

〔苏联〕A·A·罗申斯基 著

焊缝金相学

中国工业出版社

75,1
950

〔苏联〕A·A·罗申斯基 著

焊缝金相学

金 石 译

中国  业 出 版 社

本书叙述电弧焊和电渣焊焊缝的金相研究方法，分析了在低碳钢、低合金钢及中合金钢焊缝中结晶和组织转变的理论问题，列举了证实理论观点的组织研究结果，并且提供了一些实际资料，可供研究各种钢及合金的焊缝金相时参考。

此书读者对象为从事焊接工作的工程技术人员。

А.А. Россошинский
МЕТАЛЛОГРАФИЯ СВАРНЫХ ШВОВ
МАШИИЗ
Москва 1961

* * *
焊 缝 金 相 学
金 石 译

*
机械工业出版社编辑 (北京露州胡同 141 号)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路 10 号)

北京市书刊出版业营业许可証出字第 110 号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*
开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $6^{5/8}$ ·字数 150,000

1965 年 7 月北京第一版 1965 年 7 月北京第一次印刷

印数 0001—7,064·定价 (科六) 1.00 元

*
统一书号: 15165·3534 (一机-703)

原 序

电弧焊和电渣焊属于最先进的焊接生产工艺方法，可以保证高的劳动生产率和优良的接头质量。焊接工艺在不断地改进，焊接的应用范围也在日益扩大。在焊接工艺师面前摆着许多新的问题，如果不对焊缝质量作仔细分析，要解决这些问题是不可想像的。

焊接接头质量的基本指标之一，就是它的组织，而对于这种组织的研究主要是应用金相分析的方法。金相学，可以使我们对金属组织进行各具特点的、各式各样的研究，例如，用特殊的腐蚀方法可以使我们确定金属的相组成，而利用二次组织与一次组织相对照的方法，可以研究碳、硫和磷在某些钢材的焊缝中的分布特点，等等。只是在研究出一些特殊方法之后，才有可能对低碳钢、碳钢、低合金钢和中合金钢焊缝的一次组织进行研究。在本书中，对显现和研究焊缝一次组织的方法特别重视。

但在技术发展的现阶段下，仅仅一种金相分析方法，不可能满足焊接金属学研究人员的一切要求。只有在把组织的金相分析法和其他一些方法配合起来运用，即在各种研究方法的综合应用的情况下，才能够得到良好的结果。综合应用各种研究方法（其中主要的是金相法、而辅助的是X-射线结构分析法、放射线照相法以及其他一些方法），使我们有可能对焊缝中各种合金元素的分布特点、相组成、细微组织以及一次结晶过程进行研究。

为了熟悉研究焊缝组织所应用的一些综合研究方法，书中阐述了对低碳钢、低合金钢和中合金钢焊缝组织研究的实例，并且为研究焊接金属学的金相工作者作了一系列的实际指导。书中叙述的大多数方法，都是作者亲自研究成功的，以及为作者所赞许的。

目 次

原 序

第一章 焊缝的形成	1
1. 焊剂层下焊接时焊缝的获得	1
2. 焊接熔池结晶过程的特点	4
3. 焊缝结晶过程的现代调整方法	16
4. 焊缝的结构(组织)特点	22
第二章 某些工艺因素对焊缝组织和性能的影响	29
1. 冷却速度对焊缝组织和性能的影响	29
2. 合金元素对焊缝一次组织的影响	48
3. 合金元素对焊缝二次组织和机械性能的影响	85
4. 内应力对焊接接头组织和性能的影响	95
第三章 焊缝组织的显现方法	99
1. 用于金相研究的宏观和微观磨片的制备	99
2. 焊缝宏观和微观组织的化学显现法	108
3. 低碳钢、低合金钢和中合金钢焊缝一次组织的显现法	118
4. 显现组织的电解法	124
5. 显现焊缝组织的特殊方法	134
第四章 焊缝组织的研究方法	140
1. 焊缝组织的显微镜研究(合理的截面和放大、研究指定区域的方法)	140
2. 焊缝组织的照相	151
3. 焊缝的硬度和机械性能与组织之间关系的研究	163
4. 关于用于研究焊缝化学成份和组织的某些现代分析方法的评述	169
参考文献	173
附录 I	176
附录 II	180

