是由相互平行的棒状体组成，其横截面似六角蜂窝，主轴与成长方向一致。

当界面液相有较大过冷度时，胞状成长过渡到“台阶”方式成长，造成表面凸起择优生长，形成枝晶。它的形成是由于凝固界面溶质偏析引起的。枝晶的间距决定于溶质浓度分配系数 K_0 与凝固速度。换言之，溶质的偏析系数的绝对值 $|1 - K_0|$ 越大，凝固速度越大，则枝晶间距越小。当每个枝晶与邻近生长的枝晶接触时即停止生长。枝晶的接触面便成为两个晶体的晶界。晶粒就是每个晶核形成的晶体。晶界是由一个取向的晶粒过渡到另一个取向的晶粒的分界面。枝晶成长方向同熔池形状与焊速有关。一般焊接速度下，枝晶朝向焊缝中心并偏向焊接方向成长，形成“偏向晶”。高速焊接如高压真空电子束焊接生成的焊缝枝晶从焊缝边界成对地，几乎不变方向地生长，形成“定向晶”。

凝固结晶成长的形态与组分过冷有密切关系。随着温度梯度的降低，凝固速度的增大，

组分过冷度变大，焊缝结晶形态依次发展为平面晶、胞状晶、胞状枝晶、枝晶与等轴枝晶等组织形态。

焊接工艺参数直接影响熔池温度的梯度，冷却速度、形状与尺寸以及熔池的冶金过程。因之，最终影响焊缝金属凝固组织的形态。当热输入小时，熔池边缘区温度梯度大，而结晶速度比中心区低，组分过冷度小，这样使焊缝金属倾向胞状晶或胞状枝晶长大。当热输入大时，如电渣焊，熔池边缘区温度梯度小，组分过冷度大，导致该区焊缝金属多数按枝晶长大，形成短粗的柱状晶。焊接工艺通过接头形式，焊接参数，填充金属的选择等可以改变熔池温度梯度、冷却速度与形状尺寸，从而达到控制焊缝晶体成长方向、晶体形状与成分的不均匀性。

二、熔合区

熔化焊接头用通常浸蚀方法一般只能显示焊缝熔合线与热影响区。这样显示的熔合线，实际上不是真实熔合线。萨维奇 (W. F. Savage) 等把熔焊的焊缝划分为混合熔化区、未混合熔化区与半熔化区。未混合熔化区为焊缝边缘的母材经历了熔化、凝固过程，但未被混合的焊缝区，其成分与母材同。焊缝金属与母材成分相差越大，未混合区也就越易于显示。近缝区母材晶粒因导热不同与溶质分布的不均匀，导致边界各点具有不同的有效熔化温度。这些近缝区边界部位在焊接峰值温度下，处在有效液相线与固相线之间，造成局部熔化与局部不熔化的半熔化区。熔化区是母材到焊缝的过渡区。它包括未混合熔化区与半熔化区。根据以上划分，真实熔合线在未混合熔化区与半熔化区之间，是实际焊接热影响区与焊缝的边界线。

熔合区无论在化学成分上或组织上都有明显的不均匀性，为接头最薄弱的环节，往往是产生脆断与焊接裂纹的根源。

三、焊接热影响区

虽然热影响区相变与一般热处理相变基本原理相同，但前者相变机理要比后者复杂。焊接相变不仅在连续加热、冷却速度不断变化下进行，而且在热应力、拘束应力与相变应力等不均匀应力场中进行。因之，是一个不平衡的相变过程，特别是近缝区相变，由于过热并在很短时间内进行，使相变的不平衡性更为突出。近缝区各部位由于在不同时间内经历了不同峰值温度，导致相变的不均匀性与相变应力。另外，近缝区晶界偏析与液化也影响着相变的进行。

母材热影响区各部位的组织与性能决定于母材的成分、状态以及该处所经历的焊接热循环、应力、应变。材料有没有重结晶对焊接热循环反应不同。因之，形成的焊接热影响区也不同。

