

Fe-Al 基金属间化合物的焊接性*

高德春 杨王玥 董敏 黄继华 孙祖庆

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

TG406
TG457.1'

摘 要 分别用电子束焊 (EBW) 及钨极氩弧焊 (GTA) 两种焊接方法对 Fe-Al 基金属试样进行了焊接性研究。结果表明, 用 EBW 方法可以成功地得到无裂纹与缺陷的 Fe-Al 基金属焊缝; 对 GTA 方法, 需采用预热及焊后缓冷工艺方可有效地阻止延迟冷裂纹的产生。选择中低碳 CrMo 钢焊丝作填充材料, 使 Fe₃Al 基金属具有较好的焊接性。同种材料, 同种焊丝, 在保证焊透的情况下, 减小焊接电流和热输入, 有利于提高材料的抗裂能力。

关键词 Fe-Al 基金属, 电子束焊, 钨极氩弧焊, 焊接性

中图法分类号 TG401, TG457.19

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)01-0087-06

THE WELDABILITY OF IRON-ALUMINIUM BASED INTERMETALLICS

GAO Dechun, YANG Wangyue, DONG Min, HUANG Jihua, SUN Zuqing

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: YANG Wangyue, professor, Tel: (010)62333390, Fax: (010)62332336,

E-mail: zqsun@midwest.com.cn

Manuscript received 1999-07-12, in revised form 1999-10-18

ABSTRACT The ingots of two Fe₃Al-based alloys and one Fe-16%Al-based alloy have been conventionally prepared by vacuum induction melting, and then hot forged, and hot rolled into thin sheets stock with thickness of 1.5—2 mm and width of 180 mm. The weldability tests have been performed on the specimens of 80 mm × 160 mm with weld length of 150 mm by using electron beam (EBW) and gas tungsten arc (GTA) welds. The welds with no crack and defect can be successfully produced by EBW welding for all alloys studied in the present work. The results from GTA welding processing tests indicated that pre-heating and post-annealing treatment were important procedures for preventing from delayed cold crack, and proper selection of filler materials could effectively improve the weldability of the alloys studied. For the same alloys and same welding filler, it is effective way of decreasing cracking tendency of alloy to choose low welding current, i.e., low heat input.

KEY WORDS iron-aluminide, electron beam weld, gas tungsten arc weld, weldability

Fe₃Al 基金属间化合物具有价格便宜、密度低及优异的高温抗氧化、抗硫化能力。近年来, 人们对该合金的晶体结构、位错形态、有序化反应、机械性能、腐蚀行为等进行了深入广泛的研究。通过控制成分和改进热加工工艺, 合金的塑性有了显著提高, 室温延伸率可达 10%—15%, 为 Fe₃Al 基金属间化合物的应用打下了良好基础^[1,2]。焊接是作为结构材料推广应用的又一关键工艺, Fe₃Al 基金属焊接性的研究已引起了人们的关注。David^[3] 和 McKamey^[4] 等对 0.76 mm 厚的 Fe₃Al 基金属薄板焊接行为的研究表明, 合

金的化学成分和焊接工艺参数对焊接性有很大影响。采用钨极氩弧焊时, 只有在严格的工艺条件下, 才具有一定的焊接性。但对焊接填充料的研究尚少见报道, 且所讨论的都是 0.76 mm 厚的薄板, 而 1—2 mm 厚薄板的焊接性研究将更有实用意义。本文就填充料和焊接工艺参数对上述 Fe-Al 基金属薄板焊接性的影响及其相关机理进行探讨, 为材料的应用提供参考依据。

1 实验方法

采用三种 Fe-Al 基金属为实验材料, 合金成分见表 1。经真空感应炉冶炼, 浇注成锭, 铸锭在 1000 ℃ 保温 24 h 后随炉冷至室温。铸锭锻造前在 1000—1100 ℃ 预热 2 h。始锻温度为 1000—1100 ℃, 终锻温度约为 850 ℃。在 900 ℃ 多道次轧制轧成宽 180 mm, 厚 1.5—2 mm 的薄板。采用真