第一章 焊縫的形成

1. 焊剂层下焊接时焊縫的获得

熔化电极自动电弧焊，基于利用别特洛夫电弧热的原理。焊接时电弧在焊件与极絲之間燃烧。电弧温度为 $4000\sim 7000^{\circ}\text{C}$ 〔86,30,2〕，在其中放出很大的热量，足够熔化极絲和一部份基本金属。还有一部份热量消耗于熔化焊剂。

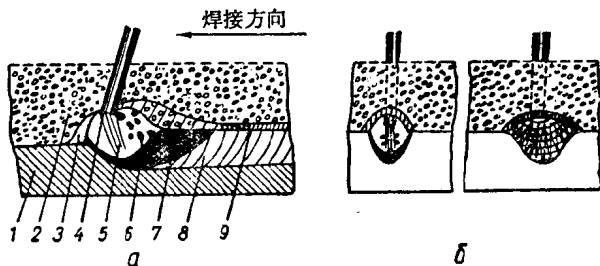


图 1 自动电弧焊过程簡图

α —纵截面； δ —横截面；1—基本金属；2—焊剂；3—充满气体的空间；4—电极；5—电弧；6—熔化金属滴；7—熔化金属（焊接熔池）；8—固态焊缝金属；9—渣壳

利用一些現代的研究方法（放射綫照相、对在保护气氛中进行的焊接过程的快速电影照相等），足以精确地对焊接过程进行研究。图 1 为焊剂层下自动电弧焊过程的簡图。

在极絲和基本金属之間引燃电弧后，焊接过程立即开始。一部份基本金属发生熔化，并和以滴状过渡的熔化的电极金属一起，共同形成焊接熔池。焊接熔池中的液态金属，靠一个液态焊剂壳[⊖]与周围空气隔絕，在此焊剂壳中充滿着在电弧燃烧区中产

⊖ 原文为“焊剂泡”（Флюсовый пузырь），这不通。根据过程的实质，此处应为“液态焊剂壳”（Оболочка жидкого флюса）。經查对原文出处〔2〕发现，确系作者引用有誤。——譯者

生的蒸气和气体〔2〕。

焊接熔池液态金属的温度很高，根据理论计算〔24〕，该温度达 2450°C ，而根据实验数据〔85〕，则为 $1800\sim 2300^{\circ}\text{C}$ ，可见是在很广阔的范围內变化着——从接近于金属的沸腾温度（近弧处）到金属的凝固温度（在外围处）。随着电弧的逐渐移开，焊接熔池的温度将逐渐降低，这主要是由于热量导入基本金属内部的结果。当达到液相温度时（即开始凝固的温度时），金属开始凝固并形成焊缝。覆盖着金属的熔化焊剂层（渣层），由于其熔点通常较金属低，所以凝固得比较迟。焊接冶金过程的产物和气体，可以毫无阻碍地通过液态焊剂排出。凝固之后，焊剂（渣）壳将自由地从焊缝表面脱落。

对于任何尺寸和型式（角接、斜接、对接、搭接等）的焊缝，焊剂层下自动电弧焊时焊缝的形成过程实际上都是一样的。

多层焊缝，是用在已经凝固了的前一条焊缝的金属上逐次堆焊的方法而获得的。在这种情况下，前一堆焊层的金属将局部熔化。在快速施焊或焊接大厚度金属时，常采用多弧焊。在这种情况下，通常是把电极在一个平面內作纵列布置。为了获得较宽的焊缝（例如堆焊时），可把电极作横列布置。在纵列布置时，如果电弧之间的距离很小，并且形成一个共同的焊接熔池，则焊接过程接近于单弧焊。如果电弧之间的距离十分大，乃至在它们之間不存在相互的热作用，则焊接过程趋近于单弧多层焊，亦即后面每一电极的焊接，是沿已经凝固了的被前面电极堆焊的焊柱进行的。

焊剂层下单层自动电弧焊，用于焊接厚度为 $30\sim 40$ 毫米的工件最为有效〔2〕。当金属厚度增大到 100 毫米以上时，焊剂层下自动焊（无论单弧焊或多弧焊）的效率将降低。为了焊接更大厚度的金属，在乌克兰科学院 E.O.巴頓电焊研究所中，乌克兰科学院院士 B.E.巴頓的领导下，在和一些重型机器制造企业的合作中，研究成功了一种新的电焊方法——电渣焊。

