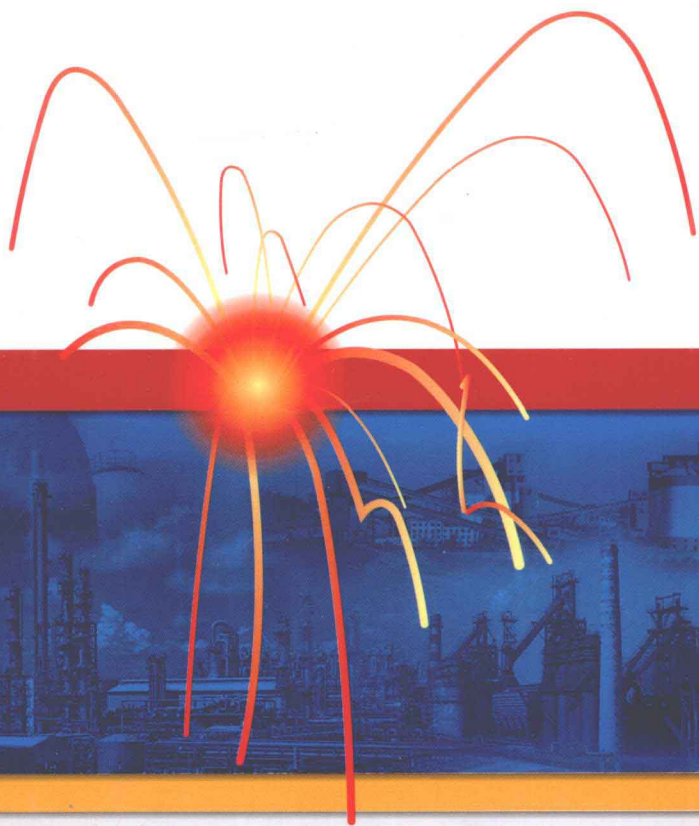


异种金属的焊接

史春元 于启湛 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



异种金属的焊接

史春元 于启湛 编著



机械工业出版社

本书简要地介绍了异种金属材料的焊接性；较详细地讨论了异种钢之间、异种非铁金属之间、钢与非铁金属之间、双金属或多金属复合板之间的焊接等。

本书可供高等院校焊接专业师生、科研机构的焊接研究人员、新产品制造和维修的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

异种金属的焊接/史春元,于启湛编著. —北京:
机械工业出版社, 2012. 3
ISBN 978 - 7 - 111 - 37251 - 6

I. ①异… II. ①史…②于… III. ①异种金属焊接
IV. ①TG457. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 013498 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吕德齐 责任编辑: 吕德齐 张淑杰

版式设计: 霍永明 责任校对: 任秀丽

封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 5 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.5 印张 · 518 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 37251 - 6

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010) 88379733

社服务中心: (010) 88361066

网络服务

销售一部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着制造业的发展和产业需求的多元化,对材料也提出了更高、更复杂的要求。既要满足设备的实际需求,又要降低成本,达到经济效益的最大化。要满足这些要求,往往不是一种材料所能实现的。

异种材料焊接是制造业发展过程中必然会遇到的问题,技术难度较大,焊接过程也十分复杂。因此在本书的编写中,力图在理论上讲清楚,在技术上贴近实际,给读者提供更多的资料,使本书既适合高等院校的焊接专业师生和科研单位的焊接研究人员参考,又适合从事产品设计和制造的工程技术人员使用。

本书简要地介绍了异种金属材料的焊接性;较详细地讨论了异种钢之间、异种非铁金属之间、钢与非铁金属之间、双金属或多金属复合材料之间的焊接等。

本书可供高等院校机械类焊接专业师生、科研机构、新产品制造和维修的技术人员参考。由于水平所限,加之资料浩繁,难免有错误、不足之处,敬请广大读者指正。若本书对您稍有裨益,不胜荣幸。

对本书所引用资料的国内外作者表示敬意和感谢!

