

关于焊接残余应力形成机制的探讨

游 敏, 郑小玲, 余海洲

(三峡大学 机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 分析了关于焊接残余应力形成过程描述的传统观点的局限性和不足, 指出材料力学的“截面法”不能用于分析横向残余应力分量。认为在不考虑材料相变的前提下, 焊缝金属冷却时收缩受制也是导致焊接残余应力产生的重要原因。虽然残余压缩应变和残余收缩应变在导致焊接残余应力产生的作用方面是等价的, 但其机理却有本质的不同, 区别二者有利于研究和开发新的焊接残余应力调控技术。对固有应变理论进行了分析和补充, 认为应统一到拉伸塑性应变上。用钢板上堆敷锡钎焊焊道的方法, 在母材温升值低于塑性应变所需温差的条件下, 由盲孔法测得了板上大范围分布的高值残余应力, 且因焊道和母材的线膨胀系数差异较大, 其应变测试值与环境温度有关。

关键词: 焊接残余应力; 形成机制; 受制收缩; 固有应变; 软钎焊

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2003)02-51-05



游 敏

0 序 言

焊接残余应力和变形, 一直吸引着世界范围内焊接专家、学者的注意力, 通过多年的研究, 到20世纪70年代初期大致奠定了焊接残余应力和变形理论的基础。例如前苏联学者库兹米诺夫 C A^[1] 等完善了建立在一维条件下的残余塑性变形理论, 认为焊接加热过程中焊缝和近缝区内因其膨胀受制而产生的塑性压缩应变是导致焊接残余应力产生的主要原因。增渊兴^[2] 用有关非协调性应变引起应力的基本理论研究焊接残余应力和变形。随后的主要研究都集中在焊接残余应力测试、计算和消除等方面^[3~5]。据传统观点对消除焊接残余应力常用方法的原理进行描述时存在互相矛盾之处^[6], 文献^[7] 为避免混淆, 建议引入“固有应变”概念。而作者通过多年的研究分析认识到焊缝金属冷却时的收缩受制也是导致焊接残余应力产生的重要原因并据此原理开发了调控焊接接头横向残余应力的新技术^[8], 故进一步开展这方面的研究是十分必要的。

作者对该问题进行了分析和试验研究, 认为虽然压缩塑性应变和残余热收缩应变均导致焊接残余应力, 但其作用的方式和机理不同, 可采用的调控措施亦不同, 因而不能将其混为一谈。试验结果表明, 即便在试样上堆敷了锡焊道, 母材的温升值低于压缩塑性应变产生所需温差时, 也测得了高值残余应力,

从而证明焊缝收缩对焊接残余应力产生过程有重要的作用。

1 焊接残余应力形成机制分析

1.1 关于残余塑性应变与热收缩应变等价的分析

文献^[7] 中作了详尽分析和讨论, 其核心内容为, 通过一维热弹塑性分析, 经历了热循环(1) T_0 (环境温度) $\rightarrow T_m$ (高于材料的弹性丧失温度) $\rightarrow T_0$ 和热循环(2) $T_m \rightarrow T_0$ 后, 两端拘束分别为膨胀受刚性拘束但可自由收缩、杆件两端均刚性固定、膨胀与收缩均受弹性拘束等三种条件时, 杆件在两种热循环下产生的应变均为等值、同号, 即热循环(1)所出现的残余压缩塑性应变与热循环(2)中的热收缩应变基本等价, 进而得出了长板条焊接时焊缝经历加热过程和不经历加热过程而直接冷却下来的情况无区别的结论, 描述平板堆焊时应力应变形成过程结论(类似于图1)便可直接用于坡口焊接接头应力应变形成过程的分析了。

作者认为, 仅从应变的值和符号相同并不能得出二者等价的结论。首先, 循环(1)和循环(2)之间是没有可比性的, 因为根据塑性变形时金属体积不变的原理, 有残余压缩应变的杆件与仅经历了收缩的杆件内部的应变情况存在差别, 特别是在板件为二维空间的情况下更难以成立; 其次, 压缩塑性变形分析的前提是焊缝下母材处于固态, 而焊缝自身(包括由无填充焊丝的TIG热源在薄板上所形成的

