

异种材料真空电子束焊接研究现状分析

冯吉才，王 廷，张秉刚，陈国庆  
(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)



冯吉才

摘 要: 真空电子束焊接具有高能量密度、束斑直径和位置精确可控, 焊接残余应力小, 焊缝无污染等优点, 因此, 电子束焊接在异种材料连接领域的应用成为近年来研究的热点, 并取得了大量的研究成果, 部分已经在工业生产中得到了应用. 由于电子束焊接属于熔化焊接, 因此在异种金属连接中也存在冶金过程带来的困难. 文中对异种材料的真空电子束焊接的研究现状进行了分析, 对不同类型的异种材料接头真空电子束焊接中存在的问题和解决方法进行了总结, 并提出了今后异种材料真空电子束焊接的研究重点.

关键词: 异种材料; 真空电子束焊接; 研究现状

中图分类号: TG456.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2009)10-0108-05

0 序 言

随着经济的发展和科学技术的不断进步, 新材料、新工艺应用日益广泛, 对零部件综合性能的要求越来越高. 单一金属结构通常很难满足工业生产的需求, 或者即使某种金属比较理想, 也往往由于十分稀缺, 不能在工程中普遍应用, 因此异种材料连接的复合结构是发展趋势. 但异种材料熔化焊时存在冶金不相容性, 例如形成脆性金属间化合物、不同熔点相的偏析以及大的残余应力等问题, 使接头性能较差.

采用钎焊、摩擦焊、电阻焊、扩散焊、胶结以及机械连接都能实现异种金属的可靠连接, 但使用条件受到极大限制<sup>[1]</sup>. 解决问题还需要从熔化焊入手. 从异种金属连接研究近年来发表的文献分布可以看出, 电子束焊接技术是采用频率最高的<sup>[2]</sup>, 这是因为真空电子束焊接具有以下优点: (1) 焊缝热输入小, 热应力低; (2) 焊接变形小; (3) 在真空条件下进行焊接, 焊缝纯度高; (4) 焊接参数精确可调, 工艺适应性强, 重复性和再现性好<sup>[3]</sup>.

文中对异种材料电子束焊接的研究现状进行了总结, 分析了异种材料电子束焊接存在的问题和解决方法.

1 异种金属电子束焊接主要方法

种材料的电子束焊接, 目前主要采取以下两种工艺方法.

(1) 过渡材料法. 该工艺针对一些冶金上不相容的金属的连接, 通过填充另一种(或几种)与两者皆相容的金属箔片(或金属丝)来改善接头的冶金性能, 从而实现电子束焊接. 添加过渡金属材料的方法可以通过机械镶嵌, 也可以通过表面熔覆或者堆焊的方法. 表 1 是电子束焊接异种金属接头常采用的过渡金属材料<sup>[3,4]</sup>.

表 1 电子束焊接异种金属常用过渡金属材料

Table 1 Transition materials used in electron beam welding for dissimilar materials

被焊异种金属	过渡层金属
镍合金(Ni)+ 钼合金(Nb)	Pt
Mo+ 钢	Ni
不锈钢+ Ti, Ni	V
硬质合金+ 钢	Co, Ni
黄铜+ 铅(Pb)	Sn
铝合金(Al)+ 铜合金(Cu)	Zn, Ag
低合金钢+ 碳钢	10MnSi8
钢+ 钛合金(Ti)	Nb, 青铜, V+ Cu, Cu+ Ni
紫铜(Cu)+ 低碳钢	Ni, CuNi 合金
铝合金(Al)+ 不锈钢	Ni, Ag
不锈钢+ CuNi 合金	镍基合金
Ta-W-Hf+ W-Re-Mo	Mo
TZM(主要含 Mo)+ Ni-Cr-W	Nb-Zr
钛合金(Ti)+ 铌(Re)	Ti+ Mo+ Re 粉末熔覆

(2) 能量精确控制法. 该工艺借助电子束焊接

能量精确可控的特点,在焊接异种金属接头时控制能量在两侧金属的分布,从而控制两侧金属的熔化量.主要控制方法包括偏束法和扫描轨迹法.偏束法指在焊接时通过焊枪的移动或偏转使电子束入射到某一侧母材上.扫描轨迹法则是通过控制线圈和扫描函数发生器,使电子束按照特定的轨迹扫描,从而实现电子束能量分布的控制<sup>[9]</sup>.

