

随焊冲击碾压减小应力变形防止热裂纹应变场分析

范成磊, 方洪渊, 陶军, 王霄腾

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 随焊冲击碾压法(Weld with Trailing Impact Rolling, WTIR)是一种降低应力、减小变形防止热裂纹的新方法。文中分析了在前后冲击碾压轮作用下, 焊缝金属塑性流动和应变场的变化规律, 揭示了这种方法的机理。前轮周面内凹, 迫使焊缝金属由焊趾处向焊缝中心流动, 对处于脆性温度区间的焊缝金属施加一个横向挤压塑性应变, 减小甚至抵消致裂的拉伸应变, 防止了焊接热裂纹的产生。后轮缘稍向外凸, 将焊缝金属冷却产生的压缩塑性变形充分碾开, 减小了工件的应力和变形。试验结果表明, 随焊冲击碾压能有效地防止焊接热裂纹的产生, 将试件的纵向挠曲变形与横向收缩变形量控制到常规焊接状态的 $1/10$ 和 $1/5$ 左右, 同时能将薄壁构件焊接残余应力控制到非常低的水平, 甚至由拉应力状态转变为压应力状态, 验证了应变场分析的正确性。

关键词: 冲击碾压; 应力; 变形; 热裂纹; 焊接应变场

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)06-47-04



范成磊

0 序 言

焊接时, 焊缝区金属在加热过程中, 因热膨胀受到限制而产生塑性挤压, 在随后的冷却过程中该部位因热收缩受到限制又产生了塑性拉伸。一般而言, 焊缝金属在冷却阶段的拉伸塑性变形不足以抵消其在加热阶段产生的挤压塑性变形, 焊件中就会有残余压缩变形保留下, 从而使焊缝金属在冷却过程中承受拉伸应变, 并且导致工件焊后出现较高的残余应力和变形^[1~3]。另外, 当焊缝金属冷却到固液共存的脆性温度区间内时, 如果其塑性储备小于拉伸应变对温度的变化率, 则产生热裂纹^[1, 4]。因此, 如果当焊缝金属冷却至脆性温度区间内时, 对其施加一定的挤压应变以抵消致裂的拉伸应变, 则可有效地防止焊接热裂纹的产生。在随后的冷却过程中, 若对焊缝金属额外施加一定的拉伸应变, 减小或抵消残余压缩变形, 就可能减小焊后残余应力和变形^[1, 5, 6]。

基于上述思想, 提出了一种全新的控制焊接应力变形、防止焊接热裂纹的新方法——随焊冲击碾压法。主要研究在冲击碾压轮的作用下, 焊接应变场的变化规律, 明确其减小焊接应力变形防止热裂纹的机理, 为其进一步应用奠定基础。

收稿日期: 2003-12-22

基金项目: 总装“十五”计划项目(41318.5.1.6)

1 WTIR 设备和工作过程

图 1 是随焊冲击碾压(WTIR)装置结构图, 从图中可以看出随焊冲击碾压机构主要由动力源(气锤)、冲击传力杆、冲击碾压轮后座、压缩弹簧、扭簧和两个冲击碾压轮等构成。

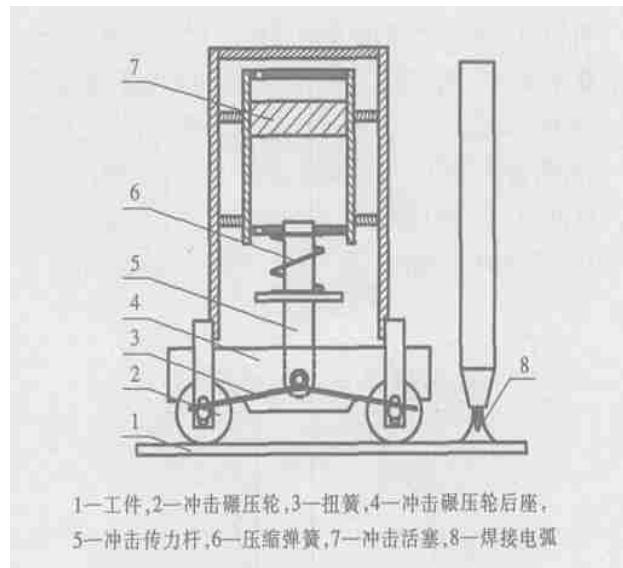


图 1 随焊冲击碾压装置简图

Fig. 1 Device of WTIR

工作时, 随焊冲击碾压机构紧紧跟随在焊接电弧后面, 并与焊枪同步运动。气锤冲击活塞在压缩空气的推动下, 在气缸中上下运动, 当运动到两端位置时, 气流换向, 活塞将向相反方向运动。当活塞向

