

焊接结构

第一讲 焊接应力与变形

一、焊接应力与变形的产生

1. 焊接应力与变形的基本知识

1.1 变形

物体在外力或温度等因素的作用下，其形状和尺寸发生变化，这种变化称为物体的变形。当使物体产生变形的外力或其他因素去除后变形也随之消失，物体可以恢复原状，这样的变形称为弹性变形；当外力或其他因素去除后变形仍然存在，物体不能恢复原状，这样的变形称为塑性变形。物体的变形还可以按照拘束条件在非自由变形中，又有外观变形和内部变形两种。

以一根金属杆的变形为例，当温度为 T_0 时，其长度为 L_0 ，均匀加热，温度上升到 T 时，如果金属杆不受阻，杆的长度会增加到 L ，其长度的改变 $\Delta L_T = L - L_0$ ， ΔL_T 就是自由变形，见图 1a。如果金属杆的伸长受阻，则变形量不能完全表现出来，这就是非自由变形。其中，把能表现出来的这部分变形称为外观变形，用 ΔL_e 表示；而未表现出来的变形称为内部变形，用 ΔL 表示。在数值上， $\Delta L = \Delta L_T - \Delta L_e$ ，见图 1b。

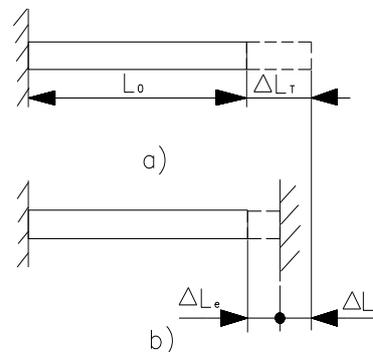


图 1 金属杆的变形

1.2 应力

物体受外力作用后所导致物体内部之间的相互作用力称为内力。另外，在物理、化

学或物理化学变化过程中，如温度、金相组织或化学成分等变化时，在物体内部也会产生内力。

作用在物体单位面积上的内力叫做应力。

根据引起内力原因的不同，可将应力分为工作应力和内应力。工作应力是由外力作用于物体而引起的应力；内应力是由物体的化学成分、金相组织及温度等因素变化，造成物体内部的不均匀性变形而引起的应力。内应力存在于许多工程结构中，如铆接结构、铸造结构、焊接结构等。焊接应力就是一种内应力。

1.3 焊接应力与焊接变形

焊接应力就是焊接过程中及焊接过程结束后，存在于焊件中的内应力。由焊接而引起的焊件尺寸的改变称为焊接变形。

2.焊接应力与变形产生的原因

产生焊接应力与变形的因素很多，其中最根本的原因是焊件受热不均匀，其次是由于焊缝金属的收缩、金相组织的变化及焊件的刚度不同所致。另外，焊缝在焊接结构中的位置、装配焊接顺序、焊接方法、焊接电流及焊接方向等对焊接应力与变形也有一定的影响。

(1) 焊件的不均匀受热

金属的焊接是一个局部的加热过程，焊件上的温度分布极不均匀，为了便于了解不均匀受热时应力与变形的产生，下面对金属在不同条件下产生的应力与变形进行讨论。

1) 不受约束的杆件在均匀加热时的应力与变形 根据前面对变形知识的讨论，不受约束的杆件在均匀加热与冷却时，其变形属于自由变形，因此在杆件加热过程中不会产生任何内应力，冷却后也不会有任何残余应力和残余变形。

2) 受约束的杆件在均匀加热时的应力与变形 根据前面对非自由变形情况的讨论，

受约束杆件的变形属于非自由变形，既存在外观变形，也存在内部变形。

如果加热温度较低 ($T < T_s$)，材料处于弹性范围内，则在加热过程中杆件的变形全部为弹性变形，杆件内部存在压应力的作用。当温度恢复到原始温度时，杆件收缩到原来的长度，压应力全部消失，既不存在残余变形也不存在残余应力。我们把压应力达到屈服点 σ_s 时的温度称为屈服点温度 T_s 。

如果加热温度较高，达到或超过材料屈服点温度时 ($T \geq T_s$)，则杆件中产生压缩塑性变形，内部变形由弹性变形和塑性变形两部分组成，甚至全部由塑性变形组成 ($T > 600^\circ\text{C}$)。当温度恢复到原始温度时，弹性变形恢复，塑性变形不可恢复，可能出现以下三种情况：

- ① 如果杆件能充分自由收缩，那么杆件中只出现残余变形而无残余应力；
- ② 如果杆件受绝对约束，那么杆件中没有残余变形而存在较大的残余应力；
- ③ 如果杆件收缩不充分，那么杆件中既有残余应力又有残余变形。

实际生产中的焊件，就与上述的第三种情况相同，焊后既有焊接应力存在，又有焊接变形产生。

3) 长板条中心加热 (类似于堆焊) 引起的应力与变形 如图 2a 所示的长度 L_0 ，厚度为 t 的长板条，材料为低碳钢，在其中间沿长度方向上进行加热。为简化讨论，我们将板条上的温度

也均匀一致。

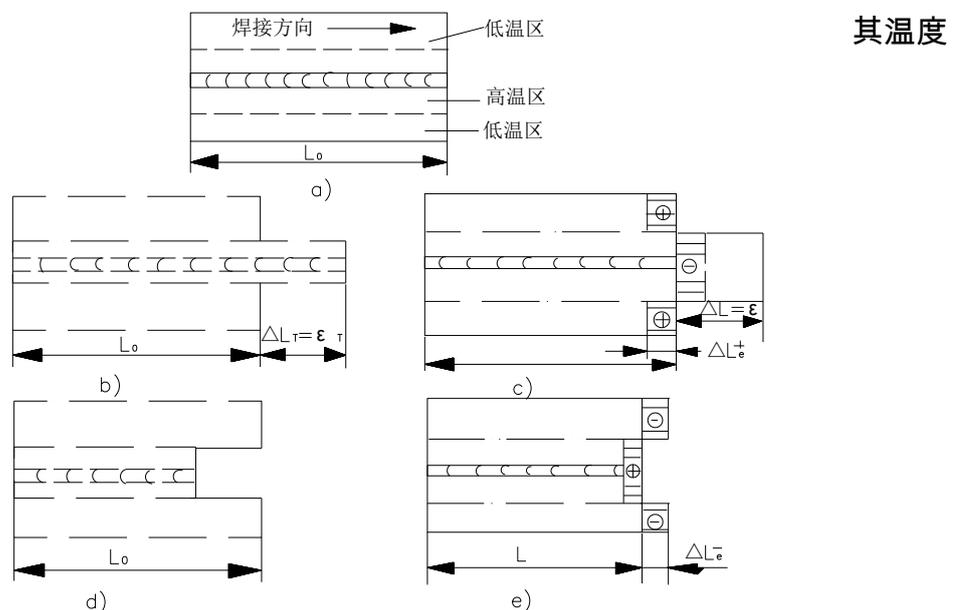


图 2 钢板条中心加热和冷却时的应力与变形

加热时，如果板条的高温区与低温区是可以分离的，高温区将伸长，低温区不变，如图 2b 所示，但实际上板条是一个整体，所以板条将整体伸长，此时高温区内产生较大的压缩塑性变形和压缩弹性变形，如图 2c 所示。

冷却时，由于压缩塑性变形不可恢复。所以，如果高温区与低温区是可以分离的，高温区应缩短，低温区应恢复原长，如图 2d 所示。但实际上板条是一个整体，所以板条将整体缩短，这就是板条的残余变形，如图 2e 所示。同时在板条内部也产生了残余应力，中间高温区为拉应力，两侧低温区为压应力。

4) 长板条一侧加热 (相当于板边堆焊) 引起的应力与变形 如图 3a 所示的材质均匀的钢板，在其上边缘快速加热。假设钢板由许多不相连的窄条组成，则各窄条在加热时将按温度高低而伸长，如图 3b 所示。但实际上，板条是一个整体，各板条之间是相互牵连、互相影响的，上一部分金属因受下一部分金属的阻碍作用而不能自由伸长，因此产生了压缩塑性变形。由于钢板上的温度分布自上而下逐渐降低，因此，钢板产生了向下的弯曲变形，如图 3c 所示。

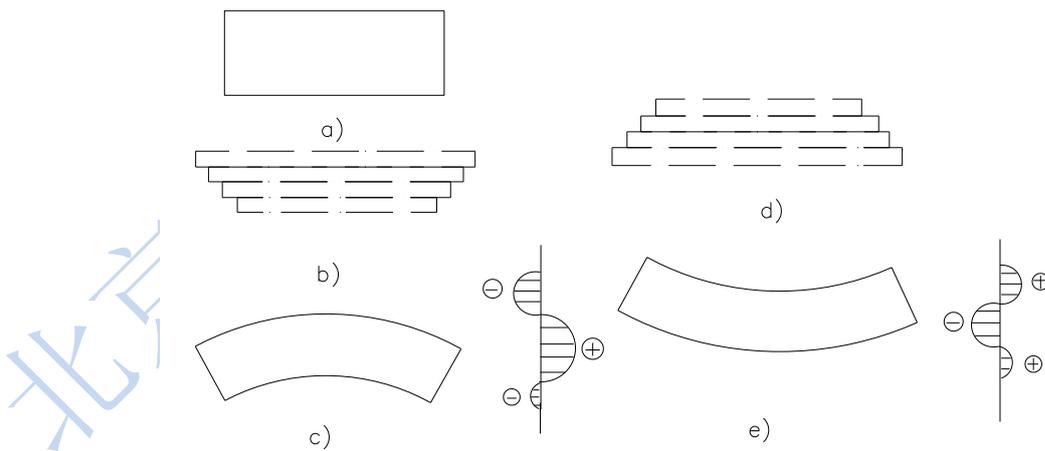


图 3 钢板边缘一侧加热和冷却的应力与变形

a) 原始状态 b) 假设各板条的伸长 c) 加热后的变形

钢板冷却后，各板条的收缩应如图 3d 所示。但实际上钢板是一个整体，上一部分金属因受下一部分金属的阻碍作用而不能自由收缩，所以钢板产生了与加热时相反的残余

弯曲变形，如图 3e 所示。同时在钢板内产生了如图 3e 所示的残余应力，即钢板中部为压应力，钢板两侧为拉应力。

由上述讨论可知：

① 对构件进行不均匀加热，在加热过程中，只要温度高于材料屈服点温度，构件就会产生压缩塑性变形，冷却后，构件必然有残余应力和残余变形。

② 通常，焊接过程中焊件的变形方向与焊后焊件的变形方向相反。

③ 焊接加热时，焊缝及其附近区域将产生压缩塑性变形，冷却时压缩塑性变形区要收缩。如果这种收缩能充分进行，则焊接残余变形大，焊接残余应力小；若这种收缩不能充分进行，则焊接残余变形小而焊接残余应力大。

④ 焊接过程中及焊接结束后，焊件中的应力分布都是不均匀的。焊接结束后，焊缝及其附近区域的残余应力通常是拉应力。

(2) 焊缝金属的收缩

当焊缝金属冷却、由液态转为固态时，其体积要收缩。由于焊缝金属与母材是紧密联系的，因此，焊缝金属并不能自由收缩。这将引起整个焊件的变形，同时在焊缝中引起残余应力。另外，一条焊缝是逐步形成的，焊缝中先结晶的部分要阻止后结晶部分的收缩，由此也会产生焊接应力与应变。

(3) 金属组织的变化

钢在加热及冷却过程中发生相变可得到不同的组织，这些组织的比体积不一样，由此也会产生焊接应力与变形。

(4) 焊件的刚性和拘束

焊件的刚性和拘束对焊接应力和变形也有较大的影响。刚性是指焊件抵抗变形的能力；而拘束是焊件周围物体对焊件的约束。刚性是焊件本身的性能，它与焊件材质、焊件截面形状和尺寸等有关；而拘束是一种外部条件。焊件自身的刚性及受周围的约束程

