

焊接物理冶金导论

〔瑞典〕K. 依斯特林格 著

唐慕尧 贾昌申 译
史跃武 校



机械工业出版社

《焊接物理冶金导论》作者中译版序

最近，我曾对中国进行了短暂的访问。我强烈地意识到，这个国家的工业（例如造船业）的发展和他们对发展与西方科学家和工程师间的联系的兴趣。现在，在各种会议上遇到年轻的中国学生和研究人员是很平常的事。他们中有些是在国外攻读高一级学位的。我很高兴，在路律欧大学（Lulea University）也有两个在我指导下攻读博士学位的中国学生。因此，得知我这本书可能为更广泛、也可能会是很重要的学者使用时，当然是十分欣慰的。

由于许多大结构都需要焊接，焊接被公认是一种非常重要的工艺。关于焊接方面的国际会议的数目逐年稳定地增加，就是一个例证。此外，国际焊接学会（IIW）也定期举行地区性和国际性的会议，以使世界各地的焊接工艺能保持在高标准水平上。毫无疑问，焊接是一个很复杂的过程。在改进描述焊接循环及其对显微组织及性能的影响模式方面，还有许多工作要做。这本书的宗旨就是想通过研究焊接物理冶金，使我们能进一步提高自觉性，并能对焊接过程进行改进和优化。如果，这本书能对你们伟大国家中业已出现的焊接技术的进一步飞速发展有所帮助的话，将是我最大的愉快。

Kenneth Fairclough

1988年5月

译 者 序

我向我国焊接界和材料工程界的朋友们，尤其是高等学校焊接专业和材料工程专业的大学生和研究生，推荐瑞典路律欧大学（Lulea University）工程材料系系主任 K. 依斯特林格（K. Easterling）教授所著的“焊接物理冶金导论”这本书。

这本书的特点是，从金属物理冶金的基本原理出发，阐述和分析焊接时焊缝及热影响区的凝固、结晶、相变、组织及各种缺陷形成的机制和动力学问题，概念清晰，说理透彻，有助于对焊接物理冶金过程的深刻了解。

因此，当译者 1987 年夏访问路律欧大学时，该大学的李文斌博士向我推荐这本书，K. 依斯特林格教授本人也向我表示殷切地希望他这本著作能有中译本的诚挚愿望，我很高兴地表示愿意给以协助。其后，我就向我国高等学校焊接专业教学指导委员会及国家机械委教材编辑室推荐本书，并自告奋勇地表示愿意承担这本书的翻译工作。

1988 年 1 月，焊接专业教学指导委员会讨论通过，“焊接物理冶金导论”（中译本）作为焊接专业教学参考书。

贾昌申同志参加了本书的翻译工作。

史跃武教授校阅了全部译文。

从实际需要出发，对原文做了少量删减。

在这里，我向这些同志表示深切的谢意。

由于个人水平有限，译文中难免有不妥、甚至错误的地方，欢迎批评指正。

唐慕尧

1988 年 5 月

前 言

这本书我是为冶金、材料科学及工程材料系的本科或研究生课程写的。我希望它也能作为工业界从事焊接的工程师的有用参考书。本书主要涉及钢的焊接，更多地反映了与钢有关的大量文献，但讨论的许多原则，对其它合金也是适用的。本书中尽量避免过多地谈及具体细节，以便能集中阐述有关物理冶金的基本原则。焊接实在太复杂了，我不知除了这样做以外，是否还有其他的处理方法。

本书共四章。中间两章是论述焊接接头，即焊缝金属和热影响区的显微组织及性能；第一章比较广泛地介绍熔化焊的工艺因素，特别是对显微组织及性能影响较大的因素；第四章是关于焊缝中的裂缝及断裂，并对北海亚历山大·凯兰特 (Alexander Kielland) 生活平台灾难性事故进行了综合性分析。

尽管焊接对结构工程来说是非常重要的，但至今还没有大学生用的教材，尤其是焊接物理冶金方面的，有的只是关于焊接冶金的一般性的书籍。编写这本书既重要而又复杂，因此是个激动人心而又富于挑战性的任务。现在，焊接物理冶金导论已经列入了本科及研究生的教学计划。

我向 F. B. Pickering (Sheffield Polytechnic) 致谢，他审阅了原稿并提出了一些有价值的建议。也要向 J. Ion (University of Luleå) 致谢，他帮助进行了最后的审校。

在过去几年搜集资料的过程中，我曾与一些人进行过很多有益的讨论。特别要提到的是 C-H. Rosendahl 及 G. Almqvist (ESAB)、N. Leide (Kockums AB)、N. Christensen (Norwegian Institute of Technology, Trondheim)、H. Astrom (Carbidkontoret Gothenburg)、N-E. Hannerz (Swedish Steel) 和 M. Ashby (Cambridge University)。我特别要感谢 H. S. Wintermark 博士 (Norske Veritas, Oslo) 和我进行的关于亚历山大·凯兰特平台事故研究的讨论；也要特别感谢 L-E. Svensson 博士 (ESAB, Gothenburg)，他送给我上述研究报告，还在焊接材料发展方面提供了有价值的建议。此外，我要感谢 B. Utterberg (ESAB) 送给我漂亮的显微照片。我还得到过焊接研究所 (Cambridge) 的许多帮助，我经常使用他们良好的图书馆设施。我也要向我的同事们 (University of Luleå)，尤其是 B. Loberg、E. Navara、J. Strid 和 J. Ion 致谢，感谢他们的支持和许多鼓舞性的讨论。最后，我要向 A. Engfors 致谢，感谢她的出色的秘书工作和对打印原稿工作的努力。

K · 依斯特林格
Luleå 大学

目 录

前言

第一章 熔化焊——工艺因素 1

1.1 熔化焊 1

1.1.1 焊接材料的设计原则 2

1.1.2 焊缝金属中的气体吸收 5

1.1.3 氮的吸收 7

1.1.4 氢的吸收 8

1.1.5 焊缝的组成 8

1.1.6 工艺因素的小结 10

1.2 焊接热循环 11

1.2.1 传热方程 11

1.2.2 母材的热循环 15

1.2.3 传热方程的改进 18

1.2.4 电渣焊时的传热 19

1.2.5 焊接模拟 20

1.2.6 有关焊接热循环的小结 22

1.3 焊接接头的残余应力 22

1.3.1 温度变化产生的应力及应变 22

1.3.2 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变产生的应力 25

1.3.3 焊缝中残余应力的测定 25

1.3.4 数值法估算焊缝中的残余应力 28

1.3.5 有关残余应力工作的小结 29

参考文献 30

进一步阅读的建议 31

第二章 焊缝金属 33

2.1 焊缝凝固特点 33

2.2 焊缝熔化形状 33

2.3 外延向凝固 38

2.4 晶体生长及偏析 40

2.4.1 固相中无扩散, 液相中完全混合 41

2.4.2 固相中无扩散, 液相中扩散混合 42

2.5 焊缝中的胞状及树枝状结晶 44

2.6 焊缝组织的改善 49

2.7 焊缝金属冷却时的相变 51

2.7.1 相变动力学 51

2.7.2 双相不锈钢焊缝中的相变 56

2.7.3 碳钢及低合金钢焊缝中的相变 60

2.7.4 合金化(元素)在相变动力学中的作用 63

2.7.5 夹杂在相变动力学中的作用 65

2.8 焊缝金属显微组织及性能的预测 67

参考文献 69

进一步阅读的建议 70

第三章 热影响区 71

3.1 母材 72

3.1.1 母材的碳当量 75

3.2 加热循环 77

3.2.1 再结晶 77

3.2.2 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变 78

3.2.3 析出(相)稳定性 78

3.2.4 焊接热循环下析出相的凝聚 80

3.2.5 焊接热循环下析出相的溶解 81

3.3 晶粒长大(晶粒生长) 83

3.3.1 晶粒生长动力学 83

3.3.2 焊接时的晶粒长大, 设质点溶解 85

3.3.3 焊接时的晶粒长大, 设质点凝聚 88

3.4 HAZ 中晶粒长大及其控制的实际因素 89

3.5 熔合线处的反应 94

3.6 冷却时的相变 95

3.6.1 晶粒长大区 95

3.6.2 晶粒细化区 96

3.6.3 部分相变区(不完全相变区) 96

3.6.4 球化碳化物区 96

3.6.5 无变化母材区 96

3.7 HAZ 显微组织及性能的预测 97

3.7.1 焊接模拟 97

3.7.2 硬度测定 97

3.7.3 焊接 CCT 图 99

3.7.4 焊接显微组织图 99

3.7.5 晶粒生长图 100

3.8 多道焊 102

3.8.1 焊缝金属 103

3.8.2 HAZ.....	103	4.6 再热裂纹.....	132
参考文献	104	4.6.1 再加热对 0.5Cr-Mo-V 钢显微组	
进一步阅读的建议	105	织的作用.....	134
第四章 焊缝中的裂纹及断裂.....	107	4.6.2 再热裂纹机制.....	136
4.1 断裂韧性.....	107	4.7 案例分析——亚历山大·凯兰特号事	
4.1.1 断裂韧性测试.....	110	故.....	138
4.2 凝固裂纹(结晶裂纹).....	112	4.7.1 亚历山大·凯兰特号的结构.....	138
4.2.1 凝固组织.....	112	4.7.2 声纳联接板的结构及装配.....	141
4.2.2 偏析.....	113	4.7.3 亚历山大·凯兰特号的倾覆.....	141
4.2.3 残余应力及接头几何形状.....	115	4.7.4 声纳联接板焊缝的金相分析.....	142
4.2.4 凝固裂纹机制.....	115	4.7.5 焊接热循环对撑杆及联接板材料	
4.3 液化裂纹.....	116	的可能影响.....	146
4.4 层状撕裂.....	118	4.7.6 破坏机制; 主要结论.....	149
4.5 冷裂纹.....	122	参考文献	150
4.5.1 氢的作用.....	124	进一步阅读的建议	151
4.5.2 应力的作用.....	126	附录一 焊接裂纹试验及焊接性公式.....	153
4.5.3 显微组织的作用.....	127	附录二 单位换算.....	154
4.5.4 冷裂纹机制.....	129		

第一章 熔化焊——工艺因素

现代焊接结构的规模是相当惊人的，新建的从乌拉山脉到西欧的 6000km 长的天然气输送管道、100000 t 巨大的超级油轮、石油平台、铝制的液化气贮罐和车辆等就是典型例子，建造这些大型结构所应用的各种材料，都必须满足诸如高强度、优良韧性、抗腐蚀、抗疲劳等许多严格的规定。最重要的是这些材料必须具有良好的焊接性。

在各种焊接委员会里，对良好焊接性的含义有过许多讨论。有人认为，既然实质上所有的金属和合金都能进行焊接，焊接性这个名词就是多余的了。其实，这种想法是过于理论性了。在实际中，只有当材料能在生产规模条件下可靠地进行焊接时，才能认为是具有良好的焊接性。良好的焊接性是一系列相互作用的因素的函数，包括：

- (1) 焊接方法；
- (2) 环境；
- (3) 合金成分；
- (4) 接头设计及尺寸。

所有这些因素，对合金的焊接性说来，都是决定性的，只要有一个不合适，就可能产生裂缝问题。焊接性也经常简单地定义为对各种焊接裂缝的敏感性。同时，也往往提倡利用一些与合金成分有关的，或更复杂些与一系列相互作用的参数如碳当量、线能量、预热温度、接头型式等有关的经验公式，来描述这些合金对某种裂缝的敏感性，后面会对这种方法进行更具体的分析。本章中，主要通过熔化焊的过程参数（工艺因素）和焊接热循环来分析焊接性。

