

再热裂纹新判据—— $(\epsilon_r)_{min}$

罗志昌 陈佩宾* 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。 σ_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°C × 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

* 陈佩宾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^[1, 2]。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定温度，保温 15 分钟后加载至预定值。加载后保温时间 2 h，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 ψ 。模拟过热区的热循环为 $t_{\text{8/s}} = 8\text{s}$ ， $T_{\text{max}} = 1320^\circ\text{C}$ 。

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用应变概念^[3, 4]。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^[1, 5]， $\sigma_0 - \sigma_r$ ， $\sigma_0^2 - \sigma_r^2$ 。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_r 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，其前提是初始应变量相等，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_r ”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_r ” 来表达。如果 ϵ 相等，则各温度下的 σ 不相等，500℃ 和 700℃ 的 σ 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 ε_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 ε_0 的单值函数。本试验即以 ε_0 为定量指标。测定 ε_0 时，仍然通过载荷传感器测出初始拘束应力，然后根据试验温度，从图1的高温 $\sigma-\varepsilon$ 曲线中换算出初始拘束应变 ε_0 。

试验共进行了五组，即500℃，550℃，600℃，650℃和700℃。试验结果用 ε_0-t 曲线来表达，图2为600℃时的 ε_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 ε_r 。 ε_r 可定义为在2 h时间内即不断亦不裂的最高初始拘束应变量。 ε_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(ε_r)_{min}

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

(ε_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，(ε_r)_{min}愈小，则再热裂纹的倾向愈大，反之亦然。

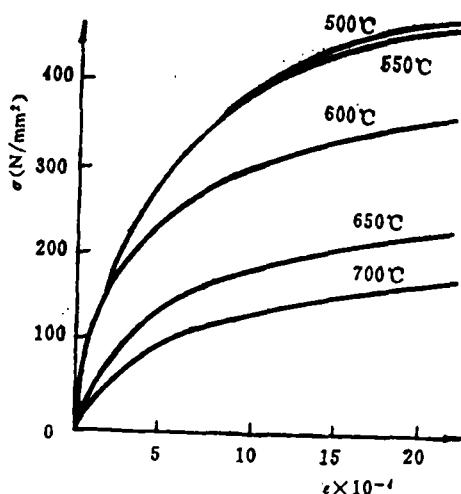


图1 HQ80C钢不同温度下的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

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

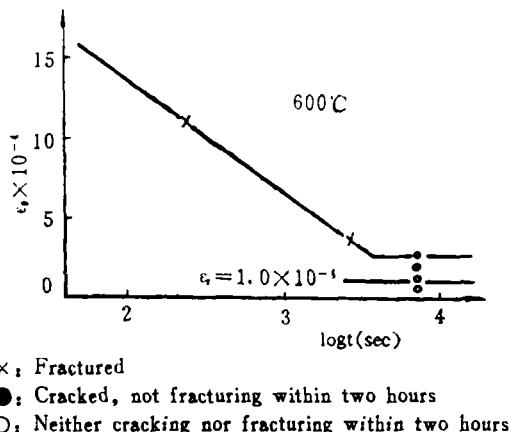


图2 600℃时插销试验的 ε_0-T 曲线

Fig. 2 ε_0-t curves of the implant test at 600°C

表2 HQ80C钢在再热温度下的 ε_r

Table 2 The ε_r of HQ80C steel at various reheat temperatures

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

采用(ε_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 $\varepsilon > \varepsilon_c$ 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 ϵ_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30 min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 ϵ , 即为前述的临界初始拘束应变, ϵ'_r 为试验时间2 h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
$-(\epsilon_r - \epsilon'_r)/\epsilon_r (\%)$	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 $T-t_s$ 的C形曲线表示再热裂纹的敏感温度。本文从各组的 ϵ_0-t 曲线上取出所需数据, 整理成 $T-t_s$ 的C形曲线。曲线的前提是初始拘束应变相等, 虚线是 $\epsilon_0=0.15\%$, 实线为 $\epsilon_0=0.10\%$, 见图3。由图3可见, HQ80C钢的再热裂纹敏感温度为600°C。

按表2数据又可画成 ϵ_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°C, 与图3结论相符, 而且曲线形态类似。但是 ϵ_r-T 曲线有更多的优点。首先, $T-t_s$ 曲线是以断裂来判断, 而 ϵ_r-T 是以启裂来判断, 显然后者更为科学。其次, $T-t_s$ 曲线是以断裂时间为指标, 虽可相对比较, 但 t_s 数据波动大; 而且无法判断不裂的临界条件。而 ϵ_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 1×10^{-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。