下冲击时, 在行程的末端受到冲击传力杆的阻挡, 在接触的瞬间, 将能量传递给冲击传力杆; 这时气流换向, 活塞开始向上运动, 开始下一个冲击循环; 而冲击传力杆将带动冲击碾压轮后座一起向下冲击。冲击力通过冲击碾压轮后座与冲击碾压轮之间的配合曲面传递到前后冲击碾压轮, 并最终作用到被焊工件上。当活塞向下冲击时, 冲击碾压轮被巨大的冲击力紧紧的压在工件表面不动, 由于工件与冲击碾压轮之间存在水平方向的相对运动, 所以这是一个冲击加碾压的综合过程; 冲击作用时间是十分短暂的, 当冲击过程结束时, 在冲击反作用力的作用下, 冲击碾压轮后座和冲击传力杆向上弹起, 在扭簧压力作用下, 冲击碾压轮与其后座脱离仍然被压在工件表面上并随整个冲击碾压机构的运动而向前转动。

2 冲击碾压轮作用下焊接应变场的分布

随焊冲击碾压法主要是通过两个冲击碾压轮, 对焊后尚处于高温状态的焊趾和焊缝区金属施加一定频率($50\sim100\text{ Hz}$)冲击碾压力, 迫使这部分金属沿着需要的方向发生塑性变形流动, 有目的的调整了焊接应变场的分布, 从而起到降低应力、减小变形、防止热裂纹的效果。

控制工件表面金属塑性变形流动方向的关键, 是冲击碾压轮轮廓形状的设计。图 2a 为冲击碾压机构的前轮, 它的形状是内凹的, 工作时它跟随在焊接电弧的后面, “跨”在焊缝上面, 其两侧轮缘紧紧地压在焊趾部位。适当调节前轮与焊接电弧之间的距离, 使前轮缘下方的焊缝金属正好处于脆性温度区间内。当冲击碾压轮后座向下冲击时, 前冲击碾压轮就对焊趾部位金属施加一个冲击碾压作用。

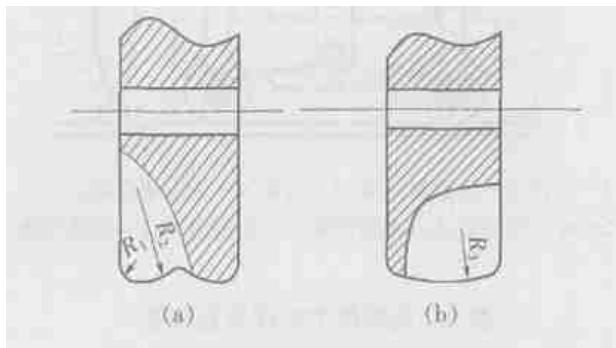


图 2 冲击碾压前轮(a)和后轮(b)形状

Fig. 2 Diagram of (a) front and (b) rear impact rollers

图 3 所示为在前轮作用下焊缝中剪切应变的分布, 从图中可以看出, 前轮不仅对处于其轮缘下方的

金属有垂直向下的挤压作用, 同时还将轮缘两侧的金属向斜上方排挤。由于 $R_2 > R_1$, 所以在相同的压入深度的情况下, 向内排挤的金属量要大于向外排挤的金属量, 即前轮对其轮缘内侧的焊缝金属的挤压作用要大于对轮缘外侧的金属的挤压。同时, 由于两轮缘之间焊缝金属的温度要高于其外侧金属温度, 更加强了这种挤压趋势。在两侧轮缘的挤压作用下, 焊缝金属被迫由焊趾处向焊缝中心流动, 这样就对处于脆性温度区间的焊缝金属施加一个横向挤压塑性应变, 见图 4a, 减小甚至抵消了致裂的拉应变, 从而达到防止焊接热裂纹的目的。但必须指出的是, 前轮在对焊缝金属施加挤压作用防止焊接热裂纹的同时, 也不可避免的加剧了焊缝的横向收缩。