1.1 熔 化 焊

熔化焊是焊接结构中所应用的最重要的技术，也是我们要讨论的主要焊接方法。文献〔1〕介绍了熔化焊及其他焊接方法；〔2〕介绍了固相焊接；〔3〕则对爆炸焊进行了评述。我们并不想深入研究熔化焊的冶金问题，而只是试图对某些影响接头[⊖]显微组织及性能的因素，进行正确的评价。

图 1.1 为最普通的熔化焊方法——手工金属弧焊

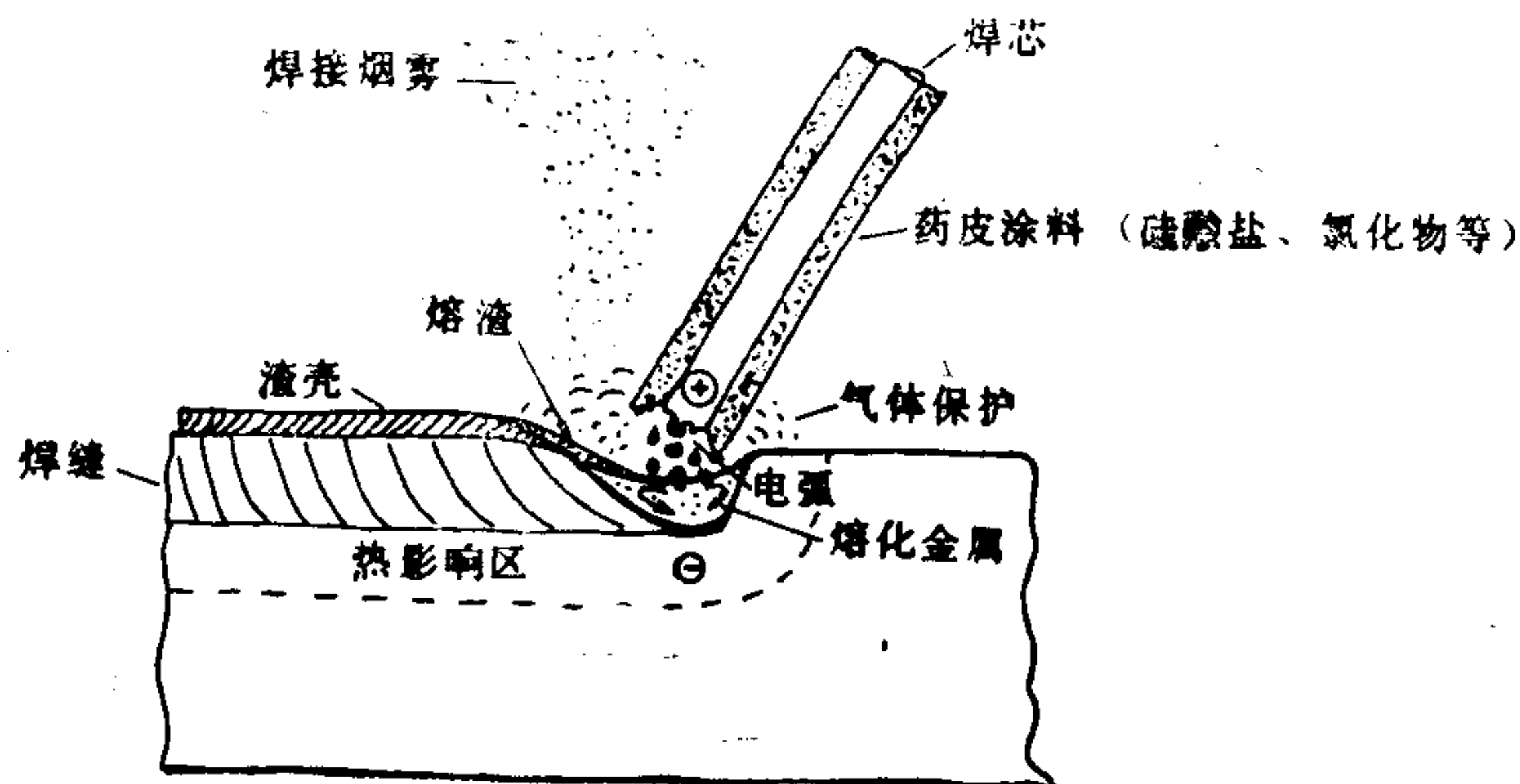


图1.1 手弧焊原理

(药皮熔化及蒸发后形成一个对空气的屏蔽保护)

⊖ 原文为 Welds，本书中可根据情况理解为焊缝或焊接接头——译注

(MMA)⊖的示意图。热源由一个高电流、低电压 (10~2000 A, 10~15 V) 的电弧供给。电极 (焊条) 由焊芯及药皮涂料组成, 后者包含有各种硅酸盐及金属氧化物。焊接时药皮熔化并形成粘性的渣, 它在熔化金属及空气之间成为一个保护层。同时, 这个渣也造成一个化学还原性的环境, 有助于阻止元素与空气作用和阻止水分渗入熔池。药皮熔化时还会产生气体, 有利于液态金属熔滴由焊芯流向熔池。渣的成分必须合适, 具有适宜的粘度, 即便在垂直焊接位置时, 也能很好地将熔化金属覆盖起来。同时, 它也应该能很容易地从已凝固的焊缝表面去除。

在其他焊接方法中, 埋弧焊 (SA) 有一个焊剂⊖的供应系统 (见表 1.1), 但其原理与手弧焊相同; 熔化极惰性气体保护焊 (MIG) 中, 由惰性气体形成保护气氛; 也有在真空中进行焊接的电子束焊接。表 1.1 介绍了应用最广泛的一些焊接方法以及它们的应用范围和可能产生的问题。手弧焊的渣和电渣焊的渣的作用是不同的。对后者主要是作为一个热源——渣的电阻热, 因此, 选择焊剂时应考虑成渣后的电导率和粘度。与其他熔化焊方法相比, 电渣焊的热容量要大得多, 热源移动速度也要慢得多。

为了正确判断熔化焊的工艺因素对焊接接头的特性及性能的影响, 有必要具体分析一下焊接材料的设计原则。

1.1.1 焊接材料的设计原则

焊接中的焊接材料, 通常由焊丝及焊剂组成。有些焊接方法, 如 MIG 及 TIG 焊中, 是不用焊剂的 (表 1.1)。

焊接材料应具有以下的特性〔4~6〕:

- (1) 有良好的电弧性能;
- (2) 熔敷时能保护金属熔滴;
- (3) 具有适宜的物理性质, 如粘度、熔化温度、表面张力及热膨胀系数;
- (4) 能对焊缝金属进行脱氧;
- (5) 能溶解气体溶质;
- (6) 能保护焊缝金属;
- (7) 有助于熔敷金属的成形;
- (8) 有利于合金元素向焊缝金属过渡;
- (9) 便于制造且价格低廉。

焊接材料有三种主要形式, 即

- (1) 有药皮涂料的, 如手弧焊中所用的;
- (2) 有些焊接方法用的药芯焊丝;
- (3) 埋弧焊中的焊剂;