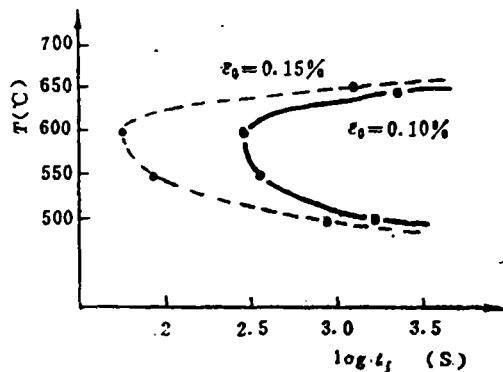


图3 HQ80C钢的T-t_f曲线

Fig. 3 T-t_f curves of HQ80C steel.

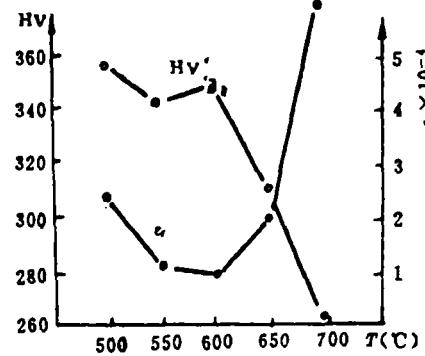


图4 ε_r-T, HV-T曲线

Fig. 4 ε_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φ和高温σ_{0.2}。试样在各个再热温度下保持时间15 min后，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φ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φ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）。

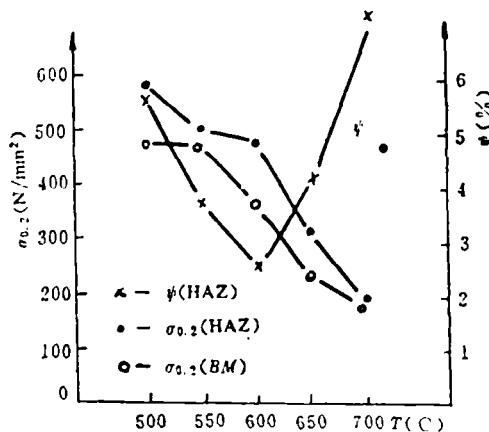


图5 HQ80C钢的ψ-T和σ_{0.2}-T曲线

Fig. 5 ψ-T and σ_{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ε_p>ε_c表示。ε_p焊接构件实际承受的

拘束应变, ϵ_c 表示被焊接材料能承受的临界拘束应变。 ϵ_c 的概念和本文所测的 ϵ_r 本质相同。再热处理促使前述的组织和性能发生种种变化, 最终导致 ϵ_c 随再热温度有明显变化, 特别是温度在 550~650℃ 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, ϵ_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, ϵ_p 可看作构件中的残余拘束应变, 此值小于 ϵ_c , 故不出现裂纹。再热处理时, ϵ_p 随温度升高而下降, 但 ϵ_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 ϵ_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, ϵ_p 和 ϵ_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℃ 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。

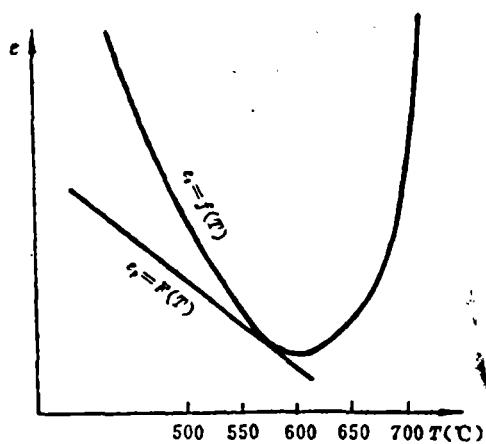
(2) 提出了再热裂纹的新判据—— $(\epsilon_r)_{min}$ 。 $(\epsilon_r)_{min}$ 能正确反映材料的再热裂纹敏感性, 其值越小, 敏感性越大。同时, $(\epsilon_r)_{min}$ 的试验温度亦就是再热裂纹敏感温度。

(3) HQ80C 钢焊接过热区的 $(\epsilon_r)_{min}$ 仅为 1.0×10^{-4} , 再热裂纹敏感性大。再热裂纹敏感温度为 600℃。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 陈伯蠡。金属焊接性基础。北京: 机械工业出版社, 1982.
- 4 张文锐。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.



■ 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 porfeotly describes the relationship among the factors affecting the reheat cracking. In this paper, the authors suggest a new oriterion of the reheat cracking— $(\epsilon_r)_{min}$, and desoribe its reasonableness and advantages. The less $(\epsilon_r)_{min}$ is, the higher is the sensi-tivity of the materials to reheat cracking.

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