FZ316L-E堆焊金属弯曲断裂原因分析及解决措施

张文军，赵斌，马明亮，范会卿

洛阳双瑞特种合金材料有限公司　河南洛阳　471000

摘要：主要针对FZ316L-E带极电渣堆焊金属侧弯断裂的原因进行了分析研究。研究认为，引起侧弯断裂的主要原因是堆焊层金属经热处理后，其与基材金属的熔合区出现了碳化物析出带。析出带的存在导致熔合区塑性下降，进而引起断裂。通过在合理的范围内调整成分及工艺，最终使此类问题得以解决。

关键词：带极电渣堆焊；侧弯断裂；碳化物；析出带

1　序言

在石化行业中的加氢反应器、反应堆压力壳、稳压器及蒸发器等设备中，由于其服役环境的特殊性，通常对容器内壁的耐蚀能力有较高的要求，而设备整体采用耐蚀材料进行制造在成本方面是无法实现的，因此，采用电渣或埋弧堆焊工艺对设备内壁进行大面积带极堆焊成为设备制造过程中常用的方法[1-3]。

在进行316L系不锈钢的电渣堆焊研究过程中发现，其堆焊金属在经过690℃×22h的焊后热处理前后，堆焊金属的弯曲性能发生了较大改变，热处理后的试样在进行侧弯试验过程中出现了断裂现象。本文对断裂的原因进行了分析并提出了解决方法。

2　试验条件

2.1 试验设备

本试验采用美国Miller公司生产的HDC 1500DX型焊接电源和比利时Soudokay公司生产的125ES1堆焊机头。

2.2 试验材料

本试验所用焊带为EQ309LMo（过渡层堆焊）、EQ309L（过渡层堆焊）和EQ316L（耐蚀层堆焊），堆焊底板金属为14Cr1MoR，焊带、底板的规格及化学成分见表1，堆焊过程焊接参数见表2。堆焊焊剂为自制焊剂。

堆焊侧弯试样按照NB/T 47018.5—2017中的要求加工。

2.3 检测设备

采用GP-TS2000W弯曲试验机对侧弯试样进行检测。采用光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）对堆焊层金属进行深入分析。

3　试验结果与分析

采用EQ309LMo作为过渡层、EQ316L作为耐蚀层完成电渣堆焊，随后对堆焊试板进行690℃×22h的焊后热处理，然后进行侧弯试验及化学成分分析。侧弯试样经弯曲后出现明显的裂纹，堆焊层金属的化学成分见表3。

表1　焊带、底板的规格及化学成分（质量分数）　（%）

牌号	规格/mm	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
14Cr1MoR	400×200×40	0.14	0.25	1.06	1.00	—	0.55	Bal.
EQ309LMo	0.5×60	0.021	0.23	1.78	23.5	12.10	2.35	Bal.
EQ316L	0.5×60	0.024	0.37	1.50	19.70	12.17	2.50	Bal.

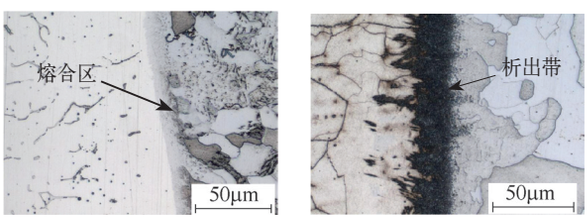
表2　焊接参数

电弧电压/V	焊接电流/A	焊接速度/cm·min^{-1}	道间温度/℃
24~25	900~950	16	140~150

表3 堆焊层金属化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N	Mo
0.025	0.495	1.29	0.0077	0.026	19.00	13.20	0.263	2.76