电渣焊时没有电弧产生，所以金属的熔化过程是靠电流通过

导电的液态渣时产生的热量进行的。

为了获得电渣过程，要力求做到在存在大量的熔化焊剂（此焊剂充满焊接区，并含有足够的热量）时熄灭电弧〔2〕。焊剂层下电渣焊过程简图如图2所示。

在电渣焊开始时燃起电弧。选定的焊接规范必须保证产生足够的热量，以获得一定体积的熔化焊剂。熔化的焊剂逐渐充满电弧空间，并把电弧熄灭。随温度的逐渐增高，熔化的焊剂（渣）的导电度增高，而其粘度则下降。在熔化状态中，导电渣为一种电解质，既含有负离子，也含有正离子。为了获得稳定的电渣过程，熔化焊剂必须具有不变的物理-化学参数，这只有在较大的渣池体积时才有可能[Ⓐ]。

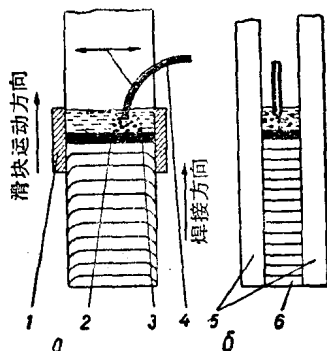


图2 电渣焊过程简图

a—纵截面； b—横截面[Ⓐ]；
1—铜滑块； 2—熔化金属； 3—渣池； 4—电极； 5—基本金属；
6—凝固的焊缝金属

极丝向焊接区的送进和水冷[Ⓐ]铜滑块的移动，是靠一个特殊装置实现的。随着二焊接面之间的间隙逐渐被金属填满，渣池和金属熔池的水准面，相对于铜滑块应保持不变。在工件间隙和厚度不变的条件下，使焊机移动速度和极丝的送进速度之间的关系保持固定不变，熔池的水准面（相对铜滑块）便可以保持不变。

- Ⓐ 此处所谓的纵、横截面，只能理解为相对工件之间的间隙而言，但一般都是相对焊缝纵轴线而划分焊缝的纵、横截面。根据后者，图中a、b皆应为纵截面，不过一为垂直于工件表面的（a），一为在工件平面之内的（b）。此处的b无助于说明问题。为了更清楚地看出焊缝结晶特点，应当再加一个横截面。——译者
- Ⓑ 这里叙述的关于电渣过程稳定性的概念是不全面的、不准确的。仅就焊剂性质的影响而言，决定电渣过程稳定性的液态焊剂的主要性质为导电性、粘度以及在焊接过程中析出气体的情况，它们都是随温度而变化的。为了获得稳定的电渣过程，要求这些性质在一定范围之内变化就可以了。可见要求熔化焊剂具有不变的物理-化学参数，是不可能的，也看不出这些性质和渣池体积之间有单值的关系。——译者
- Ⓒ 原文为用渣冷，显系笔误。——译者

在焊接邊緣之間間隙变化的情況下，為了保持焊接熔池水準面的穩定，可以接入自動控制線路^[83]。

電渣焊可以用一根或數根電極進行。電極可以是平板、特殊焊絲以及圓的、正方形的或其它截面形狀的直杆。大斷面電極電渣焊，在原理上和絲極電渣焊沒有區別。

電弧焊方法和電渣焊方法之間的區別在於：電弧焊的實現是借助於電弧熱對金屬的直接作用，而電渣焊則是靠電流通過液態的導電渣時產生的熱量。

2. 焊接熔池結晶過程的特點

焊縫的結晶，是在和一般鑄錠結晶不同的條件下進行的。在焊縫結晶過程發生之前，焊縫金屬被集中的熱源（電弧）強烈加熱，隨後，熔化金屬又被急劇冷卻。焊縫的冷卻速度，通常以每秒钟幾十度或幾百度計。而鑄錠的冷卻速度，隨其尺寸的不同而異，一般為每分鐘幾度，甚至是每小時幾度^[77, 55, 56]。焊接熔池被在電弧作用區內發生局部熔化的基本金屬所限定。基本金屬中的這一局部熔化區，構成一個“鑄錠模”，並且起着一種獨特的結晶墊板的作用。

