

# 再热裂纹新判据—— $(\epsilon_r)_{\min}$

罗志昌 陈佩寅\* 张伟明

(北京 清华大学)

秦瑞凯

(鞍山钢铁公司)

**摘 要** 采用等温插销试验,铁研试验和高温拉伸试验对 HQ80C 钢的再热裂纹敏感性进行了详尽的研究。用  $\epsilon_r > \epsilon_c$  的应变概念探讨了再热裂纹的形成条件,提出示意图,该图较完整地解释了影响再热裂纹各因素之间的关系。文中提出再热裂纹的新判据—— $(\epsilon_r)_{\min}$ ,讨论了判据的合理性和优点。研究结果表明,  $(\epsilon_r)_{\min}$  愈小,材料的再热裂纹敏感性愈大。

**关键词** 再热裂纹;判据;低合金高强度钢

## 0 序 言

调质低合金高强度钢由于含 Cr, Mo 等元素,有时容易出现再热裂纹问题。为评定再热裂纹倾向,不少作者采用定量的插销试验法。但是,所用判据各不相同,而且尚有某些不足之处。作者在研究鞍钢新研制的 HQ80C 钢焊接性时,为评定其再热裂纹倾向提出了更为合理的判据。

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料

试验材料采用 HQ80C 钢板,板厚 20mm,调质态供货。 $\sigma_s$  达 730 MPa。钢材的化学成分见表 1,试验采用鞍钢钢研所与杭州焊条厂合作研制的 HQ80C 钢专用焊条。焊条经 350℃ × 2h 烘干后使用。

表 1 试验材料的化学成分 (wt-%)

Table 1 Chemical composition of tested material (wt-%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	B
HQ80C	0.14	0.34	1.09	0.010	0.008	0.40	1.07	0.45	0.07	0.36	0.0027

\* 陈佩寅现在哈尔滨焊接研究所工作。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 等温插销试验法

试验参照 IIW 颁布的《插销冷裂纹试验法草案》和以往各家进行的再热裂纹试验进行<sup>[1, 2]</sup>。插销沿轧向取样, 直径为 8mm, 环形缺口。插销底板为 150mm×100mm×20mm。试验前先将插销与底板在室温焊好, 焊后在室温无载条件下放置时间 24h 以防产生冷裂。然后将焊好的插销和插销底板安装在试验机的加热炉中, 再以 20℃/min 的加热速度将试样加热到预计温度, 保温 15 分钟后加载至预定值。加载后保温时间 2h, 保温时温度波动低于 ±10℃, 记录整个过程的松弛曲线。采用 4 倍放大镜判断是否开裂。

### 1.2.2 铁研试验

参照《斜 Y 坡口焊接裂纹试验方法》进行, 检验再热裂纹时, 需将试样再进行 600℃×2h 回火, 然后按标准解剖, 测定裂纹率。

### 1.2.3 高温拉伸试验

参照 YB941—78《金属高温拉伸试验法》在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行, 试样工作段的直径为  $\phi 6 \pm 0.03$ 。试验的加热速度为 20℃/min, 保温 15min, 加载速度为 0.44mm/min, 测定  $\sigma$ — $\epsilon$  曲线和断面收缩率  $\phi$ 。模拟过热区的热循环为  $t_8/5 = 8s$ ,  $T_{\max} = 1320^\circ\text{C}$ 。

## 2 再热裂纹的新判据

### 2.1 两种裂纹形成条件

讨论裂纹形成条件时, 国内外学者常用两种概念来表达, 即应力概念  $\sigma > \sigma_c$  和应变概念  $\epsilon > \epsilon_c$ 。在讨论热裂纹时, 一般采用后者, 而冷裂纹采用前者较多。由于冷裂纹产生在室温附近,  $E$  值恒定, 不致产生与应变概念矛盾的结论。而再热裂纹则不然, 由于裂纹发生在 500~700℃ 之间, 再用  $\sigma > \sigma_c$  的应力概念来讨论问题就显得不合理, 因此从理论上阐述时常应变概念<sup>[3, 4]</sup>。但是实际试验时, 采用的判据却是以应力来表达。例如, 最低临界初始应力判据<sup>[1, 5]</sup>,  $\sigma_0 - \sigma_T$ ,  $\sigma_0^2 - \sigma_T^2$ 。鉴于这种理论和实际上的基本概念不一致, 就有必要探讨新的判据。