* 国家 863 计划 715-005-0121 和福特 (中国) 研究与发展基金 971516 资助项目

收到初稿日期: 1999-07-12, 收到修改稿日期: 1999-10-18

作者简介: 高德春, 男, 1968 年生, 博士生

空电子束焊接和钨极氩弧焊进行上述薄板的对焊, 焊缝长度为 200—450 mm. 真空电子束焊采用 ЭЛВ - К₁ 中压电子束焊机. 手工钨极氩弧焊在 WSE-315 交直流手工多用氩弧焊机及 Miller Syncrowave 351 交流手工氩弧焊机上进行. 保护气体用高纯氩气, 焊丝直径为 2.5 mm. 试样焊接前、后在烘箱中进行热处理 (400 °C, 2 h). 探伤实验采用 MGC40 X 射线探伤仪, 探伤精度为板厚的 1/50. 焊缝试样组织采用的侵蚀剂为 50% 醋酸 + 33% 盐酸 + 17% 硝酸 (体积分数). 沿垂直焊缝方向切取未去除焊高的焊接件拉伸试样, 标距尺寸为 50 mm × 10 mm, 室温拉伸性能在 MTS 810 力学试验机上测试.

2 实验结果与讨论

2.1 焊丝对薄板 GTA 焊接焊缝开裂的影响

在选择焊丝时, 考虑到 Fe-Al 基金属间化合物易于发生氢致冷裂问题, 选择了成分相近的 Fe 基焊丝—Fe₃AlCr 和中低碳 CrMo 钢, 简称 FCM, 奥氏体不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 及 Ni 基高温合金 (Ni2, Ni82, Inconel625, C-4) 焊丝, 其中 Ni 基焊丝中 Ni82, Inconel625 的基本成分为 80%Ni+20%Cr (质量分数, 下同), Ni2 的主要成分为 Ni,

C-4 的基本成分为 68%Ni+16%Cr+16%Mo. 表 2 示出了 GTA 的焊接情况.

从表 2 的焊接结果可以发现, 焊丝对薄板焊接开裂的影响明显. Fe 基的中低碳 CrMo 钢焊丝, 使 Fe₃Al(Cr), Fe₃Al(CrNbC) 和 Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金均焊接成功. 宏观观察未发现任何热裂和冷裂现象, 无咬边、焊穿、未焊透等缺陷, 成形性良好. 对于 1Cr18Ni9Ti 焊丝, 三种实验材料均未焊成, 有横裂. 本体焊丝焊后均出现纵向的裂纹. 三种焊接材料中, Fe₃Al(Cr) 和 Fe₃Al(CrNbC) 合金表现出良好的焊接性, Fe₃Al(CrNbC) 合金的成形性较好. Ni 基焊丝的效果并不理想, 只有在对工艺条件控制非常严格的情况下, Ni82 和 Ni2 焊丝对成分相对简单的 Fe₃Al(Cr) 合金才是可以焊接的, 但成型性较差.

不同填充料的几种合金焊接件的室温拉伸性能见表 3. 拉伸强度在 150—200 MPa 之间. 对于中低碳 CrMo 钢焊丝, 断裂一般在母材发生. 对于 Ni 基焊丝的焊件, 无论 Ni82 还是 C-4 焊丝, 当受到拉应力时, 组织和成分上的不连续使得熔合线这一小区域无法协调变形, 故断裂多发生在熔合线附近, 断裂强度也较低, 拉伸断口形貌显示为解理断口 (即脆性断裂), 且有许多二次裂纹存在.

表 1 合金的化学成分
Table 1 The composition of the test alloys

Alloy	(mass fraction, %)						
	Al	Cr	Mo	Nb	C	Y	Fe
Fe ₃ Al(Cr)	15.7	5.72	—	—	—	—	Bal.
Fe ₃ Al(CrNbC)	16.4	5.45	—	0.94	0.03	—	Bal.
Fe-16Al(CrMoNbYC)	8.90	5.11	1.92	0.23	0.033	0.06	Bal.

