

高等学校教材

焊接冶金与金属焊接性

(修订本)

吉林工业大学 周振丰
天津大学 张文钺 合编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

- t_m ——最高温度 (°C)
 T_s ——固相温度 (°C)、碳化物溶解温度 (°C)
 T_0 ——预热温度 (°C)
 T_G ——晶粒长大的开始温度 (°C)
 $T_{r,1}$ ——脆性转变温度 (却贝冲击试样具有 90~95% 结晶状断口)
 $T_{r,15}$ ——脆性转变温度 (具有 15ft-lb 冲击功的转变温度)
TRC——拉伸拘束裂纹试验
TIG——钨极氩弧焊
 T_e ——周围环境温度 (°C)
 t_H ——焊接时 A_3 相变温度以上的停留时间 (s)
 t_r ——电弧通过后冷到任意温度冷却时间 (s)
 t_{100} ——电弧通过后冷到 100°C 时的临界冷却时间 (s)
 t_{cr} ——临界冷却时间 (s)
 v ——焊接速度 (cm/s)
 v_c ——结晶速度 (cm/s)
 α ——线胀系数 ($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
 a_H ——焊条的熔敷系数 [g/(A · h)]
 a_p ——焊条的熔化系数 [g/(A · h)]
 ε ——应变 (%)
 η ——合金过渡系数 (%)
 h ——板厚 (mm)
 θ ——熔合比 (%), 浸润角
 λ ——导热系数 [W/(cm · °C)]
 ρ ——密度 (g/cm³)
 σ ——应力 (N/mm²), 表面张力 (N/m)
 σ_t ——抗拉强度 (N/mm²)
 σ_s ——屈服强度 (N/mm²)
 σ_{uc} ——上临界应力 (N/mm²)
 σ_{uL} ——下临界应力 (N/mm²)
 σ_{cr} ——产生裂纹的临界应力 (N/mm²)
 ψ ——断面收缩率 (%), 焊条损失系数 (%)
 ω_H ——加热速度 (°C/s)
 ω_c ——冷却速度 (°C/s)
UE——梅氏冲击值 (J/cm²)
VE——却贝冲击值 (J/cm²)

前 言

《焊接冶金与金属焊接性》是高等学校焊接专业一门主要的专业课程，它在培养焊接技术人员的教学过程中起着重要的作用。同时也是从事焊接技术工作同志不可缺少的参考资料。

本书——《焊接冶金与金属焊接性》是根据1984年1月“焊接专业教材分编审委员扩大会议”所通过的教学大纲编写的。是在《金属熔焊原理及工艺》（上、下册）一书的基础上，根据大纲的要求调整了若干内容：如把原书中焊接热过程转至新编参考书——《焊接传热学及数值计算》；把焊接的各类裂纹（包括热裂纹、冷裂纹、再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹）合在一起，另设一章——“焊接裂纹”，以便全面了解和分析；原书中异种金属焊接一章取消，其内容精减后并入第九章；删去了“焊接冶金过程动力学”、“浓度过冷对结晶形态的影响”和“高温合金焊接”等内容。本书经过修订之后，更为系统而深入地讨论了焊接过程的一些基本理论问题，内容也更为精炼。

在选材过程中，注意到反映近年来国内外关于熔化焊理论及金属焊接性方面的最新成就和生产经验。

本书的前六章由天津大学张文钺教授统稿，第七~十四章由吉林工业大学周振丰教授统稿。其中绪论、第一、三、五、六章由张文钺教授编写，第二和第四章分别由天津大学张炳范副教授和杜则裕副教授编写；第七章是由清华大学包芳涵副教授编写；第八章是由清华大学任家烈教授编写；第九和第十一章是由清华大学陈伯蠡教授编写；第十、十二和十三章是由吉林工业大学周振丰教授编写；第十四章是由吉林工业大学彭高峨副教授编写的。

本书由哈尔滨工业大学陈定华教授审第一章、张志明教授审第二~六章，清华大学任家烈教授审第七~十四章。

在编写过程中得到冶金部钢铁研究总院八室、冶金建筑研究总院焊接室、哈尔滨工业大学、哈尔滨焊接研究所、装甲兵技术学院、上海交通大学、北京航空材料研究所、北京材料工艺研究所和北京航空学院等单位的大力协助，提供了许多宝贵资料和照片，特此表示感谢。此外，在审稿会上，很多兄弟院校和研究所的老师、专家们，对原书稿进行了认真地讨论，提出了许多宝贵的意见，在此一并致以谢意。

由于编者水平所限，加之时间比较紧迫，书中可能存在缺点和错误，希望批评指正。

编者

1987年6月

名词符号对照表

A ——奥氏体、晶粒的平均面积(mm^2)	H_0 ——初始氢含量 ($\text{ml}/100\text{g}$)
a ——热扩散率 (cm^2/s)	IIW——国际焊接学会
a_k ——冲击韧性 (J/cm^2)	J ——电流密度 (A/mm^2)
B ——贝氏体、熔渣的碱度	K ——热能集中系数 (J/cm^2), 平衡常数 比例系数、碳化物
c ——比热容 [$\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$]	K_b ——药皮重量系数
$c\rho$ ——容积比热容 [$\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$]	K_c ——应力强度因子 ($\text{N}/\text{mm}^{3/2}$)
C'_z ——出现中间组织 (包括贝氏体、索氏体、托氏体) 的临界冷却时间 (s)	K_f ——焊剂熔化率
C'_f ——出现铁素体的临界冷却时间 (s)	K_{Ic} ——断裂韧性 ($\text{N}/\text{mm}^{3/2}$)
C'_c ——仅得到铁素体和珠光体的临界冷却时间 (s)	L ——液态金属、分配常数、板长 (cm)
C_b ——元素在母材中的浓度	MIG——熔化极氩弧焊
C_e ——元素在焊条中的浓度	P_w ——裂纹敏感指数
C_d ——熔敷金属中元素的浓度	P_H ——富氢时裂纹敏感指数
C_0 ——元素的原始浓度	P_{cm} ——合金元素的裂纹敏感系数
C_W ——焊缝中的元素浓度	Q ——热能 (J)
C_g ——平衡时的元素浓度	q ——电弧有效功率 (J/s)
C_{eq} ——碳当量	q_0 ——电弧功率 (J/s)
C_{eo} ——药皮中的元素浓度	q_e ——电弧加热焊条的有效功率 (J/s)
C_{ew} ——焊芯中的元素浓度	q_m ——最大比热流 [$\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]
C'_p ——出现珠光体的临界冷却时间 (s)	$q(r)$ ——比热流 [$\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]
d ——晶粒的平均直径 (mm)	R ——厚大焊件上某点距热源的坐标距离 $R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ 、拘束度 [$\text{N}/(\text{mm} \cdot \text{mm})$]
D ——扩散系数	r ——薄板上某点距热源的坐标距离 $r^2 = x^2 + y^2$ 、半径 (cm)
E ——焊接线能量 (J/cm)	RRC——可变刚性拘束裂纹试验
F ——铁素体、气泡的表面积 (cm^2)	R_{cr} ——临界拘束度 [$\text{N}/(\text{mm} \cdot \text{mm})$]
f ——熔滴过渡频率 ($1/\text{s}$)	H ——热焓 (J/g)
F_g ——熔滴的表面积 (cm^2)	SHCCT图——模拟焊接热影响区连续冷却组织转变图
F_p ——熔池的表面积 (cm^2)	SWCCT图——模拟焊缝连续冷却组织转变图
F_M ——焊缝的熔透面积 (cm^2)	T ——温度 ($^\circ\text{C}$), 托氏体
F_W ——焊缝的断面积 (cm^2)	t ——时间 (s)
g ——金属熔化速度 (g/s)	T_B ——脆性温度 ($^\circ\text{C}$)
g_c ——熔池金属的凝固速度 (g/s)	T_L ——液相温度 ($^\circ\text{C}$)
g_D ——焊条的平均熔敷速度 (g/s)	T_M ——熔化温度 ($^\circ\text{C}$)
g_M ——焊条金属平均熔化速度 (g/s)	
G ——温度梯度 ($^\circ\text{C}/\text{cm}$)	
HAZ——焊接热影响区	

