

# 电 阻 焊 技 术

朱正行 严向明 王敏 编著



机 械 工 业 出 版 社

# 绪 论

焊件组合后，通过电极施加压力利用电流通过接头的接触面及邻近区域产生的电阻热进行焊接的方法称为电阻焊，曾称为接触焊。它是压力焊中应用最广的一种焊接方法。

若要形成一个牢固的焊接接头，焊件的连接面上必须具有足够数量的共同晶粒。电弧焊是利用外部的电弧作热源，使焊件局部熔化，冷却凝固后形成焊缝；电阻焊则利用焊件通电时产生的内部电阻热作热源，加热焊件，且在外力作用下完成焊接过程。因此电阻热与机械力的恰当配合是获得优质电阻焊接头的必要条件。

电阻焊可加热到熔化状态（例如点焊、缝焊和闪光对焊），亦可仅加热到高温塑性状态（例如电阻对焊）。熔化金属可组成焊缝的主要部分（例如点焊、缝焊的熔核），亦可为组成焊缝而被挤出呈毛刺（例如闪光对焊时）。因此电阻焊焊缝可以具有铸状组织，亦可仅为锻状组织。

## 一、电阻焊的分类

按焊件的接头形式，工艺方法和所采用电源种类的不同，电阻焊可分为多种形式，其分类见表 0-1。电阻焊方法示意图见图 0-1。电阻焊各类电源的电流波形图见图 0-2。

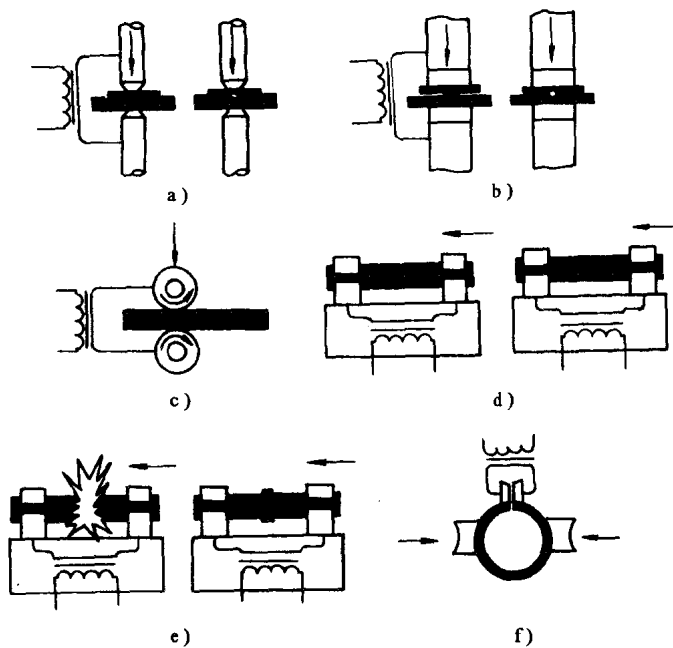


图 0-1 电阻焊方法示意图

a) 点焊 b) 凸焊 c) 缝焊 d) 电阻对焊 e) 闪光对焊 f) 缝对焊

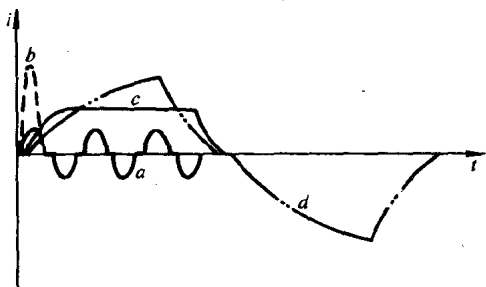


图 0-2 电阻焊各类电源的波形图

a—工频交流 b—电容放电 c—二次整流 d—低频

表 0-1 电阻焊的分类

接头形式 工艺方法		搭 接			对 接		
		点焊	凸焊	缝焊	缝对焊	对 焊	
						闪光对焊	电阻对焊
电 源 种 类							
焊接变压器 一次交变供电	工频 50 或 60Hz	△	△	△	△	△	△
	中频 100 ~ 1000Hz			△	△		△
	高频 2.5 ~ 450kHz				△		
	低频 3 ~ 10Hz	△	△	△		△	
	二次整流	△	△	△		△	△
一次单向供电 焊接变压器	电容放电	△	△	△		△ <sup>①</sup>	△
	直流冲击波	△		△			