與鑄錠不同，在焊接熔池液態金屬和“鑄錠模”壁之間不存在中間層（空氣層、氧化膜等），所以熱量可以直接散入基本金屬內部。

在很多情況下，焊縫的結晶過程對於其組織和機械性能有決定性的影響。經過熔化的焊縫金屬，與同樣化學成份的鑄鋼相比較，通常具有較高的機械性能指標，這可以用它的組織的一些特點來解釋^[2]。在同一焊縫範圍內金屬的組織是不同的，所以在同一焊縫範圍內各個區域可能具有不同的硬度和衝擊韌性^[47]。

研究焊縫結晶過程的重要性是非常明顯的。用動力學的方法研究這些過程是有一定困難的。所以對焊縫結晶過程的研究，主要是借助於已被很好地驗證了的一次組織的金相研究方法^[73]。

焊縫的一次組織具有晶體結構。在焊縫上部，晶體最粗大，

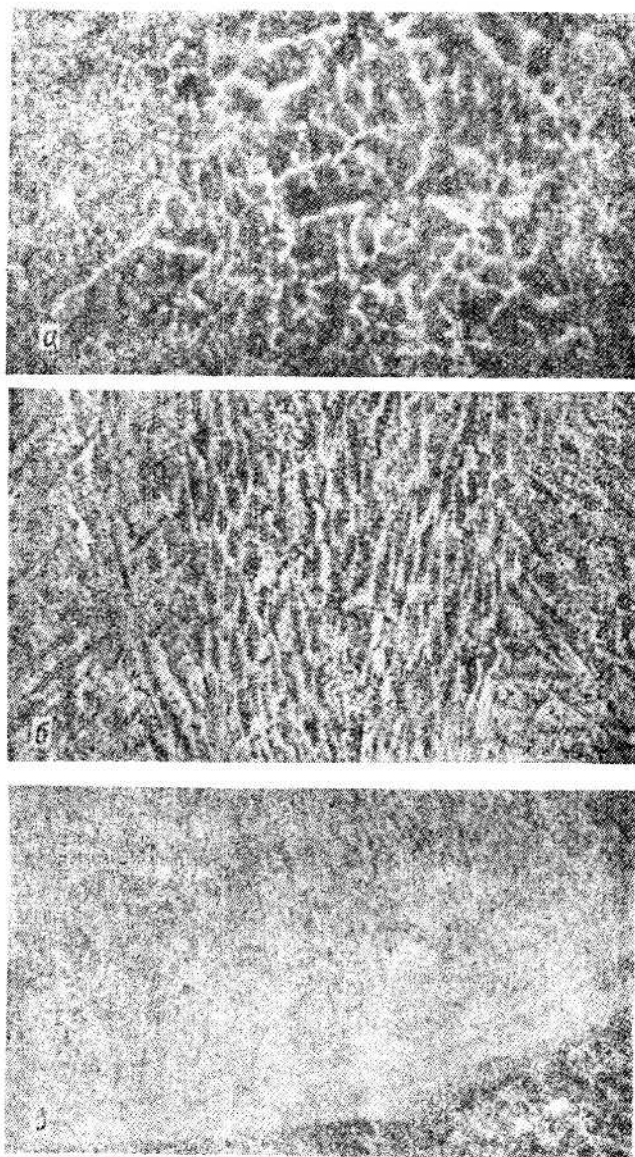


图 3 低碳鋼焊縫的一次組織（橫截面）， $\times 30$
 a —上部； b —中部； c —下部

而在焊縫下部，在焊縫根部，以及靠近未熔化的基本金屬的晶体則最細小（圖3）。特別是各个晶体都是从局部熔化了了的等軸的基本金屬晶体上长出来的。在焊縫根部附近，一般存在有結晶层，后者随着与焊縫根部距离的增大而逐漸变厚，并且越来越模糊不清，而在某些情况下会完全消失。在焊縫中部，最常見的是

