

南京机械高等专科学校备课笔记

焊接应力与变形 (welding stress and distortion)

焊接为一局部加热的工艺过程。在这个过程中和过程后，构件会产生焊接应力和变形。不均匀温度场使材料不均匀膨胀，处于高温区材料膨胀量大，受低温区材料限制，产生应力。

焊接过程中，由于不均匀加热产生的应力与变形，称为焊接时焊接应力和变形，简称焊接应力和变形；

焊接过程后，焊件焊好后，冷却后仍有部分焊接应力和变形保留下来，称为焊接残余应力和变形。(residual stress and deformation)

焊接应力是存在于焊件内部，并自相平衡的一种内应力，它是形成各种焊接裂纹的因素之一。焊接应力与变形还会影响结构强度、刚度和稳定性，影响尺寸精度及抗腐蚀性，且会增加工艺困难和经济成本的提高。

我们在进行焊件设计与制定焊接工艺时，应尽量减少焊件应力与变形。

§1. 内应力的基本概念

是没有外力作用下，物体内部产生的应力，它在物体内部自相平衡，它与构件在载荷作用下产生的应力不同。

(一) 热应力 (温度应力)。构件中由于不均匀加热与冷却，各处温度不一样，各处膨胀不一样：温度低处膨胀小，温度高处处膨胀大，但因构件为一整体，温度高处处大膨胀受到温度低处小膨胀材料的限制，于是产生应力，不均匀冷却也一样。

例如图示三块同样长度、同样截面之碳钢焊件，用两副刚性

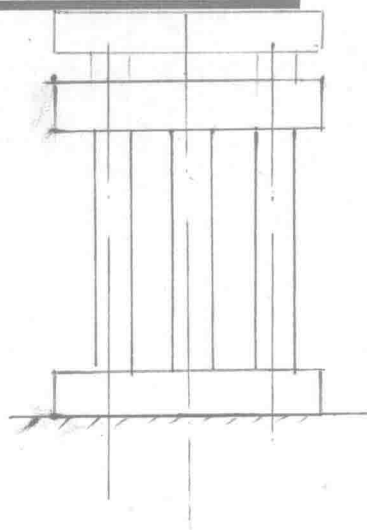
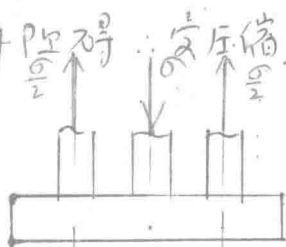
南京机械高等专科学校备课笔记

铜块连接, 中间杆加热 600°C , 两边杆保持室温。中间杆受膨胀, 但受任意, 受升, 两边杆受压缩, 而两边杆则受拉伸

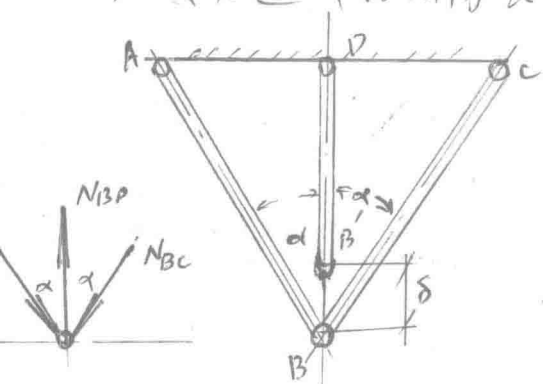
$$\Sigma Y = 0$$

$$-\sigma A + 2 \times \frac{\sigma}{2} A = 0$$

自相平衡



(二) 装配应力, 及在装配过程中, 如用螺栓拧紧等, 如尺寸误差造成的不同长度杆修制连在一起也会产生应力。



如把图示结构长度 δ 的 BD 杆与 AB, BC 杆连接在 B 点, 即产生装配应力

N_{BD} 为拉力 N_{AB}, N_{BC} 为压力

$$\Sigma X = 0 \quad N_{AB} \sin \alpha - N_{BC} \sin \alpha = 0 \quad N_{AB} = N_{BC}$$

$$\Sigma Y = 0 \quad N_{BD} - 2 N_{AB} \cos \alpha = 0 \quad N_{BD} = 2 N_{AB} \cos \alpha$$

(三) 相变应力. 金属相变时, 由于体积变化引起应力, 如奥氏体与铁素体, 铁相变为马氏体时体积膨胀, 此膨胀受周围材料的约束而产生应力

(四) 残余应力 在构件上不均匀加热, 冷却后产生应力 (如热处理装配等) 所产生内力达平衡, 冷却超过材料屈服极限时, 都会在冷却地区产生塑性变形 (应变)。当温度恢复至原来均匀状态, 冷却后冷却后, 由于构件内部有塑性恢复。

南京机械高等专科学校备课笔记

当塑性变形存在, 则与相应内力就是残余内力, 相应残余的塑性变形的残余变形



由外力

$$\sigma < \sigma_s$$

卸载后
恢复弹性

$$\sigma \rightarrow 0$$

$$\sigma > \sigma_s$$

仍有

$$\sigma \Rightarrow \text{材料}$$

§2 关于自由变形、外观变形和内部变形

自由变形 构件如因温度有改变而产生相变, 其形状和尺寸发生变化, 如这种变化没有受到外界任何阻碍而自由地进行自由变形。

如三杆材料同长及同截面
杆件及初始温度均为 T_0

如中间杆温度由 $T_0 \rightarrow T_1$

两边杆仍保持 T_0

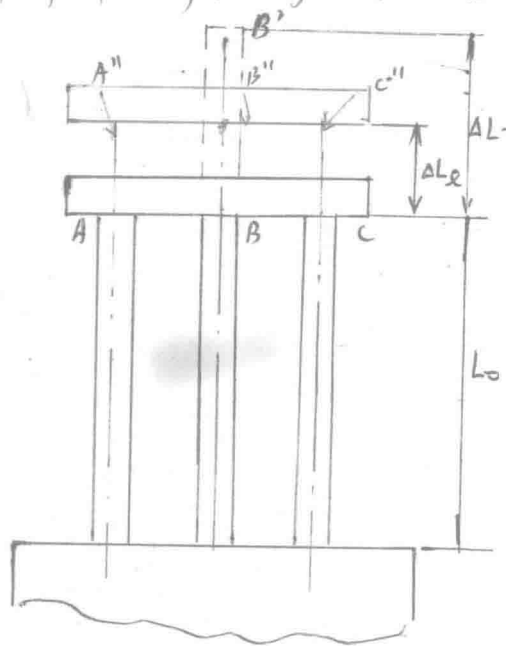
如无约束则中间杆由 $B \rightarrow B'$

其伸长为自由伸长

$$\Delta L_T = \alpha L_0 (T_1 - T_0) = \alpha L_0 \Delta T$$

而相应自由变形为

$$\epsilon_T = \frac{\Delta L_T}{L_0} = \alpha \Delta T$$



外观变形, 但因三杆与端刚性连在一起, 不能自由变形, 只能发生变形。A''B''C'' 中间由 $B \rightarrow B'$ (变形) 伸长 ΔL_T 是人为的

