

中等专业学校试用教材

熔焊原理及金属材料焊接

四川省机械工业学校 英若采 主编

**ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI**



机械工业出版社

主要名词符号对照表

A ——奥氏体, 晶粒的平均面积	SHCCT图——模拟焊接热影响区连续冷却组织转变图
a_K ——冲击韧性	T ——托氏体, 温度
B ——贝氏体, 熔宽	T_B ——脆性温度区
c ——比热容	T_L ——液相温度
c_p ——体积比热容	T_S ——固相温度
C'_1 ——仅得到珠光体和铁素体的临界冷却时间	T_0 ——预热温度
C'_2 ——出现铁素体的临界冷却时间	T_{cr} ——脆性转变温度
C'_3 ——出现珠光体的临界冷却时间	T_A ——奥氏体化温度
C'_4 ——出现中间组织(包括贝氏体、索氏体、托氏体)的临界冷却时间	T_M ——熔化温度
C_{γ} ——碳当量	T_{max} ——最高温度或峰值温度
d ——晶粒的平均直径	TIG——钨极惰性气体保护焊
D ——扩散系数	TRC——拉伸拘束裂纹试验
E ——焊接线能量, 弹什模量	t ——时间
F ——铁素体, 面积	t_H ——焊接时在 A_{c_3} 以上停留的时间
G_M ——焊条金属平均熔化速度	t' ——加热过程中在高温停留的时间
G ——温度梯度	t'' ——冷却过程中在高温停留的时间
H ——熔深	$t_{8/5}$ ——从800~500℃的冷却时间(或以 $t_{800-500}$ 表示)
HAZ——热影响区	v ——焊接速度
I ——电流	v_c ——结晶速度
IIW——国际焊接学会	w_x —— x 元素的质量分数
K ——平衡常数	α ——线膨胀系数, 弯曲角, 传热系数
K_b ——药皮重熔系数	α_H ——焊条的熔敷系数
K_f ——焊剂熔化率	α_p ——焊条的熔化系数
L ——液相, 液态金属, 拘束长度	δ ——延伸率, 板厚
M ——马氏体	η ——合金过渡系数
m ——质量	η' ——功率有效系数, 热效率
P ——珠光体	θ ——熔合比, 接触角
P_{O_2} ——氧化物的分解压	λ ——导热系数
P_W ——冷裂纹敏感指数	ρ ——密度
P_H ——富氢时冷裂纹敏感指数	σ ——应力
P_{cm} ——合金元素的裂纹敏感系数	σ_b ——抗拉强度
P_{SR} ——再热裂纹敏感系数	σ_s ——屈服强度
Q ——热能	σ_{cr} ——临界应力
q ——热功率, 电弧有效功率	τ ——熔滴过渡周期
q_0 ——电弧功率	ψ ——断面收缩率, 焊条损失系数
R ——拘束度	ϕ ——焊缝成形系数
RRC——刚性拘束裂纹试验	ω_H ——加热速度
R_{cr} ——临界拘束度	ω_c ——冷却速度

前 言

本书是中等专业学校焊接专业试用教材，是根据原国家机械委教育局所审定的中等专业学校培养目标和教学大纲编写的。

本书内容共分两大部分：第一至第七章，比较全面、系统地讨论了焊接过程的基本理论与基本规律，如焊接区热量传播的规律，焊接区金属的成分、组织与性能变化的规律，以及焊接缺陷的特征、形成过程与防止措施等。第八至第十三章，主要介绍常用金属材料的焊接性及焊接工艺，其中包括：合金结构钢、不锈钢与耐热钢、铸铁、铝及其合金、铜及其合金等。

根据中专的培养目标和中专生的年龄、知识特点，本书以提高产品质量为中心，紧密结合生产实际，在理论探讨中力求作到文字通俗，深浅适当。考虑到目前尚无适合焊接中专的金属材料的教材，所以在有关材料的各章中，对材料的性能都作了扼要的介绍。

本书由四川省机械工业学校英若采主编，其中第七章由承德高等石油专科学校张连生编写，第十一、十二、十三章由新疆机械电子工业学校赵枫编写，其余各章节由英若采编写，最后由天津大学张炳范同志主审。在讨论编写提纲和起草、定稿中，承德高等石油专科学校邵冰如同志参加了工作。

在编写中，参考了高等学校教材及教学参考书。哈尔滨焊接研究所、华中理工大学焊接实验室为教材提供了若干照片。在审稿过程中，包头机械工业学校、渤海船舶工业学校等学校的有关同志对书稿提出了宝贵意见。对上述有关单位与同志，特表谢意。

一九八八年十一月

编者

目 录

前言

主要名词符号对照表

绪论 1

- 一、焊接技术的发展现状 1
- 二、焊接过程的物理实质 1
- 三、本教材研究的对象及内容 3
- 四、学习本教材的目的及方法 4

第一章 焊接区热量的传播及温度变化 5

§ 1-1 焊接热源 5

- 一、常用的焊接热源 5
- 二、焊接过程的热效率 6

§ 1-2 焊接传热的基本方式与焊接温度场 7

- 一、焊接传热的基本方式 7
- 二、焊接温度场的概念 8
- 三、影响焊接温度场的因素 10

§ 1-3 焊接热循环 15

- 一、焊接热循环的基本概念 16
- 二、焊接热循环的基本参数和主要特征 16
- 三、影响焊接热循环的因素及调整焊接热循环的方法 18

参考资料 22

第二章 焊接化学冶金过程 23

§ 2-1 焊缝金属的构成 23

- 一、焊条的加热与熔化 23
- 二、母材的熔化及熔池 28
- 三、焊缝金属的熔合比 30

§ 2-2 焊接化学冶金过程的特点 31

- 一、焊接时金属的保护 33
- 二、焊接化学冶金反应区 34
- 三、焊接工艺参数与焊接化学冶金的关系 36

§ 2-3 焊接熔渣 37

- 一、熔渣的作用与组成 37
- 二、焊接熔渣的结构 39
- 三、熔渣的碱度 41
- 四、焊接熔渣的物理性能 42

§ 2-4 氢、氮与金属的作用 46

- 一、氢对金属的作用 46
- 二、氮对金属的作用 55

§ 2-5 焊缝金属的氧化与还原 58

- 一、氧化物的分解压 59
- 二、气相对焊缝金属的氧化 60
- 三、熔渣对焊缝金属的氧化 63
- 四、氧对焊缝质量的影响 65
- 五、焊缝金属的脱氧反应 66