目 录

绪论	1	一、焊缝中硫的危害及控制	90
一、学习本课的目的、任务和要求	1	二、焊缝中磷的危害及控制	92
二、焊接过程的物理本质	1	参考文献	94
三、焊接冶金与金属焊接性的研究概况	3	第三章 熔池结晶和焊缝组织	95
参考文献	4	§ 3-1 熔池结晶的特点和结晶形态	95
第一章 焊接热源及熔池形成	6	一、熔池结晶的特殊性	95
§ 1-1 焊接热源及温度场	6	二、熔池结晶的一般规律	96
一、焊接热源的种类及特征	6	三、熔池结晶线速度	98
二、焊接过程的热效率和焊件上的热能分布	7	四、熔池结晶的形态	101
三、焊接温度场	10	五、焊缝金属的化学成分不均匀性	105
§ 1-2 焊条熔化及熔池形成	19	§ 3-2 焊缝金属的一次结晶组织	109
一、焊条的加热及熔化	19	一、焊接条件下的凝固结晶形态	109
二、焊接熔池形成	24	二、一次结晶形态对性能的影响	111
参考文献	28	三、一次结晶组织的改善	111
第二章 焊接化学冶金	29	§ 3-3 焊缝金属的二次结晶组织	113
§ 2-1 焊接化学冶金过程的特点	29	一、低碳钢焊缝的二次组织	113
一、焊接过程中对金属的保护	29	二、低合金钢焊缝的二次组织	114
二、焊接化学冶金反应区及其反应条件	31	三、改善焊缝二次组织的途径	118
三、焊接工艺条件与化学冶金反应的关系	34	§ 3-4 焊缝中的气孔和夹杂	120
四、焊接化学冶金系统及其不平衡性	36	一、焊缝中的气孔	120
§ 2-2 焊接区内的气体和焊接熔渣	37	二、焊缝中的夹杂	129
一、焊接区内的气体	37	参考文献	130
二、焊接熔渣	43	第四章 焊条、焊剂和焊丝	132
§ 2-3 气体对金属的作用	50	§ 4-1 焊条	132
一、氮对金属的作用	51	一、焊条的分类	132
二、氢对金属的作用	55	二、焊条的组成	133
三、氧对金属的作用	65	三、焊条的工艺性能	137
§ 2-4 焊接时的氧化还原反应	68	四、典型焊条的性能分析	142
一、氧化还原方向的判据	68	五、焊条的配制	144
二、金属的氧化反应	70	§ 4-2 焊剂	145
三、脱氧反应	77	一、焊剂的类型	146
§ 2-5 焊缝金属的合金化	82	二、焊剂的性能和用途	146
一、合金化的目的及方式	82	§ 4-3 焊丝	148
二、合金化过程的理论分析	83	一、气保护焊焊丝	148
三、合金过渡系数及其影响因素	86	二、药芯焊丝	148
§ 2-6 焊缝中硫和磷的控制	90	参考文献	150
		第五章 焊接热影响区的组织和性能	151

§ 5-1 焊接热循环.....151	四、防止层状撕裂的措施258
一、焊接热循环的主要参数152	§ 6-6 应力腐蚀裂纹.....260
二、热循环主要参数的测试与计算153	一、应力腐蚀裂纹的危害性260
三、多层焊热循环的特点159	二、应力腐蚀裂纹的特征260
§ 5-2 焊接热循环条件下的金属组织转变	三、产生应力腐蚀裂纹的机理262
特点.....161	四、应力腐蚀裂纹的影响因素及其防治266
一、焊接时加热过程组织转变的特点161	§ 6-7 焊接裂纹的综合分析和判断.....269
二、焊接时冷却过程组织转变的特点163	一、宏观分析及判断269
三、焊接条件下 CCT 图的建立及其应用.....166	二、微观分析及判断270
§ 5-3 焊接热影响区的组织和性能.....170	三、断口分析及判断273
一、焊接热影响区的组织分布170	参考文献283
二、焊接热影响区的性能175	第七章 金属焊接性及其试验方法289
§ 5-4 焊接热模拟试验方法的特点.....185	§ 7-1 焊接性概念.....289
一、焊接模拟技术发展的背景185	一、金属的焊接性289
二、焊接模拟技术的发展过程及其现状185	二、工艺焊接性289
三、焊接模拟试验的基本原理及主要参数186	§ 7-2 焊接性的试验.....291
参考文献187	一、焊接性试验的内容292
第六章 焊接裂纹189	二、焊接性试验方法分类292
§ 6-1 概述.....189	三、选择或制定焊接性试验方法的原则292
一、焊接裂纹的危害性189	§ 7-3 常用焊接性试验方法.....293
二、焊接裂纹分类及其一般特征190	一、斜 Y 坡口对接裂纹试验 (Y
§ 6-2 焊接热裂纹.....195	slit cracking test)293
一、结晶裂纹的形成机理196	二、插销试验 (Implant test)294
二、结晶裂纹的影响因素199	三、刚性固定对接裂纹试验296
三、防治结晶裂纹的措施204	四、横向可变拘束试验298
四、近缝区液化裂纹206	五、其它试验298
五、多边形裂纹209	参考文献300
§ 6-3 焊接冷裂纹.....212	第八章 合金结构钢的焊接301
一、冷裂的危害性及其一般特征212	§ 8-1 合金结构钢的分类.....301
二、冷裂纹的种类213	一、强度用钢301
三、焊接冷裂纹的机理214	二、特殊用钢302
四、冷裂纹的影响因素及防治措施226	§ 8-2 热轧及正火钢的焊接.....303
§ 6-4 再热裂纹.....244	一、热轧及正火钢的成分和性能303
一、再热裂纹的主要特征245	二、热轧及正火钢的焊接性分析306
二、再热裂纹的产生机理246	三、热轧钢及正火钢的焊接工艺特点317
三、再热裂纹的影响因素及其防治250	§ 8-3 低碳调质钢的焊接.....323
§ 6-5 层状撕裂.....253	一、低碳调质钢的成分和性能323
一、层状撕裂的特征、分类及其危害性253	二、低碳调质钢的焊接性分析324
二、层状撕裂的形成机理及其影响因素255	三、低碳调质钢的焊接工艺特点330
三、层状撕裂的判据257	§ 8-4 中碳调质钢的焊接.....333
	一、中碳调质钢的成分和性能333
	二、中碳调质钢的焊接性分析336