2 异种材料电子束焊研究现状

2.1 同种金属不同系列

2.1.1 异种铝合金

何金江等人<sup>[9]</sup>对 14 mm 厚高纯 AlCu0.5 合金与 6061 合金进行了电子束焊接,采用圆形扫描方式.焊缝中没有发现 Mg<sub>2</sub>Si 强化相的存在,接头强度高于 AlCu0.5 母材,焊缝得到了强化. Dahan 等人<sup>[7]</sup>对纯铝 1050 与 6061 铝合金的电子束焊接进行了研究,发现焊缝中出现裂纹,焊缝中的硅含量和镁含量对裂纹长度有重要影响,分别与裂纹长度呈线性和抛物线关系.

2.1.2 异种镍基合金

王亚军<sup>[8]</sup>对镍基高温合金 GH4169 与铁基高温合金 GH907 电子束焊接进行了研究,发现主要的缺陷是根部液化裂纹(图 1).液化裂纹的产生是由于奥氏体晶界存在连续的液化膜,这种液化膜主要来自于 GH4169 中的 NbC, GH907 中的富 Nb 及富 Si 的 Laves 相或 G 相.通过降低热输入,能够减少液化裂纹的产生.

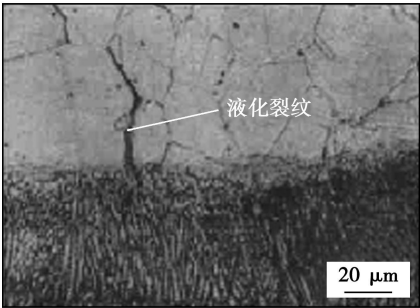


图 1 近缝区液化裂纹

Fig. 1 Liquefied crack near weld

2.1.3 异种钢铁材料

(1) 碳钢与不锈钢.异种钢的焊接主要是碳钢与不锈钢之间的焊接,因此接头的抗腐蚀性能是关注的重点. Lee 等人<sup>[9]</sup>对 690 钢与 SUS 304L 电子束焊缝的组织 and 抗腐蚀性能进行了研究.结果显示,

焊缝枝晶间包含细小的 TiN 沉淀和富 Ni-Cr 相. 休氏试验发现, TiN 沉淀和富 Ni-Cr 相周围的基体是点蚀优先产生的区域. 由于 EBW 过程中快速冷却, 相比 GTAW 接头, 焊缝中形成的 TiN 沉淀和富 Ni-Cr 相相对较少, 同时还可以抑制铬碳化物的析出, 减小晶界 Cr 元素的损耗. 结果, EBW 焊缝中只观察到有限的点蚀, 体现出更好的抗晶内腐蚀性和抗枝晶间抗腐蚀性能. Lee 等人<sup>[10]</sup>还在空气和 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + NaCl 腐蚀环境中进行了低应变拉伸性能测试. 拉伸断裂都位于熔化区, 在腐蚀环境中的抗拉强度和伸长率都低于空气中的数值.

(2) 铸铁与碳钢. 铸铁能够实现近净形成形, 铸铁构件的形状几乎可以不受限制, 因此将铸铁与其它钢焊接起来是减小构件尺寸的有效方法. Hatate 等人<sup>[11]</sup>对低碳钢 SS400 和球墨铸铁 FCD450 电子束焊接时发现, 接头中铸铁熔化并快速冷却形成渗碳体, 使得接头塑性下降. 通过在对接口加入含大量 Ni 元素的铸铁薄片, 能够阻止渗碳体的形成, 接头抗拉强度可以达到 400 MPa, 高于用 Fe-Ni 焊丝进行 MAG 焊时的 350 MPa.

