

船舶大合拢焊缝性能与热影响区相组成之间的关系

1. 远洋船舶大合拢垂直焊缝性能要求

依据CCS《材料与焊接规范2019》，性能指标分别为：屈服强度抗拉 $\sigma_t \geq 365$ MPa，强度为 $\sigma_t = 490 \sim 620$ MPa，伸长率时 $\delta \geq 21\%$ ， -20°C 时冲击功大于等于34J。根据相关标准要求，硬度值HV10 ≤ 350 ，试验结果合格，焊缝力学性能试验取样示意图如图1所示。

(1) 弯曲试验。根据中国船级社《材料与焊接规范》的要求进行侧弯试验。每次评定4个试样，试样规格：10 mm \times 25 mm \times 260 mm，弯心直径 $d = 4t$ ，弯心角为 180° 。

(2) 硬度试验。采用维氏硬度计测试粗晶区硬度，载荷为49 N。每个评定进行一组硬度试验。

(3) 拉伸试验与冲击试验。拉伸试验每次评定三个试样；冲击试验每次评定进行3个位置的冲击，每个位置3个试样，进行 -20°C 的“V”形缺口Charpy冲击试验。

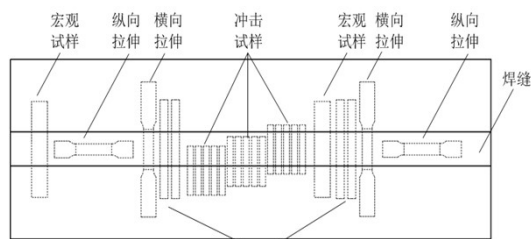


图1 焊缝力学性能试验取样示意图

2. 组织决定性能

相组成分析原理如下：图2为船用DH36钢的连续冷却转变曲线（CCT曲线），图3为其对应的不同冷却速度下的粗晶区的相组成及体积分数。由图2可以看出，当粗晶区的冷却速度小于1 °C/s时，焊接后粗晶区由铁素体(F)和珠光体(P)两相组成，在此冷却速度区间内F的体积分数随着冷却速度的增加而降低，P的体积分数随着冷却速度的增加而增加；当冷却速度大于1 °C/s时，粗晶区内的贝氏体(B)体积分数急剧增加，而P的量急剧减少到基本消失；当冷却速度进一步增加到大于60 °C/s时，粗晶区出现马氏体(M),并且M的含量随着冷却速度的增加而增加。

图3中的冷却速度与铁素体(Ferrite)、珠光体(Pearlite)、贝氏体(Bainite)、马氏体(Martensite)体积分数(VF, Volume Fraction) 的定量关系如式(1)、式(2)所示：

当 $0 < \omega_c \leq 60^\circ\text{C/s}$ 时

$$\begin{cases} VF_{\text{Ferrite}} = -1.552\omega_c^{0.04767} + 2.108 \\ VF_{\text{Pearlite}} = 0.08306e^{-((\omega_c - 0.4388)/0.2736)^2} + 0.5221e^{-((\omega_c - 1.387)/1.388)^2} \\ VF_{\text{Bainite}} = 1 - VF_{\text{Ferrite}} - VF_{\text{Pearlite}} \\ VF_{\text{Martensite}} = 0 \end{cases}$$

当 $60 < \omega_c \leq 100^\circ\text{C/s}$ 时

$$\begin{cases} VF_{\text{Ferrite}} = -1.552\omega_c^{0.04767} + 2.108 \\ VF_{\text{Pearlite}} = 0 \\ VF_{\text{Bainite}} = -0.006318\omega_c + 1.167 \\ VF_{\text{Martensite}} = 1 - VF_{\text{Ferrite}} - VF_{\text{Bainite}} \end{cases}$$