§ 2-6 焊缝金属的合金化 69

- 一、合金化的目的 69
- 二、焊缝金属合金化的方式 70
- 三、合金元素的过渡系数及影响因素 70

§ 2-7 焊缝金属的脱碳、脱磷 75

- 一、焊缝金属的脱碳 75
- 二、焊缝金属的脱磷 77

参考资料 78

第三章 焊缝金属的结晶 79

§ 3-1 焊缝金属的结晶过程 79

- 一、焊缝金属的结晶特点 79
- 二、焊缝金属的结晶过程 80
- 三、熔池结晶时晶粒长大的方向与速度 81

§ 3-2 焊缝金属的固态相变 83

- 一、焊缝中常见的金相组织类型 84
- 二、焊缝金属的固态相变过程及焊缝的二次组织 87

§ 3-3 焊缝金属的化学不均匀性 91

- 一、晶间偏析 91
- 二、区域偏析 93
- 三、层状偏析 93

§ 3-4 焊缝组织的改善 94

- 一、改善焊缝金属一次组织的措施 94
- 二、改善焊缝金属二次组织的措施 96

参考资料 97

第四章 焊接热影响区 98

§ 4-1 焊接接头熔合区的特征 99

一、熔合区的构成.....99	第六章 焊接裂纹.....138
二、熔合区的化学不均匀性100	§ 6-1 焊接裂纹的分类及基本特征.....138
三、熔合区的物理不均匀性102	一、焊接裂纹的危害138
§ 4-2 焊接热影响区在加热时的组织转变.....102	二、裂纹的分类139
一、焊接热影响区的加热特点102	§ 6-2 焊接时的结晶裂纹.....142
二、焊接加热时的组织转变特点103	一、结晶裂纹的特征与形成条件142
三、热影响区晶粒长大的特点104	二、影响结晶裂纹的因素144
§ 4-3 焊接热影响区冷却过程的组织转变.....107	§ 6-3 热影响区液化裂纹.....154
一、影响钢中过冷奥氏体转变的因素107	§ 6-4 焊接冷裂纹.....156
二、焊接热影响区冷却组织转变的特点108	一、焊接冷裂纹的危害及其特征156
三、焊接条件下的CCT图111	二、冷裂纹形成的基本因素及机理158
§ 4-4 焊接热影响区的组织.....111	三、冷裂纹敏感性的判据162
一、粗晶区112	四、防止冷裂纹的措施169
二、细晶区112	§ 6-5 再热裂纹.....173
三、部分相变区112	一、再热裂纹的特征173
四、回火区112	二、再热裂纹产生的原因174
§ 4-5 热影响区的性能.....115	三、防止再热裂纹的措施175
一、热影响区的硬度分布115	§ 6-6 层状撕裂.....177
二、热影响区的常温机械性能119	一、层状撕裂的特征及形成原因177
三、热影响区的脆化120	二、防止层状撕裂的措施178
§ 4-6 焊接热模拟技术介绍.....121	参考资料180
一、焊接热模拟装置的技术指标122	第七章 焊条与焊剂.....181
二、典型焊接热模拟装置性能介绍122	§ 7-1 焊条的组成及其分类.....181
三、热模拟试验技术的应用125	一、焊条的组成及作用181
参考资料126	二、焊条的分类及型号185
第五章 焊缝中的气孔与夹杂物.....127	§ 7-2 焊条的冶金性能.....187
§ 5-1 气孔的分布特征与产生的原因.....127	一、钛钙型焊条的冶金性能187
一、焊缝中气孔的分布特征127	二、低氢型焊条的冶金性能190
二、形成气孔的气体127	§ 7-3 焊条的工艺性能.....193
三、氢气孔产生的原因128	一、焊接电弧的稳定性193
四、一氧化碳气孔产生的原因129	二、焊缝成形193
§ 5-2 气孔形成的过程.....129	三、在各种位置焊接的适应性193
一、气泡的形核130	四、脱渣性194
二、气泡长大130	五、飞溅194
三、气泡上浮131	六、焊条的熔化速度及药皮发红问题195
§ 5-3 影响气孔生成的因素及控制措施.....132	七、焊条的卫生指标196
一、冶金因素对气孔的影响133	§ 7-4 焊条药皮配方设计及焊条制造.....198
二、工艺因素对气孔的影响135	一、焊条药皮配方设计198
§ 5-4 焊缝中的夹杂物.....136	二、焊条制造200
一、夹杂物的种类及危害136	§ 7-5 焊条的选用原则、使用和保管.....203
二、防止焊缝中形成夹杂物的措施137	一、焊条的选用原则203
参考资料137	二、焊条使用的一般原则204