2.1.4 异种镁合金

异种镁合金电子束焊接时由于两种合金在熔池中的流动性不同而易产生微孔, 从而使接头产生裂纹, 使接头的强度和塑性都变差. Chi 等人<sup>[12]</sup>研究了 Al 元素对改善异种镁合金接头的强度和塑性的作用. 结果显示, Al 元素能够提高焊缝金属的流动性, 有利于闭合微孔, 从而提高接头的强度和塑性. 在对以下不同组合 AZ31B-AZ61A, AZ31B-AZ91D, AZ61A-AZ91D 的电子束焊接时, 铝元素含量高的组合, 接头最终抗拉强度高, 焊缝区域的显微硬度值也较高.

2.2 能相互固溶的异种金属材料

对于能相互固溶的异种金属材料的电子束焊接比较容易实现, 需要注意的是焊接过程由于物理性能差异造成的焊接缺陷问题.

这一类异种金属的焊接最典型的的就是钛合金与锆合金的焊接. 钛和锆可形成固溶体组织, 不会产生脆性金属间化合物. 但两种合金的熔点差异大, 热传导性能也有差别, 两侧热输入相同时, 会导致焊缝几何尺寸不对称. 杨尚磊等人<sup>[13]</sup>对 BT5-1 钛合金与 C-103 锆合金进行电子束焊接时, 通过扫描电子束在两侧采用不同的占空比控制两侧的热输入. 在 C-103 侧占空比为 0.9 时接头熔合良好. 胡振海等人<sup>[14]</sup>对 7715D 钛合金与锆合金 C-103 进行电子束焊接时, 为了补偿两种金属的物理性能差别, 焊接时通过程序控制使电子束偏向锆合金一侧 0.25 mm, 接

头平均抗拉强度为 552 MPa, 高于钕合金母材的强度, 接头可弯曲  $180^\circ$  而无裂纹出现。

### 2.3 两种难以共溶的异种金属材料

这类合金焊接的典型是铜和钢的焊接, 二者不易发生相互作用, 但由于铜的线膨胀系数和收缩率均很大, 与钢焊接时热应力和组织应力较大, 且两种金属在固相很难互溶, 如果焊接时不能很好的控制母材的熔化量, 极易在界面形成缺陷。同时, 铜因其导热性极好而容易出现基材难以熔合、焊不透和表面成形差等缺陷。

Magnabosco 等人<sup>[15]</sup>对 Cu/AISI 304L, Cu/AISI 304 以及 CuCrZr/AISI316L 进行电子束焊接时发现, Cu 元素能够扩散进入钢奥氏体晶界, 导致微裂纹产生。接头由两种非平衡的富 Cu 相和含有 Fe, Cr, Ni 的奥氏体组成, 必须在对束流、焊道数目和焊接速度等工艺参数的精确优化设计下, 才能获得优良的焊接接头。王向斌等人<sup>[16]</sup>采用焊前预热和铜侧偏束的方法对不等厚的 T2 紫铜(厚 34 mm)和 10 钢进行电子束焊接。预热采用散焦电子束沿紫铜侧扫描进行。焊前多次预热, 使紫铜温度达到  $150 \sim 200^\circ\text{C}$ , 电子束偏 10 钢侧  $0.3 \sim 0.5\text{ mm}$ , 接头能够获得满意的焊缝成形。张秉刚等人<sup>[17]</sup>采用电子束熔钎焊对 QCr0.8 和 1Cr21Ni5Ti 接头进行了焊接, 调整电子束距对接面的距离可以改善接头的焊缝组织, 在铜侧偏值达  $0.8 \sim 1.0\text{ mm}$  时, 形成焊缝组织成分均匀, 抗拉强度可达 330 MPa。

### 2.4 形成金属间化合物等脆性相的异种金属材料

这类接头两种金属间的物理及化学性能具有显著差异, 这给熔焊带来了很大困难。焊接时易在接头区生成大量的金属间化合物等脆性相, 给接头强度带来不利影响, 甚至根本无法进行直接熔化焊接。