编者于大连交通大学

目 录

前言

第1章 异种金属的焊接性 1

1.1 异种金属焊接性的复杂性 1

1.2 根据材料的固有性能分析异种金属的焊接性 1

1.2.1 根据元素的二元合金相图分析异种金属的焊接性 1

1.2.2 根据物理性能分析异种金属的焊接性 7

1.2.3 根据化学性能分析异种金属的焊接性 10

1.3 根据焊接方法分析异种金属的焊接性 12

1.3.1 异种金属熔焊的焊接性 12

1.3.2 异种金属电阻焊的焊接性 14

1.3.3 异种金属钎焊的焊接性 14

1.3.4 异种金属扩散焊的焊接性 15

1.3.5 异种金属摩擦焊的焊接性 16

1.3.6 异种金属压焊的焊接性 16

1.3.7 异种金属爆炸焊的焊接性 17

1.4 异种金属焊接接头的均匀性 18

1.4.1 化学成分的不均匀性 18

1.4.2 金属组织的不均匀性 18

1.4.3 接头性能的不均匀性 18

1.4.4 应力分布的不均匀性 18

参考文献 19

第2章 异种钢的焊接 20

2.1 概述 20

2.1.1 焊接方法的选择 20

2.1.2 焊接材料的选择 20

2.1.3 焊接参数的选择 21

2.2 异种钢的焊接特点 33

2.2.1 异种钢形成焊接接头的可能性 33

2.2.2 异种钢熔焊的焊接性 34

2.3 异种耐热钢之间的焊接 38

2.3.1 异种低合金耐热钢之间的焊接组合 38

2.3.2 珠光体钢之间的焊接 38

2.3.3 低合金耐热钢与高合金耐

热钢的焊接 42

2.4 珠光体钢与奥氏体不锈钢的焊接 44

2.4.1 珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接存在的问题 44

2.4.2 珠光体钢与奥氏体不锈钢的焊接性 45

2.4.3 珠光体钢与奥氏体不锈钢的焊接工艺 53

2.4.4 珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接接头的使用性能 69

2.4.5 珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接的改进 72

2.4.6 珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接举例 75

2.5 其他类型不锈钢与珠光体钢的焊接 81

2.5.1 铁素体不锈钢与珠光体钢的焊接 81

2.5.2 马氏体不锈钢与珠光体钢的焊接 83

2.5.3 铁素体不锈钢及马氏体不锈钢与碳钢的电弧焊 85

2.6 异种不锈钢之间的焊接 86

2.6.1 异种奥氏体不锈钢之间的焊接 86

2.6.2 奥氏体不锈钢与铁素体不锈钢、马氏体不锈钢的焊接 89

2.6.3 铁素体不锈钢与马氏体不锈钢的焊接 92

2.7 耐磨高锰钢与其他钢的焊接 93

2.7.1 耐磨高锰钢与高碳钢的焊接 93

2.7.2 耐磨高锰钢与不锈钢的焊接 94

2.8 铸铁与钢的焊接 94

2.8.1 铸铁的分类及特性 94

2.8.2 钢-灰铸铁的焊接 99

2.8.3 钢-可锻铸铁的焊接 104

2.8.4 钢-球墨铸铁的焊接 105

2.8.5 不锈钢-铸铁的焊接	107	3.11.2 钛与钨的焊接工艺	158
参考文献	107	3.12 钛与铌的焊接	158
第3章 异种非铁金属的焊接	110	3.12.1 钛与铌的焊接性	158
3.1 异种铝合金的焊接	110	3.12.2 钛与铌的焊接工艺	159
3.1.1 异种变形铝合金的焊接	113	3.13 钛与钒、锆、钽的焊接	160
3.1.2 变形铝合金与铸造铝合金的 焊接	117	3.13.1 钒、锆、钽的物理性能及与 钛焊接的可能性	160
3.2 铝与镁的焊接	122	3.13.2 钛与钒的焊接	161
3.2.1 镁合金的种类和一般特性	122	3.13.3 钛与锆的焊接	162
3.2.2 铝-镁的焊接	123	3.13.4 钛与钽的焊接	164
3.3 铝与铜的焊接	126	3.14 镍与钨的焊接	165
3.3.1 概述	126	3.14.1 镍与钨的焊接性	165
3.3.2 铝-铜的熔化焊	126	3.14.2 镍与钨的焊接工艺	165
3.3.3 铝与铜的钎焊	131	3.15 锆与铌的焊接	166
3.3.4 铝与铜的电阻焊	132	3.15.1 锆与铌的焊接性	166
3.3.5 铝与铜的压力焊	132	3.15.2 锆与铌的焊接工艺	167
3.3.6 铝与铜的超声波焊	133	3.16 钨与钨的焊接	169
3.3.7 铝与铜的摩擦焊	134	3.16.1 钨与钨的焊接性	169
3.3.8 铝与铜的真空扩散焊	135	3.16.2 钨与钨的焊接工艺	170
3.3.9 铝与铜的爆炸焊	137	参考文献	170
3.3.10 铝与铜的液相过渡焊	137	第4章 钢与非铁金属的焊接	172
3.4 铝与钛的焊接	137	4.1 钢与铝的焊接	172
3.4.1 铝-钛的焊接性	138	4.1.1 铝与其他金属焊接中的问题	172
3.4.2 铝-钛的焊接工艺	139	4.1.2 钢与铝的焊接性	172
3.5 铝与镍的焊接	142	4.1.3 钢与铝的熔焊	174
3.6 钛与铜的焊接	143	4.1.4 钢与铝的钎焊	178
3.6.1 钛-铜的焊接性	143	4.1.5 钢与铝的固相焊接	180
3.6.2 钛-铜的焊接工艺	144	4.2 钢(不锈钢)与铜及铜合金的 焊接	195
3.7 铜与镍的焊接	146	4.2.1 不锈钢与铜及铜合金的焊 接性	195
3.7.1 铜与镍的焊接性	146	4.2.2 不锈钢与铜及铜合金的焊接 材料	197
3.7.2 铜与镍的焊接工艺	147	4.2.3 不锈钢与铜及铜合金的焊接 中应采取的措施	199
3.8 铜与钨、钼的焊接	148	4.2.4 不锈钢与铜及铜合金的焊接 方法	201
3.8.1 铜与钨的焊接	148	4.2.5 不锈钢与铜及铜合金的焊接 实践	207
3.8.2 铜与钼的焊接	149	4.3 钢(不锈钢)与镍及镍合金的 焊接	211
3.9 钛与镁的焊接	150	4.3.1 钢(不锈钢)与镍及镍合金 的焊接性	211
3.9.1 钛与镁的焊接性	150	4.3.2 钢与镍的焊接工艺	213
3.9.2 钛与镁的搅拌摩擦焊	151		
3.10 钛与钼的焊接	151		
3.10.1 Mo的物理、化学性能和 化学成分	151		
3.10.2 Mo及其合金的焊接性	153		
3.10.3 Mo与Ti的焊接工艺	155		
3.11 钛与钨的焊接	157		
3.11.1 钛与钨的焊接特点	157		