度越大，焊接变形越小，焊接应力越大；反之，焊件自身的刚性及受周围的约束长度越小，则焊接变形越大，而焊接应力越小。

二、焊接残余应力

1. 焊接残余应力的分类

1.1 按应力在焊件内的空间位置分为

(1) 一维空间应力 即单向(或单轴)应力。应力沿焊件一个方向作用。

(2) 二维空间应力 即双向(或双轴)应力。应力在一个平面内不同方向上作用，常用平面直角坐标表示，如 σ_x 、 σ_y 。

(3) 三维空间应力 即三向(或三轴)应力。应力在空间所有方向上作用，常用三维空间直角坐标表示，如 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 。

厚板焊接时出现的应力是三向的。随着板厚减小，沿厚度方向的应力(习惯指 σ_z)相对较小，可将其忽略而看成双向应力 σ_x 、 σ_y 。薄长板条对接焊时，也因垂直焊缝方向的应力 σ_y 较小而忽略，主要考虑平行于焊缝轴线方向的纵向应力 σ_x 。

1.2 按应力产生的原因分为

(1) 热应力 它是在焊接过程中，焊件内部温度有差异引起的应力，故又称温差应力。热应力是引起热裂纹的力学原因之一。

(2) 相变应力 它是焊接过程中，局部金属发生相变，其比体积增大或减小而引起的应力。

(3) 塑变应力 是指金属局部发生拉伸或压缩塑性变形后引起的内应力。对金属进行剪切、弯曲、切削、冲压、锻造等冷加工时常产生这种内应力。焊接过程中，在近缝高温区的金属热胀和冷缩受阻时便产生塑性变形，从而引起焊接的内应力。

2. 焊接残余应力的分布

在厚度不大(小于 20mm)的焊接结构中，残余应力基本纵、横双向的，厚度方向

的残余应力很小，可以忽略。只有在大厚度的焊接结构中，厚度方向的残余应力才有较高的数值。因此，这里将重点讨论纵向残余应力和横向残余应力的分布情况。

2.1 纵向残余应力 σ_x 的分布

作用方向平行于焊缝轴线的残余应力称为纵向残余应力。

在焊接结构中，焊缝及其附近区域的纵向残余应力为拉应力，一般可达到材料的屈服点，随着离焊缝距离的增加，拉应力急剧下降并转为压应力。宽度相等的两板对接时，其纵向残余应力在焊缝横截面上的分布情况如图 4 所示。图 5 为板边堆焊时，其纵向残余应力 σ_x 在焊缝横截面上的分布。两块板对接时的情况。

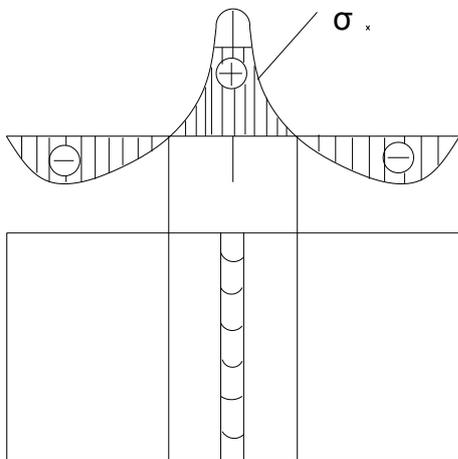


图 4 对接接头纵向残余应力在焊缝横截面上的分布情况

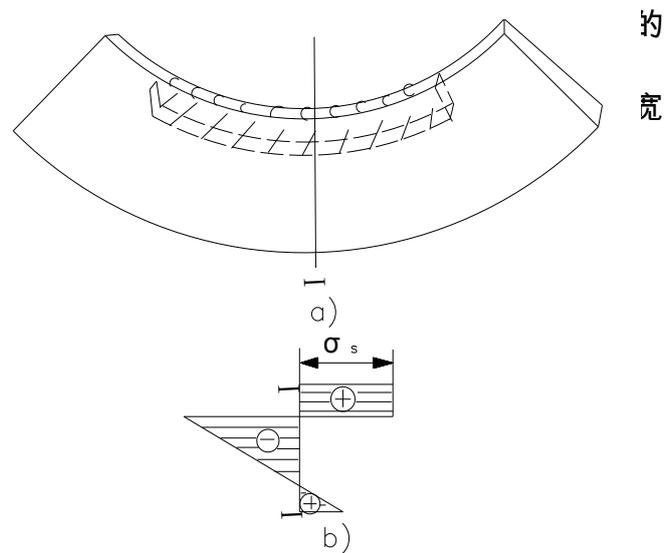


图 5 板边堆焊时的纵向

2.2 横向残余应力的分布

垂直焊缝轴线的残余应力称为横向残余应力。

横向残余应力 σ_y 的产生原因比较复杂，我们将其分成两个部分加以讨论：一部分是由焊缝及其附近塑性变形区的纵向收缩引起的横向残余应力，用 σ_y' 表示；另一部分是

由焊缝及其塑性变形区的横向收缩的不均匀和不同时性所引起的横向残余应力，用 σ_y' 表示。

(1) 焊缝及其附近塑性变形区的纵向收缩引起的横向残余应力 σ_y' 由两块平板条对接而成的构件，如果假想沿焊缝中心将构件一分为二，即两块板条都相当于板边堆焊，将出现弯曲变形，要使两板条恢复到原来位置，必须在焊缝中部加上横向拉应力，在焊缝两端加上横向压应力。由此可以推断，焊缝及其附近塑性变形区的纵向收缩引起的横向残余应力，其两端为压应力，中间为拉应力。各种长度的平板条对接焊，其 σ_y' 的分布规律基本相同，但焊缝越长，中间部分的拉应力就越低。

(2) 横向收缩所引起的横向残余应力 σ_y'' 在焊接结构上的一条焊缝不可能同时完成，总有先焊和后焊之分，先焊的部分先冷却，后焊的部分后冷却。先冷却的部分又限制后冷却部分的横向收缩，这就引起了 σ_y'' 。 σ_y'' 的分布与焊接方向、分段方法及焊接顺序等有关。如果将一条焊缝分两段焊接，当从中间向两端焊时，中间部分先焊先收缩，两端部分后焊后收缩，则两端部分的横向收缩受到中间部分的限制，因此 σ_y'' 的分布是中间部分为压应力，两端部分为拉应力；相反，如果从两端向中间部分焊接时，中间部分为拉应力，两端部分为压应力。

3. 焊接残余应力对焊接结构的影响

3.1 对焊接结构强度的影响

当材料处于脆性状态时，拉伸内应力和外载引起的拉应力叠加有可能使局部区域的应力首先达到断裂强度，导致结构早期破坏。曾有许多低碳钢和低合金结构钢的焊接结构发生过低应力脆断事故，经大量试验研究表明：在工作温度低于材料脆性临界温度的条件下，拉伸内应力和严重应力集中的共同作用，将降低结构的静载强度，使之在远远低于屈服点的外应力作用下就发生脆性断裂。因此，焊接残余应力的存在将明显降低脆性材料结构的静载强度。

3.2 对构件加工尺寸精度的影响

焊件上的内应力在机械加工时，因一部分金属从焊件上被切除而破坏了它原来的平衡状态，于是内应力重新分布以达到新的平衡，同时产生了变形，使加工精度受到影响，

3.3 对受压杆件稳定性的影响

当外载引起的压应力与内应力中的压应力叠加后达到 σ_s 时，则这一部分截面就丧失了进一步承受外载的能力，于是削弱了杆件的有效截面，使压杆的失稳临界应力 σ_{cr} 下降，对压杆稳定性有不利的影响。压杆内应力对稳定性的影响与压杆的截面形状和内应力分布有关，若能使有效截面远离压杆的中性轴，可以改善其稳定性。

焊接残余应力除了对上述的结构强度、加工尺寸精度以及对结构稳定性的影响外，还对结构的刚度、疲劳强度及应力腐蚀开裂有不同程度的影响。因此，必须设法在焊接过程中减小焊接残余应力。

4. 减小焊接残余应力的措施

减小焊接残余应力，即在焊接结构制造过程中采取一些适当的措施减小焊接残余应力。一般来说，可以从设计和工艺两方面着手：设计结构时，在不影响结构使用性能的前提下，应尽量考虑采用能减小和改善焊接应力的设计方案；另外，在制造过程中还要采取一些必要的工艺措施，以使焊接应力减小到最低程度。

4.1 设计措施

4.2 工艺措施

(1) 采用合理的装配焊接顺序和方向 所谓合理的装配焊接顺序就是能使每条焊缝尽可能自由收缩的焊接顺序。具体应注意以下几点：

在一个平面上的焊缝，焊接时应保证焊缝的纵向和横向收缩均能比较自由，如图 6

所示的拼板焊接，合理
直通长焊缝。

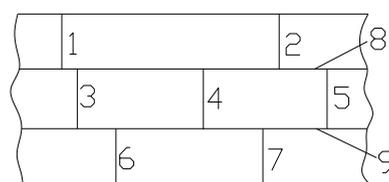


图 6 拼接焊缝合理的装配焊接顺序

收缩量最大的焊缝应先焊。

工作时受力最大的焊缝应先焊。

焊接平面交叉焊缝时，再焊缝的交叉点易产生较大的焊接残余应力。

(2) 预热法 预热法就是在施焊前，预先将焊件局部或整体加热到 $150 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 。

对于焊接或补焊那些淬硬倾向较大的材料的焊件，以及刚度较大或脆性材料焊件时，常常采用预热法。

(3) 降低焊缝的拘束度 平板上镶板的封闭焊缝焊接时拘束度大，焊后焊缝纵向和横向拉应力都很大，极易产生裂纹。为了降低残余应力，应设法减小该封闭焊缝的拘束度。

(4) 加热“减应区”法 焊接时加热那些阻碍焊接区自由收缩的部位（称“减应区”），使之与焊接区同时膨胀和同时收缩，起到减小焊接残余应力的作用，此方法在铸铁焊补中应用最多，也最有效。此方法成败的关键在于正确选择加热部位。选择的原理是：只加热阻碍焊接区膨胀或收缩的部位。检验加热部位是否正确的方法是：用气焊焊炬在所选处试加热一下，若待焊处的缝隙是张开的，则表示选择正确。

5. 消除焊接残余应力的方法

虽然在结构设计时考虑了焊接残余应力的问题，在工艺上也采取了一定的措施来防止或减小焊接残余应力，但由于焊接应力的复杂性，结构焊接完成后仍然可能存在较大的焊接残余应力。另外，有些焊接结构在装配过程中还可能产生新的残余应力，这些残余应力及装配应力都会影响结构的使用性能。焊后是否需要消除残余应力，通常由设计部门根据钢材的性能、板厚、结构的制造及使用条件等多种因素综合考虑后决定。在下列情况中一般应考虑消除内应力：

1) 在运输、安装、起动和运行中可能遇到低温，有发生脆性断裂危险的厚截面焊接结构。

2) 厚度超过一定限度的焊接压力容器。

例如，GB150-1998《钢制压力容器》规定，碳素钢厚度大于 32mm，16MnR 钢厚度大于 30mm，16MnVR 钢厚度大于 28mm 的焊接容器，焊后应进行热处理。

3) 焊后机械加工量较大，不消除残余应力难以保证加工精度的结构。

4) 对尺寸稳定性要求较高的结构。如精密仪器、机床床身、减速箱箱体等。

5) 有应力腐蚀危险的结构。

常用消除采用应力的方法有：

5.1 热处理法

热处理法是利用材料在高温下屈服点下降和蠕变现象来达到松弛焊接残余应力的目的，同时热处理还可改善焊接接头的性能。生产中常用的热处理法有整体热处理和局部热处理两种。

(1) 整体热处理 是将整个构件缓慢加热到一定的温度（低碳钢为 650℃），并在该温度下保温一定时间（一般按每毫米板厚保温 2~4min，但总时间不少于 30min），然后空冷或随炉冷却。整体热处理消除焊接残余应力的效果取决于加热温度、保温时间、加热和冷却速度、加热方法和加热范围。一般可消除 60%~90% 的焊接残余应力，在生产中应用比较广泛。

(2) 局部热处理 对于某些不允许或不可能进行整体热处理的焊接结构，可采用局部热处理。局部热处理就是将构件焊缝周围局部应力很大的区域及其周围，缓慢加热到一定温度后保温，然后缓慢冷却。其消除应力的效果不如整体热处理，它只能降低焊接残余应力峰值，不能完全消除焊接残余应力。对于一些大型筒形容器的组装环缝和一些重要管道等，常采用局部热处理来降低结构的焊接残余应力。