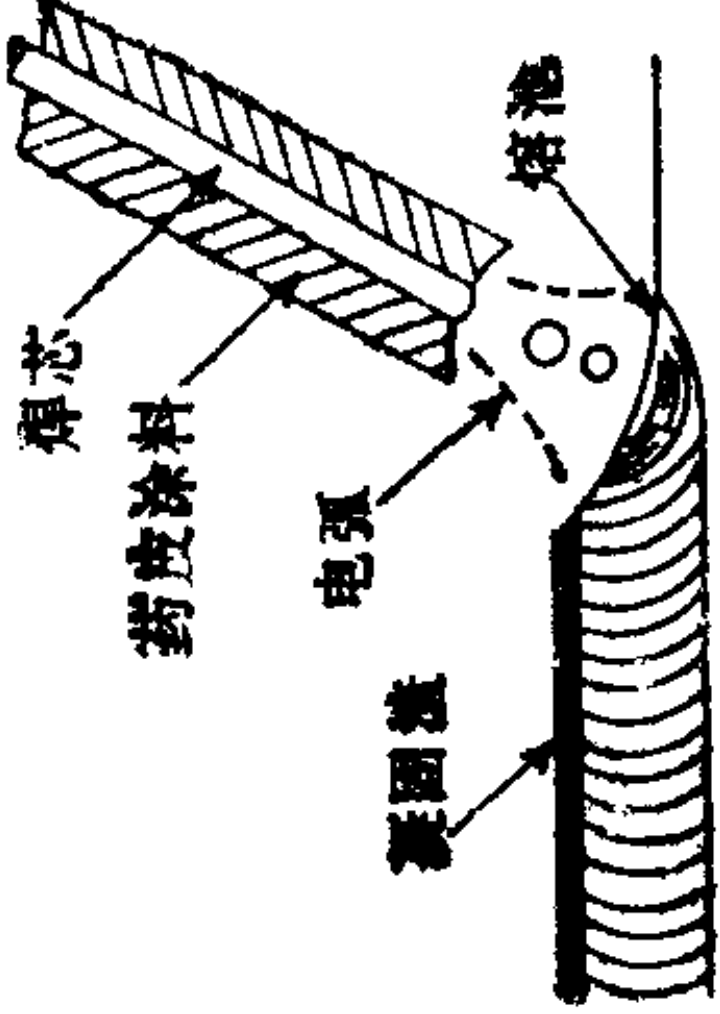
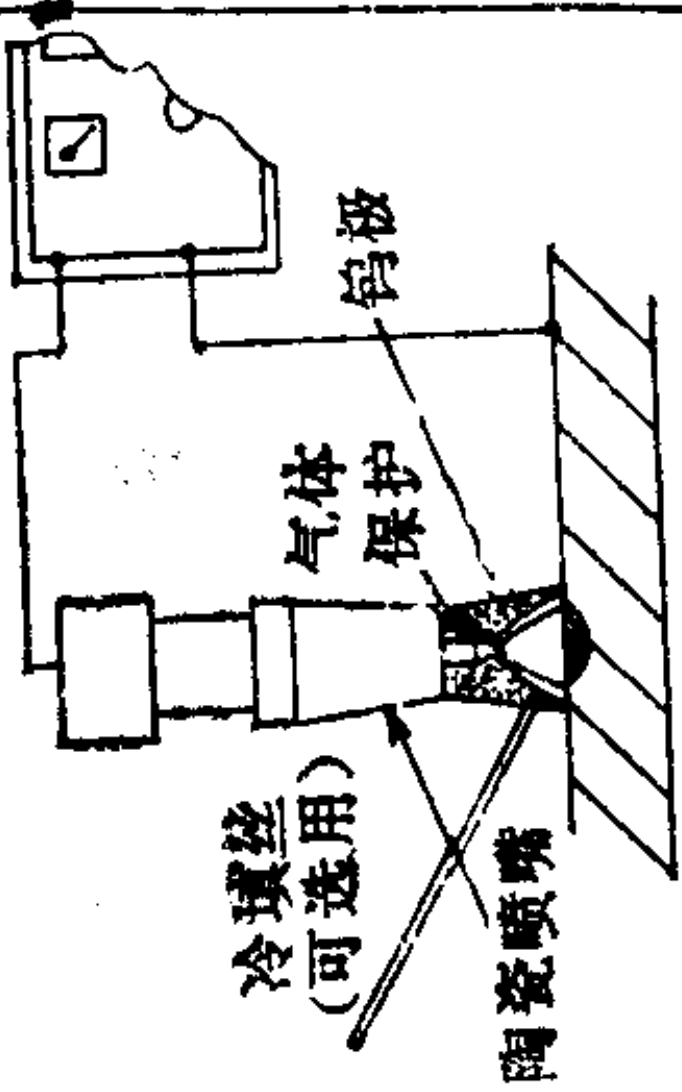
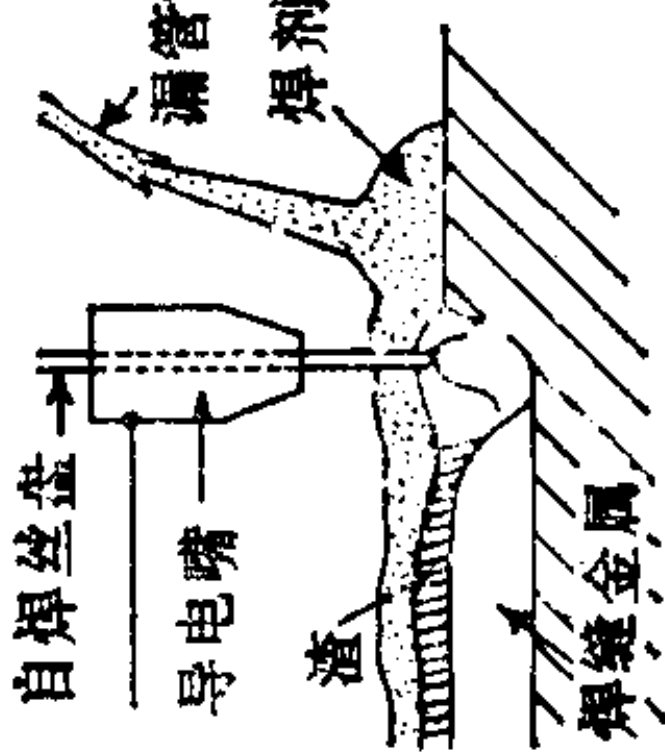
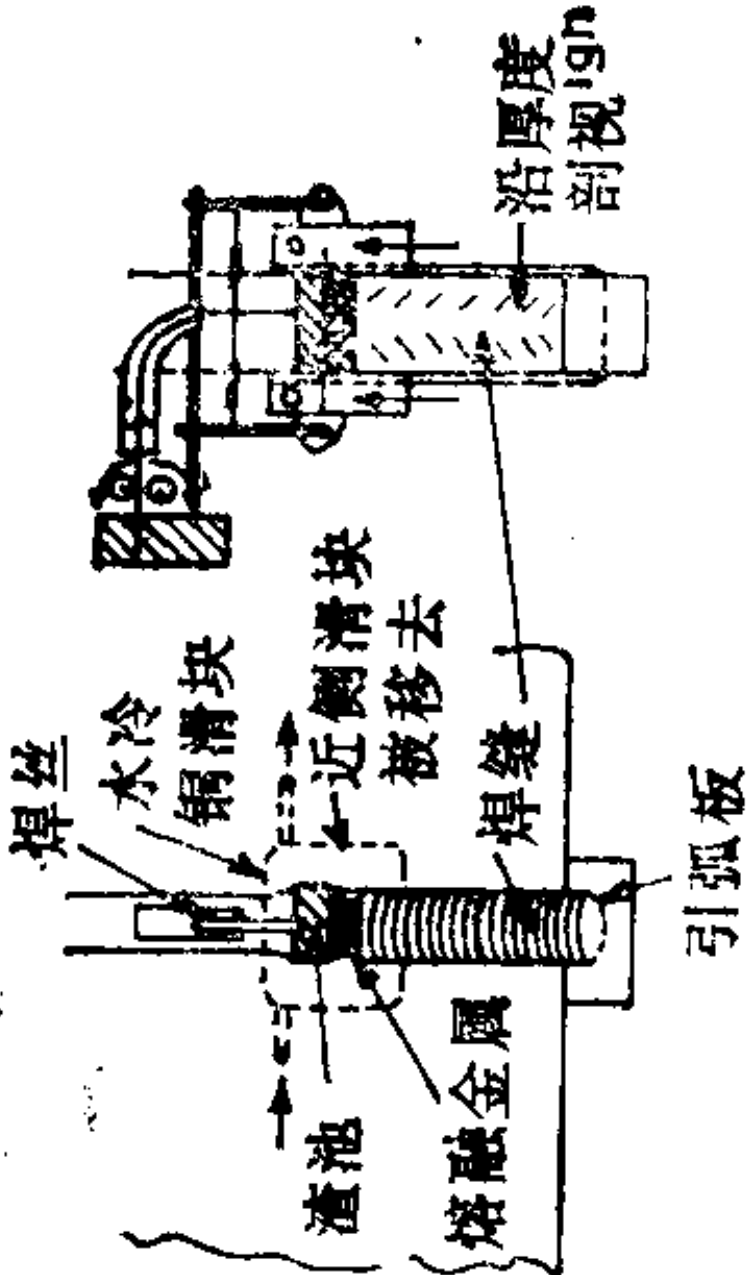
它们的主要特点, 简单介绍如下:

手弧焊涂料焊条 如图 1.1 所示, 它是由实芯焊丝及药皮涂料组成的。焊丝的典型成分为 (重量比): C 0.2%、Mn 0.5%、Si 0.02%。药皮涂料根据所要求的性能, 由各种粉末组成 (金红石、纤维素、碱性及酸性)。例如, 高金红石 (TiO_2) 药皮有改善电弧性能的作用。

⊖ 以下简称手弧焊 (MMA)——译注

⊖ 原文误为slag (渣)。本文有slag与flux (焊剂) 混用现象——译注

表1.1 主要的熔焊方法

手弧焊	气体保护金属焊	埋弧焊	电渣焊
 焊芯 药皮涂料 电弧 凝固渣 熔池	 冷填丝 (可选用) 陶瓷喷嘴 气体 保护 钨极 熔池	 自焊丝盘 导电嘴 渣 焊剂 焊管 焊缝金属	 焊丝 水冷 铜滑块 近侧滑块 被移去 熔池 熔融金属 焊缝 引弧板 沿厚度 剖视
典型的应用场合 低合金钢、不锈钢、铝、铜、镍、各种合金	非不锈钢、不锈钢（奥氏体及铁素体）钢、铝、钛、镍、合金等	大型钢结构的高能量焊接 适宜于钢、钛、铝等焊接	用以拼接大型铸件及锻件 适宜于钢、铝、钛等焊接
冶金本质及问题 由于从空气中吸收氮而形成气孔及裂纹，焊缝中残留有夹杂	冶金上为“洁净”过程，焊缝金属中氢含量低、夹杂含量低 由于吸收CO₂(MIG)或气体夹杂而引起气孔	高熔敷率，冷速高故易得气孔，厚板焊接时有热裂纹问题，线能量高，故会引引起HAZ晶粒长大	焊缝为典型铸态组织（粗大柱状晶及树枝晶等） 中心线裂纹（偏析），咬肉、未熔合引起的气孔，HAZ晶粒长大，偏析引起低韧性 低氢（焊接）方法
渣的选用 典型的为氧化硅、氧化铝、金红石，氧化镁、萤石、氧化锰及各种脱氧剂	无渣。但需用一些脱氧剂	与手弧焊相似	渣的选用应主要考虑高电阻率及隔绝空气

用，碱性药皮所熔敷的焊缝比金红石药皮的干净、夹杂含量要低。表 1.2 举出了药皮成分的一些例子和它们的性质。

表1.2 焊条药皮类型①

类 型	组 成	备 注
纤维素型	20~60%金红石, 10~20%纤维素, 15~30%石英, 0~15%碳酸盐, 0~15%锰铁	纤维素有助于电弧区的气体保护。氢能增加焊缝处热量。含氢量高(30~100ppm)。焊缝熔深大, 冷却快
金红石型	40~60%金红石, 15~20%石英, 10~14%锰铁, 0~5%有机物	主要为渣保护。含氢量较高(15~30ppm)。熔敷金属中夹杂多
酸 性	铁矿石、锰矿石、石英, 复杂硅酸盐, 碳酸盐、锰铁	氢含量较高。焊缝中夹渣含量多
碱 性	20~50%碳酸钙, 20~40%萤石, 0~5%石英, 0~10%金红石, 5~10%铁合金	氢含量较低($\leq 10\text{ppm}$), 因此通常用于焊接低合金结构钢。焊条需保持干燥。熔敷金属中夹杂含量低

① 引自Gray, T. G. F., Spence, J. and North, T. H., Rational Welding Design, Newnes-Butterworth, 1975。

药芯焊丝 它是芯部含有焊剂材料的低碳钢管子，其主要特点为：

(1) 保护良好，因而含氢量低；

(2) 焊剂材料不熔化就进入熔池，有利于合金化反应。

另一方面，这类焊接材料在制造的方便性和价格低廉方面，不如通常的药皮涂料焊条。

埋弧焊焊剂 埋弧焊是一种高生产率的方法。焊剂靠自重送给，如表 1.1 所示，因此不能用于横焊位置。焊剂粉末比较容易混合和生产，它的成分可以直接根据三元及四元氧化物熔渣状态图或粘度—温度图来确定。最常用的是以 MnO-SiO_2 及 CaO-SiO_2 为基，并加有 Al_2O_3 、 ZrO 及 TiO_2 的粉末。典型的粘度—温度图，如图 1.2 所示。熔渣熔点应低

