



# 焊接变形的工艺选择

錢祖尼編著 科學技術出版社

76

87

# 焊接变形的工艺选择

錢祖尼編著

科学技術出版社

## 內 容 提 要

本書介紹焊接變形的理論和一部分經驗資料，敘述焊接過程中中和冷卻後產生變形的原因，以及焊接變形的計算方法。作者從工藝的角度提出了防止和矯正變形的方法及其必要計算。這些計算都是從理論分析開始而後密切聯繫生產實踐的，因而是確定焊接工藝時的重要參考資料。

本書供設計與製造焊接結構的工程技術人員參考，也可供焊接專業在講解焊接應力和變形時作參考。

## 焊接變形的工藝選擇

編著者 錢祖尼

\*

科學技術出版社出版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可證出 073 號

上海啓智印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

\*

統一書號: 15119·613

開本 787×1092 1/32 · 印張 3 15/16 · 字數 82,000

1958年1月第1版

1958年1月第1次印刷 · 印數 1—2,300

定價: (10) 0.80 元

## 序

中国机械工程学会大连分会讓我和大連市的焊接工作者談一下焊接变形的工艺选择問題和汇报一下研究强制变形的某些初步結論,这些問題是当前焊接結構生产中十分重要的問題。現在已經結束了这一系統的学术講座,學員們要求把这些材料印出来作为日常生产中的参考,因此借此机会把它整理成这本小冊子。

焊接变形是一个十分复杂的問題,也是工艺工作上十分头痛的問題,作者虽然作了一些工字梁、箱形梁和桁架梁的研究,但是还是十分不够的;某些結論还是初步得出的,尙需进一步加以考查,因而这里提出的作者观点在使用中应注意。

为了使这本小冊子能比較系統全面起見,这里摘譯了某些資料。

为了使这本小冊子能有助于生产,某些数字在使用前应进行試驗和校正。在这里謹向参与試驗的茅佩珍同志、賀長生同志、工友王福云同志致謝,并向大連起重机器厂装配焊接第二工段(焊接車間)的全体同志致謝。

小冊子的写作虽化了一年時間,但整理時間还是仓促的,因而錯誤是难免的,希望同志們指出。

錢祖尼 于大連起重机器厂 1957 年

30.1.27

# 目 录

## 序

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 緒言                   | 1   |
| 一、焊接应力的性質和分类         | 4   |
| 二、焊接加热时机械性能和塑性的变化    | 7   |
| 三、杆件均匀加热时的应力和变形      | 10  |
| 四、沿平板边缘加热的应力和变形      | 19  |
| 五、焊接规范对变形的影响         | 31  |
| 六、总的变形的計算            | 37  |
| 七、局部变形的計算            | 51  |
| 八、焊接工艺参数的影响——防止变形的措施 | 61  |
| 九、焊接变形的矯正            | 86  |
| 十、焊接收縮余量的計算          | 97  |
| 十一、焊接应力和热裂縫和变形的关系    | 107 |
| 十二、結束語               | 119 |
| 十三、参考文献              | 121 |

## 緒 言

我国自从 1955 年一机部在哈尔滨召开了第一次焊接会议以后,在各个工业战线上,焊接已蓬勃的发展起来了,焊接事业正在大踏步前进。

电弧焊接已成为我国经济建设中不可或缺的工艺方法了。自动电弧焊已在我国国内开始普遍应用,焊接已经成为造船、机车、重型机械、起重机、锅炉、桥梁等方面制造的重要和主要方法。在我们的祖国里,已出现了大量以焊接为主的大型金属结构工厂和大型金属结构车间。哈尔滨,天津,清华,交通诸高等学校已有较大的焊接教研室(组),焊接研究所已在哈尔滨宣告成立,这都表示着我们焊接事业的大踏步前进。

目前已有很多工厂能制造优质厚涂料焊条以及自动焊接用熔剂。例如大连起重机器厂,大连机车车辆厂,鞍山金属结构制造工厂等都能制造 K-2 熔剂和 Э-42、Э-42A、Э-50A 等焊条。此外上海电焊机厂等亦能生产若干牌号的手弧焊机、仿苏 ПИИ-5 型半自动电焊机,以及仿苏 АДС-1000-2 型、УТ-1250 型的自动电弧焊接机,还有一些接触焊接机。这一些都给发展焊接工艺创造了物质基础。

