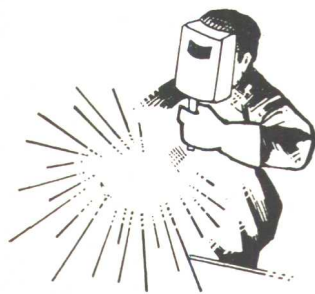


机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

对接电阻焊

孙仁德 编著



G441.3

机械工业出版社

内容提要 本书较系统地介绍了对接电阻焊，即电阻对焊和闪光对焊的原理、工艺及设备。较详细地叙述了闪光对焊过程理论及获得最佳闪光过程的要求，分析了常用材料和典型零件的对焊特点和工艺措施，书中还列出了许多材料和零件的对焊参考规范

书中还对国内外闪光焊技术的发展作了扼要的介绍；对二次整流供电和电容储能供电在对焊中的应用，也作了简单的介绍。

本书可供从事闪光对焊和电阻对焊的技术工人使用，也可供有关工程技术人员参考。

对接电阻焊

孙仁德 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

轻工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 3·字数 73 千字

1983年1月北京第一版·1983年1月北京第一次印刷

印数 60,001—12 000·定价 0.25 元

科技新书目：42—113

统一书号：15033·5471

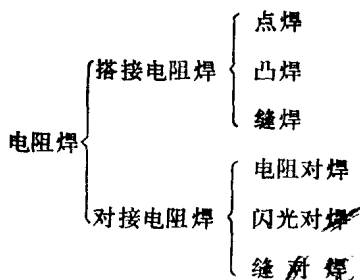
目 次

一	概论	1
二	电阻对焊	4
	1 电阻对焊接头的形成 (4)——2 电阻对焊的热源和电阻 (6)	
	——3 电阻对焊过程 (9)——4 电阻对焊的规范参数 (10)	
三	闪光对焊	13
	1 闪光对焊的电阻 (13)——2 闪光对焊过程 (14)——3 闪光对焊工艺 (21)——4 对焊接头的缺陷及质量检验 (28)——5 闪光对焊技术的发展 (34)	
四	各种金属材料和零件的对焊	38
	1 各种金属材料的对焊 (41)——2 典型零件的对焊 (47)	
五	对焊机	64
	1 对焊机的机械机构 (65)——2 对焊机的电气系统 (75)——	
	3 对焊机的主要电参数及外特性 (79)——4 通用及专用对焊机 (83)——5 对焊机的调整及维修 (89)	
六	对焊的供电方式	91
	1 工频供电式 (91)——2 二次整流供电式 (92)——3 电容储能供电式 (93)	
七	对焊的安全技术	95
	1 触电 (95)——2 灼伤和火灾 (95)——3 空气污染 (95)——	
	4 压伤 (96)	

一 概 论

焊接时，在焊接区内施加压力，并通以强大的焊接电流，利用电流通过焊件所产生的电阻热加热焊接区，当加热到适当的温度之后，断开电流，焊接区继续在压力作用下冷却，便形成牢固的焊接接头。这个焊接过程叫做电阻焊，又称为接触焊。电阻焊过程的主要特点，是在加热和加压的共同作用下形成焊接接头的，加热的热源是电阻热，加压使焊接区产生塑性变形。

电阻焊通常分为如下几类：



其中电阻对焊和闪光对焊又通称为对焊。

各种电阻焊的原理如图 1 所示。

电阻焊具有接头可靠，效率高，消耗低、机械化和自动化程度高，劳动条件好等优点，在现代工业生产中得到了广泛的应用。特别在航空、汽车、自行车、电子器件和精密仪表的生产中，以及在锅炉钢管、刀具、链条和钢轨的焊接中，电阻焊已成为主要的焊接工艺。