5.2 机械拉伸法

机械拉伸法是采用不同方式在构件上施加一定的拉应力，使焊缝及其附近产生拉伸

塑性变形，与焊接时在焊缝及其附近所产生的压缩塑性变形相互抵销一部分，达到松弛焊接残余应力的目的。实践证明，拉伸载荷加得越高，压缩塑性变形量就抵销得越多，残余应力消除得越彻底。在压力容器制造的最后阶段，通常要进行水压试验，其目的之一也是利用加载来消除部分残余应力。

5.3 温差拉伸法

温差拉伸法的基本原理与机械拉伸法相同，其不同点是机械拉伸法采用外力进行拉伸，而温差拉伸法是采用局部加热形成的温差来拉伸压缩塑性变形区。如图 1-28 为温差拉伸法示意图，在焊缝两侧各用一适当宽度（一般为 100~150mm）的氧乙炔火焰喷嘴加热焊件，使焊件表面加热到 200℃左右，在喷嘴后面一定距离用水管喷头冷却，以造成两侧温度高、焊缝区温度低的温度场，两侧金属的热膨胀对中间温度较低的焊缝区进行拉伸，产生拉伸塑性变形抵消焊接时所产生的压缩塑性变形，从而达到消除焊接残余应力的目的。如果加热温度和加热范围选择适当，消除焊接残余应力的效果可达 50%~70%。

5.4 锤击焊缝

在焊后用锤子或一定直径的半球形风锤锤击焊缝，可使焊缝金属产生延伸变形，能抵消一部分压缩塑性变形，起到减小焊接残余应力的作用。锤击时应注意施力适度，以免施力过大而产生裂纹。

5.5 振动法

振动法又称振动时效或振动消除应力法（VSR）。它是利用由偏心轮和变速电动机组成的激振器，使结构发生共振所产生的循环应力来降低内应力。其效果取决于激振器、焊件支点位置、激振频率和时间。振动法所用设备简单、价廉，节省能源，处理费用低，时间短（从数分钟到几十分钟），也没有高温回火时的金属表面氧化等文的。故目前在焊件、铸件、锻件中，为了提高尺寸稳定性多采用此方法。

三、焊接变形

1. 焊接变形的种类及其影响因素

焊接变形分为局部变形和整体变形；按照变形的外观形态来分，可将焊接变形分为五种基本变形形式：收缩变形、角变形、弯曲变形、波浪变形和扭曲变形。

1.1 收缩变形

焊件尺寸比焊前缩短的现象称为收缩变形。它分为纵向收缩变形和横向收缩变形。

(1) 纵向收缩变形 纵向收缩变形即沿焊缝轴线方向尺寸的缩短。这是由于焊缝及其附近区域在焊剂高温的作用下产生纵向的压缩缩性变形，焊后这个区域要收缩，便引起了焊件的纵向收缩变形。

纵向收缩变形量取决于焊缝长度、焊件的截面积、材料的弹性模量、压缩缩性变形区的面积以及压缩缩性变形率等。焊件的截面积越大，焊件的纵向收缩量越小。焊缝的长度越长，焊件的纵向收缩量越大。从这个角度考虑，在受力不大的焊接结构内，采用间断焊缝代替连续焊缝，是减小焊件纵向收缩变形的有效措施。

压缩缩性变形量与焊接方法、焊接参数、焊接顺序以及母材的热物理性质有关，其中以热输入影响最大。在一般情况下，压缩缩性变形量与热输入成正比。对截面相同的焊缝，采用多层焊引起的纵向收缩量比单层焊小，分的层数越多，每层的热输入越小，纵向收缩量就越小。

焊件的原始温度对焊件的纵向收缩也有影响。一般来说，焊件的原始温度提高，相当于热输入增大，焊后纵向收缩量增大。

焊件材料的线膨胀系数对纵向收缩量也有一定的影响，线膨胀系数大的材料，焊后纵向收缩量大，如不锈钢和铝比碳素钢焊件的收缩量大。

(2) 横向收缩变形 横向收缩变形系指沿垂直于焊缝轴线方向尺寸的缩短。构件

焊接时，不仅产生纵向收缩变形，同时也产生横向收缩变形 Δy 。产生横向收缩变形的过程比较复杂，影响因素很多，如热输入、装配间隙、板厚、焊接方法以及焊件的刚性等，其中以热输入、装配间隙、接头形式等的影响最为明显。

不管何种接头形式、其横向收缩变形量总是随焊接热输入增大而增加。装配间隙对横向收缩变形量的影响也较大，且情况复杂。一般说来，随着装配间隙的增大，横向收缩也增加。

横向收缩量沿焊缝长度方向分布不均匀，因为一条焊缝是逐步形成的，先焊的焊缝冷却收缩对后焊的焊缝有一定挤压作用，使后焊的焊缝横向收缩量更大。一般地，焊缝的横向收缩沿焊接方向是由小到大，逐渐增大到一定程度后便趋于稳定。由于这个原因，生产中常将一条焊缝的两端头间隙取不同值，后半部分比前半部分要大 1~3mm。

横向收缩的大小还与装配后定位焊和装夹情况有关，定位焊缝越长，装夹的拘束程度越大，横向收缩变形量越小。

对接接头的横向收缩量是随焊缝金属量的增加而增大的；角焊缝的横向收缩要比堆积焊缝的横向收缩小得多。同样的焊缝尺寸，板越厚，横向收缩变形越小。

1.2 角变形

中厚板对接焊、堆焊、搭接焊及 T 形接头焊接时，都可能产生角变形，角变形产生的根本原因是由于焊缝的横向收缩沿板厚分布不均匀所致。焊缝接头形式不同，其角变形的特点也不同。

角变形的大小与焊接热输入、板厚等因素有关，当然也与焊件的刚度有关。当热输入一定时，板厚越大，厚度方向上的温差越大，角变形越大。但当板厚增大到一定程度，此时构件的刚度增大，抵抗变形的能力增大，角变形反而减小。另外，板厚一定，热输入增大，压缩塑性变形量增大，角变形也增加。但热输入增大到一定程度，堆焊面与背面的温差减小，角变形反而减小。

对接接头角变形主要与坡口形式、坡口角度、焊接方式等有关。坡口截面不对称的焊缝，其角变形大，因而用 X 形坡口代替 V 形坡口，有利于减小角变形；坡口角度越大，焊缝横向收缩沿板厚分布越不均匀，角变形越大。同样板厚和坡口形式下，多层焊比单层焊角变形大，焊接层数越多，角变形越大。多层多道比多层焊角变形大。

1.3 弯曲变形

弯曲变形是由于焊缝的中心线与结构截面的中性轴不重合或不对称，焊缝的收缩沿构件宽度方向分布不均匀而引起的。弯曲变形分两种：焊缝纵向收缩引起的弯曲变形和焊缝横向收缩引起的弯曲变形。

(1) 纵向收缩引起的弯曲变形

弯曲变形（挠度）的大小与焊缝在结构中的偏心距 S 及假想偏心力 F_p 成正比，与焊件的刚度 EI 成反比。而假想偏心力又与压缩塑性变形区有关，凡影响压缩塑性变形区的因素均影响偏心力 F_p 的大小。偏心距 S 越大，弯曲变形越严重。焊缝位置对称或接近于截面中心轴，则弯曲变形就比较小。

(2) 横向收缩引起的弯曲变形 焊缝的横向收缩在结构上分布不对称时，也会引起构件的弯曲变形。如工字梁上布置若干短肋板，由于肋板与腹板及肋板与上翼板的角焊缝均分布于结构中心轴的上部，它们的横向收缩将引起工字梁的下挠变形。

1.4 波浪变形

波浪变形常发生于板厚小于 6mm 的薄板焊接结构中，又称之为失稳变形。大面积平板拼接，如船体甲板、大型油罐罐底板等，极易产生波浪变形。

防止波浪变形可从两方面着手：一是降低焊接残余压应力。如采用能使塑性变形区小的焊接方法，选用较小的焊接热输入等；二是提高焊件失稳临界应力。如给焊件增加肋板，适当增加焊件的厚度等。

焊接角变形也可能产生类似的波浪变形。采用大量肋板的结构，每块肋板的角焊缝

引起的角变形，连贯起来就造成波浪变形。这种波浪变形与失稳的波浪变形有本质的区别，要有不同的解决办法。

1.5 扭曲变形

产生扭曲变形的原因主要是焊缝的角变形沿焊缝长度方向分布不均匀。

以上五种变形是焊接变形的基本形式，在这五种基本形式中，最基本的是收缩变形，收缩变形再加上不同的影响因素，就构成了其他四种基本变形形式。焊接结构的变形对焊接结构生产有极大的影响。因此，在实际生产中，必须设法控制焊接变形，使焊接变形控制在技术要求所允许的范围内。

2. 控制焊接变形的措施

从焊接结构的设计开始，就应考虑控制焊接变形可能采取的措施。进入生产阶段，可采用预防焊接变形的措施，以及在焊接过程中适当的工艺措施。

2.1 设计措施

2.2 工艺措施

(1) 留余量法

此方法就是在下料时，将零件的长度或宽度尺寸比设计尺寸适当加大，以补偿焊件的收缩。余量的多少可根据公式并结合生产经验来确定。留余量法主要是用于防止焊件的收缩变形。

(2) 反变形法

此方法就是根据焊件的变形规律，焊前预先将焊件向着与焊接变形的相反方向进行人为的变形（反变形量与焊接变形量相等），使之达到抵消焊接变形的目的。此方法很有效，但必须准确地估计焊后可能产生的变形方向和大小，并根据焊件的结构特点和生产条件灵活地运用。

反变形法主要用于控制角变形和弯曲变形。

(3) 刚性固定法

采用适当的方法来增加焊件的刚度或拘束度，可以达到减小其变形的目的，这就是刚性固定法。常用的刚性固定法有以下几种：

1) 将焊件固定在刚性平台上。薄板焊接时，可将其用定位焊缝固定在刚性平台上，并且用压铁压住焊缝附近，可避免薄板焊接时产生波浪变形。

2) 将焊件组合成刚度更大或对称的结构。如 T 形梁焊接时容易产生角变形和弯曲变形，将两根 T 形梁组合在一起，使焊缝对称于结构截面的中性轴，同时大大地增加了结构的刚度，并配合反变形法（如图中所示采用垫铁），采用合理的焊接顺序，对防止弯曲变形和角变形有利。

3) 利用焊接夹具增加结构的刚度和拘束。

4) 利用临时支撑增加结构的拘束。单件生产中采用专用夹具，在经济上不合理。因此，可在容易发生变形的部位焊上一些临时支撑或拉杆，增加局部的刚度，能有效地减小焊接变形。

(4) 选择合理的装配焊接顺序

为了控制和减小焊接变形，装配焊接顺序应按以下原则进行。

1) 大型而且复杂的焊接结构，只要条件允许，把它分成若干个结构简单的部件，单独进行焊接，然后再总装成整体。这种“化整为零，集零为整”的装配焊接方案，其优点是：部件尺寸和刚度已减小，利用胎夹具克服变形的可能性增加；交叉对称施焊要求焊件翻转与变位变得容易；更重要的是，可以把影响总体结构变形最大的焊缝分散到部件中焊接，把它的不利影响减小或清除。

2) 正在施焊的焊缝应尽量靠近结构截面的中性轴。

3) 对于焊缝非对称布置的结构，装配焊接时应先焊焊缝少的一侧。

4) 焊缝对称布置的结构，应由偶数个焊工对称地施焊。

5) 长焊缝 (1m 以上) 焊接时, 可采用一定的方向和顺序焊接, 以减小其焊后的收缩变形。

(5) 合理地选择焊接方法和焊接参数

各种焊接方法的热输入不同, 因而产生的变形也不一样。能量集中和热输入较低的焊接方法, 可有效地降低焊接变形。用 CO₂ 气体保护焊焊接中厚板的变形比用气焊和焊条电弧焊小得多, 更薄的板可以采用钨极脉冲氩弧焊、激光焊等方法焊接。电子束焊的焊缝很窄, 变形极小, 适宜焊接一般经精加工的焊件, 焊后仍具有较高的精度。