南京机械高等专科学校备课笔记

得之的, 称之为外观伸长, 相应之称为外观变形 ϵ_e

$$\epsilon_e = \frac{\Delta L_e}{L_0}$$

内部变形, 就中间棒而言 B'B" 被压回去, 是没有表现出来的
的称之为内部变形

$$\Delta L = -(\Delta L_T - \Delta L_e) = \Delta L_e - \Delta L_T$$

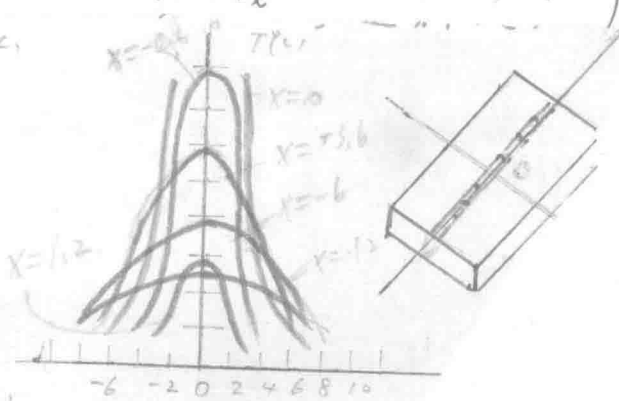
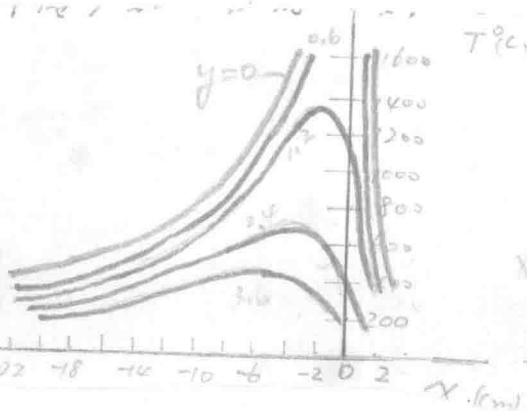
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta L_e}{L_0} - \frac{\Delta L_T}{L_0} = \epsilon_e - \epsilon_T \quad \text{or} \quad -(\epsilon_T - \epsilon_e)$$

不自由伸缩之应力 $\sigma = E \epsilon = E(\epsilon_e - \epsilon_T)$

§3. 焊接应力与变形

(一) 焊接温度场 焊接时, 由于电弧热作用, 在被焊工件上产生极不均匀温度场, 其焊接热流有三维 (厚板焊接) 二维 (平板焊接) 和一维的 (焊缝长度很短和高速焊接)

近似模型以低碳钢平板条沿中心线焊接 讨论其温度分布



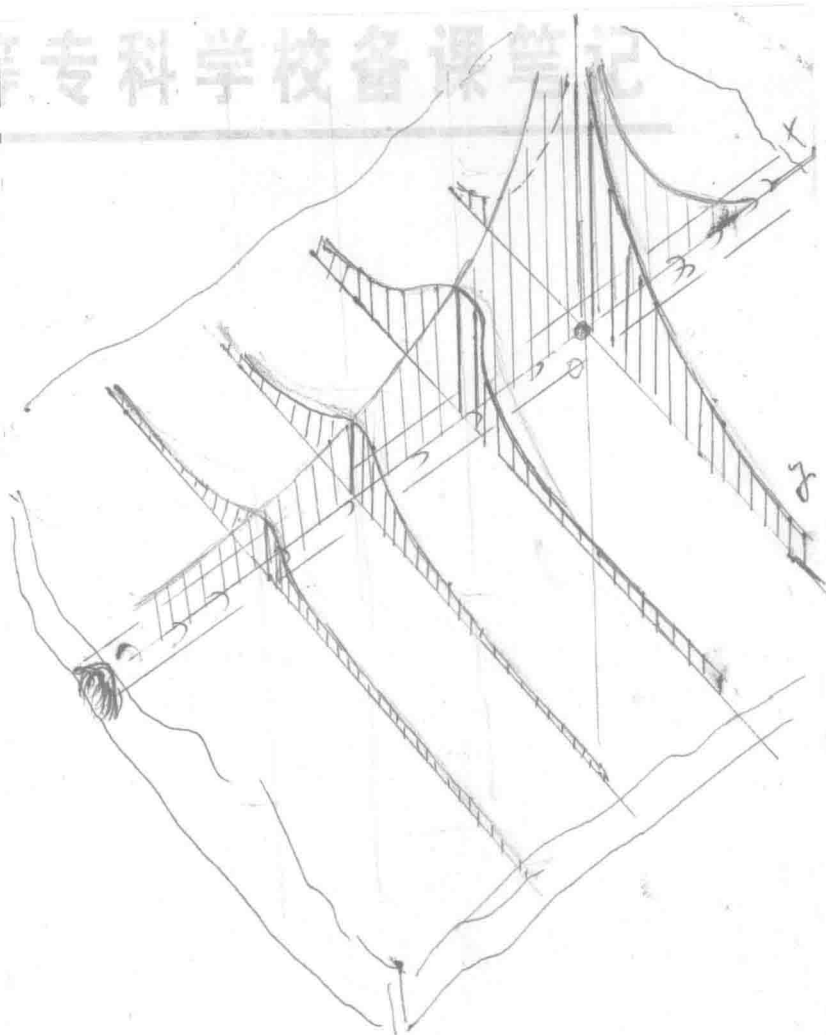
温度场有如下特征

1. 各点温度差异很大。焊上熔池为液态, 温度在熔点 (1600°C) 左右, 离开这一温度即下降。∴ 低碳钢超过 500°C 以上即失去弹性。∴ 焊缝及其附近处于热塑性状态