此外,冶金部门亦开始为焊接生产创造条件,炼制各种焊条用和自动焊用焊丝以及炼制供焊接用的镇静钢板。

很多工厂在苏联或其他兄弟国家的帮助下,已经拥有最新

的焊接设备,如电渣焊机、自动三相焊机、自动切割机等,因而不  
少工厂已开始掌握最新技术。

但是,尽管焊接事业在国内大踏步前进,在焊接工艺上的问题,  
也就是焊后的变形问题仍未有所改变。由于焊接结构生产的发展很快,  
因而焊接变形便成为当前刻不容缓要求解决的问题了。

人所共知的,金属的焊接是一个复杂的冶金过程,因为焊接具有很多特点,首先是以下三点:

- 1) 焊接过程中的不均匀加热和冷却;
- 2) 焊接过程中存在固相和液相的转化,并且在十分短的瞬间发生;
- 3) 焊件经过加热后会有金相上的组织变化。

由于焊接具有这些特点,因而在焊后会存有残留的应力和变形。这些特点是肯定的,因而残留变形是必然会有,问题却在于用工艺的方法加以限制和利用,这就是我们要研究的问题。

在工艺角度上看,焊接变形是主要的,因而对变形的产生、确定、防止和矫正必须加以详尽的研究,但是焊接应力及热裂纹是和变形有密切联系的,因而也必须加以相应的研究。

焊接变形的计算,目前有三大学派。为了生产上切合实用,应以方便和正确相结合的原则来选择;因而以奥凯尔勃隆教授的焊接规范算法为最好。热裂纹理论虽有二大学派,但考虑到联系变形问题较好,那么以普罗霍洛夫的机械观点为主来讨论。

焊接变形的工艺选择是焊接结构制造前确定工艺方案时必须考虑的问题,因而每个工艺师都必须十分熟悉这些选择的原

則。当然,工艺师們在选择时的經濟观点必須重視,但这里却无法提到。这里我們只能介紹焊接变形选择的技术方面和工艺方面。

## 一、焊接应力的性質和分类

人們都熟知金属在焊接时会产生內应力和結構的变形，其主要原因是焊接时加热的不均匀和未加热部分的剛性所形成。

金属在集中高溫加热时，随着溫度的升高而其机械性能亦有变化。由于加热部分和不加热部分的不同膨胀，就会产生热

应力和热变形。如果热应力超过屈服点，則膨胀和收缩过程將是不可逆的，这种不可逆过程的结果，形成残留应力和残留变形，这就是焊接結構內应力和变形的基礎。

取一平板(图1)，把它分成三部分，即1-2-3，长度为 $l$ ，假定这三部分的界面上可以自由滑动。当我们在板条2上加热时，板条2要伸长 $\Delta l_2$ ，这时板条2的全长为 $l + \Delta l_2$ ，而板条1和3仍为 $l$ 。实际上板条1-2-3是不能滑动的，是不可分离的整体，因而在板条2上加热以后，全长既不是 $l + \Delta l_2$ ，也不是 $l$ ，而是 $l + \Delta l$ 。对于板条1和3則拉长了 $\Delta l$ ，而板条2則压缩了 $(\Delta l_2 - \Delta l)$ 。

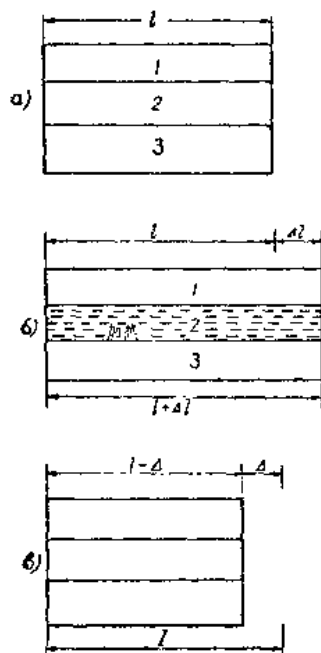


图1 平板不均匀加热的  
应力和变形

在上述情況下， $\Delta l$ 叫做可見變形或外變形。其中，板條 1 和 3  $\Delta l$  既是外變形又是內變形，而板條 2 的內變形為  $(\Delta l_2 - \Delta l)$ 。顯然，板條 1 和 3 是受拉的而板條 2 是受壓的。

