

# 压力容器焊缝返修中的断裂力学分析

戴 寰

(盐城工专机械工程系,盐城,224003)

**摘 要** 用断裂力学理论,对焊缝返修部位的熔合区和热影响区的影响进行分析。分析两区的金属组织变化,晶体结构的改变,冷热变形、各种裂纹的萌生和扩展对其母材的断裂韧性  $K_{Ic}$ , 弹性能释放率  $G_{Ic}$ , 应力强度因子, 裂纹驱动力  $G$  的关系。

**关键词** 压力容器 焊缝返修 断裂力学

**分类号** TG441.8

## 1 返修对母材断裂韧性 $K_{Ic}$ 的影响

### 1.1 返修对焊缝(WM)熔合区大小的影响

我们知道,由母材到 WM 存在着过渡区,即半熔化区和未混合区,而把二者统一构成的过渡区称为熔合区,如图 1 所示。可见,焊缝边界并不是一条“曲折”线,而是一个区域,随着焊接电流的大小、热环流不同,它就有大有小。

熔合区最大的特征是具有明显的化学不均匀性,从而引起组织的不均匀性,以至于给焊接接头的物理—化学性能带来很大的影响。它是焊接接头最薄弱的环节,也是脆性断裂和焊接裂纹最容易发生的部位。如果进行二次返修的话,那么对它造成的影响就更大。每当刨去返修前的缺陷时,总会或多或少地残留部分熔合区。这就是更容易损伤的部位。

### 1.2 返修对残留熔合区的断裂韧性 $K_{Ic}$ 的影响

#### 1.2.1 杂质增加使 $K_{Ic}$ 下降

当每次刨去焊缝缺陷时,虽然经过仔细清除,但总会遗留下一些杂质,加之残存一些过烧的氧化物,这些杂质随着返修次数的增加而增多。它们是空穴成核的根源,是引起韧窝型断裂的重要原因。其机理是夹杂物尺寸增大,可使空穴成核提前到较小的塑性应变,亦即减小了夹杂物间距。在断裂过程中,就可能使空穴减至较小尺寸,使母材塑性降低。其次是夹杂物数量增多,相应夹杂物容积百分率也增加,同样会减小夹杂物间距。施瓦尔布在评论显微组织的影响时指出:临界裂纹尖端张开位移  $\delta_c$  必与夹杂物间距  $\lambda$  成正比。而在平面应变状态下,临界裂纹尖端张开位移  $\delta_c$  与断裂韧性  $K_{Ic}$  之间的近似关系为:

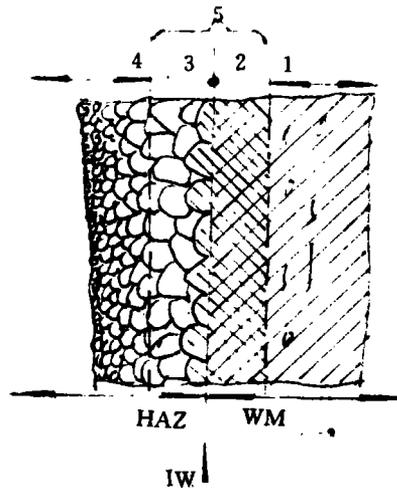


图1 熔合区构成示意图

- 1—焊缝区(富焊条成分);
- 2—焊缝区(富母材成分);
- 3—半熔化区;4—真实HAZ;5—熔合区;
- WI—真实的熔合线(焊缝边界)。

$$\sigma_c \approx \frac{K_{1c}^2}{2E\sigma_s} \quad (1-1)$$

式中  $\sigma_c$  为屈服强度,  $E$  为弹性模量。

由式(1-1)可知  $K_{1c}$  与  $\sqrt{\sigma_c}$  成正比, 显然  $K_{1c}$  与  $\sqrt{\lambda}$  也成正比。这就说明返修次数越多, 混杂到熔合区的夹杂物越多, 会使富母材料的 5 区(图 1)中夹杂物间距  $\lambda$  变得愈小, 因而导致了熔合区断裂韧度  $K_{1c}$  的下降。