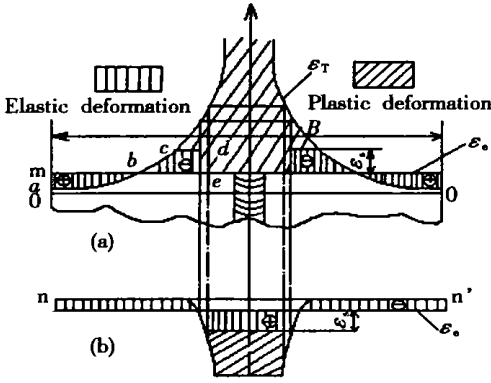


图 1 低碳钢焊接时纵向应力应变分布
Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal stress and strain distribution in mild steel welded joint

焊道)却要经历液态收缩、凝固收缩和固态收缩,情况复杂得多;再次,对已经发生压缩塑性变形的体系而言,拘束的作用是通过塑性拉伸使其回到初始平衡状态,而对热收缩应变的拘束是通过拉伸使其远离其在环境温度下的平衡状态;最后,焊接残余应力的形成机制不同,便可有针对性地采取措施消除和调控其大小和分布,焊接残余应力的形成机制不同,调控措施方面可能大相径庭。例如在受制收缩是残余应力产生的主要原因时,可通过部分解除拘束的措施来调控焊接残余应力^[8],而建立在减少压缩塑性应变以调控残余变形理念之上的急冷法,在实施时却得到了急冷和无急冷试件的最终收缩量几乎相同的结论^[2]。有无坡口的焊件残余应力与变形产生的结果完全类似,可以归因于焊缝的截面和冷却收缩大致相同。

1.2 关于固有应变的分析与完善

文献[5]认为固有应变可视为内应力的产生源,等于总的变形应变减去弹性应变,而焊接过程中的固有应变是塑性应变 ϵ_p 、热应变 ϵ_T 和相变应变 ϵ_X 之和,在不考虑相变应变时,残余压缩塑性应变和残余热收缩应变都是固有应变^[7]。无论焊件上有无坡口,焊缝处在完全冷却之后也不会出现残余压缩塑性应变,只会出现拉伸应变(包括弹性和塑性拉伸应变),因而作者认为在不考虑相变应变时,焊缝处的固有应变应为塑性拉伸应变。如下所述,在近缝区母材上,由于残余应变为拉伸应变(已发生的塑性压缩变形是不可恢复的永久变形,焊件的平衡端面应短于初始值),故可将焊接工件上的固有应变统一到塑性拉伸应变上来。

1.3 关于焊接残余应力的形成机理的讨论

对于纵向残余应力的产生过程,一般用图 1 描述: B 为板宽, ϵ_T 为自由变形, ϵ_e 为外观变形, ϵ_s 为

屈服应变, ac 段是弹性区, ad 段应力达 σ_s , d 点对应着 $500\text{ }^\circ\text{C}$, 屈服极限降低直至 e 点为 0 (对应 $600\text{ }^\circ\text{C}$)。随后的降温过程中,焊缝及近缝区的收缩受到母材的刚性制约,已发生了塑性压缩变形的区域又因受到塑性拉伸补偿部分压缩塑性变形量,最终出现拉伸残余应力的区域将与高温下受到塑性压缩的区域对应,除弹性拉伸区外还有塑性拉伸区存在(即图 1 下部的剖面线区域),弹性拉伸区与残余拉应力相吻合。显而易见,母材中的塑性压缩应变是导致低碳钢板上堆焊时纵向残余应力的主要原因。计算结果表明,在全刚性制约的前提下, Q235 钢板加热时达到压缩塑性应变的温升约为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ ^[9]。塑性压缩应变理论还用于描述横向残余应力形成过程,其基本观点是对接焊缝横向收缩的主要部分是由于母材收缩引起的,母材在焊接过程中膨胀,当焊缝金属凝固时,已膨胀的母材必然受到塑性压缩,该收缩就是横向收缩的主要部分,焊缝本身的收缩大约只有实际收缩的 10% ^[2]。采用截面法将对接接头沿焊缝轴线切开之后,由板边堆焊时所产生的变形趋势推得 σ_y' 的分布: 焊缝上必然存在两端为压应力,中心附近部位为拉应力的横向应力 σ_y' ^[9]。

图 1 中所描述的板上堆焊模型只适于描述堆焊耐磨层等场合,与实际对接接头差别较大^[8]。另外,将材料力学中的截面法用于分析横向残余应力的科学性值得探讨,因为它一般仅适于弹性体系,在添加 σ_y' 分量使分离后的钢板几何形状复原之后,并不能保证整个力学体系恢复到分离前的状态,因为这是一个至少在二维空间上的力学平衡体系,例如添加 σ_y' 分量后无法保证使 σ_x 分布复原。