### 2.2 高温应力—应变曲线的测定

众所周知, 高温测量应变比测量应力困难得多。由于再热裂纹试验需要将试件放在 500~700℃ 的炉内进行, 因此测量应变显得十分困难。有些作者在推导公式时, 常从应变概念出发, 但是最后又假设材料的高温弹性模量  $E_T$  基本不变, 从而以应力表达判据。有些研究者用  $T-t_f$  的  $C$  形曲线显示再热裂纹敏感温度, 其前提是初始应变相等, 同样由于上述原因而改用初始应力相等。

但是, 事实却与假设相反, 材料在高温不论是强度, 塑性和“ $E_T$ ”都有很大的变化。为此, 作者在 Gleeble-1500 热模拟试验机上测定了 HQ80C 钢的高温  $\sigma$ — $\epsilon$  曲线, 如图 1。由图 1 可见, 500~700℃ 温度下各曲线的斜率变化很大, 其斜率不仅与室温时不同, 而且很难用某一个定值“ $E_T$ ”来表达。如果  $\epsilon$  相等, 则各温度下的  $\sigma$  不相等, 500℃ 和 700℃ 的  $\sigma$  可相差二

倍之多,反之亦然。因此,用应力概念来讨论问题难免出现种种矛盾。

### 2.3 恒温插销试验的 $\epsilon_0-t$ 曲线

用插销法做再热裂纹试验时,在恒温条件下,试验系统可以简化为恒温恒拘束模型。拘束长度由试样尺寸和加载后夹头移动的位移决定。当采用固定尺寸试样时,试样长度为定值,此时,拘束长度是初始拘束应变 $\epsilon_0$ 的单值函数。本试验即以 $\epsilon_0$ 为定量指标。测定 $\epsilon_0$ 时,仍然通过载荷传感器测出初始拘束应力,然后据根试验温度,从图1的高温 $\sigma-\epsilon$ 曲线中换算出初始拘束应变 $\epsilon_0$ 。

试验共进行了五组,即500℃, 550℃, 600℃, 650℃和700℃。试验结果用 $\epsilon_0-t$ 曲线来表达,图2为600℃时的 $\epsilon_0-t$ 曲线。每个试验温度下都可以测得一个临界初始拘束应变 $\epsilon_r$ 。 $\epsilon_r$ 可定义为在2h时间内即不断亦不裂的最高初始拘束应变量。 $\epsilon_r$ 是一个临界值,它显示材料在某一温度下所能承受的拘束应变量。此值愈低,则表明它对再热裂纹愈敏感。

### 2.4 再热裂纹新判据 $(\epsilon_r)_{\min}$

将各试验温度下的临界初始拘束应变 $\epsilon_r$ 汇总于表2。从表2可见600℃时的 $\epsilon_r$ 最低,命名为最低临界初始拘束应变 $(\epsilon_r)_{\min}$ 。

$(\epsilon_r)_{\min}$ 可以认为是一个科学的再热裂纹新判据。它反映了材料在再热处理中所能承受的拘束应变, $(\epsilon_r)_{\min}$ 愈小,则再热裂纹的倾向愈大,反之亦然。

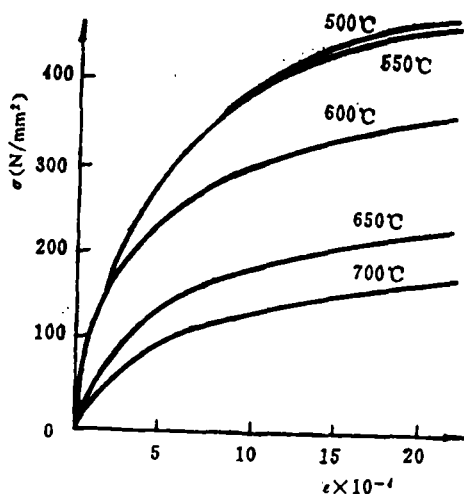


图1 HQ80C 钢不同温度下的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

Fig. 1  $\sigma-\epsilon$  curves of HQ80C steel at various temperatures.

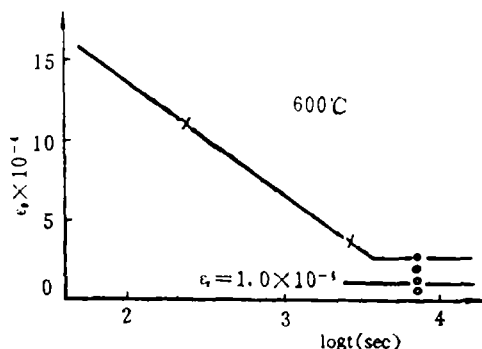


图2 600℃时插销试验的 $\epsilon_0-t$ 曲线

Fig. 2  $\epsilon_0-t$  curves of the implant test at 600℃

表2 HQ80C钢在再热温度下的 $\epsilon_r$

Table 2 The  $\epsilon_r$  of HQ80C steel at various reheat temperatures

Testing temperature(℃)	500	550	600	650	700
$\epsilon_r \times 10^{-4}$	2.5	1.2	1.0	2.1	6.5