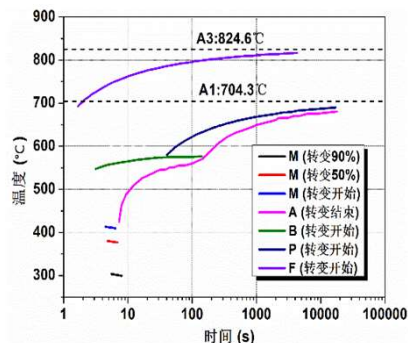


图2 DH36钢的CCT曲线

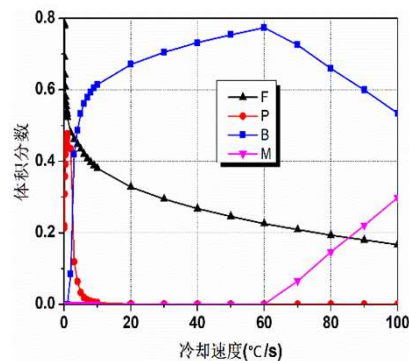


图3 不同冷却速度下近缝区的相组组成

热影响区连续冷却转变曲线 (CCT曲线)分析方法

热影响区CCT图分析方法

CCT曲线指的是过冷奥氏体连续转变温度曲线。它反映了在连续冷却条件下过冷奥氏体的转变规律，是分析转变产物组织与性能的依据，也是制订热处理工艺的重要参考资料。

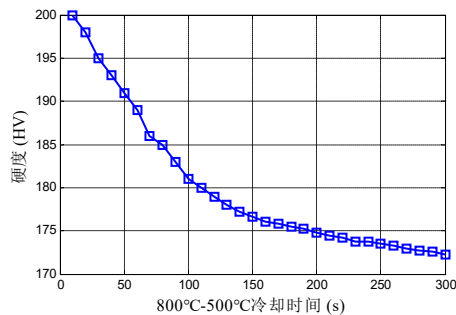
CCT曲线反映的是过冷奥氏体的冷却时组织转变的规律，针对DH36而言，研究其冷却时组织的变化规律对以后的焊接工作有指导性的作用。焊缝的组织决定性能，而我们在焊接过程中只能观察到最终成型的组织，而对于焊缝在冷却过程中进行了怎样的组织变化一无所知。但是如果我们将焊缝区域冷却时的温度记录下来，用它冷却时的温度来进行CCT曲线的实验，可以得出焊缝金属冷却时的组织变化，帮助我们更好的分析焊缝组织^[6]。我们也可以根据绘制的CCT曲线来控制冷却速度，得到我们想要的组织结构，使焊缝有良好的力学性能。

当粗晶区的冷却速度小于 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时，焊接后粗晶区由铁素体（F）和珠光体（P）两相组成，在此冷却速度区间内F的体积分数随着冷却速度的增加而降低，P的体积分数随着冷却速度的增加而增加；当冷却速度大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时，粗晶区内的贝氏体（B）体积分数急剧增加，而P的量急剧减少到基本消失；当冷却速度进一步增加到大于 $60^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时，粗晶区出现马氏体（M），并且M的含量随着冷却速度的增加而增加。

小的 $t_{8/5}$ 时间（高的冷却速度）对应的粗晶区的相组成大部分为贝氏体和马氏体组织。马氏体和贝氏体较铁素体和珠光体有更高的硬度和强度，所以低的 $t_{8/5}$ 时间粗晶区的硬度较高。但是，当粗晶区的硬度过高时，其韧性将下降，在焊接工艺设计过程中要综合考虑其热影响区的硬度和韧性。

焊缝性能与热循环关键参数之间的关系

$t_{8/5}$ 指热影响区在800°C--500°C之间的时间长度。当 $t_{8/5}$ 较小时，粗晶区以硬度较高的板条状的贝氏体组织为主；随着 $t_{8/5}$ 增大，板条状贝氏体组织显著减少，分散的岛状组织数量增多，会逐渐出现硬度较小的晶界铁素体；随着 $t_{8/5}$ 继续增大，晶界铁素体更加粗大化，但岛状组织数量减少，但尺寸相差不大。因此焊接粗晶区的硬度均随着 $t_{8/5}$ 的增加而下降，其规律如下图所示。

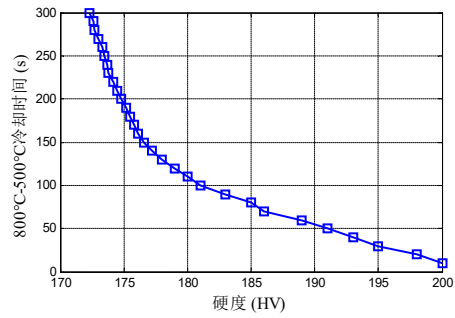


焊接粗晶区硬度与 $t_{8/5}$ 之间的关系

对上述数据进行多项式拟合后，可得到硬度与 $t_{8/5}$ 之间的数学关系：

$$H = -1.76t_{8/5}^3 + 0.001297t_{8/5}^2 - 0.3367t_{8/5} + 204.1$$

$t_{8/5}$ 计算方法如下



对上述数据进行多项式拟合后，可得：

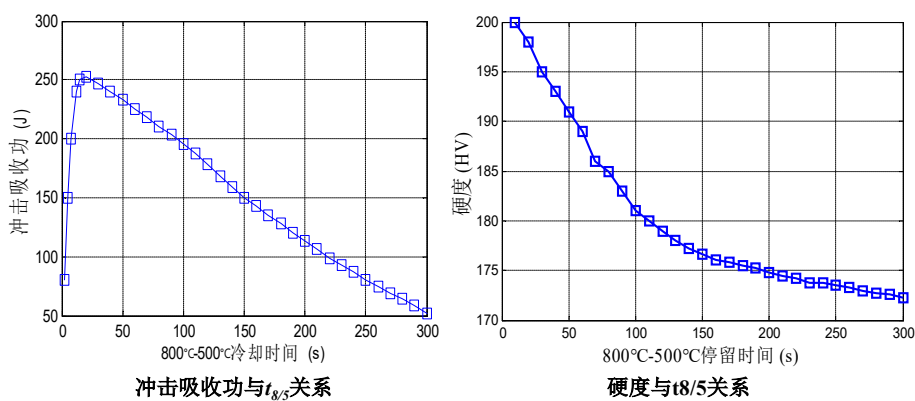
$$t_{8/5} = p_1 H^5 + p_2 H^4 + p_3 H^3 + p_4 H^2 + p_5 H + p_6$$

