

利用低相变点焊条改善焊接接头的疲劳强度

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: 依据奥氏体转变为马氏体时的体积膨胀原理, 自行研制成功低相变点焊条 (Low Transformation Temperature Electrode, LTTE)。低相变点焊条的熔敷金属组织为低碳马氏体和残余奥氏体, 其相变开始点 M_s 在 $140 \sim 325^\circ\text{C}$ 之间, 相应变结束点 T_f 在室温附近。在焊接冷却至低温阶段, 焊缝金属发生马氏体相变, 相变体积膨胀将会降低焊接热场造成的残余拉伸应力, 甚至出现残余压缩应力, 从而提高了焊接接头的疲劳强度。利用所研制的低相变点焊条和普通 E5015 焊条分别对具有较大焊接残余应力和较大应力集中的纵向角接板焊接接头进行焊接, 疲劳试验证明, 前者焊接接头的疲劳强度比后者提高 40% 左右 (在 2×10^6 循环次数下), 疲劳寿命提高 25 倍。此试验为改善焊接结构疲劳强度开辟了一条新的途径。

关键词: 低相变点焊条; 相变应力; 焊接接头; 疲劳强度; 残余压应力

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2001)05-37-04



王文先

0 序 言

疲劳破坏是金属焊接结构失效的主要形式之一, 裂纹常发生于焊接接头的焊趾部位, 其主要原因是焊接接头的残余拉伸应力和应力集中的影响。TIG 熔修法、砂轮打磨法、局部机械加工法、冲击法、锤击法、喷丸法、预过载法、局部加热、局部压延法、爆炸法等是提高焊趾部位疲劳强度的主要方法^[1-3]。它们通过以下途径改善焊接接头的疲劳强度, 其一, 改善焊缝的几何外形, 增加焊趾处的过渡半径, 降低焊趾部位的应力集中程度; 其二, 调节焊接接头表面应力场, 降低焊趾部位的残余拉伸应力, 产生压缩应力。这些方法适用于不同的工作场合, 各具有优越性, 不同程度地提高了焊接接头的疲劳强度和疲劳寿命。但是这些方法有一个共同的缺点, 是属于焊后加工型, 即焊后增加了一道工序, 对于大型焊接结构件, 焊缝数量巨多, 这样会大大增加劳动量和成本, 这显然是不合理的。

众所周知, 由于化学成分、合金含量和冷却速度不同, 钢铁材料在冷却过程中会发生不同的组织转变或多次的组织转变, 这一组织转变伴随有体积膨胀, 在拘束条件下将会产生相变应力, 属于压缩应力。对于焊缝金属来说, 这将有利于残余拉伸应力的降低, 甚至出现残余压缩应力, 从而改善焊接接头

的力学性能。近几年来, 研究者们正在利用这一原理寻找一种提高焊接接头疲劳强度的有效方法^[3-5]。低相变点焊条 (LTTE) 就是一种利用相变应力减少焊接接头的残余拉伸应力或产生压缩应力, 提高焊接接头疲劳强度的新型焊接材料。本文就低相变点焊条熔敷金属的相变特征、残余应力以及带有纵向焊缝角接板焊接接头的疲劳强度等方面进行了试验研究。

1 低相变点焊条熔敷金属的相变特征

1.1 相变膨胀应变的测试

在焊接冷却过程中, 对于绝大多数钢铁材料, 组织转变在较高的温度下结束, 此时材料处于塑性状态, 因而体积膨胀不会产生相变应力, 不影响焊接残余应力; 但对于一定合金成分的钢铁材料, 其相变开始点和结束点均出现在较低的温度, 此时材料已处于弹塑性或弹性状态, 相变体积的膨胀将会减少焊接热场造成的残余拉伸应力, 在一定的条件下会出现残余压缩应力。焊缝金属组织成分、相变温度和相变膨胀量的大小是影响残余应力的主要因素, 这三者之间存在着相互依存的关系, 但是相变膨胀量是最直接和最明显的因素, 相变膨胀量越大, 残余拉伸应力降低的越多, 也才有可能出现压缩应力。

为此, 研制了熔敷金属合金含量在 5% ~ 25% 之间范围的焊条, 测试其熔敷金属的相变膨胀应变。

收稿日期: 2001-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50175079)

测试方法如下,用焊条在试板上堆焊多层,在无母材成分的熔敷金属部位沿焊缝方向用线切割切取 $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的试件。试验前将试件加热到 900°C 保温 1 h 做退火处理,以保证试件的组织状态完全一致。在 Formaster - digital 全自动转变测试仪上进行冷却相变膨胀曲线的测试,其操作规范是,将试件缓慢加热到 940°C 后保温 20 min ,以 10°C/s 的