采用 $(\epsilon_r)_{\min}$ 作判据有以下优点。首先,它与理论分析时采用应变概念保持一致。便于直接理解 $\epsilon > \epsilon_c$ 的启裂条件,亦能正确定量。其次,各种材料的再热裂纹的敏感温度区间不

同,以某一特定温度的 $\epsilon_r$ 衡量将不能反映全面情况,而只有采用 $(\epsilon_r)_{\min}$ 才合理。第三, $(\epsilon_r)_{\min}$ 能正确反映材料的再热裂纹敏感性。

## 2.5 蠕变松弛率

再热裂纹是在升温时受拘束形成的,因此试验再热裂纹敏感性时力图造成拘束条件。但是,初始拘束应变 $\epsilon_r$ 并不能保持恒定。以恒温再热裂纹插销试验为例,它虽然能避免因温度变化造成的温度松弛,但试件在高温受拘束时将会产生蠕变松弛,如果试样开裂还会产生开裂松弛。试验表明,凡是断裂的试样拘束应变松弛得很快,这显然是开裂松弛促使的。当试样处于临界初始拘束应变条件下,试样没有开裂,当然只有蠕变松弛。蠕变松弛在前30min比较明显。随后变化平缓。蠕变松弛随温度有明显变化。现将蠕变松弛率列于表3。表3中 $\epsilon_r$ 即为前述的临界初始拘束应变, $\epsilon'_r$ 为试验时间2h后的临界拘束终应变。 $(\epsilon_r - \epsilon'_r)/\epsilon_r$ 表示蠕变松弛率。蠕变松弛率不是定值,而是随温度升高而剧增。呈 $\log(\epsilon_r - \epsilon'_r)/\epsilon_r = aT + b$ 的线性关系。

表3 各试验温度下的蠕变松弛率

Table 3 Relaxation ratio of the creep strain at various testing temperatures

Testing temperature(°C)	500	550	600	650	700
$\epsilon_r \times 10^{-4}$	2.5	1.2	1.0	2.1	6.5
$\epsilon'_r \times 10^{-4}$	2.13	0.93	0.38	1.05	1.77
$\frac{\epsilon_r - \epsilon'_r}{\epsilon_r} (\%)$	15	22	42	50	73

本文试验指标采用初始应变,就是为了避免这种复杂因素的干扰。而且初始应变是整个试验过程中的最大值,具有代表性,又易于测量。因而建议材料的再热裂纹敏感性的判据是最低临界初始拘束应变 $(\epsilon_r)_{\min}$ ,而不是 $(\epsilon'_r)_{\min}$ 。

## 3 用新判据评定 HQ80C 钢的再热裂纹敏感性

### 3.1 再热裂纹敏感温度

以往试验常用 $T-t_f$ 的C形曲线表示再热裂纹的敏感温度。本文从各组的 $\epsilon_o-t$ 曲线中取出所需数据,整理成 $T-t_f$ 的C形曲线。曲线的前提是初始拘束应变相等,虚线是 $\epsilon_o = 0.15\%$ ,实线为 $\epsilon_o = 0.10\%$ ,见图3。由图3可见,HQ80C钢的再热裂纹敏感温度为600℃。

按表2数据又可画成 $\epsilon_r-T$ 曲线,见图4。图4中显示了一个低塑性区,敏感温度亦为600℃,与图3结论相符,而且曲线形态类似。但是 $\epsilon_r-T$ 曲线有更多的优点。首先, $T-t_f$ 曲线是以断裂来判断,而 $\epsilon_r-T$ 是以启裂来判断,显然后者更为科学。其次, $T-t_f$ 曲线是以断裂时间为指标,虽可相对比较,但 $t_f$ 数据波动大;而且无法判断不裂的临界条件。而 $\epsilon_r$ 和新判据 $(\epsilon_r)_{\min}$ 则比较容易判断该材料的再热裂纹敏感性。例如HQ80C钢的 $(\epsilon_r)_{\min}$ 仅为 $1 \times 10^{-4}$ ,与 $\epsilon_s = 20 \times 10^{-4}$ 相比,仅为5%,说明该钢具有明显的再热裂纹倾向。此外,低

塑性温度区间的宽窄亦是显示再热裂纹倾向的另一重要因素。

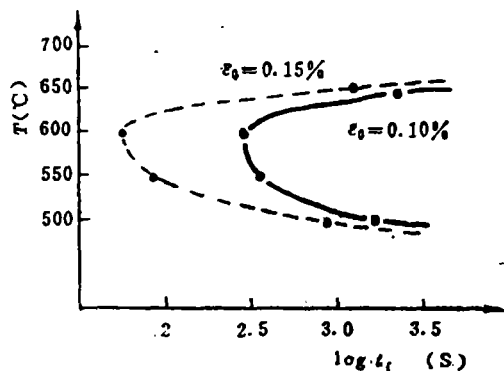


图3 HQ80C钢的 $T-t_f$ 曲线

Fig. 3  $T-t_f$  curves of HQ80C steel.