式中， $p_1 = -9.913e^{-5}$; $p_2 = 0.0947$; $p_3 = -36.17$;

$p_4 = 6906$; $p_5 = -6.591e^5$; $p_6 = 2.515e^7$

热循环关键参数(线能量、 $t_{8/5}$ 及冷却速度)设计原理

(1) 依据 $t_{8/5}$ 与冲击吸收功、 $t_{8/5}$ 与接头硬度的关系，选择 $t_{8/5}$



(2) 根据选取 $t_{8/5}$ ，根据经验公式计算焊接所需的线能量

首先按照公式(1)来计算 E ：

$$E_1 = 4\delta \sqrt{\pi\lambda c\rho t_{8/5} \left[\left(\frac{1}{500-T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800-T_0} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

再采用公式 (2) 计算E:

$$E_2 = 4\pi\lambda t_{\delta/5} \left[\left(\frac{1}{500-T_0} \right) - \left(\frac{1}{800-T_0} \right) \right] \quad (2)$$

式中 E----焊接线能量 (J/cm); λ ----导热系数[W/(cm·°C)];

$c\rho$ ----容积比热容[J/(cm³·°C)]; δ ----板厚 (cm);

T_0 ----初始温度 (°C)。

λ 、 $c\rho$ 等热物理常数是随着温度而变化的,反复试验证明,当 $\lambda = 0.29$ J/(cm·S·°C), $c\rho = 6.7$ J/(cm³·°C)计算时可得到较为正确的结果。

将所计算得到的 E_1 和 E_2 分别代入临界板厚公式 (3) :

$$\delta_r = \sqrt{\frac{E}{2c\rho} \left[\left(\frac{1}{500-T_0} \right) - \left(\frac{1}{800-T_0} \right) \right]} \quad (3)$$

如果 $\delta_{r1} > \delta$ 、 $\delta_{r2} > \delta$ 时, 取 $K = E_1$

如果 $\delta_{r1} < \delta$ 、 $\delta_{r2} < \delta$ 时, 取 $K = E_2$

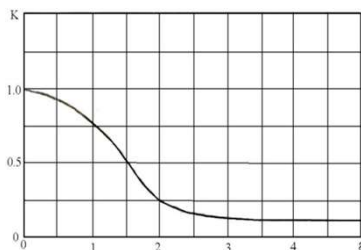
当 $\delta_{r1} < \delta < \delta_{r2}$ 时, 取 $K = \frac{|\delta - \delta_{r1}|}{|\delta_{r2} - \delta_{r1}|} |E_2 - E_1| + E_1$

则E在 $[K - 10, K + 10]$ 范围内取值。

当焊件厚度在8mm与25mm之间时, 熔合线处冷却速度 ω_c 与焊接线能量E之间的关系为:

$$\begin{cases} \omega_c = -K \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{E} \\ K = f(\varepsilon) \\ \varepsilon = \frac{2E}{\pi\delta c\rho(T - T_0)} \end{cases}$$

ε 为无量纲系数, 其范围[0,5], K与 ε 的关系如下图所示:



K与ε的关系

拟合之后的关系为:

$$K = f(\varepsilon) = 1.164e^{-\left(\frac{\varepsilon-0.2918}{1.22}\right)^2} - 0.3132e^{-\left(\frac{\varepsilon-0.4351}{0.6552}\right)^2} + 8.553 \times 10^{13} e^{-\left(\frac{\varepsilon-1436}{244.8}\right)^2}$$

因此先求出 ε 、K, 代入上式, 即可求出中厚板的冷却速度 ω_c 。

(3) 由焊接线能量 $E \rightarrow$ 熔合区冷却速度 ω_c

ω_c 是影响焊接热影响区组织与性能的主要因素。在热循环曲线上，每一温度下的瞬时冷却速度都不相同，各点的冷却速度可用该点切线的斜率表示。试验证明，焊缝和熔合线附近的冷却速度几乎相同，一般只需计算焊缝在 540°C 时的冷却速度即可。

当板厚小于 8mm 时，熔合线处冷却速度 ω_c 与焊接线能量 E 之间的关系为：

$$\omega_c = \frac{dT}{dt} = -\frac{2\pi\lambda c\rho(T_c - T_0)^3}{(q/v\delta)^2} = -\frac{2\pi\lambda c\rho(T_c - T_0)^3}{(E/\delta)^2}$$

当焊件厚度大于 25mm 时，熔合线处冷却速度 ω_c 与 E 之间的关系为：

$$\omega_c = \frac{dT}{dt} = -2\pi\lambda \frac{(T_c - T_0)^2}{q/v} = -2\pi\lambda \frac{(T_c - T_0)^2}{E}$$