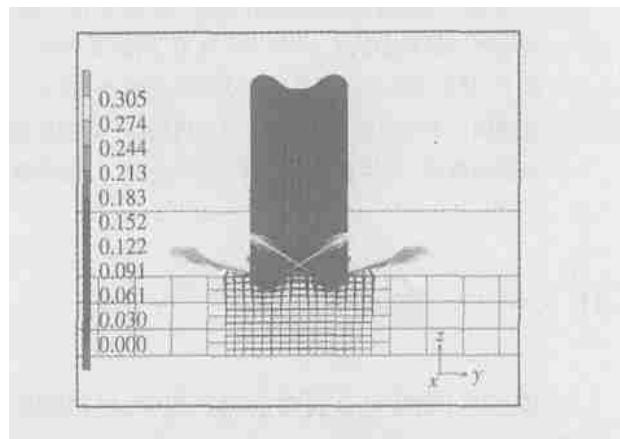
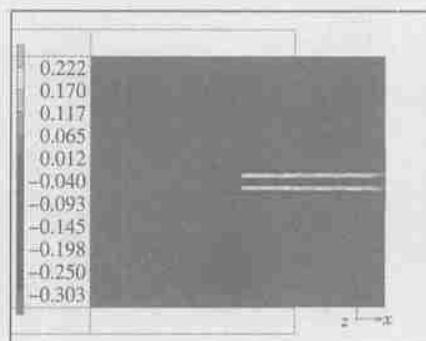


图 3 在前轮作用下试件中的剪切塑性应变

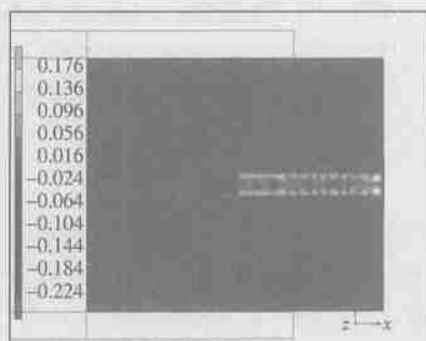
Fig. 3 Shearing plastic strain in weldment under front impact roller

图 4b 所示为在前轮作用下工件上纵向塑性应变的分布。由图可以看出, 在前轮缘正下方熔合线附近的金属, 在纵向上承受拉伸塑性应变, 这说明前轮将其轮缘下方金属的纵向压缩塑性变形充分碾展, 这必将减小这部分金属的纵向残余应力和挠曲变形。

图 2b 为冲击碾压机构后轮, 其轮缘形状略向外凸, 工作时它紧紧的压在焊缝中心部位。焊接时, 选用恰当的前后轮间距, 使后轮下方的金属冷却到脆性温度区间以下。当冲击碾压轮后座向下冲击时, 冲击碾压后轮就给焊缝金属施加一个冲击碾压作用。图 5 是在后轮作用下焊缝中剪切塑性应变的分布, 由图可知后轮不仅对其下方的金属有垂直向下的挤压作用, 而且在横向上将其向两侧排挤, 迫使其由焊缝中心线向熔合线流动, 这样就对焊缝金属施加了一个延展作用, 将焊缝金属冷却收缩产生的横向压缩塑性变形和前轮对焊缝施加的横向挤压应变充分碾开, 如图 6a 所示, 这必然会减小工件的横向收缩变形。



(a)



(b)

图4 前轮作用下工件中横向(a)、纵向(b)塑性应变

Fig. 4 Transverse (a) and longitudinal (b) plastic strain in weldment under front impact roller

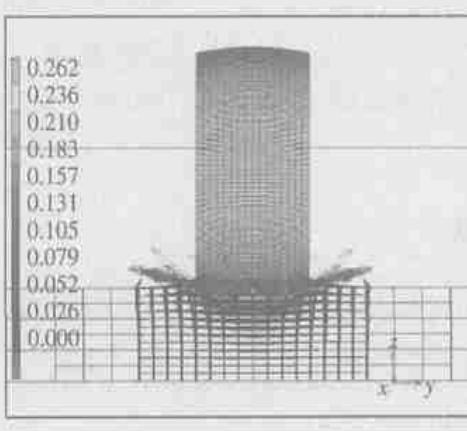
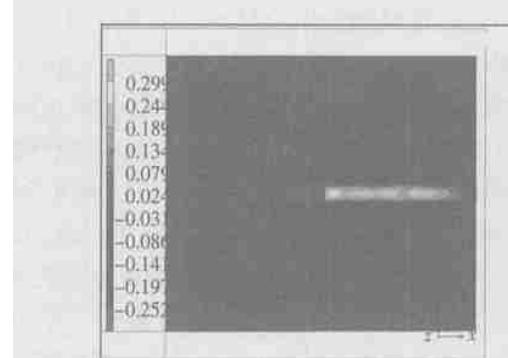