注：△——表示采用。

① 一般采用直接放电，称为冲击闪光焊。

## 二、电阻焊的主要优缺点

电阻焊方法自 19 世纪末问世以来发展迅速，尤其是随着汽车工业等大批量生产企业的兴起，其应用日趋广泛。据统计，目前电阻焊方法已占整个焊接工作量的 1/4 左右。它是零部件的毛坯准备，组合件制造的重要工艺方法之一。与通常的熔焊工艺相比，电阻焊具有如下主要优缺点：

### 1. 优点

- 1) 热量集中、加热时间短、焊接变形小。
- 2) 冶金过程简单，一般不需要填充材料及熔剂，不需要保护气体。
- 3) 能适应多类同种及异种金属的焊接，包括镀层钢板

的焊接。

4) 工艺过程简单, 易于实现机械化及自动化, 上岗前不需要对焊工进行长期培训。

5) 焊接生产率高, 成本低。

6) 劳动环境较好, 污染小。

## 2. 缺点

1) 设备复杂, 需配备较高技术等级的维修人员。造价较高, 一次投资费用大。

2) 电容量大, 且多数为单相焊机, 对电网造成不平衡负载严重, 必须接入容量较大的电网。

3) 对影响强度的某些内在指标(例如点焊的熔核直径及焊透率, 对焊的熔合不良和灰斑等)目前尚缺少简便、实用的无损检测手段。因此阻碍了电阻焊在质量要求特别高的场合(如航空、航天工业等)的进一步推广应用。

综合上述情况, 电阻焊主要用于生产批量大的场合, 只有这样才能显示出它所具有的高生产率与高经济效益。

## 三、电阻焊在工业中的应用

电阻焊工艺在工业中的应用极为广泛, 航空、航天、汽车车辆、轻工家电、仪器、仪表、量具刃具, …等部门都得到广泛应用。例如一辆轿车一般有 5000 个焊点, 而一架战斗机则可高至百万焊点。若不采用高生产率的电阻焊, 则无法实现年产几十万辆轿车的生产目标。

电阻焊的主要用途有三类:

1) 各种形状相同截面的对接或环状零件的生产。例如建筑钢筋的接长、铁路钢轨的接长、刃具的异种钢毛坯对接; 钢窗框架、自行车轮圈、汽车轮圈、锚链等的生产。

2) 各种薄板构件的生产。例如轿车外壳拼装, 仪表柜、

钢家具的生产；油桶、油箱、化工原料盛器、食品罐头等的制造。

3) 各种冲压件、挤压件之间及其对薄板的装焊。例如物品货架、动物笼、网格栅架、汽车止动闸、电气触头、不锈钢餐具等零部件的生产。

#### 四、电阻焊的发展概况

随着相关技术的发展，在电阻焊中新技术的应用日趋广泛，主要着重于下列方面：

1. 发展节能型设备和工艺 电阻焊机的瞬时功率极大，且较多为单相，因此在大容量设备上正逐步采用三相二次整流、逆变、低频等电源，以平衡电网负荷。在工艺上则发展如薄焊轮缝焊、不带有电顶锻闪光焊、脉动闪光焊等节能型工艺。

2. 采用计算机技术 随着计算机的飞速发展，电阻焊机的控制部分日益革新，目前已从分离元件经短暂的小规模集成元件时代进入单片机和微机时代。在这方面充分利用计算机的特点，实现了群控、多参数存储、自动补偿电压波动及恒流等以前较难实现的功能。