三、焊条管理与贮存	206	三、热影响区高温液化裂纹	265
§ 7-6 焊剂	206	四、冷裂纹	266
一、焊剂的分类及型号	207	五、再热裂纹	268
二、焊剂的成分与性能	210	六、层状撕裂	268
§ 7-7 焊条和焊剂的发展现状	215	七、热影响区性能的变化	268
一、焊条发展现状	215	§ 9-3 低合金高强度钢的焊接工艺	271
二、焊剂发展现状	219	一、热轧及正火钢的焊接工艺	271
参考资料	220	二、低碳调质钢的焊接工艺	280
附录一 焊接钢丝标准(GB1300—77)	221	三、中碳调质钢的焊接工艺	284
附录二 焊条药皮材料技术条件	223	§ 9-4 压力容器用钢的焊接	286
附录三 常用药皮材料的性能	227	一、压力容器用钢的特点及分类	286
附录四 焊条牌号编制方法(摘自 GB980—76)	229	二、低碳钢压力容器的焊接	288
附录五 国内外焊条对照表	231	三、压力容器设计与制造中与焊接 工艺有关的规定	290
第八章 金属的焊接性及其试验方法	235	§ 9-5 珠光体耐热钢的焊接	292
§ 8-1 金属的焊接性	235	一、珠光体耐热钢的成分与性能特点	292
一、焊接性的概念	235	二、珠光体耐热钢的焊接工艺	294
二、工艺焊接性与使用焊接性	235	§ 9-6 低温用钢的焊接	296
三、冶金焊接性与热焊接性	236	一、对低温用钢的性能要求	297
§ 8-2 金属焊接性试验	237	二、低温用钢的分类	297
一、焊接性试验的内容	237	三、低温用钢的焊接	299
二、选择和拟定焊接性试验的原则	237	四、焊接低温压力容器的一些特殊要求	302
三、焊接性试验方法分类	237	§ 9-7 低合金耐蚀钢的焊接	303
§ 8-3 常用的焊接性试验方法	238	一、耐石油腐蚀低合金钢的焊接	303
一、不用专用装置的裂纹试验方法	238	二、耐大气及耐海水腐蚀用钢的焊接	306
二、使用专用设备的裂纹试验方法	245	参考资料	308
三、使用焊接性试验方法	249	附录一 GB5118—85低合金钢焊条型 号划分(摘录)	308
四、焊接性的间接评定法	253	附录二 钼和铬钼耐热钢焊条主要化 学成分等级表示方法	310
参考资料	254	附录三 GB983—85不锈钢焊条型号 划分(摘录)	310
第九章 合金结构钢的焊接	255	附录四 低温用钢焊条牌号表示方法	311
§ 9-1 高强度钢的分类及性能特点	255	第十章 不锈钢与耐热钢的焊接	312
一、高强度钢的分类	255	§ 10-1 不锈钢与耐热钢的性能特点	312
二、热轧及正火钢的成分、组织和性能 特点	256	一、金属的腐蚀与不锈钢的耐蚀性	312
三、低碳调质钢的成分、组织和性能 特点	258	二、耐热钢的耐热性	315
四、中碳调质钢的成分、组织和性能 特点	260	三、奥氏体钢的成分和性能特点	316
五、低合金高强度钢的选用	262	四、马氏体钢的成分和性能特点	319
§ 9-2 高强度钢的焊接性分析	263	五、铁素体钢的成分和性能特点	321
一、合金元素对高强度钢焊接性的影响	263	§ 10-2 奥氏体钢的焊接性	322
二、焊缝中的结晶裂纹(凝固裂纹)	265	一、焊接接头的晶间腐蚀倾向	323

二、焊接接头的刀蚀	325
三、应力腐蚀开裂	326
四、焊接接头的热裂纹	329
五、不同使用条件下焊接接头的机械性能	333
§ 10-3 奥氏体钢的焊接工艺	334
一、焊前准备	334
二、奥氏体钢的手工电弧焊工艺	336
三、钨极氩弧焊工艺	337
四、熔化极氩弧焊工艺	338
五、埋弧焊	338
六、等离子弧焊接	339
七、铬锰氮不锈钢的焊接	339
八、焊缝的酸洗及钝化处理	339
§ 10-4 马氏体钢和铁素体钢的焊接	340
一、马氏体钢的焊接	340
二、铁素体钢的焊接	342
§ 10-5 珠光体钢与奥氏体钢的焊接	343
一、珠光体钢与奥氏体钢焊接的焊接性	344
二、焊接材料的选择	348
三、焊接工艺要点	350
四、不锈钢复合钢板的焊接	351
参考资料	354
附录 不锈钢焊条牌号编排方法	355
第十一章 铸铁的焊接	356
§ 11-1 铸铁的种类及性能	356
一、铸铁的种类、化学成分及牌号	356
二、铸铁的性能特点	358
三、铸铁的石墨化	359
§ 11-2 灰口铸铁的焊接性	361
一、接头的白口化	361
二、焊接接头的冷裂纹	363
§ 11-3 灰口铸铁的焊接工艺	365
一、灰口铸铁的手弧焊补焊工艺	365
二、灰口铸铁的气焊工艺	376
三、灰口铸铁的手电渣焊工艺	379
四、灰口铸铁的钎焊	380
§ 11-4 球墨铸铁的焊接	381
一、球墨铸铁的焊接性	381
二、球墨铸铁的气焊	381

三、球墨铸铁的手工电弧焊	382
参考资料	383
第十二章 铝及铝合金的焊接	384
§ 12-1 铝及铝合金的分类及性能	384
一、工业纯铝	384
二、铝合金	385
§ 12-2 铝及铝合金的焊接性	390
一、气孔问题	391
二、裂纹问题	393
三、焊接接头软化问题	396
四、焊接接头的耐蚀性问题	398
§ 12-3 铝及铝合金的焊接工艺	400
一、焊接方法的选择	400
二、焊接材料的选择	400
三、焊前及焊后清理	402
四、铝及铝合金的氩弧焊工艺	403
五、铝及铝合金的气焊工艺	405
参考资料	406
附录 铝及铝合金焊条牌号编排方法	406
第十三章 铜及铜合金的焊接	407
§ 13-1 铜及铜合金的分类及性能特点	407
一、紫铜	407
二、黄铜	408
三、青铜	411
§ 13-2 铜及铜合金的焊接性	411
一、难熔及易变形	411
二、焊接裂纹	412
三、气孔	413
四、接头的机械性能降低	414
五、耐蚀性及导电性降低	414
§ 13-3 紫铜的焊接工艺	415
一、气焊工艺	415
二、氩弧焊工艺	417
三、其它焊接方法	419
§ 13-4 黄铜的焊接工艺	420
一、气焊	421
二、手工电弧焊	421
三、手工钨极氩弧焊	422
参考资料	422

绪 论

在金属加工工艺领域中,焊接是一种年轻但发展非常迅速的加工方法,目前已发展为一门独立的学科,并在能源、交通、建筑,特别是机械制造部门中得到了广泛的应用。随着经济与科学技术的发展进步,焊接技术将发挥越来越大的作用。

一、焊接技术的发展现状

现代焊接技术是从19世纪80年代末开始发展起来的,至今不过百年。科学技术的进步,为焊接的发展提供了理论与物质条件,而焊接所具有的技术经济优越性,使之能在不长的时间内发展成为各种装备制造中必不可少的手段。焊接技术的发展主要表现在以下几方面:

1. 新焊接能源的应用

焊接方法的发展依赖于能源的开发与应用。从本世纪开始,几乎每隔10年就出现一种新的焊接能源或焊接工艺方法,目前已发展到几十种。当前,除了以电弧为能源的各种常规焊接方法外,以电阻热为能源的电阻焊(又称接触焊)和电渣焊等在生产中亦得到广泛的应用。另外,以高速运动电子束为能源的电子束焊接;以激光为能源的激光焊;以等离子弧为能源的等离子弧焊等高能密度的焊接方法,也越来越多地应用于各个生产领域。