式中， E ----焊接线能量[J/cm]； T_c ----瞬时温度[$^\circ\text{C}$]；
 T_0 ----焊件初始温度[$^\circ\text{C}$]； q ----单位时间输入热量[J/s]；
 v ----焊接速度[cm/s]； λ ----导热系数[W/(cm \cdot $^\circ\text{C}$)]；
 $c\rho$ ----容积比热容[J/(cm 3 \cdot $^\circ\text{C}$)]； δ ----板厚 (cm) ；
 T_0 ----初始温度 ($^\circ\text{C}$) 。

热循环关键参数与焊接工艺之间的关系

焊接工艺参数与焊接线能量的关系

当焊丝熔化速度与焊接速度之间处于平衡状态时，焊接速度等于单位时间熔化金属的填充体积和坡口截面积之比，即：

$$v = \frac{V}{S}$$

在不考虑飞溅损失时，可认为焊丝熔化速度和坡口截面积之比为：

$$v = \frac{v_m}{S}$$

而焊丝的熔化速度与焊接电流成正比： $v_m = k_f I$

焊接线能量为：

$$E = \frac{IU}{v}$$

因此，

$$E = \frac{1}{k_f} \cdot US$$

以上公式中：

v —焊接速度 (cm/s)； V —单位时间焊丝熔化金属体积 (cm³/s)；

v_m —焊丝的熔化速度 (cm³/s)； S —坡口截面积 (cm²)；

I —焊接电流 (A)； U —电弧电压 (V)； E —焊接线能量 (J/cm)；

k_f —焊丝的熔化系数 (cm³/A·s)，大小取决于焊丝的电阻率、直径、伸出长度等，当这些参数不变时，其值为常数。

焊接参数(焊接电流、焊接电压及焊接速度)设计原理

焊接电流、焊接电压及焊接速度设定

a. 焊接电流选择

垂直自动焊时，由于电流密度大，电源超过一般CO₂焊短路过渡的临界电流值，熔滴显示滴状过渡形式。其特点是飞溅小，电弧燃烧稳定，且熔敷速度大，因此必须选用合适的电流。过大过小的焊接电流都会影响焊接过程的稳定性和焊道的成形良好。经验焊接参数如下表所示

焊接电流及焊接电压经验参数表

板厚(mm)	电流(A)	电压(V)
12-14	290-350	29-35
16-20	320-400	32-37
21-25		33-45
26-33		34-42

b. 电压设计原理

焊接电压与电弧长度有关，一般而言，电弧长度越长，焊接电压越大。电弧电压的选用值须与焊接电流相匹配，在其它规范参数不变的情况下，电弧电压增大，焊缝宽度增加，过高的电弧电压会出现焊缝咬边；电压较小时，会导致焊接过程中飞溅严重。但过低的电弧电压会使电弧燃烧不稳定。因此在保证焊接过程稳定和焊缝成形良好的情况下，应尽量降低电弧电压以防止气孔和减少合金元素的烧损都是有利的。

电压设定方法：有两种焊接方法，一种是焊速匹配焊接，另一种是焊速不匹配焊接，当焊速不匹配时，焊接一段时间之后焊接将失败。

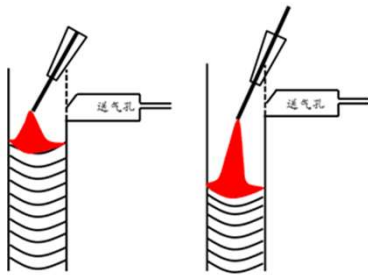
焊接速度设计原理

合适的焊接速度视焊丝熔化速度而定。它与焊丝熔化速度间的关系，以水冷滑块内金属液面距进气口底部为(5-10)mm较合适。

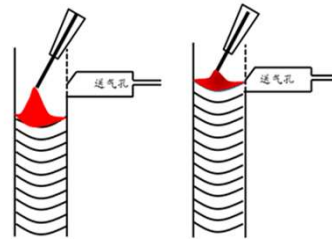
1) 焊速匹配条件下: $v=KI^2$

2) 焊速不匹配条件下: $v=\frac{IU}{E}$

当设定焊接速度V大于平衡焊速时，熔池液面相对滑块的位置逐渐降低，弧长逐渐拉长，最后电弧失去维持能力，电弧熄灭，焊接失败；当设定焊接速度V小于时，熔池液面相对滑块的位置升高，弧长逐渐缩短，最后焊丝深入液面以下，电弧熄灭，焊接失败。如下图所示。



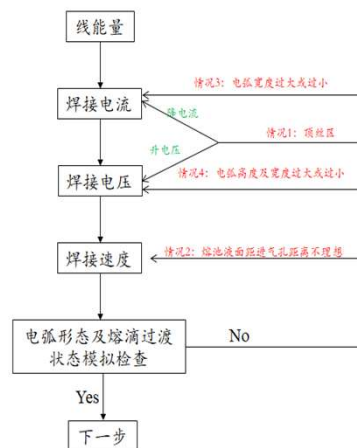
焊接速度 > 平衡焊速



焊接速度 < 平衡焊速

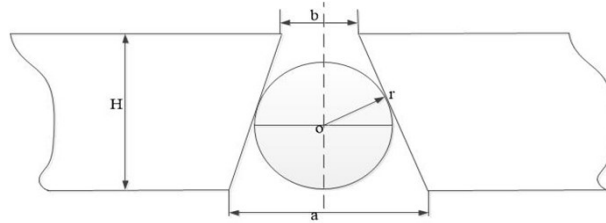
电弧作用临界半径计算及意义

设计流程



一般地，DH36钢适合在130kJ/cm以下热输入进行焊接。垂直气电焊的焊接电流和电压的范围比较大，要根据实验条件进行进一步的选择，通过理论设计和试焊的方式确定最佳的焊接电压、焊接电流及焊接速度的匹配。