同时随着机电一体化技术的推广应用，电阻焊工艺与机械手和机器人的结合，已广泛应用于轿车焊装等自动化程度高的生产线上。

# 第一章 对 焊

将焊件端面相对放置，利用焊接电流通过焊件的电阻热加热，并施加压力完成焊接的电阻焊方法称为对焊。

对焊接头必为相同截面的对接。若为变截面焊件时，须将连接部位加工成相同截面（图 1-1）。不论截面的大小（从

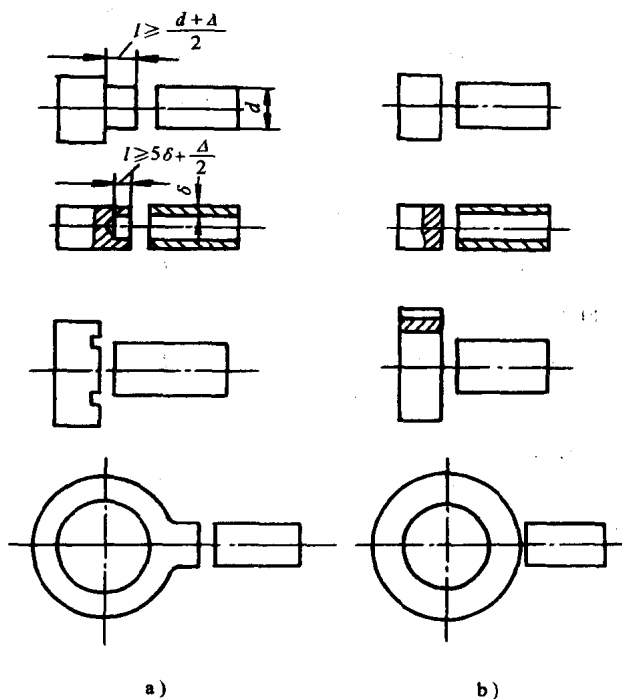


图 1-1 对焊接头设计  
 a) 正确设计 b) 错误设计  
 $\Delta$ —总留量  $d$ —直径  $\delta$ —壁厚

直径 0.04mm 的细丝至截面积 10 000mm<sup>2</sup> 及 100 000mm<sup>2</sup> 的铁路钢轨及输气管道) 均对整个截面一次同时焊成。因此一般要求对焊机的容量较大, 个别可高达 1000 多千伏安。

## 第一节 对焊的分类及热源

### 一、对焊的分类

对焊可分为电阻对焊与闪光对焊两大类。

1. 电阻对焊 将焊件装配成对接接头, 使其端面紧密接触后通电, 利用电阻热加热至塑性状态, 然后施加顶锻力完成焊接的方法称电阻对焊。按压力在焊接过程中的变化与否, 电阻对焊又可分为等压式与变压式两种。图 1-2 为电阻对焊的时序图。

2. 闪光对焊 将焊件装配成对接接头, 接通电源后使其端面逐渐移近达到局部接触, 利用电阻热加热这些接触点 (产生闪光), 使端面金属熔化, 直至端部在一定深度范围内达到