图1为FZ316L-E堆焊试板（过渡层金属EQ309LMo）热处理前后金相组织，从图1a中可以看出，焊态堆焊层金属与基材金属处存在着一条明显的熔合区，堆焊金属侧的金相组织为奥氏体及在其上分布的δ-铁素体；经690℃×22h热处理后，熔合区附近出现了明显的析出带（图1b中深色区域），且堆焊金属靠近熔合区的组织基本变为了奥氏体。从图1中可以看出析出带的平均宽度大约有50μm。



a）焊态 b）热处理后

图1 FZ316L-E堆焊试板（过渡层金属EQ309LMo）热处理前后金相组织

在电渣堆焊过程中，基材Cr-Mo钢与堆焊金属间为典型的异种钢连接，由于两种钢的化学成分特点，两种材料间必然存在不同成分的浓度梯度。从表1和表3的成分对比可以看出，基材侧的w_C=0.14%，而堆焊层金属的w_C=0.024%。因此，在热处理过程中，在驱动力的作用下，必然会产生C元素的迁移和扩散，导致基材金属脱碳及堆焊金属的增碳，采用扫描电镜对热处理后熔合区两侧C含量进行分析，如图2所示。从图2中可以看出，在熔合区附近（坐标0点）存在C元素的聚集，同时，堆焊层的Cr元素也会向基材侧发生迁移和扩散，使得在C聚集区生成$M_{23}C_6$型碳化物，导致强度提高。

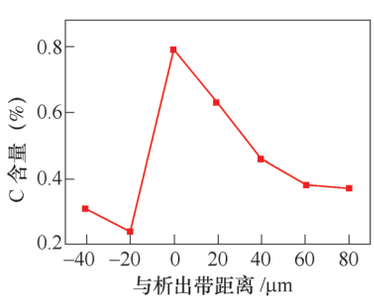
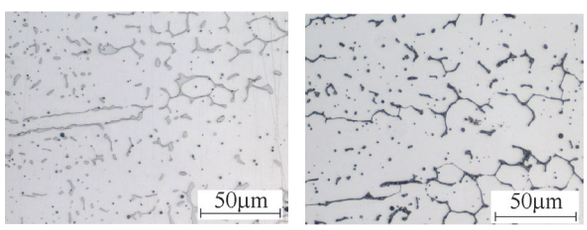


图2 C含量分布示意

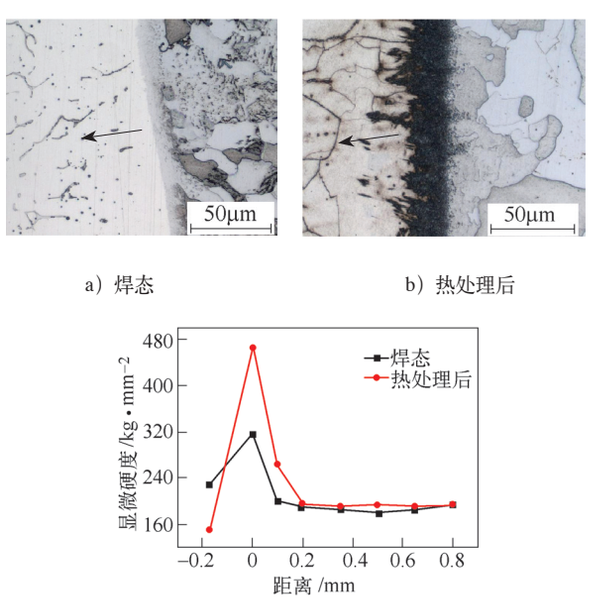
对热处理前后堆焊层金属进行金相分析，结果如图3所示。从图3a中可以看出，焊态金属的金相组织为奥氏体基体及在其上连续分布的树枝状的δ-铁素体，而经热处理后的δ-铁素体内出现了明显的碳化物析出，其原因是在堆焊过程中，熔化的金属冷却速度较快，导致在凝固过程中奥氏体基体中将固溶部分过饱和的C，而在堆焊金属的热处理过程中，这部分C将从奥氏体中析出并向晶界扩散。由于在奥氏体晶界分布着富Cr的铁素体，析出的C与晶界处的Cr形成$M_{23}C_6$型碳化物，使得堆焊层金属强度升高。



a）焊态 b）热处理后

图3 堆焊层热处理前后金相对比

为进一步分析原因，对比热处理前后试板强度差异，对热处理前后的试样进行显微硬度分析，结果如图4所示，图中的“0”表示距离的零点，测量方向为从基材侧到堆焊层。



a）焊态 b）热处理后

c）显微硬度对比

图4 热处理前后金相及显微硬度对比

从显微硬度分析结果可以看出，经热处理后，前文分析的脱碳层及增碳层的存在，熔合区析出带

的显微硬度出现了明显变化，而堆焊层金属虽有析出，但强度变化不大。原因分析如下：由于熔合区析出了大量脆硬的碳化物，因此该区强度会明显增高，而脱碳区由于脱碳软化，显微硬度出现下降；堆焊层金属中δ-铁素体内析出的碳化物使得其显微硬度稍有提高，但由于其基体为奥氏体组织，因此该处金属整体硬度提高不大。