4.3.3 不锈钢与镍及镍合金的焊接 实践	216	5.2.1 不锈复合钢板	265
4.3.4 钴基合金在镍基合金上的 堆焊	221	5.2.2 不锈复合钢板的焊接性	267
4.4 钢(不锈钢)与钛及钛合金的 焊接	222	5.2.3 不锈复合钢板的焊接工艺	267
4.4.1 钢(不锈钢)与钛及钛合金 的焊接性	222	5.2.4 不锈复合钢板的焊接实践	271
4.4.2 钢(不锈钢)与钛及钛合金 的焊接工艺	222	5.3 高镍合金复合材料的焊接	288
4.5 钢与锆及其合金的焊接	231	5.3.1 高镍合金复合钢板的焊接	288
4.5.1 锆及其合金的应用、成分与 性能	231	5.3.2 高镍合金复合钢管的焊接	289
4.5.2 钢与锆及其合金的焊接性	233	5.4 钛-钢复合板的焊接	294
4.5.3 钢与锆及其合金的焊接工艺	235	5.4.1 关于钛-钢复合板	294
4.6 钢与钼及其合金的焊接	239	5.4.2 钛-钢复合板的焊接工艺	295
4.6.1 钢与钼及其合金的焊接性	239	5.4.3 钛-钢复合板的焊接接头的 力学性能	297
4.6.2 钢与钼及其合金的焊接工艺	240	5.4.4 钛-钢复合板的焊接举例	298
4.7 钢与铍及其合金的焊接	244	5.5 铜-钢爆炸焊接复合板的焊接	299
4.7.1 钢与铍及其合金的焊接性	244	5.5.1 铜-钢爆炸焊接复合板的焊 接性	299
4.7.2 钢与铍及其合金的焊接工艺	245	5.5.2 铜-钢爆炸焊接复合板的焊 接工艺	299
4.8 钢与铌及其合金的焊接	246	5.6 铝-钢爆炸焊接复合板的焊接	301
4.8.1 钢与铌及其合金的焊接性	246	5.6.1 铝-钢爆炸焊接复合板过渡 焊接接头形式	301
4.8.2 铌及其合金的热处理	247	5.6.2 铝-钢爆炸焊接复合板过渡 接头性能	303
4.8.3 钢与铌及其合金的焊接工艺	247	5.6.3 铝-钢爆炸焊接复合板过渡 接头焊接接头性能	304
4.9 钢与钨及其合金的焊接	252	5.7 镍-钢爆炸焊接复合板的焊接	305
4.9.1 钢与钨及其合金的焊接性	252	5.8 锆-钢爆炸焊接复合板的焊接	306
4.9.2 钢与钨及其合金的焊接工艺	252	5.9 钽-钢爆炸焊接复合板的焊接	307
4.10 钢与镁及其合金的焊接	253	5.9.1 钽-钢爆炸焊接复合板的焊 接性	307
参考文献	253	5.9.2 钽-钢爆炸焊接复合板的焊接 方法	308
第5章 金属复合板的焊接	256	5.9.3 钽-钢爆炸焊接复合板的焊接 实践	308
5.1 概论	256	参考文献	309
5.1.1 复合板材料的制造方法	256	附录 焊接方法对异种金属焊接的 适应性	311
5.1.2 复合板的性能	258		
5.1.3 复合材料的焊接特点	262		
5.1.4 覆层焊接材料的选择	263		
5.2 不锈复合钢板的焊接	265		

第 1 章 异种金属的焊接性

1.1 异种金属焊接性的复杂性

异种金属的焊接性肯定比同种金属要差。分析异种金属的焊接性，一方面要明确异种金属的焊接接头要求具有什么样的性能，另一方面要明确获得这种性能的焊接接头需要选用的适合的焊接材料及焊接工艺。

异种金属的焊接，顾名思义，就是将不同的金属焊接为一个整体。就熔焊而言，它是由两种母材和焊接材料熔合为焊缝金属，其化学成分和性能既不同于两种母材，也不同于焊接材料。但是，却要尽可能充分地弄清楚焊缝金属的化学成分和性能，以及焊接时和焊接后产品在运行过程中的行为。这些都要通过适合的焊接材料及焊接工艺来保证。

1.2 根据材料的固有性能分析异种金属的焊接性

1.2.1 根据元素的二元合金相图分析异种金属的焊接性

异种金属的焊接性大体上可以从两种金属的主加元素的二元合金相图进行初步分析。二元合金相图可以分为三类：无限固溶型（见图 1-1）；两相几乎完全不固溶，也不形成化合物的分离型（见图 1-2）；形成有限固溶体，并形成金属间化合物的金属间化合物型（见图 1-3）。

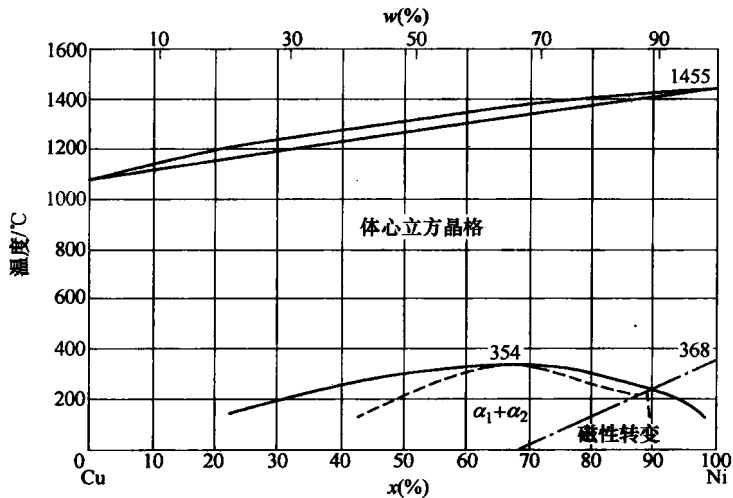


图 1-1 Cu-Ni 二元合金相图

对于无限固溶型的两种金属来说，异种金属的焊接性良好，如图 1-1 所示的 Cu-Ni 二元合金相图。对于两相分离型，能够互相混合，或者两者有极少的固溶，但不会形成金属间化合物，也容易进行异种金属的焊接，如图 1-2 所示的 Cu-Fe 二元合金相图。对于能够形成金

属间化合物的二元合金相图的异种金属来说，在一种金属或两种金属能形成比较广的固溶体的情况下，能够控制两种金属的熔化量使其金属间化合物的形成量得以控制，也能够进行异种金属的焊接，如图 1-3 示出的 Al-Mg 二元合金相图。