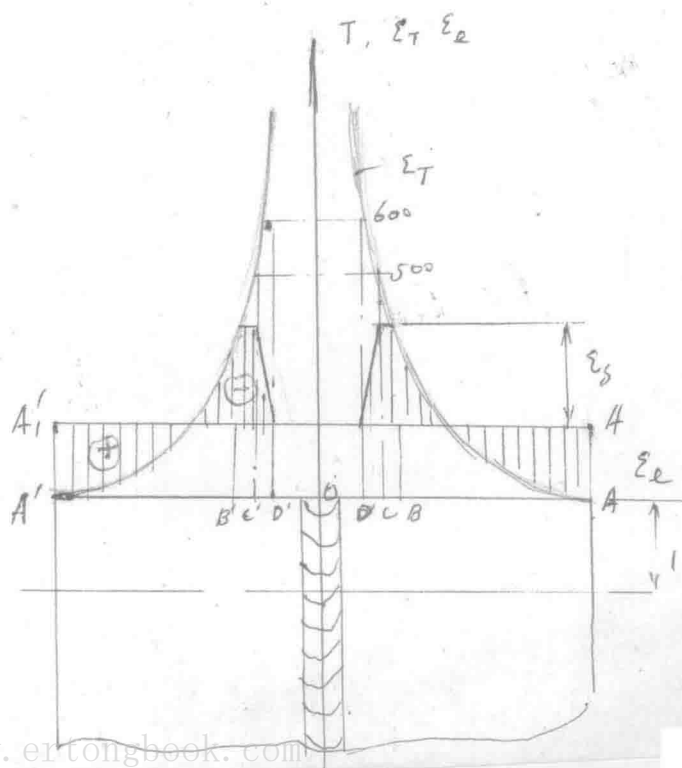
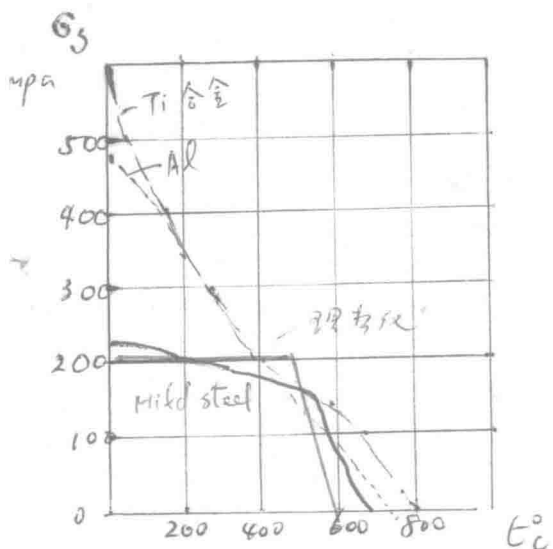
南京机械高等专科学校备课笔记

2. 随着这高焊缝, 温度急剧下降至室温, 材料也由热塑性, 半塑性状态, 过设计弹性状态。

3. 加热冷却也不均匀, 在焊缝处升温过程, 焊件由点升温最高温度时间不同。



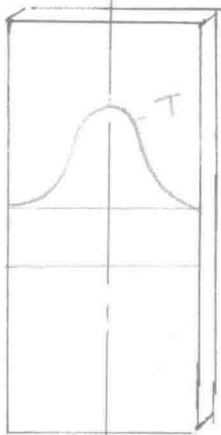
(二) 金属在高温下, 性能特别是 σ_s 随温度发生变化。



南京机械高等专科学校备课笔记

(三) 研究一下不均匀温度场下 ~~长板条~~ 长板条的变形和应力

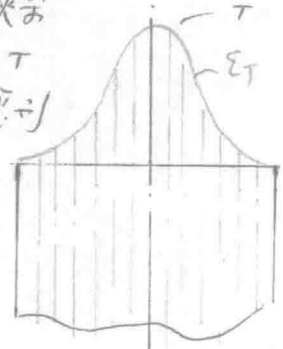
一种粗糙模型



中间加粗
两边温度依次降低

用电阻丝沿长度加粗

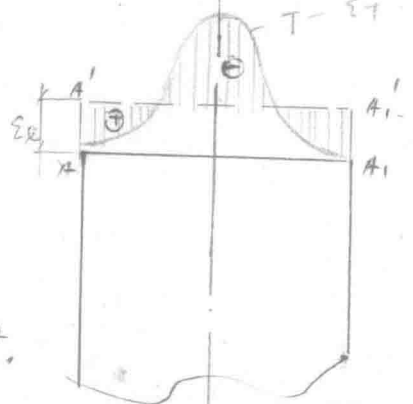
长板条由狭条
经BK-2/接T
分布形状类似



实际长板条为一整体
ε 温度场分布

∴ 经 AA₁ → AA'
± 板条外延变形
ε_e

中间部分与内部
变形



当 $\sigma < \sigma_s$ $\varepsilon < \varepsilon_s$

温度恢复及板条 ε 后, 应力消失
形迹消失 → 内部变形

当 $\sigma > \sigma_s$ $\varepsilon > \varepsilon_s$

在 C 区内产生塑性变形

当温度恢复及板条 ε 后, 应力消失
有永久残余:

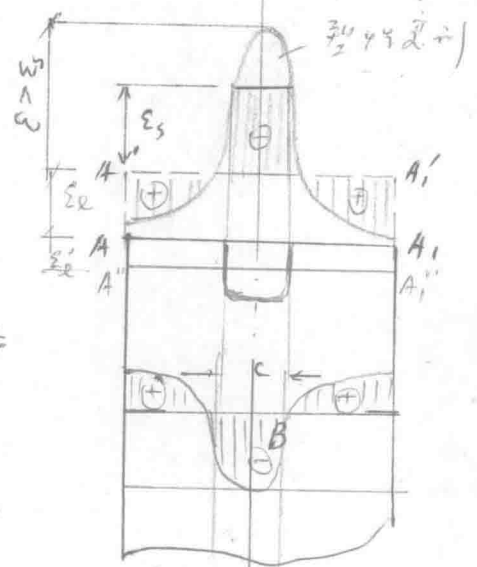
弹性区 [A, B] 部分恢复变形 AA₁

但 C 区: 仍有弹性变形, 只是因自由收缩, 则 C 区产生一凹面, 因此不连续, (∵ 一物体保持平衡)

