

# 热影响区软化焊接接头的强度及变形

朱 亮, 陈剑虹

(兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 焊接接头热影响区软化是细晶粒钢焊接时普遍存在的问题。用有限元分析方法, 分析热影响区软化的焊接接头屈服强度和抗拉强度, 以及接头上的应力分布和变形机制。分析结果表明, 软化热影响区的屈服应力降低和宽度增加对接头的屈服强度降低影响较小, 而对接头抗拉强度降低影响较大, 提高焊缝的屈服应力可以提高热影响区软化接头强度。同时发现, 当外加应力超过软化热影响区的屈服应力时, 在热影响区及其附近区域出现了三轴应力状态, 主应力及 Mises 等效应力在有屈服应力差别的区域交界处发生突变, 使热影响区的 Mises 等效应力降低, 与之相邻区域的 Mises 等效应力升高, 从而可以对软化热影响区宽度及软化程度影响焊接接头强度的机制进行解释。

关键词: 焊接接头; 热影响区软化; 强度匹配; 有限元分析; 低合金高强度钢

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)02-61-05



朱 亮

## 0 序 言

由于细晶粒钢在不增加合金元素的情况下, 可获得高韧性及高强度, 在工程上得到了广泛的关注。它所遇到的一个不可避免的问题是焊接接头热影响区晶粒粗化, 从而引起热影响区的局部软化<sup>[1]</sup>。为了不损失整个接头的承载能力, 在设计上采用高匹配的焊接接头, 为了对热影响区弱化的接头的承载能力做出客观评价, 同时给高匹配焊接接头的设计提供依据, 需要定量分析焊缝、热影响区的力学性能不均匀和几何尺寸对接头屈服强度和抗拉强度的影响。而且, 在进行非等强接头完整性评价和韧性参数测量时, 也需要确定试样的屈服载荷。关于非等强焊接接头性能研究, 过去主要针对裂纹试样, 用有限元分析方法研究非等强匹配对接头断裂行为的影响<sup>[2-4]</sup>。对于非等强焊接接头的强度, 过去主要采用基于滑移线场理论解析分析方法<sup>[5]</sup>和有限元分析方法<sup>[6]</sup>, 研究焊缝的力学性能不均匀和几何尺寸对接头性能的影响, 但是这些方法对采用含有中间裂纹的拉伸试样, 无法对非等强焊接接头屈服强度和抗拉强度做出直接评价。虽然用滑移线场理论也可对热影响区软化的焊接接头进行屈服强度的评价<sup>[7]</sup>, 但忽略了材料加工硬化对接头性能的影响。Toyoda M<sup>[8]</sup>等用有限元分析方法, 对热影响区软化的焊接

接头的平板拉伸试样进行了分析, 但只是对试样的抗拉强度进行了研究, 该文利用有限元分析方法, 从屈服强度和抗拉强度两个方面对热影响区软化的焊接接头强度进行分析, 通过分析外载作用时接头上的应力分布及变形行为, 说明热影响区软化焊接接头的最软区的屈服应力及宽度对整体接头强度影响的机制。

## 1 热影响区软化焊接接头有限元分析模型

用于有限元分析的试样如图 1 所示, 它是一个包含对接接头平板拉伸试样, 其中焊缝、热影响区和母材具有不同的屈服应力。忽略接头上焊接残余应力的存在。为了使有限元分析的结果能反映实际接头的工作状态, 将试样的宽度和厚度之比设定为 10, 这样可以看作为无限大板<sup>[8]</sup>。用

$$\delta_w = \frac{W_w}{t}, \quad \delta_h = \frac{W_h}{t}, \quad \delta_b = \frac{W_b}{t},$$

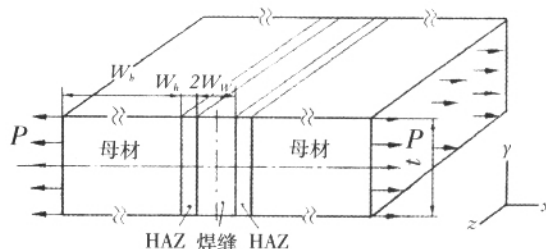


图 1 单轴拉伸试样

Fig.1 Specimen used for finite element analysis

收稿日期: 2003-05-28

基金项目: 甘肃省科技攻关项目 (GS002-A52-021)