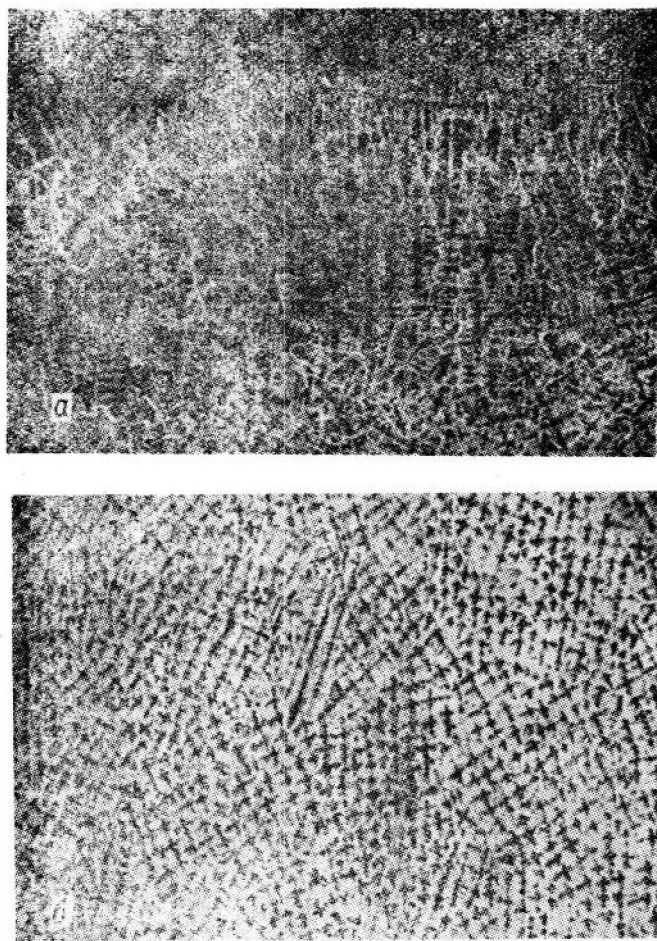


图 4 焊縫的一次組織（纵截面）， $\times 30$

a —焊縫上部； b —焊縫下部

橫晶結構。此處的晶体具有伸長的形狀，而其枝狀結構則表現得不明顯。在焊縫上部，晶体具有明顯的枝狀結構。在橫截面中，這些晶体具有等軸形狀，而在縱截面中，則沿焊縫軸向稍許伸長（圖4）。

對一次組織的研究結果，以及用放射綫照相法、X-射綫結構分析及其它一些分析方法所獲得的一些資料，使我們可以對焊縫結晶過程做如下的敘述。在焊接的開始階段，電極金屬和部分基本金屬發生熔化。熔化了的金屬形成焊接熔池。如果從電弧獲得的热量超過導出的热量，則焊接熔池的尺寸將增大。如果導入基本金屬內部的热量等於從電弧獲得的热量，則焊接熔池的尺寸將保持不變，而金屬的結晶速度將等於零。之後，热源（電弧）將離開在焊接開始階段形成的金屬熔池。隨著電弧的逐漸移開，在焊接熔池的這一段內所獲得的热量將減少。在導出的热量剛剛大於獲得的热量之後，馬上就開始結晶過程。

焊縫的結晶具有斷續的特點。在一定的時間間隔內，結晶潛熱和從電弧獲得的热量加在一起，會引起結晶過程的短時停頓，這就是出現結晶層的原因^[43]。

在這個問題上存在着一些另外的觀點。例如，根據文獻^[1]中舉出的資料，热量從加熱热源向結晶綫的斷續供給，是構成焊縫層狀結構的原因之一。因為這種热量的斷續供給，會引起先前已經凝固的區域的局部再熔化。根據文獻^[13]的資料，热量向結晶綫的斷續供給，是破壞在結晶綫之前的熱平衡的基本原因之一；其結果，並不是先前已經凝固的金屬發生局部再熔化，而是焊接熔池的冷卻速度發生變化。