三、中碳调质钢的焊接工艺特点	337	一、工业纯铝的特性	404
§ 8-5 专用钢焊接的特殊要求	339	二、铝合金的合金化及其特性	404
一、珠光体耐热钢焊接的特殊要求	339	三、铝合金的耐蚀性	407
二、低温用钢焊接的特殊要求	343	四、铝合金的物理性能	407
三、低合金耐蚀钢焊接的特殊要求	348	§ 11-2 铝及其合金的焊接性	408
参考文献	352	一、焊缝的气孔	408
第九章 不锈钢及耐热钢焊接	354	二、焊接热裂纹	412
§ 9-1 不锈钢及耐热钢的类型和特性	354	三、焊接接头的“等强性”	416
一、不锈钢及耐热钢类型	354	四、焊接接头的耐蚀性	420
二、不锈钢的耐蚀性能	354	§ 11-3 铝及其合金的焊接工艺特点	421
三、耐热钢的高温性能	355	一、焊接工艺的一般特点	421
四、不锈钢及耐热钢的物理性能	356	二、焊接方法的选用	421
§ 9-2 奥氏体钢的焊接	357	三、焊丝的选用	424
一、奥氏体不锈钢接头的晶间腐蚀问题	357	参考文献	425
二、不锈钢接头的应力腐蚀开裂问题	362	第十二章 铜及铜合金的焊接	427
三、奥氏体钢焊接接头热裂问题	363	§ 12-1 铜及铜合金的分类、成分及性能	
四、奥氏体钢焊接接头的力学性能问题	367	简介	427
五、奥氏体钢的焊接生产工艺特点	368	一、紫铜	427
§ 9-3 马氏体钢及铁素体钢的焊接	369	二、黄铜	428
一、马氏体钢的焊接问题	369	三、青铜与白铜	429
二、铁素体钢的焊接工艺特点	372	§ 12-2 铜及铜合金焊接性分析	429
§ 9-4 珠光体钢与奥氏体钢的焊接	374	一、难熔合及易变形	429
一、异种钢焊接的主要问题	374	二、热裂纹	430
二、异种钢焊接施工特点	378	三、气孔	430
三、复合钢的焊接特点	379	四、焊接接头机械性能及导电性能	
参考文献	380	的变化	432
第十章 铸铁焊接	381	§ 12-3 紫铜及黄铜的焊接工艺要点	432
§ 10-1 铸铁的种类及性能简介	381	一、焊接方法的选择	432
§ 10-2 铸铁焊接性分析	384	二、焊接材料的选择	433
一、灰口铸铁焊接性分析	384	三、焊接工艺技术上的要点	433
二、球墨铸铁焊接性的特点	389	参考文献	434
§ 10-3 灰口铸铁焊接材料及工艺	390	第十三章 钛及钛合金的焊接	435
一、同质(铸铁型)焊缝的熔化焊	390	§ 13-1 钛及钛合金的种类、成分及性	
二、异质(非铸铁型)焊缝的电弧冷焊	393	能简介	435
三、钎焊	400	§ 13-2 钛及钛合金可焊性分析	438
§ 10-4 球墨铸铁焊接工艺简介	401	一、气体等杂质污染而引起焊接接头	
一、同质焊缝的熔焊工艺	401	脆化	439
二、异质(非铸铁型)焊缝的电弧冷		二、焊接接头裂纹问题	443
焊焊条	402	三、焊缝气孔问题	443
参考文献	403	§ 13-3 工业纯钛及 TC1 钛合金焊接工艺	
第十一章 铝及其合金的焊接	404	要点	445
§ 11-1 铝及其合金的类型及特性	404	一、氩弧焊	445

二、等离子弧焊	447	四、气体保护和自保护明弧堆焊	466
参考文献	448	五、等离子弧堆焊	467
第十四章 堆焊	449	六、电渣堆焊	467
§ 14-1 堆焊的应用及意义	449	参考文献	469
§ 14-2 堆焊层的工作条件及堆焊合金		附录	470
成分的选用	450	附录一 焊条牌号编制方法 (GB980—76) ...	470
一、堆焊层磨损的一般概念	450	附录二 焊条新国标中：“焊条型号”的	
二、堆焊合金的类型、特点和选用	452	编制方法 (GB5117—85)	471
§ 14-3 堆焊方法的特点	464	附录三 焊条药皮材料技术条件	473
一、手工电弧堆焊	464	附录四 国内外焊条对照表	476
二、氧-乙炔焰堆焊	464	附录五 焊剂牌号编制方法	480
三、埋弧堆焊	465	附录六 国内外堆焊焊条对照表	481

绪 论

焊接在现代的工业生产中，已成为一种重要的金属加工工艺，它已广泛地应用于金属结构、桥梁、造船、航空、航天、海洋工程、核动力工程、微电子技术以及石油化工、电力、冶金建筑等工业部门。随着科学技术的不断发展，焊接已发展成为一门独立的学科。

一、学习本课的目的、任务和要求

《焊接冶金与金属焊接性》是焊接专业的主要基础理论课之一，它的主要任务是：研究金属材料在熔焊条件下，有关化学冶金和物理冶金方面普遍性规律。在这个基础上，来分析各种具体条件下金属材料的焊接性，为制订合理的焊接工艺、探索提高焊接质量的新途径提供理论依据。因此，本课在专业教学中占有重要地位。本课的内容共分两大部分：