由於板條之間存在着內變形，則亦存在着內應力，內應力的大小和方向決定於內變形的大小和方向。

對於板條 1 和 3，內變形為  $\Delta l$ ，則內應力為：

$$\sigma_{1,3} = -\frac{\Delta l}{l} \cdot E \text{ (拉應力)}$$

對於板條 2，內變形為  $(\Delta l_2 - \Delta l)$ ，則內應力為：

$$\sigma_2 = \frac{\Delta l_2 - \Delta l}{l} \cdot E \text{ (壓應力)}$$

如果應力  $\sigma > \sigma_s$ ，則構件會發生塑性變形，變形就成為不可逆；其實，在焊接條件下（用電弧或氣焰），由於高溫集中加熱，在受熱區始終保持  $\sigma > \sigma_s$  的，因而變形是不可逆的，也就是說，殘留應力和變形是不可避免的。

由於塑性變形的存在，上述加熱平板在冷卻後的長度不再是  $l$  而是  $(l - \Delta)$  了，也就是加熱後使板縮短了  $\Delta$ ；至於  $\Delta$  的大小將在下面加以研討。

因此，在焊接時所產生的內應力亦稱為焊接應力，焊接應力相互併存的是焊接時所產生的內變形和外變形，我們僅將外變形稱做焊接變形，這種焊接變形亦稱為殘留變形，或簡稱變形。

焊接時所產生的變形可以分為兩大類，即局部的和總的變形。所謂局部的變形是指這種變形不及於整個結構而僅發生於某一局部，例如角變形和波浪形。所謂總的變形是指焊接時產生的遍及整個結構的變形，例如撓度和扭曲。

焊接結構的变形过大会影响結構的使用，例如結構壁板的波浪形，就可能使結構在承受不大的压应力时丧失稳定性或引起附加的塑性变形。因此，在設計和制造中必須設法使結構的变形最少，这种措施將在以下各节中加以叙述。但是，由于影响焊接变形的可变条件过多，如時間、溫度、机械性能发生变化、相的变化（固相变到液相）等，这一些都使焊接变形的計算复杂化，就不能以一般的数字方法进行，而只能假定若干条件，然后进行近似計算。在苏联，曾經有过不少学者进行了变形計算的研究。如瓦洛格金，奥凱尔勃隆，尼古拉也夫等人在焊接应力和变形的研究上都有一定的理論上和实践上的貢獻。自从雷卡林建立了热計算理論以后，焊接变形的研究又有了強力的理論基础，并且奥凱尔勃隆又有了新的貢獻。

焊接时所产生的內应力，按照魏德門在1927年提出的应力分类法，可以分为三大类：

### 1) 宏观应力——第一类应力

宏观应力亦称区域应力，由于結構在某区域内进行集中加热而造成整个結構内存有的应力叫做区域应力；这种应力所形成的裂縫可以用目测发现，因而亦称宏观应力或第一类应力。在焊接时，这一类应力是主要的，又根据应力的方向性不同，第一类应力又可分为縱向的和橫向的两种。

### 2) 微觀应力——第二类应力

作用在一个或几个金属晶界上的应力叫做微觀应力，亦称第二类应力。这是由于淬火时在显微区产生的物理化学变化或体积变化而造成的。微觀应力会造成显微裂縫。低碳鋼焊接可以不考虑这种应力。

### 3) 超微观应力——第三类应力

作用在晶格之内的应力叫做超微观应力或第三类应力。这对焊接来说更为少见,但对低碳钢和高合金钢焊接时仍有产生。超微观应力会造成超显微裂缝。但是,这种应力可以借时效而消除之 ( $120^{\circ}\text{C}$ , 600 小时时效)。