坡口参数包括 (a, b, 及H), 坡口尺寸示意图如下图所示



坡口尺寸示意图

式中, 板厚用H表示, 坡口角度用 α 表示, a、b分别为上下间隙。S单位 cm^2 。

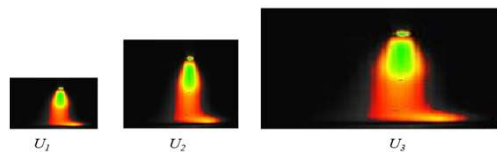
测量出a、b、H后, 由计算机通过下式计算临界半径R:

$$R = \frac{2(a^2 + ab + b^2)H}{3(a+b)\sqrt{(a-b)^2 + 4H^2}}$$

电弧作用临界半径是决定能否获得较好焊接质量的重要因素, 电弧作用临界半径与电弧形态设计具有直接关系。

① 电弧形态效果

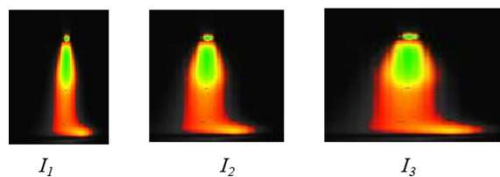
同其他气保焊相同, 随焊接电压的增大, 弧长越长, 电弧宽度越大。焊缝熔深随电弧电压变化关系复杂, 先增大后减小。焊接电压对电弧形态影响如下图所示。过高的电弧电压会出现焊缝咬边。过低的电弧电压会使电弧燃烧不稳定。因此在保证焊接过程稳定和焊缝成形良好的情况下, 应尽量降低电弧电压, 这对防止气孔和减少合金元素的烧损都是有利的。



不同电压下的电弧形态($U_1 < U_2 < U_3$)

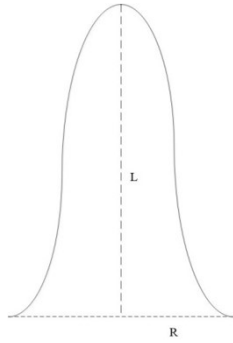
② 电弧宽度效果

对于普通气保焊, 电流越大, 电弧高度不变, 电弧热源半径越大, 如图4-2所示。随焊接电流增大熔宽和熔深均增大。过大过小的焊接电流都会影响焊接过程的稳定性和焊缝成形。



不同焊接电流下的电弧形态($I_1 < I_2 < I_3$)

a) 电弧宽度及高度效果示意图

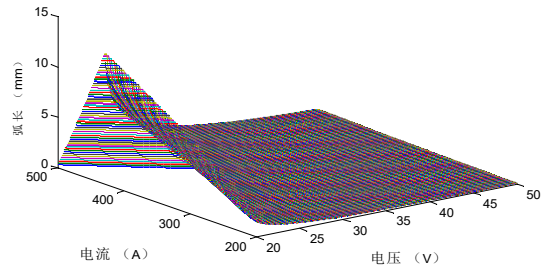


R为电弧宽度；L为电弧高度。

$$R = 0.054U + 0.011I$$

b) 弧长和电流电压关系：

$$L_{\text{弧}} = \left(\frac{U_{\text{弧}} - 6 - \sqrt{(U_{\text{弧}} - 6)^2 - 12 * 6.32 * 0.01 * I}}{6} \right)^2$$