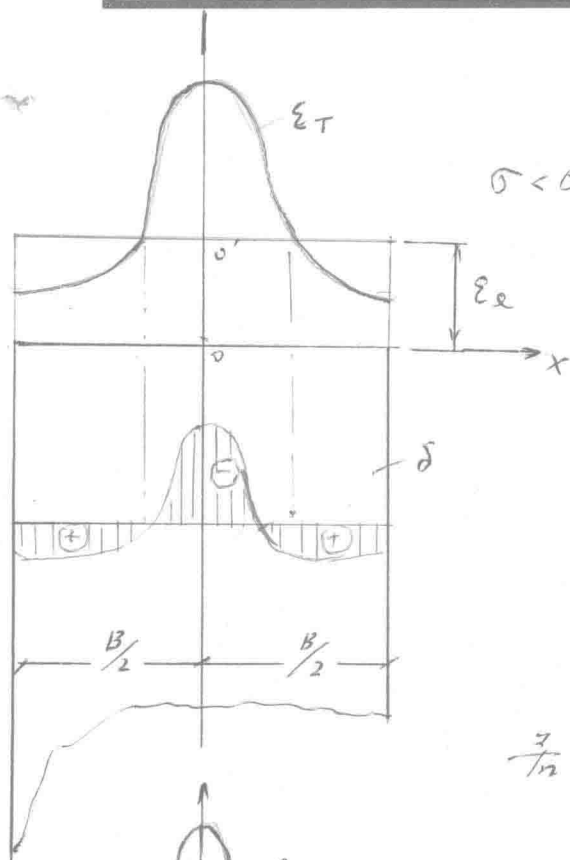
经大变形抗, 一起变形 AA''A₁

于 C 区, 中间 C 区受拉, 两边受压, 产生合力

AA₁ → AA''A₁ ε_e — 残余变形



南京机械高等专科学校备课笔记



长板在均匀的溫度場

作用下，變形與應力

中心點

$$\sigma < \sigma_s$$

$$\Sigma Y = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma(\delta dx) = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} E \epsilon \delta dx$$

$$= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} E (\epsilon_c - \epsilon_T) \delta dx$$

$$\epsilon_T = \alpha f(x)$$

$$= E \delta \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} [\epsilon_c - \alpha f(x)] dx = 0$$

由於在板斷面上應力平衡
同變形及位移是內應力為零

$$\frac{7}{12} \sigma > \sigma_s$$

由此，求得應力 \$\epsilon_p\$

$$\Sigma Y = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma(\delta dx) = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} E \epsilon \delta dx$$

$$= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} E \delta (\epsilon_c' - \epsilon_p) dx$$

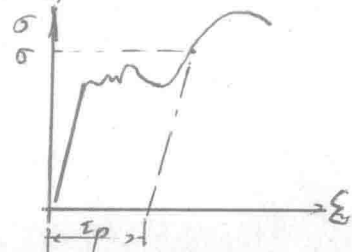
$$= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{c}{2}} E \delta \epsilon_c' dx + \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} E \delta (\epsilon_c' - \epsilon_p) dx + \int_{\frac{c}{2}}^{\frac{B}{2}} E \delta \epsilon_c' dx$$

$$= E \delta \left[\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{c}{2}} \epsilon_c' dx + \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} [\epsilon_c' - f_p(x)] dx + \int_{\frac{c}{2}}^{\frac{B}{2}} \epsilon_c' dx \right]$$

$$= E \delta \epsilon_c' (B - c) + E \delta \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} [\epsilon_c' - f_p(x)] dx = 0$$

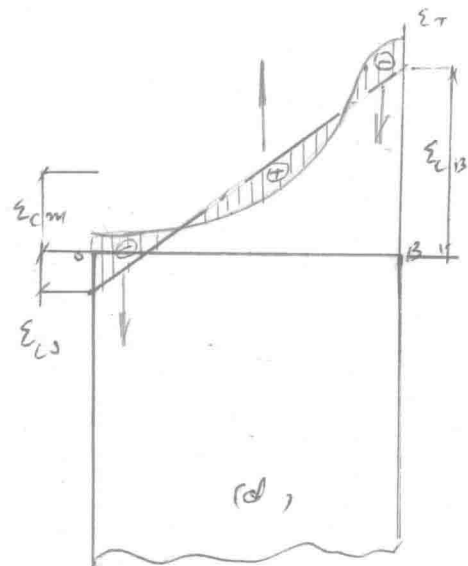
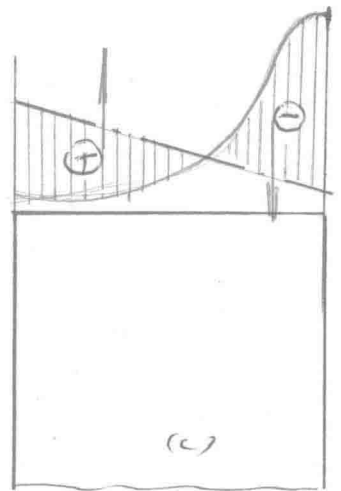
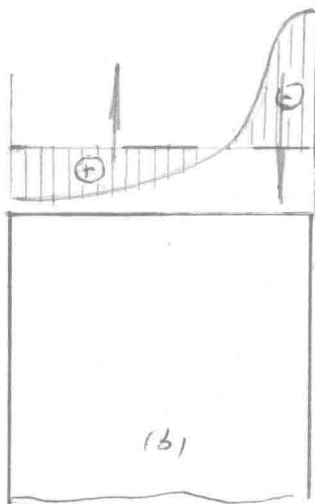
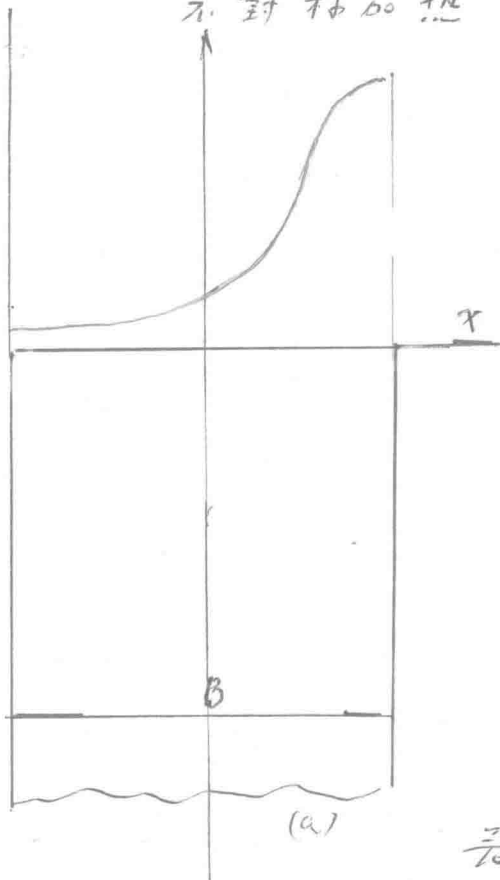
由此，求得應力