考慮到最新的實驗結果，我們來比較詳細地考察一下焊縫的層狀結構。近年來已經証實了下面幾點：

1. 在小截面焊縫中，結晶層可以很好地顯現出來。在單層大截面的焊縫中，結晶層主要在基本金屬附近能夠顯現出來，而在焊縫的上中部則未能發現。

2. 在把热源切斷之後發生結晶的焊縫弧坑中，結晶層仅仅

发生在熔合綫附近，并且較焊縫的其余部分显得特別微弱。

3. 在用电容焊方法于一次脉冲之內焊成的焊点（此焊点是在切断焊接电流之后結晶的）核中发现，結晶层特別清晰（图 5）。

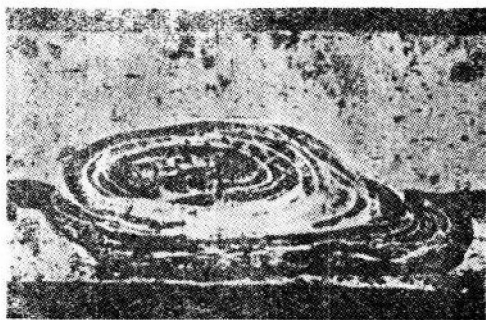


图 5 电容焊（一次脉冲）焊点的一次組織， $\times 60$

所有这些实验資料的結果表明，不能把結晶层的出現解释为仅仅是由于結晶热的强烈析出和热量从热源向結晶綫的断續供給。实际情况是，弧坑的冷却速度和結晶速度比其余部分要大，而其中的結晶层的显现則較差，并且只

存在于基本金属附近。弧坑和电容焊时焊点的鑄态金属核，都是在切断热源的情况下，亦即处于消除了任何从热源获得的脉冲热流的条件下进行的，但結晶层既出現于弧坑中，也存在于焊点的鑄态金属核內。

如果与高的冷却速度和結晶热的强烈析出一起，也考虑到焊接熔池中在結晶綫之前的溫度分布，則焊接熔池断續結晶的实质就可以确定。

在焊接熔池中，液态金属的溫度急剧地从結晶金属的熔点（熔池边界处）到沸点（电弧附近）間变化着。已获得的一些实验結果表明，只有在由于高速冷却而析出的結晶热引起在結晶綫之前的溫度急剧增高时，才存在焊接熔池的断續結晶。

在小尺寸焊縫中，結晶綫之前的溫度增高，較在大尺寸焊縫中为急剧，所以在小尺寸焊縫中形成清晰而細薄的层状結構。在大尺寸焊縫中，結晶层仅仅在熔合綫附近形成，因在該处在結晶綫之前的液态金属中发生相当大的溫度梯度和高的冷却速度。在这种焊縫的中部，由于溫度梯度和冷却速度都比較小，結晶过程不发生停頓，所以沒有結晶层（图 6）。

在焊縫的弧坑中，在結晶的初期当切断热源之后的瞬时，在結晶綫之前尚保持着稳定焊接过程所特有的較高的溫度，所以在开始时，弧坑的結晶仍和焊縫其余部分一样，即断續地进行，形成結晶层。随着時間的过去，焊接熔池的溫度将逐漸均化，弧坑的内部，虽然其冷却速度仍較焊縫其余部分的相应区域为高，但結晶是不停頓地进行的，所以不形成結晶层。