### 1.2.2 碳迁移对 $K_{1c}$ 的影响

在混合区(图 1 的 3 区)中, 是液固相共存区, 由于碳在固相中的化学位高于在液相里的化学位, 因此, 它趋于从母材的固相中向液相里扩散。若二次返修, 可能会出现三次固液相共存的状态, 这就造成碳原子多次从固相向液相扩散的机会。不过固液相共存的时间短暂, 很快产生互联结晶。由母材扩散过来的碳只能集结于实际熔合线(WI)内侧形成增碳层。其次因碳是一种间隙性扩散原子, 它在金属中的扩散能力比其它元素大  $10^4 \sim 10^6$  倍, 所以碳迁移现象在多次焊接过程中, 使其增碳层的碳越积越多, 从而导致增碳层硬度强度也随之提高。由线弹性断裂力学(LEFM)观点可知: 材料屈服强度、硬度增加, 其断裂韧度  $K_{1c}$  也必然下降。同时, 碳大大增加会引起 S、P 等元素偏析加剧。这样容易造成增碳层严重脆化, 导致  $K_{1c}$  进一步下降。

### 1.2.3 晶界液化对 $K_{1c}$ 的影响

晶界液化使熔合区产生化学不均匀, 尤其是下列三点更为严重: (1) 晶界发生迁移, 使最容易扩散活动的杂质原子(S、P、C)被推动而析集于晶界, 随返修次数增加, 它们集结于晶界的数量增多, 特别是 S、P 集析是影响  $K_{1c}$  下降的重要因素。(2) 混合区因共存的固液相之间相互作用, 使溶质易于转入液相之中, 从而使晶界偏析加剧。随着返修次数增加, 相应溶质转入液相之中越多, 晶界偏析越厉害。(3) 不均匀的新相沉淀(硫化物, 碳化物, 氮化物等)都会随返修次数增加而增多。

### 1.2.4 物理不均匀对 $K_{1c}$ 的影响

半熔化区(固液共存区)在多次不平衡加热过程和冷却过程中, 存在着不同的元素和杂质。它们滞留于晶界间, 共熔点和凝固点都不一样, 易于出现空位和位错的聚集或重新分布——即所谓物理不均匀性。由于空位的高度可动性和位错运动的塞积作用, 因而往往是熔合区产生延迟裂纹的原因所在。实际上, 多次不平衡加热和冷却, 最容易使空位聚集长大, 使位错运动加快, 加之返修过程中伴有振动, 而振动又有利于推动原子离开静平衡位置, 削弱原子间的结合力或使原子价键断裂, 促使空位聚集, 并有助于位错运动的加快。此外塑性变形也促使空位形成较大的应力集中, 这不仅使  $K_{1c}$  下降, 而且给裂纹萌生和扩展创造了有利条件。

## 1.3 返修对 WM 的热影响区(HAZ)的影响

焊缝两侧的各个不同位置经历着不同的焊接热循环, 离 WI 越近, 其加热的峰值温度越高, 且加热速度和冷却速度也越大, 在焊接热循环的作用下, 焊缝两侧处于固态的母材发生明显的组织或性能变化的范围, 称为焊接热影响区(HAZ)。不言而喻, 若经过两次以上返修, 对 HAZ 的影响就更大了。对于不同的母材, 有着不同的影响; 同一母材因焊接工艺的差异, 也有不同的影响; 同时因不同的热循环对该区各部位组织又有不同的影响。多次返修使 HAZ 从高温到环境温度就像经过多次不同的特殊热处理过程一样, 特别是紧邻 WI 和过热区(也称近缝区), 除了晶粒长大之外, 还有第二相质点(碳化物, 氮化物, 碳氮化物)向基体中固溶, 引起不同