#### 2.4.1 铝和钢

铝合金与钢焊接时易在接头区生成大量的 Fe-Al 脆性金属间化合物, 而且铝和钢熔点相差较大, 得到成形良好的焊缝也比较困难。

张秉刚等人<sup>[18]</sup>采用  $100\text{ }\mu\text{m}$  厚 Cu 箔作为中间层对 2 mm 厚 LF2 铝合金和 Q235 钢进行电子束焊接, 结果显示铜对铝/钢接头金属间化合物的抑制作用不明显, 连接接头的强度为 75 MPa。

#### 2.4.2 铜和钛

刘伟等人<sup>[19]</sup>对 QCr0.8 和 TC4 的电子束焊接性进行了研究, 结果发现, 焊缝中形成大量的钛铜金属间化合物, 断裂发生在化合物层中, 接头抗拉强度最大为 82 MPa。采用偏束焊能够大幅度提高二者的结合强度, 在铜侧束偏量为  $0.8\text{ mm}$  时, 接头塑性得到改善, 接头抗拉强度可达到 270 MPa。

#### 2.4.3 钛和钢

由 Ti-Fe 相图可知, 铁在  $\alpha\text{-Ti}$  中的溶解度只有 0.04%, 熔化焊接时接头中几乎全部由 Ti-Fe 金属间化合物组成, 在焊接热应力作用下发生开裂, 无法实现连接。进行电子束焊接时可选用钎、铌或青铜作为中间材料, 以改善接头组织。焊前严格清理被焊材料, 可按焊接钛或钛合金的焊接参数选择工艺参数。焊接过程中也可采用偏束的工艺来改善焊缝成形和显微组织<sup>[4]</sup>。通过焊前预热和焊后后热可以降低降温速率, 有助于缓解焊接热应力, 避免接头开裂。

#### 2.4.4 钛和锆

锆属于稀有难熔金属, 并具有较高的密度, 良好的抗化学性能和稳定性, 没有脆性转变温度, 但非常昂贵且难以加工成形。钛合金与锆的复合结构在航空航天领域有很好的应用前景。

杨尚磊等人<sup>[20]</sup>对锆与 BT5-1 钛合金的电子束焊接进行了研究, 发现直接进行电子束焊接的焊缝成形不良, 在钛合金侧容易出现气孔和马氏体相, 在锆侧出现裂纹和  $\text{Ti}_3\text{Re}_{24}$  脆性相。Re 含量超过 10% 时, 焊缝中出现脆性  $\omega$  相, 也会降低接头的塑性。为了改善接头性能, 在 BT5-1 表面用电子束熔覆含有 Ti, Re 和 Mo 元素的粉末, 然后采用焊前预热和焊后后热的方法对热量进行控制, 接头成形良好, 裂纹和气孔消除, Re, Mo, Ti 元素在接头中变化均匀。

### 2.5 金属与陶瓷、化合物材料、非晶材料

#### 2.5.1 金属与陶瓷材料

真空电子束焊接是金属与陶瓷的一种有效的焊接方法。但陶瓷与金属的焊接接头容易在热应力作用下开裂, 因此焊接时要注意减小焊接应力。焊接时要进行适当的焊前预热和焊后后热, 以降低冷却速度, 缓解残余应力。高纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷与难熔金属 (W, Mo, Nb, Fe-Co-Ni 合金) 电子束焊接时, 宜采用高压电子束焊机进行<sup>[4]</sup>。

#### 2.5.2 金属与金属间化合物材料

(1) 钛铝与钛合金。钛铝金属间化合物由于塑性差, 焊接时接头容易在热应力作用下产生宏观裂纹, 与其它金属焊接时应注意控制焊缝金属降温速率, 以降低热应力, 从而控制焊接裂纹的产生。

张秉刚等人<sup>[21]</sup>对 Ti-43Al-9V-0.3Y 与 TC4 的电子束焊进行了研究, TiAl 合金侧局部产生横向裂纹, 焊缝中还常会形成气孔。焊缝区以  $\alpha\text{-Ti}_3\text{Al}$  相为主, 焊接速度的变化对接头抗拉强度的影响不大, 而束流与抗拉强度的关系曲线存在峰值, 接头强度最高可达 210 MPa。张洪涛等人<sup>[22]</sup>研究发现  $\text{TbAl}$  与 TC4 的焊接性优于 TiAl, 电子束焊接接头无宏观焊接缺

