



焊工革新者丛书

貝特洛夫編著

焊接时 发生的过程

机械工业出版社

出·版·者·的·話

这套丛书是苏联列宁格勒技术推广所和全苏焊接科学技术工程学会列宁格勒分会編輯出版的。这套丛书系統地叙述焊接的各种方法、工艺规范和苏联在焊接方面的新成就；可以帮助我国熟练焊工和焊接工作人員进一步提高技术水平，所以我們決定把这套丛书翻譯出版。

本丛书一共有 18 本。它們是 [苏联焊接发展史和近代焊接法]、[焊接时发生的过程]、[低碳鋼的手工电弧焊接]、[高速手工电弧焊接法]、[半自动焊接]、[自动电弧焊接和电渣焊接]、[接触焊接]、[气焊]、[气割]、[金屬的钎焊]、[合金鋼的焊接]、[有色金屬及其合金的焊接]、[鑄鉄焊接]、[金屬結構的装配和焊接順序及防止弯曲的方法]、[焊接质量檢查]、[焊接生产中的技术定額和劳动組織]、[焊接生产中的劳动保护和安全技术]、[参考文献目录]，其中最后一册 [参考文献目录] 因跟工人同志的关系不大，所以不打算翻譯出版。

本书是丛书的第 2 册。

目 次

1 焊接和焊接热源	3
2 添入金屬的熔化及其向焊池中的过渡	9
3 焊池及其結晶	12
4 焊接对于被焊金屬組織的热作用	15
5 焊縫和焊縫附近地区金屬的組成和性能	20
6 多层焊接时焊縫和焊縫附近地区的組織	28
7 焊接接头中形成裂縫的条件	31
8 焊接加热影响焊接接头性能的特殊情况	37
結語	38

1 焊接和焊接热源

焊接是一种得到机械上不能拆开的接头的过程。金属和合金，以及某些其他材料都具有结晶构造（組織），也就是由密布着的晶粒组成的。由于焊接的结果，被连接部分成为有联系的組織，也就是形成了共同的构造（組織）。在焊接接头的地方，焊缝金属的构造不断地转变为被连接部分金属的构造。

促使形成这种焊接接头的条件能够用下列两种办法得到：

1. 在足够的压力作用下，使相邻的表面发生显著的共同变形（形状和尺寸的改变），例如铅、铝、铜和其他金属的冷焊。
2. 在高温作用下，不论应用外部压力或不应用压力，都把被焊接的表面加热到熔化状态。

实际上，甚至对于可焊性良好的材料，也要有某些必要的条件，只有在这些条件下，才能在生产上用这种方法得到保证必要性能（首先是机械性能）的焊接。

例如，对于几乎纯铁的鉄，造成优质焊接接头的条件（假设焊接表面没有氧化）决定于温度和压力之间的关系（图1）。

如果用位于曲线 $ABBF_1$ 上部温度和压力关系的规范来完成焊接的话，那末焊接接头就能获得很好的性能。当它们的关系位于曲线 $ABBF_1$ 的下面，温度或者压力比较低时，就不能焊接，或者焊接接头的性能不好。

在温度低于 t_1 而压力限于曲线 AB 段的规范下，实际上不会获得可靠的焊接接头，因而这种规范属于有限制的焊接区域。在温度从 t_1 到熔化温度 t_2 （在铁的塑性状态下），为了完成焊接，附

加压力仍是必要的，不过压力可以随着温度的增高而逐渐减小。这是压力焊接规范的区域。在温度 t_2 时，铁被熔化了，如果焊接边缘同时熔化，形成公共的焊池，那末在冷却之后不附加任何外力就能形成焊缝。因为焊接好像是自身发生的，并不要附加外力（挤压力），所以叫做熔化焊接。