表 2 填充料对 Fe-Al 基合金钨极氩弧焊接开裂行为的影响
Table 2 The effect of the fillers on crack behavior of GTA welded Fe-Al based alloys

Welded material	Fe ₃ Al(Cr)	FCM	1Cr18Ni9Ti	Ni2	Ni82	Inconel625	C-4
Fe ₃ Al(Cr)	Crack ^{1,3)}	No crack	Crack ¹⁾	No Crack	No Crack	Crack ¹⁾	Crack ^{2,3)}
Fe ₃ Al(CrNbC)	Crack ^{1,3)}	No Crack	Crack ¹⁾	Crack ^{2,3)}	Crack ^{2,3)}	Crack ^{1,2)}	Crack ¹⁾
Fe-16Al(CrMoNbYC)	—	No Crack	Crack ¹⁾	—	—	—	—

1) longitudinal crack, 2) transversal crack, 3) cold crack

表 3 GTA 焊接件的室温拉伸性能
Table 3 The tensile strength of the GTA welded specimens at room temperature

Filler	Welded material	I, A	σ_b , MPa	Cracking zone
FCM	Fe ₃ Al(Cr)	80—120	127	Base metal
		80—120	270	Fusion zone
FCM	Fe ₃ Al(CrNbC)	80—120	222	Base metal
		80—120	211	Base metal
Ni82	Fe ₃ Al(Cr)	80—120	170	HAZ
		80—120	61	Base metal
Ni2	Fe ₃ Al(Cr)	80—120	136	Base metal
		80—120	177	HAZ

图 1 为采用中低碳 CrMo 钢焊丝 FCM 作填充料所得焊件的焊缝区组织 (FZ 为熔合区, HAZ 为热影响区)。焊缝组织呈现联生结晶的组织形貌, 相当于母材晶粒的外延生长。中低碳 CrMo 钢作为一种低合金结构钢焊丝, 其成分除 Fe 之外含少量的 Cr、Mo、Mn 和 C, 其中 Cr 又是母材的组元之一, 焊丝与母材易于充分熔合, 利于成分的均匀化, 基体和焊缝之间成分连续变化。从 FCM 焊丝的焊缝熔合区、热影响区及母材的 EDAX 结果 (表 4) 也可以看出: 焊接时成分是连续过渡的, 焊丝与基体材料得到了充分的熔合。X 射线物相分析结果表明, 焊缝与母材的结构是相同的, 焊缝与基体具有相近成分和相似晶格类型。由于焊接熔池小, 冷却速度快, 在熔池壁连接母材处的晶粒最适宜作为焊缝金属结晶的现成表面, 对结晶最有利, 焊缝组织容易在母材的基础上形成, 即组织的外延生长, 并且沿热传导方向择优生

长成柱状晶。在焊缝中心, 有时会形成等轴晶, 甚至在特殊条件下, 整个熔合区全部为等轴晶。这和熔池的温度梯度有关, 当温度梯度小时, 易于生成等轴晶。

Ni 基焊丝的焊缝区组织如图 2 所示, 熔合区和母材之间有明显的熔合线, 组织不连续变化。焊缝和母材成分差异较大, 焊缝熔合区呈枝晶长大。EDAX 分析表明, 有明显的宏观偏析存在^[5], 焊缝中 Ni 元素的加入使其组成也较为复杂, 经 X 射线物相分析, 焊缝熔合区主要由 Fe_3Al 和 Ni_3Al 两相组成, 与基体结构显然不同。正是由于 Ni 基焊缝熔合区的成分和相组成与基体差异较大, 从而导致两者组织的不连续性而, 有了明显的熔合线。Santella 等人^[6] 在研究 Fe 含量 (原子分数) 约为 10% 的 Ni_3Al 合金的焊接性时, 亦观察到焊缝中两相共存及明显的熔合线, 且熔合线是焊接件的性能薄弱区域。