对接电阻焊中的缝对焊，主要用于焊接管材的生产中，缝对

焊工艺在管材焊接中将另作详细介绍，本书重点介绍闪光对焊。

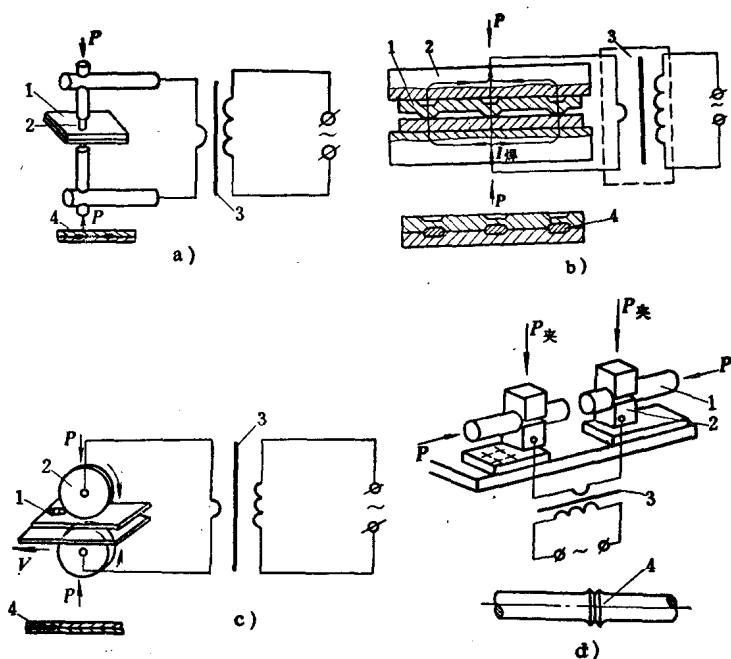


图1 电阻焊方法

a) 点焊 b) 凸焊 c) 缝焊 d) 对焊
1—焊件 2—电极 3—变压器 4—接头

对焊的主要应用范围是：

1) 接长零件，即把短件接成长件。例如，在冶金工业中带钢及型材的对焊，建筑工业中的钢筋的对焊，以及钢轨、锅炉钢管、石油和天然气输送管道的对焊等（图2 a、b）；

2) 环件对接，例如，链环、汽车轮辋、齿轮轮缘及自行车轮圈对焊等（图2 c、e）；

3) 把简单零件焊成复杂的产品，以简化加工工艺，减少加

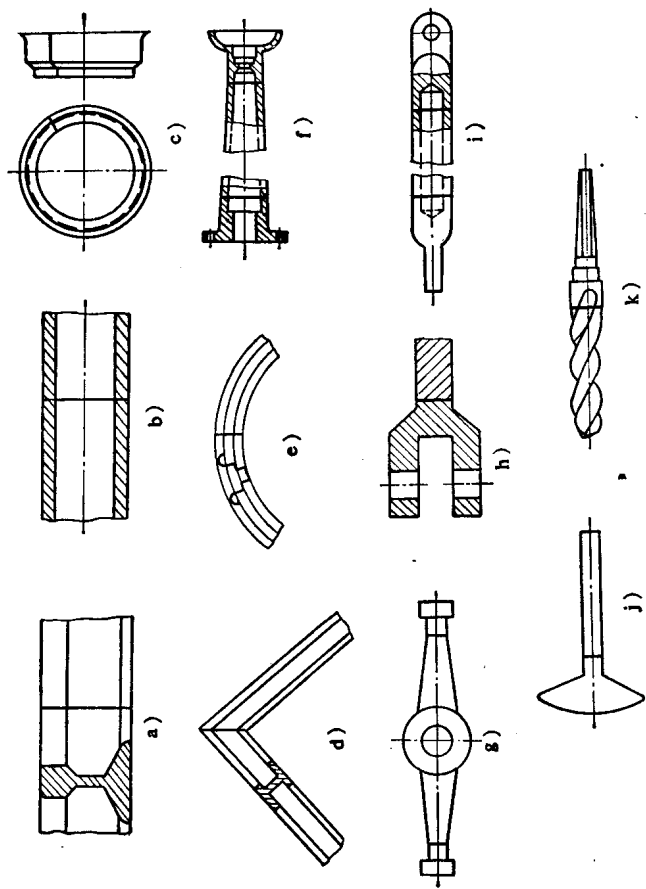


图 2 对焊产品

- a) 钢轨 b) 管道 c) 汽车轮辋 d) 窗框 e) 车圈 f) 万向轴壳
 g) 汽车后桥壳体 h) 连杆 i) 拉杆 j) 排气阀零件 k) 刀具

工工时，降低材料消耗。例如，餐具、窗框、汽车万向轴壳和后桥壳体及柴油机机体的对焊等（图 2 d、f、g、h、i）；

4) 异种金属对接，以节省贵重金属，提高产品的性能。例如，刀具、铝—铜接头及内燃机排气阀的对焊等（图 2 j、k）。

二 电阻对焊

图 3 为电阻对焊原理图。焊接时，把焊件 1 夹紧在夹头 2 中，施加压力使焊件端面互相挤紧，然后接通变压器 3，通电加热，当端面加热到焊接温度时（约为材料熔点的 0.8~0.9 倍），断开电流，焊接区在压力作用下产生塑性变形，形成焊接接头。由此可见，加热和塑性变形是形成接头的主要条件，为了弄清楚加热和塑性变形在焊接过程中的作用，下面首先介绍电阻对焊接头是如何形成的。

