

关于焊接应力变形两个问题的进一步探讨

王者昌, 陈怀宁

(中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 讨论了焊缝是否存在压缩塑性变形问题和拉达伊 D 应力应变原理图存在的问题。指出刚刚经历熔化—凝固过程的焊缝不存在压缩塑性变形, 一直承受拉伸塑性变形。拉伸塑性变形区的范围要比拉达伊 D 的原理图上给出的大得多, 对拉达伊 D 的原理图进行全面修改, 提出新的焊接热应力应变原理图。在新原理图中, 三组曲线分别是升温—降温、压缩—拉伸和拉伸弹性—塑性变形的分界线。将等温线所处的温度明确为熔点, 它包围的区域为熔池。取消弹性卸载区的提法, 改为弹性变形区。整个焊接板由弹性变形区、压缩塑性变形区、拉伸塑性变形区和熔池组成。

关键词: 焊接应力; 压缩塑性变形; 拉伸塑性变形

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)05-69-04



王者昌

0 序 言

1965 年, 前苏联尼古拉也夫 Г А 院士首先提出焊缝存在压缩塑性变形的观点^[1]。几十年来他的这一观点被中国学者广泛接受, 在权威手册^[2,3]、教科书^[4]和许多论文^[5~7]中均能看到。文献[8]中提出另一种观点, 认为焊缝一直受拉伸, 不存在压缩塑性变形。但迄今为止, 这一观点尚未被普遍认同, 包括新版《焊接手册》^[9]还在继续沿用传统观点。

为了说明拉伸塑性变形区等的范围大小, 新版《焊接手册》^[9]引用了德国拉达伊 D 教授的应力应变原理图^[10], 并进行了少许修改。但是作者认为此图尚有许多不妥之处。

上述两个问题直接影响到焊接应力应变形成的分析和消除应力原理的阐述, 因此对上述问题深入讨论是必要的。

1 焊缝是否存在压缩塑性变形

关于这个问题, 最近新出版的《焊接手册》第三卷^[9]“焊接应力与变形”一章中前后有互相矛盾的描述。

文献[9]引用拉达伊 D 的原理图(见图 1), 指出, 抛物线外部的前方由于加热膨胀, 发生(拟改为形成—本作者注)压缩塑性变形区(用交叉斜线标出); 而在抛物线内部因冷却收缩, 又形成拉伸

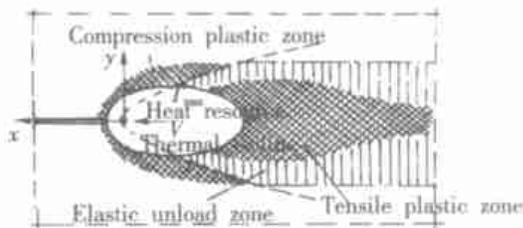


图 1 移动热源准稳态温度场的塑性变形区和局部应力应变循环

Fig. 1 Plastic deformation area in temperature field of moving hot resource and local stress—strain circulation

塑性变形区(也用交叉斜线标出)。从图 1 及上述论述可知, 刚刚经历熔化—凝固过程的焊缝受拉伸, 不存在压缩塑性变形。文献[9]还引用了有限元方法计算得出的低碳钢板焊接过程瞬态应力分布的数值求解结果, 见图 2(虚线部分除外)。从图 2 可看出, 随时间增加, 焊缝拉伸应力越来越大。图 2 中在 9.54 s 时焊缝出现压应力, 这与图 1 有矛盾。从图 1 可看出, 靠近熔池尾部的焊缝及近缝区为拉伸塑性变形, 不会有压应力, 看来图 2 中 9.54 s 的计算结果有误。此时焊缝的应力在图 2 中作者用虚线标出。最近的焊接应力应变场数值模拟结果^[11]也表明, 焊缝一直受拉伸, 而不是受压缩。