部位组织产生软化、硬化、脆化现象,从而给该区母材也造成严重影响。

### 1.3.1 返修使过热区的晶粒粗化对 $K_{Ic}$ 的影响

在 HAZ 中,因温度分布不同,离焊缝越近,其温度越接近熔点。如果不计相变所引起的影 响,那么距 WM 边界越近,温度越高,其晶粒粗化越严重。而这种晶粒粗化区离开 WM 有一微小距离,它实际上处于固液共存状态,属于半熔化区,该区晶界局部熔化而限制了晶粒长大,这种最大晶粒区域称之为过热区,也称粗晶区。若是二次返修,则该区晶粒就有三次再长大的机会。特别是返修多次加热,很容易造成晶粒异常长大,即产生第二次再结晶现象。因为每次加热可能会使一些再结晶晶粒的初生晶粒消失,向边界迅速迁移,所以使大多数一次结晶的初生晶粒消失形成了很大的第二次再结晶晶粒。这样随着返修次数增多,形成上述晶粒的机会也越多,粗化也越严重。

据 W. W 格伯里奇等人描述碳钢和合金钢的屈服强度和断裂韧度与晶粒度的关系来看:

$$\sigma_{r-120C} = 210MPa + (0.73MPa \cdot m^{1/2})d^{-(1/2)} \tag{1-2}$$

$$K_{Ic-120C} \approx 6.6MPa \cdot m^{1/2} + 0.13MPa \cdot m^{1/2}d^{-(1/2)} \tag{1-3}$$

$$\sigma_{r25C} = 572MPa + (0.11MPa \cdot m^{1/2})d^{-(1/2)} \tag{1-4}$$

$$K_{Ic25C} \approx 58.8MPa \cdot m^{1/2} + 0.16MPa \cdot md^{-(1/2)} \tag{1-5}$$

该方程也符合图 2(a,b)中的数据关系。由此可得出断裂韧度  $K_{Ic}$  与晶粒度直径的平方根成反比。也就是说晶粒度愈大,  $K_{Ic}$  愈小。同时也说明低温使用的容器,返修部位更易开裂。

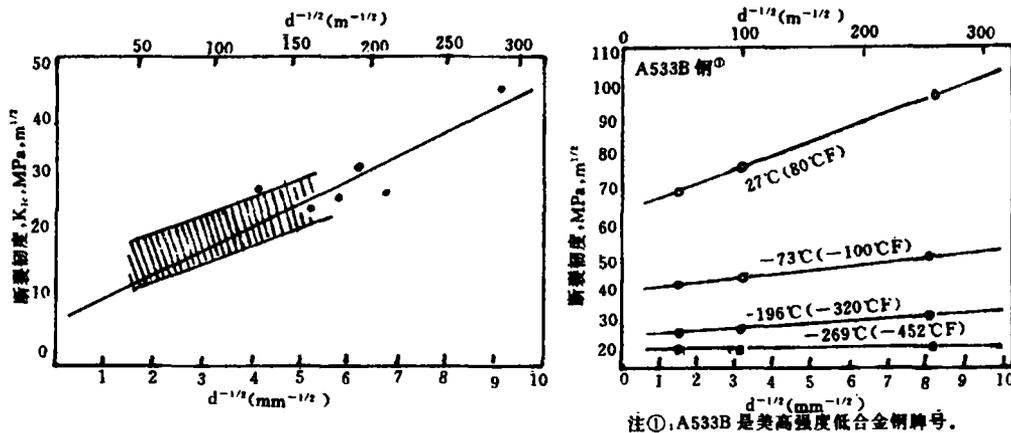


图 2 断裂韧度与晶粒度平方根倒数的关系

(a) 几种普通碳钢在  $-120^{\circ}C$  下的断裂韧度与铁素体晶粒度平方根倒数的关系;