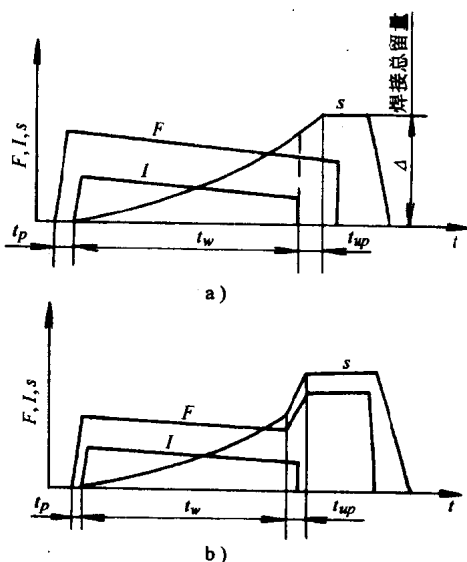


图 1-2 电阻对焊时序图

a) 等压式 b) 变压式

$t_p$ —预压时间  $t_w$ —焊接时间  $t_{wp}$ —维持时间

$F$ —焊件间所作用的压力  $I$ —电流

$t$ —通电时间  $s$ —导电夹钳的位移



预定温度分布时，迅速施加顶锻力完成焊接的方法。闪光焊又分为连续闪光焊与预热闪光焊两种。图 1-3 为闪光焊的时序图。

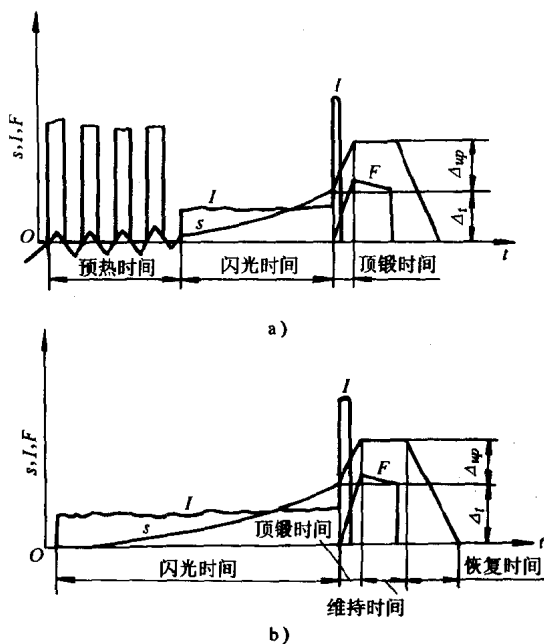


图 1-3 闪光对焊时序图

a) 预热闪光焊 b) 连续闪光焊

$t$ —时间  $I$ —电流  $F$ —压力  $s$ —导电夹钳的位移

$\Delta t$ —闪光留量  $\Delta_{up}$ —顶锻留量

## 二、对焊的热源

对焊时的热源是由焊接区电阻产生的电阻热。按焦耳定律所产生的总热量可用下式表达

$$Q = I^2 R t$$

式中  $Q$ ——总热量 (J);  
 $I$ ——电流的有效值 (A);  
 $R$ ——总电阻的平均值 ( $\Omega$ );  
 $t$ ——通电时间 (s)。

对焊时焊接区的电阻由三部分 (图 1-4) 组成。

总电阻  $R$  可用下式表达

$$R = 2R_{ew} + 2R_w + R_c$$

式中  $2R_{ew}$ ——导电钳口与焊件间的接触电阻 ( $\Omega$ );

$2R_w$ ——焊件导电部分的  
电阻 ( $\Omega$ );

$R_c$ ——两焊件间的接触  
电阻 ( $\Omega$ )。

1.  $R_{ew}$  由于夹紧力较大, 接触电阻较小, 且它远离结合面, 其析热量对结合面附近的温度影响很小, 常忽略不计。

2.  $R_w$  其值可按欧姆定律计算, 其计算式如下

$$R_w = m\rho l_o / S$$

式中  $R_w$ ——焊件导电部分的电阻 ( $\Omega$ );

$l_o$ ——焊件单边导电部分的长度, 即为伸出长度 (cm);

$S$ ——焊件截面积 ( $\text{cm}^2$ );

$\rho$ ——焊件材料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$m$ ——集肤效应引起的系数。

$\rho$  随温度变化而变化, 可用下式计算

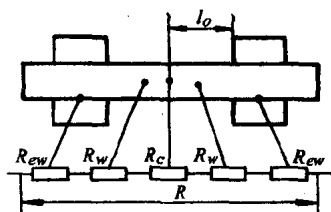


图 1-4 对焊时的电阻分布  
 $R$ —总电阻  $R_{ew}$ —导电钳口与焊件间的接触电阻  $R_w$ —焊件导电部分的电阻  $R_c$ —两焊件间的接触电阻  
 $l_o$ —伸出长度

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta)$$

式中  $\rho_0$ ——273K时的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );  
 $\alpha$ ——材料电阻率的温度系数 (1/K);  
 $\theta$ ——温度 (K)。

由于焊接时温度呈一定分布规律,且随加热过程的进行温度不断地上升,在粗略估算时, $\rho$ 常取其平均值。

3.  $R_c$  电阻对焊与闪光对焊的接触电阻在成因与数值上均有较大差别。

(1) 电阻对焊的接触电阻 因焊件间的接触面上存在微观不平或阻碍导电的杂质,所以电流在流过接触面附近时电流线会产生扭曲,使实际导电面积缩小而引起的附加电阻称为接触电阻(图 1-5)。

接触电阻值随焊件间压力的增加而减小,随温度的上升而下降,并在某温度趋向于零。这是由于焊件的材料产生了变形,实际导电面积增加所致。室温时的接触电阻可用下列经验公式计算。

$$R_c = r_c \left( \frac{F}{10} \right)^{-\alpha}$$

式中  $R_c$ ——室温时的接触电阻 ( $\Omega$ );

