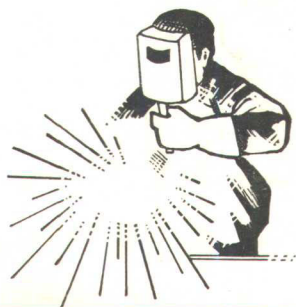
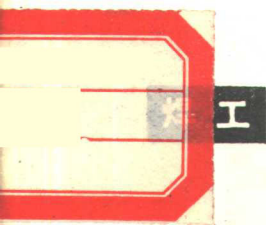


机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

怎样防止焊接应力与变形

黄国定 编著



机械工业出版社

内容提要 本书简要讲解了外力与内力、应力与应变的基本概念，着重阐明焊接应力与变形形成的原理，并通过若干典型的焊接结构实例，具体地分析了焊接应力与变形的形成以及预防、消除与矫正应力和变形的有效方法。

本书可供三级以上的焊工和冷作装配工阅读。

怎样防止焊接应力与变形

黄国定 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许可出字第 117 号）

机械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 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $2\frac{1}{2}$ · 字数 58 千字

1982 年 1 月北京第一版 · 1982 年 1 月北京第一次印刷

印数 00,001-20,500 · 定价 0.20 元

※

科技新书目：15-71

统一书号：15033 · 5245

目 次

一 焊接应力与变形的基本概念.....	1
1 外力、内力和应力(2)——2 金属在拉(压)时的机械性能(5)——3 外力去除后应力还会存在吗?——内应力的概念(10)——4 焊接应力与变形形成的过程(15)	
二 焊接结构的应力与变形.....	21
1 窄板边缘堆焊时的应力与变形(21)——2 板材对接时的应力与变形(24)——3 丁字梁焊接时的应力与变形(27)——4 工字梁焊接时的应力与变形(28)——5 定点加热、点焊和电钎焊时的应力与变形(30)——6 薄板焊接时波浪变形的形成(32)——7 焊接应力与变形对焊接结构强度的影响(34)	
三 在焊接生产过程中控制焊接应力的措施.....	40
1 采用合理的焊接次序(41)——2 预热法(41)——3 同步退火法(44)	
四 消除焊接应力的方法.....	46
1 热处理法(47)——2 低温处理消除焊接应力(48)——3 机械法(49)——4 振动法(52)	
五 控制焊接变形的措施.....	52
1 刚性固定法(53)——2 反变形法(53)——3 利用自重法(56)——4 控制焊接线能量法(56)——5 间断对称焊接法(61)——6 锤击焊缝法(61)——7 合理的装焊顺序可以防止变形(61)	
六 矫正焊接变形的的方法.....	65
1 机械矫正(65)——2 火焰矫正(66)	
七 改进焊接结构.....	74
1 合理选择焊缝型式和尺寸(74)——2 尽可能减少不必要的焊缝(75)——3 合理的安排焊缝的位置(76)	

焊接应力是人的眼睛所看不见的，对它的认识也是在实践中逐步深化的。

在第二次世界大战期间，美国一艘新建的“自由”型轮船好端端地停泊在码头上。一天清晨，突然间爆发出一声轰隆巨响，这艘新建的轮船断裂成两半，倾倒在海洋里（见图 1）。这是怎么回事，是遭到敌方潜水艇的攻击，还是遇上了暗藏的水雷？调查结果完全排除了上述的可能性，最后断定断裂的原因是在轮船本身，