从上述分析结果可以看出, 刚刚经历熔化—凝固形成的焊缝受拉伸而不是受压缩, 产生拉伸塑性变形而不是产生压缩塑性变形。

但是新版《焊接手册》^[9]在后面消除残余应力方法的叙述中多次提到焊缝存在压缩塑性变形。例如, 采用温差拉伸法时, “两侧的金属受热膨胀对温

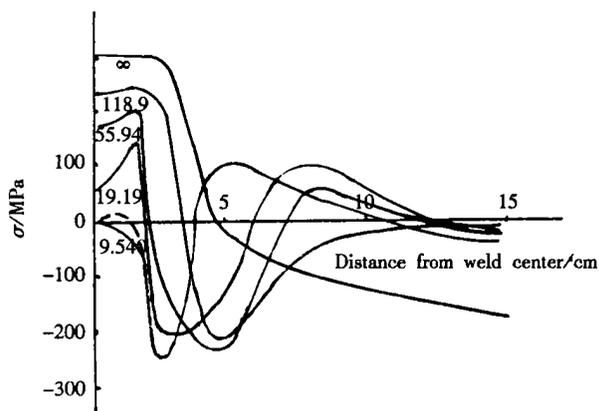


图2 低碳钢焊接过程中的瞬态应力分布
(曲线上的数字为热源通过后的时间s)

Fig. 2 Instantaneous stress distribution during low carbon steel welding (number on curve indicating period since hot resource passed)

度较低的焊缝区进行拉伸,使之产生拉伸塑性变形以抵消原来的压缩塑性变形”。采用机械拉伸法时,“焊缝压缩塑性变形得到拉伸并屈服,从而减小由焊接引起的局部压缩塑性变形量,使内应力降低”。采用滚压法时,“焊后用窄滚轮滚压焊缝和近缝区,……可达到补偿焊接所造成的压缩塑性变形的目的,见图4—62”。由该图可明显看出,焊缝存在压缩塑性变形。

从上述论述可看出,新版《焊接手册》关于焊缝变形的提法是自相矛盾的。

在文献[8]中,分析了薄板焊接应力应变发展过程。温度场分布如图3a所示。抛物线(虚线所示)外部为升温区,内部为降温区。可以看出,焊缝

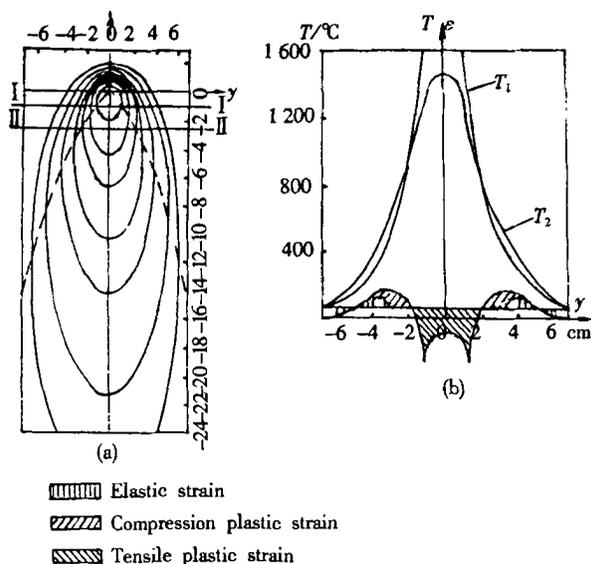


图3 低碳钢板焊接时横截面的应力应变分布

Fig. 3 Stress-strain distribution in cross section during low carbon steel welding

处于降温区,在到达室温前一直为降温过程。截面I取自熔池最宽处,截面II取自熔池后面不远处。图3b同时画出截面I和II的温度分布。截面II时的应力应变如图3b所示。从图3b可看出,焊缝承受拉伸塑性应变,其大小与该处温度与熔点的差成正比。截面II不同位置应变大小可用下式表示 $\epsilon = \alpha(T_1 - T_2)$ 。可以看出,熔合线处的拉伸应变最大, T_2 与 T_1 曲线相交处应变为零。在熔合线两侧,随离熔合线的距离增加,纵向拉伸应变急剧减小,这就很容易解释文献[12]报道的,如图4所示的液化裂纹分布在熔合线两侧和裂纹很短的现象。如果按照焊缝存在压缩塑性变形的观点,这种裂纹就不会出现了。因为焊缝一直处在冷却过程中,它冷却收缩受阻,承受拉伸应变。因此除相变外,焊缝不可能出现压应变和压缩塑性变形。至于熔池前沿升温膨胀产生的压缩性变形,由于此时焊缝尚未形成,尚不能算作焊缝的压缩塑性变形。