(6) 热平衡法 对于某些焊缝不对称布置的结构, 焊后往往会产生弯曲变形。如果在与焊缝对称的位置上采用气体火焰与焊接同步加热, 只要加热的工艺参数选择适当, 就可以减小或防止构件的弯曲变形。

(7) 散热法 散热法就是利用各种方法将施焊处的热量迅速散走, 减小焊缝及其附近的受热区, 同时还使受热区的受热程度大大降低, 达到减小焊接变形的目的。图 7a 是水浸法散热

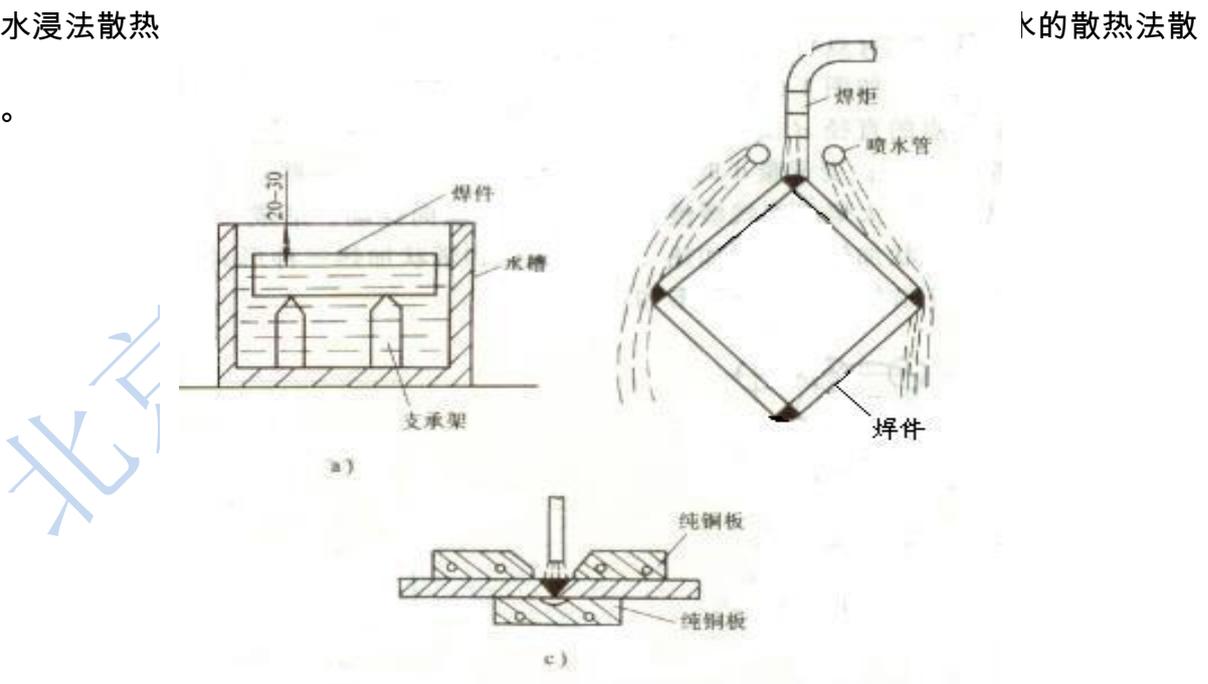


图 7 散热法示意图

a) 水浸法散热 b) 喷水法散热 c) 散热垫法散热

3. 矫正焊接变形的的方法

在焊接结构生产中，首先应采取各种措施来防止和控制焊接变形。但焊接变形是难以避免的，因为影响焊接变形的因素太多，生产中无法面面俱到。当焊接结构中的残余变形超出技术要求的允许范围时，就必须对焊件的变形进行矫正。常用的矫正焊接变形的的方法有：

3.1 手工矫正法

手工矫正法就是利用锤子、大锤等工具锤击焊件的变形处。主要用于矫正一些小型简单焊件的弯曲变形和薄板的波浪变形。

3.2 机械矫正法

机械矫正法就是利用机器或工具来矫正焊接变形。具体地说，就是用千斤顶、拉紧器、压力机等将焊件顶直或压平，如图 8 所示。机械矫正法一般使用于塑性比较好的材料及形状简单的焊件。

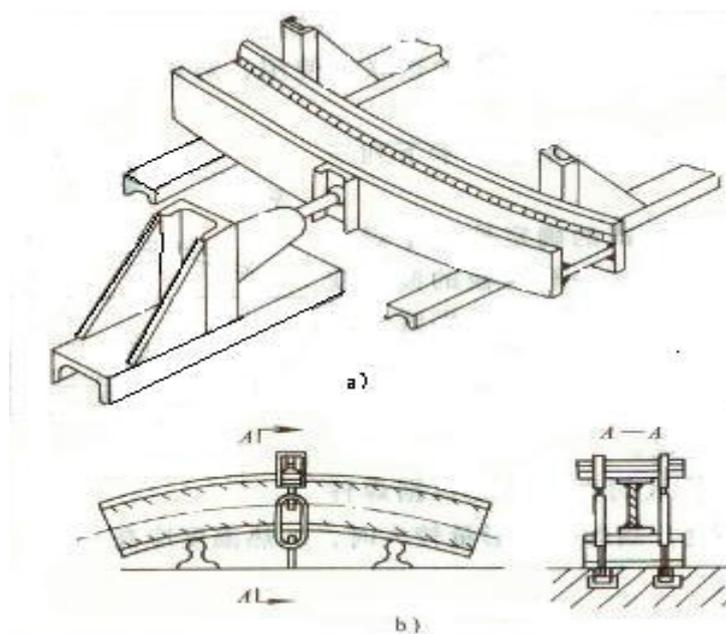


图 8 机械矫正法示例

3.3 火焰加热矫正法

火焰加热矫正法就是利用火焰对焊件进行局部加热，使焊件产生新的变形去抵消焊

接变形。火焰加热矫正法在生产中应用广泛，主要用于矫正弯曲变形、角变形、波浪变形等，也可用于矫正扭曲变形。

火焰加热的方式有点状加热、线状加热和三角形加热。

(1) 点状加热 如图 9 所示，加热点的数目应根据焊件的结构形式和变形的情况而定。对于厚板，加热点的直径 d 应大些；薄板的加热点直径 d 应小些。变形量大时，加热点之间的距离 a 应小些；变形量小时，加热点之间距离 a 应大一些。

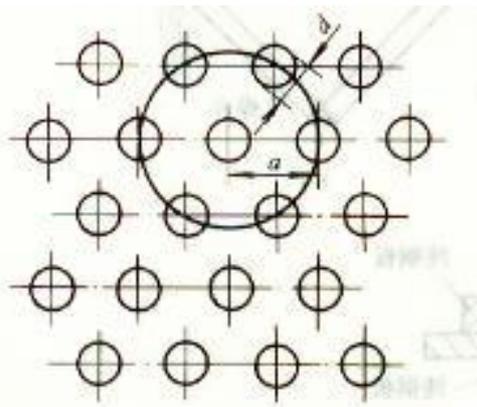


图 9 点状加热

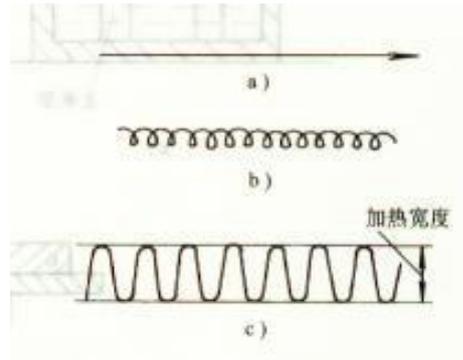


图 10 线状加热

a) 直通加热 b) 链状加热 c) 带状加热

(2) 线状加热 火焰沿直线缓慢移动或同时作横向摆动，形成一个加热带的加热方式，称为线状加热。线状加热有直通加热、链状加热和带状加热三种形式，如图 10 所示。线状加热可用于矫正波浪变形、角变形和弯曲变形等。

(3) 三角形加热 三角形加热即加热区域呈三角形，一般用于矫正刚度大、厚度较大的结构的弯曲变形。加热时，三角形的底边应在被矫正结构的拱边上，顶端朝焊件的弯曲方向，如图 11 所示。三角形加热与线状加热联合使用，对矫正大而厚焊件的焊接变形效果更佳。

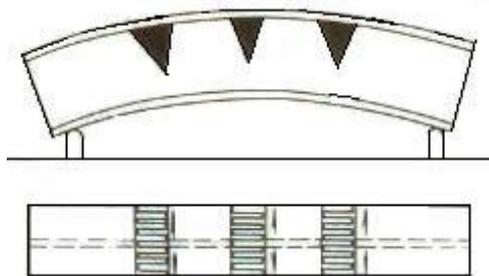


图 1-11 工字梁弯曲变形的火焰矫正

火焰加热矫正焊接变形的效果取决于下列三个因素：

1) 加热方式 加热方式的确定取决于焊件的结构形式和焊接变形形式，一般薄板的波浪变形应采用点状加热；焊件的角变形可采用线状加热；弯曲变形多采用三角形加热。

2) 加热位置 加热位置的选择应根据焊接变形的形式和变形方向而定。

3) 加热温度和加热面积 应根据焊件的变形量及焊件材质确定，当焊件变形量较大时，加热温度应高一些，加热区的面积应大一些。

第二讲 焊接接头静载强度计算

一、工作焊缝和联系焊缝

在焊接结构中，焊接接头主要起到两方面的作用：第一是连接作用，即把被焊工件连接成一个整体；第二是传力作用，即传递被焊工件所承受的载荷。焊缝与被焊工件并联的接头，焊缝传递很小的载荷，焊缝一旦断裂，结构不会立即失效，这种接头叫做联系接头，它的焊缝被称为联系焊缝；焊缝与被焊工件串联的接头，焊缝传递全部载荷，焊缝一旦断裂，结构就会立即失效，这种接头叫做工作（承载）接头，它的焊缝被称为工作（承载）焊缝。此外，还有双重性的接头，其焊缝既起连接作用又起传力作用，这种焊缝叫做双重性焊缝。这三类接头的典型例子如图1所示。联系焊缝所承受的应力称为联系应力；工作焊缝所承受的应力称为工作应力；具有双重性的焊缝，它既有联系应力又有工作应力。设计时，联系焊缝无需计算焊缝强度，而工作焊缝必须进行强度计算，对于双重性接头只计算焊缝的工作应力，而不考虑联系应力。

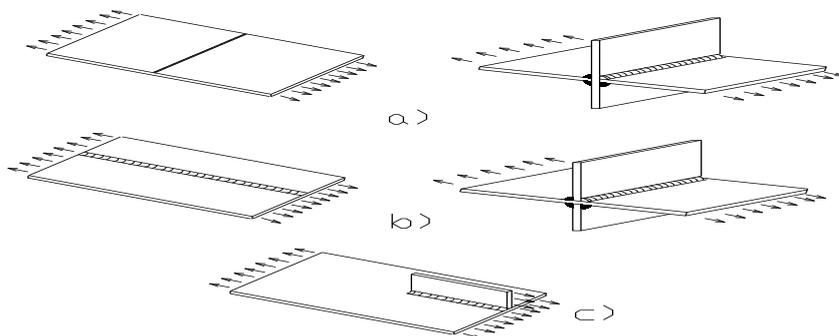


图 1 按作用分类的三种焊接接头

a) 工作 (承载) 接头 b) 联系接头 c) 双重性接头

二、焊接接头强度计算的假设

焊接接头的强度计算和其他结构的强度计算相同，均需要计算在一定荷载作用下产生的应力值。但是焊接接头的应力分布，尤其是角焊缝构成的 T 型接头和搭接接头等的应力非常复杂，精确计算接头的强度是困难的，常用的计算方法都是在一些假设的前提下进行的，称之为简化计算。在静载条件下为了计算方便常作如下假设：

- 1) 残余应力对接头强度没有影响；
- 2) 焊趾处和余高处的应力集中对接头的强度没有影响；
- 3) 接头的工作应力是均布的，以平均应力计算；
- 4) 正面角焊缝与侧面角焊缝的强度没有差别；
- 5) 焊脚尺寸的大小对角焊缝的强度没有影响。
- 6) 角焊缝都是在切应力的作用下被破坏，故按切应力计算强度；
- 7) 角焊缝的破断面 (计算断面) 在角焊缝截面的最小高度上，其值等于内接三角形