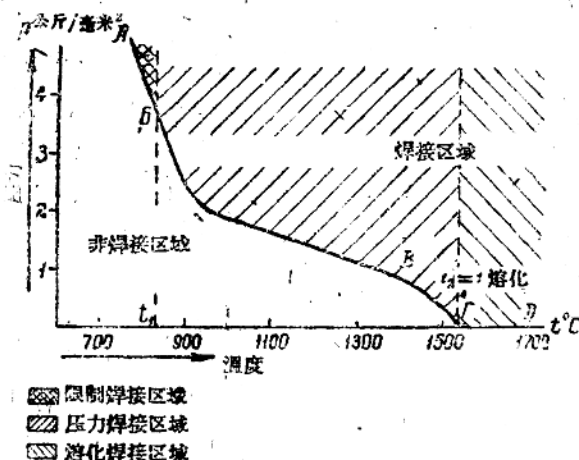


图1 完成工业纯铁焊接的条件图。

其他材料的焊接规范也服从类似的关系。但是某些材料（焊接这种材料可以在最低的必需温度下进行）实际上可能没有这两个区域中的某一个，因而只能使用熔化焊接，或是只能使用压力焊接（例如，铸铁只可以用熔化焊接）。

因为焊接通常带来一系列复杂的物理化学过程（焊接材料性能的变化，材料与周围介质的相互作用，各种化合物的生成和分解等），对于许多材料来说，这些过程还没有充分的研究，目前只讨论金属和金属合金、玻璃、石英玻璃、某些陶磁材料、天然和人造树脂、各种塑料等的焊接。但是金属的焊接最为普遍，

因此以后主要是研究金屬的焊接問題。

除了塑性极好的金屬能用冷焊之外，一般的焊接都要求应用某种加热被焊金屬的热源，叫做焊接热源。

这些热源应该保証能够將体积不大的金屬迅速加热到焊接所必需的温度。热源的温度应该大大地超过焊接金屬所必需加热的温度。为了使温度局部上升到焊接所必需的温度，可以利用化学能或电能，或者同时利用这两种形式的能量。

在利用化学能进行焊接加热，也就是利用燃烧的热效应时，热量基本上散发到受热金屬附近的空間。在这种情况下，焊接金屬的加热总是利用燃烧产物放热化学反应的热交换来进行的，并且也像任何热交换一样，会产生热损失。利用化学能的焊接热源有：1) 固态或液态燃料的燃烧（例如用鍛炉焊接时），2) 气态燃料的燃烧（在压力气焊和熔化气焊时）和3) 用高热剂反应（通常是氧化鉄和鋁粉或鎂粉之間的反应）所产生的熔化鉄和鋁或鎂的氧化物来加热。利用在应用电能作为焊接热源时，或是电流经过金屬时，由于金屬固有电阻和接触电阻（例如在接触电焊时）所放出的热量，或是利用电弧焊时直接在受热金屬表面上所放出的热量，那时焊件是焊接电弧电极之一。

在这些情况下，由于受热金屬周圍空間中几乎沒有傳热过程，所以热量的损失减少了，而热源的功率可以更有效地利用。

自然，在压力焊接时，焊接温度要比金屬的熔化温度低一些，因而可以利用比熔化焊接时功率較小的热源来加热。例如，对于鋼材的压力气焊可以使用在空气中燃烧的水煤气火焰加热，这种火焰的温度大約为 1800°C ，可是对于鋼的熔化气焊，則火焰的温度必須不低于 2000°C ，而那樣的温度在燃烧氫氧混合物时才能得到。但在任何情况下，提高火焰温度將提高焊接时热量的利

用效率。例如，在气焊厚度为3毫米的鋼料时，在用氩氧火焰的情况下，耗于有效地熔化金屬（构成焊缝）上的热能只占总热能的2%左右；在用氧和电加热气（氧和碳化氢的混合物）火焰时，溫度大約 2500°C，这时耗于有效地熔化金屬上的热能占总热能的3.5%，而在用氧-乙炔火焰时，火焰的溫度約有 3000°C，热量的有效利用率可达 6~7%。

当被焊金屬的厚度較大时，由于傳热大，因而使耗于熔化金屬上的有效热量更少。拿氩氧火焰來說，当鋼料厚度为 8 毫米时，有效热量几乎等于 0，而在用氧-乙炔火焰的情况下，当厚度約为 40 毫米时，有效热量也等于 0。