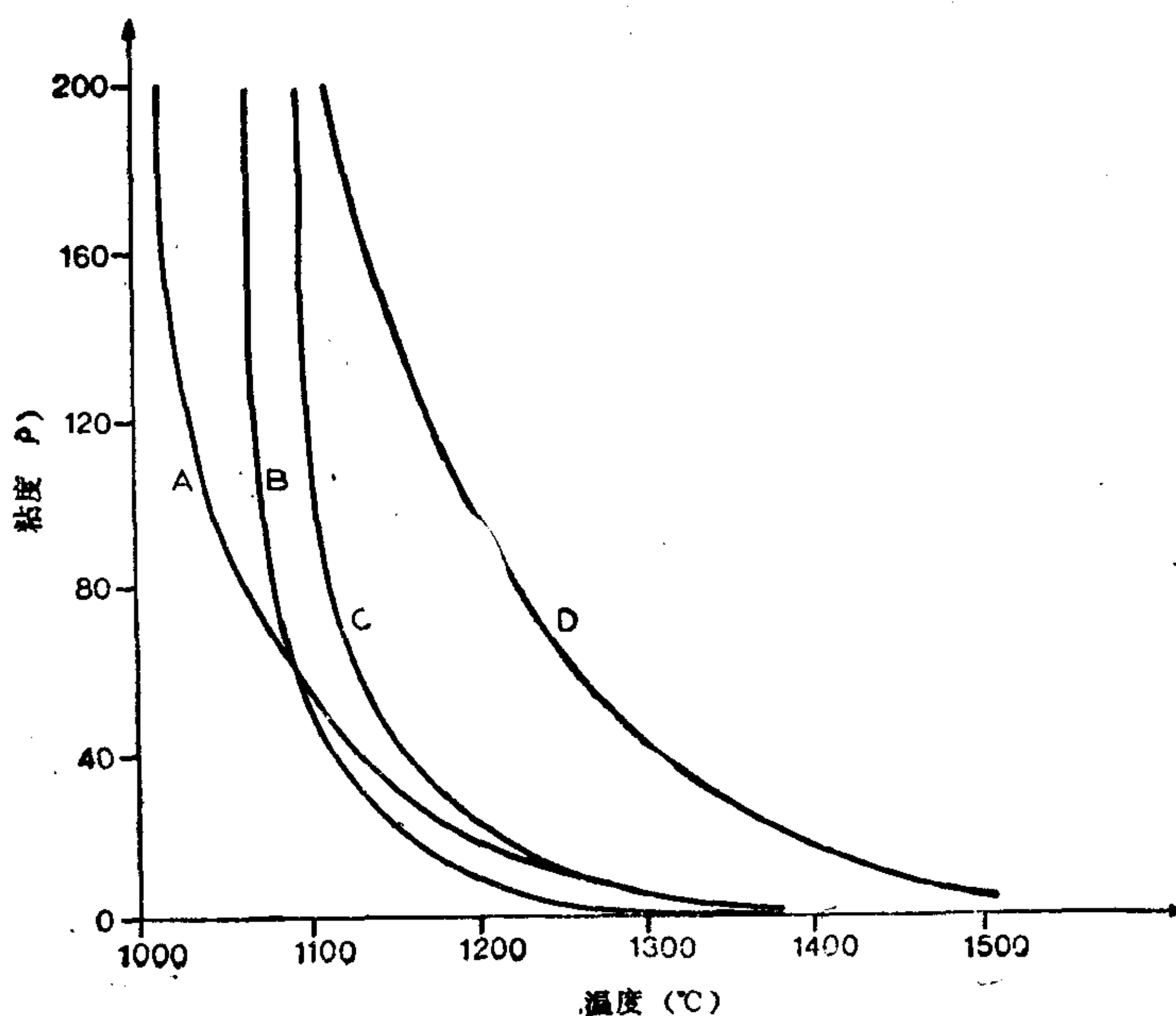


图1.2 埋弧焊熔渣粘度与温度的关系②

(A, $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系; B, MnO-SiO_2 系; C, $\text{CaO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ 系; D, CaO-SiO_2 系)

② 引自Jackson, C., Fluxes and Slags in Welding, Ohio State University, Dec. 1973。

于焊缝金属，并使焊缝易于成形。图 1.2 表明，温度不低于 1300°C 时，粘度变化不大。

在决定焊缝金属成分的诸因素中，焊剂（或药皮）的碱度有重要的作用。碱度 B 以式 (1.1) 表示：

$$B = \frac{\Sigma (\text{碱性氧化物})}{\Sigma (\text{酸性氧化物})} \quad (1.1)$$

实际上，碱度通常以碱性氧化物与 SiO_2 之比（重量%比）来计算，而各种氧化物应根据它们对形成单硅酸盐的作用进行折算。式 (1.2) 给出了完整的公式。请注意， Al_2O_3 在酸性药皮中视作为碱性氧化物，在碱性药皮中则为酸性氧化物。 B 的数值通常为 0.5~3.0。

$$B = \frac{\Sigma \text{CaO}}{\Sigma \text{SiO}_2} = \frac{\text{CaO} + 1.4\text{MgO} + 0.60\text{K}_2\text{O} + 0.90\text{Na}_2\text{O} + 0.45\text{ZrO}_2 (+ 0.55\text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2 (+ 0.59\text{Al}_2\text{O}_3)} \quad (1.2)$$

图 1.3 表示了手弧焊时焊缝成分 a 及夹杂含量 b 与熔渣碱度的关系。可以预期，金红石型药皮的焊缝金属中夹杂含量较高，因此韧性也较低。在熔化焊焊缝中，以 Si 为基础的脱氧剂的重要性是很明显的。与炼钢相比，焊接时这些氧化反应很难控制，焊缝熔敷金属中硅酸盐的含量也较高。

熔化焊在某些方面可以和小型电炉炼钢相比。由于电弧焊时间短、温度高，因此很难达到热力学平衡。80% Ar-20% CO_2 保护的电弧焊中的脱碳反应式 (1.3)，达不到平衡，就是一个例子〔6〕：



这里， $[\text{C}]$ 是表示碳溶解在熔化金属中的。实际上，当碳含量小于 0.1% 时，也可以发现渗碳反应。这意味着， CO_2 的分解是由电弧的温度，而不是熔化金属的温度来控制的。从热力学的角度可以看到，温度高于 3500 K 时，就会发生反应式 (1.4)。电弧焊中的高温梯度加强了熔池的湍流，进而影响凝固行为（见第二章）。



保持焊缝金属的低含氢量是很重要的，这就要求严格控制药皮（焊剂）的吸湿性能。焊条或焊剂在存贮中应不易吸潮，必要时焊条应在使用前进行重新干燥。文献〔7〕认为，熔炼的埋弧焊焊剂是玻璃性质的，只要制造时在水法粒化后经过仔细干燥，它的水份含量是较低的。粘结焊剂或药皮（如同涂料焊条中通常所应用的）则有 4~7% 的水份以粘结剂的形式存在，干燥后降低为 2% 左右。不同方法形成的焊剂的吸湿率不同。450°C 左右重新烘焙可降低潮湿焊剂的含氢量。烘焙温度对焊缝金属中残余氢含量的影响如图 1.4 所示。

1.1.2 焊缝金属中的气体吸收

由表 1.1 及表 1.2 表明，在某些焊接方法中，焊接熔池会吸收气体。而当吸收多量气体时，凝固时会产生气孔或裂纹。例如，尽管有保护，还会从空气中吸收氮及氧。也可以通过空气中的水份、焊剂（药皮）的反应，甚至从清除油污、铁锈等不够的表面吸收氢。前面也提到过，焊缝可能从保护气体本身吸收 CO 及 CO_2 。虽然有可能产生问题，尤其在手弧焊中，但在大多数情况下，氮可以相当有效地予以排除。少量氧有利于精炼过程，但在焊接钛及铝时，必须特别注意防止氧的沾污。吸收氢总是危险的，主要是冷裂纹问题，尤其当焊接高淬硬性的钢时。

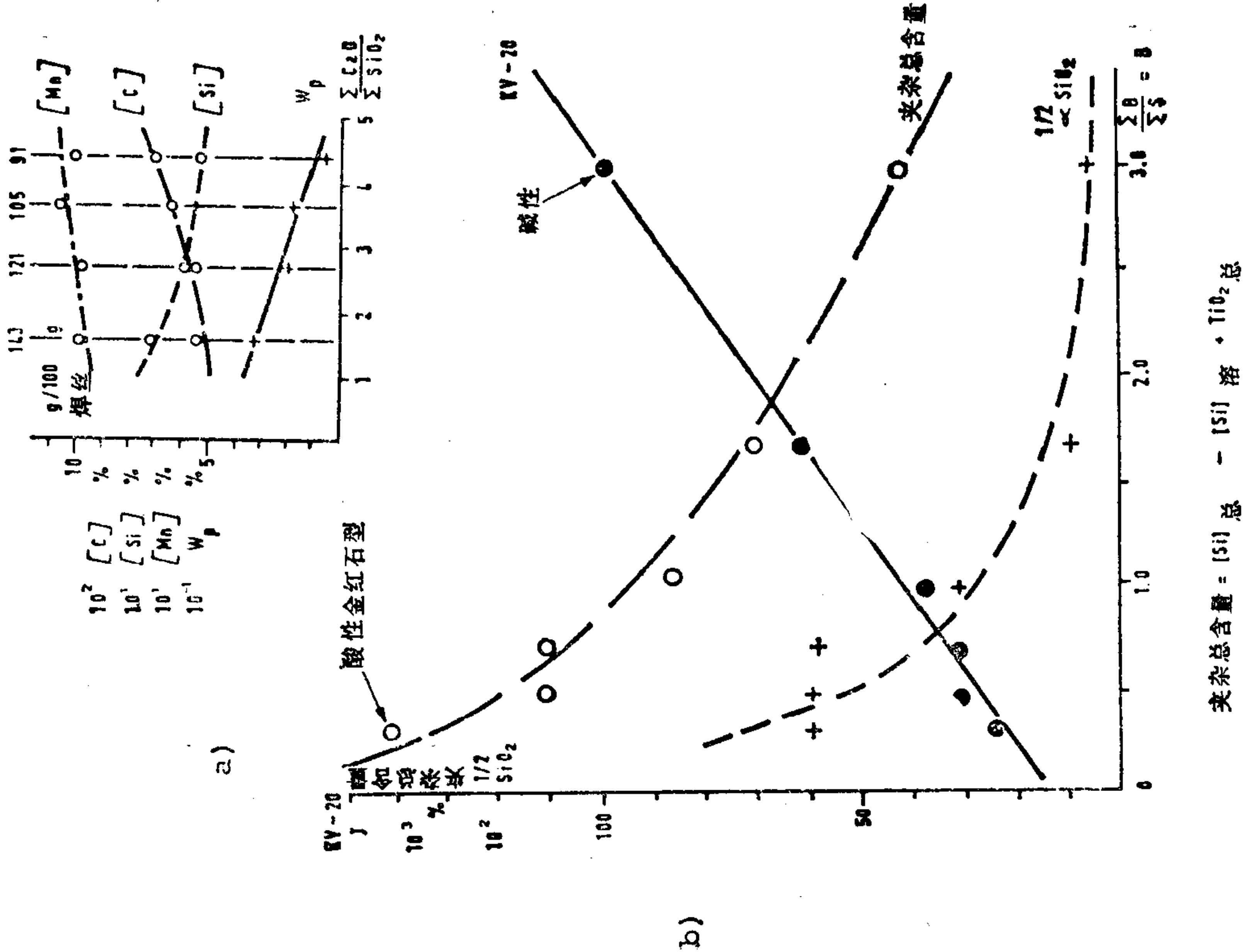


图1.3 碱度对焊缝熔敷金属中合金含量
a) 及夹杂含量、韧性 b) 的影响^⑤

⑤ 引自Coe, F. R., Welding steel without hydrogen cracking, The Welding Institute, Abington, 1973.