(一) 具有重结晶材料的焊接热影响区

具有重结晶的纯金属或单相合金在熔焊情况下，焊接热影响区可分为粗晶区、细晶区与再结晶区。粗晶区或过热区位于晶粒迅速粗化温度以上的区域。正常相变区或细晶区位于晶粒迅速长大温度与金属重结晶温度之间的区域。再结晶区位于重结晶温度与再结晶温度之间的区域。

具有重结晶多相合金的焊接热影响区组织远比单相合金复杂。如合金结构钢在熔焊条件下，焊接热影响区按经历焊接热循环不同可分为五个区域：(1)半熔化区在有效固相线与有效液相线之间；(2)粗晶区在固相线与奥氏体晶粒迅速长大温度之间；(3)完全重结晶区或

细晶区在奥氏体晶粒迅速长大温度与铁素体、珠光体全部转化为奥氏体温度 (A_{c1}) 之间:

(4) 不完全重结晶区在 A_{c3} 与开始由铁素体、珠光体转变为奥氏体相变温度 A_{c1} 之间:

(5) 回火区取决于焊前热处理状态。调质钢在 A_{c1} 与焊前该钢回火温度之间形成软化区。关于低合金钢热影响区相变与组织细节将在第三章中论述。

(二) 不发生重结晶材料的焊接热影响区

不发生重结晶的纯金属或单相合金在退火状态下, 焊接时只有晶粒粗化区。冷加工的纯金属或单相合金焊接时有再结晶软化区。

不发生重结晶的多相合金的焊接热影响区基本可分为固溶区与相析出区, 后者在时效强化铝合金中为过时效区或软化区。在 18-8 铬镍奥氏体不锈钢中则为敏化区。

第二章 焊接金相技术

焊接接头的化学成分与金相组织很不均匀，特别是异种金属焊接接头的不均匀性更为突出。这是焊接金相分析中一个主要特点，也是比铸造、压力加工和热处理等金相分析更为困难之处。因此，操作时必须细心，有时还要采用一些特殊的技术，才能获得满意的结果。

焊接金相与一般金相分析一样包括样品的制备、组织观察与鉴别以及照像等几个相互关联的环节，基本要求如下：

一、金相样品的制备

金相样品的制备包括取样、镶嵌、标记、磨光与抛光、清洗及浸蚀等一系列操作过程。一个优良的金相样品必须达到：

- (1) 不能有加工硬化或其它使组织模糊的表面层；
- (2) 不能有假组织；
- (3) 所有要观察的视场内一定要平，其凸凹度不能超过光学显微镜的景深；
- (4) 不能有磨痕或非金属夹杂物、第二相剥落等；
- (5) 浸蚀方法得当。

因此，必须对样品制备的各个环节进行严格的控制。

(一) 取样

样品要根据金相分析的目的来选取纵向剖面，或横向截取。取样的部位一定要有典型性和代表性，要包含能准确反映所研究问题的全部信息。排除偶然的、局部的缺陷或假像。焊接接头金相样品一般应包括焊缝金属、热影响区和母材等三个部分。

取样的方法很多，可分为四类：

- (1) 机械切割 包括砂轮切割及锯、刨、车、铣等；
- (2) 火焰切割；
- (3) 电弧切割 包括电火花及线切割等；
- (4) 电化学切割 现已应用的有酸铣、酸锯和酸喷射切割等。

应用最广的是机械切割。从大件或结构上取样，一般先用火焰切割，再用其它方法去掉受火焰加热影响的部分。电弧和电火花切割速度很慢，多用于特硬材料、精密样品的切取。电化学切割可获得很光滑的表面，对样品无任何有害影响，有时不需抛光即可直接进行浸蚀。无论用什么方法取样，必须避免受热和冷加工硬化引起组织的变化。

(二) 镶嵌与夹持

当样品形状不规则，尺寸较小，质地较软或必须观察边缘处的组织时，需采用机械夹持装置或镶嵌于电木粉和塑料中。机械夹持是将样品夹固于管子或夹板内。管子与夹板的材料最好与样品相同，以免因硬度不同而影响抛光。镶嵌时一般要加热至150℃左右。也可镶嵌于低熔点合金（Bi 50%，Pb 25%，Si 12.5%，Cd 12.5%）或硫磺中。如果样品不能受热，则可采用室温固化环氧树脂镶嵌。

(三) 标记