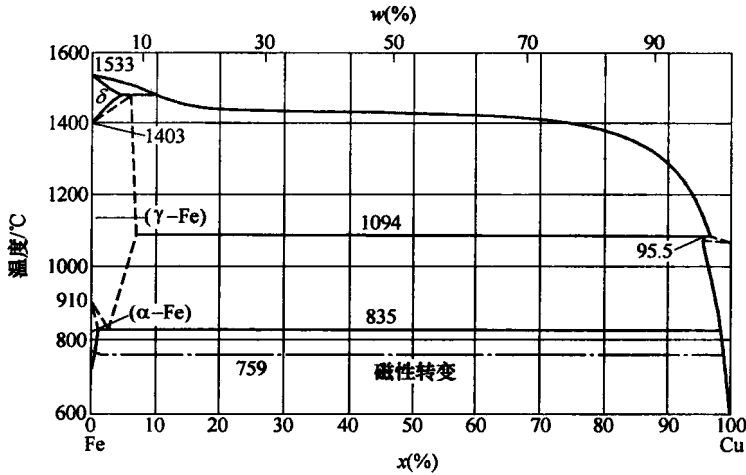


图 1-2 Cu-Fe 二元合金相图

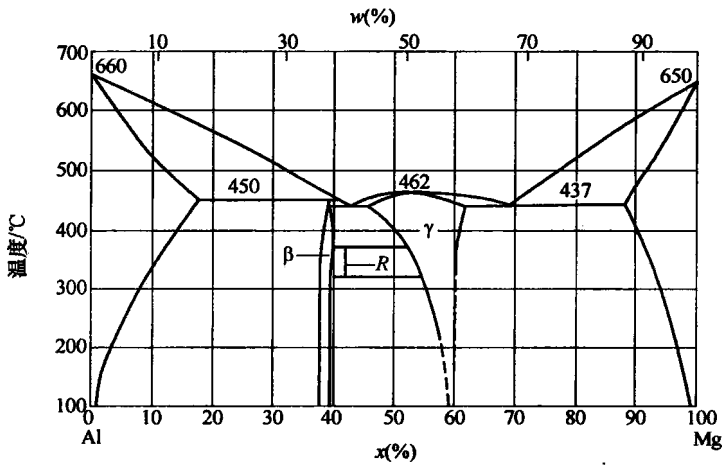


图 1-3 Al-Mg 二元合金相图

表 1-1 为根据二元合金相图统计的部分金属元素间的相互作用。

随着焊接技术的发展，新的焊接方法层出不穷。曾经被认为难以焊接甚至不能焊接的金属，也成为可以焊接甚至具有良好焊接性的金属。这与焊接技术本身有关。因此，在分析金属的焊接性时，必须与焊接方法相联系。如许多异种金属的焊接用熔焊的方法是根本无法实现的，但采用某些压焊（如摩擦焊、扩散焊）或钎焊就可以得到较为满意的焊接接头；即使是用传统的焊接技术（熔焊、压焊、钎焊等）无法焊接的陶瓷及金属间化合物等脆性材料，采用特殊的固相焊接（包括摩擦焊、扩散焊、自蔓延高温合成）技术也能够实现焊接。表 1-2 为根据二元合金相图判断激光焊时常见异种金属的焊接性，表 1-3 为根据二元合金相图判断电弧焊时常见异种金属的焊接性。

表 1-1 部分金属元素间的相互作用

金属元素	温度/°C		晶格类型	原子半径/nm	晶格常数/nm	形成固溶体		形成金属间化合物	形成共晶混合物	不发生作用
	熔点	同素异构转变				无	有限			
Fe	1538	910	体心立方	0.1241	0.28608	-V, -Cr, -Mn, -Co, -Ni, -Pd, -Pt, W.....	Cu, Au, Al, Ti, Zr, Nb, Ta, -Cr, -V, Mo, -Ni, Co, Mn, -Pd, -Pt, W.....	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge.....	C	Mg, Ag, Pb
			面心立方		0.3668					
Co	1485	417	密排六方	0.1248	0.2501	-Mn, -Fe, Ni, Pd, Pt.....	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Mo, Cr, W, Au, Al, Mn, Cu, -Fe, C, Si, Ge.....	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Mo, W, Mn, Fe, Ni, Pt, Al, Ge, Cr	Ag	Pb
			面心立方		0.3548					
Ni	1453	—	面心立方	0.1245	0.3517	-Mn, -Fe, Co, Pd, Pt, Cu, Au	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Al, Si, C, Mn, Fe.....	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, C, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Al, Si, Ge	—	Ag, Pb
			面心立方		0.40414					
Al	660	—	面心立方	0.1432	0.40414	—	Ti, Zr, Nb, Mn, Cu, Ni, Mg, V, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Pd, Pt, Ag, Au, Si, Ge	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, Mn, W, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, C	Sn	Pb
			密排六方		0.3203 0.52002					
Mg	650	—	密排六方	0.1598	0.3203 0.52002	—	Ti, Zr, Nb, Mn, Cu, Ni, Pd, Ag, Au, Al, Si, V	Cu, Ni, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si, Pb, Ge	—	Mo, W, Fe.....
			面心立方		0.36077					
Cu	1083	—	面心立方	0.1278	0.36077	Mn, Ni, Pd, Pt	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Cr, Fe, Co, Ag, Al, Si, Mn, Ge	Mg, Ti, Zr, Mn, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	—	Ta, W, Mo, Pb
			体心立方		0.2885					
Cr	1857	—	体心立方	0.1249	0.2885	-Ti, V, Mo, W, -Fe	-Ti, Zr, Nb, Ta, Mn, -Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Al, Si, Mo	Ti, Zr, Ta, Nb, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	Th	Pb, Sn,
			体心立方		0.2885					

(续)

