第24卷 第5期
2003年10月
焊 接 学 报
TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION
Vol. 24 No. 5
October 2003

低相变点焊缝金属接头的焊接残余变形

王文先， 霍立兴， 张玉凤， 王东坡
（天津大学 材料科学与工程学院，天津 300072）

摘 要：试验中低相变点焊缝金属的固态相变温度在190℃左右，由于焊缝金属相变体积膨胀使其焊接接头的焊接残余变形降低。利用低相变点焊条LTTE和普通焊条E5015通过V形坡口对接接头和半V形坡口T形接头的角变形以及平板堆焊试验，探讨了焊缝金属固态相变对焊接变形的影响。两种接头角变形试验结果表明，LTTE焊条试件具有较小的角变形，其角变形分别为E5015焊条试件角变形的69.1%和64.3%；LTTE焊条平板堆焊试件出现反变形，在该试验条件下反变形挠度为-1.9 mm，而E5015焊条试件的正变形挠度为2 mm。这些试验结果为减小和控制焊接残余变形提供了一条有效的方法。

关键词：固态相变；焊缝金属；焊接接头；焊接变形
中图分类号：TG404 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-360X(2003)05-05-05

王文先

0 序 言

焊接残余变形是焊接结构不可避免的缺点之一，它的存在造成了焊接结构形状变异、尺寸精度下降和承载能力降低，并在工作载荷作用下引起附加弯矩应力和应力集中，是造成焊接结构早期失效的主要原因，也是造成焊接接头疲劳强度下降的原因之一。

人们采取了许多工艺方法来预防和控制焊接残余变形[1~3]，如，反变形方法、刚性固定法、合理选择焊接顺序、限制焊接线能量等，也经常采用理论计算来评估焊接变形[4]，这为改善焊接结构的质量提供了保障。

低相变点焊缝金属由于焊接冷却过程中在较低的温度下才发生固态相变[5]，相变体积膨胀可以有效地减小焊缝金属的整体收缩，从而有望降低焊接残余变形。作者利用低相变点焊条LTTE和普通焊条E5015通过V形坡口对接接头和半V形坡口T形接头的角变形以及平板堆焊试验，探讨了焊缝金属固态相变对焊接变形的影响，初步分析了低相变点焊缝金属对减小和控制焊接残余变形的作用。

1 试验材料

对接接头和T形接头的试验母材采用20 mm厚的16Mn钢板，试件尺寸为250 mm×110 mm×20 mm。平板堆焊试验母材采用8 mm厚的16Mn钢板，试件尺寸为190 mm×60 mm×8 mm。焊接材料采用直径为ϕ4 mm自行研制的低相变点焊条LTTE和普通结构钢焊条E5015两种，它们的熔敷金属化学成分和相变特征见表1。LTTE焊条的其它组织特性和热物理性能，文献[5]有详细的阐述，在此不再赘述。

表1 试验材料的化学成分(质量分数，%)和相变特征

Table 1 Chemical composition and transformation characteristic of test materials

Materials	Chemical composition								Transformation characteristic	
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	T_s/℃	ε_{exp}(%)
16Mn	0.15	0.31	1.24	0.010	0.016	—	—	—	693	0.13
D. M. of E5015	0.05	0.51	1.26	0.013	0.024	—	—	—	758	0.11
D. M. of LTTE	0.07	0.23	1.25	0.015	0.012	9.10	8.64	0.33	190	0.63

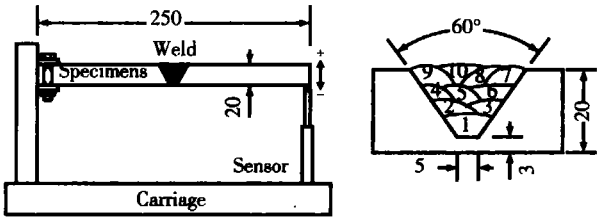
2 对接接头的焊接角变形

2.1 试验方法

对接接头焊接角变形的试验方法如图1a所示。在钢板长度方向的中部开V形坡口，坡口角度60°，

收稿日期：2003-01-06
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50175079)；
中国博士后科学基金资助项目(2003033348)

为了防止错边变形和焊穿，坡口底部留有宽5 mm、厚3 mm的钝边。把试板用螺栓固定于专用的支撑架上并保持水平，自由端（右边）安装位移传感器，测量仪器采用YBD－3动态应变仪和TYPE3036型250 mm X－Y记录仪。



(a) Test method sketch (b) Welding sequence

图1 对接接头试验方法示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of test method for butt joints