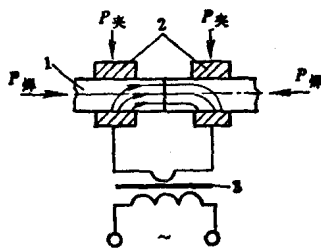


图 3 电阻对焊原理图

1—焊件 2—夹头 3—变压器

1 电阻对焊接头的形成 金

属由原子组成，通过原子间的互相作用，保持为整体。要把两种金属焊接起来，也必须使它们的原子间产生相互作用。电阻对焊是在高温固态下焊接的。在固体状态下，使两个焊件端面上原子间发生互相作用的必要条件是：它们之间的距离应达到几个 \AA ($1 \text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米)。但是，实际的金属表面都存在着微观或宏观的不平度，即使经过精密加工的平面，其不平度仍超过 100\AA ，而金属原子间能产生相互作用的距离只有 5\AA 左右。由于表面的不平度，金属的接触只能是个别的点相接触（图 4），其接触面积不超过总面积的 1%，因此，一般接触不会使原子间产生相互作用。

另外金属表面上总是有一层氧化物、油污及吸附的气体等脏物，其厚度一般在0.05微米以上。这些脏物是原子间互相作用的障碍。

由此可见，要实现焊接，必须克服表面不平度，去除表面上氧化物等脏物，使金属原子进一步接近，达到互相作用的距离。

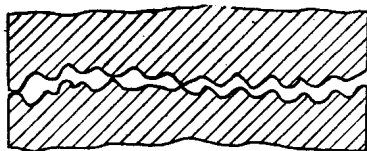


图4 金属表面接触方式

实验研究证明，在压力作用下使焊件端面共同产生塑性变形，不仅能够克服表面不平度，还能破坏并去除表面上的部分氧化物，使端面上金属原子紧密接触产生互相作用。例如，塑性较好的铝和铜，在室温下对接端面的变形程度达到60%以上，就可以焊接在一起，这就是所谓的“冷压焊”。但是，对于塑性较差的金属，例如，碳钢、合金钢等，不容易实现“冷压焊”，因为这些金属在塑性变形之前，将产生很大的弹性变形，当解除外加压力之后，弹性力又重新使表面恢复凹凸不平的状态，从而破坏了原子间的互相作用。

加热可以提高金属的塑性，降低金属变形阻力，因而可以减小产生塑性变形的压力。同时加热又能增加金属原子的活动能力和扩散速度，促进原子间的互相作用。例如，铝加热到400°C时，只需要8%的变形程度就能够实现焊接。在真空中焊接钢，如果把加热温度从1150°C提高到1250°C，则焊接压力可从2公斤力/毫米²降到1公斤力/毫米²。但是，在空气中加热，金属被强烈地氧化，如果不去除氧化物，残留在接口中便形成氧化夹杂物，则接头的塑性和韧性便会明显地下降。在真空中以及在惰性气体（氩、氦）和还原性气体（氢气、一氧化碳）中加热，能够避免或大大地减少金属的氧化。

综上所述，获得优质电阻对焊接头的条件是：

1) 焊接区必须产生足够的塑性变形。塑性变形量是衡量接头质量的主要标志之一，通常用截面系数 K 表示，对于优质的对焊接头应满足于

$$K = \frac{F_k}{F_0} \approx 2 \sim 3$$

式中 F_k ——焊后接口的截面积；

F_0 ——焊前焊件端面面积。

提高端面的平整度以及减少端面的氧化程度，就可以降低 K 值。所以在保护气氛中对焊， K 值可以小于2。在一般情况下，对焊小直径线材， K 值接近于3，有时甚至大于3，而焊接大截面焊件时 K 值可减小。