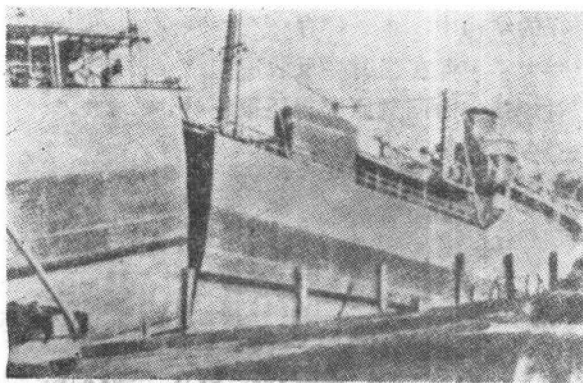


图 1 美国一“自由”型轮船断裂情况

具体地说，就是由于轮船焊缝存在的焊接应力所引起的。

美国在 1942 年 2 月至 1946 年 4 月共生产了 4694 艘“自由”型焊接货轮，其中的 970 艘共产生了 1442 条裂纹，而 127 艘的甲板则完全毁坏，船身断裂成两半。原因都出在自身的焊接应力上，特别引起人们注意的是，这类事故大多数发生在寒冷的季节——十月至三月。

1937 年比利时焊接成了一座阿尔伯特运河桥，跨度为 73 米。该桥经检验合格交付使用，仅仅只过了十四个月于 1938 年 3 月 14 日突然断塌毁坏（见图 2）。在毁坏时，没有任何车辆在桥上

行驶，只是在毁坏之前气温曾急剧降低。

上述两例，以及其它一些焊接结构自身毁坏的原因之外，当时都认为这是由于结构在焊接之后有应力之故，这应力就是所谓焊接应力。后来就得出这样的结论：使用焊接工艺要特别谨慎，对于重要的结构要禁止使用焊接工艺，最好采用铆接。这个结论显然是错误的。焊接既然如此不可靠，那为什么在当时仍有成千上万的焊接结构在严重的情况下仍安全地履行自己的职责呢？要知道在那些完好的结构中，也一样存在有焊接应力。显然焊接应力的坏作用被夸大了。但在当时要反驳那种错误的结论也是困难的，因为那时对焊接应力问题研究得还很不够。

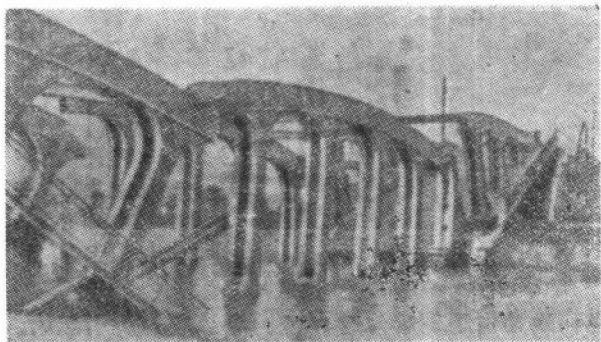


图2 阿尔伯特运河桥塌毁情况

什么叫焊接应力？焊接应力对结构强度的影响到底如何？用什么方法来消除焊接应力？下面将要叙述这些问题。

一 焊接应力与变形的基本概念

1 外力、内力和应力 各种建筑物和机器，它们的各部分

都承受着多种形式的载荷（力）。如起重机的吊绳吊起重物时，吊绳就受到拉力，拉力的大小与物体的重量相等。汽车发动机汽缸里的气体压力通过连杆传给曲轴。装在氧气瓶中的压缩气体，压着瓶壁，力图使瓶壁破裂。飞行在宇宙间的火箭处在天体引力和火箭喷射出的气体——火箭燃料燃烧的产物——形成的反作用力之间。所有上面提到的力都称之为外力。

加在物体上的外力将会在物体内部引起内力。所谓内力，就是物体内部（原子或分子）之间的作用力。研究内力要用到所谓断面法，见图3。

假如一根杆件两端都受到一个拉力 P ，那么在这个拉力作用下，杆件处于平衡状态。我们设想一个垂直于杆件轴线的平面，这平面将杆件分成上

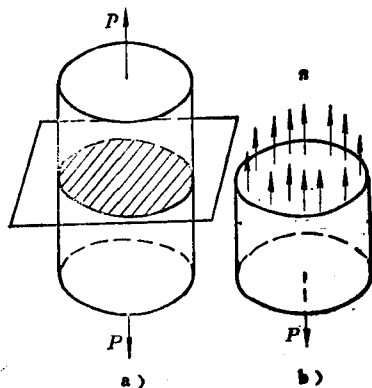


图3 断面法

下两部分；再设想拿走其中一部分，如上面这部分。那么，看看下面这部分的情况（图3b），知道它是在外力 P 和内力 n 的作用下处于平衡状态。在这种情况下，内力 n 是平均分布在断面上的。很明显，内力之和等于外力 P ，只有这样才能保持杆件的平衡。