因此，对于熔化气焊和压力气焊应当力求使用具有最高溫度的火焰，也就是氧-乙炔火焰。产生低溫火焰的燃料，只在焊接熔化溫度較低的金屬时才使用（例如，焊接鉛用的氢气）。

电弧是具有較高溫度的焊接热源。按照现代的概念，根据計算和實驗室測量，知道电弧极上的溫度为电极材料的沸騰溫度所限制。在两电极之間空間的弧柱中溫度还要高些。例如，用金屬鋼焊条焊接鋼料时，在所謂阴极輝点（在电弧的阴极上）和阳极輝点（在电弧的阳极上）的区域内，溫度达到鉄的沸騰溫度（約 2700°C），而在弧柱中它們达 5000~6000°C（用手工焊接时），而在自动焊接的情况下，則达 7000~8000°C。

用不熔化的炭精、石墨或鎢极焊接时（在保护气体中），被焊金屬一部分由电极被焊金屬上所放出的热量来加热，而在某些程度上由弧柱的热量来加热。在添加金屬的焊接情况下，添加金屬在弧柱中加热和熔化，而把附加的热量帶入焊池中。

用熔化的金屬焊条焊接时，焊条的熔化主要是由于焊条端部电弧輝点所放出的热量。

由于焊条熔化的结果，金属以滴状和部分的蒸气形态过渡到焊池中。过渡金属滴的大小决定于芯棒的成分（当焊条芯中的含碳量增加时，金属滴变小）、焊条药皮的特性和成分；而在自动焊接时，显然还决定于焊剂的成分和电流量（焊接电流越大，过渡金属滴的尺寸越小）。在手工电弧焊接的情况下，不论用低碳钢裸焊条焊接时或用某些成分的药皮焊条焊接时，金属滴都会达到最大的尺寸。在所有这些情况下，金属滴的直径大约等于焊条芯棒的直径。在许多场合下，金属并不以单个的、比较大的甚至暂时闭塞电弧的金属滴形态，而是以大量的小滴熔化金属〔雨〕，由焊条过渡到焊池中。