第一部分——焊接冶金学 这部分是前六章内容，是金属熔化焊的理论基础，主要讨论在焊接条件下的熔池形成问题、焊接热源及温度场；焊接化学冶金问题、气相与金属的相互作用、熔渣与金属相互作用、焊接时的氧化与还原、焊缝金属的合金化，以及焊缝金属中硫、磷等杂质的控制和降低有害作用等；焊接熔池结晶和焊缝组织、焊缝金属的一次结晶、二次结晶、焊缝中的气孔和夹杂；焊条、焊剂和焊丝、气保护焊丝和药芯焊丝；焊接热影响区组织和性能、焊接条件下 CCT 图的建立及其应用；焊接热裂纹、冷裂纹、再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂级，以及各种焊接裂纹的综合分析及判断等。

第二部分——金属焊接性 这部分是后八章内容，主要是对典型金属材料的焊接性进行分析和选择优化的焊接工艺。讨论的主要内容有金属焊接性及其试验方法，合金结构钢的焊接、不锈钢及耐热钢的焊接（包括异种钢焊接）、铸铁焊接、铝及铝合金的焊接、铜及铜合金的焊接、钛及钛合金的焊接及堆焊等。

学习本课的目的在于：掌握金属材料熔化焊接的基本理论，培养学生分析金属焊接性的基本能力、学会试验研究的基本方法，并综合运用其他方面的知识，为正确选择焊接材料、工艺方法和制定合理的焊接工艺打下基础。

本课是以“物理化学”、“金属学及热处理”，以及“焊接概论”等课为基础，结合焊接的特点来探讨各种金属焊接时的基本规律。本课所涉及的理论问题和实际问题十分广泛，有时必须综合运用几个方面的知识和生产经验才能解决。

应当指出，就现代的科学技术水平来看，焊接冶金与金属焊接性方面仍有一些未被认识的内在规律，这就需要在今后的科学实践中不断认识、不断提高。要有所发现、有所前进，使我国的焊接技术达到一个更高的水平。

二、焊接过程的物理本质

正确认识焊接的物理本质，对于提高焊接质量、发展焊接技术具有重要的意义。

什么是焊接？概括来讲，可以给焊接下如下的定义：

两种或两种以上材质（同种或异种），通过加热或加压或二者并用，来达到原子之间的结合而形成永久性连接的工艺过程叫作焊接。

由此可知，焊接与其他连接方式不同，不仅在宏观上建立了永久性的接头，而且在微观

上也建立了组织之间的内在联系。

众所周知，金属是依靠金属键结合在一起的。由图 0-1 可以看出，两个原子之间的结合力决定于二者之间引力与斥力共同作用的结果。当原子间的距离为 r_A 时，结合力最大。对于大多数金属， $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{nm}\ominus$ ，当原子间的距离大于或小于 r_A 时，结合力都显著减小。

怎样才能实现焊接过程呢？从理论上讲，就是使两被连接的固体金属表面接近到相距 r_A 时，就可以在接触表面上进行扩散、再结晶等物理化学过程，从而形成金属键，达到焊接的目的。但是，即使经过精加工的金属表面，实际上也有凹凸不平之处，同时金属表面还常常带有氧化膜、水、油污等吸附层，这些都会阻碍金属表面紧密接触。

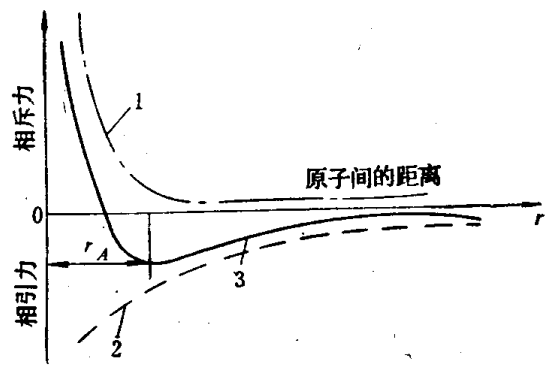


图0-1 原子之间的相互作用力与距离的关系
1—斥力 2—引力 3—合力

为了克服阻碍金属表面紧密接触的各种因素，在焊接工艺上可采取两种措施：

1. 对被焊金属施加压力 目的是破坏接触表面的氧化膜，使连接处发生局部塑性变形，增加有效接触面积，从而达到紧密接触。
2. 对被焊金属加热 使连接处达到塑性或熔化状态，使接触面的氧化膜迅速破坏，降低金属变形的阻力，增加原子的振动能，促进扩散、再结晶、化学反应和结晶过程的发展。

每种金属实现焊接所必需的温度与压力之间存在一定的关系，对于纯铁来讲，可参见图 0-2 所示^[1]。由该图可以看出，金属加热的温度越低，实现焊接所需的压力就越大。当金属的加热温度 $T < T_1$ 时，压力必须在 AB 线的右上方（I 区）才能实现焊接。当金属的加热温度 T 在 $T_1 \sim T_2$ 之间时，压力应在 BC 线以上（II 区）。当 $T \geq T_M$ (T_M 是金属的熔化温度) 时，实现焊接所需的压力为零，这就是熔化焊的情况（III 区）。

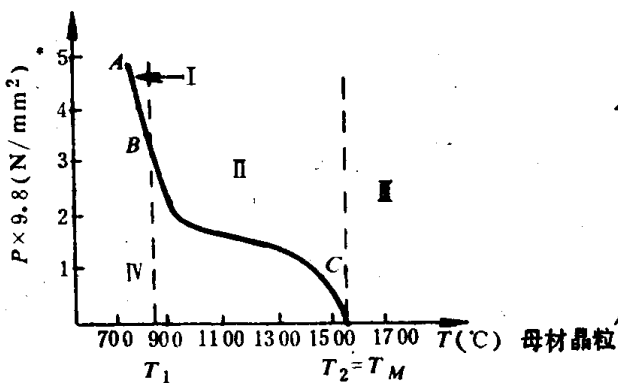


图0-2 焊接纯铁时所必需的温度和压力

I—高压焊接区 II—电阻焊区 III—熔焊区 IV—不能实现的焊接区

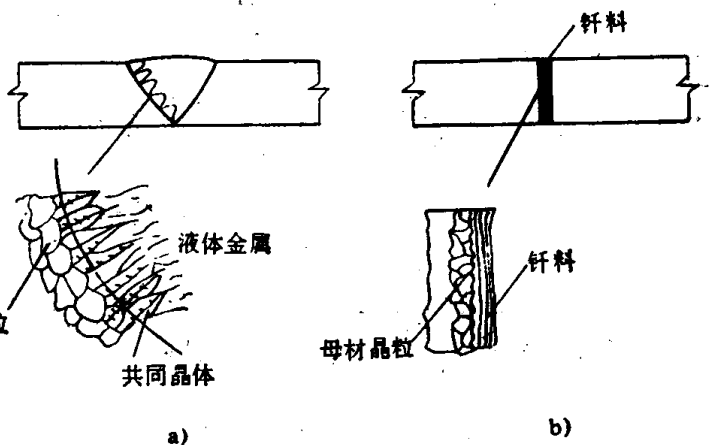


图0-3 焊接和钎焊的本质区别
a) 焊接 b) 钎焊

总括以上的分析，尽管实现焊接的途径很多，然而在实质上，都是使母材和焊缝金属形成共同的晶粒，如图 0-3 a 所示。钎焊时虽然也能形成不可拆卸的接头，但在一般情况下由