分别定义焊缝、热影响区和母材的相对宽度，其中  $W_w$ 、 $W_h$  和  $W_b$  分别是拉伸试样中焊缝、热影响区和母材长度的一半， $z$  是试样的厚度。设焊缝、热影响区和母材具有相同的弹性模量，不同的屈服应力  $\sigma_{0w}$ 、 $\sigma_{0h}$ 、 $\sigma_{0b}$ 。用

$$\beta_w = \frac{\sigma_{0w}}{\sigma_{0b}}, \quad \beta_h = \frac{\sigma_{0h}}{\sigma_{0b}},$$

分别定义焊缝、热影响区的相对屈服应力。设母材的屈服应力  $\sigma_{0b}=600$  MPa，用以上参数的不同组合定义各种不同形式的非等强匹配焊接接头。屈服后塑性变形的加工硬化过程符合幂函数规律，材料的加工硬化指数都为  $n=0.1$ 。利用弹性模量、屈服应力、 $n$ ，可得到描述试样各部分的弹塑性变形行为的真应力应变曲线，作为用于有限元计算的材料性能。用真应变等于加工硬化指数  $n$  时的应力作为材料的抗拉强度<sup>[9,10]</sup>，在给有限元计算输入材料的性能时，只将真应力应变曲线上真应变小于等于加工硬化指数  $n$  的部分输入；ABAQUS 在计算时，当应力超出输入的材料性能数据中的真应力范围时，材料性能的应力响应视为常数，其值等于所输入的应力应变曲线上的最后一个真应力值<sup>[11]</sup>，也就是说，如果材料的应力达到该值时，材料将持续变形直至应力降至该值以下。

考虑到试样的对称性，取试样的 1/8 作为计算对象，用 ABAQUS 有限元分析软件进行分析，模拟载荷以均匀分布载荷的形式施加在端面上，以施加载荷增量来模拟整个加载过程，在增加载荷的每一步，记录加载面的载荷与位移，处理后可得到加载过程中的名义应力和名义应变的关系曲线。采用与实际的光滑拉伸试样相同的方法确定屈服强度和抗拉强度，屈服强度用引起 0.2% 塑性变形的名义应力来确定，抗拉强度为最大载荷点的名义应力。

## 2 软化区的强度和宽度对接头强度的影响

在接头各部分的相对厚度给定的情况下，改变影响区的相对屈服应力，对各种不同匹配的焊接接头的拉伸试样进行有限元分析，利用前面所述的方法确定试样屈服强度  $\sigma_{yj}$  和抗拉强度  $\sigma_{tj}$ ，同时分别除以均匀母材试样的屈服强度  $\sigma_{yb}$  和抗拉强度  $\sigma_{tb}$  得到其相对值。图 2a 是焊缝在等强匹配及高匹配的情况下，热影响区的相对屈服应力与接头的相对屈服强度及相对抗拉强度的关系。不难看出，热影响区软化对接头相对抗拉强度的影响明显大于对接头相对屈服强度的影响。当热影响区的相对屈服应力低于某一临界值时，接头相对抗拉强度会骤然下降，通过采用高匹配的焊接接头可以使这一临界值降低。从工程的角度来看，针对热影响区不同程度软化，选择合理的焊缝屈服应力，可以使接头的屈服强度和抗拉强度不落入急促下降的范围。

图 2b 和图 2c 分别是在给定热影响区的相对屈服应力为 0.7，焊缝的相对屈服应力为 1.0 和 1.2 的情况下，热影响区及焊缝的相对宽度与接头的相对屈服强度及相对抗拉强度的关系。软化的热影响区宽度对接头性能有较大的影响，尤其是对接头抗拉强度的影响。值得注意的是，当热影响区宽度较小时，其影响很小，当热影响区的相对宽度超过某一临界值时，接头相对抗拉强度会骤然下降，通过采用高匹配的焊接接头可以使这一临界值提高；但是对相对屈服强度的影响不存在这样的临界值。焊缝的相对宽度对接头的相对屈服强度及相对抗拉强度影响是不同的。无论是等强匹配还是高匹配，接头的抗拉强度随焊缝宽度的增加而增加，当焊缝