弧长同焊接电压及焊接电流的关系

焊缝无损检测方法 及 评定标准

(1) 焊缝表面检测过程与标准，由学生完成

(1) 对接焊缝余高下限不得低于钢板表面，上限不得超过下列值：

当板厚 $\leq 10\text{mm}$ 时，为 3.5mm ；

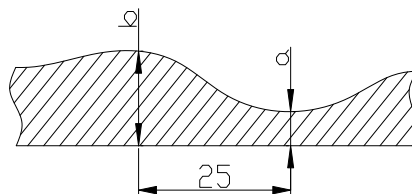
当板厚 $> 10\text{mm}$ 时，为 4.5mm 。

(2) 焊缝外形检验、

焊缝外形应均匀，焊道与焊道、焊道与基体金属之间应平缓地过度，不应有截面的突然变化。

焊道表面凹凸，在焊道长度 25mm 范围内，高低差 $b-a$ 不得大于 2mm ；

对接焊缝焊道宽度差，在 100mm 范围内不得大于 5mm ，如下图所示。

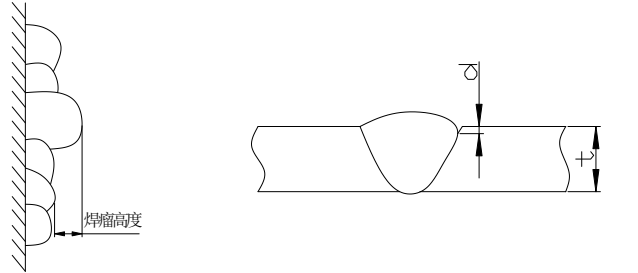


(3) 焊缝表面质量检验

焊缝不得存在表面裂纹、未熔合、夹渣、烧穿和未填满的弧坑。

焊缝表面不允许有高于2mm的淌挂的焊瘤。

焊缝表面不允许存在由于熔化金属淌到焊缝以外未熔化的基体金属上的满溢。



(4) 船体外板、强力甲板和舱口围板等重要部位的对接焊缝，咬边深度d允许值为：

当板厚 $t \leq 6\text{mm}$ 时， $d \leq 0.3\text{mm}$ ，局部 $d \leq 0.5\text{mm}$ ；

当板厚 $t > 6\text{mm}$ 时， $d \leq 0.5\text{mm}$ ，局部 $d \leq 0.8\text{mm}$ 。

(5) 船体外板、强力甲板和舱口围板等重要部位以及要求水密的焊缝不允许有表面气孔。

(6) 其它部位的焊缝，1m长范围内允许存在2只表面气孔，气孔的最大允许直径：

当构件的板厚 $t \leq 10\text{mm}$ 时，为1mm；

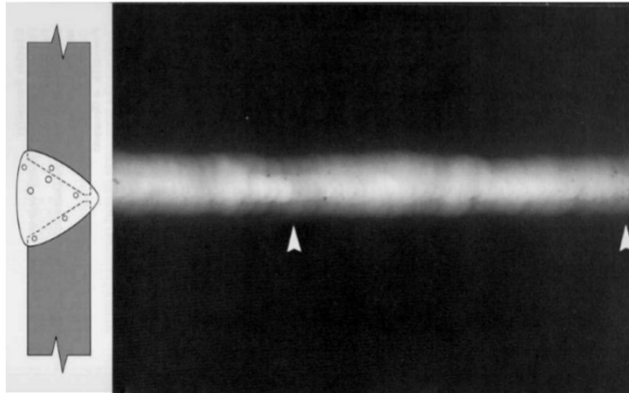
当构件的板厚 $t > 10\text{mm}$ 时，为1.5mm。

(2) x射线检测过程与标准，由计算机与学生协同完成。辐射危险、检测简易过程特效。(待建)

第一部分：特效

全景：垂直吊篮放置射线机，遥控操作射线机。





要有一个标尺工具，包括纵向和横向标尺。编号是底片对应于焊缝探伤位置，评片结论输入框是学生通过评片后输入的结论（根据标准给出的焊缝级别）。（最好能实现点击缺陷可以看到缺陷的尺寸。）

缺陷产生随机：1、尺寸随机，在给定期别下尺寸多样化组合；2、位置随机（需要评级的需要在10X10mm的方框内，否则作为不同的评级区域），缺陷在底片上的位置是随机的，同一个评定区内必须有一定数量的缺陷。

第二部分：评判标准

底片评定范围内的缺陷按性质分为裂纹、未熔合、未焊透、条形缺陷和圆形缺陷。依据CB/T3558船舶钢焊缝射线探伤等级评定方法如下：

①焊缝质量的分级

根据底片评定范围内存在缺陷的性质、数量和密集程度，焊缝质量等级划分为I、II、III、IV、V级。

②质量分级的一般规定

- 1) 只要出现裂纹、未熔合或未焊透，即评定为V级。
- 2) 当各类缺陷评定的质量级别不同时，以质量最差的级别作为焊缝质量等级。

③圆形缺陷的分级评定

- 1) 圆形缺陷评定区取为一个长边与焊缝方向平行的矩形，其尺寸见表1。圆形缺陷评定区应选在缺陷最严重的区域。
- 2) 在圆形缺陷评定区内或与圆形缺陷评定区边界线相割的缺陷均应划入评定区内。将评定区内的缺陷按表2的规定换算为点数，按表3的规定评定焊缝的质量级别。

表1 缺陷评定区尺寸（单位为毫米）

母材公称厚度 ^a	≤25 ^a	>25~100 ^a	>100 ^a
评定区尺寸 ^a	10×10 ^a	10×20 ^a	10×30 ^a

表2 缺陷点数换算表

缺陷长径 mm ^a	≤1 ^a	>1~2 ^a	>2~3 ^a	>3~4 ^a	>4~6 ^a	>6~8 ^a	>8 ^a
缺陷点数 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	6 ^a	10 ^a	15 ^a	25 ^a