金属滴在弧柱中加热以后，就把附加热量带入焊池中。因此，电弧中放出的大量热量被带入焊池，所以在用金属焊条进行电弧

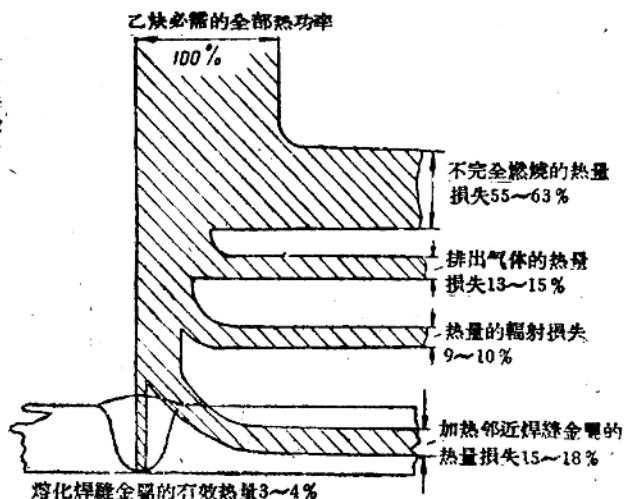


图2. 熔化气焊时乙炔燃烧热量的分配图。

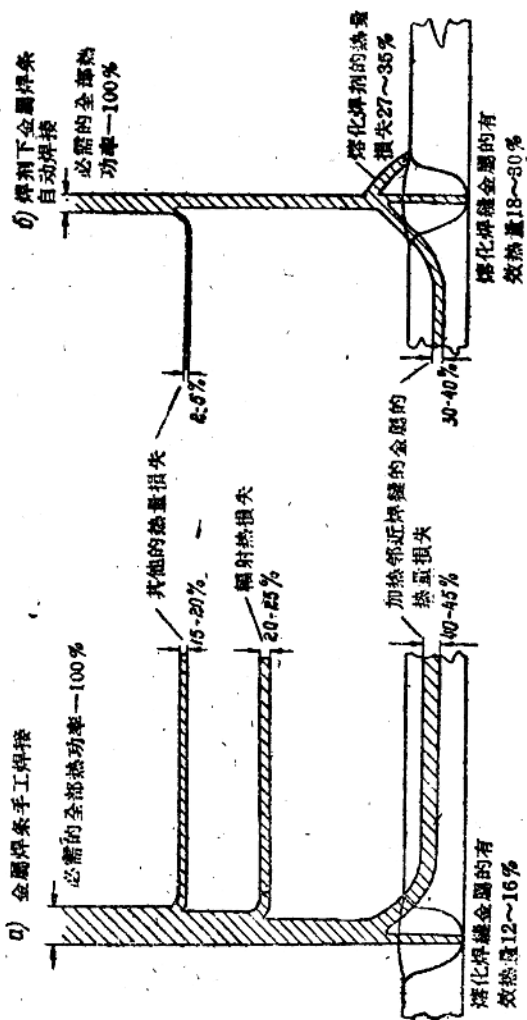


图 3 用熔化金属焊条焊接时电弧的热量分配图。

焊时，能够最有效地利用热能。如果在熔化气焊时，用来熔化金属的燃烧热量有效利用率为4~6.5%，则在用金属焊条进行电弧焊时，根据焊接情况（手工焊接或焊剂下自动焊接）其值可达12~30%。

由利用燃烧发热量的观点而论，用氧-乙炔火焰加热10毫米原钢料的一般特性，如图2所示。

在明弧焊接和焊剂层下自动焊接时，利用电弧热功率的一般特性如图3所示。

在图上(图2和图3)，分叉线以上划有阴影线的部分是焊接热源必需的总热功率，而分叉线是加热和损失所用去的部分。

因此，根据分叉线的宽度就可以判断用不同方法焊接10毫米厚钢料时的热量消耗，以及加热邻近焊缝地段金属所用的热量。

对于其他厚度的钢料和其他不同性能（导热性、热容量）的金属来说，有效利用热量和热量损失之间的数值关系有一些改变，但是，上述这几种焊接方法的一般特性仍旧是完全一样的。

2 添入金属的熔化及其向焊池中的过渡

在某些情况下，焊缝仅仅是由于被焊基本金属边缘的熔化而获得的，例如，预先折好边缘的薄金属用炭精电极焊接或气焊时就是如此。

在大多数熔化焊接的情况下，焊缝是由熔化的基本金属与焊条或添入棒熔化而得到的焊着金属所形成的。

由于气体和其他物质（焊接时，在熔化、向焊池过渡和凝固过程中，这些物质会与熔敷金属相接触）对焊着金属作用的结果，焊着金属的成分和焊条金属或添入棒是不同的。

除在最简单的熔化气焊情况下，添入金属在气焊火焰中熔化，并且由于火焰气体在它上面作用结果，金属的成分就改变了。成分有些变化的添入焊丝的熔化金属。在进入焊池之后，与已熔化的、局部也遭受火焰气体作用的基本金属混合起来。因此，焊缝金属在凝固以后，通常会得到新的成分和性能。金属和气体相互作用的反应速度决定于接触表面的大小、操作过程的时间和发生作用的温度。

采用添入金属的气焊，如果像图4上所示的那样来进行，也就是添入料离开被焊金属表面一些距离，随着添入料的熔化，金属滴将落入焊池中，这样就可以看到添入料和基本金属对火焰气体的相互作用是分开进行的。