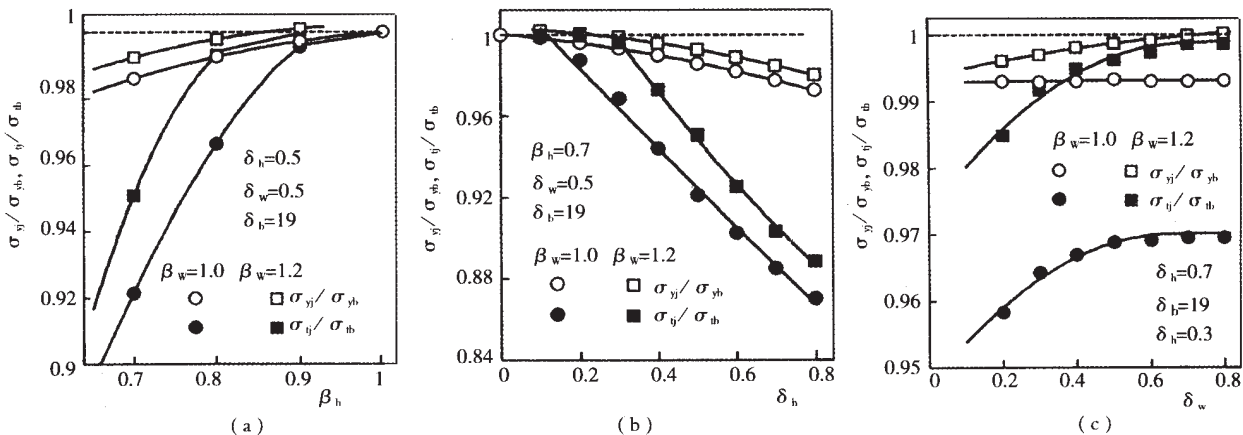


图 2 热影响区屈服应力及宽度和焊缝的宽度对接头强度的影响

Fig.2 Effect of yield stress and width of HAZ and width of weld on tensile strength

的相对宽度增加到 0.5 时,对接头的抗拉强度不再有影响;然而,焊缝宽度对相对屈服强度影响表现为,对于等强匹配的接头,几乎没有影响,对于高匹配的接头,相对屈服强度随焊缝宽度的增加而增加。

### 3 热影响区软化焊接接头应力分布及变形

#### 3.1 热影响区软化接头应力分布特征

对图 1 所示的热影响区软化焊接接头的单轴拉伸试样进行有限元计算,分析不同载荷下的主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  和 Mises 等效应力  $\sigma_m$  在  $x$  方向分布的变化,普遍发现,当外加应力  $\sigma$  小于接头上最小的屈服应力  $\sigma_{0h}$  时,整个接头的应力状态为单轴拉伸,即  $\sigma_1 = \sigma$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = 0$ , 当  $\sigma > \sigma_{0h}$  时,在热影响区及其附近区域应力状态发生变化,出现了三轴应力,即  $\sigma_1 \neq \sigma$ ,  $\sigma_2 \neq 0$ ,  $\sigma_3 \neq 0$ 。且随着载荷的增加不断加强,图 3 反映了热影响区软化接头,在两种不同载荷下,主应力和 Mises 等效应力  $\sigma_m$  在接头上的分布情况,用  $\delta$  表示试样的长度与试样厚度  $t$  的比值,用远离热影响区的单轴拉伸应力状态区的应力  $\sigma$  表示载荷的大小,图 3a 是  $\sigma = 423$  MPa 的状态,因  $\beta_h = 0.7$ ,  $\sigma_{0h} = 600$  MPa,可知  $\sigma_{0h} > \sigma$ ,从图中可知,此时热影响区内的  $\sigma_m$  超过  $\sigma_{0h}$  1 MPa,开始出现三轴应力;图 3b 是  $\sigma = \sigma_{0h}$  的状态,此时母材区内的  $\sigma_m$  已达到了母材的屈服强度。但不管在哪种情况下,当离开热影响区 3~6 倍的试样板厚距离的母材区域,应力状态仍为单轴拉伸。