用LTTE焊条和E5015焊条依次在两个试板的V形坡口内进行焊条电弧焊，焊接层数为4层，共10道，焊接顺序如图1b所示，层（道）间温度小于100 ℃，即需保证焊接时间间隔20 min。焊接工艺规范参数如表2所示。

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

Weld	Voltage U/V	Current I/A	Length s/mm	Speed v/(mm·min^{-1})
1	23～25	135	110	170
2～10	20～22	155	110	150

2.2 试验结果及分析

在焊接过程中，X－Y函数记录仪自动记录试件自由端y方向位移随时间变化曲线，两种焊条试件的试验曲线如图2所示，每道焊缝引起自由端位移变形曲线特征值见表3。

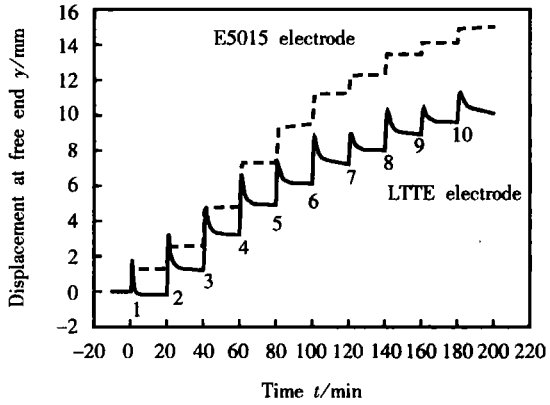


图2 对接接头自由端位移随时间的变化规律

Fig. 2 Variation of displacement at free end for butt joints

E5015焊条对接接头的变形曲线较为简单，每道焊缝均引起一个收缩变形（即向上位移），收缩量都不相同，但总的趋势是随着焊接道数（层数）的增加，总变形量增大，而每道焊缝引起的收缩量在下降。自由端最终焊接收缩变形量（位移量）为14.9 mm，换算成角变形β为7.08°。

LTTE焊条对接接头的变形曲线较为复杂，每道焊缝由于冷却过程中热收缩的作用均先引起一个收缩变形Δy_c，温度降到固态相变开始点时，由于焊缝金属的相变体积膨胀，则引起与收缩变形反方向的膨胀变形Δy_e（即向下位移）。膨胀变形量Δy_e与收缩变形量Δy_c之比为膨胀变形率δ_e，它代表了相变体积膨胀变形抵消热收缩变形的比例。在表3中，除了第1道焊缝之外，余9道焊缝的膨胀变形率δ_e均在0.43～0.61，平均值为0.54。被相变体积膨

表3 变形曲线特征值

Table 3 Characteristic values of distortion curves

Electrode	Characteristic value	Weld number / Displacement value/mm										Result
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
E5015	Starting point y_s	0	1.3	2.6	4.8	7.3	9.5	11.3	12.3	13.5	14.1	
	Ending point y_e	1.3	2.6	4.8	7.3	9.5	11.3	12.3	13.5	14.1	14.9	
	Real displacement $\Delta y_r = y_e - y_s$	1.3	1.3	2.2	2.5	2.2	1.8	1.0	1.2	0.6	0.8	Total 14.9
LTTE	Starting point y_s	0	-0.2	1.2	3.2	4.9	6.1	7.2	8.0	8.9	9.6	
	Maximum point y_m	1.8	3.2	4.7	6.6	7.3	8.8	8.9	10.3	10.4	11.3	
	Ending point y_e	-0.2	1.2	3.2	4.9	6.1	7.2	8.0	8.9	9.6	10.3	
	Contract displacement $\Delta y_c = y_m - y_s$	1.8	3.4	3.5	3.4	2.4	2.7	1.7	2.3	1.5	1.7	
	Expansion displacement $\Delta y_e = y_m - y_e$	2.0	2.0	1.5	1.7	1.2	1.6	0.9	1.4	0.8	1.0	
	Real displacement $\Delta y_r = y_e - y_s$	-0.2	1.4	2.0	1.7	1.2	1.1	0.8	0.9	0.7	0.9	Total 10.3
	Expansion strain $\delta_e = \Delta y_e / \Delta y_c$	1.11	0.59	0.43	0.5	0.5	0.59	0.53	0.61	0.53	0.59	Ave. 0.54