高 a ，见图 2， a 称为计算高度，直角等腰角

焊缝的计算高度：

$$a = K / \sqrt{2} \approx 0.7K$$

8) 余高和少量的熔深对接头的强度没有影响，但是，在采用熔深较大的埋弧焊和 CO_2 气体保护焊时，应予以考虑，见图 2。角焊缝计算

断面高度 a 为：

$$a = (K + p) \cos 45^\circ$$

当 $K \leq 8\text{mm}$ 时，可取 $a = K$ ；当 $K > 8\text{mm}$ 时，可取

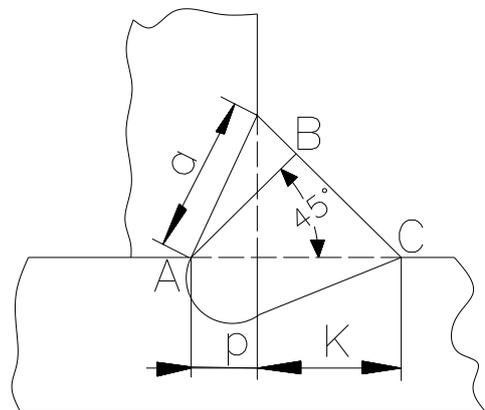


图 2 深熔焊的角焊缝

$\rho=3\text{mm}$ 。

三、电弧焊接头的静载强度计算

静载强度计算方法目前仍然采用许用应力法，而接头的强度计算实际上是计算焊缝的强度。因此，强度计算时的许用应力值均为焊缝的许用应力。

电弧焊接头静载强度计算的一般表达式为：

$$\sigma \leq [\sigma'] \text{ 或 } \tau \leq [\tau']$$

式中， σ 、 τ 为平均工作应力； $[\sigma']$ 、 $[\tau']$ 为焊缝的许用应力。

1. 对接接头的静载强度计算

计算对接接头的强度时，可不考虑焊缝余高，所以计算基本金属强度的公式完全适用于计算这种接头。焊缝计算长度取实际长度，计算厚度取两板中较薄者。如果焊缝金属的许用应力与基本金属相等，则可不进行强度计算。

全部焊透的对接接头的各种受力情况见图 3。图中 F 为接头所受的拉（或压）力， F_s 为切力， M_1 为平面内弯矩， M_2 为垂直平面的弯矩。

对接接头在各种受力情况下的静载强度计算公式如下：

(1) 受拉或受压对接接头的静载强度计算

1) 受拉时：

$$\sigma_t = F/L\delta_1 \leq [\sigma'_t]$$

2) 受压时：

$$\sigma_p = F/L\delta_1 \leq [\sigma'_p]$$

式中 σ_t 、 σ_p —— 接头受拉或受压时焊缝中所承

受的工作应力 (MPa)；

F —— 接头所受的拉力或压力 (N)；

L —— 焊缝长度 (mm)；

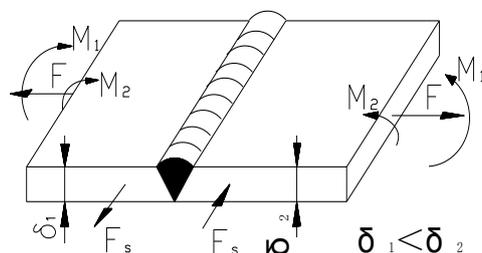


图 3 对接接头受力情况

δ_1 ——接头中较薄板的厚度 (mm) ;

$[\sigma'_{t}]$ ——焊缝受拉或受弯时的许用应力 (MPa) ;

$[\sigma'_{p}]$ ——焊缝受压时的许用应力 (MPa) 。

(2) 受剪切对接接头的静载强度计算

$$\tau = F_s / L \delta_1 \leq [\tau']$$

式中 F_s ——接头所受的切力 (N) ;

L ——焊缝长度 (mm) ;

δ_1 ——接头中较薄板的厚度 (mm) ;

τ ——接头焊缝中所承受的切应力 (MPa) ;

$[\tau']$ ——焊缝许用切应力 (MPa) 。

(3) 受弯矩对接接头的静载强度计算

1) 受平面内弯矩 M_1 :

$$\sigma = 6M_1 / \delta_1 L^2 \leq [\sigma'_{t}]$$

2) 受垂直板面弯矩 M_2 :

$$\sigma = 6M_2 / \delta_1^2 L \leq [\sigma'_{t}]$$

式中 M_1 ——板平面内弯矩 (N·mm) ;

M_2 ——垂直板面弯矩 (N·mm) ;

L ——焊缝长度 (mm) ;

δ_1 ——接头中较薄板的厚度 (mm) ;

$[\sigma'_{t}]$ ——焊缝受拉或受弯时的许用应力 (MPa) 。

四、焊缝许用应力

焊缝许用应力的大小与许多因素有关，它不但与焊接工艺及材料有关，而且也与焊接检验方法的精确程度密切相关。

随着焊接技术的不断发展，以及焊接检验方法的日益改进，焊接接头的可靠性不断提高，焊缝的许用应力也相应增大。确定焊缝的许用应力有两种方法。

第一种方法，按基本金属的许用应力乘以一个系数，确定焊缝的许用应力。这个系数主要是根据所用焊接方法和焊接材料而确定的。若用一般焊条和手工焊成的焊缝，应采用较低的系数，用低氢型焊条或机械化焊焊成的焊缝，采用较高的系数，见表 1。

表 1 焊缝金属的许用应力

焊缝种类	应力状态	焊缝许用应力	
		一般 420MPa 及 490MPa 级 焊条的焊条电弧焊	低氢型焊条的焊条电弧焊、 自动焊和半自动焊
对接焊缝	拉应力	0.9 [σ]	[σ]
	压应力	[σ]	[σ]
	切应力	0.6 [σ]	0.65 [σ]
角焊缝	切应力	0.6 [σ]	0.65 [σ]

注：1. [σ] 为基本金属的拉伸许用应力。

2. 适用于低碳钢及 490MPa 级以下的低合金高强度结构钢。

第二种方法，采用已经规定的具体数值，这种方法多为某类产品行业所用。为了本行业的方便和技术上的统一，常根据产品的特点、工作条件、所用材料、工艺过程和质量检验方法等，制定出相应的焊缝许用应力的具体数值，见表 2。

表 2 焊缝金属的许用应力

(单位：MPa)

焊缝种类	应力种类	符号	机械化焊、手工焊和 用 E43 型焊条电弧焊	机械化焊、手工焊和 用 E50 型焊条电弧焊	
			构件的钢号		
			Q215 钢	Q235 钢	Q345 钢

			第一组	第二、三组	第一组	第二、三组	第一组	第二组	第三组	
对接 焊缝	抗 压	$[\sigma_p]$	152	136	166.5	152	235	226	210	
	抗 拉	机械化焊或用精确方法 检查手工焊的焊缝质量	$[\sigma_t']$	152	136	166.5	152	235	226	210
		用普通方法检查 手工焊的焊缝质量	$[\sigma_t']$	127	117.5	142	127	201	191	181
	抗 剪		$[\tau']$	93	83	98	93	142	136	127
角 焊缝	抗拉、抗压、抗剪		$[\tau']$	107	107	117.5	117.5	166.5	166.5	166.5

注：1. 钢材按其尺寸分组，见表3。

2. 检查焊缝的普通方法系指外观检查、测量尺寸、钻孔检查等；精确方法是在普通方法的基础上，用射线或超声波进行补充检查。

表3 钢材的分组尺寸 (单位：mm)

组 别	钢材的钢号			
	Q215 钢或 Q235 钢			Q345 钢
	钢棒的直径或厚度	型钢或异型钢的厚度	钢板的厚度	钢材的直径或厚度
第一组	≤40 > 40 ~ 100	≤15		≤16
第二组		> 15 ~ 20	4 ~ 20	17 ~ 25
第三组		> 20	> 20 ~ 40	26 ~ 36

注：1. 棒钢包括圆钢、方钢、扁钢及六角钢，型钢包括角钢、工字钢和槽钢。

2. 工字钢和槽钢的厚度系指腹板的厚度。

第三讲 典型焊接结构生产

焊接结构品种繁多，应用广泛，其设计和生产与焊接结构本身的特点有关。焊接结构有多种分类方法，通常根据其承载、工作条件和结构特征来分类，如梁柱、桁架、框架、板壳和机器等结构形式。

本章仅结合水电行业的特点，选择水工钢闸门、压力管道及梁与柱等典型的焊接结

构，重点描述其焊接技术关键及常用焊接工艺，以供借鉴和参考。

一、焊接的基本规定和通用工艺要求

1) 焊接工作人员除焊工外，还应配备专门的焊接技术人员、焊接检查员和无损检验人员。所有焊工均应经专门的基本理论知识和实际操作技术培训。凡从事一、二类焊缝焊接的焊工，必须按 SL35《水工金属结构焊工考试规则》或产品技术条件规定的焊工考试规划的规定进行考试，并取得合格证书，焊工不得担任合格项目以外的焊缝焊接。

2) 焊缝分类

(1) 焊缝应按其所在部位的载荷性质、受力情况和重要性分为三类，并于技术文件中注明。

(2) 压力钢管、钢闸门等水工金属结构焊缝分类按相应产品标准进行；其它焊接产品标准中有明确的焊缝分类规定，则按其规定执行，若无规定可参照表 3—1 规定。

表 3—1 焊缝分类原则

焊缝类别	分 类 原 则
一类	在动载荷或静载荷下承受拉力，按等强原则设计的对接焊缝，对接和角接的组合焊缝
二类	在动载荷或静载荷下承受压力，按等强原则设计的对接焊缝和角焊接
三类	除上述一、二类以外的焊缝

3) 焊接材料存放、保管、烘烤、发放和使用及回收应符合 JB/T3223—96《焊接材料管理规定》及相关焊材产品标准与使用说明书的要求。

4) 焊接设备必须具有参数稳定、调节灵活和安全可靠等性能，能满足焊接规范需要。

5) 焊接前必须根据母材的焊接性、结构特点、使用条件、设计要求、设计能力、施工环境等拟定焊接工艺方案，并经工艺评定合格后，编制焊接作业指导书。

6) 焊前预热：

(1) 作业指导书要求预热时，其定位焊和固定工卡具的焊缝也应按同等规范预热。

(2) 当环境温度低于 0℃时，不规定预热的焊件也应加热至 15℃左右（手触温暖感）。

(3) 预热应在焊缝中心线每侧 3 倍板厚且大于等于 100 mm 的范围内进行。

7) 焊件组对前，坡口面以及每侧 10—20mm 范围内的毛刺、铁锈、氧化皮、挂渣等必须清除干净。

8) 焊件组对质量应符合以下要求：

(1) 同厚度焊件对接允许对口错位如下：

一类焊缝 10%板厚且 $\leq 2\text{mm}$

二类焊缝 15%板厚且 $\leq 3\text{mm}$

三类焊缝 20%板厚且 $\leq 4\text{mm}$

(2) 不同厚度焊件对接，当其厚度差大于 4mm 时，应作削斜处理或堆焊过渡处理，允许对口错位按薄板计算。

(3) 角焊缝连接的焊件应尽可能贴紧，其组对间隙应 $\leq 1\text{mm}$ 。

(4) 焊件组对局部间隙超过 5mm，允许作业堆焊处理，堆焊时严禁填充异物，堆焊后应修磨平整达到规定尺寸，并保持厚坡口的形状。

9) 定位焊的要求：

(1) 定位焊的质量要求及工艺措施应与正式焊缝相同。

(2) 一、二类焊缝的定位焊由持有效合格证书的焊工承担。

(3) 定位焊缝应有一定的强度，但其厚度一般不应超过正式焊缝的二分之一，通常为 4~6 mm。定位焊的长度一般为 30~60mm，间距以不超过 400mm 为宜，冬季施工的低合金钢，基其定位焊缝的厚度可增加至 8 mm，长度可为 80~100 mm。