$r_c$ ——当  $F = 10\text{N}$  时的接触电阻,其值与表面状态有关,是实测统计所得的常数 ( $\Omega$ ),低碳钢为  $0.005 \sim 0.006\Omega$ ,铝合金为  $0.001 \sim 0.002\Omega$ 。

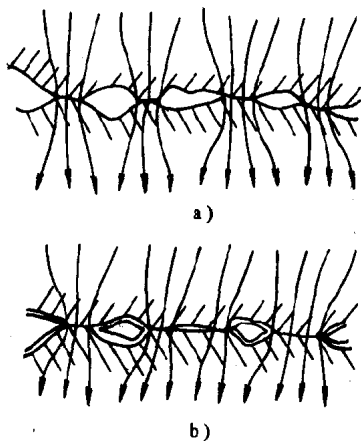


图 1-5 接触电阻形成机理

a) 表面不平引起的电流线弯曲  
 b) 表面氧化膜而引起的电流线弯曲

$F$ ——焊件间所作用的压力 (N);

$\alpha$ ——与材料有关的指数, 钢为 0.65 ~ 0.75, 铝为 0.75 ~ 0.85。

接触电阻尚有下列特性:

当压力增大时, 接触电阻下降, 而压力再下降时, 接触电阻虽上升但不能恢复到原值。这是因部分触点的塑性变形之故, 这个现象称“滞后”。图 1-6 为对数坐标下接触电阻与压力的关系。

(2) 闪光对焊的接触电阻 当两焊件缓慢靠近时, 端面上仅个别点接触。电流通过这些点时, 由于电流密度极高, 很快就形成熔化金属小滴 (称作过梁)。当过梁进一步升温气化而爆破后即转入短暂的电弧过程, 而后很快熄灭。随着焊件的靠近, 在其他凸出部位又形成新的过梁。这种过梁与电弧不断交替的平均电阻值即为闪光对焊的接触电阻。其值可用下列经验公式计算。

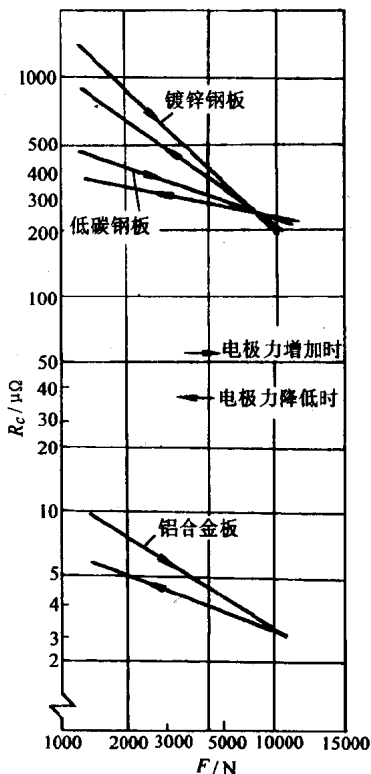


图 1-6 对数坐标下接触电阻与压力的关系 (板厚 1mm + 1mm)

$$R_c = \frac{9500k}{S^{2/3}v^{1/3}J} \times 10^{-6} \quad (1-1)$$

式中  $k$ ——与材料性质有关的系数，对碳钢  $k$  取 1；对奥氏体钢  $k$  取 1.1；

$S$ ——焊件截面积 ( $\text{cm}^2$ )；

$v$ ——闪光速度 ( $\text{cm/s}$ )；

$J$ ——电流密度 ( $\text{A/cm}^2$ )。

由式 (1-1) 可得出如下结论：闪光焊的接触电阻远比焊件导电部分的电阻  $R_w$  大，一般为  $100 \sim 1500 \mu\Omega$ ，且在闪光过程中始终存在，不像电阻对焊加热到某温度时将逐渐消失。闪光结束进入顶锻后，此接触电阻立即消失。