2) 焊接端面必须加热到适当而均匀的温度。加热温度太低，塑性变形困难，加热温度过高，可能产生过热组织，对焊接质量都有不良影响。通常电阻对焊加热温度为：

$$T_{\text{焊}} = (0.8 \sim 0.9) T_{\text{熔}}$$

式中 $T_{\text{焊}}$ ——焊接端面温度；

$T_{\text{熔}}$ ——焊件材料的熔化温度。

电阻对焊时要求端面加热均匀，加热不均匀，使塑性变形不均匀，容易产生未焊透缺陷。

3) 尽可能减少接口中的氧化夹杂物。接口中的氧化物既有焊前端面上残留的，也有焊接过程中加热氧化新产生的。电阻对焊时，接口中的氧化物很难全部排除，因而对于要求高的合金钢焊件，最好在真空中或保护气氛中加热焊接。

2 电阻对焊的热源和电阻 电阻对焊时，电流通过焊件产生的电阻热，可以用电热公式表示；

$$H = 0.24 I^2 R t \quad (\text{卡})$$

式中 H ——产生的电阻热 (卡);
 I ——焊接电流 (安);
 R ——焊接区电阻 (欧);
 t ——焊接通电时间 (秒)。

由式中可见, 影响产生热量的因素是电流、时间和电阻。电流和时间是规范参数, 以后再作讨论, 这里首先介绍一下焊接区的电阻。

电阻对焊时的电阻分布如图 5 所示, 焊接区的电阻可用下式表示:

$$R = 2R_{\text{件}} + R_{\text{触}} + 2R_{\text{极}}$$

式中 $R_{\text{件}}$ ——一个焊件导电部分的电阻;
 $R_{\text{触}}$ ——两个焊件端面间的接触电阻;
 $R_{\text{极}}$ ——焊件与电极之间的接触电阻。

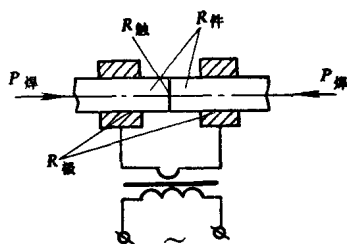


图 5 对焊的电阻分布

焊件电阻符合电学上的电阻定律, 即

$$R_{\text{件}} = m\rho_r \frac{l}{F}$$

式中 l ——焊件导电部分的长度 (厘米);
 F ——焊件导电部分的截面积 (厘米²);
 ρ_r ——焊区金属的电阻系数 (微欧-厘米);
 m ——趋表效应系数。

电阻系数随温度升高而增大, 通常可按下列式计算:

$$\rho_r = \rho_0 (1 + \alpha T)$$

式中 ρ_0 ——零度时的电阻系数;
 α ——电阻温度系数, 对于纯金属 $\alpha = 0.004$ 1/度, 对于

合金钢 $\alpha = 0.001 \sim 0.002$ 1/度，并随着合金元素含量增加而减小；

T ——焊接区平均温度， $T = 0.75T_{\text{熔}}$ ，对于低碳钢 $T \approx 900^\circ\text{C}$ 左右。

趋表效应随导体直径增加、电流密度的减少而增大，钢棒直径小于 20~25 毫米时，趋表效应对电阻的影响可以忽略。此外，钢加热超过 768°C （居里点）即磁性转变温度后，趋表效应的影响可略去不计。

接触电阻是导体互相接触处所特有的电阻。由于导体接触面是点接触状态，所以其实际导电面积很小。此外，表面上总是有一层氧化物等脏物，它的电阻率比金属导体的电阻率大得多。这就是产生接触电阻的主要原因。

接触面的状态、温度及压力对接触电阻有很大的影响。随着温度升高，接触点变软，接触面积增加，接触电阻迅速减小。钢加热至 600°C ，铝合金加热至 350°C 时，接触电阻完全消失。随着焊接压力增加，接触点面积增大，氧化膜受压破坏，因而接触电阻迅速地减小。