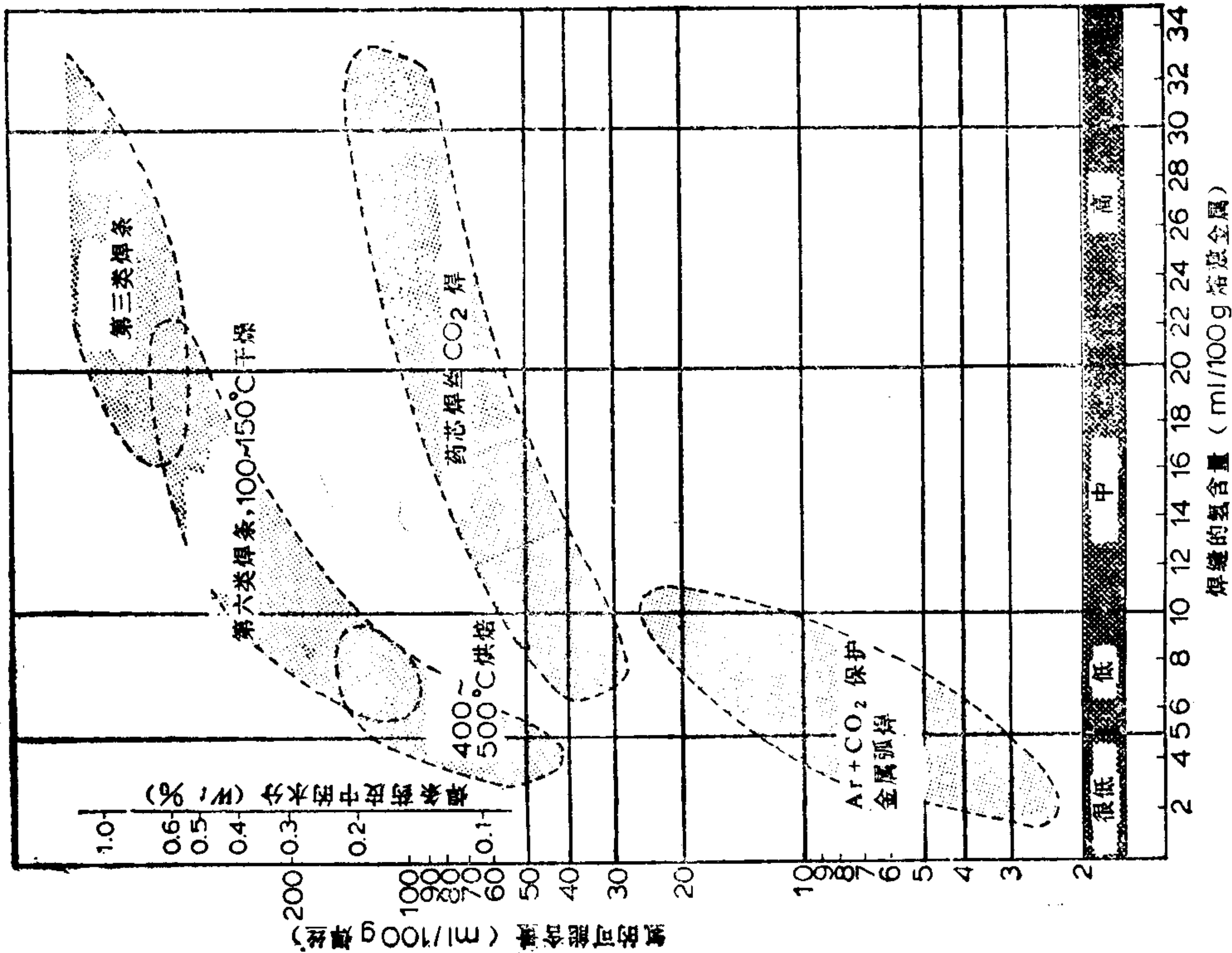


图1.4 焊接方法及烘焙工艺不同时, 氢的可能含量与实际含量的关系^⑥

⑥ 量的关系^⑥

由于氮和氢对焊缝性能的影响甚为重要，我们将进一步予以讨论。更具体的介绍，可参阅文献[8]。

1.1.3 氮的吸收

空气是氮最重要的来源。焊条药皮的组成及厚度和电弧长度会影响焊缝金属中的氮含量。氮既可以以气体形式被吸收，也可以通过反应式(1.5)以原子形式被吸收。



这时，在一个大气压下，氮在1600℃时在液态铁中的平衡浓度为0.0445%（重量%），如图1.5。图1.5还表明，原子氮在面心立方（f、c、c）的 γ -Fe中的溶解度，远高于在体心（b、c、c）的 δ 或 α -Fe中时。固态中这种溶解度的差异，就会导致产生各种氮化物。液态铁中，其他合金元素对氮的溶解度的影响如图1.6所示。有些元素可有效地提高氮的溶解度，而碳、硅及氧则强烈地降低它的溶解度。这种溶解度的变化，可能是由于对应变效应适应性不同的缘故。假设在固相和液相中都是这种情况。

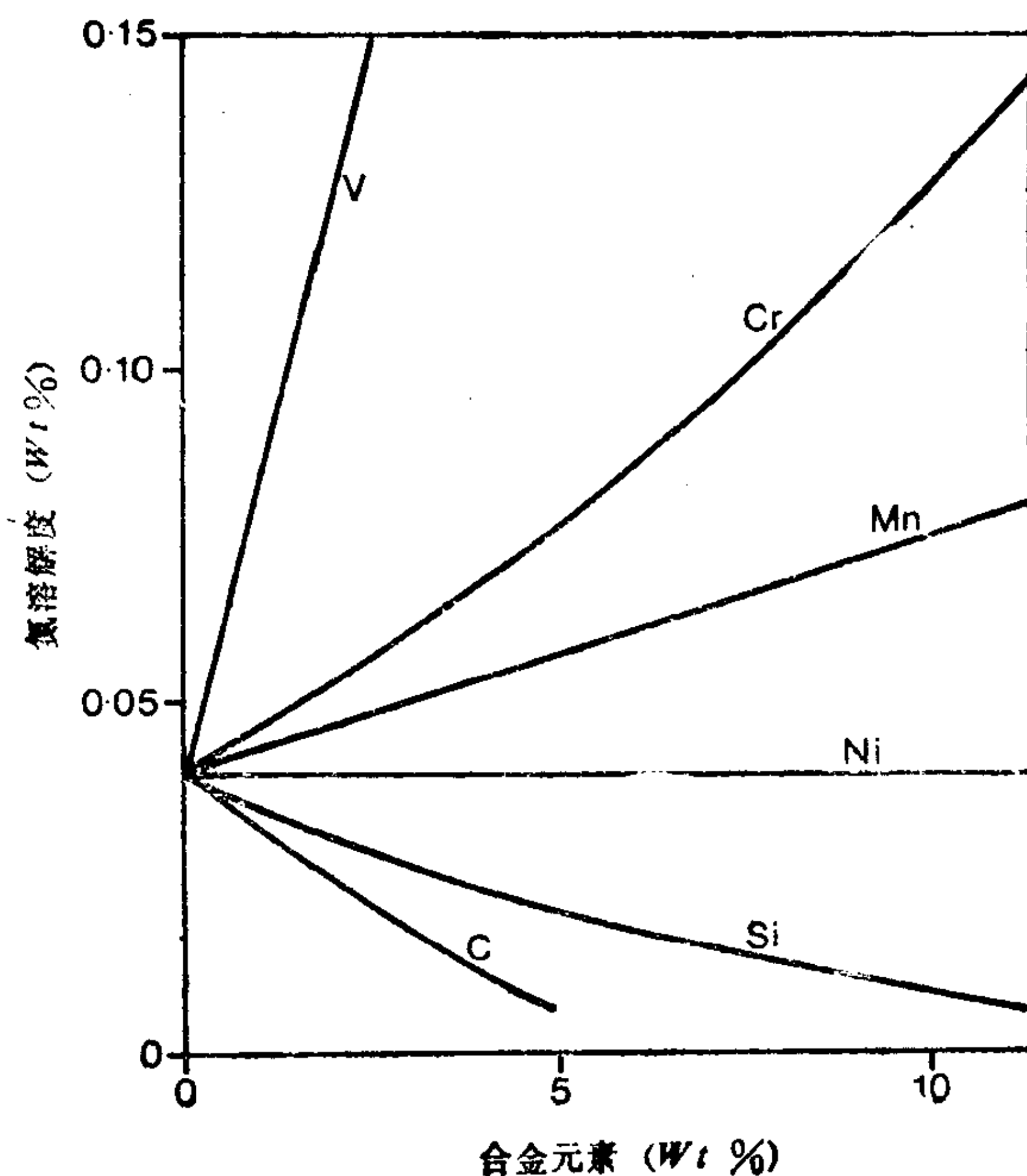
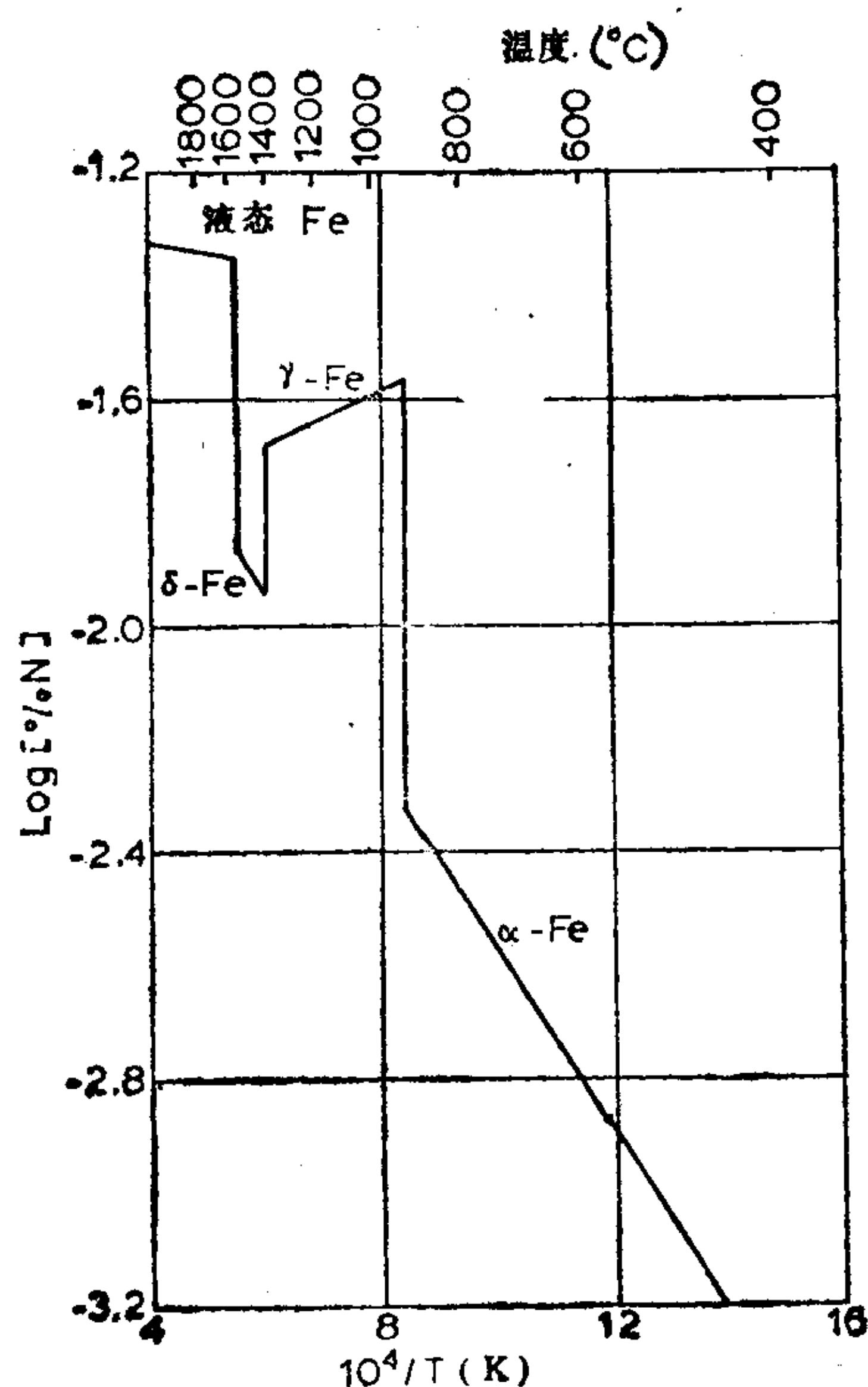


图1.5 氮在铁中的溶解度与温度的关系[⊖]

图1.6 各种元素对1600℃时氮在铁中的溶解度的影响[⊖]

在焊接的不平衡条件下，凝固焊缝中的实际氮含量通常都高于图1.5中的数值。表1.3给出了各种焊接方法和条件下，焊缝金属的实际含氮量。原子氮在铁中的室温溶解度低于0.001(Wt%)。很明显，表1.3的高值是由于有氮化物存在的缘故。多量的氮，主要来源于空气。

⊖ 引自The making, Shaping and treatment of Steel, U. S. Steel, 1971;

⊖ 引自Kumar, B., Physical metallurgy of iron and steels, Asia Publications, 1968.