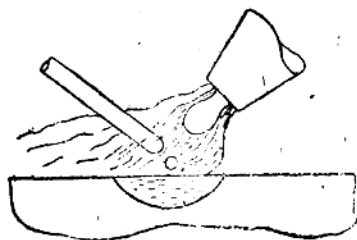


图4 熔化气焊原理图。

如果把添入金属上滴下的金属滴和焊池比较一下，就可以看出火焰对金属滴的影响要大些。的确，如果假设金属滴的直径（通常等于添入棒的直径）为4毫米，则它的体积为33.5毫米³，重量为0.23克，而表面积为50毫米²。这时，每一毫米²的金属滴表面上仅有0.0046克液态金属。例如，在焊接厚度为5毫米的钢料时，金属池具有5毫米深度和11毫米的直径，而它的表面积为95毫米²，液态金属的重量为3.2克，也就是说，每平方毫米的表面积就有0.033克的焊池金属，或者说，比金属滴大7倍。相应地说来，对于直径为5毫米的金属滴，每平方毫米的金属滴表面能得到0.0059克的液态金属，而焊接厚度为7毫米的钢料时，在焊池深度为7毫米和直径为15毫米的情况下，每平方

毫米的表面积将有 0.046 克的液态金属，亦即大 7.5 倍。

一般可以认为，和火焰气体相接触的金属滴的有效表面积比焊池大 5~10 倍。

已经查明，在气焊低碳钢时，焊池的表面温度（约 1600°C）平均比钢的熔化温度高 100~130°C。金属滴的温度，由于散热较少应该更加高一些，大概当表面温度达 2000°C 时，其平均温度高于 1800°C。这种较焊池增高 200~400°C 的温度，强烈地改变了金属与火焰气体相互作用的反应速度。例如铁与氧的反应速度能增加到 3~6 倍。

金属滴的有效作用表面相对地增大到 5~10 倍，而同时反应速度也提高到 3~6 倍，这不可能被比金属滴落下时间更长的气体与焊池的相互作用所弥补，因而熔着金属由于与火焰气体反应的结果比焊池熔化金属发生更显著的变化。

因此几乎在进行一切气焊工作时，最好把添入料放在焊池中，以减少附加金属与火焰气体的作用面积，同时使它不会显著地过热。

在用金属焊条进行电弧焊接时，情况就不同了。在这种情况下，根据焊接过程的本质，必须把金属滴由焊条过渡到焊池中去，因而不可避免地会使它们过热。

焊条上在 0.001~0.01 秒时间内生成的金属滴，迅速受到加热，而且在它表面的个别地段上将达到沸腾温度。由于金属与空气中氧气相互作用的结果而发生的氧化（在用裸焊条或离子化涂层焊条焊接时），或由于涂层中氧化物对金属滴起作用而发生的一些轻微氧化，实际上使这些氧化物在金属滴还留在焊条端部时就立刻溶解在熔滴中了。因为在焊条端部熔化金属的成分中总有由焊条芯棒成分中和某些涂层材料中加入的碳，所以在

金屬滴內部就產生出氣態的一氧化碳，因為氣體的膨脹而使金屬滴好像是脹大了。在這種氣體膨脹的作用下，以及電力和其他外力的作用下，金屬滴就離開焊條而跳向電弧的第二個極——焊池。

當金屬滴通過電弧間隙過渡時，金屬與熔渣和電弧氣體繼續進行反應。這種情況不論是在有短路的大金屬滴過渡時，或沒有短路的小金屬滴過渡時都會發生。一般金屬滴的外面為熔渣薄膜所掩蓋，而內部包藏有氣泡和通常是很小的熔渣微粒。金屬滴通過電弧間隙的時間一般是很短的，並且不超過 0.002 秒。但是高的弧柱溫度和小的金屬滴尺寸，都能使從電弧進入焊池的金屬有顯著的過熱，而這種金屬的溫度大約可達 2000°C 。

3 焊池及其結晶

電弧焊接時的焊池平均溫度也比氣焊時的焊池平均溫度高一些，而且焊池表面的溫度差最大，主要是在電弧焊點區域內。

氣焊火焰或電弧離開焊池的某一地段，焊池的溫度就開始下降，其主要的原因是熱量傳給了被焊金屬。液態金屬在火焰或電弧的機械壓力作用下受到排擠，並且轉移到低溫區域的焊池後壁（圖 5，a 和 b）。