当焊件表面有明显的氧化皮时，接触电阻就急剧增大，有时因接触电阻太大，电流太小，而不能进行焊接。

在对焊时，焊件与电极间的接触电阻较小，而且离焊接端面较远，所以它对加热影响极小。

图 6 表示电阻对焊时电阻的变化。由图可见，在焊接过程

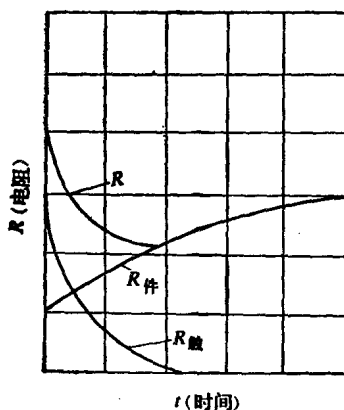


图 6 电阻对焊时的电阻变化

中，接触电阻迅速减小到零，焊件电阻逐渐增加。一般情况下，焊件电阻对加热起主要作用。接触电阻产生的热量不超过总热量的10~15%，但这部分热量集中于接口上，使接口处的温度迅速提高，从而使变形集中，有利于焊接。

3 电阻对焊过程 图7表示电阻对焊时电流、压力及其作用时间的关系。电阻对焊过程可分为预压、加热和锻压三个阶段，其中加热和锻压是主要阶段。

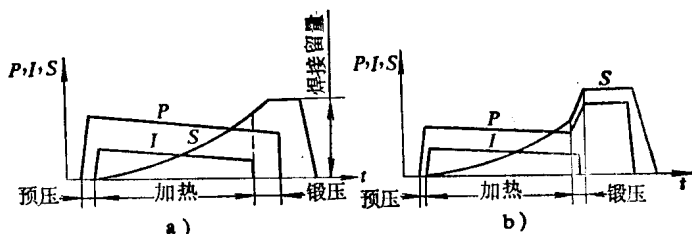


图7 电阻对焊过程图

a) 等压力式 b) 变压力式

P—压力 I—电流 S—动夹头行程

由于电阻对焊的加热时间较长，接头变形较大，所以预压阶段的时间可以缩短，甚至可以等于零。但是，如果加热时间很短，例如采用电容储能对焊，则必须使焊接压力稳定之后，才能通电加热，否则，会影响加热的稳定性。

电阻对焊时，在端面间，电流沿着个别接触点流过，因而接触点被加热，温度升高，表现出明显的加热不均匀性。随着加热时间的延长，加热不均匀性逐渐减少。但是，当焊接大截面焊件时，加热不均匀性往往保持到加热结束，所以严重地影响焊接质量，这是电阻对焊不能焊接大截面焊件的原因之一。另外，加热时间越短，加热不均匀性越严重。例如，用电容储能对焊，焊接较大截面的焊件时，由于加热时间很短，加热不均匀性严重，常产

生未焊透的缺陷。

为了改善加热和减少氧化，焊件端面必须进行严格的焊前准备。图8是生产中常用的端面型式。图8a是带凸缘的端面，在焊接开始时，凸缘先加热焊合，使内表面与空气隔绝，因而减少了氧化。采用球形和截锥形端面，不仅加热较均匀，而且容易去除氧化物。这种端面型式，常采用调幅电流进行加热。随着导电面积增加，电流逐渐加大。用平端面时，应仔细地加工，以保证端面有良好的接触，为了均匀加热，常采用脉冲焊接电流。

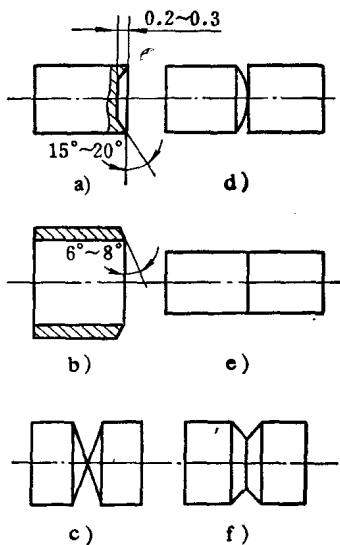


图8 电阻对焊的端面型式

锻压的作用是使接头产生塑性变形。电阻对焊有两种锻压方式，一种是等压力式（图7a），即锻压力等于焊接压力；第二种是变压方式，即锻压力大于焊接

压力（图7b）。前者加压机构简单，便于实现，但锻压效果不如变压方式的好。变压力的锻压方式主要用在焊接合金钢、有色金属及其合金上。

4 电阻对焊的规范参数 电阻对焊的规范参数有：伸出长度（ L ）；焊接电流（ $I_{\text{焊}}$ ）或焊接电流密度（ $j_{\text{焊}}$ ）；焊接通电时间（ $t_{\text{焊}}$ ）；焊接压力（ $P_{\text{焊}}$ ）和锻压力（ $P_{\text{锻}}$ ）。