表1.3 各种焊缝金属中的室温氮含量①

焊 缝	氮含量(Wt%)
非合金钢氧-乙炔焊	0.0016~0.002
非合金钢电弧焊, 采用	
碱性焊条	0.001
纤维型焊条	0.0016~0.002
金红石型焊条	0.002~0.0025
酸性焊条	0.0027~0.003
氧化性型焊条	0.0035~0.004
无药皮焊条	0.01~0.022
18-9Cr-Ni钢, 采用	
碱性焊条	0.0055~0.0065
金红石型焊条	0.006~0.0075
熔炼焊剂、多道埋弧焊	0.0014

① 引自Christensen, N., Welding Compendium, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1975.

1.1.4 氢的吸收

焊接时吸收有氢, 会导致产生各种问题, 例如焊缝金属中的气孔和 HAZ 中的裂纹等。与氮相似, 氢在铁中很容易按反应式(1.6)分解为原子状态。



图 1.7 为氢在铁中的溶解度。钢在凝固时氢溶解度的明显降低会因式 (1.6) 的逆向进行而形成气孔。原子氢的扩散系数很高, 大多数氢可自焊缝表面扩散出去, 但同时也会有一部分向焊缝金属及母材深处扩散。合金元素对原子氢在 1600°C 铁水中的溶解度的影响示于图 1.8。请注意, 碳及硼会引起氢溶解度的急骤下降, 这对冷裂纹有重要的意义 (见第四章)。

图 1.9 所示为焊接方法、焊条洁净性及干燥度对焊缝金属氢含量的影响。图 1.10 为碱性及金红石焊条焊缝金属中的氢分布 (与离弧坑距离有关) 曲线。这些结果突出地显示了在可能产生冷裂纹的条件下, 即当焊接较厚的高强钢时, 采用碱性焊条的重要性。电弧后方氢含量的明显降低, 主要是由于表面扩散所致。

1.1.5 焊缝的组成

熔化焊的热源非常强, 必然使母材熔化或稀释。焊缝金属事实上是由填充丝、母材及焊剂 (药皮) 几种材料混合组成的。

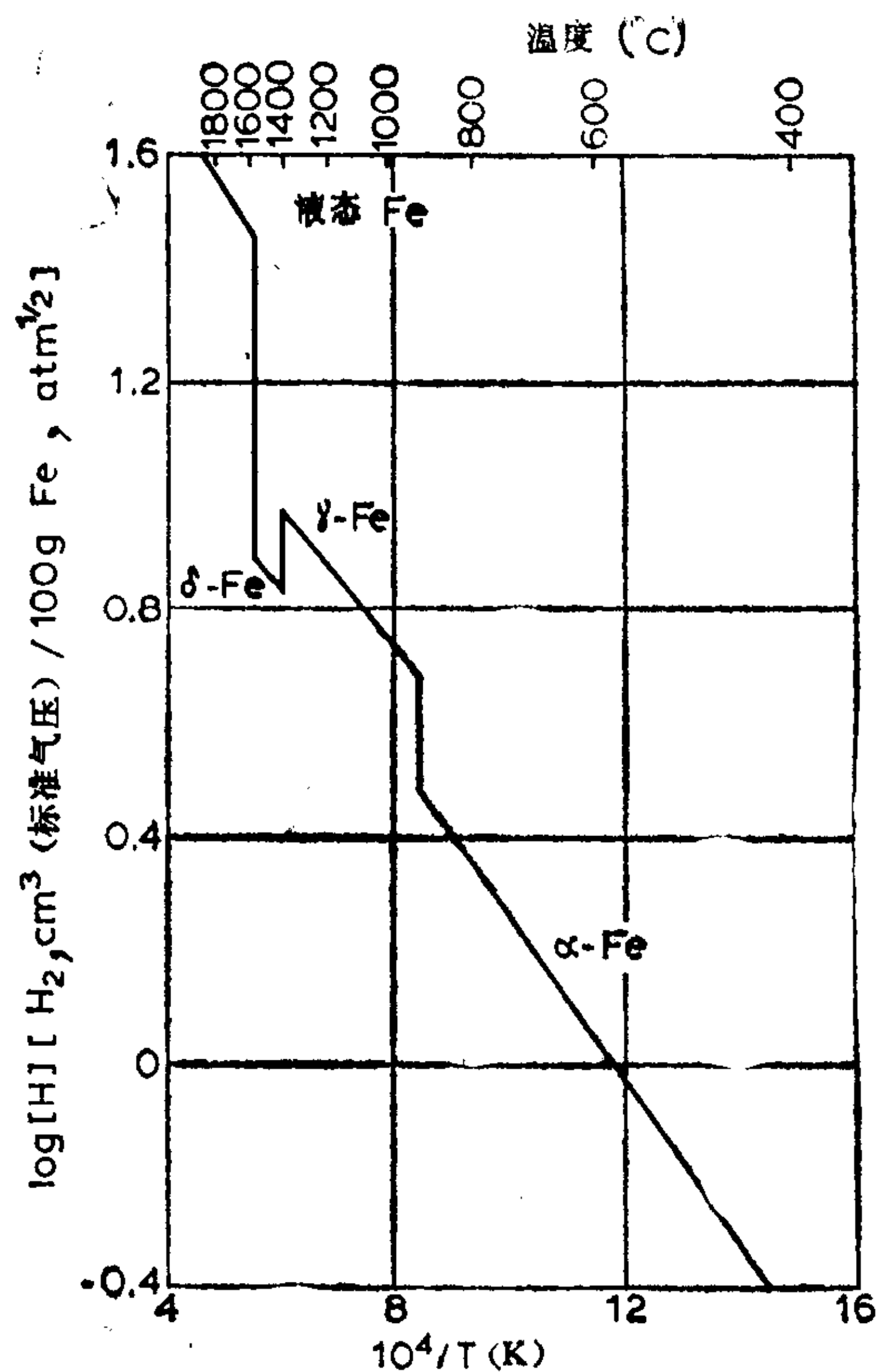


图1.7 氢在铁中的溶解度②

② 引自Making, Shaping and treatment of steel, U. S. Steel, 1971.