作者认为,在不考虑相变的情况下,除了传统机理所描述的母材中的压缩塑性变形引起焊接残余应力之外,焊缝金属冷却时的受制收缩也是导致焊接残余应力产生的重要原因^[8]。

2 平板上软钎焊时残余应力实测

综上所述,对于焊接残余应力形成机制而言,不管在焊缝或母材上是否出现了塑性压缩应变,至关重要的问题是其收缩被制约的程度,若自由收缩得以完成,焊接残余应力不会存在。为探索其形成机制,作者设计了在 Q235 钢板上堆焊低熔点焊道的试验方案。如母材的温升低于 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,出现了数值可观的焊接残余应力时,其产生机制就可能与焊缝收缩密切相关,而与母材上出现的塑性压缩应变无关。

2.1 试验条件

Q235 钢板尺寸 250 mm×100 mm×8 mm, 预先进行去应力退火处理。试样上的应变片分布如图 2 所示, 用 502 胶粘贴应变片, 固化时间不少于 24 h。

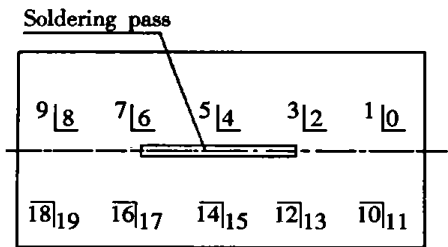


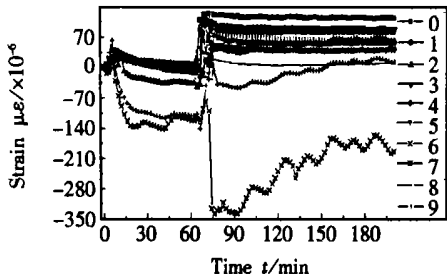
图 2 Q235 钢板试样及应变片布置示意
Fig. 2 Schematic diagram of soldering sample and arrangement of strain gauge

在距焊缝轴线 10 mm 的平行直线上, 粘贴了 5 片双向应变花 ($S_1 \sim S_5$, 相邻应变花间距 50 mm, S_1

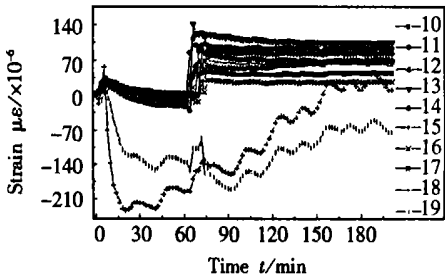
和 S_5 的钻孔中心与板端相距 25 mm), 在距焊缝轴线 25 mm 的平行直线上所粘贴 5 片双向应变花 ($S_6 \sim S_{10}$) 间距与之相同。锡焊道长 90 mm, 宽 8 mm, 高度为 3 mm。在各应变片与 YJ-22 型静态应变仪联接之后, 借助于 YJPC2 智能接口每隔 2 min 自动测取 $S_1 (\epsilon_0, \epsilon_1) \sim S_{10} (\epsilon_{18}, \epsilon_{19})$ 的纵横应变值 (脚标为偶数者是纵向应变, 脚标为奇数者是横向应变) 各 1 次, 时间延续共 200 min, 存放在数据文件中。用熔点约 210 °C 的市售的锡焊丝在钢板上形成焊道, 用 BB120-4AA (11) 型测温应变片监测距焊缝轴线 10 mm 处的升温; 焊接顺序为从左至右。

2.2 试验结果及分析

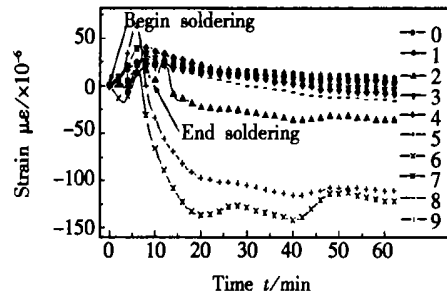
Q235 钢板试样从软钎焊开始至钻盲孔后的应变随时间的变化如图 3 所示。图 3a 和图 3b 给出了约 200 min 时间内各应变片测取的应变值变化情况, 图 3c 和图 3d 给出了软钎焊开始至钻盲孔之前