由於熱量經過焊池的後壁和側壁傳出，因溫度降低而使靠近

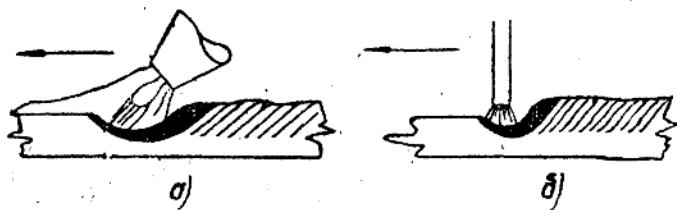


圖 5 在焊炬熱源機械力作用下熔化金屬在焊池中移動示意圖

a — 氣焊時； b — 電弧焊時。

池壁的熔化金屬开始結晶。这一結晶过程是依靠焊池熔化金屬在焊池边界上长出不熔化晶体而实现的。在焊池的熔化边界上，基本金屬的一切晶体首先开始成长，但是因为它們的成长条件不一样，几乎即刻就出現一些成长較快的和个别停止成长的或成长較慢的晶体（见图 6）。

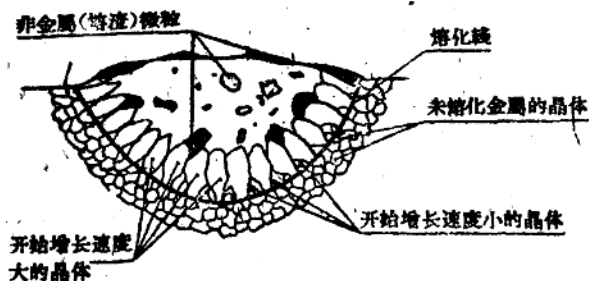


图 6 焊池中金屬結晶示意图。

那些由于不断向金屬排出热量而继续成长的晶体前緣可以把焊池中的非金属熔渣微粒“推出”到焊池的表面上。

如果結晶过程进行得均衡（也就是散热均匀），而使焊池已結晶部分发生第二次不均匀熔化（例如，手工焊接时焊条的横向摆动不均匀的热源并不破坏已有晶体的成长时），則所有的大粒夹杂物都应该被成长中的晶体从焊縫中“挤出”去。例如，在进行焊縫自由成形的仰焊时，熔渣因为比較輕，好像应该在結晶焊縫的内部“浮起”（图 7 a）。但是如果施焊得正确，則成长中的晶体能把它們全部挤到焊縫的表面上来（图 7 b）。

如果第二次熔化破坏了金屬結晶的均匀性，則在熔池中能够形成落后于晶体成长的液态“囊”。凝固后，其中可能留存大粒的熔渣夹杂物（图 8）。为了使純金屬充滿結晶池的全部体积，焊池的寬度与深度之間必須有一定的比例。例如，焊池的寬度大于

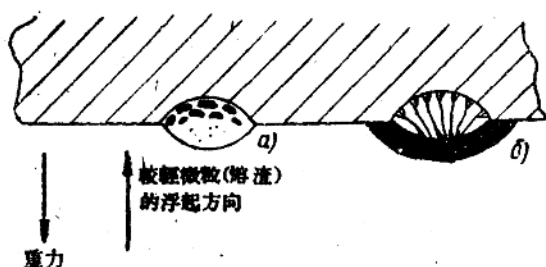


图7 自由成形仰焊时金属和熔渣的分布图:

a —实际上并不发生的那种熔渣浮起; b —仰焊时熔渣在反重力方向上被挤到表面。

深度, 则结晶将是正常的 (图9 a), 深的焊池 (例如, 在某些规范时, 主要的是自动焊接时) 将在焊缝的中央形成软弱的地方 (图9 b)。但是, 当焊池很小而很宽时 (图9 c), 在垂直于拉伸力方向上成长的晶体冷却时有形成裂缝的危险。

在正确选择焊接规范, 使焊池在结晶过程中有一定的形状的情况下, 一切粗大的熔渣夹杂物应该都被挤到焊缝的表面上来, 因而在焊缝中可以获得充分纯净的金属。所以对于许多