陷产生,焊接热输入通过影响晶粒尺寸影响焊接接头强度,在保证熔深的情况下热输入越小,接头强度越高,接头最高抗拉强度为 831 MPa,达到  $\text{Ti}_3\text{Al}$  强度的 92%。

(2) 钛铝和钢. Ding 等人<sup>[23]</sup>对  $\gamma\text{-TiAl}$  和低合金钢进行了电子束焊接,试验发现在热输入较大的情况下,由于热应力较大,焊缝出现固态裂纹,同时形成脆性相  $\text{TiC}$  和少量的  $\text{Ti}_3\text{Al}$  化合物. 只有在焊接参数得到适当的控制,使得热应力减小或消除,才能得到无裂纹的接头,  $\text{TiC}$  和  $\text{Ti}_3\text{Al}$  的形成才能减少到最低。

(3) 钢与硬质合金. 硬质合金与钢的连接可以解决其尺寸有限、形状简单、成本高、韧性差等不足. 二者扩散焊时容易在界面处形成有害的  $\eta$  相( $\text{M}_6\text{C}$  形复合碳化物),使结合部位抗弯强度低. 采用电子束焊接,由于冷却速度快,能在一定程度上控制元素的扩散,抑制有害相的产生. 赵秀娟等人<sup>[24]</sup>对 YG30 硬质合金与 45 钢电子束焊接时发现,经焊前预热,焊接束流较低、焊接速度较慢的接头界面接合良好,没有焊接缺陷产生,但有  $\eta$  相生成.  $\eta$  相在界面处聚集长大,厚度约  $10\ \mu\text{m}$ . 焊接过程中硬质合金中的碳向焊缝和焊缝中的铁向硬质合金中的迁移是  $\eta$  相形成的主要原因. 在焊前不预热,焊接速度较快的情况下,有极少量的  $\eta$  相生成,但接头容易产生裂纹等焊接缺陷。

### 2.5.3 金属与非晶态材料

非晶态金属玻璃合金具有高弹性、高强度的特点,最大厚度已可达几十毫米,但还不能满足某些结构中的使用,因此有必要将其与其它合金焊接起来. 锆基非晶态金属玻璃是目前比较常用的一种。

Kawamura 等人<sup>[25]</sup>对 3 mm 厚锆基玻璃合金与多晶锆金属板成功进行了电子束对接试验. 在热影响区和焊缝区未发现可见缺陷或者裂纹. 界面附近的玻璃合金保持非晶态,除了密排六方的锆之外,没有任何结晶相形成. 接头界面表现出足够的韧性和连接强度,锤击时能弯曲到  $90^\circ$ 。

Kim 等人<sup>[26]</sup>将 5 mm 厚  $\text{Zr}_{41}\text{Be}_{23}\text{Ti}_{14}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{10}$  非晶态金属玻璃与钛合金进行电子束焊接时发现,接头没有缺陷产生,但焊缝区由于发生了结晶过程从而生成了  $\text{Zr}_{12}\text{Ni}$  金属间化合物,界面处有约  $20\ \mu\text{m}$  的富 Ti 反应层,这主要是因为钛的熔化量过大而导致的. 弯曲破坏发生在界面处. 采用非晶侧偏束的方法可以减少钛的熔化量,从而可以避免晶界过程的发生. 采用偏束工艺进行焊接时,在束流偏非晶侧 0.4 mm,相同参数下进行焊接,焊缝无缺陷,焊缝保