$\ominus 1 \text{ \AA} = 0.1 \text{nm}$ 。

于只填充钎料熔化、母材不熔化，故在连接处不易形成共同的晶粒，只是在钎料与母材之间形成粘合（图0-3 b）。因此，一般来讲，焊接与钎焊在微观上是有原则的区别。但近年来研究的共同钎料，也能形成共同晶粒。

三、焊接冶金与金属焊接性的研究概况

由于科学的不断进步，为人类提供的各种装备日益向高参数（如高温、高压、高抗蚀）、大容量、大型化的方向发展。因而不断提出具有特殊性能材料的焊接问题，如高强钢、超高强钢、不锈钢、耐热钢、耐蚀钢、铝合金、钛合金、耐热合金、各种活性金属、难熔金属、异种金属以及金属与非金属的焊接。这就对焊接提出了更高的要求，同时就促使人们去研究焊接冶金的有关问题，并使它得到很大的发展。当然，焊接工艺、焊接设备和焊接材料等也得到很大的发展〔2、3〕。

焊接冶金所研究的内容十分广泛，包括焊接所经历各个过程。对于金属材料的熔化焊来讲，一般都要经历：加热、熔化、冶金反应、结晶、固态相变至形成焊接接头。这些过程之间的相互联系和所处的温度、时间条件，可参见图0-4所示。为便于分析，可归纳为三个相互联系的过程进行研究：

1. 焊接传热过程 熔化焊接时，被焊金属在热源的作用下，将发生局部受热和局部熔化。因此，在被焊金属中必然存在热的传播和分布问题，通常称之为焊接热过程。

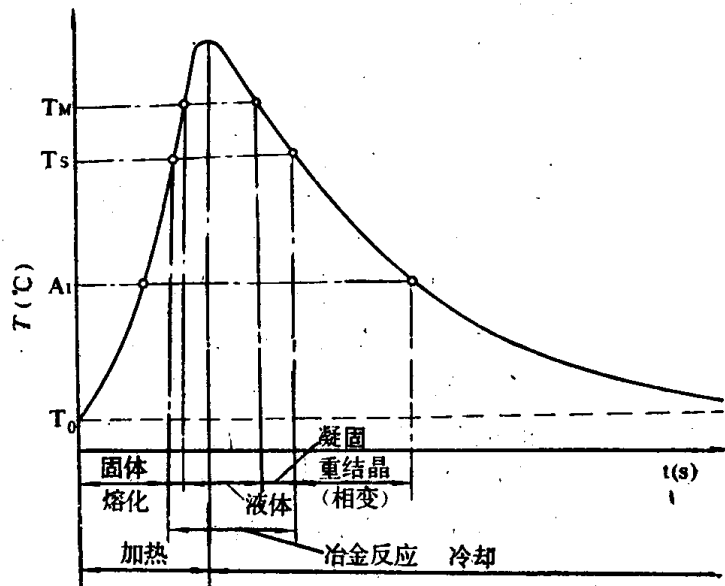


图0-4 焊接所经历的过程

T_M —金属的熔化温度(液相线) T_s —金属的凝固温度(固相线)

A_1 —钢的 A_1 变态点 T_0 —初始温度

焊接热过程贯穿整个焊接过程的始终，可以这样说，一切焊接冶金过程都是在热过程中发生和发展的。例如，焊接温度场就决定了焊接应力应变的分布，同时也与冶金反应、结晶、相变和变形等有密切的关系，使之成为影响焊接质量和生产率的重要因素之一。因此，引起了世界各国对焊接热过程的重视，已成为焊接领域中一个独立的分学科，即“焊接传热学”。长期以来，根据数学、物理学和传热理论，对焊接过程的传热进行了大量的研究，已有许多专著〔4、5、6〕。

近年来随着工程建设的需要，各种焊接新工艺得到很大发展：CO₂气保护焊、TIG焊，MIG焊，真空电子束焊接等，这些新焊接方法的焊接传热及温度分布问题，近年来已引起各国重视，并进行了许多研究〔7、8〕。

值得提出的是，近年来采用红外摄影微计算机处理来测定焊接温度场已取得满意的效果。对测定的温度场由计算机作伪着色处理，可以获得清晰的彩色温度场图像，其温度分辨率可达1°C左右〔9〕。

2. 焊接化学冶金过程 熔化焊时，在熔化金属、熔渣和气相之间进行一系列的化学冶金反应，如金属的氧化、还原、脱硫、脱磷、掺合金、除氢等。这些冶金反应直接影响焊缝

金属的成分、组织和性能。因此，控制化学冶金过程是提高焊接质量的重要方法之一。当前在化学冶金方面的研究重点是通过焊接材料提高焊缝的强韧性（与母材相匹配）。所采取的途径主要是两方面：

(1) 通过焊接材料向焊缝中加入微量 Mo、V、Ti·Nb·Zr、Al 和稀土等元素，从而使焊缝金属韧化^[10、11]。

(2) 净化焊缝，适当降低焊缝中的碳，并最大限度排除焊缝中的硫、磷、氧、氮、氢等杂质，也能使焊缝韧化^[12、13]。

此外，近年来采用电子计算机可对焊缝化学成分和机械性能进行预测，对做出最优化的选择方面已取得很大的进展^[14]。把化学冶金的有关规律，建立数学模型。利用电子计算机选出焊缝化学成分与机械性能的最优化方案，是今后焊接化学冶金发展的重要研究方向之一。