4.  $R$  对焊过程中总电阻的变化规律见图 1-7。电阻对焊时  $R_w$  随温度上升而上升， $R_c$  则在焊接初期即急剧下降趋于零，所以总电阻是先急降后微升。闪光对焊时  $R_w$  变化规律与电阻对焊相类似，而  $R_c$  则仅在闪光过程中略下降，而在闪光结束时突然消失，所以总电阻也是先微降而后突降。

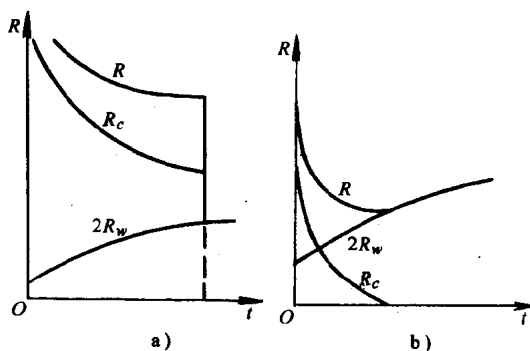


图 1-7 对焊过程中总电阻的变化规律

a) 闪光对焊时 b) 电阻对焊时

$R$ —总电阻  $R_c$ —两焊件间的接触电阻

$2R_w$ —两焊件导电部分的电阻

5. 对焊时的温度分布 假设焊件的材料在加热区间的物理常数为定值（一般可把加热区间划分为若干分析区段，每一区段内假设为定值），则可应用叠加原理，在各分析区段内把焊件各点的温度看成由下述两部分叠加而成：第一部分由电流通过  $R_c$  析出的热量（可视为面热源），经热传导后所达到的温升；第二部分由电流通过  $R_w$  析出的热量（可视为体热源），经热传导后所引起的温升。

电阻对焊时上述两部分热量均占一定比重，对焊时温度分布曲线见图 1-8。电阻对焊的温度分布见图 1-8 中曲线 1，其最高温度根据工艺要求应控制在焊件材料熔点的 90% 左右（一般按摄氏温度计算）。

连续闪光对焊时  $R_c$  上的析热占主导地位，因此总的温度分布曲线较陡，见图 1-8 中曲线 2。

预热闪光对焊时的温度分布介于上述二者之间，见图 1-8 中曲线 3。

闪光对焊时的最高温度根据工艺要求应高于材料的熔点。

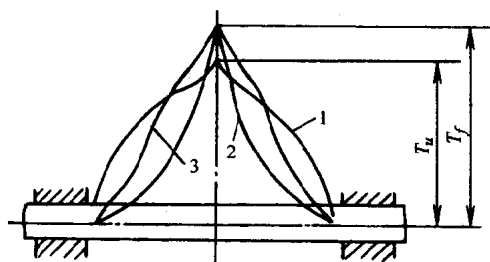


图 1-8 对焊时温度分布曲线

1—电阻对焊时 2—连续闪光对焊时

3—预热闪光对焊时

## 第二节 电阻对焊

### 一、电阻对焊的过程分析

电阻对焊过程分为预压、加热、顶锻、维持和休止等程序。其中前三个程序参与电阻对焊接头的形成，后两个则是操作中的必要辅助程序。等压式电阻对焊时，顶锻与维持合一，较难区分。

1. 预压 预压的目的是建立良好且分布均匀的物理接触点。为此，焊件的连接面及其电流导入的表面应很好地清理干净，其连接面平行度的误差应尽可能小些。以保证初始接触点尽可能均布。对某些旋转体对称截面的焊件可做如图 1-9 的焊前加工，这种加工有利于造成初始对称分布温度场，有利于温度较快地达到均匀分布。

2. 加热 加热的目的是电阻对焊的主要阶段，在机械力与电阻热的综合作用下，接触点迅速加热变形，导致接触面积增加，最后扩展到整个结合面，从而接触电阻趋向于零。焊件电阻则随温度上升而增大。在热传导作用下端面温度渐趋均匀，而沿焊件端部纵深则形成一定的温度分布，电阻对焊时的温度分布曲线，见图 1-8 曲线 1。同时在压力作