金属元素	温度/°C		晶格类型	原子半径/nm	晶格常数/nm	形成固溶体		形成金属间化合物	形成共晶混合物	不发生作用
	熔点	同素异构转变				无限	有限			
Mo	2620	—	体心立方	0.136	0.31466	-Ti, V, Nb, Ta, Zr, W	-Ti, Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Au, Al, C, Si, Cr	Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	—	Mg, Cu, Ag
W	3380	—	体心立方	0.1367	0.31648	V, Nb, Ta, Cr	Ti, Zr, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, C, Si	Zr, Fe, Ni, Pt, Al, Si, C	Th	Mg, Mo, Cu, Ag, Zn, Pb
Si	1412	—	金刚石型	0.1175	0.34198	Ge	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pt, Cu, Al	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Ni, Pd	Mg, Ag, C, Au	Zn
Mn	1245	742 1095	体心立方 面心立方 体心立方	0.112	0.3774 0.3533 0.372	-Fe, -Co, -Ni, Cu	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Fe, Cr, Mo, Co, Pd, Pt, Ag, Au, Ni, Al, C, Si	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Ni, Pd, Ag, Au, C	—	W, Pb
V	1919	—	体心立方	0.1316	0.30338	-Ti, Nb, Mo, Ta, W, Cr, -Fe	Zr, Mn, Cu, Ni, Cr, Pd, Pt, -Fe, Al, Au, C, Si, Ge	Cu, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si, Ge, Pb	—	Ag, Hg
Nb	2468	—	体心立方	0.1426	0.32941	-Ti, V, Mo, -Zr, W, Ta	Mg, Cr, Mn, -Ti, Fe, Co, Ni, C, -Zr, Pd, Pt, Cu, Al, Si	Ti, Zr, Ta, Nb, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Au, Al, C, Si	—	—
Ti	1668	882	密排六方	0.1444	0.29446 0.46694	-Zr, -V, -Nb, -Ta, -Cr, -Mn	Mg, -V, -Nb, -Ta, Co, Pd, Fe, Mn, Ni, W, -Zr, Pd, Pt, Ag, -Mo, C, Au, Al, Ge, Si, Pb	Mg, Zr, Mn, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	—	—

表 1-2 根据二元合金相图判断激光焊时常见异种金属的焊接性

	Ag	Al	Au	Be	Co	Cu	Fe	Mg	Mo	Nb	Ni	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	W
Al	2																
Au	1	5															
Be	5	2	5														
Co	3	5	2	5													
Cu	2	2	1	5	2												
Fe	3	5	2	5	2	2											
Mg	5	2	5	5	5	5	3										
Mo	3	5	2	5	5	3	2	3									
Nb	4	5	4	5	5	2	5	4	1								
Ni	2	5	1	5	1	1	2	5	5	5							
Pt	2	5	1	5	1	1	1	5	2	5	1						
Re	3	4	4	5	1	3	5	4	5	5	3	2					
Sn	2	2	5	3	5	2	5	5	3	5	5	5	3				
Ta	5	5	4	5	5	3	5	4	1	1	5	5	5	5			
Ti	2	5	5	5	5	5	5	3	1	1	5	5	5	5	1		
W	3	5	4	5	5	3	5	3	1	1	5	1	5	3	1	2	
Zr	5	5	5	5	5	5	5	3	5	1	5	5	5	3	2	1	5

注：1—可以焊接（形成固溶体）；2—大体上可以焊接（形成复杂的组织）；3—焊接时必须注意（焊接资料不多）；4—焊接时必须非常注意（无可信赖的焊接资料）；5—不可以焊接（形成金属间化合物）。

资料来源：Welding handbook, Vol. 2, 8th edition, America welding, Miami, FL, 1991。

表 1-3 根据二元合金相图判断电弧焊时常见异种金属的焊接性

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Ag		F	G	Z	F	T	F	F	T	Z	F	T	e	F	F	Z	T	F	T	F	T	T	Z
Al	G		Z	F	Z	Z	Z	F	Z	F	Z	Z	Z	Z	F	Z	C	F	Z	Z	Z	Z	Z
Au	G	Z		Z	Z	F	T	G	F	Z	Z	F	C	G	Z	G	C	Z	C	Z	T	C	Z
Be	Z	F	Z		C	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	C	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Cd	F	Z	Z	C		T	T	Z	T	G	T	C	C	T	F	Z	C	F	C	Z	C	C	T
Co	T	Z	F	Z	T		F	F	F	Z	F	Z	Z	G	F	G	G	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Cr	F	Z	T	Z	T	F		F	F	Z	F	G	Z	F	F	F	G	F	Z	G	T	G	Z
Cu	F	F	G	Z	Z	F	F		F	Z	G	T	T	G	F	G	T	F	T	Z	T	T	Z
Fe	T	Z	F	Z	T	F	F	F		T	F	F	Z	F	F	G	Z	Z	Z	Z	G	Z	Z
Mg	Z	F	Z	Z	G	Z	Z	Z	T		Z	T	C	Z	Z	C	Z	C	T	C	T	T	T
Mn	F	Z	Z	Z	T	F	F	G	F	Z		T	Z	F	F	Z	C	Z	Z	Z	Z	T	Z
Mo	T	Z	F	Z	C	Z	G	T	F	T	T		G	Z	T	T	Z	T	G	G	G	G	Z
Nb	C	Z	C	Z	C	Z	Z	T	Z	C	Z	G		Z	C	Z	Z	Z	T	G	G	T	G
Ni	F	Z	G	Z	T	G	F	G	F	Z	F	Z	Z		F	G	T	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Pb	F	F	Z	C	F	F	F	F	F	Z	F	T	C	F		Z	C	F	C	Z	C	T	Z

(续)

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Pt	G	Z	G	Z	Z	G	F	G	G	Z	Z	T	Z	G	Z		F	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Re	T	C	C	Z	C	G	G	T	Z	C	C	Z	Z	T	C	F		T	T	Z	T	Z	Z
Sn	F	F	Z	T	F	Z	F	F	Z	Z	Z	T	Z	Z	F	Z	T		Z	Z	Z	T	Z
Ta	T	Z	C	T	C	Z	Z	T	Z	C	Z	G	T	Z	C	Z	T	Z		G	T	T	Z
Ti	F	Z	Z	Z	Z	Z	G	Z	Z	T	Z	G	G	Z	Z	Z	Z	Z	G		G	F	G
V	T	Z	T	Z	C	Z	T	T	G	C	Z	G	G	Z	C	Z	T	Z	T	G		T	Z
W	T	Z	C	Z	C	Z	G	T	Z	T	T	G	T	Z	T	Z	Z	T	T	F	T		Z
Zr	Z	Z	Z	Z	T	Z	Z	Z	Z	T	Z	Z	G	Z	Z	Z	Z	Z	Z	G	Z	Z	