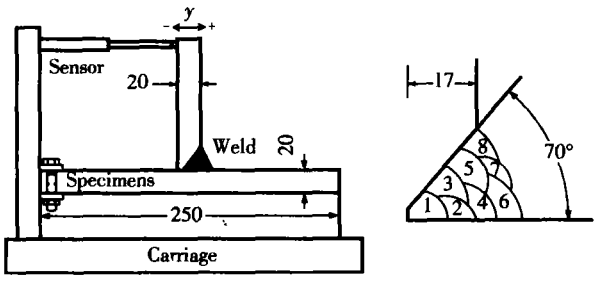
胀变形抵消后的收缩变形称之为收缩变形余量 Δy_r，10 道焊缝的收缩变形余量之和 $\Sigma\Delta y_r$ 即为最终焊接收缩变形量，其数值为 10.3 mm，即角变形 β 为 4.91°。这一数值相当于 E5015 焊条对接接头最终焊接收缩变形量的 14.9 mm 的 69.1%，即焊接残余变形降低了 30.9%。

值得一提的是，第一道焊缝引起的膨胀变形率 δ_e 却大于 1，也即收缩变形余量 Δy_r 为负值，出现了反变形。这是由于第一道焊缝厚度大于或等于预留钝边厚度，焊缝金属在较低温度下的相变体积膨胀大于其自身收缩效果，而钝边金属在冷却过程中始终在收缩，不能够有效约束焊缝金属的体积膨胀，致使出现反变形。在第二层焊缝以后，每道焊缝厚度均小于已焊焊缝金属（包括钝边金属）厚度，焊缝金属相变体积膨胀受到已焊焊缝金属的约束，小于其自身收缩效果，从而使得每道焊缝结束后仍保持其正变形状态。

3　T 形接头的焊接角变形

3.1　试验方法

T 形接头焊接角变形的试验方法如图 3a 所示。把平板用螺栓固定于专用的支撑架上并保持水平，立板置于平板的中部，焊前点固。立板边缘开单边 V 形坡口，坡口角度 70°，为了防止错边变形和焊穿，坡口底部留有宽 5 mm、厚 3 mm 的钝边。立板顶端安装位移传感器，测量仪器与 2.1 节相同。



(a) Test method sketch　　(b) Welding sequence

图 3　T 形接头试验方法示意图

Fig. 3　Diagrammatic sketch of test method for T - type joints

用 LTTE 焊条和 E5015 焊条依次分别在两个试板的单边 V 形坡口内进行焊条电弧焊，焊接层数为 4 层，共 8 道，焊接顺序如图 3b 所示，层（道）间温度小于 100 ℃，即保证焊接时间间隔 20 min。焊接工艺规范参数见表 4。

表 4　焊接工艺参数

Table 4　Welding parameters

Weld	Voltage U/V	Current I/A	Length s/mm	Speed v/(mm · min^{-1})
1	23 ~ 25	135	110	170
2 ~ 8	20 ~ 22	155	110	150

3.2　试验结果及分析

在焊接过程中，X - Y 函数记录仪自动记录立板顶端 y 方向（水平）位移随时间变化曲线，两种焊条的试验曲线如图 4 所示，每道焊缝引起变形曲线特征值见表 5。

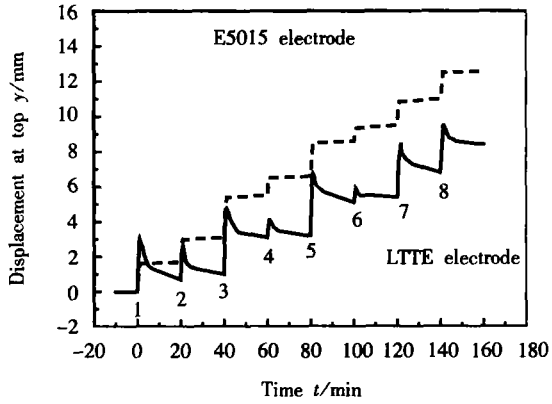


图 4　T 形接头立板顶端变形随时间的变化规律

Fig. 4　Variation of displacement at top of vertical plate for T - joints

同对接接头角变形一样，E5015 焊条 T 形接头的变形曲线也较为简单，每道焊缝均引起一个收缩变形（即向右位移）。每道焊缝的收缩量都不同，这依赖于每道焊缝在坡口中的位置，1、3、5、7 和 8 焊缝对平板和立板起到了连接作用，因此对立板的变形影响较大，2、4 和 6 焊缝对立板的变形影响较小。立板的最终焊接收缩变形量为 12.6 mm，即角变形 β 为 5.99°。