现在再来看看下面这个例子。有三支杆件，一支为圆形截面，一支为正方形截面，另一支的截面具有不规则的形状（图4）。三支杆件各有不同的截面积 F 和承受着不同的拉伸外力 P 。

从这三支杆件来看，谁有较大的内力呢？看来应该是截面具有不规则形状的那支杆件，因为它的外力最大。果真如此吗？

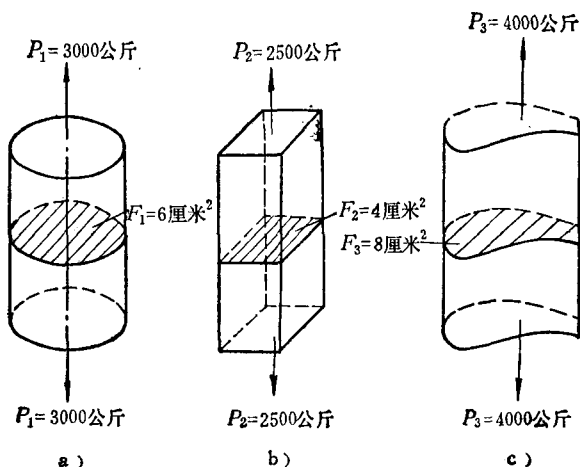


图4 承受拉伸外力的三支不同断面的杆件

为了回答上面提出的问题，应该计算出每支杆件截面上，单位面积的内力是多少。计算如下：

$$\frac{P_1}{F_1} = \frac{3000 \text{ 公斤}}{6 \text{ 厘米}^2} = 500 \text{ 公斤/厘米}^2;$$

$$\frac{P_2}{F_2} = \frac{2500 \text{ 公斤}}{4 \text{ 厘米}^2} = 625 \text{ 公斤/厘米}^2;$$

$$\frac{P_3}{F_3} = \frac{4000 \text{ 公斤}}{8 \text{ 厘米}^2} = 500 \text{ 公斤/厘米}^2。$$

计算结果表明，第二支杆件的内力最大，其值为 625 公斤/厘米²。第一支与第三支均较小，为 500 公斤/厘米²。上面计算的数值称为“应力”，换句话说，单位面积上的内力称为“应力”。

上面讲到的力，它们的方向都是垂直于杆件的断面，我们把这种内力称为正应力，用希腊字母 σ 来表示。当外力 P 与杆断面不垂直时则可以将 P 力分解成为一个正应力 σ 和一个切向应力，

切向应力用希腊字母 τ (读作“套”) 来表示, 见图 5 所示。

这样, 我们可以知道前面计算出来的结果都是正应力, 应力可用公斤/厘米²或公斤/毫米²为单位。1 平方厘米等于 100 平方毫米, 所以 1 平方毫米比 1 平方厘米小 100 倍。若用公斤/毫米²作为上面三支杆件正应力的单位, 就应将上面所得的数值除以 100, 这样就得到:

$$\sigma_1 = 5 \text{ 公斤/毫米}^2$$

$$\sigma_2 = 6.25 \text{ 公斤/毫米}^2$$

$$\sigma_3 = 5 \text{ 公斤/毫米}^2$$

在上述简单的拉伸情况下, 每一杆件的应力都均匀分布在横截面上。但是, 这种情况不是经常有的。实际上, 就是在简单的拉伸情况下, 当杆件上有一小孔或一个缺口时, 应力就不会均匀分布了; 应力将集中在小孔或缺口的四周。这种现象称为应力集中。截面的应力分布可详细地绘在图上 (图 6 b)。应力图表明了 I、II、III 各截面的应力数值。从图中我们可以看到应力集中正是发生在截面有突变处, 离突变处越远应力越小 (σ_I 和 σ_{II}), 而在无突变的断面上应力是均匀分布的 (σ_{III})。