图5 后轮作用下工件中的剪切塑性应变

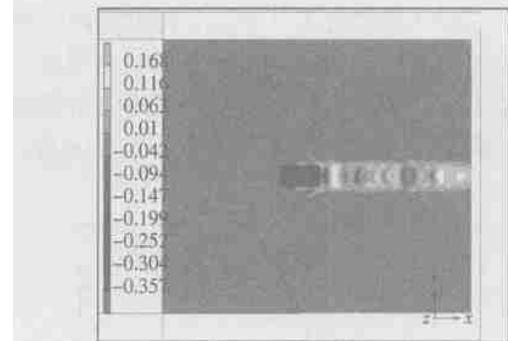
Fig. 5 Shearing plastic strain in weldment under rear impact roller

同前轮一样, 后轮对焊缝金属也有纵向延展作用, 如图6b所示。综合考虑图4b和图6b可知, 焊接接头处金属的纵向压缩塑性变形都被延展, 这必将降低整个焊接试件的纵向残余应力和挠曲变形。

总之, 在前后轮的共同作用下, 无论是焊趾处还是焊缝中心部位的压缩塑性变形, 在纵向和横向都被充分延展, 达到了降低残余应力、减小了焊接变形的目的。



(a)



(b)

图6 后轮作用下焊缝中横向(a)、纵向(b)塑性应变

Fig. 6 Transverse (a) and longitudinal (b) plastic strain in weldment under rear impact roller

3 随焊冲击碾压法控制应力变形防止热裂纹工艺试验

图7a所示为没有进行冲击碾压的常规焊缝形貌, 图7b所示为随焊冲击碾压后的焊缝形貌。从图

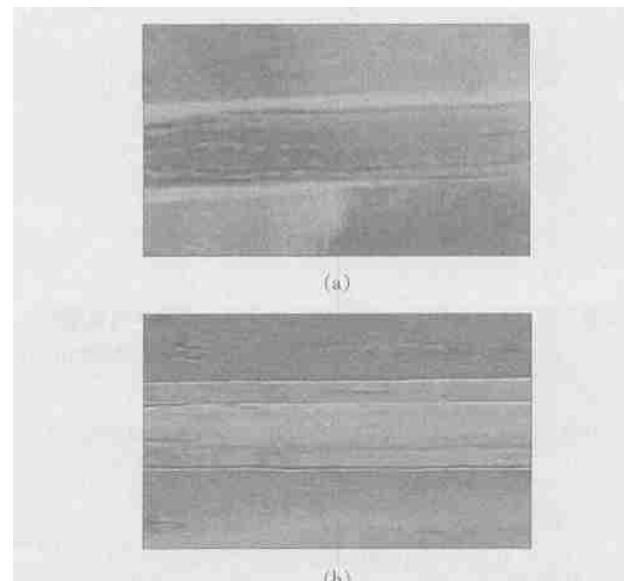


图7 常规焊(a)和WTIR焊(b)形貌对照(LD10铝合金, 厚度为2 mm, $I=125$ A, $v=500$ mm/min)

Fig. 7 Surface of WTIR weld (a) and ordinary weld (b)

中可以看出在常规焊缝中心部位出现了几乎贯穿全长的热裂纹, 而随焊冲击碾压后的焊缝中没有热裂纹。

图 8a 所示为随焊冲击碾压法对焊接试件纵向挠曲变形控制效果。从图中可以看出, 没有进行随焊冲击碾压的试件的纵向挠度最大值达到 9.84 mm, 而随焊冲击碾压试件纵向挠度最大值为 1.02 mm, 仅为前者的 1/10 左右, 证实了焊缝试件的纵向压缩塑性变形被前后冲击碾压轮充分碾展。图 8b 所示为随焊冲击碾压法对焊接试件横向收缩控制效果。从图中可以看出, 横向收缩量平均值从没有进行随焊冲击碾压的试件的 0.45 mm 降低到随焊冲击碾压试件的 0.1 mm 左右。这就充分说明焊缝金属冷却过程中产生的横向压缩应变和前轮对焊缝额外施加的横向挤压应变确实被后冲击碾压轮充分碾展。