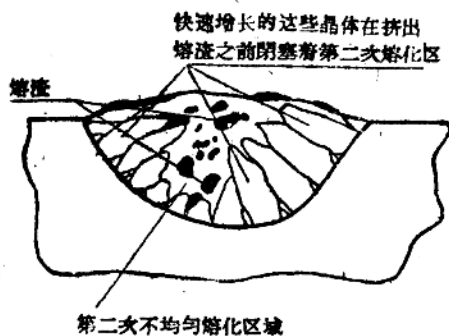


图8 熔渣“陷入”在结晶池中图。

有形成裂缝倾向的和对阻塞影响敏感的合金, 最好在施焊时焊条不要作横向摆动, 以免破坏结晶过程。这种结晶完了的金属截面一般型式如图10所示。具有快速成长条件的粗大晶体, 继续成



图9 不同形状（宽度和深度比）焊池的结晶图。

长至彼此相遇，同时形成拉长的大致垂直于焊池与基本金属熔化线的晶体组织。

这样的组织叫做树枝状组织，而有这种组织的金属都比同样化学成分的热轧金属具

有较弱的机械性能。所以为了获得比用于制造焊接结构的热轧金属性能更高的焊缝金属，在焊接时要设法改善焊缝

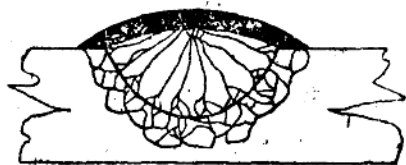


图10 单程焊接的焊缝金属组织示意图。

金属的成分，用足以获得较好性能的各种成分来向金属中掺合金，而不考虑树枝状组织。

4 焊接对于被焊金属组织的热作用

焊接接头的性能不仅决定于焊缝金属的性能，而且还决定于因焊接而改变的基本金属性能。这种基本金属性能的变化，在大多数情况下决定于焊接热量对于焊缝附近地区的热作用。

焊接对于被焊金属的温度作用决定于焊接热源的温度、加入热量的集中程度、热功率和在受热金属上热作用的持续时间。

如果用静止的高温焊接热源（例如，用气焊火焰或碳棒焊条的电弧）加热基本金属，则距离加热地方不同的金属将在不同时

間內受到不一致的加熱。這種加熱的示意圖如圖 11 所示。由於基本金屬的導熱性，加入的热量將沿金屬傳布至金屬的深處和兩側。因此，焊接熱源直接加熱處附近的金屬，也將被加熱，而它的溫

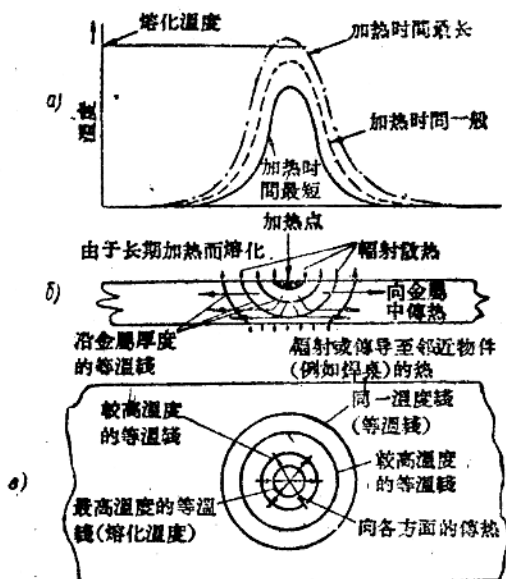


圖 11 在不同的焊接熱源作用下基本金屬中的熱量分布圖。

度也將升高。離開加熱的地方越遠，則受熱越少，而金屬的溫度也將越低（圖 11 a）。如果繼續加熱，則熱量將傳布得更遠，如用不同曲綫（實綫、虛綫和點綫）在圖 11 a 上所表示的那樣。同時，一部分熱量傳到周圍空間和與受熱金屬緊貼的物件中（如放置加熱工件的焊接台、特殊的墊板等）。在大多數情況下，這些損失的程度並不很嚴重，但是有時也必須要加以考慮（在寒冬有風時焊接；用銅墊板焊接等）。