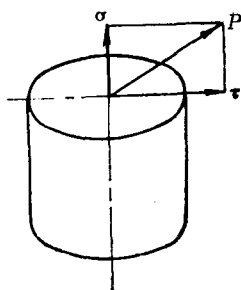


图 5 力 P 分布为正应力 σ 和切向应力 τ

2 金属在拉(压)时的机械性能 物体在外力作用下, 它的尺寸和形状将起变化, 这变化就是所谓变形。

下面具体分析金属受到外力拉伸时, 它的尺寸和外形变化的情况。我们取一截最平常的焊接对象——低碳钢加工成如图 7 的短圆棒, 然后在表面打出标距, 标距 $l = 10d$ 或 $l = 5d$, 放到材料试验机上去作拉伸试验。随着拉力 P 由零逐步增加, 标距也在

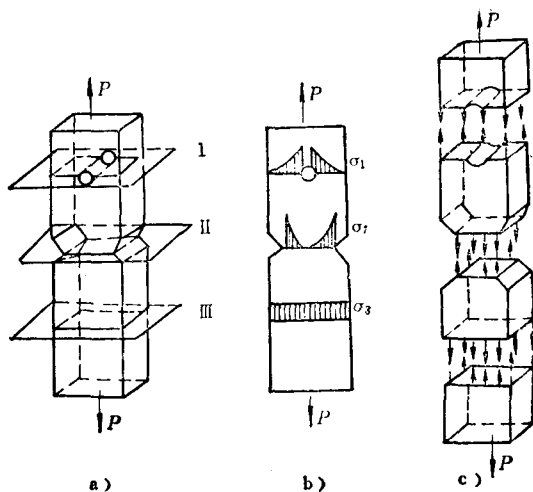


图6 小孔和缺口处的应力集中现象

逐步加大，最后达到一定拉力时试棒断裂。我们根据拉力 P 和标距的伸长值之间的关系，绘制出一条曲线图，通常称为拉伸图，如图8所示。

拉伸图反映了试件的受力与变形之间的关系。但很明显这关系与试件尺寸相关连，如试件原始直径越大，原始长度越长，则伸长值 Δl 所对应的拉力 P 值也就越大。为了消除尺寸影响反映出材料本身的性能，我们将伸长值 Δl 除以原始标距长度 l

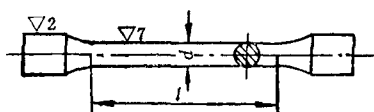


图7 拉力试样

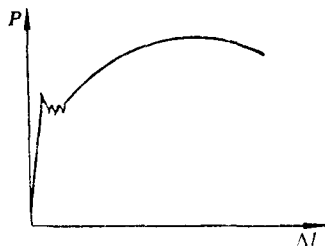


图8 低碳钢拉伸图

作为横坐标，将拉力 P 除以试件横截面面积作为纵坐标来绘制这条曲线。 Δl 和 l 的单位应该相同，如果都是厘米，那么 Δl 除以 l 就是每一厘米单位长度的伸长值，单位长度的伸长值我们称之为应变，用希腊字母 ε 表示。如果拉力 P 以公斤为单位，而面积 F 以平方厘米为单位，则 P 除以 F 就是每一平方厘米单位面积上的力，我们称它为应力，这一点我们在前面已经讲到。写成除式就是