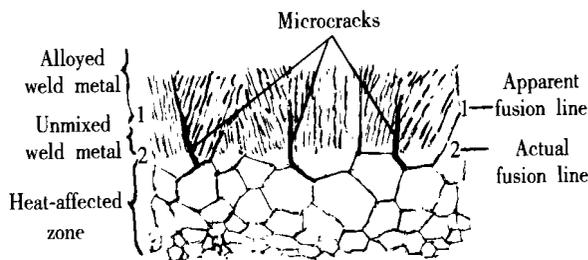


图4 液化裂纹示意图

Fig. 4 Sketch graph of liquation crack

从上述分析可知,对于刚刚经历熔化—凝固过程的焊缝不存在压缩塑性变形,而是受到拉伸产生拉伸变形(包括塑性和弹性变形)。

由于焊缝不存在压缩塑性变形,因此,过去以此为基础的消除应力的原理就可能需要重新论述。例如,对于薄板单道焊而言,机械拉伸法消除应力为通过过载拉伸,使焊缝和近缝区产生拉伸塑性变形,从而使弹性拉伸应变和拉伸应力减少。温差拉伸法:两侧的金属因受热膨胀对温度较低的焊缝区进行拉伸,使之产生拉伸塑性变形,从而使弹性拉伸应变和拉伸应力减少。滚压法则用窄滚轮滚压焊缝和近区,产生拉伸塑性变形,使弹性拉伸应变和拉应力减少。

2 新的应力应变原理图的建立

图1表示出拉伸塑性变形区的大小。文献[9]针对图1解释道:“在移动热源前方既产生了压缩塑性应变,经过最高温度 T_{max} 后,跨入抛物线的内侧,该点开始降温并发生弹性卸载,继而又进入受拉而

屈服的拉伸塑性状态,在冷却至室温前,因该点所累积的压塑性应变仍继续受拉伸屈服,而进入弹性卸载状态,可见,在完成板件对接焊后,冷却至室温的残余状态,在焊接接头区保留有:在焊缝中心的拉伸塑性区及其两侧由累积的压缩塑性应变演变而来的弹性卸载区。”

图1出自于文献[10]。两者的区别在于,在文献[9]中,另外加上了弹性卸载区的范围,即两条平行线中间的部分区域。

上述论述中所指出的“该点”显然是指图5中的A点和B点。A点位于焊缝边缘,B点在近缝区。作为焊缝的一部分,A点一直处于冷却状态,没有受到加热,不存在升温膨胀产生的压缩,因此不存在“累积的压缩塑性变形”问题。至于熔池前沿,此处金属的压缩变形,因焊缝尚未形成,不能算作焊缝的压缩塑性变形。另外,此处的金属经过熔化,前期的压缩塑性变形都消失了,不可能给后来的变形进行“累积”。由于焊缝一直处于冷却过程,可以看出A点的金属不可能进入弹性卸载状态,也不可能处在弹性卸载区,而应该处于拉伸塑性变形区。

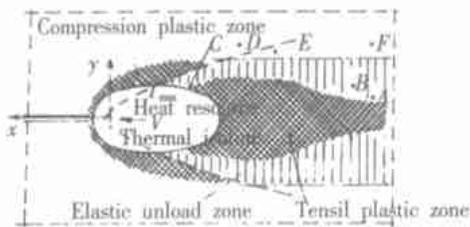


图5 用于分析应力应变有代表性的点的位置

Fig. 5 Position fo representative points in stress-strain analysis

至于B点所处的近缝区,它曾承受过加热过程产生的压缩塑性变形。但它经卸载区进入拉伸塑性变形后,由于也一直处于冷却状态,而没有二次加热,因此它一旦进入拉伸塑性变形状态后,就一直处于这种状态,不会进入卸载状态。因此它也应处于拉伸塑性变形区。