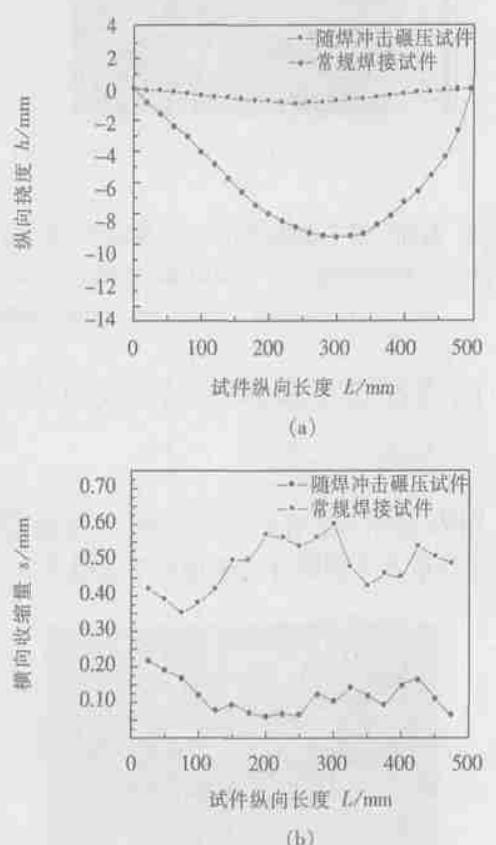


图 8 WTIR 对焊接试件的纵向挠曲变形 (a) 和横向收缩变形 (b) 控制效果 (LY12 铝合金, 500 mm \times 300 mm \times 2 mm, I = 127 A, v = 500 mm/min)

Fig. 8 Flexural deflection (a) and transverse shrinkage (b) of WTIR weld and ordinary weld

图 9 是随焊冲击碾压后的试件和没有进行随焊冲击碾压的试件的纵向应力分布图, 从图中可以看出随焊冲击碾压后, 纵向应力较没有进行随焊冲击碾压的情况大大降低, 特别是焊缝中心部位甚至由原来的拉应力状态变转为压应力状态。

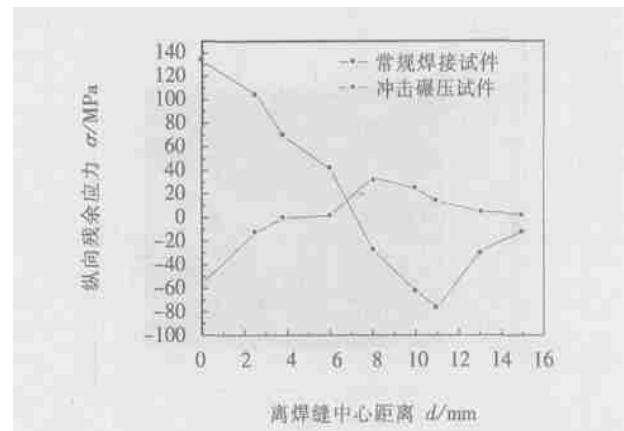


图 9 WTIR 试件和常规焊接试件纵向应力对比图

Fig. 9 Distribution of longitudinal residual stress in transection of WTIR and ordinary weldment

4 结 论

(1) 在前冲击碾压轮的作用下, 焊缝金属被迫从焊趾处向焊缝中心流动, 从而对处于脆性温度区间的焊缝金属施加了一个额外的挤压应变, 减小甚至抵消了致裂的拉应变, 起到防止焊接热裂纹的效果。

(2) 在前后轮共同作用下, 焊接接头部位的纵向和横向压缩塑性变形都被充分延展, 降低了残余应力, 减小了焊接变形。

(3) 通过随焊冲击碾压可以将试件的纵向挠曲变形控制在常规焊接的 1/10 左右, 将横向收缩变形控制在常规焊接的 1/5 左右。同时试件中的残余应力大大降低, 甚至由拉应力转变为压应力, 有效地防止了焊接热裂纹的产生, 验证了文中应变场分析的正确性。

参考文献:

- [1] 田锡唐. 焊接结构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] Guo Shaoqing, Tian Xitang, Xu Wenli. Transverse stress-strain evolution during welding of thin aluminum alloy plate [J]. China Welding, 1998, 7(2): 86-92.
- [3] Koichi Masubuchi. Research activities examine residual stresses and distortion in welded structures [J]. Welding Journal, 1991, 70(12): 41-46.
- [4] Liu W, Tian X, Zhang X. Preventing weld hot cracking by synchronous rolling during weld [J]. Welding Journal, 1996, 75(9): 297s-304s.
- [5] Guo Shaoqing, Li Xiaohong, Xu Wenli, et al. Welding distortion control of thin aluminum alloy plate by static thermal tensioning [J]. Journal of Material Science & Technology, 2001, 17(1): 163-164.
- [6] Guan Q, Guo D L, Li C Q. Low stress non-distortion (LSND) welding a new technique for thin material [J]. Welding in the World, 1994, 33(3): 160-167.

作者简介: 范成磊, 男, 1976 年 6 月出生, 博士研究生。主要研究方向为焊接力学及可靠性, 发表论文 5 篇。

Email: fclwh@hit.edu.cn