LTTE 焊条 T 形接头的变形曲线也较为复杂，每道焊缝由于冷却过程中热收缩的作用均先引起一个收缩变形 Δy_c，温度降到固态相变开始点之后，由于焊缝金属的相变体积膨胀，则引起与收缩变形反方向的膨胀变形 Δy_e（即向左位移）。在表 5 中，8 道焊缝的膨胀变形率 δ_e 均在 0.43 ~ 0.9，平均值为 0.62，8 道焊缝的收缩变形余量之和 $\Sigma\Delta y_r$ 即为最终焊接收缩变形量，其数值为 8.1 mm，即角变形 β 为 3.86°。这一数值相当于 E5015 焊条 T 形接头最终焊接收缩变形量 12.6 mm 的 64.3%，即焊接残余变形降低了 35.7%。

表5 变形曲线特征值

Table 5 Characteristic values of distortion curves

Electrodes	Characteristic value	Weld number / Displacement value/mm								Result
		1	2	3	4	5	6	7	8	
E5015	Starting point y_s	0	1.7	3.1	5.5	6.6	8.6	9.5	11	
	Ending point y_e	1.7	3.1	5.5	6.6	8.6	9.5	11	12.6	
	Real displacement $\Delta y_r = y_e - y_s$	1.7	1.4	2.4	1.1	2.0	0.9	1.5	1.6	Total 12.6
LTTE	Starting point y_s	0	0.7	1.0	3.1	3.2	5.1	5.5	6.8	
	Maximum point y_m	3.0	2.7	4.7	4.1	6.7	5.9	8.2	9.5	
	Ending point y_e	0.7	1	3.1	3.2	5.1	5.5	6.8	8.1	
	Contract displacement $\Delta y_c = y_m - y_s$	3.0	2.0	3.7	1.0	3.5	0.8	2.7	2.7	
	Expansion displacement $\Delta y_e = y_m - y_e$	2.3	1.7	1.6	0.9	1.6	0.4	1.4	1.4	
	Real displacement $\Delta y_r = y_e - y_s$	0.7	0.3	2.1	0.1	1.9	0.4	1.3	1.3	Total 8.1
	Expansion strain $\delta_e = \Delta y_e / \Delta y_c$	0.77	0.85	0.43	0.9	0.46	0.5	0.52	0.52	Ave. 0.62

4 平板堆焊的弯曲变形

4.1 试验方法

平板堆焊弯曲变形试验如图5所示。用两种焊条在钢板中部进行焊条电弧堆焊，共堆焊两层，每层四道焊缝，层(道)间温度小于100 ℃。堆焊工艺规范参数见表6。待试件堆焊完毕冷却到室温后，用卡尺对试件的弯曲变形量(挠度)进行测量。

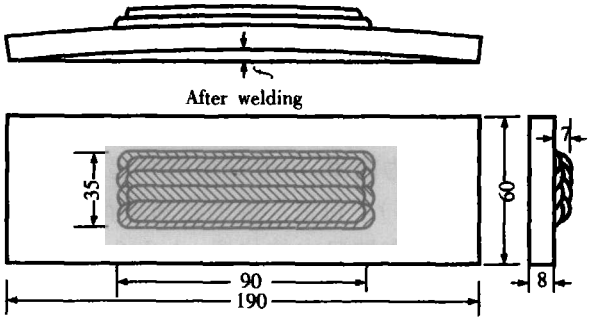


图5 平板堆焊试验方法示意图

Fig. 5 Diagrammatic sketch of test method of build-up welding on plates

表6 焊接工艺参数

Table 6 Welding parameters

Weld	Voltage U/V	Current I/A	Length s/mm	Speed v/(mm · min^{-1})
1 ~ 8	22 ~ 24	155	90	180

4.2 试验结果及分析

平板堆焊试件的照片如图6所示，按图中的位置，普通E5015焊条试件的变形为下挠，称之为正变形，挠度为正值2.0 mm，LTTE焊条试件的变形为上挠，称之为反变形，挠度值为负值 -1.9 mm。

对于E5015焊条试件，在试件冷却到力学熔点以下，由于E5015焊条焊缝金属始终处于热收缩状态，焊态下试件则出现下挠变形。对于LTTE焊条试件，在焊缝金属固态相变之前(190 ℃以上)，呈现正变形。但在相变之后，由于焊缝金属相变体积膨胀，而同时母材金属仍在收缩之中，焊缝金属相变体积膨胀足以抵消焊缝金属和热影响区母材的收缩，因而出现上挠弯曲，即反变形。

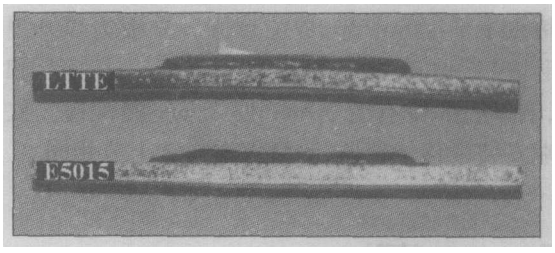


图6 LTTE和E5015堆焊试件弯曲变形的比较

Fig. 6 Comparison of bending distortion of specimens welded with both LTTE and E5015