注: Z—形成中间相; G—形成固溶体; F—形成复杂的显微组织; T—应采取特殊措施; C—待研究。

各元素间的相互作用由其化学性能及电化学性能决定。各元素间的溶解度与元素的晶体结构、原子半径和负电性有密切关系。

分析表明,只有当溶质和溶剂原子半径之相对差 $[(r_{\text{溶质}} - r_{\text{溶剂}})/r_{\text{溶剂}}]$ 小于15%时,才有可能形成溶解度较大甚至于无限溶解的固溶体;反之,则溶解度非常有限。在其他条件相近的情况下,原子半径之相对差越大,其溶解度越受限制。溶质和溶剂原子半径之相对差对溶解度的影响是由于溶质原子的溶入会使溶剂原子的晶格点阵发生畸变,从而需要消耗较大的能量所致。若溶质原子与溶剂原子半径相差无几,则溶质原子就会很容易地溶入溶剂原子的晶格点阵中去;若溶质原子比溶剂原子半径大,溶质原子溶入溶剂将排挤它周围的溶剂原子,这就要赋予周围的溶剂原子能量以使其偏离原来的平衡位置。溶质原子半径越大,被排挤的周围的溶剂原子范围越大,数目也越多,偏离原来的平衡位置也越远,因而消耗的能量就越高。这样就限制了溶质原子的溶入,溶解度就低。若溶质原子比溶剂原子半径小,溶质原子溶入溶剂原子将使它周围的溶剂原子向内靠拢,这也赋予周围的溶剂原子以能量使其偏离原来的平衡位置。溶质原子半径越小,向内靠拢的周围的溶剂原子范围越大,数目也越多,偏离原来的平衡位置也越远,因而消耗的能量就越高,因此,也限制了溶质原子的溶入,溶解度也低。如铝和铅,它们的原子半径分别为0.143nm和0.176nm,铅向铝中溶解时原子半径之相对差 $[(r_{\text{溶质}} - r_{\text{溶剂}})/r_{\text{溶剂}}]$ 为23.08%,而铝向铅中溶解时原子半径之相对差 $[(r_{\text{溶质}} - r_{\text{溶剂}})/r_{\text{溶剂}}]$ 为18.75%,它们互相溶解时原子半径之相对差都大于15%,因而,它们之间的固溶度很小。铅在铝中的固溶度在600℃时只有0.02%的原子份数,而铝在铅中几乎不固溶。图1-4给出了元素周期表中各元素的原子直径(1Å=0.1nm)。取铁原子直径2.5Å为基准线,在其上下划出了与铁原子直径相对差为15%的两条虚线,以区分各元素在铁中的溶解能力。可以看到,凡是与铁原子直径相对差为15%以上的元素,在铁中的溶解度都很低。这种作用只对形成置换固溶体的元素有效,对形成间隙固溶体的元素则无效。

此外,元素之间的负电性(即此元素的原子从其他元素的原子夺取电子而变为负离子的能力)相差越大,它们之间的化学亲和力越大,就越倾向于生成化合物而不利于形成固溶体,即使能形成固溶体,其溶解度也不会太大。所以,只有负电性相近的元素之间才可能具有较大的溶解度。图1-5给出了各元素的原子半径及负电性对它们在铁和铌中溶解度的影响,图中横坐标表示溶质的原子半径,纵坐标表示溶质的负电性。为确定溶解度的范围,分别画出了两个椭圆:椭圆长轴为负电性的范围,椭圆短轴为原子半径的范围。从图1-5中可以看到,小椭圆负电性的范围为 $\pm 0.2\%$,原子半径差为 $\pm 0.8\%$;大椭圆负电性的范围为

$\pm 0.4\%$, 原子半径差为 $\pm 0.15\%$ 。位于小椭圆内的元素能与铁 (见图 1-5a) 或镍 (见图 1-5b) 形成无限溶解的固溶体, 位于两椭圆之间的元素能与铁或镍形成有限溶解的固溶体, 而位于大椭圆外的元素则不能形成固溶体。