3. 焊接时金属的结晶和相变过程 随着热源离开，局部熔化的金属就开始结晶、金属原子由近程有序排列转变为远程有序排列，即由液态转变为固态。对于具有同素异构转变的金属，随温度的下降，将发生固态相变。例如，钢铁材料，将发生 $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ 转变。由于焊接条件下是快速连续冷却，受局部拘束应力的作用，使焊缝金属的结晶和相变都具有各自的特点，并且有可能在这些过程中产生偏析、夹杂、气孔、热裂纹、脆化、冷裂纹等缺陷。因此，控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

与此同时，熔合区和接近焊缝两侧的母材，焊接时也受到热的作用，如图 0-5 上的 2、3 部位。通常把“3”这个部位称为焊接热影响区，该区中各点的最高温度都不超过母材的熔点，但各点所经受的温度循环不同，所以各点所发生的组织转变也不同，并且在某些情况下有可能性能变脆或软化，甚至产生缺陷。

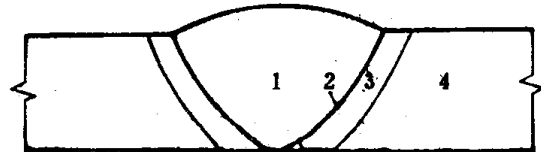


图0-5 焊接接头示意图

1—焊缝 2—熔合区 3—热影响区 4—母材

因此，焊接时除了必须保证焊缝金属的性能之外，还必须保证热影响区的性能。在焊接某些材料，如高强钢、铝合金、钛合金时，热影响区存在的问题比焊缝更为突出，解决起来也更困难一些。为此，世界各国对焊接时的结晶和固态相变（包括焊缝和焊接热影响区）进行了深入的研究，提出了熔池结晶条件对焊缝组织形态的影响^[15]。对于某些低合金高强钢，超高强钢焊缝金属及热影响区的组织（如马氏体、M-A组元、粒状贝氏体等）对性能的影响也作了不少研究^[16、17]。

近年来，根据工业规模的发展，研制出许多新的钢种和新的金属材料，对这些材料焊接接头的韧性、脆性、固态相变、冷裂纹、热裂纹、再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹等问题进行了系统的研究，取得了满意的成果。然而从各个问题的实质和微观行为机理方面，仍在不断作深入研究^[18、19、20、21、22]。

总之，在“焊接冶金与金属焊接性”方面的研究内容十分广泛，目前正从宏观到微观，从定性到定量，从理论到工程实际，进行着全面的、系统和深入研究。

参 考 文 献

- [1] Г. Л. Петров, Теория Сварочных Процессов, «Вышая Школа», 1977.

- [2] 张文钺, 金属材料焊接的发展现状, 《国外焊接技术》, 1978, №3
- [3] 张文钺, 当代新技术的发展趋势及 2000 年焊接技术的发展展望, 1985
- [4] D. Rosenthal, Theory of heat distribution during Welding and Cutting, 《Welding journal》, Vol. 20, 1941, 220s
- [5] Н.Н.Рыкалин, 《焊接热过程计算(译本)》, 机械工业出版社, 1958
- [6] 张文钺, 《焊接传热学》, 天津大学教材, 1963
- [7] 西安交通大学, 脉冲弧焊时的热过程计算, 1977
- [8] 上海交通大学, 脉冲 TIG 焊接温度场的有限元分析和计算, 1982
- [9] 陈定华等, 微型计算机测定焊接温度研究, 《哈尔滨工业大学学报》, 1981. №4
- [10] 西尾一致, 溶接金属の组织に及ぼす微量元素の影響, 《日本第 84 届溶接冶金委员会资料》, 1981
- [11] 渡边之, 溶接金属の韧性におよぼす Ti, B, N および O の影响, 《日本第 84 届溶接冶金会议资料》, 1981
- [12] H. Suzuki, Weldability of modern Structural Steels in Japan, 《Transaction ISIJ》, Vol. 23, 1983
- [13] 唐伯钢, 采用重稀土降低熔敷金属扩散氢的研究, 1985
- [14] 天津大学, 921A 钢用低氢高韧性焊条(远洋-60C 焊条)研究报告, 1985
- [15] 松田福久, 《溶接冶金学》日刊工业株式会社, 1972
- [16] 冶金部钢铁研究总院, 冶金部建筑研究总院, 国产低合金钢焊接接头的断口和金相图, 1985
- [17] 尹士科, 低合金高强钢焊缝中 M-A 组织, 1985
- [18] 日本溶接研究委员会, 溶接冶金(レビュー)上、下《日本溶接学会技术资料》, №3. №4, 1978
- [19] I.F.Lancaster, Metallurgy of Welding, 1980
- [20] R.D.Stout, 《钢的焊接性》(译本), 机械工业出版社, 1986
- [21] 张文钺, 《焊接物理冶金学》, 天津大学研究生教材, 1986
- [22] И. Гривняк, Свариваемость Сталей《Машиностроение》, 1984

第一章 焊接热源及熔池形成

实现焊接过程必须由外界提供相应的能量，也就是说，能源是实现焊接的基本条件。

从实现焊接所采用能源的基本性质来看，主要是热能和机械能。本书主要讨论熔化焊接的有关问题，对于熔化焊接来讲，采用的能源主要是热能源。

熔化焊接的发展过程在某种意义上讲也可以说是焊接热源的发展过程，从上个世纪80年代开发电弧以来，经过100年的历史，作为焊接的热源不断得到更新和完善。例如，1885年的炭弧电焊，1891年的金属极电弧焊，本世纪初的气焊和薄皮焊条电弧焊、20年代至30年代的厚皮焊条电弧焊及氢原子焊、氮气保护焊、40年代(二次大战期间)电阻焊和埋弧自动焊得到了广泛地应用、50年代又出现了电渣焊和CO₂气体保护焊、60年代以后电子束焊接和等离子焊接与切割陆续应用到生产中去，在历史进入70年代的时候又开辟了新的焊接热源，即激光焊接。80年代一方面逐步完善电子束焊接和激光焊接在各项工程上的应用，另一方面又在寻求和探索新的焊接热源，如太阳能、微波和离子束等。

在科学技术不断发展的过程中，随着工程建设的需求，总是不断地研制出新的材料和设计出新的结构，并且不断地提出更高更严格的技术要求，这就需要不断地开发新的焊接热源和新的焊接工艺。从发展的趋势来看，焊接逐步向高效率、高质量，降低劳动强度，降低能量消耗的方向发展。从这一点出发，作为焊接热源应当是：热量高度集中可快速实现焊接过程，并保证得到致密而强韧的焊缝和最小的焊接热影响区。

本章主要讨论焊接热源的种类、特点、焊接温度场以及熔池的形成过程等。这些问题将对焊接化学冶金、熔池结晶，焊接热影响区组织性能，以及应力与变形、气孔、夹杂、裂纹等缺陷具有重要的影响。