图5中的C点,它位于刚凝固焊缝的边缘。像A点一样,它也未承受过压缩塑性变形,因此也不存在弹性卸载问题。它与焊缝其它部位一样,也同属于拉伸塑性变形区。可以看出,焊缝全部而不是仅仅中心部位属于拉伸塑性变形区。除焊缝外,近缝区的大部分也属于拉伸塑性变形区。拉伸塑性变形区的外边界可能也是一组抛物线,用 σ_s 表示(图6),在这组曲线上的点应力都为屈服应力。这组曲线的一端,逼近 T_{max} 与熔池的交点,可近似地取熔池最宽处,另一端为起弧处横截面上残余拉应力

达到屈服应力的离焊缝最远的点。由于从约600℃降到约500℃时,低碳钢的屈服应力大幅度提高,在此温度段内拉伸塑性变形区范围可能有所缩小,但仍比焊缝宽得多。在图2中,在焊接板足够长的情况下,该点离焊缝中心大约25mm。也就是说,焊缝及近缝区拉伸塑性变形区的最宽处达50mm左右,这远远大于焊缝中心区的宽度,甚至比焊缝也宽得多。用 σ_s 表示的曲线内侧是拉伸塑性变形区,紧靠此区的外侧是拉伸弹性变形区。

图5中D、E和F点,它位于图1所示的弹性卸载区之外,文献[9]没有给出它们属于什么区。D点在 T_{max} 抛物线外侧,它只有升温,尚未降温,因此只有加载而没卸载过程。E和F位于 T_{max} 抛物线内侧,属降温区,在该抛物线上压应力达到最大之后,随着降温的进行,首先是卸载过程,由E点距 T_{max} 抛物线较近,故只发生卸载,而F点距 T_{max} 抛物线较远,除卸载过程外,还有加载过程。D、E和F诸点由于应力低于屈服应力,故都处在弹性变形状态。

在图1及有关解释中的“弹性卸载区”的提法不够确切。“卸载”应该是指载荷降低的过程。弹性卸载是指在弹性应变范围内应力降低的过程。在由压缩塑性变形向拉伸塑性变形转变的过程中,先是由压缩屈服应力降低到零,这是卸载过程,然后又由零变为拉应力,应力继续增加,达到拉伸屈服。后半段是加载过程,而不是卸载过程。前述F点既有卸载过程,又有加载过程。因此“弹性卸载”不能代表整个过程。因为不管是卸载还是加载,都是在弹性变形范围内进行的,所以作者将上述“弹性卸载区”的提法改为弹性变形区。

图5中D、E和F诸点所在的区域也属于弹性变形区。

在图1中,标出弹性卸载区范围的两条平行线的物理意义是什么?怎样标定?如果就弹性卸载而言,此区内的点有弹性卸载过程,而此区外的E点和F点(图5)也有卸载过程。因此可以认为,用两条平行线标出弹性卸载区范围是有问题的。拉达伊D教授的原理图^[10]中也没有这两条直线。

在弹性变形区内, T_{max} 抛物线内侧的点,首先经过降温卸载阶段。完全卸载($\sigma=0$)后,随冷却过程的继续进行又进入拉伸加载阶段。完全卸载的点,即 $\sigma=0$ 的点,大致可用一条抛物线 σ_0 表示出来(图6)。该曲线的一端与 σ_s 曲线基本相同,另一端在起弧处横截面上应力为零的点。在图2中,在焊接板足够长的情况下,该点离焊缝中心大约为46mm。曲线 σ_0 的外侧为压应力和压变形区,内侧为拉应力和

拉变形区。

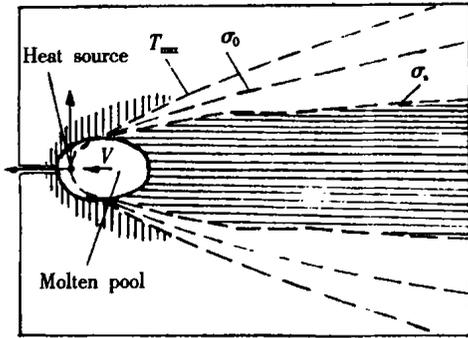


图6 焊接热应力应变原理图

Fig. 6 Principle graph of welding thermal stress-strain

图1中的“等温线”一词也似乎不太确切。刚凝固的焊缝金属由于处于冷却过程中,并且温度远高于“力学熔点”,它冷却收缩承受的拉伸变形可以认为全部是塑性变形。图1中的“等温线”所代表的温度,既可以是熔点,也可以是熔点以下的某个温度,从而产生不确切性。选用“熔点”为图1中“等温线”所处的温度,这样会更确切一些。因此将图1中“等温线”包围的区域改为熔池。