(4) 定位焊的引弧和熄弧应在坡口内进行。

(5) 熔入焊道的定位焊缝，其焊接材料必须符合正式焊缝要求。

10) 技术文件要求时，可设置焊接衬垫。保留垫板应沿焊缝全长设置，垫板需设接头时，应符合对接焊缝焊透的质量要求。

11) 埋弧自动焊应在焊缝两端设置引弧板和引出板。引弧板与引出板的材质、坡口型式及坡口尺寸应和焊件相同。引弧板和引出板的尺寸一般应大于等于 50mm×100mm，与焊件接头处应封底或垫以焊剂垫以防烧穿。

12) 焊条和手工弧焊的引出板和引弧板可根据需要确定。

13) 焊接时应加强对施焊现场环境的监测，出现下列任一情况应采取有效防护措施，方可焊接。

(1) 雪天、雨天的露天施焊；

(2) 施焊场地风速：气保焊时 $> 2\text{m/s}$ ，其它 $> 8\text{m/s}$ 。

(3) 环境温度低于 -10°C 。

(4) 空气相对湿度大于 90%。

14) 施焊前焊工应对焊件的组对质量进行检查，如发现尺寸超差或坡口及其附近有缺陷，应及时提出，进行修复。

15) 焊接规范应严格按作业指导书的规定执行。当设计对焊接接头的冲击韧性有要求时，施焊中应严格测定和控制线能量。

16) 严禁在非焊接部位的母材上引弧、试电流及焊接临时支架。

17) 要求预热的焊件为多层焊时，应保持层间温度不低于规定预热温度的下限值。

18) 多层多道焊时，应将每道的熔渣、飞溅物仔细清理，自检合格后再进行下层焊接；层间接头应错开 30mm 以上。

19) 除第一层和盖面焊缝外，允许对中间焊缝进行锤击，以降低焊接应力，防止产生裂纹。

20) 双面焊的焊缝，一侧焊后，另一侧应采用机械加工或碳弧气刨方法清根。碳弧

气刨清根后应修磨刨槽，除去渗碳层。

21) 焊接完毕后，焊工应仔细清理焊缝表面，并检查外观质量，必要时可作局部修补，但应符合第(32)条有关规定。

22) 工卡具的去除应采用砂轮磨削或碳弧气刨方法进行，不得伤及母材，严禁用锤击方法去除；去除后应将残留痕迹打磨修整，并认真检查。

23) 引弧板和引出板不得用锤击落，允许用气割方法去除，但应用砂轮修磨平整。

24) 一、二类焊缝焊后应在其附近打上焊工钢号，不能打钢印的，应作上其他标记。

25) 焊条摆动宽度应小于焊条直径的3~5倍。

26) 大型焊接件在拼装位置焊接时，应采用偶数焊工由中心向外围分段焊接。所有焊工应同时施焊，其焊接规范及焊接方向也应保持基本对称。

27) 长度大于1000mm的焊缝宜采用分段退焊法焊接，每段长度400mm左右。

28) 焊缝要求包角焊时，其焊脚尺寸与正常焊缝相同。

29) 作业指导书要求后热时，应在焊后立即进行，加热宽度应为焊缝每侧3倍板厚且大于等于100mm，保温时间1~2h。

30) 焊后应首先对各条焊缝的全长进行外观检查，焊缝的形状尺寸和表面质量应符合相应产品标准或技术条件要求，外观检查用焊缝量规和5倍放大镜进行。

31) 对于一、二类焊缝，外观质量检查合格后，应进行内部质量检验，内部质量检查的方法、范围、质量标准按相应产品标准或技术要求执行。

32) 焊缝的修补：

(1) 焊件表面被电弧、碳弧气刨及气割损伤处和焊疤必须修磨平整。

(2) 焊缝有不允许的一般表面缺陷，允许焊工自检后自行修补，但表面裂纹不得擅自处理，应及时申报焊接技术人员。

(3) 内部缺陷、表面裂纹修补前，应分析原因，制定切实可行的修补方案。

(4) 焊缝缺陷可用碳弧气刨、风铲、砂轮或其它机械方法清除，不允许用电弧或气割火焰熔除。

(5) 修补时焊接缺陷必须彻底清除，不允许有毛刺和凹痕，坡口底部应圆滑过渡。碳弧气刨槽应磨去渗碳层。

(6) 禁止在与水接触的情况下进行修补。

(7) 焊缝在同一位置修补次数一般不应超过两次，第三次修补必须经技术总负责人批准，并将修补情况记入产品质量档案。

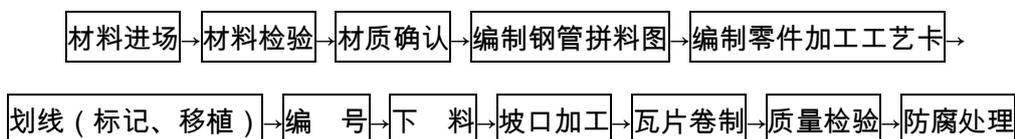
(8) 修补后，应按原焊缝的质量要求对修补处及其附近进行质量检验。

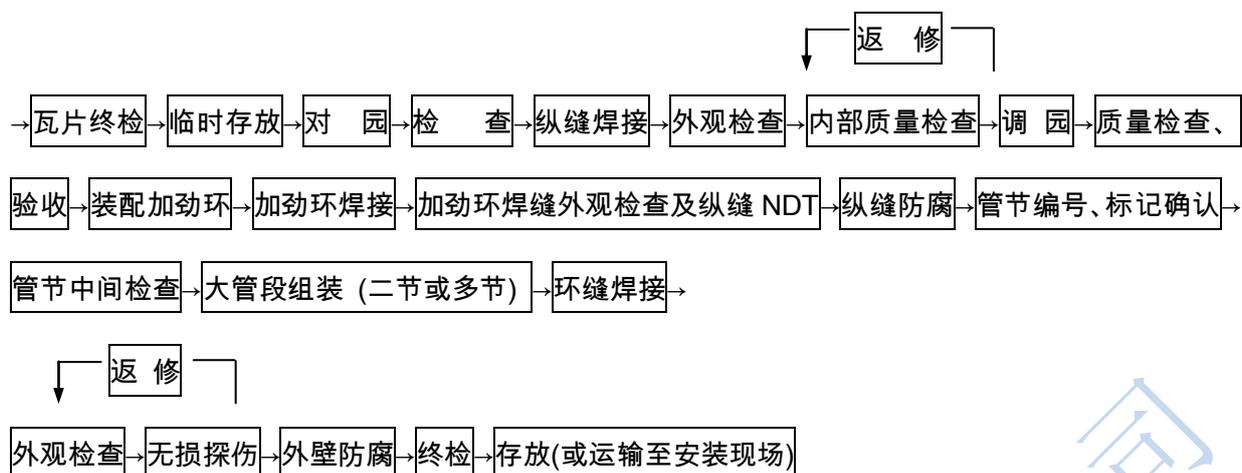
二、引水压力钢管的焊接

引水压力钢管是水电站主要的组成部分，它衔接着电站进水口和水轮机涡壳或球阀，起着将水由进水口引向涡壳或球阀，进而推动水轮机转动的作用。压力钢管多用于大、中型水电站，它们要承受较大的内水压力，且在不稳定的水流状态下工作，容易出现事故，事故一旦发生，后果严重。故对钢管和为其连接的焊缝都应有一定的强度和塑、韧性的要求。压力钢管的布置形式是根据水电站所在地区地形，地质条件和挡水、引水结构形式的不同分为坝内式钢管、隧洞斜井式钢管、隧洞竖井式钢管和露天式钢管中四种。根据供水方式不同，钢管又可分为单独供水方式和联合供水方式。各类钢管的布置和供水方式虽有所不同，但在结构上，一般都是由上水平管、上弯管、斜直管(或竖井钢管)、下弯、下弯管、下水平管等几部分组成。其主要结构有：主管：锥管、岔管、凑合节、伸缩节、支承环、加劲环、进入孔等。

1) 压力钢管管节制作工艺流程：

压力钢管管节制作工艺流程如图 3—1 所示。





2) 焊接方法的选用

(1) 压力钢管制作可选用焊条手工电弧焊、埋弧自动焊、CO₂或富氩气体保护半自动焊，自保护药芯焊丝半自动焊及 CO₂气体保护药芯焊丝半自动焊等焊接方法；在大型厚壁钢管上还可采用实芯富氩气体保护的自动立焊及自动焊接方法。

(2) 压力钢管安装多采用焊条手工电弧焊，当条件许可时，也可选用半自动焊。

(3) 纵缝焊接。纵缝焊接前应用样板仔细检查纵缝弧度，应先焊使纵缝处角变形继续增大的侧焊缝，即当外凸时，先焊内侧面焊缝；当内凹时，先焊外侧焊缝。焊接时应监测弧度变化情况，随时调整焊序及分段情况和焊接规范参数。

(4) 加固圈的焊接。加固圈焊接应焊加固圈环板对接焊缝，然后焊接加固圈环板与钢管管壁之间的双面角焊缝。当该节钢管纵缝焊接需要预热时，则加固圈向焊缝焊接时也应预热，预热要求同管节纵缝。焊接角焊缝时，应分段两侧面交替焊接，以保证加固圈环板与管壁之间的垂直度。

(5) 钢管环缝焊接。钢管环缝焊接采取偶数焊工对称焊接，当焊大坡口侧焊缝，然后背面清根焊接。

(6) 凑合节焊接。凑合节焊接先焊接纵缝，无损检测合格后，焊接环缝、凑合节上的两条环缝不得同时施焊，先焊填充量大的焊缝，然后焊接另外一条。

(7) 焊接检验。严格执行 DL5017—93《压力钢管制造、安装及验收规范》第 6.4

节及设计文件要求。

三、平面钢闸门的焊接

闸门是水工建筑物的重要组织部分之一，它的作用是封闭水工建筑的孔口，并能够按需要全部或局部开启这些孔口，以调节上、下游水位，泄洪流量，用于防洪、灌溉、引水发电、通航、过木以及排除泥沙、冰块或其他飘浮物等。

闸门一般主要由以下三大部分组成：其一为活动部分，既能关闭孔口又能开放孔口的封塞体，一般称门叶结构；其二为埋设部分，系埋固在土建结构中的构件，如支承行走轨道等；通过这些构件将活动部分所随的荷载传给土建结构；其三为启闭机械，系控制活动部分位置的操作机构。

闸门按其工作性质可分为工作闸门、事故闸门、检修闸门和施工导流闸门等。按其形状特征可分为平面闸门、弧门闸门、扇形闸门、球形闸门等。

平面钢闸门一般由活动的门叶结构，固定的门槽埋件结构和启闭闸门的机械设备。本节着重介绍门叶结构的焊接工艺。

平面钢闸门门叶一般由面板、梁格、纵向垂直联结系、行走支承装置、导向装置、止水装置、吊耳等组成。

1) 正式焊接前的准备工作

(1) 制定焊接工艺卡。门叶在拼装后的焊缝基本上是角焊缝或组合焊缝，这是其特征之一；其二，焊缝多，焊接最大；其三，焊缝集中；其四，多个焊工同时作业，热量集中。所有这些，势必引起较大的焊接应力和变形，必须针对这些具体情况，制定合理的焊接工艺，尽量减小焊接应力，并控制变形在允许范围之内。

(2) 检查焊接平台，保证具有足够刚性和对门叶有足够的支垫。

(3) 对门叶进行加固性点焊。门叶在拼装过程中所进行的点焊一般都比较薄弱，为防止在正式焊接过程中出现焊点开裂，应对点焊处进行加固性补焊。

2) 闸门焊缝的分类及质量标准

(1) 闸门的焊缝按其受力和重要程度分为三类：

①一类焊缝：闸门主梁、边梁、支臂的腹板及翼缘板的对接焊缝；闸门吊耳板、吊杆的对接焊缝；闸门主梁与边梁腹板连接的角焊缝及翼缘板连接的对接焊缝；转向吊杆的组合焊缝及角焊缝。

②二类焊缝：门叶面板的对接焊接；闸门主梁、边梁、支臂的翼缘板与腹板的组合焊缝及角焊缝；闸门吊耳板与门叶的组合焊缝及角焊缝。主梁、边梁与门叶面板的组合焊缝及角焊缝；支臂与连接板的组合焊缝及角焊缝。