2. 焊接技术应用范围的扩大

随着新能源的开发与焊接质量的提高,焊接技术的应用范围有了明显的扩展。目前一些现代化的大型设备,如大型高参数的压力容器与贮罐、大吨位油轮、超音速飞机、大功率的核发电设备,及水力、火力发电设备等,都大量采用了焊接结构。焊接技术还用于电子元件、火箭、宇宙飞船等尖端精密产品的制造中。

随着产品向高参数、大容量、长寿命、大型化或微型化的方向发展,要求采用一些具有特殊性能的结构材料,如高强度钢、耐蚀钢、耐热钢、超高强度钢、各种有色金属及其合金、难熔金属和活性金属、异种金属、复合材料、功能材料等。因此,用于焊接结构的材料品种也随之有了极大的发展。

应用范围的扩大,对焊接质量提出了更高的要求;反过来,又促进了焊接工艺方法、焊接设备、焊接材料、焊接结构设计和焊接质量检测方法等方面的发展。

3. 焊接生产的机械化与自动化

焊接技术的广泛应用,对焊接质量和生产率的要求日益提高,促进了焊接生产的机械化与自动化。目前,除了一些机械化程度较高的专机和专业生产线外,很多发达国家均建成了带程序控制的自动焊接生产线,电子计算机也已用于焊接生产中的数据处理和程序控制。有些工业部门,如汽车制造、水下工程和核电站的维修等,已采用了电子计算机控制的焊接机器人或遥控全位置焊机。我国最近也研制成功了焊接机器人。

二、焊接过程的物理实质

了解焊接过程的物理实质,是掌握其基本理论与基本规律的重要前提。

焊接之所以能够成为一种独立的加工工艺方法,是由其独有的特点所决定的。在机械制造中连接的方法很多,除焊接外,常用的还有螺栓连接、键连接、铆接等等。从宏观上看,

焊接是永久性的连接，而所谓的物理实质，则系指其微观特点而言。

GB3375—82《焊接名词术语》中指出：焊接是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件间达到原子结合的一种加工方法。作为一种工艺，对焊接可以从不同角度、用不同的文字加以描述，但上述定义是从微观上说明了焊接过程的本质——使两个分开的物体（焊件）达到原子结合。这就是说，焊接与其它机械连接最根本的区别在于，通过焊接两个焊件不仅在宏观上建立了永久性的连接，而且在微观上形成了原子间的结合。

固体是依靠键合力结合的。当大量金属原子聚合在一起构成金属晶体时，由于金属原子的最外层电子很容易摆脱原子核的束缚，所以绝大部分金属原子将失去价电子而成为正离子。正离子按一定的几何形状规则地排列，脱离了原子核束缚的价电子为整个金属所共有，在各个离子间自由运动，形成所谓自由电子气。金属晶体正是依靠各正离子与自由电子的相互作用来保持原子的有规律排列，这种结合方式叫做金属键。金属的特征就是由金属键所决定的。实现金属的焊接，从本质上讲，就是创造条件在被焊金属的原子间建立金属键。

为了简化问题，我们以双原子模型进行分析。两个原子的结合情况取决于二者之间的引力和相斥力的综合作用，只有当引力和相斥力达到平衡时，才能使两原子的位置相对固定。原子间的引力是由一个原子的外部电子与另一原子核相互作用引起的，而相斥力则是由两个原子的核外电子相互作用和两原子核间的相互作用而引起的。引力和相斥力的大小取决于原子间的距离。只有当这个距离与金属的晶格尺寸相接近时，引力与相斥力才有可能达到平衡而形成金属键。图1为两个原子之间相互作用力与距离之间的关系。由图可以看到，当原子间的距离远大于晶格常数时，它们之间的引力和斥力都接近于零，可以认为原子间没有力的作用。当两原子逐渐接近时，将受到引力与斥力的合力作用，直至原子间的距离达到 r_A ，其间作用力达到最大引力值，这时原子即可自动靠近而达到平衡位置。对于大多数金属， $r_A = (3 \sim 5) \times 10^{-8} \text{cm}$ （即 $3 \sim 5 \text{ \AA}$ ）。

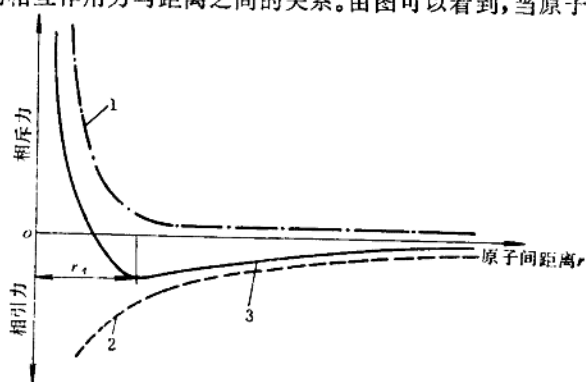


图1 双原子间的相互作用力与距离的关系

1—相斥力 2—相引力 3—合力

从理论上讲，焊接时被焊金属表面间的距离达到 r_A ，两侧

原子就会产生最大的引力，从而发生扩散、再结晶等物理化学过程，而促使进一步靠近，最后原子间的距离达到合力为零的平衡位置，从而建立了金属键，完成了焊接过程。但实际情况是，在没有外加能量的条件下，要使两个分开的固体表面距离达到 $3 \sim 5 \text{ \AA}$ 是不可能的。因为，实际的金属表面即使经过精密加工，其表面粗糙度也远大于 r_A 值，因此，宏观上密合的两个表面，其原子之间仍然没有力的作用。此外，金属表面存在的氧化膜和其它吸附物，也阻碍其表面的紧密结合。由于上述障碍的存在，使焊接时必须输入一定的能量，以消除不利于表面紧密结合的因素。这种能量，实际生产中主要是以加热或加压两种形式提供的。

加压可以破坏表面膜，使连接处发生局部塑性变形。当压力达到一定值时，两物体表面原子间的距离可接近到 r_A ，从而产生最大引力，进而建立起金属键，形成焊接接头。

加热使连接部位达到塑性状态,从而破坏了金属表面的氧化膜,减小变形阻力,同时增加原子的振动能,有利于再结晶、扩散、化学反应和结晶过程的进行,而实现焊接。当金属被加热到熔化状态时,原子在液态并伴随强烈搅拌的条件下相互作用,被焊金属互相熔合。随着温度下降、凝固结晶的进行,金属键的强度逐渐提高,最后形成牢固的接头。