表3 各级允许的圆形缺陷点数

评定区 ^a mm×mm ^a		10×10 ^a			10×20 ^a		10×30 ^a
母材公称厚度 mm ^a		<10 ^a	>10~15 ^a	>15~25 ^a	>25~50 ^a	>50~100 ^a	>100 ^a
评定 等级 ^a	I级 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a
	II级 ^a	3 ^a	6 ^a	9 ^a	12 ^a	15 ^a	18 ^a
	III级 ^a	6 ^a	12 ^a	18 ^a	24 ^a	30 ^a	36 ^a
	IV级 ^a	9 ^a	18 ^a	27 ^a	36 ^a	45 ^a	54 ^a
	V级 ^a	缺陷点数大于IV级或缺陷长径尺寸大于T/2 ^a					

注：当母材公称厚度不同时，取较薄板的厚度。^a

- 3) 当缺陷的尺寸小于表10的规定时，分级评定时不计该缺陷的点数。质量等级为I级的焊接接头和母材公称厚度 $T \leq 5\text{mm}$ 的II级焊接接头，不计点数的缺陷在圆形缺陷评定区内不应多于10个，否则其焊缝质量等级应降低一级。
- 4) 由于材质或结构等原因，返修可能会产生不利影响的焊缝，各级别的圆形缺陷点数可放宽1点~2点。
- 5) 对致密性要求高的焊缝，制造方底片评定人员应考虑将圆形缺陷的黑度作为评级的依据，将黑度大的圆形缺陷定义为深孔缺陷，当评定区域内存在深孔缺陷时，焊缝质量评为V级。

④ 条形缺陷的分级评定

- 1) 单个条形缺陷按表4的规定进行分级评定。

表4 各级焊缝允许的单个条形缺陷长度（单位为毫米）

评定等级 ^a	单个缺陷的允许长度 ^a
I ^a	$T/3$ ，最小 ^b 4；最大 ^c 16 ^a
II ^a	$T/2$ ，最小 ^b 6；最大 ^c 24 ^a
III ^a	$2T/3$ ，最小 ^b 8；最大 ^c 32 ^a
IV ^a	$5T/6$ ，最小 ^b 10；最大 ^c 40 ^a
V ^a	大于IV级 ^a

^aT——被检焊缝母材厚度，两侧母材厚度不同时取较薄侧母材厚度；
^b最小——指T小于某一厚度时的允许值；如I级焊缝，当 $T \leq 12\text{mm}$ 时，允许单个缺陷长度为4mm；
^c最大——指T大于某一厚度时的允许值；如I级焊缝，当 $T \geq 48\text{mm}$ 时，允许单个缺陷长度为16mm。

2) 相邻的条形缺陷的间距（最短的直线距离）不大于其中较长缺陷尺寸时，将各缺陷的长度及间距相加，作为单个缺陷的长度，按表11评定。

3) 在任意12T焊缝长度内，各级焊缝中条形缺陷的累计长度按表5评定。

表5 12 T焊缝长度内各级焊缝允许的条形缺陷累计长度（单位为毫米）

评定等级 ^①	条形缺陷累计长度 ^②
I ^③	≤T ^④
II ^③	≤2T/3 ^④
III ^③	≤2T ^④
IV ^③	≤3T ^④
V ^③	大于IV级 ^④

4) 被检焊缝长度小于12T时，表12中的限值可按比例折算。当折算后的允许累计长度小于单个缺陷的允许长度时，以单个缺陷的允许长度作为限值。

⑤ 综合评级

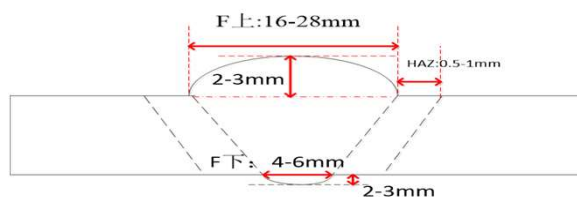
在圆形缺陷评定区内同时存在圆形缺陷和条形缺陷时，先对圆形缺陷和条形缺陷分别评定级别，再将两者级别之和减一作为综合评级的质量等级，最差为V级。