我们将不对第二类应力和第三类应力进行研究,因为它们对焊接的关系不大,特别对于低碳钢来说更没有必要,因此,我们在下面只提到第一类应力。

## 二、焊接加热时机械性能和塑性的变化

在焊接时,由于对金属的加热温度很高而使机械性能起剧烈的变化,这种变化涉及到金属的热物理性(密度、线膨胀系数等)和强度特性。在焊接这样一个短的时间内,金属的变化将是:开始时金属完全是弹性的和硬的,而焊接结束时金属是塑性的了,因此在焊接结束时只要经受较小的力,金属就能变形了。如果我们忽视了加热时金属的塑性变化过程,那么,一切计算将会不正确了。

因而,对于钢从弹性到塑性之间随温度而变的强度特性必须予以阐明。

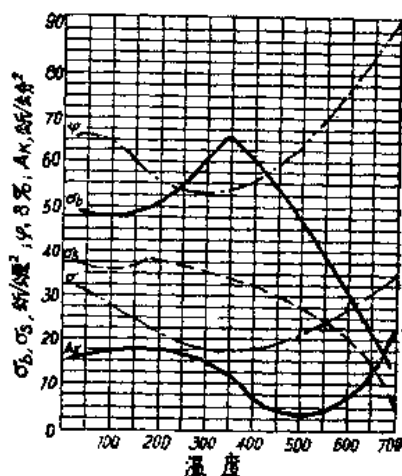


图 2

图2是由CT-3或CT-4鋼用 $\Phi$ -50A焊条焊接后的极限强度 $\sigma_b$ , 屈服点 $\sigma_s$ , 冲击值 $A_k$ , 延伸率 $\delta$ 和断面收缩率 $\varphi$ 等与温度的

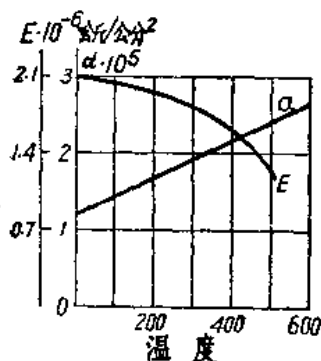


图3

的关系。对于其他牌号結構鋼亦具有类似的性質。

鋼的彈性系数 $E$ 在500~600°C时几乎变化到零值(见图3), 而线膨胀系数 $\alpha$ 则随温度升高而升高(见图3), 由于 $E$ 的降低和 $\alpha$ 的升高, 对于低碳鋼說来在500°C以下时,  $E \cdot \alpha$ 的乘积却近乎不变, 則

$$E \cdot \alpha = \text{const} = 2.1 \times 10^6 \times 1.2 \times 10^{-5} \approx 25 \text{ 公斤/公分}^2$$

由于鋼的塑性随着温度升高而急剧降低, 因而在开始加热时, 試样的断面收缩率有不大的降低后, 当温度超过250~300°C时迅速上升。

在温度250~300°C时, 金属的可变形性能大大降低, 在这种情况下会引起藍脆, 因此, 焊缝在冷却到100~300°C时会形成溫裂縫。

随着温度的升高, 金属的塑性大大提高, 在温度700~800°C或更高时, 金属具有更大的塑性, 此时金属可以进行压力加工即軋制、锻造、冲压等。

鋼的主要特性之一是加热时极限强度 $\sigma_b$ 和屈服点 $\sigma_s$ 的变化。

对于低碳鋼來說, 屈服点 $\sigma_s$ 随着温度的升高而比較均匀地下降。当温度为700°C时, 其屈服点約为原来的10%。

大部分的鋼，在  $300^{\circ}\text{C}$  以下时强度极限不变，当温度超过  $300^{\circ}\text{C}$  时，强度极限下降，到  $700^{\circ}\text{C}$  时其强度极限会低达原来大小的  $10\sim 15\%$ 。

这样，可以認為大部分結構鋼在加热到  $550\sim 600^{\circ}\text{C}$  时尚保持彈性和坚硬性，在加热到更高温度时，鋼就软化，并且就是在很小的外力作用下也会变形。