冷却速度冷却。测试结果见表 1,相变膨胀应变与相变开始温度的关系如图 1 所示,其中 LTTE5 焊条熔敷金属的相变膨胀应变数值最大,实测值为 0.63% ,它的相变开始温度为 191°C 。

1.2 冷却相变膨胀曲线的对比与分析

E5015 焊条和 LTTE5 焊条熔敷金属的实测冷却转变曲线如图 2 所示。

表 1 相变温度及相变引起的膨胀应变

Table 1 Transformation start temperature and expansion strain

Electrodes type	Transformation start temp $M_s/^\circ\text{C}$	Transformation end temp $M_f/^\circ\text{C}$	Transformation strain start temp $T_s/^\circ\text{C}$	Transformation strain end temp $T_f/^\circ\text{C}$	Transformation expansion strain $\varepsilon_p(\%)$
D. M. of E5015	787	631	733	666	0.11
D. M. of LTTE1	325	100	310	160	0.44
D. M. of LTTE2	298	50	275	115	0.48
D. M. of LTTE3	242	<0	225	50	0.54
D. M. of LTTE4	237	<0	215	30	0.57
D. M. of LTTE5	191	<0	174	≈ 0	0.63
D. M. of LTTE6	144	<0	134	<0	0.55
D. M. of LTTE7	138	<0	128	<0	0.52
D. M. of LTTE8	79	<0	60	<0	0.20

Note: D. M. means deposited metal.

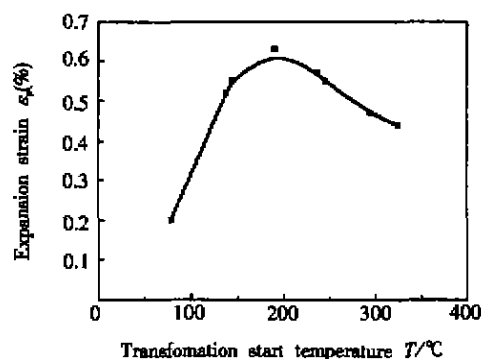


图 1 相变膨胀应变与相变开始温度的关系

Fig. 1 Relations between transformation expansion strain and transformation start temperature

普通 E5015 焊条的冷却过程沿着曲线 1 变化,其焊缝金属的组织转变在 787°C 开始,在 630°C 时结束,相变膨胀应变只有 0.11% ,而且整个相变过程均处在塑性状态,没有相变应力的产生。相变结束后,焊缝金属体积继续收缩,随着温度的降低和弹性的回复,拉伸应力出现并不断增加至材料的屈服强度(随温度变化)维持到室温。

低相变点焊条 LTTE5 的冷却过程沿着曲线 2 和曲线 3 变化,在相变之前,焊缝金属随着温度的降低和弹性的回复,拉伸应力出现并不断增加至相变

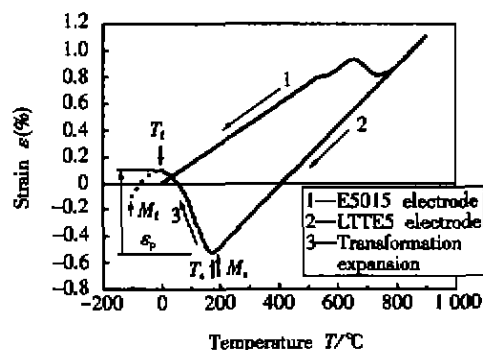


图 2 焊条熔敷金属冷却转变曲线

Fig. 2 Variation of strain with cooling constraint free condition

开始温度时的材料屈服强度。在相变开始温度 M_s 点,奥氏体开始向马氏体转变,但由于马氏体的数量还较少,相变膨胀应变不足以抵消奥氏体温度收缩应变,曲线继续下降,直到相应变开始点 T_s 曲线开始上升,即焊缝金属的相变膨胀才真正开始,直到相应变结束点 T_f 。相变膨胀应变 ε_p 越大,残余拉伸应力越小。低相变点焊条能够使焊缝金属产生残余压缩应力的关键有两点,其一,焊缝金属相应变结束点 T_f 应在室温附近,而不是相变结束点 M_f 等于室温。因为在 T_f 时相变膨胀应变达到最高点,在室温

工作条件下的焊缝金属可以获得最大的相变膨胀应变。其二,最大相变膨胀应变 ε_p 应大于材料室温下的拉伸弹性应变 ε_s ,这样相变应力才可以抵消由热场造成的残余拉伸应力,从而引起残余压缩应力。从表1看到,表中所列的低相变点焊条,除LTTE8外,均可能产生残余压缩应力,其中LTTE5的相变膨胀应变最大,效果最好。当然这还依赖于焊接接头形式、焊接顺序、焊缝的拘束程度和焊接冷却条件。