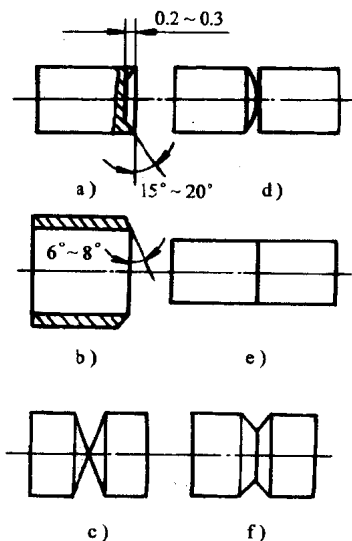


图 1-9 旋转体对称形  
焊件端面的加工

用下焊件渐渐产生塑性变形而缩短。

在加热期间应注意下列要点：

1. 两焊件结合面上的最高温度不应超过其材料的熔点，一般为材料熔点的 80% ~ 90%（按摄氏温度计算）。端面上各处的温度分布应藉热传导而均匀化。

2. 减少和防止结合面在加热过程中的氧化。必要时可导入保护气氛（如 Ar、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CO 气体等单一或混合气体）；亦可采用图 1-9a 所示的坡口，以便在加热最初期使端面与大气隔绝。

3. 顶锻 当焊件端面温度达到均匀，且沿焊件纵深温度分布合适时，塑性变形速度会明显地加快，进入顶锻阶段，此时应切断电流。顶锻时应彻底排除端面的氧化物等杂质，使后续纯净金属在获得一定的塑性变形下导致金属界面消失，组成共同晶粒，从而形成接头。当采用等压式电阻对焊时，顶锻力与加热力相同，因此两阶段的区分不清晰。当采用变压式电阻对焊时，顶锻力大于加热力。顶锻除彻底排除氧化物等杂质外还应获得足够的塑性变形。除了合适的温度分布和压力外，对于旋转体对称形焊件的端面采用如图 1-9c、图 1-9d、图 1-9f 所示的加工法，有利于氧化物的排除。

4. 维持 维持的目的是使焊件在加压下冷却，避免收缩应力所产生的缺陷。

5. 休止 用于设备的复位。

## 二、电阻对焊的优缺点及适用范围

1. 优点 与闪光对焊相比，电阻对焊的优点有：

- 1) 设备简单，焊接参数少，便于掌握。
- 2) 焊件的缩短量小，节约材料，毛刺少，有利于简化



后道工序。

2. 缺点 与闪光对焊相比，电阻对焊的缺点有：

1) 热效率低、比功率高，目前一般仅适用于焊接截面积小于  $250\text{mm}^2$  的零件。

2) 焊件端面上先导电的接触点比后导电的接触点通电时间长，其温差只能靠热传导来达到均化，故端面加热不均匀性大，因此仅能焊接紧凑截面的零件，如丝、棒及窄的带钢。

3) 热影响区较宽，晶粒长大较快，接头的冲击韧度低等。

4) 由于电阻对焊的焊接温度低于熔点，塑性变形阻力大，对其面上氧化物的排除较困难，尤其当氧化物为固态时更难将其挤出接口，故电阻对焊的可焊品种远少于闪光对焊。目前仅适用于碳钢、纯（紫）铜、黄铜、纯铝及少数低合金钢等的焊接。

3. 适用范围 当前电阻对焊主要用于各种线材的接长，直径小于  $20\text{mm}$  棒料的对接，以及生产由线材或窄带钢制造的环形零件，如小形链条和带锯等。

### 三、焊接参数

1. 电流密度（或比功率） 碳钢电阻对焊时，一般取电流密度  $J$  为  $9000 \sim 70000\text{A}/\text{cm}^2$ （或比功率为  $10 \sim 50\text{kV}\cdot\text{A}/\text{cm}^2$ ），当焊件截面较小时取上限值。

2. 焊接时间 碳钢的电阻对焊时间  $t_w$  为  $0.02 \sim 0.3\text{s}$ 。 $J$  与  $t_w$  可按经验公式  $J\sqrt{t_w} = k \times 10^3$  选用。其中  $k$  为常数，碳钢取  $k = 8 \sim 10$ ，纯铝取  $k \approx 20$ ， $J$  与  $t_w$  的单位分别为  $\text{A}/\text{cm}^2$  及  $\text{s}$ 。

3. 压力 等压式电阻对焊时，对碳钢取  $20 \sim 30\text{MPa}$ ；有