图 1 $Fe_3Al(CrNbC)$ 和 $Fe-16Al(CrMoNbYC)$ 合金的焊缝区组织

Fig.1 Microstructures of welded zone of alloys $Fe_3Al(CrNbC)$ (a) and $Fe-16Al(CrMoNbYC)$ (b)

表 4 焊缝熔合区、热影响区及母材的化学成分

Table 4 The compositions of FZ, HAZ and BM (base metal)

Welded material	Filler	Analysis zone	Atomic fraction, %				
			Fe	Al	Cr	Nb	Mo
$Fe_3Al(Cr)$	FCM	FZ	81.9	14.5	3.5	-	-
		HAZ	74.6	20.8	4.6	-	-
		BM	67.1	27.6	5.2	-	-
$Fe_3Al(CrNbC)$	FCM	FZ	77.8	17.9	3.6	0.68	0.08
		HAZ	73.0	22.3	4.2	0.47	0.07
		BM	67.5	26.9	5.1	0.50	-
$Fe-16Al(CrMoNbYC)$	FCM	FZ	87.1	9.00	3.2	0.07	0.70
		HAZ	85.2	10.4	3.4	0.12	0.90
		BM	78.0	15.3	5.0	0.26	1.20

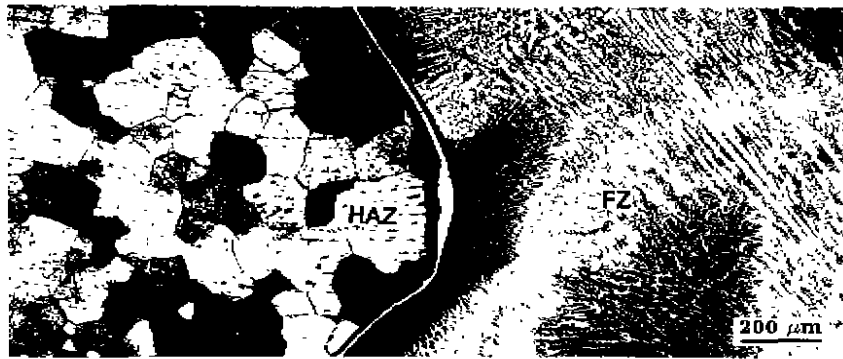


图2 Ni基焊丝焊缝区组织

Fig.2 The microstructure of welded zone joined with nickel-based filler

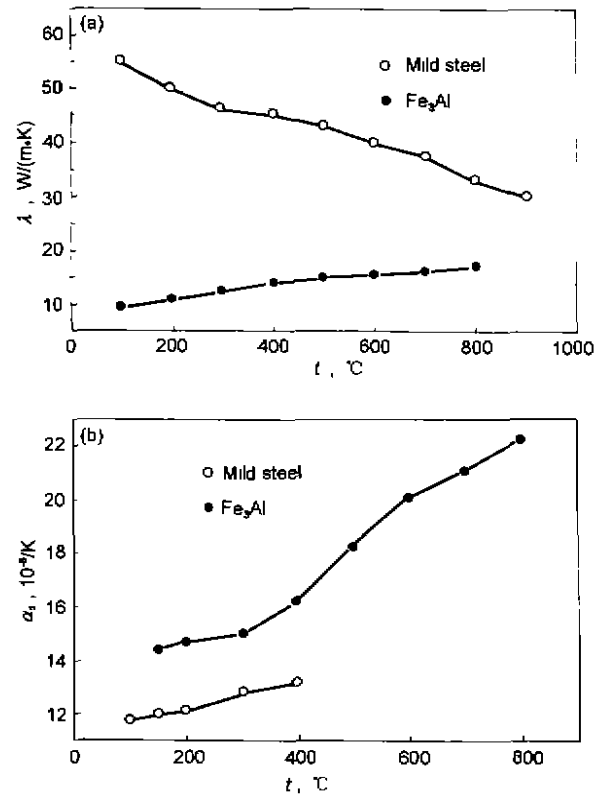
2.2 焊接工艺参数对薄板 GTA 焊缝开裂的影响

2.2.1 焊接电流的影响 焊接填充料的选择对 Fe-Al 基合金的焊接性影响极大,在确定了焊丝的情况下,焊接工艺参数直接决定了材料的焊接性.实验结果表明,降低电流与线能量,采用中低碳 CrMo 钢焊丝, Fe₃Al 基合金表现出良好的焊接性.本体焊丝 Fe₃Al(Cr) 对工艺参数的变化要敏感得多,大电流焊接时出现纵向热裂纹,而小电流完全避免了开裂,成功地焊成了 Fe₃Al(CrNbC) 合金,降低焊接电流后,焊件的角变形减轻,焊接宽度减小,变形性改善,而气体保护不仅减轻了氧化现象,同时加强了熔池中液体的流动性,利于焊缝组织的均匀和成型.降低电流对 Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金的影响更为明显,由无法焊接到成功实现对接.