§ 1-1 焊接热源及温度场

一、焊接热源的种类及特征

根据多年来的生产实践和根据对焊接热源的基本要求，能够满足焊接条件的热源有以下几种：

1. 电弧热——利用气体介质中放电过程所产生的热能作为焊接热源，是焊接热源中目前应用最为广泛的一种。如厚皮焊条的手工电弧焊、埋弧自动焊、惰性气体保护焊(TIG、MIG)、CO₂气体保护焊(实芯及药芯焊丝)。

2. 化学热——利用可燃气体(氧、乙炔等)或铝、镁热剂燃烧时所产生的热量作为焊接热源(如气焊和热剂铸焊)。这种热源在当前虽属落后些，但在一些电力供应困难和边远地区仍起重要的作用。

3. 电阻热——利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接热源(电阻焊和电渣焊)。采用这种热源所实现的焊接方法，都具有高度的机械化和自动化，有很高的生产率，但需要强大的电力工业为后盾。

4. 高频热源——对于有磁性的被焊金属，利用高频感应产生的二次电流作为热源，在局部集中加热，实质上也是电阻加热的另一种型式。由于这种加热方式热量高度集中，故可以实现很高的焊接速度，如高频焊管等。但高频热源有集肤效应。

5. 摩擦热——由机械摩擦而产生的热能作为焊接热源（摩擦焊）。

6. 等离子焰——电弧放电或高频放电产生高度电离的离子流（严格来讲应不存在分子和原子），它本身携带大量的热能和动能，利用这种能量作为焊接热源（等离子焊接及切割）。

7. 电子束——在真空中，利用高压高速运动的电子猛烈轰击金属局部表面，使这种动能转化为热能作为焊接热源。由于在真空中焊接，可使焊接质量很高，同时由于热能高度集中，使焊缝的深宽比可达40以上，所以焊接热影响区很窄。

8. 激光束——通过受激辐射而使放射增强的光(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)简称Laser(激光)，经过聚焦产生能量高度集中的激光束作为焊接热源。

每种热源都有它本身的特点，目前在生产上均有不同程度的应用，然而随着科学技术的进步，一些理想的焊接热源正在不断完善，如等离子，真空电子束和激光等，将在生产上得到更为广泛地应用。与此同时，还在大力开发新的焊接热源，如太阳能、微波等。

各种热源的最小加热面积、最大功率密度和正常焊接规范条件下的加热温度等特性，如表1-1所示。

表1-1 各种热源的主要特性

热 源	最小加热面积(cm ²)	最大功率密度(W/cm ²)	温 度 (K)
乙炔火焰	10 ⁻²	2×10 ³	3400~3500
金属极电弧	10 ⁻³	10 ⁴	6000
钨极氩弧(TIG)	10 ⁻³	1.5×10 ⁴	8000
埋弧自动焊	10 ⁻³	2×10 ⁴	6400
电渣焊	10 ⁻²	10 ⁴	2300
熔化极氩弧(MIG)CO ₂ 气体保护焊	10 ⁻⁴	10 ⁴ ~10 ⁵	
等离子	10 ⁻⁵	1.5×10 ⁵	18000~24000
电子束	10 ⁻⁷	10 ⁷ ~10 ⁹	—
激光	10 ⁻⁸	10 ⁷ ~10 ⁹	—

限于本书所讨论的主要内容，对于各种热源的物理本质和相应的焊接方法，将在有关的课中进行介绍。

二、焊接过程的热效率和焊件上的热能分布

(一) 焊接过程的热效率

在焊接过程中由热源所提供的热量并不是全部被利用，而是有一部分热量损失于周围介质和飞溅等。也就是说，真正用于焊接的热量只是由热源提供热量的一部分。

如果由热源提供的热量为 Q_0 ，而有效地用于加热焊件的热量为 Q ，那么热效率的定义：

$$\eta = \frac{Q}{Q_0} \quad (1-1)$$

η 称为热效率或加热功率的有效系数。在一定条件下 η 是常数，主要决定于热源性质。

焊接工艺方法、焊接材料的种类（焊条、焊剂、保护气体等）、被焊金属的性质及尺寸形状等。

1. 电弧焊的热效率 如果把电弧看成是无感的，可认为全部电能转为热能，此时电弧功率可由下式确定

$$q_0 = UI \quad (1-2)$$

式中 U ——电弧电压(V)；

I ——焊接电流(A)；

q_0 ——电弧功率，即电弧在单位时间内所析出的能量(W)。

由于能量不是全部用于加热焊件，故真正有效用于加热焊件的功率为

$$q = \eta UI \quad (1-3)$$

如前所述， η 值受许多因素的影响，一般情况下 η 值大小如表1-2所示。

表1-2 不同焊接方法的电弧热效率 η (%)

η 值	焊接方法	碳弧焊	厚皮焊条 手工电弧焊	埋弧自动焊	钨极氩弧焊		熔化极氩弧焊	
					直 流	交 流	钢	铝
η		0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.99	0.78~0.85	0.68~0.85	0.66~0.69	0.70~0.85