对一定的金属来说,实现焊接所需的最低能量为一定值。因此,所需之最低温度与压力之间存在一定的关系。图2为纯铁焊接时所需温度与压力之间的关系。

图中曲线 ABC 为实现焊接所需的温度与压力配合关系,各种金属焊接时都存在这种类似的关系。可以看到,加热的温度越高,则所需的压力越小。根据上述关系,可将温度与压力的配合划分为几种类型。当加热温度低于 T_1 时,只有少数高塑性金属才能进行焊接,称之为有限加压焊接区(图中I区)。加热在 $T_1 \sim T_2$ 之间,称为实际应用焊接区(图中II区),生产中的压焊大都是在这个温度范围内进行的。当加热温度达到 T_m 时,不需加压即可实现焊接,故称之为熔焊区(图中III区)。曲线 ABC 以下的区域,由于所提供的能量不足,属于不能实现焊接的区域。

根据以上分析,按外加能量形式之不同,将焊接分为熔焊与压焊两大类。将被焊金属局部加热至熔化状态,不加压力而完成的焊接方法叫作熔焊,必须对焊件施加压力(加热或不加热)来完成的焊接方法叫作压焊。熔焊比压焊在机械制造中应用更为广泛,本教材中主要介绍有关熔焊过程的基本理论与应用。

三、本教材研究的对象及内容

本教材是根据焊接专业中专四年制《金属熔焊原理》及《金属材料的焊接》两门课程的教学大纲编写的,内容包括相应两大部分。

1. 《金属熔焊原理》

是焊接专业的专业基础理论课。它研究的对象是熔焊过程所涉及的基本理论与基本规律,其中包括了一些独立的分支,如焊接传热学、焊接化学冶金学和物理冶金学等。

本教材中熔焊原理部分的内容是根据中专校的培养目标和学生的知识水平,以提高焊接质量和生产率为出发点,着重介绍熔焊过程中焊接接头金属的成分、组织、性能的变化与焊接工艺条件之间的关系,以及常见焊接缺陷的识别与防止等问题。具体的内容为以下的几部分:

- (1) 焊接过程的物理本质。
- (2) 焊接区的热量传播与温度变化的规律。
- (3) 焊接化学冶金过程 熔焊过程中焊接区各相之间的物理、化学反应过程及其控制。
- (4) 焊接接头的结晶 焊接接头中各部位(焊缝、熔合区、热影响区)在冷却过程中组织、性能的变化及其控制。
- (5) 常见焊接缺陷分析 主要有气孔、夹杂物、常见裂纹的特征及危害,产生原因及防止措施。

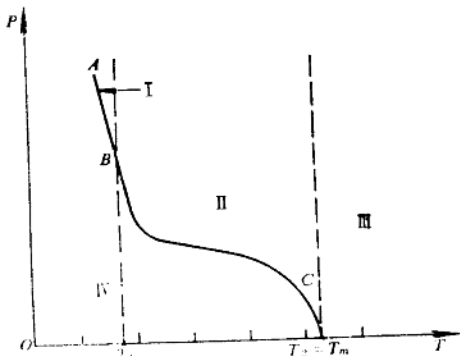


图2 焊接纯铁时所需的温度与压力的关系

I区—有限加压焊接区 II区—实际应用的压焊区

III区—熔焊区 IV—不能实现焊接的区域

(6) 焊条与焊剂 焊条、焊剂的组成、性能、型号与牌号,以及焊条配方计算和制造等。

上述内容包括了熔焊过程的普遍规律,是掌握各种熔焊方法的原理、分析各种金属材料的焊接性和制定焊接工艺的理论基础,是焊接工艺人员必备的专业理论知识。

2. 《金属材料的焊接》

是为了适应焊接结构材料品种不断扩大的需要而开设的。研究的对象是各种金属的焊接性,以及如何根据焊接性能特点制定合理的焊接工艺。因此,它即是一门工艺课,又是有较强的综合性与一定的理论深度。

作为中专教材,本书主要讨论在机器制造厂中常用金属材料的焊接。具体包括以下内容:

(1) 金属的焊接性及其试验方法。

(2) 常用焊接结构材料的焊接性分析及焊接工艺 主要有合金结构钢、不锈钢和耐热钢、铝及铝合金、铜及铜合金等。

(3) 铸铁的补焊 根据铸铁的焊接性及补焊要求,选用合理的焊接材料及工艺方案。

四、学习本教材的目的及方法

1. 通过学习本教材,应达到以下的目的要求

(1) 了解焊接过程的本质,能从理论上说明焊接与其它连接过程的本质区别。

(2) 了解熔焊过程中金属温度变化的特点,掌握焊接条件下化学冶金及物理冶金的基本规律。

(3) 初步掌握焊接冶金过程中常见缺陷产生的条件及影响因素,并能结合具体生产条件分析缺陷产生的原因,提出防止措施。

(4) 掌握焊接性的概念,了解常用金属材料的焊接性,并能根据产品的技术条件来正确选择焊接性试验方法,选用焊接方法、焊接材料及焊接工艺参数。

(5) 基本掌握灰口铸铁补焊常用工艺方法的特点,并能根据补焊要求制订合理的补焊工艺方案。

2. 学习本教材应注意掌握以下的学习方法

(1) 坚持理论与实践的统一 即在分析问题时一定不能脱离焊接本身的特点和具体的生产条件。焊接过程中的可变因素很多,同一种材料,用于不同产品或采用不同的工艺方法,出现的问题都可能不一样。这是学习中必须掌握的一个方面。

(2) 善于综合运用多方面的知识 《熔焊原理及金属材料焊接》涉及的知识领域与实际问题的都十分广泛。只有将各方面的知识融汇贯通,并能不同条件下灵活运用,才能提高分析与解决问题的能力。如化学冶金过程,不仅涉及物理、化学及金属冶炼的知识,而且还要考虑焊接方法、保护介质等因素的影响;各种钢在焊接时组织与性能的变化,均涉及到热处理原理、材料的强化机制,以及与物理学有关的传热学知识。由此可见,仅仅依靠某一个学科是难以把问题搞清楚的。

(3) 以唯物辩证的方法为指导来分析和解决问题。焊接条件下各个变化过程的发生、发展,是存在多种影响因素的,而在一定的具体条件下,要求在众多因素中找到起主要作用的因素,从而抓住解决实际问题的关键所在。