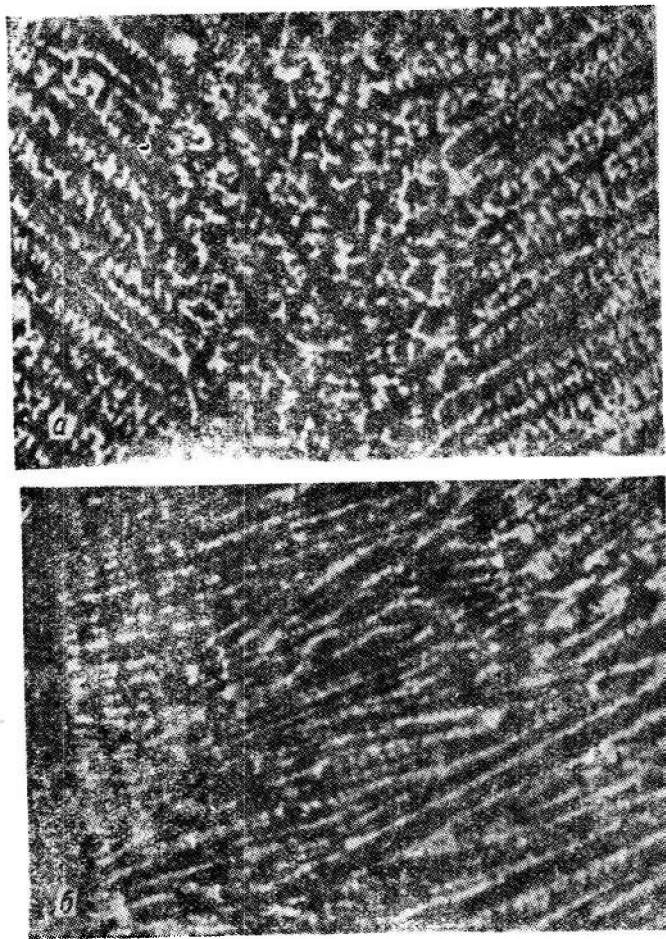


图 6 电渣焊焊縫的初次組織， $\times 18$
a—焊縫中部；b—鑄态金属和基本金属之間的过渡区

在电容焊的焊点核中，在結晶綫之前，在特別大的冷却速度时产生明显的溫度增高現象，所以在这样的焊点中結晶层扩展于整个点核的截面。

上述結果証实，剩余的結晶热也是构成結晶层的基本原因之一。在鑄态焊缝金属和基本金属之間的过渡区附近，結晶不是均匀地，而是断續地进行，很多微小結晶层的存在，可以說明这一点。随着結晶逐漸向焊缝内部深入，結晶过程将比較平緩地进行。

焊接熔池的平均結晶速度不可能高于焊接速度，并且实际上等于焊接速度。但是焊接熔池的各个不同区域，是以不同的速度进行結晶的。虽然由于結晶过程頻繁停頓的結果，平均結晶速度很相近，但在焊缝周边区域各結晶层之間个别晶体的結晶綫速度大于其中心部分。在大尺寸焊缝的中心部分，由于結晶过程沒有停頓，在单位時間內来得及长成尺寸很大的晶体。

在焊接熔池液态金属和未熔化的基本金属之間的过渡区中，进行着强烈的元素再分布过程。在焊缝中，液相和固相之間的相互作用的延續時間，通常为3~40秒的样子。但計算表明，甚至在这樣暫短的时间間隔里，在凝固溫度区間內（在液-固相溫度附近），大部分元素能够扩散0.05~0.2毫米的深度。

用一些特殊的实验証明，在接近于焊接的条件下，有可能进行交换扩散过程。为此目的曾做了如下的实验。在ЛТ-68黃銅磨片上，在距磨片边缘2毫米处钻了一些直径0.5毫米的小孔，然后经过每一个小孔和磨片边缘通过一根直径20微米的細鎢絲。此后在磨片端面上（在細鎢絲上）鍍一层厚4毫米的紫銅。从这样制备的試件中制成了磨片，磨片的截面是在垂直于鍍銅方向截取的。在显微硬度計ПМТ-3上測量了这些細鎢絲和小孔外緣之間的距离。曾以气体火焰把試件加热至920~930°C。結果确定，在920~700°C的溫度区間內停留10秒钟，足以使这些細鎢絲和小孔外緣之間的距离平均縮小0.12毫米。

这个說明基尔庚道尔（Киркендолл）效应^[31]的簡單实验

証明，在焊接時間之內，焊縫的某些区域在液-固相溫度區間內停留的時間，足以使與細微組織的結構变化相關聯的擴散過程得以進行。液固相之間的擴散過程，導致在過渡區中產生化學不均勻性。

圖 7 所示的含鉻 3 % 的焊縫組織，可作為一個例子。從圖中可見，在基本金屬附近的焊縫鑄態金屬中發生富碳，而在鑄態金屬附近的基本金屬中，則幾乎在同樣深度內發生貧碳。