焊接金相组织表明,焊接电流降低,热影响区总的宽度降低,从母材到熔合区,晶粒增长的趋势也减缓,晶粒尺寸也较小.熔合区晶粒的形状也因电流的不同而不同.大电流时,熔池内部温度梯度小,因此出现粗大的等轴晶;焊接电流减小,熔池内部温度梯度大,过热度小,出现柱状晶,尤其对 Fe₃Al(Cr) 合金,合金成分简单,原材料晶粒粗大,焊后热影响区晶粒受热循环作用长大.由于没有析出相的细化作用,晶粒的长大对电流十分敏感,所以小电流下性能明显提高,有些试样断裂在熔合线,这说明晶粒长大的部位是薄弱环节. Fe₃Al(CrNbC) 合金在小电流下同样比大电流下性能优异,同时,添加 Nb 和 C 对焊接起了有利作用. Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金的焊接性对电流非常敏感,合金中由于合金元素较多,使晶粒减小,强度较高,但当焊接电流较大时,第二相会析出并长大,成为裂纹的发源地,故大电流下易开裂.

2.2.2 焊件预热、缓冷的作用 焊前预热焊后缓冷对 Fe-Al 合金的焊接是非常必要的. Fe₃Al 基合金与低碳钢的线膨胀系数 α_1 与热导率 λ 随温度的变化如图 3 所示^[7]. Fe₃Al 基合金较高的线膨胀系数 α_1 和相对低的导热系数 λ

使焊接时产生较大的热应力,这是引起热裂的重要原因.同低碳钢相比, Fe₃Al 基合金的热导率很低,不利于焊缝的散热,同时,线膨胀系数又大,尤其在高温区更加明显,使得熔化区和热影响区在冷却阶段产生较大收缩,易产生热裂纹.焊前预热可以使材料温度梯度变缓,降低冷却速度,减小收缩量,降低应力,使材料处于性能较好的温度区,在一定程度上抑制了热裂趋势.

图3 低碳钢和 Fe₃Al 的热导率及线膨胀系数与温度的关系Fig.3 Thermal conductivity λ (a) and coefficient of linear expansion α_1 (b) of mild steel and Fe₃Al vs temperature t

氢对 Fe_3Al 的冷裂倾向影响较大. 在真空中无一试样在加载前开裂. 随着水蒸气含量增高, 冷裂越发严重. Fe_3Al 的环境脆性影响了室温塑性. 同样, Fe_3Al 基合金在水汽环境中的氢脆敏感是焊接中造成冷裂的主要原因^[8,9]. 冷裂纹一般是在焊后冷却过程中发生, 即延迟裂纹. 冷裂纹的起源多发生在具有缺口效应的焊接热影响或有物理化学不均匀的氢聚集的局部地区. 延迟裂纹不仅取决于氢的这种有害作用, 而且还取决于焊接接头所处的应力状态. 在焊接的条件下, 主要存在热应力、组织变化时引起的组织应力和外界条件造成的外应力, 相互叠加产生很大残余应力. Fe_3Al 韧-脆转化温度 (RDTT) 为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右^[10], 而在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上即可将 Fe_3Al 吸附的氢赶走, 所以预热温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 较好. 实验证明, 预热温度由 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 材料的焊接性有所改善, 原来冷裂的现象得到了抑制, 但过高的温度也会使晶粒粗大, 反而加剧了开裂倾向.