本书根据中专的培养目标,涉及的范围主要是与生产实际联系紧密的基础部分,还有大量的更深入、更广泛的内容,有待同学们在今后的学习和工作中进一步学习和探索。

第一章 焊接区热量的传播及温度变化

熔焊时，通过对焊件进行局部加热，使焊接区的金属熔化，冷却后构成了牢固的接头。加热是完成熔焊过程的必要条件，但加热也必将引起焊接区金属的成分、组织与性能发生变化，这些变化的结果就直接决定了焊接质量。因此，为了能主动控制焊接质量，首先必须掌握焊接区热量传播的情况与温度变化的规律。

§ 1-1 焊 接 热 源

局部加热是焊接加热的显著特点。由于金属的导热能力高，进行局部加热时，必然有热量向金属内部流失。为了防止加热区域过宽和减少金属内部的热量损失，要求焊接时应采用高温而能量集中的热源，即热源的溫度应明显高于被焊金属的熔点，且加热范围小。

一、常用的焊接热源

热源的性质与功率，决定了焊接加热的速度、加热的温度和加热的范围，将直接影响焊接质量和生产率。因此，不断研制和开辟新的热源，对焊接技术的发展有重要的作用。

1. 生产中常用的焊接热源

(1) 电弧热 利用气体介质在两电极之间强烈而持续的放电过程中所产生的热量进行焊接。电弧是目前应用最广泛的焊接热源，如手工电弧焊、埋弧焊、气体保护电弧焊等。

(2) 化学热 利用可燃气体（如乙炔、液化石油气）燃烧时放出的热量，或热剂（由一定成分的铝粉或镁粉、氧化铁粉、铁屑或铁合金等按一定比例配制而成）在一定温度下进行反应所放出的热量进行焊接，如气焊、热剂焊。

(3) 电阻热 利用电流通过焊件的接触面及邻近区，或电流通过熔渣所产生的电阻热进行焊接，如电阻焊、电渣焊。

(4) 摩擦热 利用摩擦所产生的热量进行焊接，如摩擦焊。

(5) 等离子弧 利用等离子焊炬，将阴极和阳极之间的自由电弧压缩成高温、高电离度及高能量密度的电弧，叫做等离子弧。利用等离子弧的高温 and 释放出的热能进行焊接，叫做等离子弧焊接。

(6) 电子束 利用在电场中被加速的电子束，轰击置于真空或非真空中的焊件时所产生的热能进行焊接。

(7) 激光束 利用通过受激辐射而被加强并经聚焦后的激光束轰击焊件时所产生的热量进行焊接。

2. 热源性能的对比

各种热源的特性与应用范围均有不同，根据焊接对热源的要求，从提高焊接质量和生产率出发，通常从下述三方面来对比热源的性能。

(1) 最小加热面积 即在保证热源稳定的条件下加热的最小面积，单位 cm^2 。

(2) 最大功率密度 热源在单位面积上的最大功率，单位为 W/cm^2 。在功率相同时，

热源加热面积越小，则功率密度越高。功率密度表明热源的集中性。

(3) 正常焊接工艺参数下能达到的温度 温度越高，则加热速度越高，因而可用于焊接高熔点金属，将具有更宽的应用范围。

常用焊接热源的最小加热面积、最大功率密度和在正常焊接工艺参数下能达到的温度等特性数据，列于表 1-1。

表1-1 常用焊接热源的特性数据⁽¹⁾

热 源	最小加热面积 cm^2	最大功率密度 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	达 到 温 度 $^{\circ}\text{C}$
乙炔火焰	10^{-2}	2×10^3	3200
金属极电弧	10^{-3}	10^4	6000 K
钨极氩弧(TIG)	10^{-3}	1.5×10^4	8000 K
埋弧焊	10^{-3}	2×10^4	6400 K
电渣焊	10^{-3}	10^4	2000
熔化极氩弧(MIG)	10^{-4}	$10^4 \sim 10^5$	
CO_2 气体保护电弧			
等离子弧	10^{-5}	1.5×10^5	18000~24000
电子束	10^{-7}		
激光束	10^{-8}	$10^7 \sim 10^9$	

由表 1-1 中数据可以看出，不同热源的特性数据的差别是相当大的，理想的热源应该是具有加热面积小、功率密度高、加热温度高等特点。如：等离子弧、电子束、激光束等，均属于此类热源。

有关各种焊接热源的物理实质和产生过程，将在弧焊电源及焊接方法与设备等课程中进行较详细的介绍，本课程仅讨论对热源热量的利用情况，即热效率问题。

二、焊接过程的热效率

焊接时，热源所产生的能量并不能全部得到利用，而是有一部分损失于向周围介质的散失及飞溅中。我们把焊件（包括母材与填充金属）所吸收的热量叫作热源的有效热功率。有效热功率是热源输出总功率的一部分。

现以电弧为例，电弧输出的总功率 q_0 可以表示为：

$$q_0 = UI \quad (1-1)$$

式中 U ——电弧电压，

I ——焊接电流，

q_0 ——电弧功率，即电弧在单位时间内所析出的能量。

有效功率 q 为

$$q = \eta' q_0 \quad (1-2)$$

式中 η' ——加热过程功率有效系数或称热效率。

η' 值一般根据实验测定，其数值与焊接方法、焊接工艺参数和被焊材料有关，见表 1-2 与表 1-3。

为了更好地理解有效功率及热效率的含义，表 1-4 列出手工电弧焊和埋弧焊过程中热量分配的情况。可以看出，有效功率包括了基本金属从热源吸收的热量和随熔滴过渡到熔池中的热量。埋弧自动焊时 $\eta' = 81\%$ ，高于手工电弧焊的 η' 值，说明前者的能量利用更为充分。

表1-2 不同焊接方法的 η' 值

焊接方法	碳弧焊	手工电弧焊	埋弧焊	钨极氩弧焊		熔化极氩弧焊	
				交 流	直 流	钢	铝
η'	0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.99	0.68~0.85	0.78~0.85	0.66~0.89	0.70~0.85

表1-3 焊剂和电流对 η' 值的影响⁽¹⁾

焊 剂	电流与焊丝直径之比/(A·mm ⁻¹)				含 氢 量
	70~100	100~200	200~300	300~400	$w_{C.P.} \times 100$
AH-3(苏)	0.78~0.85	0.84~0.87	0.87~0.92	0.92~0.97	0.2~3.5
焊剂430	—	0.70~0.85	0.85	—	5.0~8.0