由于焊接变形与试件的温度场有直接的关系，而温度场又与母材厚度、焊缝厚度、焊接线能量等规范因素有关，因此对于不同厚度不同形状尺寸的试件，低相变点焊缝金属的堆焊是否出现这样的反变形，还依赖于试件尺寸和焊接工艺条件，这需要进一步的探讨。无论如何，焊接角变形和平板堆焊试验结果说明了焊缝金属相变可以有效地减小和控制焊接变形，这为减小和控制焊接变形提供了一条值得探讨的途径。

5 结 论

(1) 低相变点焊缝金属的焊接试件具有较小的

焊接变形，对接接头和 T 形接头焊接试验结果表明，它们的角变形分别为 E5015 焊条试件角变形的 69.1% 和 64.3%，即焊接角变形降低了 30.9% 和 35.7%。

（2）平板堆焊试验表明，与普通焊条 E5015 堆焊试件的正弯曲变形不同，低相变点焊条 LTTE 的平板堆焊试件获得了反弯曲变形，在该试验条件下，其弯曲变形挠度为 -1.9 mm。

（3）试验表明低相变点焊缝金属可以减小焊接残余变形，在特定的试件（如平板堆焊）和一定的焊接工艺条件下，可以控制焊接残余变形。

参考文献：

[1] 奥凯尔勃洛姆. 焊接应力与变形[M]. 雷　原 译. 北京：中国工业出版社，1958. 30 ~ 78.

[2] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京：机械工业出版社，1982. 5 ~ 18.

[3] 霍立兴. 焊接结构工程强度[M]. 北京：机械工业出版社，1995. 26 ~ 36.

[4] Wohlfahrt Helmut, Zhang Fan. Experimental evaluation and calculation of transverse distortions due to welding in butt joints and T-joints[J]. Welding in the World, 1994, 34(7/8): 397 ~ 406.

[5] Wang Wenxian, Huo Lixing, Zhang Yufeng, *et al*. New developed welding electrode for improving the fatigue strength of welded joints [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2002, 18(6): 527 ~ 531.

作者简介： 王文先，男，1963 年 7 月出生，博士后，副教授。主要研究方向为焊接结构的强度与断裂，材料连接及其界面力学行为，获得国家发明专利 3 项，发表论文 20 余篇。

Email： lxhuo@tju.edu.cn

[上接第 4 页]

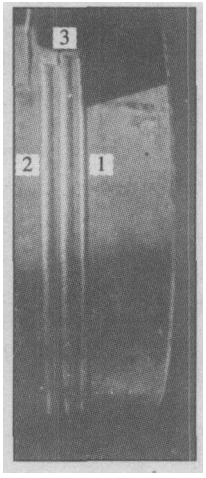


图 6　实际堆焊焊缝外观

Fig. 6　Appearance of practical bead weld

1 Root weld; 2 Filled weld; 3 Cover weld

4　结　　论

管道环缝全位置焊接的关键在于准确控制不同焊接位置的线能量输入。作者结合开环控制和闭环控制的方法，既解决了整个环缝焊接参数的大范围匹配，又实现了不同焊接位置线能量的精确控制。开发的系统可用于非旋转管道环缝的打底、填充和盖面等焊接过程的自动控制，结果表明，焊接过程稳定，焊缝成形良好。

参考文献：

[1] Nadeau F, Tahash G, Norrish J. Automation of rolled welding in process piping prefabrication[J]. Welding Review International, 1994, 13(4): 357 ~ 362.

[2] 陈学武. 长输管道焊接方法及其选择[J]. 油气储运，2000，19(7): 28 ~ 31.

[3] Barbara K Henon. Orbital welding technology speeds riser construction of offshore platforms[J]. Welding Journal, 1994, 73(4): 53 ~ 55.

[4] 隋永莉. 长输管线环缝全位置自动焊接过程控制系统的研究[D]. 北京：清华大学，1999.

[5] 韩赞东，刘文焕，廖宝剑，等. 汽车储气筒环缝搭接自动跟踪技术[J]. 焊接技术，1998，27(8): 13 ~ 15.

作者简介： 韩赞东，男，1969 年 9 月出生，工学博士，副教授，中国机械工程学会会员，国际 SAE 会员。主要从事焊接工艺及焊接过程自动控制领域的研究工作。获授权发明专利 1 项，发表论文 40 余篇。

Email： hanzd@tsinghua.edu.cn