此外,在图1中压缩塑性变形区的大小,下半部明显大于上半部。应该是对称的,可能是绘图有误。

根据上述分析,作者将图1改为图6。在图6中,一组抛物线和两组曲线分别代表最高温度(T_{max})卸载终了 $\sigma=0$ 的点(σ_0)和拉伸应力达到材料屈服应力的外边界点(σ_s)的集合,后者是拉伸塑性变形区与拉伸弹性变形区的分界线,它包围的区域即是拉伸塑性变形区。 $\sigma=0$ 的那组曲线是压缩应力、压缩变形与拉伸应力、拉伸变形的分界线; T_{max} 则是升温区和降温区的分界线。在图6中,整个焊接板由压缩塑性变形区(竖线标出)、拉伸塑性变形区(横线标出)、弹性变形区和熔池构成。

3 结 论

(1)刚刚经历熔化—凝固的焊缝金属,不存在压缩塑性变形,一直承受拉伸塑性变形。与此相应,

多种应力消除原理的阐述就可能需要作适当更正,以便描述更为准确。

(2)焊接拉伸塑性变形区的范围远比拉达伊 D 教授给出的(见图1)大得多。还对图1进行了其它修改,从而形成了新的焊接热应力应变原理图(图6)。此图中,三组曲线 T_{max} 、 σ_0 和 σ_s 分别是升温—降温区、压缩—拉伸变形区和拉伸弹性—塑性变形区的分界线。整个焊接板由弹性变形区、压缩塑性变形区、拉伸塑性变形区和熔池构成。

参考文献:

- [1] Николаев Г. А. Расчет сварных соединений и прочностных конструкций [M]. ИЗД. АГЕЛЬСТВО, 1965. 155~158.
- [2] 机械工程手册编辑委员会. 机械工程手册—机械制造工艺及设备卷(一)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 6~20.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(3)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. 53~55, 73.
- [4] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 14~15, 64.
- [5] 关 桥. 推广应用焊接滚压工艺的几个问题[J]. 航空工艺技术, 1980, (2): 21~26.
- [6] 关 桥, 张崇显, 郭德伦. 动态控制的低应力无变形焊接新技术[J]. 焊接学报, 1994, 15(1): 8~14.
- [7] 郭绍庆, 徐立文, 刘雪松, 等. 温差拉伸控制铝合金薄板的焊接变形[J]. 焊接学报, 1999, 20(1): 34~41.
- [8] 王者昌. 关于焊接残余应力消除原理的探讨[J]. 焊接学报, 2000, 21(2): 55~58.
- [9] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(3)(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [10] 拉达伊 D. 焊接热效应—温度场、残余应力、变形[M]. 熊 策, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1997. 141~142.
- [11] 魏艳红, 刘仁培, 董祖珏. 不锈钢焊接凝固裂纹应力应变场数值模拟结果分析[J]. 焊接学报, 2000, 2(2): 36~38.
- [12] Savage W. F. A mechanism for crack formation in HY-80 steel weldments[J]. Welding Journal, 1967, 46(2): 94s~96s.

作者简介: 王者昌, 男, 1938 年出生, 研究员, 兼任中国空间科学学会机械专业委员会委员和中国水机磨蚀中心理事。主要从事钛合金焊接、焊接气孔、焊接热裂纹、堆焊材料和水轮机抗磨蚀用钢的研究。获全国科学大会奖和国家特等奖各 1 项、科学院二等奖 2 项、航天部二等奖 1 项、水利部 1 等奖 1 项。获国家发明专利 2 项, 发表论文近 100 篇, 参与编审专著 3 部。

Email: hnchen@imr.ac.cn