表1-4 手工电弧焊和埋弧焊时热量分配情况和 η' 值

焊 接 方 法	有 效 热 功 率			飞溅损失	损失于周围介质的热量 ⁽¹⁾
	基本金属吸收热量	随熔滴过渡热量	η'		
手 工 电 弧 焊	50%	25%	75%	5%	20%
埋 弧 焊	54%	27%	81%	1%	18%

① 包括焊条药皮和焊剂熔化所消耗的热量。

应该说明的是, η' 值虽然代表了热源能量的利用率, 但并不意味着其包含的热量全部得到了合理的应用。因为母材吸收的热量中只有一部分消耗于使焊接区熔化, 而其余部分则散失于母材内部, 使得近缝区母材的温度升高, 以致发生组织变化, 从而形成热影响区。严格地说, 对加热近缝区母材所消耗的热量不仅不能称之为“有效”, 反而会因金属组织与性能的变化而带来不利的影响。因此, 我们希望这部分热量越少越好。

近年来, 不少文献中引用了熔化效率的概念。热源的熔化效率, 系指焊接时用于熔化金属的热功率在热源中的百分比。熔化效率不仅能确切说明热源能量的利用率, 而且可以作为描述焊接热源先进性的一个指标。熔化效率高的热源(如电子束和激光束可达95%左右)焊接生产率高, 热影响区窄, 焊接质量好, 而且节约能源。特别适用于焊接一些难熔或活性的金属材料, 应用范围比较宽。

§ 1-2 焊接传热的基本方式与焊接温度场

熔焊时, 要求热源迅速将被焊金属局部加热到熔点以上的高温, 同时热源与工件之间还有相对运动, 因此工件上的温度分布不均匀, 且各点温度要随时间而变化。在生产中, 热源的性质和功率、被焊金属的性能、产品的几何尺寸等, 也将对热量的传递产生明显的影响。因此, 焊接的传热过程比整体均匀加热的热处理要复杂得多。

焊接接头质量与焊接时传热情况有密切联系, 为此, 必须根据传热学的基本规律掌握工件温度变化的规律。

一、焊接传热的基本方式

由热力学第二定律指出: 只要有温度差存在, 热量总是自发地从高温物体向低温物体传

递。焊接时，焊件局部被加热到高温，焊件上各点之间以及焊件与周围介质之间都存在着温度差，因此必然伴随有热量的转移。

热量有三种基本传递方式，即导热、对流及热辐射。这三种传递方式的物理本质不同。

1. 导热（又称热传导）

是指直接接触的物体之间热量传递的现象。导热一般发生在固体内部，在流体中也能发生，但比较微弱，一般不予考虑。导热过程中热量的传递形式，主要是热运动能量较高的粒子通过碰撞，将能量转移给热运动能量较低的粒子。对于金属来说，粒子的热运动能量，主要是依靠自由电子传递。微观上粒子动能的转移，在宏观上就表现为热量由物体的高温部分传递到低温部分。

2. 热对流

是指流体内部各部分发生相对位移而引起的热量转移现象，热对流只能发生在流体内部。

3. 热辐射

是由物体表面直接向外界发射可见和不可见射线，在空间传递能量的现象。热辐射与传导、对流不同，能量传递时不需要互相接触。因此，即使在高真空度的空间，热辐射也能进行。热辐射过程中能量形式的转化过程一般是热能→辐射能→热能。辐射能是由分子的碰撞和原子的运动而产生的，属于物体固有的属性。由于物体的辐射能力与其绝对温度（K）的四次方成正比，因此两个物体互相辐射的结果，必然是热量从温度较高的物体向温度较低的物体转移。

在焊接过程中上述三种传热方式都存在，对大多数焊接方法来说（电阻焊与摩擦焊除外），热量从热源传递到焊件主要是通过热辐射和热对流，而热量在母材与焊丝内部，则以导热的方式传递。我们现在主要是研究热量在母材和焊丝（条）内部的传递与分布规律，因此以导热为主，适当考虑热对流和热辐射的作用。

二、焊接温度场的概念

导热过程中热量转移的数量，与物体上的温度分布（温度差）、导热面积、导热时间及物体本身的性质等因素有关，而其中温度分布是最主要的。

焊接时，焊件上各点的温度不同，并随时间而变化。某一瞬时焊件上各点温度的分布，叫做焊接温度场。与磁场、电场等概念相似，温度场考虑的对象，是空间一定范围内各点温度总的分布状态，而不是某一个点的温度变化。由于焊件上各点的温度还随时间而变化，因此温度场应该是某一瞬时的温度场。与其它函数一样，温度场可以用列表、数学式或图形表示。

温度场的数学表达式可写作

$$T(t) = f(x, y, z) \quad (1-3)$$

式中 $T(t)$ ——工件上某一点在某一瞬时的温度；

x, y, z ——该点的坐标。

最直观和实用的表示方法是图象法，在实用中用等温线或等温面来表达温度场的形象。等温线或等温面就是在同一瞬时温度场中相同温度各点所联成的线或面。在给定温度场中，任何一点不可能同时具有两个温度，因此不同温度的等温线（面）绝对不会相交，这是等温线（面）的重要性质。

为了进一步说明等温线（面）的应用，现以最简单的固定热源加热厚大工件时的情况进行分析。由于排除了热源运动和工件边界散热的影响而将问题简化，工件上温度分布见图1-1。由于金属内部各个方向的散热条件相同，因此某一瞬时工件上各点的温度只与该点至热源的距离有关。显然，等温面就是以热源中心为圆心的同心半球面，半球的半径随温度的降低而加大，而温度为金属熔点 T_M 的等温面所包围的体积就是熔池（图中阴影线部分）。从平面观察，在与 XOY 面平行的各个截面上的等温线是不同半径的同心圆；而平行于 XOZ 和 XOY 的各个截面上的等温线则是不同半径的同心半圆。

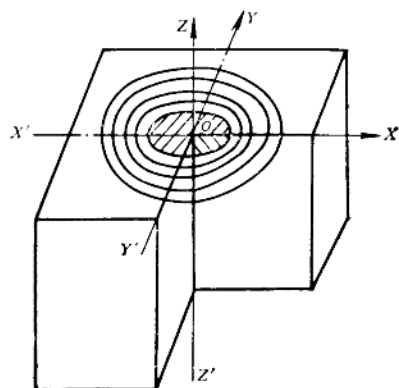


图1-1 固定热源加热厚大工件时的等温面分布

当热源移动时，温度场将发生变化，移动热源的温度场如图1-2所示。热源的运动使得沿运动方向的温度分布不再对称，这是因为热源前面是未经加热的冷金属，温差大，等温线密集；而热源后面则是刚焊完的焊缝，尚处于高温，温差小，等温线稀疏（图1-2 a）。热源运动对两侧温度的分布影响相同，因此，整个温度场对 Y 轴形成不对称，而对 X 轴分布对称（图1-2 a、b）。