③三类焊缝：不属于一、二类焊缝的其他焊缝（设计有特殊要求者例外）。

(2) 焊缝的质量标准：

① 所有焊缝均应进行100%外观质量检查，外观质量应符合DL/T5018规范表4.4.1规定。

② 一、二类焊缝应进行超声波或射线探伤检查，检查比例、合格标准按DL/T5018规范第4.4.4~4.4.9条执行。

3) 减小焊接变形的措施

(1) 预留焊接收缩余量：

为弥补焊接收缩后整体几何尺寸的减小，根据实践经验，在拼装时预留1/1000的焊接收缩余量，比较合适，焊后一般能满足要求。

(2) 在门嘎拼装中注意顶紧所有接缝：

在拼装中尽可能将接缝顶紧，局部间隙不超过1mm，这是减小焊接变形的有效办法。拼装间隙越大，熔敷的金属量也越多，所引起的焊接变形也越大。当局部间隙过大时，严禁在间隙处加填塞物进行焊接，而应该在大间隙处先进行堆焊，堆焊到间隙合格后再正式连接焊接。

(3) 制定合理的焊接工艺：

焊接工艺制定是否合理，对减小门叶的焊接变形共有十分重要的意义。闸门焊后的整体变形是无法用计算方法确定的，由于变形情况较复杂，焊接工艺也并非一成不变，有时要在焊接过程中根据变形的具体情况进行调整。

焊接工艺包括焊接规范、焊接程序、焊接工人、工位号及焊接方法等。

① 焊接规范：同时进行焊接的远销个焊工必须严格按工艺卡中的规定进行施焊，所用的焊接规范，如焊接方法、焊材规格、焊接电流、焊接速度、焊接方向等要基本对称一致。

② 焊接程序：以门叶垂直中心线（或隔板）、主梁中心线等为界，将整个门划分成几个对称的焊接区域（划分时应为偶数而不要为奇数），如图 3-2 所示。焊接时必须由中心向四周逆向施焊。

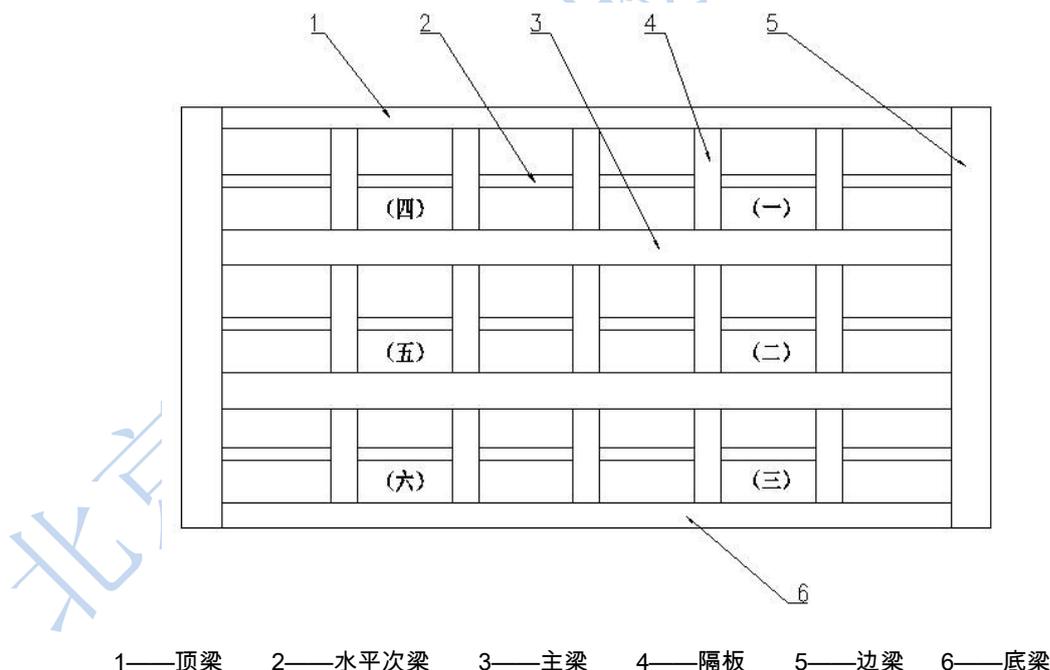


图 3-2 门叶焊接分区示意图

焊接顺序一般为：第一步，隔板连接。①隔板后翼缘与主梁后翼缘开缝；②隔板腹板与主梁后翼缘角焊缝。③隔板与主梁立缝。④隔板与筋板立缝。第二步，梁系与面板

之间连接的平角缝，从中心向四周对称、分段、退步焊接。第三步，两边梁连接缝。①边梁与主梁连接焊缝；②水平次梁与边梁腹板连接缝；③边梁与面板连接缝；第四步，翻转门叶气泡清根后，焊面板迎水面焊缝（职面板已拼完毕，则此步略）。

③ 焊工数和工位号

焊工数就是同时参加焊接的焊工人数，一般说来，是按门叶划分的焊接区域数决定的。也可以根据焊缝的具体情况和对称的原则决定焊工数，在门叶的焊接过程中，焊工数也并不是一成不变的，可以根据需要作适当调整，成偶数变化。

工位号就是每个焊工必须焊接的位置的代号，在焊接工艺卡中，对于焊工数和工位号都要作出明确的安排和规定。

④ 焊接方法：在条件许可的情况下，应尽量采用热输量较小的焊接方法，如气体保护半自动焊。

（4）实施变形监测和控制

焊接过程中门叶的变形是一个很复杂的问题，受到很多因素的影响和制约，而且这些因素在整个焊接过程中又在不断变化。比如：周围环境气温早、中、晚的变化会影响到变形；太阳照射的角度也会影响到变形；同时焊接的各焊工的施焊速度、焊接电流、电弧长短等也在不断变化，也会影响到变形等等。因此，在施焊中，有可能出现异常变形，为了避免出现这种情况，应派专人对门叶的变形情况随时进行监测，以便随时发现问题并及时处理。

对于出现门叶整体弯曲，若是按规范要求凸向迎水面，且不超过允许值，则是正常的；若是凸向相反的方向则必须进行调整。可以用调整焊接线能量的方法，用改变焊接顺序的方法，用改变门叶支垫点等方法加以控制和调整。

4) 工地现场节间组合缝的焊接

受运输条件限制，大型钢闸门一般沿高度方向分节制造，运抵工地后在闸室内进行

立式拼装或在门槽孔口附近搭设平台卧式拼装焊接成整体。门体组合缝的焊接，主要问题仍然是控制焊接变形。在施焊前要根据门叶结构特点及质量要求和环境条件编制焊接工艺卡以指导焊接施工。节间结合缝多为一、二类焊缝，焊接必须由持有效合格的焊工承担。由偶数焊工对称焊接左右边梁腹板对接缝，然后焊接门体中间隔板对接缝或纵梁与主梁间的焊缝，然后再焊接后翼缘的对接缝，最后焊接机板对接缝。施焊的规范、层次、方向等应力求基本一致。长度超过 800mm 的焊缝应采用从中间向两头分段退焊，每段长 200~400mm 为宜。

四、不锈钢复合板钢的焊接

随着水电站大坝及机组容量的不断提高，冲砂底孔、溢流深孔等过流孔道的弧形闸门门井区段高速过流部位，为改善水力学条件并减轻腐蚀侵害，均采用钢衬砌保护，综合考虑高流过速水道正常运行的基本条件，耐用、方便施工及运行维护和工程造价等因素，钢衬砌过流面板选用不锈钢复合板。根据过流面水体流速和价质含量等的不同，可选用 00Cr22Ni5Mo3N、00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢，0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢及 0Cr19Ni9N 奥氏体不锈钢等作为复材。其厚度多为 4mm，基材选用 Q235、Q345 等，厚度 12~20mm。不锈钢复合板钢衬砌与其他钢衬的焊接要求、施工程序一样，所不同的是在焊接不锈钢复合板时应采取一些相应的工艺措施。主要有：

1) 焊工。从事不锈钢复合板焊接的焊工必须经过复合板焊接工艺知识和操作技能培训并经考试合格，施焊的项目应与其资格证书核准的项目相符。

2) 焊前清理。焊前应采用角磨机及有熔剂清除焊缝坡口面及其两则至少 20mm 范围内的油污、锈迹、氧化膜及其他污物，并均匀喷涂金属焊接飞溅液；过渡层及复层焊缝焊接前，必须仔细打磨清理基材焊缝表面的及坡口面上附着的熔渣、飞溅等。

3) 焊接方法。基层焊接，在安装现场采用焊条电弧焊方法，在制造车间可采用焊条电弧焊方法，也可采用气保焊方法；而过渡层及复层的焊接均采用焊条电弧焊。

4) 焊接材料。焊接材料的选择主要依据基材等临、复材等化学成份，过渡层应保证复材与基材及焊缝之间形成良好的冶金结合并符合要求的金相组织同时兼顾方便施工等原则进行。

5) 焊接工艺评定。焊接开工及焊工培训前应依据 DL/T5017、DL/T5018、及 JB4708 规范及施工合同有关技术条款要求进行焊接工艺评定试验，依据合格工艺评定报告编制焊接作业指导书。

6) 焊接程序。先焊衬材，经规定项目的质量检验合格后，再焊接过渡层，最后焊接复层。

7) 基材的焊接。焊接基材时，其焊道不得触及和熔化复材，焊道表面应距复合界面 1~2mm，焊道余高应小于 1.5mm，否则应用砂轮机进行修整。

8) 过渡层焊接。焊接过渡层时，在保证熔合良好的前提下，要尽量减少基材金属的溶入量，宜采用直径不大于 3.2mm 的焊条及较小的焊接线能量，过渡层应控制在 2~3mm 厚度。

9) 复层的焊接。复层焊缝表面应尽可能与复材表面保持平整、光顺，对接焊缝余高不大于 1.5mm，且焊后磨平。

10) 在焊接过渡层及复层焊缝时，不锈钢焊条不得作横向摆动，同时保持层间温度低于 100℃。

11) 复材表面质量保护。在施工过程中，应注意保护复材的表面质量，不得用铁器锤击复材表面，不得在复材表面随意引弧、试电流、焊接工卡具、吊环及临时支架等物。

五、梁与柱的焊接

梁和柱是金属结构中的基本元件，面广而量大。焊接梁和柱的制造方法基本相同，它们有各种各样的断形状，但都可以归纳成开式断面和闭式断两大类。有些梁或柱上设置有肋板；有些沿其长度上作成变断面的，即等强梁或柱。

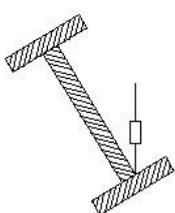
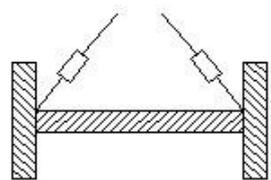
用于制造焊接梁和柱的金属材料，一般都是选择焊接性能良好的碳素结构钢或低合金高强钢，如 Q235 系列、Q345 系列等。正式制造这些梁或柱之前，应结合生产实际做焊接工艺试验，其结果是作为制定焊接工艺的依据。除此之外，制造梁和柱的主要技术问题就是如何保证达到技术条件中提出的形状和尺寸精度，准确的装配和严格的控制焊接变形常成为梁和柱生产中的关键。

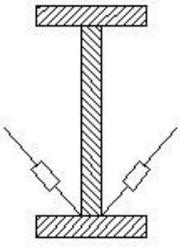
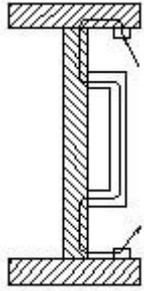
1. 工字断面的梁和柱

有各种各样工字形断面的梁或柱，其基本形式都是腹板和上下翼板互相垂直构成。仅仅在相互位置、厚与薄、宽与窄、有无肋板等有区别。应用最多的是腹板居中，左右和上下对称的工字断面梁或柱，一般由四条纵向焊缝连接。制造焊接这种对称的工字梁和柱，需要控制的主要变形是翼板的角变形的挠曲变形，挠曲变形中有上拱和下拱以及左（右）弯弯，腹板的凸凹度，处理不当还可能产生难以矫正的扭曲变形。