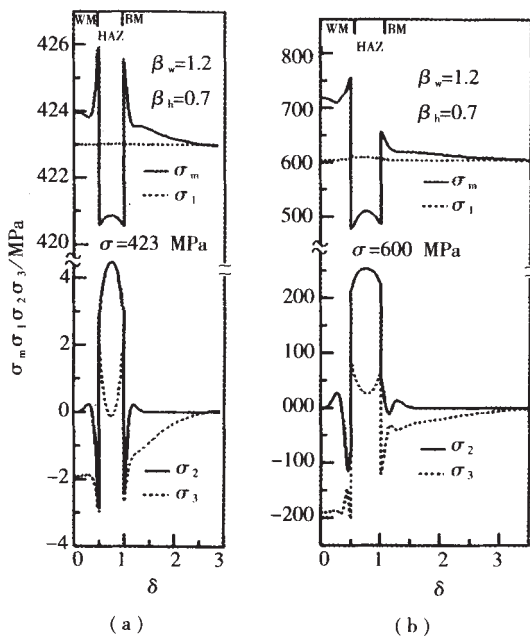


图 3 热影响区软化接头的应力分布

Fig.3 Distribution of stresses of HAZ-softened joints

从图 3 中发现,主应力在热影响区与焊缝和母材的交界处发生突变,变化最为显著的是  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ 。在屈服应力较低的热影响区,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的符号为正,即为拉应力;而在与之相邻的焊缝和母材区,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的符号为负,即为压应力。容易理解,在屈服应力较低的热影响区首先发生屈服,而随后的塑性变形受到旁边屈服应力较高的焊缝和母材的约束,从而产生三轴应力。因为上述主应力的变化特点,使 Mises 等效应力  $\sigma_m$  在热影响区减小,而在与之相邻的焊缝和母材区增大。

进一步分析可以看出,  $\sigma_m$  在热影响区与焊缝和母材的交界处的突变幅度随界面两侧材料的屈服应力差值的增大而增大,随载荷的增加而增大。而且,如果以远离热影响区的单轴拉伸应力状态区的应力  $\sigma$  为基准线,将 Mises 等效应力与  $\sigma$  的差值沿试样的长度方向求积分,即在图 3 中  $\sigma_m$  曲线与  $\sigma$  基准线之间的面积,发现在焊缝和母材区为正,而在热影响区为负,三者之和为零。即

$$\int_0^{\delta_w} (\sigma_m - \sigma) d\eta_w + \int_0^{\delta_h} (\sigma_m - \sigma) d\eta_h = - \int_0^{\delta_h} (\sigma_m - \sigma) d\eta_h \quad (1)$$

式中  $\eta_w$ 、 $\eta_h$  分别为在焊缝和母材区离开它们与热影响区的交界面的距离与板厚  $t$  的比值,始终取正;  $\eta_h$  定义为在热影响区离开它与焊缝的交界面的距离与板厚  $t$  的比值,始终取正。

#### 3.2 热影响区软化接头的屈服强度

屈服强度是根据名义应力应变曲线,用引起 0.2% 塑性变形的应力来确定,如图 4 所示,塑性应变是整个试样上各部分塑性应变的积分。在加载过程中,屈服应力最低的热影响区首先产生塑性变形,但在随后的加载过程中,根据前面的分析,热影响区附近产生三轴应力,热影响区的  $\sigma_m$  低于外加应力