⑥ 报告样式

产品名称 ^①	大合拔纵缝 ^②	产品编号 ^③	□	材质 ^④	DH36 ^⑤	坡口形式 ^⑥	V型 ^⑦
检测厚度 ^⑧	22mm ^⑨	焊接方法 ^⑩	垂直气电立焊 ^⑪	焊工代号 ^⑫	XX ^⑬	检测标准 ^⑭	CB/T3558-2011 ^⑮
技术等级 ^⑯	B级 ^⑰	射线机型号 ^⑱	XXQ-2505 ^⑲	焦点尺寸 ^⑳	2.0×2.0 ^㉑	焦距 ^㉒	600mm ^㉓
管电压 ^㉔	230KV ^㉕	管电流 ^㉖	5mA ^㉗	曝光时间 ^㉘	5分钟 ^㉙	显影时间 ^㉚	5分钟 ^㉛
显影温度 ^㉜	20℃ ^㉝	停显时间 ^㉞	20秒 ^㉟	定影时间 ^㊱	10分钟 ^㊲	定影温度 ^㊳	20℃ ^㊴
洗片方式 ^㊵	自动 ^㊶	冲水方式 ^㊷	□	冲水时间 ^㊸	□	胶片类型 ^㊹	天津 III ^㊺
验收等级 ^㊻	II级 ^㊼	探伤要求 ^㊽	100% ^㊾	干燥方式 ^㊿	□	□	□
焊缝位置/编号 ^①	底片编号 ^②	黑度 ^③	像质指数 ^④	等级 ^⑤			
□	□	2.0~4.0 ^⑥	11 ^⑦	I ^⑧	II ^⑨	III ^⑩	IV ^⑪
□	□	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	□	□
操作人 ^⑫	XXX ^⑬	初评 ^⑭	XXX ^⑮	复评 ^⑯	XXX ^⑰	审核 ^⑱	XXX ^⑲
级别 ^⑳	II ^㉑	级别 ^㉒	II ^㉓	级别 ^㉔	II ^㉕	级别 ^㉖	II ^㉗
结论 ^㉘	XX ^㉙	结论 ^㉚	XX ^㉛	结论 ^㉜	XX ^㉝	结论 ^㉞	XX ^㉟
日期 ^㊱	2020.5.6 ^㊲	日期 ^㊳	2020.5.6 ^㊴	日期 ^㊵	2020.5.6 ^㊶	日期 ^㊷	2020.5.6 ^㊸

焊接参数变化对焊接质量的影响

1. 当U值处于[33,39]V时，焊接正常。随焊接电压U增大，弧长逐渐变长，线能量E增大，HAZ宽度变宽，但熔合区宽度不变。问题： $t_{8/5}$ 时间变长，冷却速度降低，硬度变化？强度变化？在不同的电压作用下，HAZ变化具体规律？焊缝宏观形貌如下图所示。



焊缝宏观截面形貌

随焊接电压增大，HAZ区域发生变化，其余尺寸变化较小可忽略。当焊接电压为33V时，HAZ宽度为0.5mm，当焊接电压为39V时，HAZ宽度为1mm。

硬度和强度变化计算思路：根据线能量计算 $t_{8/5}$ ，根据 $t_{8/5}$ 计算强度和硬度。

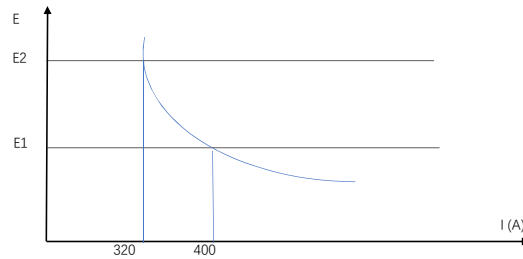
2. 当U值处于[40,45]V时，随焊接电压U增大，线能量E继续增大，但是弧长变长，气体保护效果变差，开始产生气孔缺陷及咬边缺陷，电弧进入不稳定状态，HAZ宽度更宽， $t_{8/5}$ 时间变长，冷却速度降低。

3. 当U大于45V时，提示不能正常焊接，电弧闪两到三次后，电弧熄灭，焊接失败。
4. 当U小于33V时，提示弧长过短，直接熄弧。补充内容：飞溅过大效果。

(3) 稳态焊接、电压一定时，焊接电流变化对焊接质量的影响

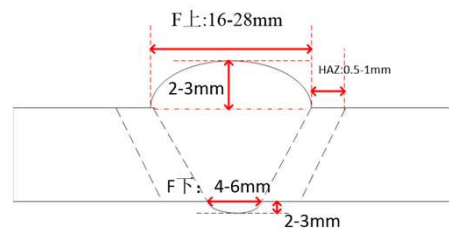
$$E = \frac{UI}{v} = \frac{UI}{KI^2} \cdot \frac{S_{\text{坡口}}}{S_{\text{焊丝}}} = \frac{US_{\text{坡口}}}{KIS_{\text{焊丝}}}$$

根据线能量计算公式，当坡口一定条件下，焊接电压一定时，线能量E和焊接电流成反比，如下图所示：



焊接线能量和焊接电流之间关系

1. 当焊接电流I值处于[320,400]范围时，正常焊接，随电流I增大，电弧变粗，尽管E降低导致HAZ宽度变窄，但熔合区变宽，t8/5时间变短，冷却速度增大，硬度变化？强度变化？焊缝宏观形貌如下图所示。



焊缝宏观截面形貌

随焊接电流增大，HAZ宽度变窄，但熔合区变宽，其余尺寸变化较小可忽略。当焊接电流为320A时，F上为16mm，F下为4mm，HAZ宽度为1mm，当焊接电流为400A时，F上为28mm，F下为6mm，HAZ宽度为0.5mm。

2. 当焊接电流I值小于320A时，电弧直径变细，尽管E增大，但无法获取适当的焊接成形(未熔合缺陷)。
3. 当焊接电流I值大于400A时，电弧大于临界半径，电弧不但都会灼伤冷却铜块，对而且侧壁的挖掘剧烈，同时较低的线能量又无法保证适当的焊接成形，容易产生咬边缺陷，焊缝成形差。