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad \sigma = \frac{P}{F}$$

经过这样的变换，我们就画出了 $\sigma - \varepsilon$ 曲线即应力-应变曲线，如图 9。这条曲线可以分为几个阶段：

(1) 弹性阶段：这是拉伸的初级阶段，材料的应变值很微小，在这个阶段若卸去外力，应变也就消失，这种可以恢复的变形叫弹性变形。在这个阶段里应力与应变之间的关系可以按虎克定律计算。虎克定律的公式如下：

$$\sigma = E \varepsilon$$

式中 E 为弹性模量，各种材料有不同的弹性模量值。大多数钢材的弹性模量是 21000 公斤/毫米^2 ，钢的弹性模量较钢小一倍。从上式也可看出，弹性模量 E 是应力 σ 与应变 ε 之比，在弹性变形阶段，应力与应变呈正比。一定应力与一定的应变相对应。图 9 中 A 点的应力就叫做材料的弹性极限，用 σ_e 表示。弹性极限

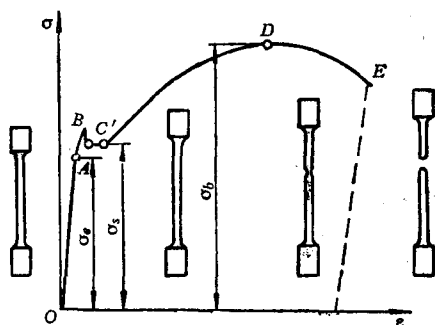


图 9 低碳钢应力-应变图

为材料只出现弹性变形的极限应力值。在工程中一般均使材料在弹性变形范围内工作。

(2) 屈服阶段：应力超过 A 点以后，材料产生塑性变形。 B 点开始曲线基本上为一条小锯齿形的水平线，表明材料在应力几乎不变的情况下，应变却在不断地大量增长，这种现象称为屈服。在屈服阶段的最低应力值(锯齿形水平线的最低点 c') 称为屈服极限，用 σ_s 表示。

(3) 强化及颈缩断裂阶段：曲线 CDE 经过屈服阶段以后，材料抵抗变形的能力有所增强，要使它继续变形就必须增加拉力，这种现象称为材料的强化。对应强化阶段最高点 D 的应力称为材料的强度极限，以 σ_b 表示。在这个阶段中试件截面尺寸逐渐变小，而到 D 点时则更显著变细，出现颈缩现象。由于颈缩处截面积急剧缩小，试件对变形的抗力不断减小，拉力 P 迅速下降，到 E 点试件断裂。

在上述的拉伸试验中，当达到屈服极限以后(在强化阶段中)若去除外力，那么材料的应力和应变关系曲线不是沿着原来上升的道路降下来回到零点，而是沿另外的路线回到一定的位置。如图 10 在 D' 点我们把外力逐渐卸掉，那么曲线将随 $D'O'$ 回降，可以看出当应力等于零时，应变并不等于零，而是保留了一个相当于 OO' 的变形。这种在外力去除后仍然保留的变形，称为塑性变形。这里还要注意一点，是不是屈服极限以后的变形只是单一的塑性变形而完全没有弹性变形了呢？不是的，它既有塑性变形也有弹性变形，只是弹性变形所占的比例很小。从图 10 中可看出， D' 对应的应变是 OO'' ，而外力去除后最后保留下来的应变只有 OO' ，那么还有一部分应变 $O'O''$ 是在外力去除后缩回去的，我们已经知道这个能恢复的变形称为弹性变形。