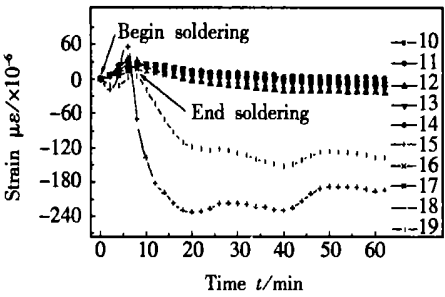
(a) Strains of ϵ_0 to ϵ_9 after soldering (0 to 200 min)



(b) Strains of ϵ_{10} to ϵ_{19} after soldering (0 to 200 min)



(c) Strains of ϵ_0 to ϵ_9 after soldering (0 to 62 min)



(d) Strains of ϵ_{10} to ϵ_{19} after soldering (0 to 62 min)

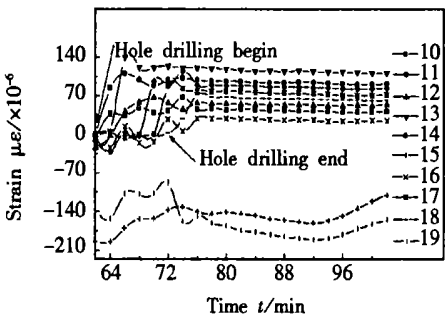
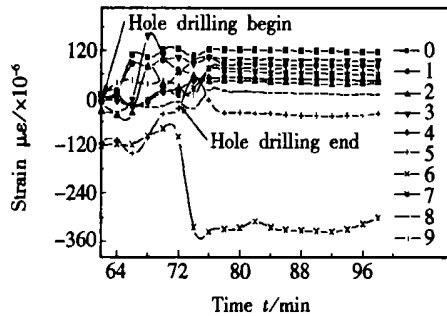
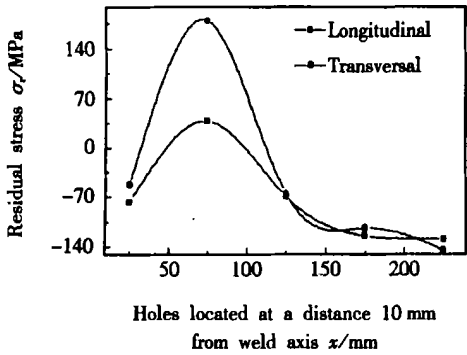


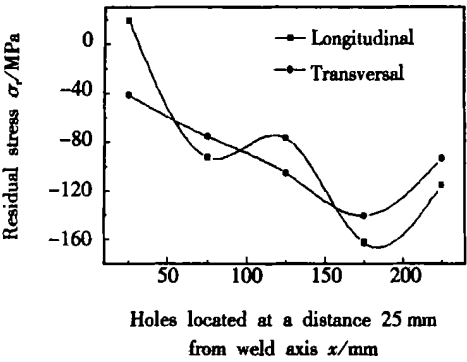
图 3 Q235 钢板试样从软钎焊开始至钻盲孔后的应变随时间的变化
Fig. 3 Strains vs time measured by strain gauges after soldering and hole drilling

各应变测试值随时间的变化,图 3e 和图 3f 给出了开钻之后各应变测试值随时间的变化。锡焊道堆敷时间和钻盲孔时间均为约 10 min,图 3c 和图 3d 中均标出了钎焊开始时间(0 min)和终了时间(10 min),图 3e 和图 3f 中均标出了钻孔开始时间(62 min)和终了时间(72 min)。

在停钻以后继续测取应变值共 146 min,取相邻两次读数相差 1~2 $\mu\epsilon$ 以内的测试值用于计算残余应力,该时间为停钻后 20 min。为考察软钎焊中焊接残余应力的大小,将测得的应变换算为应力后,按盲孔中心与焊缝轴线距离的不同,将沿轴线距 10 mm($S_1 \sim S_5$)和 25 mm($S_6 \sim S_{10}$)的直线上的残余应力分布分别绘于图 4a 和图 4b 中,纵向和横向残余应力分别由不同曲线标示出。图 4a 中,残余应力的峰值出现在与始焊部位相对应之处,而图 4b 中,残余应力峰值出现在靠近板端的地方。



(a) Along the line 10 mm parallel to the axis of the weld



(b) Along the line 25 mm parallel to the axis of the weld

图 4 沿平行于焊缝轴线的直线上焊接残余应力的分布
Fig. 4 Distribution of residual stress along a certain line parallel to axis of weld