由上述分析可知,低相变点焊条的熔敷金属并不能全部转变为马氏体,其组织应当是马氏体和残余奥氏体。为了保证焊缝金属的其它力学性能,如韧性指标等,马氏体应当为低碳马氏体,低碳马氏体不仅具有较高的强度,也具有较好的韧性,可以满足焊缝金属的冶金和力学性能。

2 焊接残余应力测试

用LTTE5焊条和E5015焊条分别在两块 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 低碳钢板上各堆焊一道长 100 mm 、宽 15 mm 的焊道,在焊道一端的焊趾部位和焊缝金属上进行残余应力测量,如图3所示。方法采用钻盲孔测量法,盲孔直径 $\phi 2\text{ mm}$,深 2 mm ,焊缝端部母材上A孔中心距熔合线 2.5 mm ,焊缝上的B孔在焊缝中心。

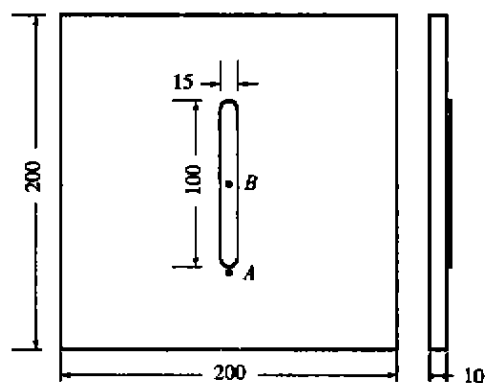


图3 残余应力的测试位置

Fig.3 Position of points to measure residual stresses

残余应力的测试值见表2,表中负号表示压缩应力,正号表示拉伸应力, x 表示平行于焊缝的方向即纵向, y 表示垂直于焊缝的方向即横向。焊趾处(熔合线上)的残余应力无法测试,但可以依据A、B两点的测量数值进行推算,E5015焊条的焊趾处纵向残余应力为拉应力 120 MPa 左右,LTTE5焊条的焊趾处纵向残余应力为压应力 -60 MPa 左右,残余拉伸应力的降幅达 180 MPa 。

表2 残余应力的测试结果

Table 2 Test results of residual stresses

	Weld toe A		Weld metal B	
	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa
LTTE5	-5	37	-122	-63
E5015	69	-85	168	38

试验证明,低相变点焊条可以降低焊接接头的残余拉应力,甚至产生残余压应力,由表2可见,焊缝金属的残余压应力可达 -122 MPa ,焊缝端部距焊趾 2.5 mm 母材处的残余压应力为 -5 MPa ,焊趾处的残余应力由普通焊条的拉应力转变为压应力,下面的疲劳试验证明这已造成了焊接接头疲劳强度的提高。

3 焊接接头的疲劳试验

试验材料用厚度为 8 mm 的Q235B钢板,采用具有较大残余应力和较大应力集中的纵向焊缝角接板焊接接头形式,如图4所示。用LTTE5和E5015焊条分别进行焊接,围绕角接板焊接一层角焊缝,焊角高度 8 mm 左右,起弧点和熄弧点在角接板的中部,焊接电流 $I=160\text{ A}$,焊接速度 $v=100\text{ mm/min}$ 。在 10 t 高频疲劳试验机上进行疲劳试验,频率 $f=139\text{ Hz}$,应力循环比 $r=0.1$ 。

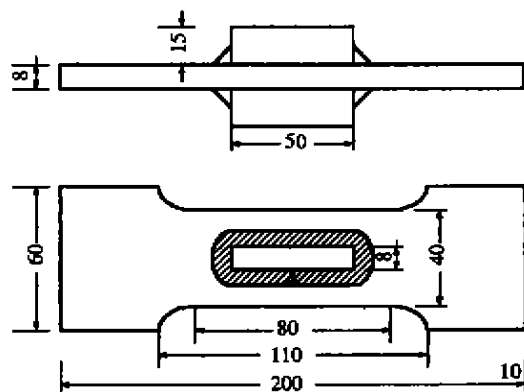


图4 纵向角接板焊接接头疲劳试件

Fig.4 Fatigue specimen of welded joint with longitudinal stiffeners

4 疲劳试验结果及分析

4.1 疲劳强度试验结果及分析

疲劳试验结果见表3和图5,由焊接接头疲劳试验的 $S-N$ 曲线可以看出,低相变点焊条LTTE5

的试件疲劳强度明显的高于普通焊条 E5015 的试件,在 2×10^6 循环次数下,LTTE5 焊条的应力幅值为 167 MPa, E5015 焊条的应力幅值为 119 MPa,疲劳强度提高 40%。按疲劳试验中两种焊条试件的最低试验应力范围值(大于 2×10^6 循环次数,试件均未断裂,可以认为是疲劳极限)计算,LTTE5 焊条的为 153 MPa, E5015 焊条的为 108 MPa,疲劳强度提高 41%。如果不考虑试验数值的分散性,按 LTTE5 焊条试件达到 11×10^6 循环次数的断裂应力幅值计算,此时 E5015 的断裂循环次数为 437×10^3 ,疲劳寿命提高 25 倍左右。