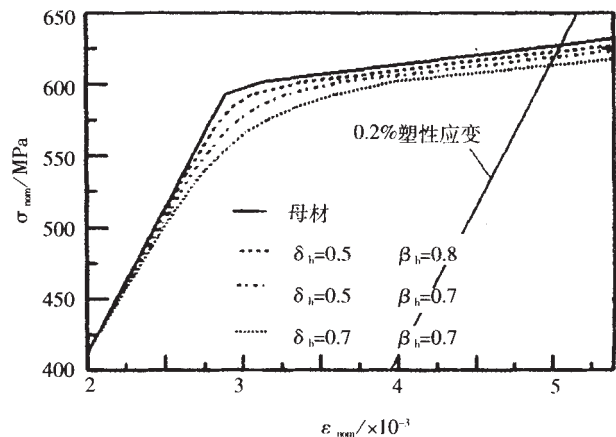


图 4 名义应力应变曲线

Fig.4 Nominal stress- strain curves

$\sigma$  ,使热影响区的塑性变形量降低,而在与之相邻的焊缝和母材区的 $\sigma_m$ 高于外加应力 $\sigma$ ,在外加应力 $\sigma$ 没有超过一定值时,这两区域中的 $\sigma_m$ 仍低于 $\sigma_{0w}$ 或 $\sigma_{0b}$ ,因而不产生塑性变形。只有当在外加应力 $\sigma$ 高于一定值时,尤其是高于 $\sigma_{0b}$ ,由于试样长度中母材所占的比例较大,塑性变形量将明显增加。图4是母材试样和三种不同形式的软化接头试样的名义应力应变曲线,对于母材试样,当应力超过 $\sigma_{0b}$ 时,开始出现塑性应变;对于 $\beta_h$ 分别为0.7和0.8的热影响区软化接头试样,当应力超过 $\sigma_{0b}$ 时,开始出现塑性应变,不过在初期塑性变形量很小,只有当应力接近 $\sigma_{0b}$ 时,塑性变形量才明显增加,才能使塑性变形量达到0.2%。软化热影响区宽度的增加或屈服应力的降低,都会使塑性变形量明显增加时应力降低,但降低的幅度不大。从图2也可以看出,热影响区的宽度及软化的程度对接头屈服强度的影响较小。

### 3.3 软化热影响区的宽度及屈服应力对接头抗拉强度的影响机制

图5反映了热影响区软化接头,在各种不同软化区的宽度及屈服应力条件下,Mises等效应力 $\sigma_m$ 随载荷变化在接头上的分布情况,用 $\delta$ 表示试样的长度与试样厚度 $t$ 的比值,用远离热影响区的

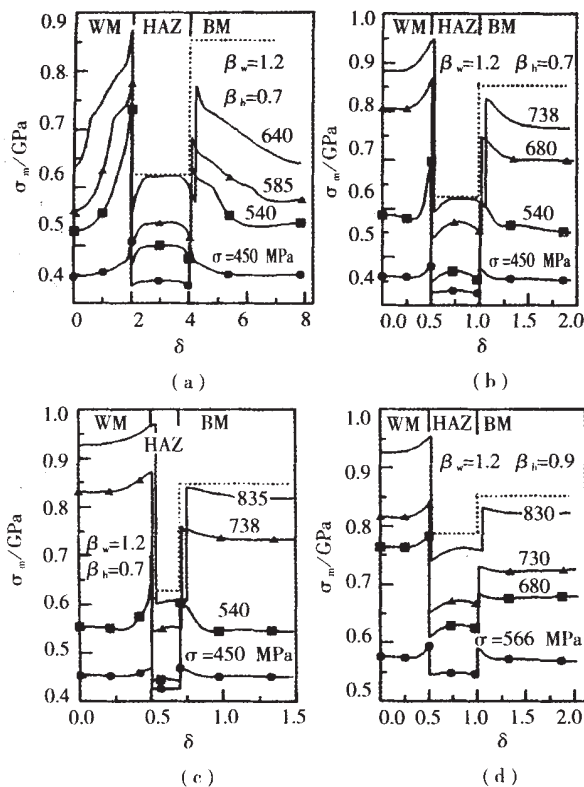


图5 软化热影响区的宽度及屈服应力对 Mises 等效应力分布的影响

Fig.5 Effect of width and yield stress of softened HAZ on distribution of Mises equivalent stress

单轴拉伸应力状态区的应力 $\sigma$ 表示载荷的大小,图中的虚线表示热影响区和母材的抗拉强度。可以看出,在热影响区与焊缝和母材的交界处, $\sigma_m$ 发生的突变,其突变的幅度随载荷的增大而增大。