其分布如圖 14'



南京机械高等专科学校备课笔记

不对称加热



$$\frac{\partial}{\partial x} \epsilon_T = \alpha f(x)$$

两种情况 (b) (c) 内部均无应力

平衡: 不存在 应力 (d) 应力 分布

$$\begin{aligned} \Sigma F &= \int_0^B \sigma dx = E \int_0^B \epsilon dx = E \int_0^B (\epsilon_c - \epsilon_T) dx = E \int_0^B (\epsilon_c - \alpha f(x)) dx = 0 \\ \Sigma M &= \int_0^B \sigma x dx = \int_0^B E \epsilon x dx = E \int_0^B (\epsilon_c - \epsilon_T) x dx = E \int_0^B (\epsilon_c - \alpha f(x)) x dx = 0 \\ \Sigma F &= 0 \quad 0 = 0 \end{aligned}$$

∴ 有角变形 板面有应力 $\epsilon_c \neq \text{constant}$

$$\epsilon_c = \epsilon_{c0} + \frac{x}{B} (\epsilon_{cr} - \epsilon_{c0})$$

$\epsilon_{cr}, \epsilon_{c0}$ 由边界条件 $\Sigma F=0, \Sigma M=0$

$$\epsilon_c = \epsilon_{c0} + \frac{x}{B} (\epsilon_{cr} - \epsilon_{c0})$$

平衡

板条平均伸长 $\epsilon_{cm} = \frac{\epsilon_{c0} + \epsilon_{cr}}{2}$

板条弯曲

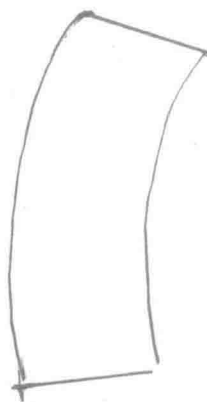
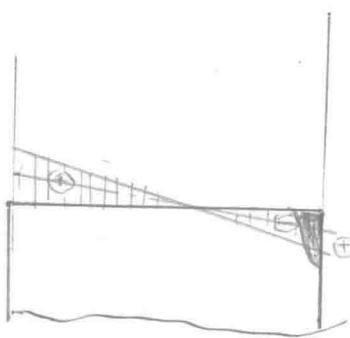
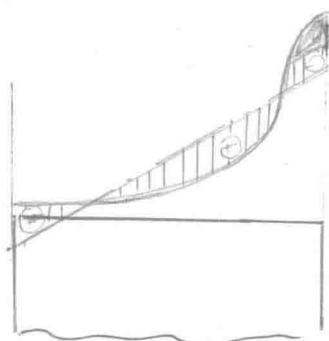
$$c = \frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_{cr} - \epsilon_{c0}}{B}$$

南京机械高等专科学校备课笔记

结论: 若 $\varepsilon < \varepsilon_s$ 弹性阶段, 变形以内力消为
不产生残余变形

若 $\varepsilon > \varepsilon_s$ 出现屈服阶段变形, 弹性阶段
内力不产生残余应力

材料在屈服阶段变形与屈服变形, 其方向
小加型时相反 变形位置由平衡条件决定



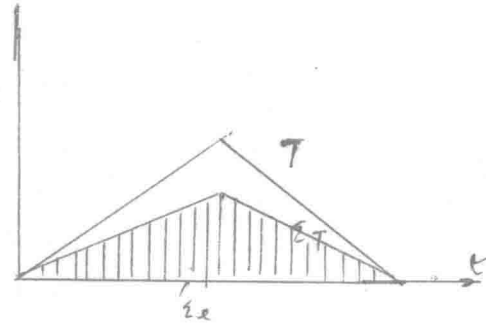
南京机械高等专科学校备课笔记

(四) 受拘束体在热循环中应力与变形的过程

取一两端固定不能伸缩单位长度
低碳钢棒, 先将棒均匀加热后冷却

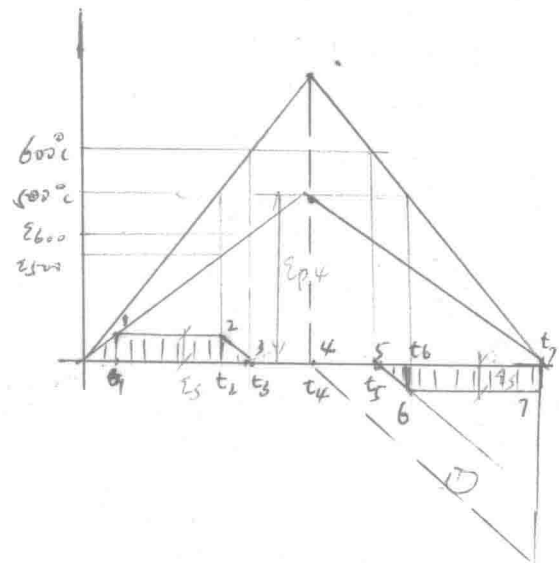
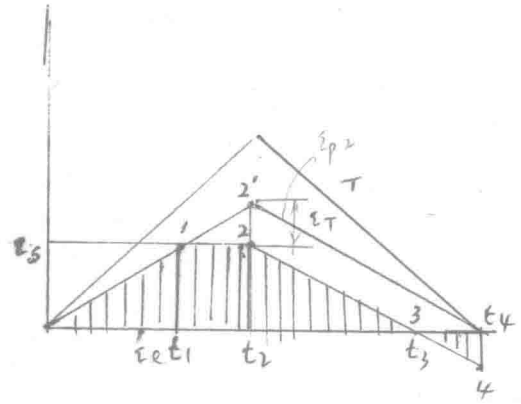
$$\varepsilon < \varepsilon_s$$