表3 疲劳试验结果

Table 3 The result of fatigue test

Electrode type	Stress range $\Delta\sigma$ /MPa	Fatigue life $N \times 10^3$ /cycles	Position of fracture
E5015	180	275	Weld toe
E5015	162	437	Weld toe
E5015	153	530	Weld toe
E5015	135	1 017	Weld toe
E5015	126	887	Weld toe
E5015	117	1 104	Weld toe
E5015	108	5 000	No fracture
LTTE5	198	560	Weld toe
LTTE5	180	543	Weld toe
LTTE5	171	2 262	Weld root
LTTE5	171	1 953	Weld root
LTTE5	162	1 153	Weld toe
LTTE5	162	11 000	No fracture
LTTE5	153	2 134	Weld toe
LTTE5	153	2 500	No fracture

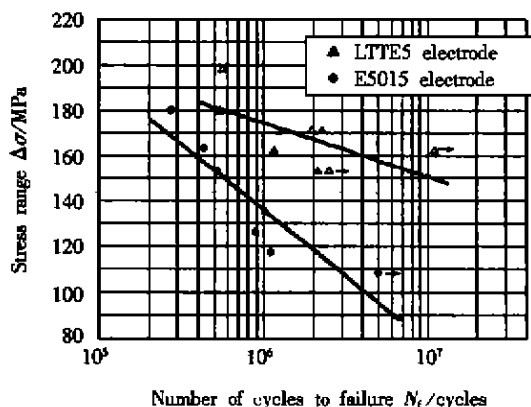


图5 焊接接头的 S-N 曲线

Fig. 5 S-N curve of welded joints

4.2 焊接接头的断裂分析

对于具有纵向角接板的焊接接头,纵向一端的焊趾部位具有最大的残余拉伸应力,而此处也是载荷作用下应力集中部位,是此类焊接接头的危险点。由表3可见, E5015 焊条的所有断裂试件均断裂于此焊趾部位,但是,低相变点焊条的8个试件中,2个没有断裂,6个断裂试件中,有4个断裂于焊趾部位,但其断裂应力值远远高于 E5015 焊条,说明低相变点焊条的相变膨胀降低了焊趾部位的应力峰值,使疲劳强度提高;有两件断裂于角接板一端的焊缝根部,说明低相变点焊条所产生的相变膨胀使得焊趾部位的拉伸应力低于焊根部位,焊接接头的危险点发生了转移。

5 结 论

(1) 低相变点焊条可以降低焊接接头焊趾部位的残余拉应力,甚至产生残余压应力,本试验的焊缝金属获得 -122 MPa 的残余压应力,焊趾部位获得约 -60 MPa 的残余压应力。

(2) 低相变点焊条可以提高焊接接头的疲劳强度和疲劳寿命,利用本文所研制的低相变点焊条 LTTE5 焊接带有纵向角接板的焊接接头,疲劳试验证明,在 2×10^6 循环次数下,其疲劳强度比 E5015 焊条的提高 40% 左右,疲劳寿命提高 25 倍左右。

参考文献:

- [1] 霍立兴. 焊接结构的工程强度[M]. 北京:机械工业出版社, 1995. 231 ~ 243.
- [2] Ohta A, Suzuki N, Maeda Y. Effective means for improving the fatigue strength of welded structure [J]. Welding in the World, 1996, 37(2): 84 ~ 89.
- [3] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京:机械工业出版社, 2000. 352 ~ 367.
- [4] Kobrin M M, Dekhtyar I I. Relationship of the fatigue strength of steel to its properties and to the residual stresses in deposited metal [J]. Avt. Sv, 1963, (9): 19 ~ 25.
- [5] Akihiko Ohta, Naoyuki Suzuki, Yoshio Maeda. Doubled fatigue strength of box welds by low transformation temperature welding material[R]. HW Doc. XIII-1825-2000. 1 ~ 7.

作者简介: 王文先,男,1963 年出生,副教授,博士研究生。主要研究方向为焊接结构的强度与断裂,陶瓷/金属连接及其断裂力学行为。发表论文 20 余篇。

(编辑:董卫国)