不同的材料有不同的应力和应变曲线。一般来说含碳量越高、

合金元素越高，其屈服极限和强度极限都比较高而塑性变形的数值比较小，也就是说塑性较差。

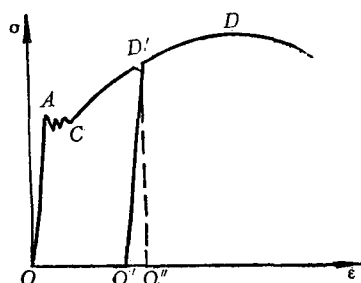


图10 逐渐卸去外力时应力-应变图的变化

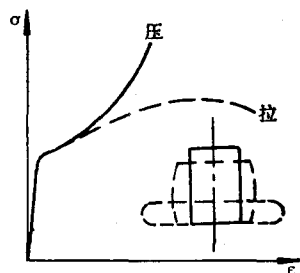


图11 低碳钢压缩时的应力-应变图

以上所讲的是在拉伸时外力与变形之间的关系，下面再谈一谈压缩时外力与变形之间的关系。

试验结果表明，低碳钢压缩时的弹性模量 E 和屈服极限 σ_s 都与拉伸时的相同。在屈服阶段以后，试件越压越扁，横截面积不断增大，所以得不到压缩时的强度极限，见图 11。

有许多构件不仅受到拉伸，同时也受到压缩。譬如置于两个支墩上的梁受到一个平行于该横截面的外力 P 时（图 12），这支梁将产生弯曲，这时在梁中心线上 P 的纤维受到压缩，其横截面上分布着压应

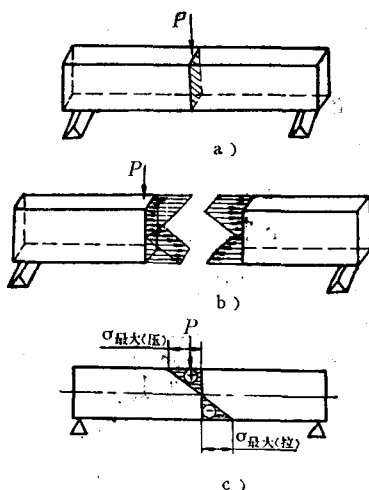


图12 梁弯曲时断面应力的分布

力（用负号表示）；而中心线以下的纤维受到拉伸，其横截面上分布着拉应力（用正号表示）；而中心线上纤维既不受拉应力也不受压应力的作用，就是说应力等于零。

事实上梁不仅在受到横向力时产生拉压应力，在外观上表现出弯曲变形，而且在受到偏离中心线的纵向拉伸或压缩时，也会产生弯曲，如图 13 所示。

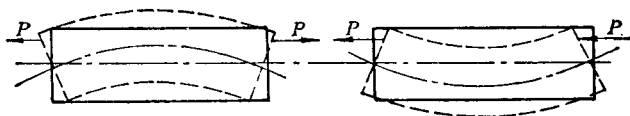


图13 偏心拉压造成的弯曲

前面我们讲到由于受力构件断面的突变会造成应力集中，也就是应力分布不均匀的现象。从上面弯曲变形的例子来看，由于力的作用在构件不同位置上也会造成同一面上应力分布不均匀以致应力方向全然相反。对这些问题要作具体分析。

3 外力去除后应力还会存在吗？——内应力的概念 现在我们已经知道有外力作用就有应力，有了应力就有应变；外力去除则弹性应变也就消失，但对于塑性变形即使外力去除了应变也还是保留下来。塑性变形是这样，那么应力又如何呢？前已述及 $\sigma = \frac{P}{F}$ ，从中可以明确知道当外力 P 等于零时，那么由外力而产生的应力 σ 亦等于零。外力去除后，是否所有的构件中均没有应力的作用了呢？如还有应力的话，则这种应力又如何产生的呢？且让我们来看看下面的例子。

假如将两块钢板用铆钉热铆起来（图 14），在热铆钉的冷却过程中，铆钉竭力缩短自己的长度（这是热胀冷缩现象，下面要

讲到)，但钢板却阻碍着铆钉的缩短，从而铆钉对钢板产生压力，钢板对铆钉产生拉力。这是一个很好的例子，它说明在没有任何外力（如铆枪的锤击力，千斤顶的撑顶的压力等等）的情况下，钢板与铆钉本身仍然存在着应力，这个在没有任何外力的情况下所存在的应力叫“内应力”，以区别前面讲的“应力”。