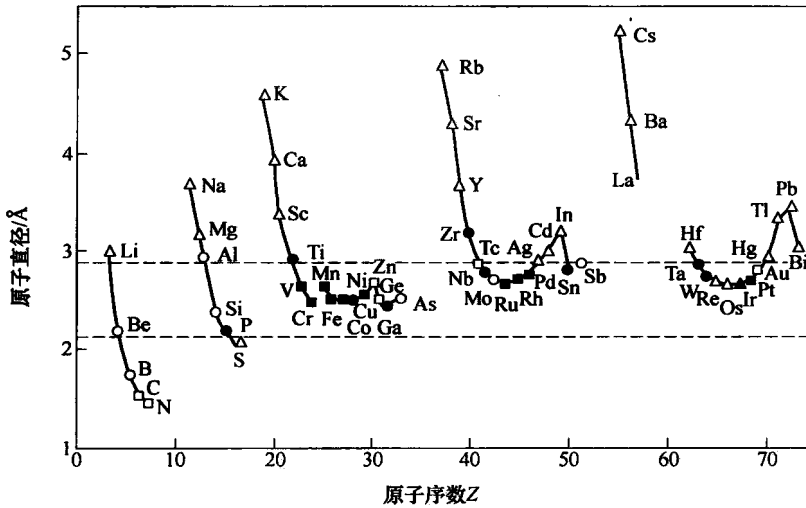


图 1-4 元素周期表中各元素的原子直径 ($1\text{Å}=0.1\text{nm}$) 分布图及其在铁中溶解的情况

△—不溶解 ■—无限溶解 □—溶解度大 ○—溶解度较大 ●—溶解度小

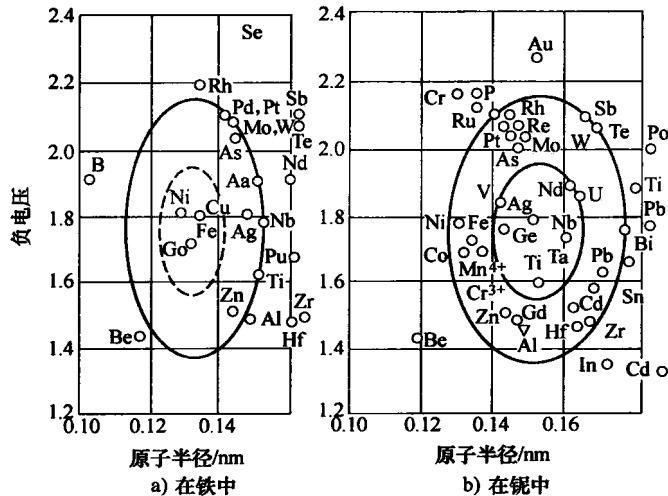


图 1-5 各元素的原子半径及负电性对它们在铁和镍中溶解度的影响

1.2.2 根据物理性能分析异种金属的焊接性

表 1-4 给出了部分常见金属的物理性能, 可以看出, 有些金属元素之间物理性能的差异很大。这些物理性能对材料焊接性的影响有以下两方面。

表 1-4 部分常见金属的物理性能

金属	化学符号	密度 /(g/cm ³)	熔点 /°C	沸点 /°C	比热容 /[J/(kg·K)]	热导率 /[W/(m·K)]	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)	电阻率 /(10 ⁶ Ω·m)
铍	Be	1.84	1289	2477	1847.8	12.3	4.2	
镁	Mg	1.74	650	1104	1086.9	144.6	25.8	4.46
铝	Al	2.6984	660.425	2327	934.8	206.9	23.8	2.65
钛	Ti	4.5	1670	3530	539.1	13.8	8.2	42.1
钒	V	6.1	1910	3377	552.2	26.9	8.3	24.8
铬	Cr	7.19	1863	2665	295.7	61.5	6.2	12.8
锰	Mn	7.42	1246	2051	500	—	22	185
铁	Fe	7.87	1538	2857	481.5	66.7	11.76	10.1
钴	Co	8.9	1495	2877	443.4	63.5	14.2	5.68
镍	Ni	8.9	1455	2834	456.5	69.6	13.4	7.8
铜	Cu	8.93	1084.87	2578	376.8	359.2	16.6	1.67
锌	Zn	7.13	419.58	906	317.4	103.8	29.7	5.75
锆	Zr	6.50	1855	4415	286.9	21.9	5.05	44.7
铌	Nb	8.55	2498	4927	278.3	48.1	7.5	14.6
钼	Mo	10.2	2623	4827	265.2	123.1	5.44	5.78
银	Ag	10.49	961.63	2162	243.5	384.6	20.6	1.59
锡	Sn	7.3(正方,白) 5.8(立方,灰)	232	2679	234.8	61.5	23	11.5
锑	Sb	6.68	630.755	1637	217.3	17.3	10.8	39
铈	Ce	6.747	798	—	—	—	—	—
钽	Ta	16.6	3020	5427	156.5	50	66	13.6
钨	W	19.3	3422	5900	147.8	152.9	4.6	5.1
铂	Pt	21.45	1769	3827	139.1	65.4	8.9	10.58
金	Au	19.26	1064.43	2709	134.8	273.1	14.3	2.44
铅	Pb	11.34	327.502	1751	130.4	31.9	29.1	22

一方面是对热能的利用上,如熔点、热导率等。如果这些性能差别太大,在进行熔化焊时,两种金属将无法均匀地熔合在一起,给焊接施工造成困难,甚至无法进行。如铁和铝的熔化焊,特别是进行电弧焊时,它们的熔点分别为 1538℃ 及 660℃,相差 878℃,铝已熔化而铁却难以熔化,它们之间难以熔合无法实现牢固的连接。又如铁和铜的熔焊,它们之间虽然熔点之间的差别比铁和铝之间小,但也达 455℃;另外,铁的热导率是 66.7W/(m·k),而铜则是 359.2W/(m·k)。这样,要让铜熔化也不容易。但是必须指出,若改变焊接方法,如采用摩擦焊,它们就比较容易焊接。

另一方面是影响到焊接质量,主要是弹性模量及线膨胀系数,它们将影响到焊接产品的尺寸和形状的稳定性和产生焊接缺陷的可能性。也就是说,弹性模量及线膨胀系数差别太大,将形成大的残余变形和内应力。如奥氏体不锈钢与珠光体钢的异种钢焊接接头就因线膨

胀系数差别太大,形成较大的残余变形和内应力而影响接头性能。

1. 线膨胀系数的差异

不同的金属具有不同的线膨胀系数,当两种线膨胀系数差别较大的金属进行焊接时,将会造成焊接接头出现复杂的高内应力状态,一种金属产生压应力,另一种金属产生拉应力。产生拉应力的金属,就可能产生裂纹,甚至还会导致焊缝与母材金属剥离。若结构经历反复加热和冷却循环时,问题就更加严重。奥氏体不锈钢与其他非奥氏体钢的焊接正是这种情况,因此,这类异种钢焊接时,应特别要防止上述缺陷的发生。焊前对线膨胀系数小的金属进行预热,或者在线膨胀系数差异很大的两金属间加入一种塑性好的金属焊接成过渡接头作为缓冲带,都是行之有效的方法。线膨胀系数还会随温度的变化而变化,图1-6给出了一些钢种的线膨胀系数随温度的变化而变化的曲线。