$$\sigma = E(\varepsilon_e - \varepsilon_T) \\ = -E\varepsilon_T$$



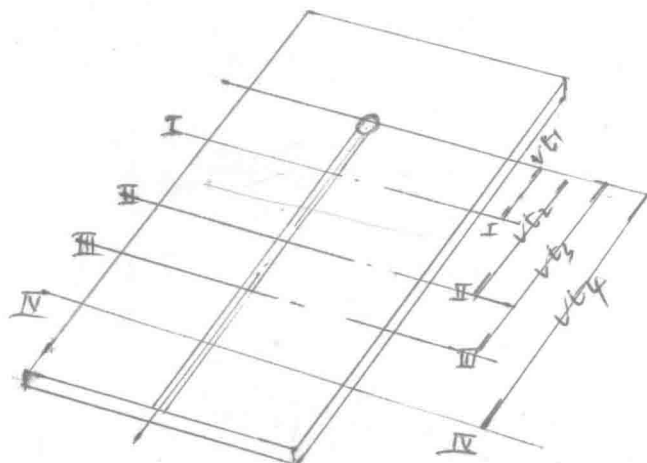
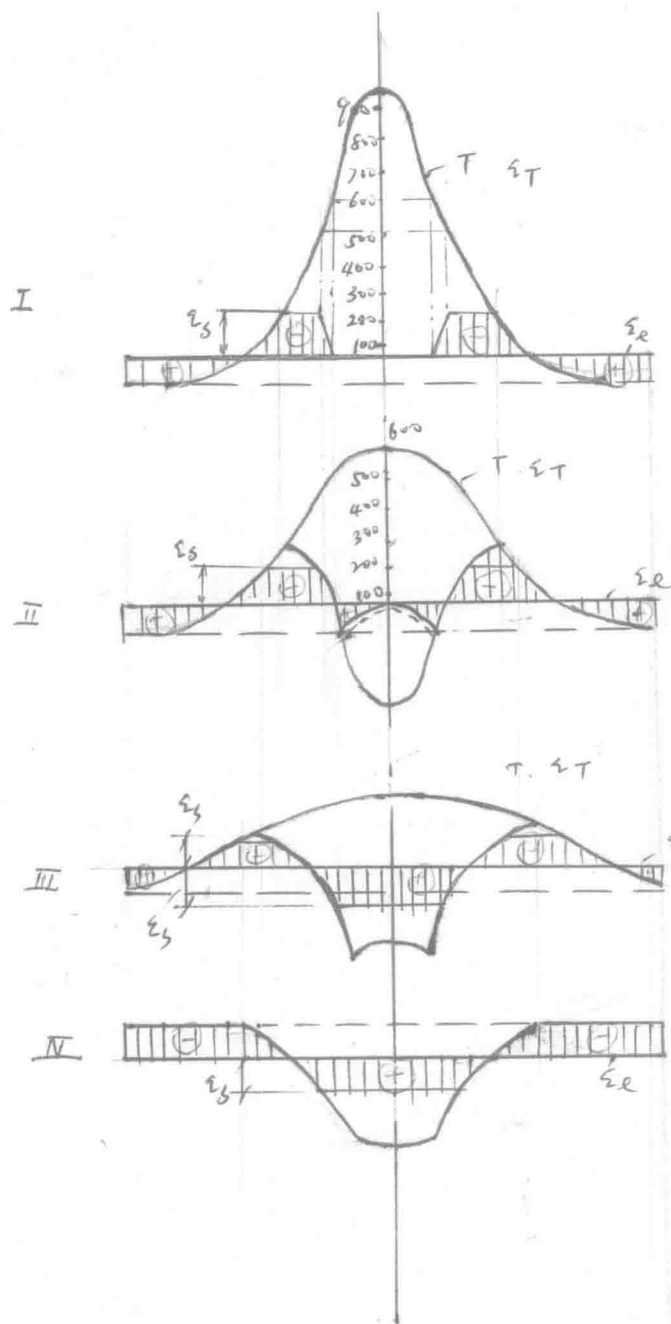
$$\varepsilon > \varepsilon_s$$

$$T_{max} < 500^\circ\text{C}$$



南京机械高等专科学校备课笔记

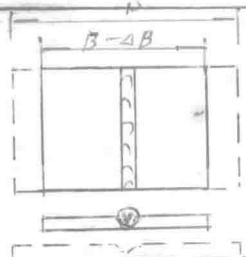
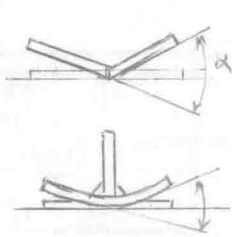
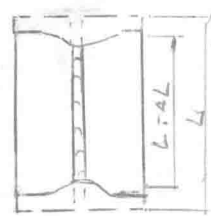
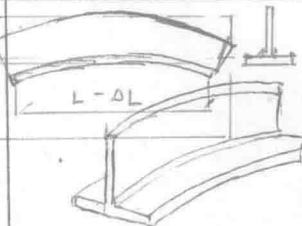
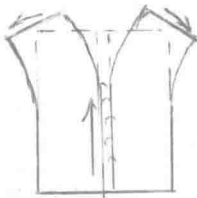
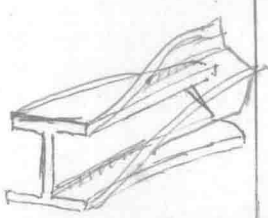
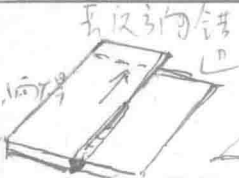
(五) 焊接应力、变形的形成过程



南京机械高等专科学校备课笔记

§4 焊接变形 (主要指残余变形)

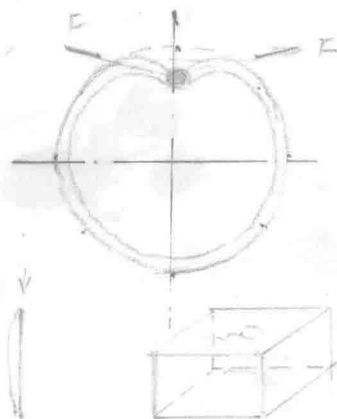
(一) 焊接残余变形的类型

横向收缩		垂直焊接 方向收缩	角变形		焊接时,因板厚方向温度不均匀引起工件围绕焊缝的角变形
纵向收缩		焊接方向 收缩	扭曲变形		因焊缝纵向收缩或横向收缩引起构件扭曲
回弹变形		焊接过程中 坡口角度的 开与闭合 变形	扭曲变形		焊后构件产生扭曲
弯曲变形		弯曲变形	波浪变形		厚板焊接,因焊接应力分布不均引起波浪变形