在图5a、b、c中,软化热影响区的相对屈服应力均为0.7,软化区热影响区的相对宽度由2变化到0.2,可以看出,在热影响区与焊缝和母材的交界处, $\sigma_m$ 的突变幅度随载荷的增大而增大,但在载荷相同的情况下,基本上保持不变,不随接头上各区宽度的变化而变化,然而,在载荷相同的情况下热影响区 $\sigma_m$ 与外加应力 $\sigma$ 的差值随 $\delta_h$ 的减小而增大,这是因为接头上 $\sigma_m$ 的分布始终要满足式(1)所示的关系。根据前面所述材料抗拉强度的定义,如果 $\sigma_{0b}=600$  MPa,  $n=0.1, \beta_h=0.7$ ,热影响区的抗拉强度为619 MPa,当 $\delta_h$ 分别为2、0.5和0.2时,热影响区中的 $\sigma_m$ 达到热影响区的抗拉强度时,外加应力分别为640 MPa、738 MPa和835 MPa,也就是说热影响区软化焊接接头的抗拉强度大于热影响区的抗拉强度,且随热影响区宽度的减小而增加。当 $\delta_h$ 增大到一定程度时,如图5a所示的情况,随载荷增加,热影响区中间部位的 $\sigma_m$ 与单轴拉伸区的应力 $\sigma$ 相差不大,接头抗拉强度接近于软化热影响区的抗拉强度。当 $\delta_h$ 较小时,如 $\delta_h=0.2$ ,如图5c所示的情况,当单轴拉伸区的应力 $\sigma$ 接近母材的抗拉强度时,热影响区的 $\sigma_m$ 仍小于其抗拉强度,在这种情况下,接头的抗拉强度接近于母材的抗拉强度。因此不难理解图2b中的结果,即软化热影响区的宽度对接头抗拉强度的影响存在临界值,超过它时,明显降低接头抗拉强度。在图5b、d中,软化的热影响区的相对宽度均为0.5,热影响区的相对屈服强度分别为0.7和0.9。可以看出,如果载荷相同,在热影响区与焊缝和母材的交界处 $\sigma_m$ 的突变幅度随界面两侧材料的屈服应力差值的减小而减小,而接头上 $\sigma_m$ 的分布始终要满足式(1)所示的关系。当 $\beta_h$ 为0.7时,热影响区中的 $\sigma_m$ 达到该处的抗拉强度时的外加应力为738 MPa;如果 $\beta_h$ 为0.9,当单轴拉伸区的应力 $\sigma$ 接近母材的抗拉强度时,热影响区的 $\sigma_m$ 仍小于该区的抗拉强度,就是说,只有当热影响区软化到一定程度时,才对接头的抗拉强度产生明显影响。从图2a所示有限元分析结果也可看出,软化的热影响区的屈服应力对接头抗拉强度的影响存在临界值,低于它时,明显降低接头抗拉强度。

图6是对应名义应力应变曲线上的载荷最大点,三种不同类型接头的有限元分析的变形网格,

图6a是热影响区软化程度较严重,而热影响区宽度较宽的情况,当外加应力 $\sigma = 750$  MPa时,热影响区的 $\sigma_m$ 达到其抗拉强度619 MPa,在热影响区发生颈缩,此时的外加应力远低于母材的抗拉强度850 MPa。图6b是热影响区软化程度较严重,而热影响区宽度较窄的情况,当单轴拉伸区的应力 $\sigma$ 等于母材的抗拉强度时,热影响区并没有发生明显的颈缩。图6c是热影响区宽度较宽,而热影响区软化程度较轻的情况,当单轴拉伸区的应力 $\sigma$ 等于母材的抗拉强度时,热影响区并没有发生明显的颈缩。

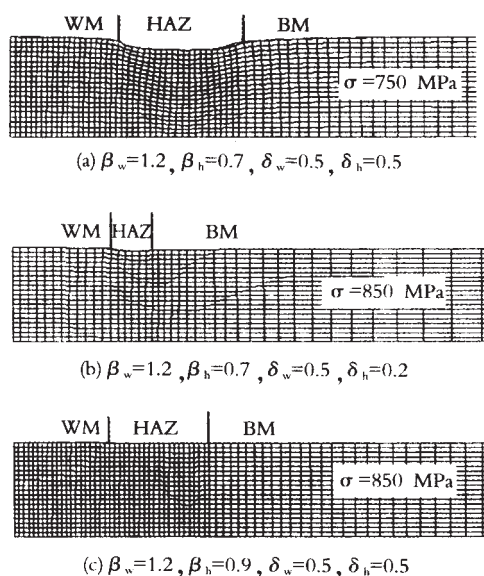


图6 最大载荷时试样的变形

Fig.6 Deformation of specimen at the maximum load

在已分析中,假设焊接接头的焊接残余应力已完全消除,其实,因不同的焊接工艺及焊后热处理条件,实际接头上的焊接残余应力或多或少地存在,会对以上的分析结果有较大的影响,需要另外进一步研究。