(b) 在四种不同温度下的断裂韧度与先奥氏体晶粒度的关系

## 2 返修给 HAZ 的裂纹萌生和扩展创造了更有利的条件

在返修过程中,由于 HAZ 受不同的热循环影响,使该区母材断裂韧度严重下降,尤其是近缝区受返修时反复软化、硬化、脆化的影响,易于生成各种微裂纹,这些微裂纹在多次热循环影响下,将会迅速扩展。

### 2.1 影响近缝区微裂纹扩展的因素

一是该区对吸收热量和释放能量不平衡而引起的,二是冷热应力和应变而造成的。

2.1.1 当加热时,由于晶界液化与杂质偏析,并沿晶界运动而产生热应力,使其热裂纹张开而

扩展。当冷却释放能量超过吸收能量时,产生冷却应力,从而又导致冷裂纹张开而扩展。特别是返修时反复加热,引起沉淀相多次析出造成沉淀化一再加强,导致再热裂纹多次萌生和扩展。这样,经过几次热循环之后,使这些微裂纹扩展而互联成长裂纹,设其半裂纹长度为 $a_+$ ,则有

$$a_+ = a_R + a_L + a_0 \quad (2-1)$$

式中 $a_R$ 、 $a_L$ 、 $a_0$ 分别为热裂纹、冷裂纹、再热裂纹的半长度。

2.1.2 由于近缝区热胀、冷缩都在极其复杂的局部状态下反复进行的,不仅导致该区产生复杂的应力和弹塑性变形,而且使半熔化区在凝固过程中还会出现相变和体积变化,从而造成晶体组织和应力不均匀。一般在近缝区会产生两种应力,一种是没有外力的作用而产生的复杂应力,这种应力属瞬时应力,对裂纹萌生和扩展起重要作用。另一种应力则在返修结束后仍然存在于返修部位的近缝中,称之为永久焊接残余应力( $\sigma_{cy}$ ),这对设备投入使用后,裂纹扩展将起很大的影响。

## 2.2 返修后近缝区长裂纹扩展的条件

根据线弹性断裂学和 Gyiffith 准则,返修后投入使用的压力容器,其裂纹扩展条件是

$$K_+ = 1.1\sigma_+ \sqrt{\pi a} = K_{Ic} \quad (2-2)$$

或

$$G_+ = \frac{1.21\pi a_+ \sigma_+^2}{E} = G_{Ic} \quad (2-3)$$

式中: $K_+$ 为综合应力强度因子; $G_+$ 为综合弹性能释放率, $G_+$ 又称为裂纹驱动力; $\sigma_+ = \sigma + \sigma_{cy}$ ,为综合应力强度。

由式(2-2)、(2-3)可知,投入使用的设备,其返修焊缝 HAZ 的近缝区裂纹提前扩展有三个原因。其一是近缝区母材断裂韧度 $K_{Ic}$ 下降或临界能量释放率 $G_{Ic}$ 减小引起的。其二是母材的综合应力强度 $\sigma_+$ 增大造成的。其三是各种微裂纹扩展而互联导致的。

## 3 小结

从本文分析来看,压力容器焊缝缺陷返修,除了必须遵守有关规程、规范和 GB150、GB151 外,还必须重新测定返修部位 WM 的 HAZ 断裂韧度 $K'_{Ic}$ 或临界弹性能释放率 $G'_{Ic}$ 。在水压试验后,测出该部位裂纹总长度 $a_+$ 和残余应力 $\sigma_{cy}$ 。然后,再根据水压试验压力,用压力容器泄漏准则进行校核。

### 参考文献

- 1 陈伯鑫. 焊接冶金原理. 清华大学出版社. 1991
- 2 邹荣莲主编. 焊接理论及工艺基础. 北京航空航天大学出版社. 1994
- 3 [美]J·E 坎贝尔, W. W 格伯里奇, J. H 安德伍德. 汪一麟, 邵本逮译. 断裂力学在选材方面的应力. 冶金工业出版社. 1992
- 4 杨广里等编著. 断裂力学及应用. 中国铁道出版社. 1990