由图 3 可知,在整个 200 min 的测试时间内,各应变栅的测试值有两次剧烈变化。一次在钎焊中,图 3c 给出了横向应变 ϵ_5 和纵向应变 ϵ_6 的较大变化;而在图 3d 中,横向应变 ϵ_{15} 和 ϵ_{19} 变化显著。在纵向应变方面,由于 S_4 紧邻始焊部位,与焊缝平行

的应变栅轴线与焊缝边缘相距仅 6 mm,故焊缝端部的收缩导致 ϵ_6 出现负值,而因 $S_6 \sim S_{10}$ 离焊缝轴线稍远,焊缝的纵向收缩对其没有显著的影响,图 3d 中的纵向应变均呈相似的变化趋势,即钎焊之初有所上升,而随着时间的推移而缓慢降低;在横向应变方面,由于 S_3 和 S_8 与焊缝长度的中点相对应,钎焊完成之后,母材对该两应变片处的横向变形拘束程度较低,因而 ϵ_5 和 ϵ_{15} 在钎焊之后有较大的收缩应变被检测出来,与之相似的还有 ϵ_{19} 。另一次是在钻盲孔过程中,图 3e 给出了纵向应变 ϵ_6 的较大变化, ϵ_6 减小了 200 $\mu\epsilon$ 左右,而在图 3f 中, ϵ_{19} 减小了 50 $\mu\epsilon$ 左右,其它各应变栅的测试值相对于钻孔之前均有所增加。

在图 3 中给出的应变测试值中,所表征的物理意义是不同的:在 62 min 之前描述的是金属试样经钎焊之后发生的外观变形;而 62~92 min 之间表征的是钻孔后释放出的内部变形,其值与试样的内应力密切相关,例如 ϵ_6 和 ϵ_{19} 在钻孔之后应变的进一步降低,说明还有部分收缩应变被制约而未能进行完全;92 min 之后的变化可能与温度变化和应力松弛有关,试验室的环境温度为 24 $^{\circ}\text{C}$,由 1 台空调器控温,周期约为 20 min,锡的线膨胀系数比钢的约高 1 倍,这种交变效应使得钢板内的残余应力趋于下降。

钎焊实施后,沿平板试样的对称轴线形成高度为 3 mm 的锡焊道,其体积约为 2.16 cm^3 ,重量为 15.8 g,按其在使用焊锡膏的条件下熔点为 210 $^{\circ}\text{C}$ 估算,其从熔点冷却至 25 $^{\circ}\text{C}$ 时放出的总热量约为 2327.1 J(包括其凝固潜热 60.7 J/g)。在理论计算方面,假定这些热量全部用于加热体积为 10 cm^3 的母材(包括焊缝下方及近缝区,其长 125 mm,宽 25 mm,厚度为 3.2 mm),重量约为 76 g。按 $\alpha\text{-Fe}$ 的热容表达式计算,假定将钎焊后放出的所有热量用于升高该区域内母材的温度时,所得温升略低于 90 $^{\circ}\text{C}$ 。而从实测情况来看,据测温应变片的测试信号,得到测点处的最高温度值为 90 $^{\circ}\text{C}$,该处温升仅为 65 $^{\circ}\text{C}$ 。因而可以肯定,堆敷钎焊焊道下方母材中的温升难以达到塑性压缩变形产生的最低限度(在全拘束条件下温升为 100 $^{\circ}\text{C}$),故该试验条件下的焊接残余应力只能与焊缝的受制收缩有关。实际上,作者已进行了与之类似的在钢板上堆敷胶层、于室温下固化的试验,同样得到了出现高值残余应力的结果(另文发表),因而焊接残余应力的形成机制中,焊缝的受制收缩实际上有着举足轻重的作用。

升高(见图 1)。表明相对细小的晶粒度, 相对细小、均匀分布的 M—A 颗粒以及适当数量的晶界小块状 F, 晶内细条状或针状 F 组成的显微组织对冲击韧度的改善有利。这表明, 对试验钢, 存在一个相对最合理的焊接工艺, 有望获得相对最佳的焊后韧性。