## 4 结 论

(1) 软化的热影响区的屈服应力降低和宽度增加对降低接头的屈服强度的影响较小,对降低接头的抗拉强度有较大的影响,而且存在临界值,超过它们时,使接头抗拉强度明显降低;提高焊缝的屈服应力可以改变临界点,使接头抗拉强度不落入急速降低的范围内,同时也可提高接头的屈服强度。

(2) 热影响区软化焊接接头的单轴拉伸试样,当外加应力超过最软区的屈服应力时,在最软区及

其附近区域出现了三轴应力状态,使最软区的 Mises 等效应力降低,与之相邻区域的 Mises 等效应力升高。而且增加量沿试样的长度方向积分等于减少量沿试样的长度方向积分。主应力及 Mises 等效应力在有屈服应力差别区域交界处发生突变,突变的幅度与交界面两侧材料的屈服应力差值有关,而与两侧区域的宽度无关,随外加载荷的增加而增大。

(3) 当 Mises 等效应力达到接头上最软区的抗拉强度时,在该处发生颈缩,随最软区宽度的减小或屈服应力的增加,发生颈缩所需的外加应力增加;当最软区相对厚度小于 0.2 或相对屈服应力大于 0.9 时,在最软区已无明显颈缩。

## 参考文献:

- [1] 李午申. 我国合金结构钢的新发展及其焊接性[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 83~86.
- [2] 荆洪阳, 朱政强, 霍立兴, 等. 强度匹配对核容器用钢 A508-III 焊接接头断裂行为的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 35~37.
- [3] 马维甸, 田锡唐. 低匹配焊接接头不均匀裂微体的 J 积分研究[J]. 焊接学报, 1987, 8(2): 82~97.
- [4] 陈丙森. 硬夹层中含有垂直裂纹的焊接接头断裂参数的研究[J]. 焊接学报, 1989, 10(3): 200~207.
- [5] Joch J, Ainsworth R A, Hyde T H. Limit load and Estimates for idealized problem of deeply cracked welding joints in plane strain bending and tension[J]. Fatigue Fract. engng. Mater. struct, 1993, 16 (10): 1061~1097.
- [6] Lei Y, Ainsworth R A. A J-integral estimation method for cracks in welds with mismatched mechanical properties[J]. Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 1997, 70(3): 237~245.
- [7] 朱亮, 陈剑虹. 非等强焊接接头的屈服载荷[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(4): 21~24.
- [8] Toyada M, Mochizuki M, Shintomi T, et al. Analytical study on deformation and strength in HAZ softened weld joints of fine-grained steels[A]. The 54th annual assembly of the international institute of welding[C]. IIW Doc. X-1503-2002.
- [9] 朱亮, 陈剑虹. 细晶粒钢热影响区软化焊接接头的力学性能[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(4): 19~22.
- [10] 布赖恩 匹克林 F. 钢的组织与性能[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 278~281.
- [11] 庄茁. ABAQUS/Standard 有限元软件入门指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

作者简介: 朱亮, 男, 1964年12月出生, 博士, 教授。主要从事焊接工艺及设备, 焊接结构强度及断裂研究。

Email: zhul@gsut.edu.cn

**Key words:** trailing intense cooling; thermal tensioning; welding distortion; orthonormality test design

**Dynamic study in partial transient liquid phase bonding of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Cu}/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$**  ZOU Jia-sheng, CHU Ya-jie, ZHAI Jian-guang, CHEN Zheng (East China Shipbuilding Institute, Jiangsu Zhenjiang 212003, China).p43-46,51

**Abstract:** Partial transient liquid phase bonding (PTLP bonding) of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic with Ti ( $5\mu\text{m}$ ) / Cu ( $70\mu\text{m}$ ) / Ti multi-interlayer is performed by changing time and temperature. The joint interfaces are analyzed by SEM and EDX and the kinetics in PTLP bonding of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic has been systematically studied. The results show that the growth of reaction layer and the transposition of isothermal solidification interface obey the parabolic law and are controlled by the diffusion of participating elements. It is pointed out that the optimization of the bonding parameters for the PTLP bonding of ceramics differs from that of conventional reactive brazing and the diffusion bonding. Both processes of the growth and the liquid phase isothermal solidification should be harmonized, in order to increase joint strength at room temperature and at high temperature simultaneously.