焊后缓冷可以起到使金属在焊接中产生的应力得到释放, 即应力松弛; 消除扩散氢及改善组织 (比如改善热影响区的塑性) 等的作用. 由于冷裂纹存在潜伏期, 一般在焊后

几分钟或几小时才会发生, 在裂纹产生以前及时进行热处理 (即缓冷), 对防止冷裂是很有必要的.

用 $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{Cr})$ 作为焊丝, 其成分和母材十分接近, Fe_3Al 基合金膨胀系数的大小对合金成分变化不敏感, 热导率随合金元素增多呈下降趋势, 但相差不大. 因此填充料和母材同样具有大的膨胀系数和小的热传导, 在温度梯度较大时极易开裂. 本体填充料同样对氢敏感, 所以裂纹不仅会在热影响区发生, 同样会在熔合区发生, 因此增大了延迟冷裂的几率. 而中低碳 CrMo 钢焊丝所得焊缝热膨胀较小, 且焊缝区成分连续变化, 组织呈联生长大, 中焊缝区同基体材料结构类似, 即使不进行预热和缓冷, 也可以成功焊接 Fe_3Al 基合金薄板.

2.2.3 优化的焊接工艺参数 经过工艺优化, 试验采用的热处理制度为: 焊前与焊后分别在 $400\text{ }^\circ\text{C}$, 2 h 保温, 随炉冷. 焊接工艺参数为: 焊接电流 $I=50\text{--}80\text{ A}$; 焊接电压 $U=8\text{--}15\text{ V}$; 焊接速度 $v=0.5\text{--}2\text{ mm/s}$; 电弧热效率 $\eta=0.7$; 氩气正、反面流量分别为 20 和 10 L/min .

采用上述优化工艺, 对中低碳 CrMo 钢焊丝, 试验材



图 4 电子束焊接 $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{CrNbC})$ 和 $\text{Fe-16Al}(\text{CrMoNbYC})$ 合金的焊接区组织

Fig.4 Microstructures of welded zones formed in $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{CrNbC})$ alloy (a) and $\text{Fe-16Al}(\text{CrMoNbYC})$ alloy (b) welded by electron beam

料全部焊成, 未发生开裂, 尤其是 Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金, 在电流减小后不再发生开裂, 小的焊接电流导致小的热输入, 利于增强材料的抗裂能力. 而本体焊丝, 电流减小后, 可以焊成 Fe₃Al(CrNbC) 合金, 但对工艺要求十分严格. 对同种焊丝, Fe₃Al(CrNbC) 合金表现出更好的焊接性, Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金焊接性最差, 只有在合适的工艺下选用中低碳 CrMo 钢焊丝才可焊成. 焊接电流的大小直接影响到热输入的大小, 从工艺角度讲, 尽量小的热输入利于减小应力和变形, 且能改善焊缝的粗大组织.

2.3 Fe-Al 基合金的真空电子束焊接

电子束焊接是利用电子枪产生的电子束聚焦在工件上, 使焊件金属迅速熔化后再重新凝固. 电子束斑直径小、焊缝窄, 且高度聚焦、输入能量低. 焊接在真空下进行, 避免了氢致裂纹, 焊缝质量高.

经多次试验, 采用的焊接参数如下: 聚焦电流 $I_f=800-1200$ mA; 焊接电流 $I_b=20-30$ mA; 焊接速度 $v=0.5-2$ m/min; 真空度为 1.33×10^{-2} Pa.