为了简化計算，很多学者对屈伏点的变化作了不同的假定。其中以瓦洛格金和奥凱尔勃隆两人的假定为最适用。

两人認為在  $600^{\circ}\text{C}$  时屈伏点可以認為零值，在零度时瓦洛格金取  $\sigma_s = 2,400$  公斤/平方公分，并認為屈伏点和温度的变化沿抛物綫进行，见图 4 曲綫 3；奥凱尔勃隆認為  $500^{\circ}\text{C}$  以下可認為屈伏点不变，取  $\sigma_s = 2,200$  公斤/平方公分，而  $500\sim 600^{\circ}\text{C}$  間呈直綫下降（如图 4 曲綫 2）。曲綫 1 是实际变化曲綫。

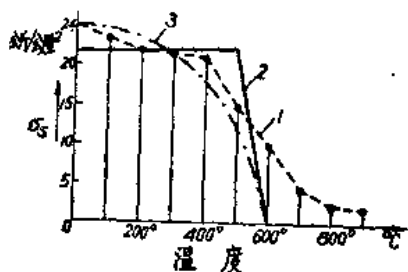


图 4

根据瓦洛格金的方法，任何温度  $T$  下的屈伏点

$$\sigma_s^T = 2,400 - \frac{T^2}{150} \text{ 公斤/公分}^2$$

根据奥凱尔勃隆的方法

$$T \leq 500^{\circ} \quad \sigma_s^T = 2,200 \text{ 公斤/公分}^2$$

$$500 < T < 600^{\circ} \quad \sigma_s^T = 22(600 - T) \text{ 公斤/公分}^2$$

$$T \geq 600^{\circ} \quad \sigma_s^T = 0.$$

### 三、杆件均匀加热时的应力和变形

前面已经提到一个平板由于集中的不均匀加热，那么平板会产生残留的应力和变形。如果是一个杆件，那么我们在杆件上加热时可以认为沿杆件断面是均匀加热的，因而杆件加热时的应力和变形和平板有所不同，下面将杆件在不同紧固情况下受热后所产生的应力和变形加以分析。

#### 1) 自由状态下的杆件加热

杆件具有直径  $d_0$ ，长度  $l_0$ ，原始温度  $T_0$ ，体积  $V_0$ ；我们假定杆件并无热交换的存在，当杆件完全处于自由状态时进行加热和冷却。如果杆件经过加热和冷却这一热循环以后，其几何形状变为  $d'_0$ ， $l'_0$ ， $V'_0$ ；则由于温度  $T$  升高的变化见下表所示

| 比较项目 | 加 热 前 | 加 热 $T^{\circ}\text{C}$ 时 | 冷 却 后        |
|------|-------|---------------------------|--------------|
| 温 度  | $T_0$ | $T_T = T_0 + T$           | $T_0$        |
| 长 度  | $l_0$ | $l_T = l_0(1 + \alpha T)$ | $l'_0 = l_0$ |
| 直 径  | $d_0$ | $d_T = d_0(1 + \alpha T)$ | $d'_0 = d_0$ |
| 体 积  | $V_0$ | $V_T = V_0(1 + \beta T)$  | $V'_0 = V_0$ |

表中的线膨胀系数  $\alpha$  和体积膨胀系数  $\beta$  采用常数，但这并不妨害上表中的结果，当精确计算时， $\alpha$  和  $\beta$  都应该取温度  $T$  的函数。

由此可见，杆件在自由状态下均匀加热时不引起任何残留应力和变形，并且只要在固态下，不受温度的限制。

#### 2) 杆件两端在加热时膨胀受阻的情况

上述的杆件,其几何尺寸为 $d_0$ ,  $l_0$ 和 $V_0$ 时,自温度 $T_0$ 加热到 $(T+T_0)$ ,如果在加热膨胀过程中,杆件的两端为固定壁所限制;但是,在冷却时收缩却不受限制,这种杆件加热情况就大大不同于上面所述自由状态的情况,关于两端有固定壁限制的杆件均匀加热时的应力和变形见图5所示。