从焊件端面到电极，这段长度叫做伸出长度。焊接时，由于加热和散热综合作用的结果，使焊件伸出长度上有一定的温度分布。由于对焊电极是由铜合金制造的，通常又采用通水冷却，因

而电极散热最快，使邻近电极的焊件温度较低。在接触端面上，由于接触电阻的析热和散热不利，所以温度最高。从而形成了从端面到电极温度由高到低的分布状态（图9）。

伸出长度对温度分布有较大影响，伸出长度长，温度分布缓降，伸出长度过长，加热区太宽，容易过热，而且锻压时常常会失稳而旁弯。伸出长度太短，加热区很窄，变形很困难。一般焊接碳钢的伸出长度为

$$L = (0.5 \sim 1) d$$

式中 d ——圆材为直径，方材为边长。

焊接有色金属时，伸出长度通常比焊碳钢时长。

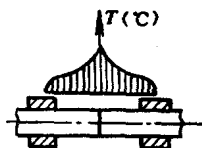


图9 电阻对焊的温度分布

如果焊接截面不相等或导电、导热性差异很大的焊件时，因加热不均衡而影响焊接质量。为了使加热均衡，常采用调节伸出长度的方法。当焊件材料一样，而截面不等时（直径相差不能超过15%，厚度相差不能超过10%），可使大截面焊件伸出长度长一些。当材料性能不同时，可使导电导热性好的材料伸出长度长一些。

焊接电流和焊接时间是影响产生电阻热的参数，二者可以互相调配，即 $I_{\text{焊}}$ 增大， $t_{\text{焊}}$ 相应减小，反之也可以。但是，如果 $I_{\text{焊}}$ 很大而 $t_{\text{焊}}$ 很短时，则易产生未焊透缺陷；而 $I_{\text{焊}}$ 很小 $t_{\text{焊}}$ 很长时，会使端面严重氧化。

焊接钢材时，焊接电流密度随着焊件截面增大而减少，焊接时间随着截面增大而加长。例如，直径从1毫米增加到5毫米时， $j_{\text{焊}}$ 从400~450安/毫米²降为80~100安/毫米²， $t_{\text{焊}}$ 从0.5秒增加到2秒。

在加热过程中，施加的压力叫做焊接压力，在锻压过程中，施加的压力叫做锻压力。焊接压力影响接触电阻值，因而影响产

生电阻热；锻压力主要影响塑性变形。当采用等压力式焊接时，对于钢， $P_{\text{锻}} = P_{\text{焊}} = 2 \sim 4$ 公斤力/毫米²，对于有色金属， $P_{\text{锻}} = P_{\text{焊}} = 1 \sim 2$ 公斤力/毫米²；当采用变压压力式时，对于钢， $P_{\text{锻}} = 1 \sim 1.5$ 公斤力/毫米²，对于有色金属 $P_{\text{锻}} = 0.1 \sim 0.8$ 公斤力/毫米²。锻压力超过焊接压力十几倍到几十倍，例如，对于合金钢 $P_{\text{锻}} = 10 \sim 15$ 公斤力/毫米²，对于铜， $P_{\text{锻}} = 30 \sim 45$ 公斤力/毫米²。

电阻对焊，常用焊件的加热缩短量来控制加热时间。焊接线材时的缩短量，对于低碳钢为 $0.5 \sim 1d$ ，铝和黄铜为 $1 \sim 2d$ ，铜为 $1.5 \sim 2.5d$ ，锻压量比加热缩短量小 $1.5 \sim 1.7$ 倍，有电锻压量约为 $0.05d$ 。

当焊接截面较大的低碳钢件时，加热缩短量与无电锻压量大体相等，缩短量与截面的关系见表 1。焊接淬火钢时，缩短量应增加 $15 \sim 20\%$ 。

表 1 焊件缩短量与截面的关系

焊件截面 (毫米 ²)	25~100	250	500~1000
加热缩短量 (毫米)	0.8~1	1.5~1.8	2~2.5

截面大于 300 毫米² 的零件，一般在保护气氛中焊接。例如，截面为 32×4 毫米的 20 号钢和铬钢管材可以在氮与氢的混合气氛中焊接，混合气体中的氧和水汽应滤净，管子端面加工成 6° 截锥形，焊接规范为： $P_{\text{焊}} = 650$ 公斤力， $P_{\text{锻}} = 4000$ 公斤力， $t_{\text{焊}} = 4$ 秒， $I_{\text{焊}} = 11000 \sim 12000$ 安，平均比功率为 0.1 千伏安/毫米²。