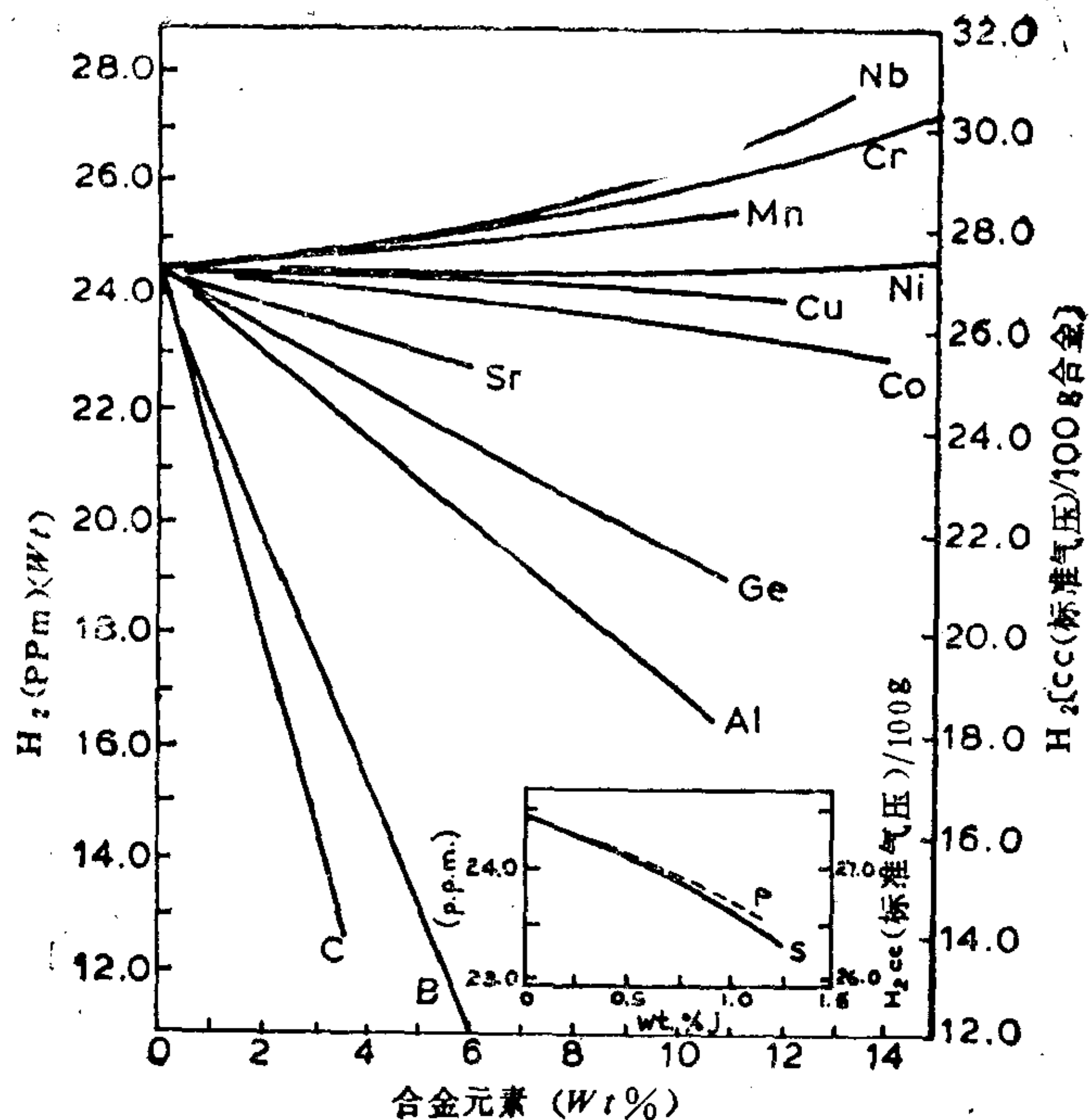


图1.8 铁的各种二元合金中的氢溶解度 (1592°C)⊖

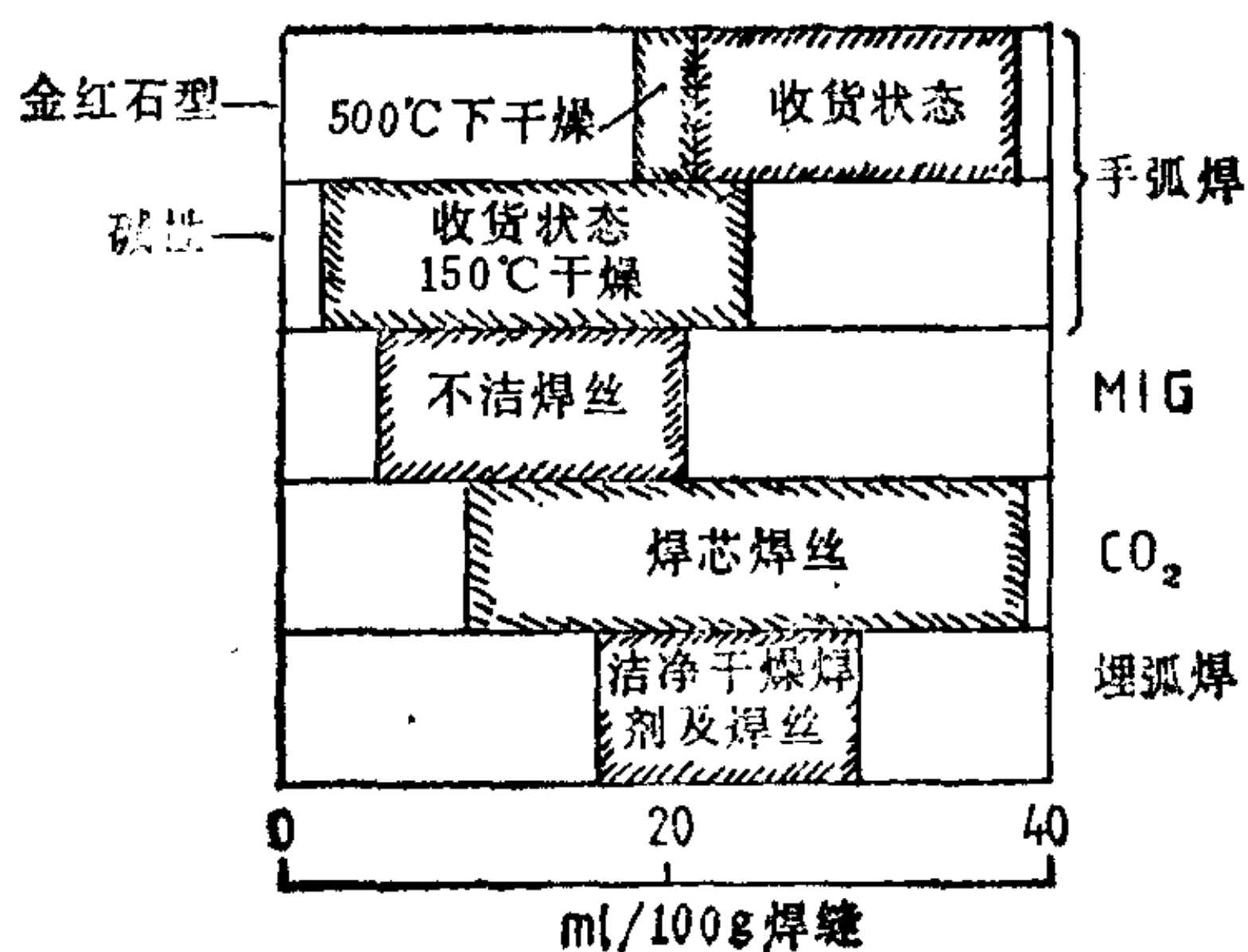


图1.9 焊缝金属氢含量与工艺因素的关系 (与图1.4相比)

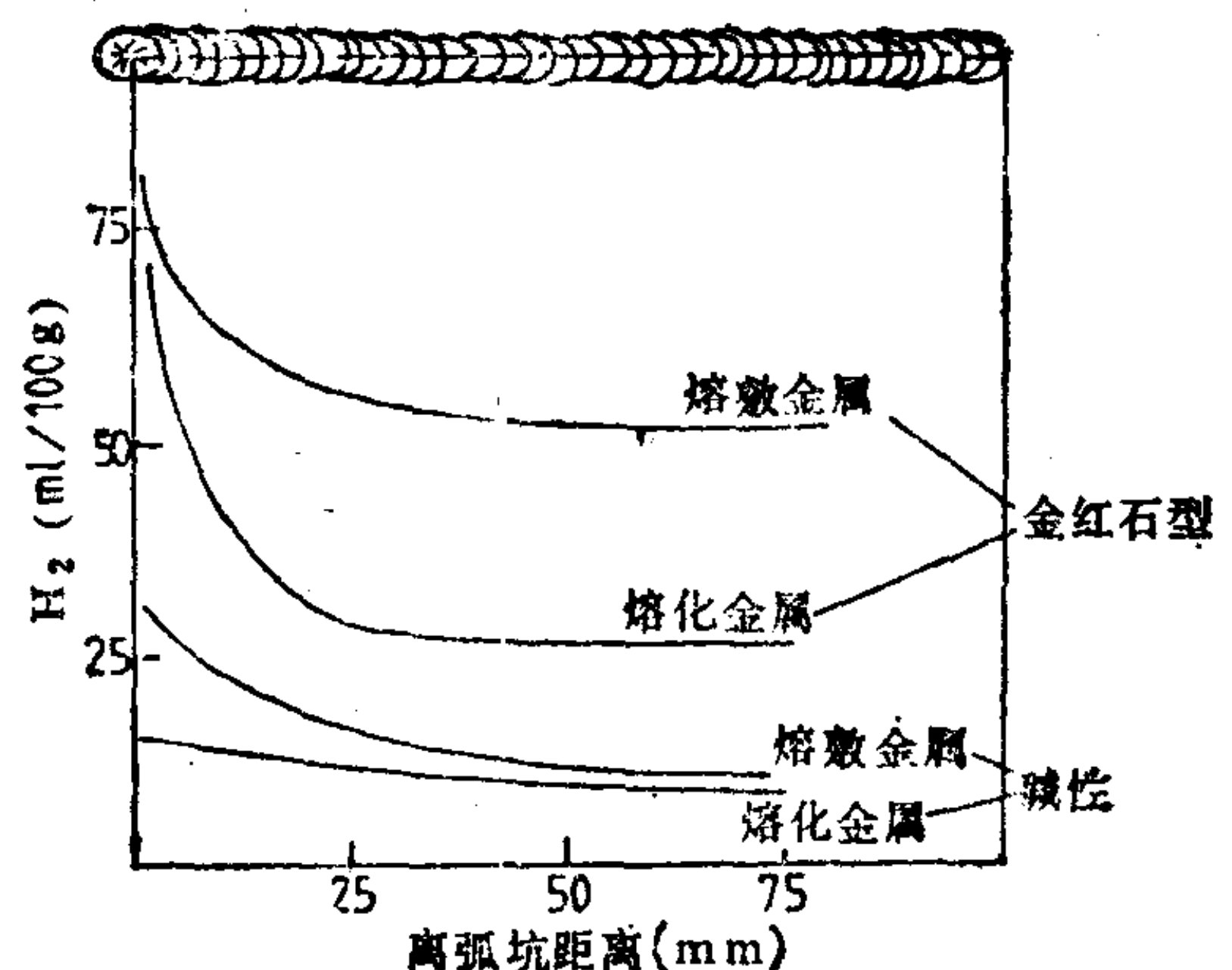


图1.10 实测的氢分布与焊条种类和离弧坑距离的关系⊖

要获得良好的焊缝，必须恰当地操纵焊条。图 1.11 所示的运条规迹，可以避免在板边缘形成弧坑。后者通常是容易产生的裂缝的区域。这是由于电弧移去后，熔池处相对来说温度梯度较和缓，增强了偏析的作用，再加上不均匀冷却形成的残余应力，致使产生凝固（结晶）裂缝。这些因素的作用，将在第四章内进行更详细的讨论。

⊖ 引自 Making, Shaping and treatment of steel, U. S. Steel, 1971;

⊖ 引自 Christensen, N., Welding Compendium, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1975.

厚板多道焊时，必须仔细控制运条轨迹，以获得整齐、完整的焊缝，如同图 1.12 所示的 V 形对接焊缝及对接立焊焊缝。很明显，多道焊要比单道焊费工、成本更高。但在一些场合中，如核压力容器及管线焊接中，为了减少残余应力，还是必须的。图 1.13 所示为手工焊 V 形对接及双 V 形对接的多道焊缝的宏观组织。可以看到焊缝金属的初始铸造组织是如何被局部再加热和处理的。这些将在第三章内进行更详细的讨论。图形也表明，即便焊缝敷置得非常小心，它的表面仍然是不平的，这在某些情况下是会影响疲劳强度的。双 V 形焊缝的中心第一道焊道，也可以用较软的材料焊成，以减少残余应力。这种方法称为铺面，在须要预防层状撕裂的情况下，经常被采用(见第四章)。

1.1.6 工艺因素的小结

熔化焊是一种工艺因素很多、较复杂的方法，任何一个因素都对焊接接头最终显微组织及性能有重要的影响。要阻止气体，尤其是氧、氮及氢渗入铁水（熔化了的金属）是很难的，而氢又最易引起问题，因此，应该详细讨论氢的作用（第四章）。药皮涂料及焊剂材料，由于合金化及夹杂的作用，对焊缝的最终性能有很大的影响。由于稀释作用，

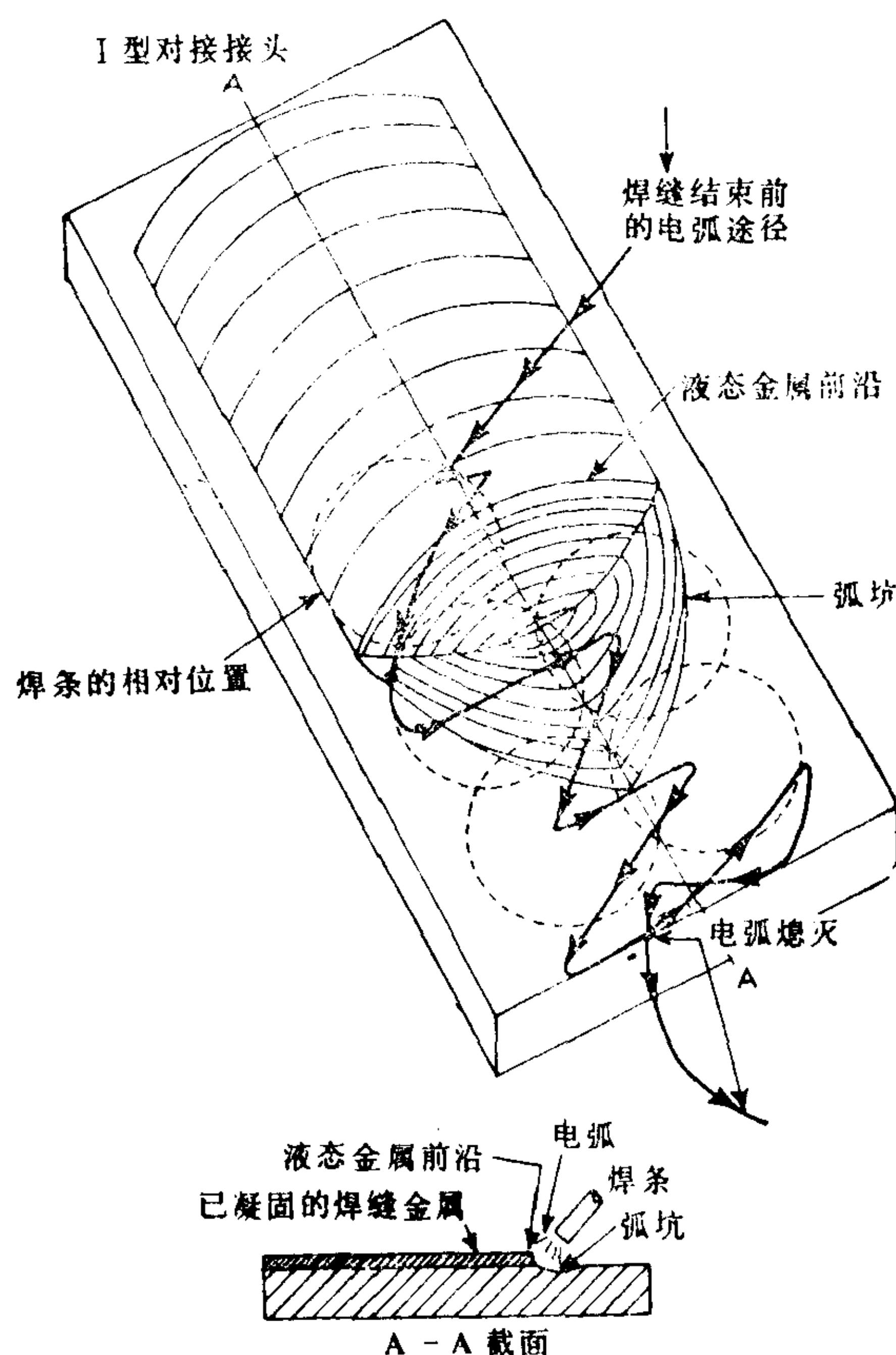


图1.11 适宜的运条方法可以避免终端裂纹[⊖]