焊接残余变形对焊接结构有很大影响

1. 影响结构尺寸, 和外形
2. 影响组装精度
3. 降低结构承载能力 例如:
4. 变形超过范围 浪费大量人力物力矫正, 矫正不达标就报废

产生附加弯矩
如圆柱筒在
受压弯曲变形
破坏, 对称性
对一般定尺结构
加应力失稳



5. 由于焊接变形大, 焊后机加工的构件就
要加大余量, 加大毛坯尺寸, 增加材料消耗

南京机械高等专科学校备课笔记

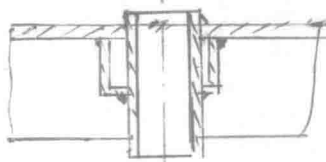
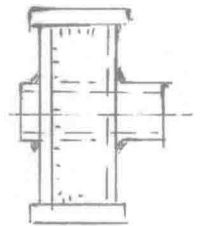
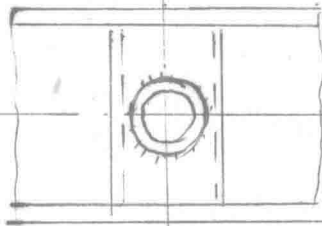
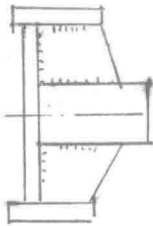
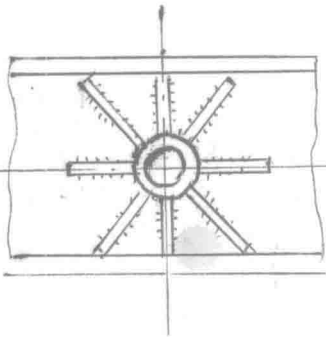
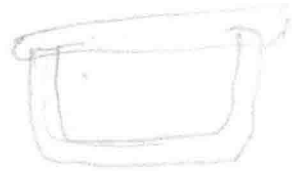
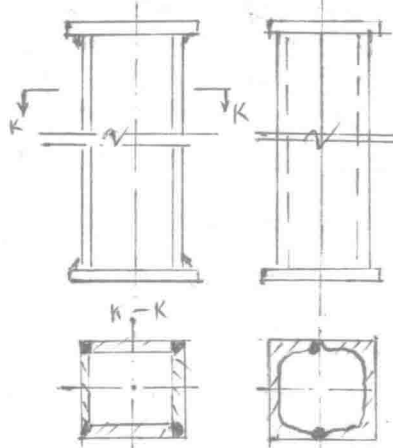
(二) 控制焊接残余变形的措施

I 设计措施

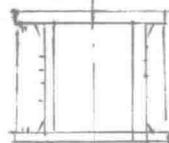
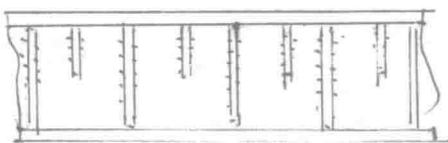
1. 尽可能减少焊缝数量, 避免不必要的焊缝

① 选用型材和冲压件来组焊, 这样既可以用较少肋板和零件, 从而减少焊缝。

譬如:



② 批量不大的机身结构, 宁可稍大一些加板厚也要减少肋板



2. 选择合理的焊缝尺寸和形状

减少合金量

南京机械高等专科学校备课笔记

① 对于厚度较大对接接头选取对接切口, 用X型切口代替V型切口, 熔敷金属量少 $\frac{1}{2}$, 还可采用U型双U型窄间隙深坡口, 减少焊接变形。

② 在保证足够承载能力情况下, 应尽可能采用小的焊缝尺寸。但并非越小越好。焊缝太小, 冷却速度过大, 易产生焊接缺陷如裂纹, HAZ硬化过大, 变脆等。为此对于低碳钢规定了最小允许焊脚K (角焊缝)

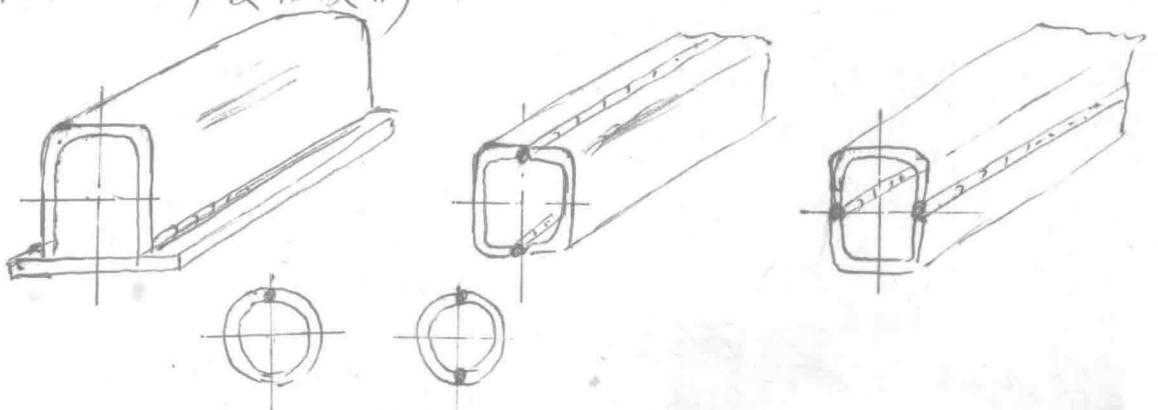
板厚 δ mm	≤ 6	7~18	19~30	31~50	51~100
min K mm	3	4	6	8	10

③ 对于受力较大的T形或十字形焊接接头, 在保证相同强度条件下, 采用开坡口角焊缝比一般角焊缝可以大大减少焊缝金属, 减少焊接变形。

④ 设计的结构应尽可能使大多数焊缝可采用自动焊, 焊接变形比手焊小, 对于薄板结构采用CO₂保护焊代替手焊或气焊, 用接触点焊代替熔钎焊缝, 减少变形, 减少矫正。