再来看存在于热轧型钢中的内应力的例子。经热轧后的工字钢，各部分冷却速度是不同的，由于腹板比较薄，它冷却速度比翼板快，因此这部分比较早地恢复在高温时失去的弹性，它开始变得有刚性，并阻碍连在它两端的翼板的收缩。在整个工字钢冷却之后，翼板上形成拉应力，而腹板上形成压应力。这些内应力绘在图 15 上。这些内应力不是突然产生的，而是逐渐累积的。内应力的数值随冷却速度的快慢而改变。冷却速度越快，内应力越大；反之内应力越小。为了区别温度改变过程中的内应力与完全冷却后的内应力，前者称为暂时应力；后者称为残余应力。

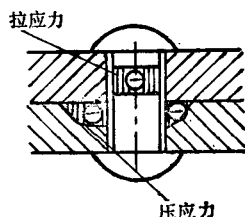


图14 钢板铆接图

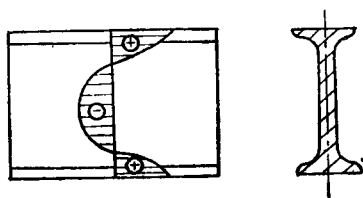


图15 工字钢的残余应力

暂时应力和残余应力不仅在铆接和热轧工艺中产生，而且还会在铸、锻、冲、热处理和金属切削加工工艺中产生。

内应力的一个重要特性是在物体的任何一个断面中，不同方向的内应力相互平衡。这也就是说在任何一个断面中，若存在拉应力就必然存在大小与其相等的压应力，反之亦然。

焊接内应力的大小和方向可以绘在图上，这就叫做“内应力

图”。看懂内应力图是很重要的，我们在后面分析焊接应力与变形时经常要用到它。为了看懂内应力图，则应该了解内应力图是怎样绘制的。

图 16 是两块平板焊接的焊接接头。我们垂直焊缝任取一个断面 $abcd$ ，在这个断面上，焊缝中部承受拉应力（参考“焊接应力与变形的形成过程”一节），离焊缝较远的两侧存在压应力。如果这钢板比较薄，就基本上存在这两个方向的应力，而且在任一与钢板平面 1 平行的平面 2、3、中，其应力状态都与平面 1 相同。因此，可用一个平面应力图（图 16 b）来代替立体应力图（图 16 a），这样简单得多。

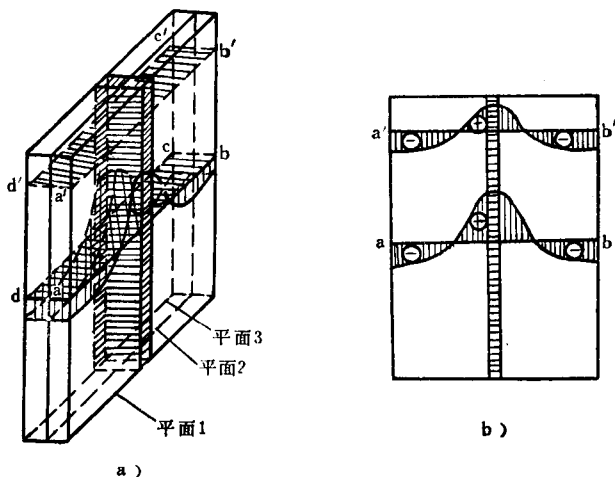


图16 平板对接纵向内应力

在平面的应力图上 ab 线实际上代表了一个平面 $abcd$ ，在这条线的一侧，绘出该平面上所存在的内应力，如在上侧绘拉应力线，下侧绘压应力线，二者方向相反，还往往在拉应力线上写一个‘ $\oplus$ ’，在压应力线上写一个‘ $\ominus$ ’，最后再把应力线端点连成一