在温度升高时,杆件将伸长,其热伸长量 $\lambda = \alpha T$ ,假定 $\alpha$ 不变,则 $\lambda = \alpha T$ 是一条直线。 $\Delta$ 为可见变形——缩短(系相对缩短之简称,下同)。

然而由于两端受固定壁的限制,杆件要伸长是不可能的,那么开始加热时起,在杆件中就产生压缩弹性变形(图5中的0—1线),并且在杆件中存在有压应力。其值可由虎克定律求得之。

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \alpha T E$$

前面已经说过 $E \cdot \alpha = \text{const} = 25 \text{ 公斤/公分}^2$

$$\therefore \sigma = 25 T \text{ 公斤/公分}^2$$

由此可见 $\sigma-T$ 亦是直线关系。在图5的下部的0—1线便是

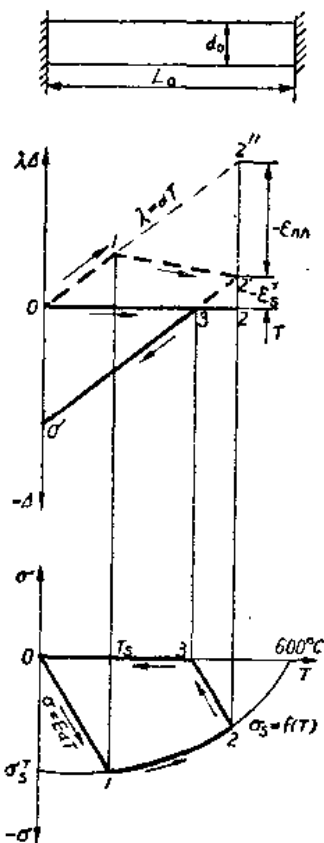


图5 两端有固定壁限制的杆件均匀加热时的应力和变形

表示这一点的。当加热到  $T_1$  时, 压缩应力增长到该温度时的屈服点  $\sigma_s^T$  (点 1), 其相应的应变以  $\varepsilon_s^T$  表示之。

对于低碳钢来说, 在常温下的屈服点实际上为 2,400~2,500 公斤/平方公分, 当杆件处于绝对刚性时,  $T_1$  可由下式计算之:

$$T_1 = \frac{\sigma_s}{E\alpha} = \frac{2,400 \sim 2,500}{2.1 \times 10^6 \times 1.2 \times 10^{-5}} \approx 100^\circ\text{C}$$

换言之, 当杆件处于绝对刚性时, 温度升高  $100^\circ\text{C}$ , 杆件就失掉弹性了。

当温度超过  $T_1$  继续升高时, 杆件将产生塑性变形, 这时就不再沿直线 0—1 上升, 而是沿曲线 1—2' 和曲线 1—2 (下部) 变化了, 曲线 1—2' 系在直线 0~2'' 和 0—2 之间, 曲线 1—2' 系在各该温度下相应于屈服点的应变  $\varepsilon_s$  值。

当温度超过  $T_1$  时, 杆内的应力将保持在各该温度的屈服点上, 当然, 屈服点是随着温度上升而减少的 (见上节), 此时, 屈服点是温度  $T$  的函数  $\sigma_s^T = f(T)$ , 随着温度的升高, 屈服点即按此曲线均匀地变化 (见图 5 的应力图)。

在加热到  $T_2$  时, 杆的体积应变大, 但长度由于二端的限制而不变, 即  $l_T = l_0$ , 因而直径就变大, 并且比自由状态时的大。

当温度到达  $T_2$  时停止加热, 因而其温度开始下降。随着冷却, 杆的体积变小, 长度亦缩短, 相应地杆内的压缩应力亦减小, 一直减小到弹性范围内 (线 2—3)。压缩应力的减少是呈直线形的。2—3 线还平行于 0—1 线 ( $\sigma = E\alpha T$ ), 在点 3 应力和变形均为零值, 但此时尚未全部冷却。因而在继续冷却时将使杆件缩短。但并无内应力产生 (线 3—0)。当温度降到原始温度  $T_0$  时, 杆件长度较原来为短, 杆件将有残留变形。但是经过热循环