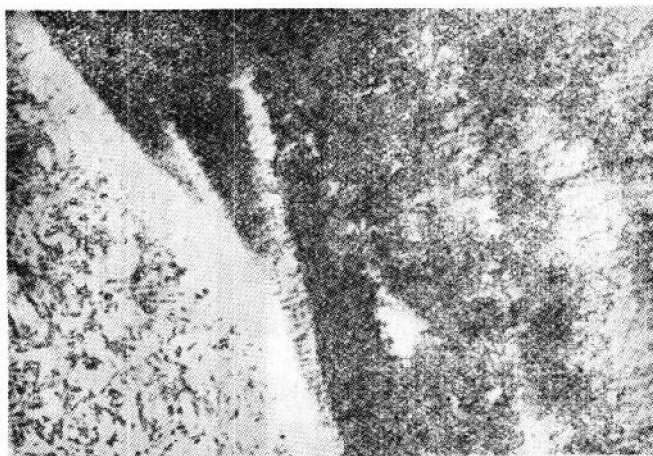


圖 7 含鉻 3 % 的焊縫一次組織。在 20 % 的鉻酞水溶液中作電解腐蝕， $\times 75$

焊縫結晶過程的短時停頓，每次造成的條件，都和發生於鑄態金屬與基本金屬之間的過渡區中的條件相似，因而可以設想，焊縫中層狀不均勻性的產生與結晶層的形成有關係。

只有在研究出一些新的焊縫一次組織的金相分析方法，以及為此目的而應用了放射性同位素之後，才有可能查明和分析沿結

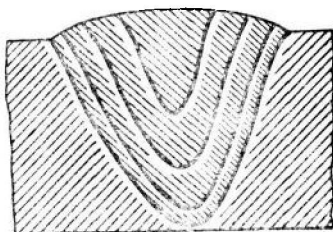


圖 8 焊縫中沿結晶層的化學不均勻性示意圖

晶层的不均匀性[73、14、61]。

焊缝中沿结晶层的典型化学不均匀性示意图列于图 8。此图恰好与结晶层的微观组织图(图 9)以及焊缝的放射线照相研究的結果[61、14、50]相符合。

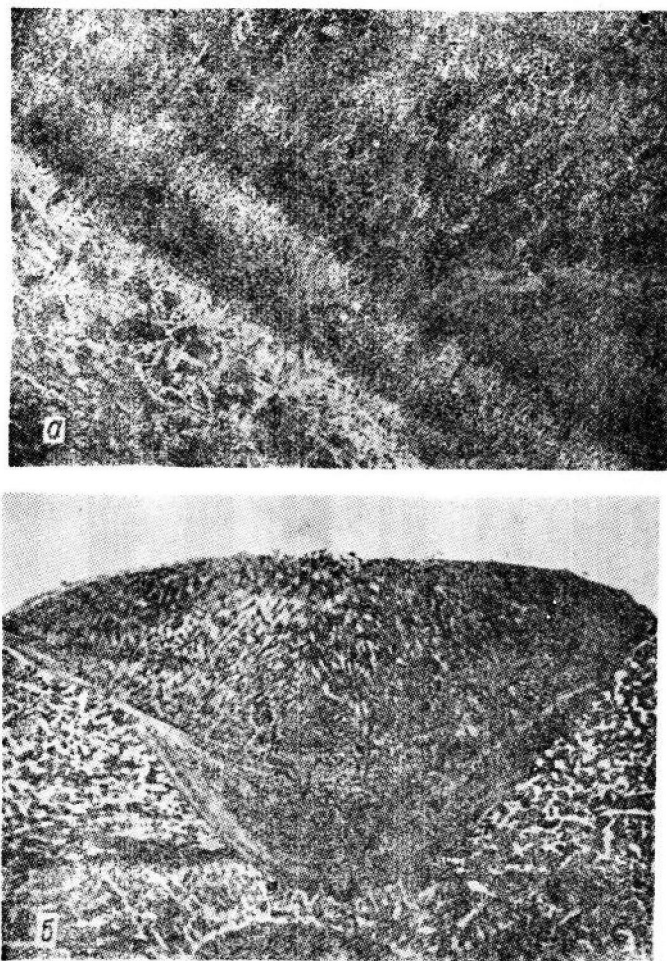


图 9 含锰 2.52% 的焊缝的二次组织及放射线照相图
 a—二次组织, $\times 30$ 。在铬酐水溶液中的电解腐蚀; b—放射线照相图。硫同位素 S^{35} 通过基本金属加入焊缝, $\times 2$