Fe₃Al(Cr), Fe₃Al(CrNbC) 和 Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金焊后均未出现开裂, 焊接成功的试片, 外形十分平整, 热变形很小, 焊缝窄, 约是氩弧焊的一半 (2 mm 左右), 焊缝成形性良好, 无褶皱, 无氧化皮, 焊缝部位十分干净, 无任何夹杂, 明显优于氩弧焊.

图 4 为采用电子束焊接 Fe₃Al(CrNbC) 合金以及 Fe-16Al(CrMoNbYC) 合金的焊缝区组织. 从图中可以看出: 集中的高能量输入使熔合区组织细化, 焊缝组织为典型的柱状晶, 宽度窄小, 沿热传导方向生长, 热影响区也十分窄小, 局部温度梯度增大, 晶粒组织较钨极氩弧焊焊缝明显细化, 焊接过程中不产生热裂, 又因为焊接在真空中进行, H 和 O 等原子的浓度很低, 抑制了氢的作用, 使氢致延迟裂纹难以发生, 焊后不产生延迟冷裂纹. 电子束焊接 Fe₃Al(CrNbC) 合金试样的拉伸、弯曲性能结果表明, 室温拉伸和弯曲时, 断裂均发生在母材部分. 抗拉强度和抗弯强度分别为 289 和 18 MPa, 焊缝并没有弱化焊接件的力学性能. 在合适的工艺参数下, 采用 EBW 焊, Fe-Al 基合金表现出良好的焊接性, 焊缝外形美观、性能优异.

3 结论

(1) 采用钨极氩弧焊 (GTA) 时, Fe₃Al 基合金的焊接性和焊丝选择有很大关系, 对该类材料, 选用中低碳 CrMo 钢焊丝是合适的. 焊缝组织为联生长大, 成分连续变化, 性能比较稳定. 而 Ni 基焊丝由于成分和相组成的差异, 对 Fe-Al 基合金的焊接性产生不良影响.

(2) 在 Fe₃Al 中加入 Nb 和 C, 细化了熔合区和热影响区组织, 增加了合金的抗冷裂的能力, 提高了合金的焊接性能. 而 Fe₃Al(Cr) 合金由于组织粗大, 焊接成型性较差. 选择合适的预热缓冷工艺, 可以有效地避免材料的延迟冷裂现象.

(3) GTA 焊接时, 焊接工艺参数, 尤其是焊接电流, 对材料的焊接性影响明显. 在保证焊透的情况下, 减小焊接热输入, 可增强其抗裂能力.

(4) 采用真空电子束焊 (EBW), Fe-Al 基合金表现出良好的焊接性能, 热变形小, 焊缝窄, 质量高, 性能较好.

参考文献

- [1] McKamey C G, Devan J H, Tortorelli P F, Sikka V K. *J Mater Res*, 1991; 6: 1779
- [2] Sun Z Q, Huang Y D, Yang W Y, Chen G L. *Mater Res Soc Symp Proc*, 1993; 288: 885
- [3] David S A, Zacharia T. *Weld J*, 1993; 72(5): 201-s
- [4] Goodwin G M, McKamey C G, Maziasz P J, Sikka V K. *DE90012722/XAD*, Report of The US Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 1990: 181
- [5] Dong M. *Master Thesis*, University of Science and Technology Beijing, 1999
(董敏. 北京科技大学硕士学位论文, 1999)
- [6] Santella M L, David S A. *Weld J*, 1986; 65(5): 129-s
- [7] Liu Y D. *Master Thesis*, University of Science and Technology Beijing, 1997
(刘豫东. 北京科技大学硕士学位论文, 1997)
- [8] Liu C T, McKamey C G, Lee E H. *Scr Metall Mater*, 1990; 24: 385
- [9] Stoloff N S, Liu C T. *Intermetallics*, 1994; 2: 2033
- [10] Goodwin G M. *DE94001091*, Report of The US Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 1994