**Key words:** partial transient liquid phase bonding; silicon nitride ceramic; isothermal solidification; reaction layer; kinetics

**Analytical model for dynamic process of metal transfer in pulsed GMAW** LI Shi-Kai, Chen Mao-ai, WU Chuan-song (MoE Key Laboratory for LSHM, Shandong University, Jinan 250061, China).p47-51

**Abstract:** In pulsed GMAW, an obvious oscillation of droplet will be excited at the electrode tip when the current is suddenly changed. Metal transfer can be precisely controlled by the utilization of downward momentum. Based on the analysis of the forces exerted on the droplet, an analytical model is developed to analyze the oscillation and detachment process of droplet and calculate quantitatively the effects of welding process parameters on the dynamic behaviors of metal transfer. The model can be used to guide the optimum design of welding process parameters in realizing one-droplet/one-pulse in pulsed GMAW.

**Key words:** pulsed GMAW; metal transfer; analytical model

**Three dimensional finite element numerical simulation of residual stresses of all-position welding in duplex stainless steel pipe** JIN Xiao-jun<sup>1</sup>, HUO Li-xing<sup>1</sup>, ZHANG Yu-feng<sup>1</sup>, BAI Bing-ren<sup>2</sup>, Li Xiao-wei<sup>2</sup>, Cao Jun<sup>2</sup>(1.School of Material Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Offshore Oil Engineering Ltd., Tianjin 300452, China).p52-56

**Abstract:** On the basis of the thermal-elastic-plastic theory, a three-dimensional finite element numerical simulation residual stress of girth welded duplex stainless steel pipes with ANSYS non-linear finite element program. Three-dimensional FEM using mobile heat source for analysis transient temperature field and welding stress field in circumferential joint of pipes is founded. Distributions of axial and hoop residual stresses of the joint are investigated. The axial and the hoop residual stresses at the weld

and weld vicinity on inner surface of pipes are tensile, and gradually transferred into compressive in base metal. The axial residual stresses at the weld and weld vicinity on outer surface of pipes is compressive while the hoop one is tensile. The distributions of residual stresses compared positive semi-circle with negative-circle show distinct symmetry. These results provide theoretical knowledge for the optimization of welding process and the control of welding residual stresses.

**Key words:** duplex stainless steel pipe; residual stress; finite element; numerical simulation

**Effects of weld pool surface deformation on behavior characters of welding arc** LU Feng-gui, YAO Shun, LOU Song-nian, ZHANG Yu-xin (Welding Research Institute, Shanghai Jiao tong University, Shanghai, 200030, China).p57-60

**Abstract:** This paper studied the effects of weld pool surface deformation on welding arc behavior characters basing on unified arc-pool mathematical model. The calculated results of current density and heat flux on flat weld pool surface using model established in this paper are agreed with experiment. But current density and heat flux on deformed weld pool surface are not similar Gauss distribution. The work in this paper supplied basis for the study on welding arc and weld pool.

**Key words:** welding arc; weld pool; interface deformation; uniform mathematical model

**Strength and deformation in HAZ-softened welded joints**

ZHU Liang, CHEN Jian-hong (College of Materials Science and Engineering, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050, China).p61-65

**Abstract:** The softening in the HAZ(heat-affected zone) of the weldment of fine-grained steels is an ubiquitous problem. Using the finite element analysis, both yield strength and tensile strength in the HAZ-softened welded joints are evaluated, and the stress distribution and deformation behaviors were analyzed. An calculation results show that an increase of the softened HAZ width and a decrease of yield stress in it can lower slightly yield strength in HAZ-softened joints, and reduced significantly the tensile strength in HAZ-softened joints. Increasing of the yield stress of weld metal can improve the yield strength and tensile strength in HAZ-softened welded joints. Analyses demonstrate that as applied stress is higher the yield stress of the softened HAZ, a triaxial stress state occurs in HAZ and its adjacent zones. At the boundaries of zones with different yield stresses, the principal stresses and the Mises equivalent stresses change in the step wise. The Mises equivalent stresses decrease in the softened HAZ and increase in its adjacent zones correspondingly. Utilizing these analyses results, the mechanism of the effect of width and softened degree of softened-HAZ on the strength of such joints can be explained.

**Key words:** welded joint; strength match; finite element analysis; heat-affected zone softening; high strength low alloy steel

**Vision detecting spray transfer pool and contour extraction**

WANG Ke-hong, TANG Xin-chen, LIU Yong, XU Yue-Jan, YU jin