此外，电流种类、电流大小、焊接速度以及使用的焊条、焊剂不同，即便同一焊接方法，电弧热效率 η 值也都有一定的变化，如果不是精确考虑，一般情况下可以忽略不计。

为了便于了解电弧焊时，热量的分配情况可参见图1-1所示。

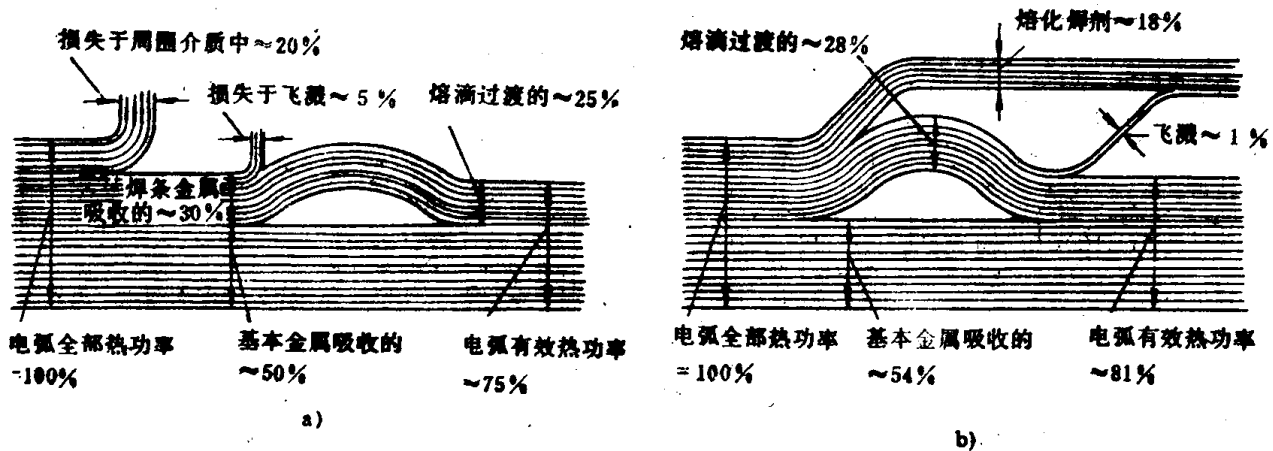


图1-1 电弧焊时的热量分配⁽²⁾

a) 厚皮焊条手工焊 ($I = 150 \sim 250 \text{ A}$, $U = 35 \text{ V}$) b) 埋弧自动焊

($I = 1000 \text{ A}$, $U = 36 \text{ V}$, $v = 36 \text{ m/h}$)

应当指出，这里所说的热效率 η ，只是考虑焊件所能吸收到热能。实际上这部分热能又分流为两方面：一方面用于熔化金属而形成焊缝；另一方面由于热传导而流失于母材形成热影响区。热效率 η 并没有反映这两部分的比例。严格来讲，用于熔化金属形成焊缝的热能才是真正的热效率。

2. 电渣焊的热效率 电渣焊时，渣池处于厚大焊件的中间，热能主要损失于强制成形的冷却滑块。实践证明，焊件的厚度越大，滑块带走热能的比例（即损失于滑块的热量）越

小。这说明电渣焊时，板厚越大，热效率越高。

应指出，电渣焊时，在熔化金属的同时，有大量的热能向母材金属传导，因而导致焊接热影响区过宽、晶粒粗大，成为电渣焊的最大缺点。

电渣焊 90 mm 厚的钢板，其热能分配如图 1-2 所示。由图 1-2 看出，它的热效率较高，可达 80% 以上(用于熔化焊丝、母材及向母材导热)。

3. 电子束与激光焊接的热效率 由于电子束是在真空中焊接，因此它的能量损失很少，热效率可达 90% 以上，电子动能的绝大部分都能转为热能。

激光对焊件加热的机理与电子束不同，它照射焊件时，一部分被吸收，另一部分被焊件表面反射，吸收与反射的比例与被焊材料种类及其表面状态有关。一般来讲，只要被焊件吸收的能量，就能被充分利用，能量的损失极少。

这两种热源的共同特点是能量极为集中，可以在最小的加热面积上提供最大的功率。利用这种热源进行焊接时，可在瞬时之间实现焊接，使绝大部分能量都用于熔化金属 (90% 以上)，所以在焊接同样的工件时所需的功率比其他焊接方法要小得多。

(二) 焊件上加热区的热能分布

热源把热能传给焊件是通过焊件上一定的作用面积进行的，对于电弧焊来讲，这个作用面积称为加热区。如果再进一步分析的话，这个加热区又可分为活性斑点区和加热斑点区 (见图 1-3)。

1. 活性斑点区 活性斑点区是指带电质点 (电子和离子) 集中轰击的部位，而把电能转为热能。该斑点的直径为 d_A ，电流密度 j 的变化如图 1-3 虚线所示。

2. 加热斑点区 在加热斑点区内金属受热是通过电弧的辐射和电弧周围介质的对流进行的。由图 1-4 可以看出，加热斑点的直径为 d_H ，在该区内的热量分布是不均匀的，中心多、边缘少，如同立体的高斯锥体。根据研究证明，在加热斑点上的比热流 (即单位时间内通过单位面积传入焊件的热能) 分布，可以近似地用高斯数学模型来描述。如图 1-4 所示，距斑点中心任意点 A 的比热流可用式 (1-4) 计算：

$$q(r) = q_0 e^{-Kr^2} \quad (1-4)$$

式中 $q(r)$ —— A 点的比热流 [$J/(cm^2 \cdot s)$];

q_0 —— 加热斑点中心的最大比热流 [$J/(cm^2 \cdot s)$];

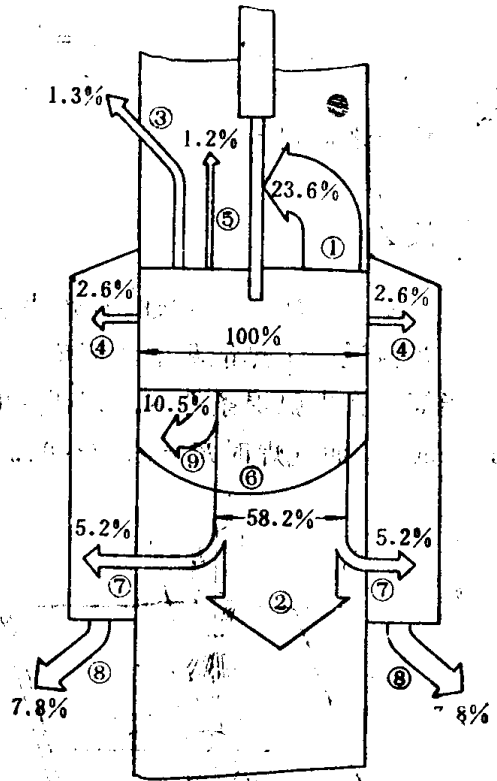


图1-2 电渣焊时的热能分配 (板厚 90mm)

- ①—用于熔化焊丝的热能
- ②—向母材传导的热能
- ③—辐射于工件边缘的热能
- ④—渣池损失于滑块的电能
- ⑤—辐射损失于周围介质的热能
- ⑥—用于熔化母材的热能
- ⑦—熔池损失于滑块的电能
- ⑧—冷却水带走的热能
- ⑨—用于熔池过热的热能

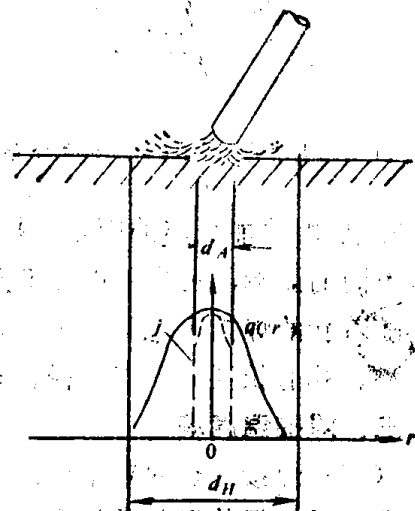


图1-3 电弧作用下的加热斑点