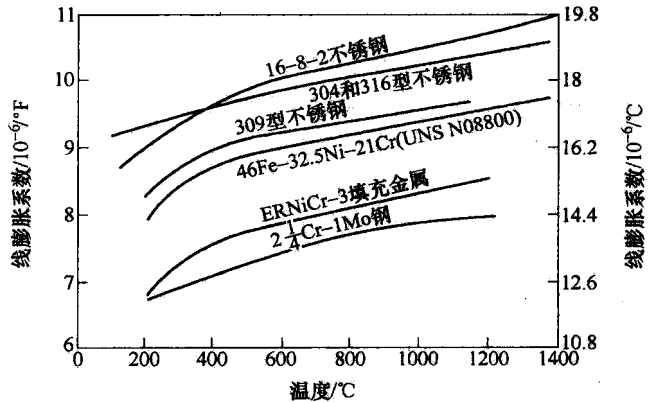


图 1-6 一些钢种的线膨胀系数随温度变化的曲线

2. 热导率和比热容的差异

金属的热导率和比热容强烈地影响被焊材料的熔化、熔池的形成、焊接区温度场和焊缝金属的结晶过程。

热导率大的金属,焊接熔池的热量会被未熔化的母材迅速地带走,导致金属熔化不足;冷却时会加大冷却速度,这样就相当于降低了焊接热输入。当两种金属在这方面差异很大时,可使被焊金属的熔化不同步,熔池形成和金属结合不良,导致焊缝结晶条件变坏,焊缝性能和成形不良。为了克服这种差异,熔焊时,通常应将热源位置偏向导热性能好的金属一侧,或者预热热导率高的母材。例如纯铜与18-8型奥氏体不锈钢焊接时,由于铜的热导率比18-8型奥氏体不锈钢大20倍,因此必须把热源的大部分热量集中到纯铜待焊处一侧,以保证待焊处两侧的金属均匀同步的熔化和凝固。

对于比热容小的金属,它相当于热导率小的金属,同样的焊接热输入可以熔化较多的母材金属。若两种金属的比热容差异很大时,比热容小的金属其熔化量就多,相当于增加了焊接热输入。热源位置应偏向比热容大的材料一侧。

3. 熔点的差异

如果两金属的熔点相差太大,也会导致两金属的熔化量不均衡,甚至会导致另一种熔化温度较低的金属熔化量太大,而另一种熔化温度较高的金属熔化量过小,更甚者另一种金属不熔化,因而难以采用熔焊,但可以采用钎焊及压力焊等。

两种母材之间或焊缝金属与一种母材之间的熔点相差太大,会使熔化温度较低的金属受到破坏。熔化温度较高的金属过分收缩,会使处于薄弱状态的另一种熔化温度较低的金属内产生拉应力,严重时可能产生裂纹,甚至发生剥离。在熔化温度较高的金属表面熔敷一层或多层中间熔化温度的材料,可以解决这个问题,这种方法叫做隔离层堆焊。这种隔离堆焊层与另一熔化温度较低的金属进行焊接时,隔离层起到降低熔点差的作用。

4. 电磁性的差异

在异种金属熔焊时，有时会出现焊接电弧偏吹，或者电弧燃烧不稳定现象而造成的焊缝成形变坏，这往往是由于两种金属的电磁性相差很大而发生的，如非奥氏体的钢铁与其他无磁性金属（铝、铜等）、奥氏体不锈钢同其他钢铁的异种钢焊接等。对于热源密度不大而热源截面较大的热源（如电弧焊）来说，这种电磁性的差异对焊接过程的影响尚不很明显；而对热源密度很大、热源截面很小的热源来说，这种电磁性的差异对焊接过程的影响就很明显。如电子束焊接铜与低碳钢时，当电子束指向铜-钢对缝处或铜母材（一般来说，铜-钢异种金属焊接时，由于铜的热导率比钢大得多，因而热源应偏向铜的一侧）时，发现电子束向低碳钢母材一侧移动，这是由两种金属的电磁性不同而引起的。

1.2.3 根据化学性能分析异种金属的焊接性

这里主要应考虑元素的化学活泼性，即与周围环境化学元素化合的敏感性。其中包括简单材料化学元素与周围环境化学元素作用的敏感性，这是在同种材料焊接中就存在的问题，在异种金属的焊接中依然存在。此外，两种金属的主导元素也可能发生化学作用，影响其焊接性。如铝与钢焊接时，由于铝的化学性质活泼，与周围环境气体中的氧发生化学作用产生三氧化二铝膜，就成为铝-钢异种金属焊接中必须要解决的问题。除此之外，铝与钢的主导元素铁与铝之间也能发生化学作用，而形成一系列的 Fe-Al 金属间化合物，这些金属间化合物也对铝-钢异种金属焊接产生重要的影响。不仅如此，异种金属焊接时，其合金元素化学性能的作用也不可低估。如在碳钢与含铬的耐热钢或不锈钢的异种金属焊接中，碳钢中的碳与含铬的耐热钢或不锈钢中的铬会发生强烈的化学作用，而形成一系列的 C-Cr 化合物，对焊接质量有重大影响。所有这些都对异种金属的焊接产生影响，也是异种金属焊接中必须要考虑和解决的问题。表 1-5 给出了部分常见金属的化学性能。

表 1-5 部分常见金属的化学性能

金属	化学符号	原子序数	相对原子质量	原子半径 /nm	原子外层电子数	晶格类型	晶格常数 / 10^{-10} m	元素周期表中位置
铍	Be	4	9.012	0.113	2	密排六方	$a = 2.2856$ $c = 3.5832$	II A
镁	Mg	12	24.0302	0.160	2	密排六方	$a = 3.2049$ $c = 5.2105$	II A
铝	Al	13	26.98	0.143	1	面心立方	$a = 4.0496$	III A
钛	Ti	22	47.9	0.147	2	密排六方	$a = 2.9506$ $c = 4.6788$	IV B
钒	V	23	50.942	0.132	2	体心六方	$a = 3.0282$	V B
铬	Cr	24	51.99	0.125	1	体心立方 (α -Cr) 密排六方 (β -Cr)	$a = 2.8846$	VI B
锰	Mn	25	54.94	(0.112, 0.150) ^①	2	复杂立方 (α -Mn) 复杂立方 (β -Mn) 面心立方 (γ -Mn) 面心立方 (δ -Mn)		VI B