3. 合理选择结构形式和安排焊缝位置

① 安排焊缝应尽可能使对于截面中心轴, 尽量使焊缝靠近中心轴, 以减少弯曲变形。

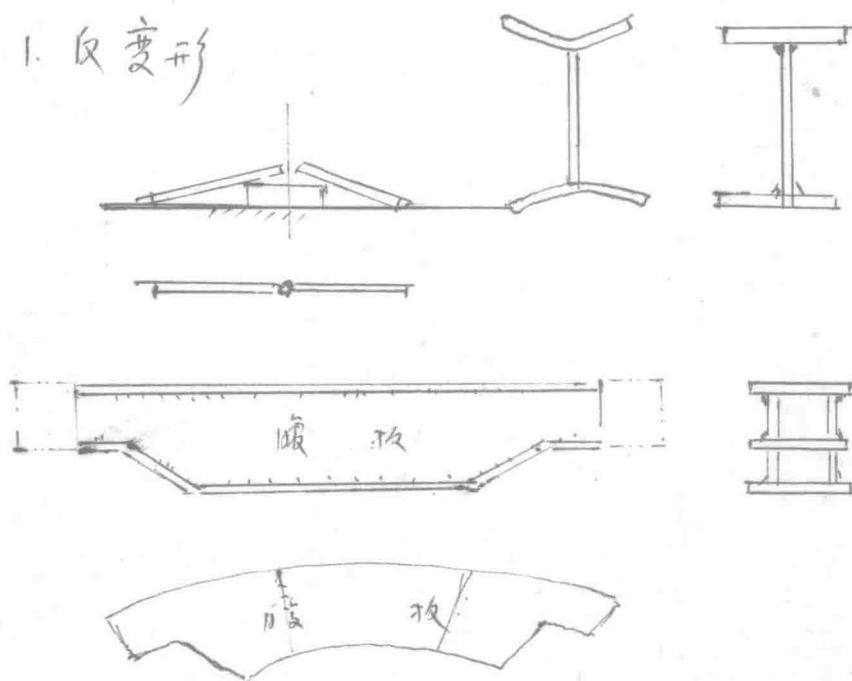


南京机械高等专科学校备课笔记

- ② 由于横向收缩通常要比纵向收缩显著,因此允许将焊缝布置在平行于主要焊接变形最小方向。
- ③ 总以在构造上做到构成焊接的件数少。可以分部件再总装焊接,并使焊接应力减小。
- ④ 有时可使用胎具和夹具。

II. 主要措施

1. 反变形



2. 刚性固定 用于焊接刚性较小的结构,使用胎具或临时支承办法,以增加结构在焊接时的刚性

法三盘 用3个夹固定法三盘

法板加空块

焊板焊缝附近点固角钢

南京机械高等专科学校备课笔记

3. 选用合理焊接接头形式和尺寸

$$q = \frac{0.24 \sqrt{I_0}}{V} \quad \text{J/cm}$$

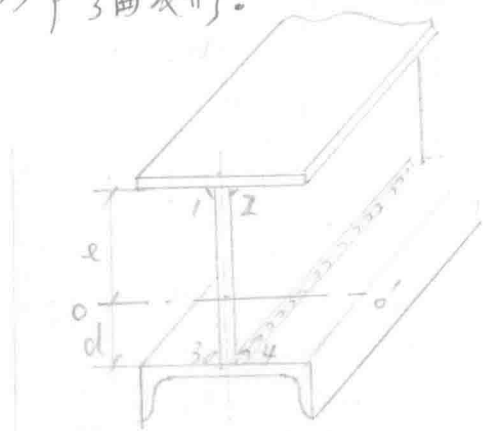
① 选用能量利用率高的焊接接头形式，如 CO₂ 保护焊、等高对接焊代替气焊、手工电弧焊或普通板焊接，减小变形，用合金钢束可焊转齿加后齿轮。



② 采用强力焊接线能量 q 减小焊接变形，但因生产复杂，焊接线能量不能过低。在焊缝两侧采用直接水冷或水冷铜块散热， q 限制和缩小焊接温度场，减小变形。但此法对效率大为宜慎用。此外，用退火焊和跳坎焊减小温度场，也可减少变形。

③ 焊接不对称结构，通过选用不同焊接参数，可以控制和调节弯曲变形。

如图： $a > d$



因焊接规范 1, 2 变形比 3, 4 大； $\therefore$ 焊 1, 2 用比 3, 4 小的焊接参数，可减小弯曲变形抵消。

4. 选择合理的装配焊接顺序 (例)

3-1-2 焊 3，焊后 3 校直收落

$f = f_1 + f_2 + f_3$ 在中 4 和 0-0 以下，应比 2 及 f_3 1" 纵向收落 — f_1 (也 3 和 2 和 4 7.)

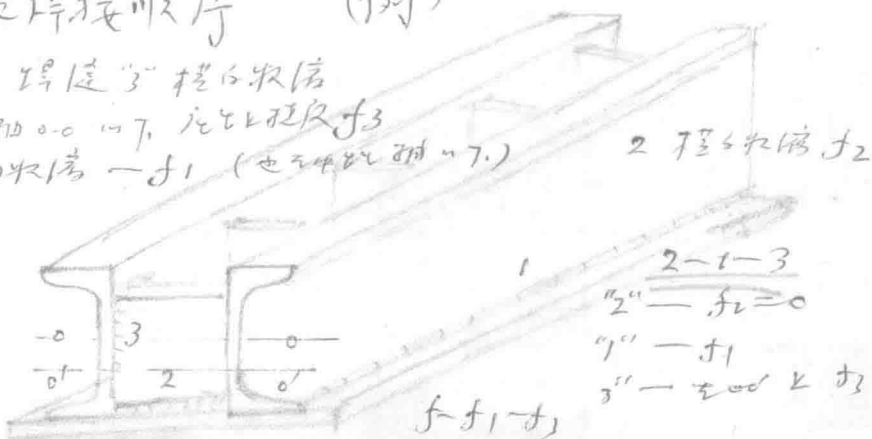
2 7 3 4 收落 f_2

1-2-3 1" — f_1

2" — f_2

3" 在 0-0 以上 3" — f_3

$f = f_1 + f_2 + f_3$



2-1-3

2" — $f_2 = 0$

1" — f_1

3" — 在 0-0 以上 f_3

$f = f_1 + f_2$

南京机械高等专科学校备课笔记

四 焊接变形的矫正

都是利用外界因素(加外力,用火焰加热……)在已经变形的物件上造成与焊接变形相反^{塑性}的变形,可消除焊接变形(相互抵消)

1. 机械矫正法, 利用压力机、矫正机, 如多辊矫直机, 管轮辗压机等机械矫正或用锤击等机械方法产生与焊接塑性变形相反^{塑性}的变形使原来缩短部分得到延伸, 达到矫正目的。
2. 火焰矫正法, 利用火焰加热时产生局部膨胀变形, 使较长金属在冷却后缩短来消除变形。主要应控制温度^{塑性}和加热位置。

对低碳钢和普通低合金钢常用 $600 \sim 800^{\circ}\text{C}$ ($575 \sim 650^{\circ}\text{C}$) 加热温度, 然后喷水急冷。需要在特定区域按一定顺序或形状反复加热, 一般是点状或线状。