电阻对焊具有接头光滑，毛刺小，焊接过程简单等优点。但是，电阻对焊接头的机械性能较低，对焊件的准备工作要求高，在线材、管材、链环及截面小于 200 毫米² 低碳钢棒材的对焊中应用较多。

三 闪光对焊

闪光对焊有两种方法：连续闪光焊和预热闪光焊。预热闪光焊是在连续闪光焊之前，先进行预热。图 10 为闪光对焊原理图。

焊接时，首先把焊件 1 用夹头 2 夹紧，再接通变压器 3，然后移动可动夹头，使焊件端面轻轻接触，进行通电加热。因为这时有火花从焊件端面间喷射出来，所以叫做闪光焊。当闪光加热达到适当温度之后，骤然将可动夹头快速移动，以很大的压力使焊件端面互相挤压，

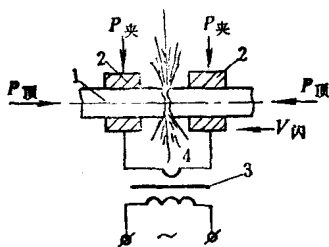


图10 闪光对焊原理图

并断开焊接电流，焊接区在压力作用下便产生塑性变形，焊成牢固的接头，这后一过程叫做顶锻。闪光加热和加压顶锻是闪光焊的主要过程。

闪光焊也是利用电阻热进行加热的，因此先介绍闪光焊的电阻。

1 闪光对焊的电阻 对闪光焊加热起作用的电阻，同样是焊件电阻和接触电阻。焊件的电阻可以按电阻对焊时计算电阻的公式来计算。

闪光焊的接触电阻是端面间液体金属的电阻，叫做闪光电阻。闪光电阻可按下面的经验公式近似计算：

$$R_{\text{闪}} = \frac{9500K}{F^{\frac{2}{3}} V_{\text{闪}}^{\frac{1}{3}} j} \quad (\text{微欧})$$

式中 K ——考虑钢材性质的系数，对于碳钢和低合金结构钢， $K = 1$ ，对奥氏体钢 $K = 1.1$ ；

- F ——焊件截面积 (厘米²);
 $V_{\text{闪}}$ ——闪光速度 (厘米/秒);
 j ——电流密度 (安/毫米²)。

和一般接触电阻比较, 闪光电阻有以下特点:

1) 闪光电阻数值较大, 钢闪光焊时, 闪光电阻通常介于 100~1500 微欧之间;

2) 闪光电阻在整个闪光过程中存在, 虽然电阻值逐渐减小, 但始终大于焊件电阻 (图 11);

3) 当顶锻开始, 闪光结束, 闪光电阻就完全消失。

由于以上特点, 所以闪光电阻对加热起主要作用, 焊件电阻产生的热量占总热量的 10~15%。只是在有电顶锻阶段, 焊件电阻才起主要作用。但是, 由于有电顶锻时间很短, 所以, 它产生的热量仍然是较少的。

2 闪光对焊过程 闪光对焊过程由预热、闪光和顶锻组成, 预热是预热闪光焊所特有的过程, 下面将逐一作个介绍。

一、闪光过程 闪光开始, 端面上只有个别点相接触 (图 12), 电流沿接触点流过, 由于接触点上电阻和电流密度都很大, 所以迅速加热熔化, 熔化金属形成联接两个端面的过梁。其形状如图 13 所示。由于过梁中部电流密度最大, 又不容易散热, 因而把金属强烈加热到沸腾温度, 使过梁内部产生蒸气, 蒸气压力将使过梁爆破。这时金属蒸气和微粒被喷射出来, 便形成火花。焊件又随着动夹头向前移动, 促使过梁不断地产生和爆破, 呈现出火花四射的闪光现象, 发出“劈啪”的爆炸声响。由此可见, 闪光过程的实质是过梁不断地产生和爆破的过程。在闪光过程

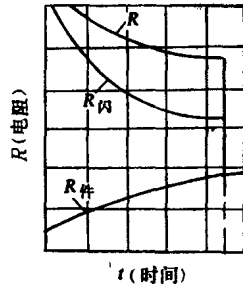


图11 闪光对焊时电阻变化