导热过程中，热量由高温传向低温，是沿着等温面法线方向传递的。如果热量是沿着与法线成 ϕ 角的方向传递（如图1-3），则可将热量 q 分解为法线上的分量 q_n 和切线方向的分量 q_τ 。但是在等温面的切线方向上不存在温度差，因而没有热量的转移， q_τ 必然为零。因此，热量只能是沿着等温面的法线方向传递。

导热过程中传递热量的大小与温度差成正比，因此，沿等温面法线方向温度变化率是定量描述导热过程的一个重要的物理量。通常把温度场中任意点的温度沿等温面法线 n 方向的增加率称为该点的温度梯度 G 。

$$G = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-4)$$

因为法线 n 是矢量，所以温度梯度也是矢量，温度梯度的正方向指向温度增加一方，矢量的模是式（1-4）的数值。热流朝温度下降的方向传递，与温度梯度的方向相反。负的温度梯度（ $-G$ ）又叫做温度降度。

根据热量传播的规律，从等温面的分布状态就可以判断热量散失的方向和速度，从而可以判断焊缝结晶对晶粒长大的方向及冷却速度等。

一般把各点温度不随时间变化的温度场称为稳定温度场，而随时间变化的温度场称为不稳定温度场。实际生产中，绝大多数焊接温度场都是随时间而变化的，属于不稳定温度场。

研究不稳定温度场的实际困难很多，但在正常焊接条件下，当恒定功率的热源在一定尺寸的工件上进行匀速直线运动时，经过一段时间以后，焊接过程稳定，就形成了一个与热源作同步运动的不变温度场，叫做准稳定温度场。如果采用移动的坐标系，坐标原点与热源中心重合，则各点的温度就不再随时间变化。这样，采用了移动坐标系就可把不稳定的温度场转换为稳定的温度场，从而用瞬时的温度场描述整个焊接区温度变化的规律。在焊接热过程

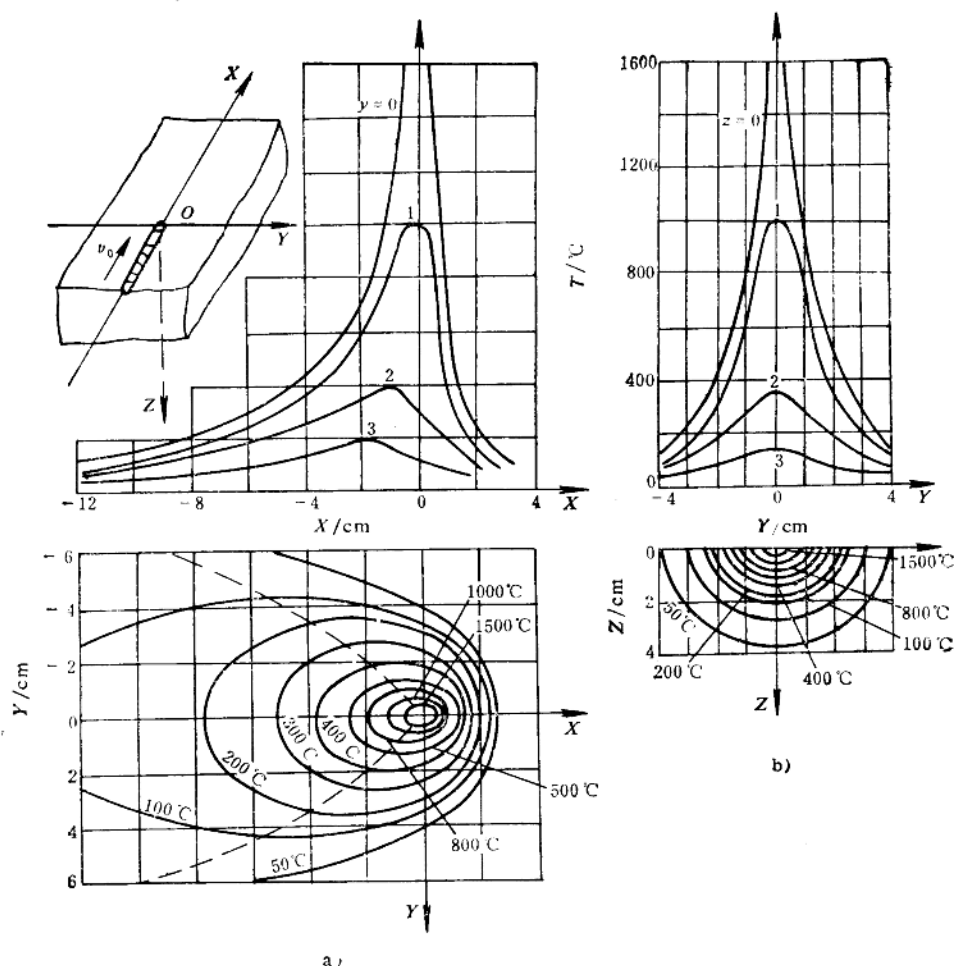


图1-2 半无限大物体表面上运动热源的温度场
 a) 在XOY平面上的等温线及温度分布 b) 在YOZ平面上的等温线及温度分布
 $q = 4200 \text{ J/s}$ $v = 0.1 \text{ cm/s}$

分析中，都是采用这种与热源作同步运动的移动坐标系。

三、影响焊接温度场的因素

温度场是由焊接热源的性质与热量在焊件内部传递的情况所决定的。在导热过程中，转移的热量 dQ 的大小，与导热面积 dF 、导热时间 dt 、温度梯度 G 成正比。可用下式表示

$$dQ = \lambda (-G) dF dt \quad (\text{J}) \quad (1-5)$$

式中 λ 为由材料的物理性能所决定的比例常数，称为热导率或导热系数，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 或 $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

根据式(1-5)的关系，影响焊接温度场的因素有如下几个：

1. 热源的性质及焊接工艺参数

不同的热源及焊接工艺参数影响焊件上各点的温度梯度及导热时间，因而最终决定温度