目前中厚板的工字断面的梁和柱主要有表 3-2 中所列的四种焊接方案

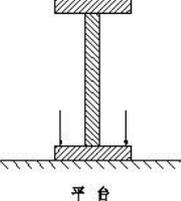
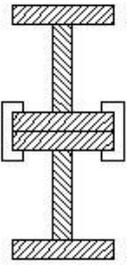
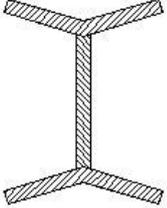
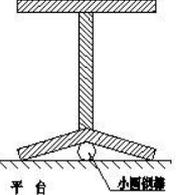
表 3-2 中厚板工字断面梁或柱焊接的基本方案

序号	焊接方法	示意图	特点
1	电弧焊 (SMAW、CO ₂ 焊、 SAW)		船形位置单头焊，焊缝成形好，变形控制难度大。工件翻身次数多，生产效率低。
2	电弧焊 (CO ₂ 焊、SAW)		卧放位置，双头在同侧、同步、同方向施焊。翼板有角变形，左右两则不对称，有旁弯，工件至少翻身一次。

3	电弧焊 (CO ₂ 焊、SAW)		立放位置，双头两侧对称同步、同方向施焊。翼板角变形左右对称，有上拱或下挠变形，工件最少翻身一次。
4	电阻焊		立放位置，上、下翼板同时和腹板边装配边通过高频电流并加压完成焊接。工件不翻转，变形小，生产效率高，但要有辅助设备配套。

预防角变形的最好做法是反变形法或刚性固定法，如表 3-3。

表 3-3 防止工字形梁或柱焊接角变形的几种作法

方法名称	刚性固定法		反变形法	
示意图				
说明	利用夹具把翼板夹紧在刚性平台上，可减少角变形，但不能全消除。	利用夹具或点焊将两工字形梁靠背固定在一起焊接，可减少角变形，也不能完全消除，用于变形控制要求	用冲压法在翼板上预制反变形，在无拘否条件下焊接，应力小，要有经验和	靠夹具的夹紧力获得翼板所需的反变形量，焊后松开，翼板回弹，

	片，故很少采用。	较低，生产条件较差的场合。	预制反变形的设备。	需要有一定经验。
--	----------	---------------	-----------	----------

为保证四条组合焊缝的熔透质量，最常用的是“船形”位置施焊，其倾角为 45° ，并适当加大焊缝坡口根部空间。这时，焊缝的焊接顺序以及工件的倾斜和翻转按图 3-3 所示程序进行。

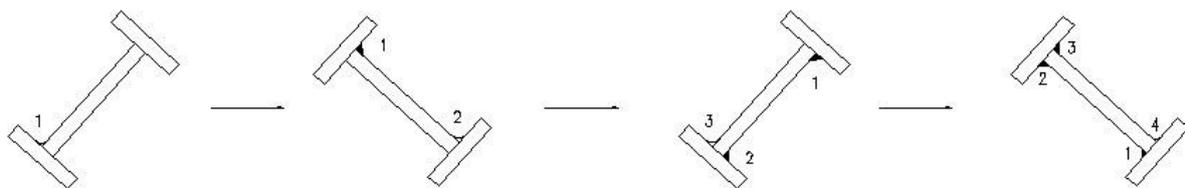


图 3-3 工字梁成柱组合焊缝（角焊缝）船形焊的焊接顺序

断面形状和焊缝分布不对称的工字梁和柱，焊后除角变形外，还将产生较为明显的挠曲变形，挠曲变形的方向和大小，除受四条长角（组合）焊缝影响外，还受工字梁和柱上肋板焊缝的分布，焊缝断面尺寸、焊接方法、焊接工艺参数等的影响。在焊接过程中，要严格控制其挠曲变形的产生，防止非对称梁和柱产生挠曲变形最有效的技术措施是采用反变形法。

2. 箱形断面的梁和柱

箱形梁的断面形状多为长方形，箱形柱则多为正方形。两者的基本特征均是有四块平板用四个 T 型接头连成整体，与断面轮廓尺寸相比，梁的臂厚显得较薄，而柱显的较厚。为了提高梁或柱的整体和局部刚性，以及稳定性，在其内部常使用肋板（又叫隔板）。梁中的肋板形状和布置比较复杂，因而制造困难较多。

1) 箱形梁的焊接

制造箱形梁的主要技术问题是焊接变形的控制，从梁的断面结构形状和焊道分布看，对于断面重心轴线左右是基本对称的，焊后产生旁弯的可能性较小，而且比较容易控制；

对于断面水平轴线上下是不对称的，因小肋板都在上方，于是焊缝大部分分布在轴线上部，焊后要发生下挠的变形，这和技术上要求上拱是相反的。

箱形梁腹板与上下翼板连接的四条角（组合）焊缝焊接后，将在腹板中部和上、下翼板处产生大面积焊接残余压应力。如果腹板和上下翼板较薄时，很容易受压失稳产生波浪变形；肋板与腹板，肋板与上、下翼板角焊缝所产生的角变形，也将引起腹板和上、下翼板的波浪变形；肋板角焊缝的纵向收缩，在腹板和上、下翼板上引起的残余压应力与四条长角（组合）焊缝在腹板和上、下翼板上引起的残余压应力相叠加时，将会加大已经产生的波浪变形；腹板拼接焊缝，尤其超大型箱形梁腹板高达 2200~2500mm，腹板拼接纵缝和横缝均将引起腹板的波浪变形。

因此，制造箱形梁要解决的主要问题是防止下挠兼保证获得技术要求的上拱度，其次是减少波浪变形。

在箱形梁制造过程中要获得上拱度的方法很多，合理而又可行的方法是在腹板上预制上拱度。即在备料时，预先在腹板上作出上拱度，然后投入主梁的装配和焊接。在腹板上预制上拱度 f_y 的数值应大于技术要求的主梁上拱度。这是因为在制造过程中发生的下挠是要消耗一部分上拱度的。究竟应取多少预制上拱度，须根据梁的结构形状、工厂生产技术条件以及所用的工艺程序等因素确定。

采用焊后火焰加热箱形梁的下部（工作时箱形梁下部承受拉应力）获取上拱度的措施是不合理的，在箱形梁的制造过程中，要严禁在箱形梁工作时承受拉应力的部位，进行火焰矫形。

解决箱形梁腹板波浪变形一般从两个方面着手，一是减少腹板焊接残余压应力；二是减少腹板对手上肋板焊缝的角变形。减少腹板焊接残余应力不利影响的措施有：（1）在保证焊缝连接强度要求的条件下，最大限度地减少焊缝截面尺寸；（2）选用能量密度大的焊接方法（如气保焊）并采用适当焊接工艺参数，尽可能减少焊接热输入量；（3）

适当增加腹板厚度；(4) 腹板拼焊时，应使用防变形工艺装置；(5) 各种箱形梁尤其是大型、超大量箱形梁腹板的波浪变形，可用一条或多条纵向全长肋板减少其波浪变形；(6) 装配下盖板时，预制腹板产生拉应力，用以抵消腹板上产生的焊接残余压应力。减少肋板焊缝角变形不利影响的措施有：(1) 严格控制角焊缝截面尺寸及形状；(2) 开坡口焊接角焊缝；(3) 选用能量密度大的焊接方法，如 CO_2 气体保护焊。

整个箱形梁的装配和焊接的一般程序，如图 3-4 所示。

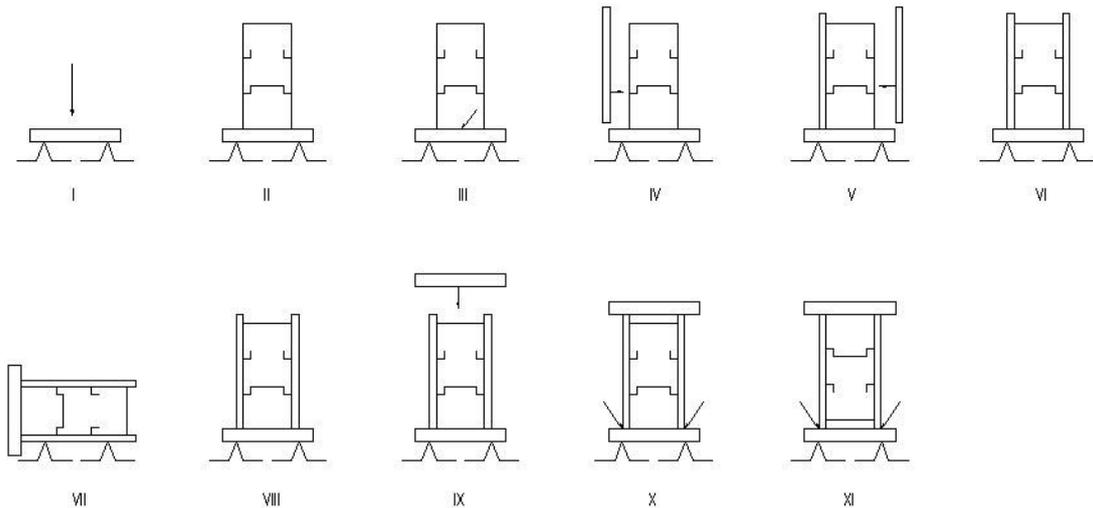


图 3-4 箱型梁装配焊接顺序示意图

箱形梁焊接工艺措施：(1) 箱体内的所有焊缝最好使用 CO_2 (划 CO_2+Ar) 气体保护半自动焊，材料拼接和四条纵向长组合焊缝外侧焊缝应用自动焊。(2) 箱体内部焊缝焊接时应采取偶数焊工对称由中间向四周分段退焊的方法施焊。(3) 当保证焊缝熔合质量的条件下，尽量选用小规范焊接。(4) 焊接过程中应积极利用箱形梁的自重来预防和控制焊接变形。

2) 箱形柱的焊接

在许多高层建筑中，钢结构应用日益广泛，其柱子多设计成方箱形的结构。

根据方箱柱子的结构形式和所用的焊接材料，一般来说，焊焊生产并不困难。但是由于柱内空间小，四个角接头的焊缝均必须从外面进行焊接，其接头坡口形式一般按图

3-5 所示制备。要求全焊透时，采用图 3-5(a)的结构，里面采用永久垫板，一般使用 CO_2 (或 CO_2+Ar) 焊成埋弧自动焊，当壁厚较大，气温较低时，焊接应进行预热。

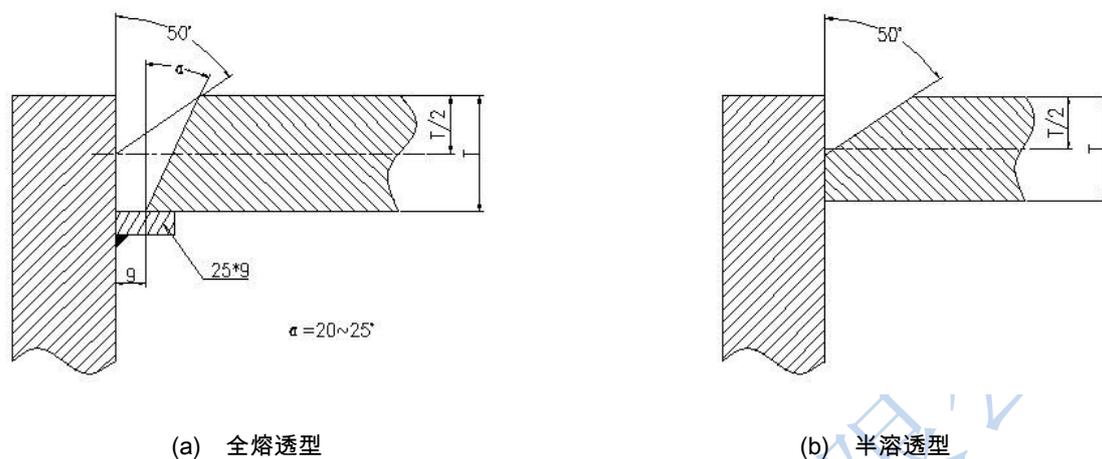


图 3-5 方箱柱壁板角接头的坡口形式

方箱形柱焊接遇到的最大困难是横向肋板与壁板连接的四条焊接问题。由于柱内空间小，只能焊接其中的三条。最后一面的焊缝如何施焊成为厚壁方箱柱焊接生产中的一个技术难题，目前多使用熔嘴电渣焊方法解决。