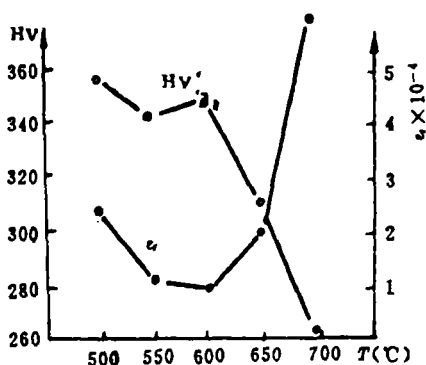


图4 HQ80C钢的 $\epsilon_r-T$ ,  $HV-T$ 曲线

Fig. 4  $\epsilon_r-T$  and  $HV-T$  curves of HQ80C steel.

### 3.2 铁研试验

铁研试验证实该钢具有明显的再热裂纹敏感性。金相检验表明, 裂纹在缺口处粗晶区开裂, 且只在粗晶区扩展, 裂纹沿晶扩展, 系典型的再热裂纹。预热 150℃ 焊接后, 再热裂纹率明显降低。

### 3.3 再热处理对 HQ80C 过热区性能的影响

首先测定各个再热裂纹试验温度的插销试样上维氏硬度 (载荷为 100 N), 结果如图 4 所示。证实过热区经 600℃ × 2 h 回火产生了

“二次强化”。维氏硬度反映的是晶内性能, 说明晶内强化了。而此温度恰恰是用新判据确定的再热裂纹敏感温度。其次, 测定了母材和热模拟过热区试样的高温拉伸断面收缩率  $\phi$  和高温  $\sigma_{0.2}$ 。试样在各个再热温度下保持时间 15 min 后, 再在同一温度下拉伸。测得数据汇总于图 5。过热区热模拟试样的断面收缩率为 2.4%~7.0%, 远小于母材。500~700℃ 的母材  $\phi$  在 34.1%~61.6% 之间。前者断口为沿晶+沿晶韧窝形貌, 而母材的断口为韧窝, 属穿晶断裂, 说明过热区经再热处理晶界已经弱化。600℃ 再热处理后的  $\phi$  值最小, 仅为 2.4%。此与用新判据确定的再热裂纹敏感温度相符 (对比图 4 和图 5)。

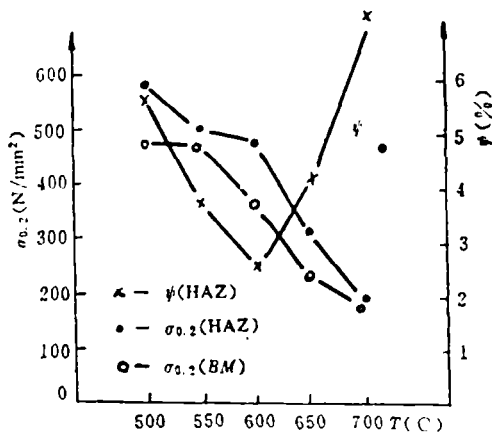


图5 HQ80C钢的 $\psi-T$ 和 $\sigma_{0.2}-T$ 曲线

Fig. 5  $\psi-T$  and  $\sigma_{0.2}-T$  curves of HQ80C steel.

## 4 焊接再热裂纹形成条件的探讨

焊接再热裂纹形成条件以应变表达较为合理, 此处以  $\epsilon_p > \epsilon_c$  表示。 $\epsilon_p$  焊接构件实际承受的

拘束应变,  $\epsilon_c$  表示被焊接材料能承受的临界拘束应变。 $\epsilon_c$  的概念和本文所测的  $\epsilon_r$  本质相同。再热处理促使前述的组织性能发生种种变化, 最终导致  $\epsilon_c$  随再热温度有明显变化, 特别是温度在  $550 \sim 650^\circ\text{C}$  之间出现极小值和再热脆性温度区。可用示意图(见图 6)的曲线  $\epsilon_c = f(T)$  表示。随温度升高,  $\epsilon_p$  会因温度松弛和蠕变松弛等因素而降低, 此处用  $\epsilon_p = F(T)$  表示。室温时,  $\epsilon_p$  可看作构件中的残余拘束应变, 此值小于  $\epsilon_c$ , 故不出现裂纹。再热处理时,  $\epsilon_p$  随温度升高而下降, 但  $\epsilon_c$  陡降更甚。如果  $\epsilon_p = F(T)$  和  $\epsilon_c = f(T)$  二曲线相交, 则将产生再热裂纹。从图 6 即可推论, 避免构件再热处理时产生裂纹的途径有三:

(1) 提高材料的  $(\epsilon_c)_{\min}$ , 亦即  $(\epsilon_r)_{\min}$ ; (2) 减小再热脆性温度区间; (3) 降低  $\epsilon_p$ 。前二者与材料的化学成分, 性能、原始组织, 析出物类别和形态等有关。后者与构件的结构刚度, 接头形式, 焊接规范以及温度场分布等有关。焊后拘束应变越小,  $\epsilon_p$  和  $\epsilon_c$  二曲线相交的可能性越小, 亦就是有可能避免再热裂纹。本文铁研试验预热  $150^\circ\text{C}$  时再热裂纹率明显降低就是例证。

## 5 结 论

(1) 再热裂纹形成条件以  $\epsilon_p > \epsilon_c$  表示较为合理, 本文提出的示意图(图 6) 可以较完整地解释影响再热裂纹各因素之间的关系, 从而指明消除或减轻再热裂纹的途径。

(2) 提出了再热裂纹的新判据—— $(\epsilon_r)_{\min}$ 。 $(\epsilon_r)_{\min}$  能正确反映材料的再热裂纹敏感性, 其值越小, 敏感性越大。同时,  $(\epsilon_r)_{\min}$  的试验温度亦就是再热裂纹敏感温度。

(3) HQ80C 钢焊接过热区的  $(\epsilon_r)_{\min}$  仅为  $1.0 \times 10^{-4}$ , 再热裂纹敏感性大。再热裂纹敏感温度为  $600^\circ\text{C}$ 。铁研试验也证实该钢产生再热裂纹。

(1990年1月15日收到初稿)

## 参 考 文 献

- 1 张相权等。用插销法研究焊接再热裂纹。焊接学报, 1981, 2(2): 75~83
- 2 Tamaki K. Reheat cracking test on high strength steels by a modified implant test. Trans. of J. W. S., 1983, 14(2): 33~38
- 3 陈伯鑫。金属焊接性基础。北京: 机械工业出版社, 1982。
- 4 张文钺。金属熔焊原理及工艺。北京: 机械工业出版社, 1980。
- 5 李志远等。用单插销应力松弛试验评定几种低合金钢再热裂纹倾向。第五届全国焊接学术会议论文选集, 哈尔滨, 1986。

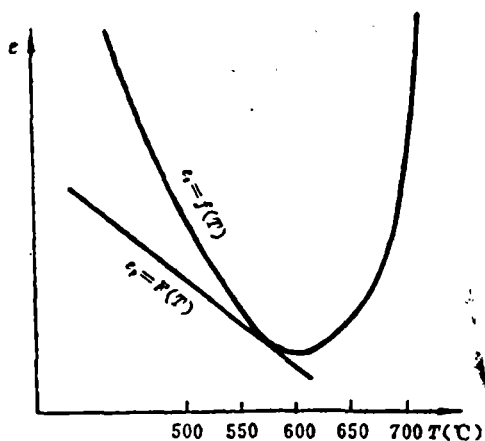


图 6 再热裂纹形成条件示意图

Fig. 6 Diagram showing the conditions resulting reheat cracking.

# **New criterion of reheat cracking—— $(\epsilon_r)_{min}$**

*Luo Zhichang, Chen Peiyin and Zhang Weiming*

*(Tsinghua University)*

*Qin Ruikai*

*(Anshan Iron & Steel Complex)*

**Abstract** The sensitivity of HQ80C steel to the reheat cracking was investigated by using the equi-temperature implant test, the Tekken test and the high-temperature tensile test. The conditions causing the reheat cracking were discussed utilizing the strain concept. Moreover, a scheme was proposed, which perfectly describes the relationship among the factors affecting the reheat cracking. In this paper, the authors suggest a new criterion of the reheat cracking—— $(\epsilon_r)_{min}$ , and describe its reasonableness and advantages. The less  $(\epsilon_r)_{min}$  is, the higher is the sensitivity of the materials to reheat cracking.

**Key words** reheat cracking; criterion; high strength low alloy steel