4 解决措施

根据上述分析，堆焊金属侧弯断裂的主要原因是熔合区处出现了明显的碳化物析出带，以及由此引起的该区域的强度提高，因此，解决消除碳化物析出带是提高堆焊金属弯曲韧性的关键。

由分析可知，析出带的产生是由于在热处理过程中，熔合区两侧存在浓度梯度的元素在驱动力作用下产生了扩散，并在熔合区形成了$M_{23}C_6$型碳化物，因此，减少碳化物的形成就可相应的减小析出带。

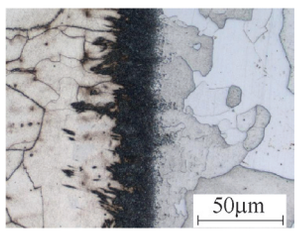
由于堆焊金属的特点，元素的浓度梯度不可避免的存在，导致在热处理过程中扩散的驱动力也不可避免的存在，为尽量降低浓度差，选择在满足成分要求的范围内将过渡层焊带EQ309LMo的成分进行适当调整，调整后焊带成分见表4。另一方面，在不影响整体焊道成形及堆焊厚度的前提下，将焊接参数进行适当调整以提高过渡层焊接时的稀释率。综合调整后，堆焊金属熔合区两侧的浓度梯度得以改善，经690℃×22h的热处理后，堆焊金属的侧弯试样无裂纹产生。

表 4 调整后焊带成分（质量分数） （%）

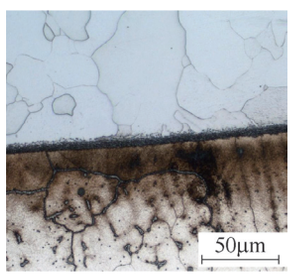
牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
EQ309LMo	0.020	0.23	1.75	21.5	12.10	2.1	Bal.

对调整前后的试样进行金相观察及显微硬度分析，结果如图5所示。

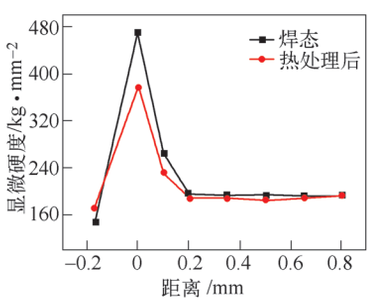
从图5a与图5b的对比可看出，经过调整，堆焊金属熔合区热处理后仍有一条较为明显的析出带，但其宽度则显著减小，由调整前的约50μm减小到5μm；从图5c的显微硬度曲线对比可知，经过调整，虽然熔合区仍有析出，但较调整前有明显下降；另一方面，堆焊层金属的显微硬度较调整前也有明显下降，这些改善保证了堆焊金属的侧弯性能。



a）调整前



b）调整后



c）硬度曲线对比

图5 调整前后堆焊金属熔合区金相及显微硬度对比

5 结束语

1）针对FZ316L-E堆焊金属，由于堆焊层金属与基材金属存在C、Cr等元素的浓度梯度，热处理过程中，元素在迁移和扩散时会在熔合区析出碳化物，形成较宽的析出带，使得熔合区处的强度升高，导致堆焊金属弯曲性能下降。

2）通过调整钢带成分及工艺，调整后的熔合区析出带宽度明显降低，显微硬度也有明显的下降，堆焊金属弯曲性能得到了提高。

参考文献：

[1] 王家淳，陈勇.超低碳奥氏体不锈钢带极电渣堆焊层晶间相析出机理[J].焊接，1999（12）：18-21.

[2] 孔红雨，周浩，鲁晓声.一种带极埋弧堆焊烧结焊剂：200810007846.2[P]. 2009-09-02.

[3] 张文钺.焊接冶金学（基本原理）[M].北京：机械工业出版社，1999.

MW 20191120