条连续光滑的曲线,即成内应力图。内应力线的长短代表了内应力的大小,如 1 厘米代表 100 公斤/毫米²,则 1 毫米代表 10 公斤/毫米²。而内应力的实际数值是经专门仪表如电阻应变仪测得或经计算得到。这个平行于焊缝长度方向的内应力称之为纵向应力,用 σ_x 表示。实测数据表明,在低碳钢和普通低合金钢中,焊缝及其附近的 σ_x 为拉应力,一般都达到材料的屈服极限 σ_s 。拉应力区的宽度 S 主要取决于焊接线能量(何谓焊接线能量将在下面解释),线能量越大,拉应力区域就越宽。

上面提到平行平面 1、2、3 的应力状态(大小和方向)是相同的,那么平行于 $abcd$ 平面的 $a'b'c'd'$ 平面上的应力大小和方向又如何呢?实测说明,沿焊缝长度 σ_x 的分布并不均匀,接近工件的两端较低而中间较高,应力方向则是相同的——中间是拉内应力,两侧是压内应力。

再来看平行于焊缝的内应力图(图 17 a)。平行于焊缝的平面 $abcd$ 截面上,中间是拉内应力,而两头是压内应力,拉压应力是相互平衡的。同样在相互平行的平面 1、2、3 上,垂直于焊缝的应力状态都是相同的,这同样可以用一个平面应力图(图 17 b)来代替立体应力图(图 17 a)。垂直于焊缝方向的内应力称为横向应力,用 σ_y 表示。与 σ_x 相似,越远离焊缝 σ_y 值越小(图 17 b)。

现在我们已经明确内应力是与应力不同的,但常常为了简便起见,习惯把焊接后产生的残余的内应力简称为“焊接应力”,焊接内应力图简称为“焊接应力图”。

最后来解释一下什么叫“焊接线能量”,这个概念在以后要用到。

在焊接时,大家都有这样的体会,焊接电流越大,电弧电压越高,那么焊接电弧发出的热量也越高。通过计算可知,每一秒

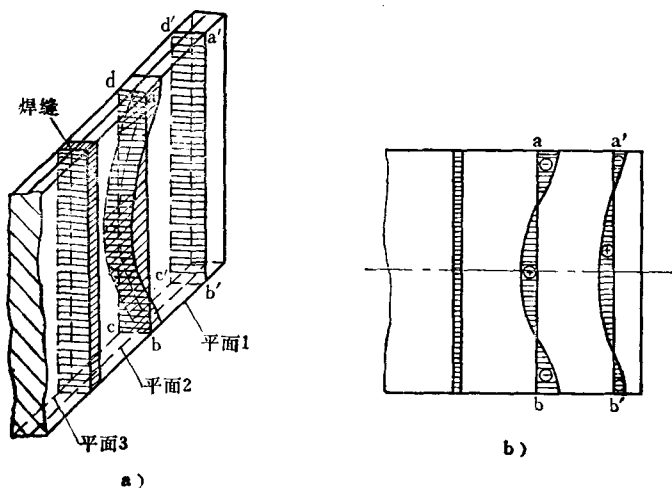


图17 平板对接横向内应力图

钟焊接电弧发出的热量与焊接电流、电弧电压有这样的关系：

$$q = 0.24 \times I \times U \text{ 卡/秒}$$

式中 q ——代表每秒钟电弧发出的热量 (卡/秒)；

I ——焊接电流 (安培)；

U ——焊接电弧电压 (伏特)。

但是，电弧发出的热量不会全部输入工件，而只是其中的一部分，对手工焊大致是 75% 的电弧热量，另外 25% 将消失在周围的介质，如空气中。输入工件的热量称为有效热量，其计算公式是：

$$q_{\text{有效}} = 0.24 \times I \times U \times \eta \text{ 卡/秒}$$

式中 η ——电弧加热工件过程中的实际有效系数。对手工焊

$$\eta = 0.75。$$

大家知道，焊接热源是移动热源（点焊、电钎焊等例外），当移动速度即焊接速度越快，则在单位长度工件上电弧输入工件