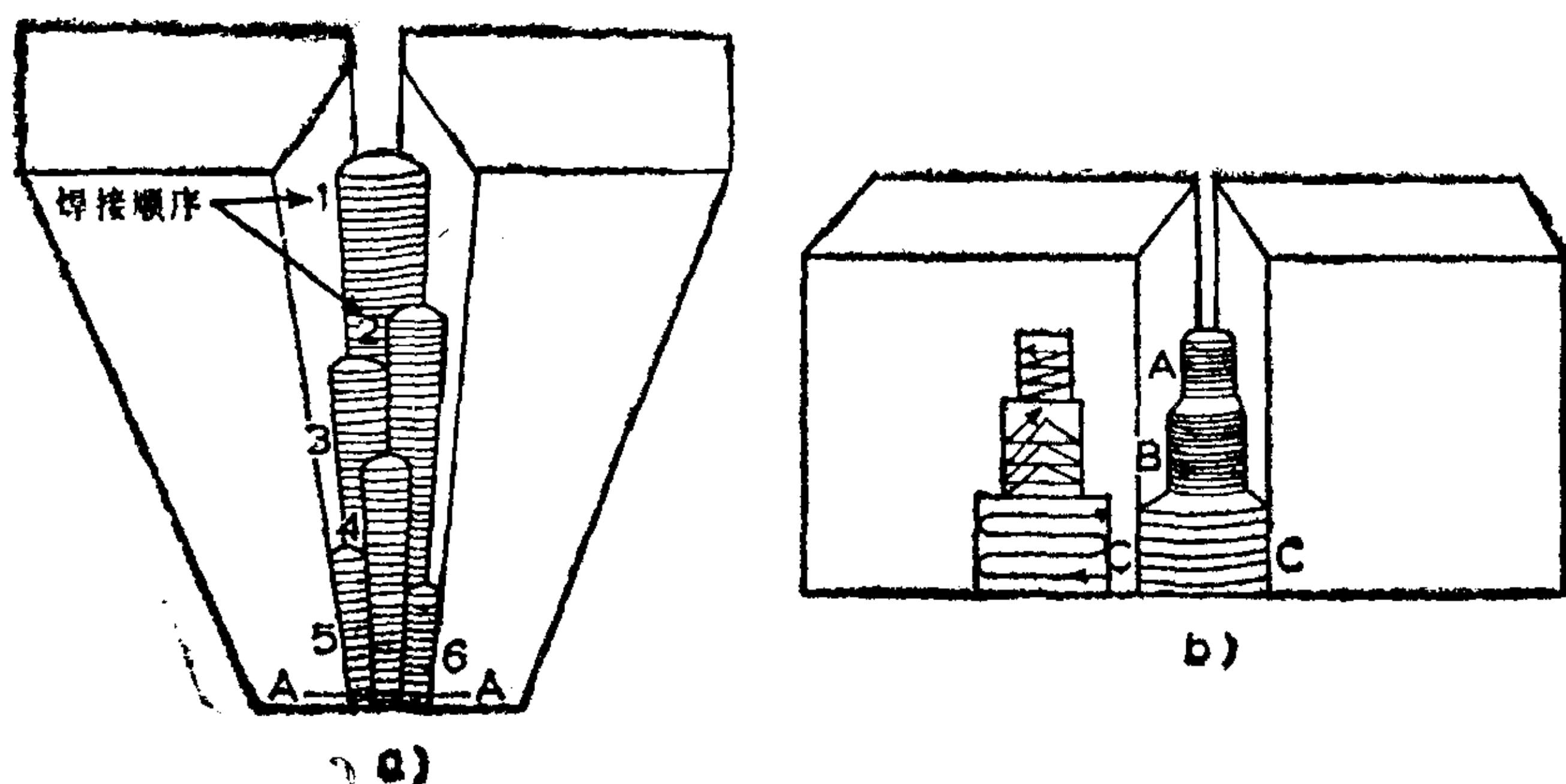


图1.12 V形对接

a) 及立焊对接 b) 焊缝的理想熔敷情况[⊖]

⊖ 引自 Woods, P. F., *Fundamentals of welding skills*, Macmillan, London, 1976;

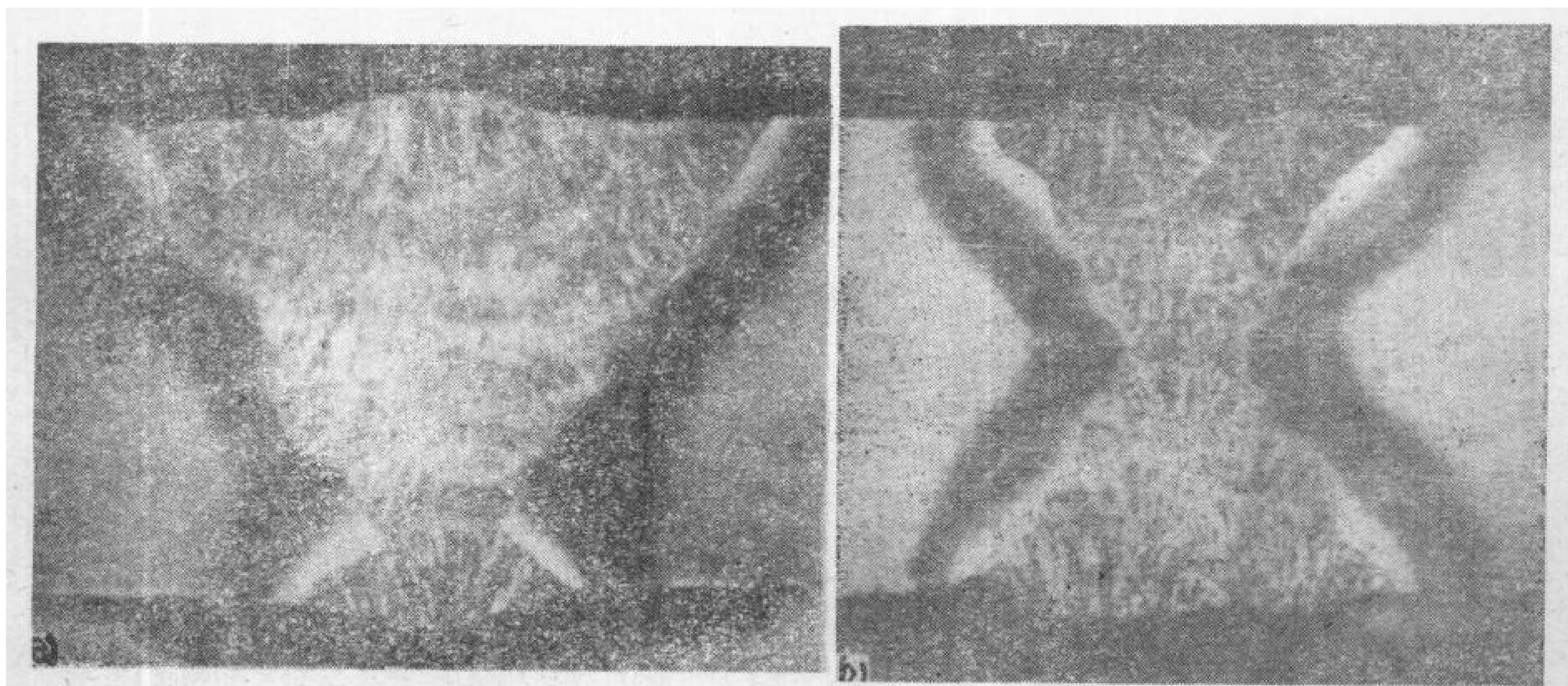


图1.13 V形对接

a) 及双V形对接 b) 的手弧焊焊缝 (两者厚度均为18cm) ⊖

焊缝金属的成分会受母材的影响。在某些情况下, 这种作用对焊缝性能说来也是有害的 (见第二章)。

采用多道焊, 可以对焊缝金属的铸造组织进行一定的调整处理, 这在厚板焊接接头 (承受较高的残余应力的作用) 中是很重要的。焊接强烈热源的作用, 会在熔池区域产生很陡的温度梯度, 焊接热循环将在下一节中进行详细的分析。

1.2 焊接热循环

电弧焊时工件上作用有一个非常强烈的移动热源, 预测热源附近的温度梯度情况, 对于了解诸如焊缝熔宽及熔透深度与线能量的关系、母材 HAZ 显微组织的变化和残余应力等现象是很有用的。有关这些条件的认识, 对于预测裂缝可能性也是必须的。

要实际测量熔池中的温度分布是很困难的。但已有用埋入热电偶的方法对母材 HAZ 内的热循环进行了一系列测定, 测定情况将在后面谈到。也曾对焊接热循环进行过理论分析, 通常要进行一些简化与假设, 如有关焊缝 (液态) 及母材的高温性能等。由下述可以看到, HAZ 的实测及理论的温度分布曲线之间吻合情况还是相当满意的。

1.2.1 传热方程

罗森萨尔 (Rosenthal) 在 1939 年就给出了点状移动热源传热方程的解^[9]。假设热源沿固定坐标系的 x 轴以速度 v 作等速运动, 如图 1.14 及式 (1.7) 所示。电弧有效功率 q 通过焊接电流、电压及电弧效率 η 来定义 (式 1.8)。

$$\text{线能量} = q / v \text{ MJm}^{-1} \quad (1.7)$$

$$q = \eta VI \quad (1.8)$$

电弧效率 η 与焊接方法有关, 表 1.4 列出了一些数值。埋弧焊时, 1~10% 的损失与部分未熔化的焊剂有关。TIG 焊的电弧效率低, 是由于焊炬处的热损耗的缘故。

⊖ 由 ESAB, Gothenburg 提供 (18cm 疑为 18mm 之误——译注)。