4 结 论

- (1) 用干涉层腐蚀法制备的低碳微合金钢试样, 能够在光学金相显微镜下清晰显示焊后显微组织中的粒贝及 M—A 组元, 有利于工艺参数—显微组织—性能关系的研究。
- (2) 试验钢焊后冷却期间生成了大量的铁素体和粒贝组织, 其形态和数量受热模拟工艺参数 T_{\max} 和 $t_{8/5}$ 的影响, 显示出冲击韧度—显微组织—工艺参数之间的良好对应。
- (3) T_{\max} 的升高或 $t_{8/5}$ 的增加都会使显微组织粗化, 韧性下降。而 $T_{\max}=1\,320\,^{\circ}\text{C}$ 和 $1\,360\,^{\circ}\text{C}$, $t_{8/5}=$

100 s 时, 产生均匀细小的显微组织, 对应有冲击韧度值的明显上升, 应为相对最佳的焊接工艺参数。

参考文献:

[1] 尹桂全, 黄龙旺. 微Ti钢焊接热循环过程中的第二相粒子 [J]. 焊接学报, 2000, 21(4): 50~53.

[2] 尹桂全, 高甲生, 洪永昌, 等. 低碳 Ti—Nb 系列钢焊后显微组织和性能 [J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 71~74.

[3] 吕德林, 李砚珠. 焊接金相分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[4] 康沫狂, 杨思品, 管敦惠. 钢中贝氏体 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.

[5] Davis C L, King J E. Effect of cooling rate on intercritically reheated microstructure and toughness in high strength low alloy steel [J]. Mater. Sci. Technol. Jan, 1993, 9(1): 8~5.

作者简介: 尹桂全, 女, 1948 年 9 月出生, 教授。主要从事金属 X 射线学、金属电子显微分析、金属材料学等课程的教学和研究工作, 表论文 30 余篇。

[上接第 54 页]

3 结 论

- (1) 根据作者对焊接残余应力产生机制的分析, 虽然残余压缩应变和残余收缩应变在导致焊接残余应力产生的作用方面是等价的, 但其本质却有不同, 区别二者对焊接残余应力形成过程的贡献是有意义的, 对于研究和开发新的焊接残余应力调控技术有指导作用。在不考虑相变的情况下, 除了传统机理所描述的母材中的压缩塑性变形引起焊接残余应力之外, 焊缝金属冷却时的收缩受到制约也是导致焊接残余应力产生的重要原因, 材料力学中的“截面法”直接用于分析横向残余分量的分布缺乏科学依据。
- (2) 分析了导致残余应力产生的固有应变, 焊缝处和近缝区母材上, 由于残余应变为拉伸应变, 作者认为在不考虑相变应变时, 焊缝处的固有应变应为塑性拉伸应变。可将焊接工件上的固有应变统一到塑性拉伸应变上来。
- (3) 进行了在 Q235 钢板上堆敷软钎焊焊道的试验研究, 结果表明在计算和实测结果显示焊接后母材升温低于 $100\,^{\circ}\text{C}$ 的情况下, 接头上仍出现了数值相当可观的残余应力, 从而证明了焊缝的受制收缩对焊接残余应力的形成有至关重要的作用。由于焊缝和母材的线膨胀系数差异较大, 其应变测试值与环境温度有关。

参考文献:

[1] 库兹米诺夫 C A . 船体结构的焊接变形 [M]. 王承权 译. 北京: 国防工业出版社, 1978.

[2] 增渊兴一. 焊接结构分析 [M]. 张伟昌 译. 北京: 机械工业出版社 1985.

[3] Michelenis P, Dantzig J, Tortorelli D. Minimization of welding residual stress and distortion in large structure [J]. Welding Journal. 1999, 78 (11): 361s~365s.

[4] Guan Q. A survey of development in welding stress and distortion controlling in aerospace manufacturing engineering in China [J]. Welding in the World 1999, 43(1): 64~74.

[5] Ueda Y, Kim Y C, Yuan M G. A predication method of welding residual stress using source of residual strain (Report 1)—characteristics of inherent strain (source of residual strain) [J]. J. Trans. of JWRI, 1989, 18(1): 135~141.

[6] 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.

[7] 汪建华, 陆 皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题探讨 [J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 75~79.

[8] 游 敏, 郑小玲. 对接接头横向残余应力调控技术研究 [J]. 焊接学报, 2002, 23(4): 37~40.

[9] 章应霖, 游 敏, 厉雷均. 焊接结构工程 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

作者简介: 游 敏, 男, 1958 年 7 月出生, 工学博士, 教授, 硕士生导师, 湖北省机械工程学会理事。主要从事金属胶接接头性能和焊接残余应力调控技术等方面的研究, 发表论文和著作 90 余篇(部)。

Email: youmin@ctgu.edu.cn