持非晶状态,界面处存在约  $10\ \mu\text{m}$  厚的 Ti, Zr 交互扩散层. 弯曲破坏发生在钛侧。

电子束焊接 Ni 基非晶态金属玻璃时,也存在上述问题,采用偏束的方法也能实现可靠连接<sup>[27]</sup>。

## 3 结 论

对电子束焊接的国内外研究现状进行了总结与分析,可以看出:电子束在异种材料的连接中具有其它方法无法比拟的优越性. 对于同种材料不同系列以及冶金相容性较好的异种接头已经能够实现较满意的连接,但对于易生成金属间化合物等脆性相的异种金属接头或金属与金属间化合物材料之间的电子束焊大都采用添加过渡金属或偏束的工艺,尚不能得到性能十分优良的接头. 预热和焊后热能够降低焊接热应力,但目前的电子束焊接设备只能实现局部加热,还不能实现整体预热和整体焊后后热,因此对热应力的缓解效果还十分有限. 因此,今后的研究在进一步改进焊接工艺的同时,还应该从设备改进入手,使电子束焊接设备尽量实现多功能化,能够满足更多新工艺的需求,以更好的实现异种材料的连接。

## 参考文献:

- [1] 刘中青. 异种金属焊接技术指南[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [2] Sun Z, Kappi R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59(3): 257-267.
- [3] 王之康, 高永华, 徐 宾. 真空电子束焊接设备及工艺[M]. 北京:原子能出版社, 1990.
- [4] 李亚江, 王 娟, 刘 鹏. 特种焊接技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [5] 李少青, 张毓新, 王学东, 等. 基于电子束能量分布控制的异种金属连接[J]. 机械工程材料, 2005, 29(9): 35-38.  
Li Shaoqing, Zhang Yuxin, Wang Xuedong, et al. Welding of dissimilar metals based on electron beam energy distribution control[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(9): 35-38.
- [6] 何金江, 郭力山, 王欣平, 等. 高纯 Al 合金与 6061Al 合金的电子束焊接[J]. 热加工工艺, 2007, 36(19): 33-35.  
He Jinjiang, Guo Lishan, Wang Xinping, et al. Research on electron beam welding of high pure Al alloy and 6061 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(19): 33-35.
- [7] Dahan I, Dabush E, Stern A, et al. Dissimilar alloy electron beam welding of aluminum Al-6061 to Al-1050[C] // The 6th International Conference on Trends in Welding Research. Phoenix, AZ: ASM International, 2002: 15-19.
- [8] 王亚军. 高温合金 GH4169/GH907 异种材料的电子束焊接

- [ J ] . 航空工艺技术, 1995(2): 11—14.
- Wang Yajun. EBW for superalloy GH4169/GH907[ J ] . Aeronautical Manufacturing Technology, 1995(2): 11—14.
- [ 9 ] Lee H T, Lin Y D, Kuo T Y, *et al.* Precipitated phases and corrosion behavior in the dissimilar alloy 690-SUS 304L joints formed by EBW and GTAW[ J ] . Materials Transactions, 2007, 48(6): 1538—1547.
- [ 10 ] Lee H T, Lin Y D. Microstructure and corrosion behaviour of alloy 690-SUS 304L butt joints formed by electron beam welding[ J ] . Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(6): 650—656.
- [ 11 ] Hatate M, Shiota T, Abe N, *et al.* Bonding characteristics of spherical graphite cast iron and mild steel using electron beam welding process[ J ] . Vacuum, 2004, 73(3—4): 667—671.
- [ 12 ] Chi C T, Chao C G, Liu T F, *et al.* Aluminum element effect for electron beam welding of similar and dissimilar magnesium-aluminum-zinc alloys[ J ] . Scripta Materialia, 2007, 56(9): 733—736.
- [ 13 ] 杨尚磊, 楼松年, 薛小怀, 等. BT-5 钛合金与 C-103 钨合金的真空电子束焊接工艺研究[ J ] . 热加工工艺, 2005(2): 35—36.
- Yang Shanglei, Lou Songnian, Xue Xiaohuai, *et al.* Electron beam welding of BT-5 titanium alloy and C-103 niobium alloy[ J ] . Hot Working Technology, 2005(2): 35—36.
- [ 14 ] 胡振海, 朱铭德, 张建浩. 钛合金与钨合金的真空电子束焊接工艺研究[ J ] . 航天工艺, 2001(1): 10—15.
- Hu Zhenhai, Zhu Mingde, Zhang Jianhao. EBW of titanium alloy and niobium alloy[ J ] . Aerospace Manufacturing Technology, 2001(1): 10—15.
- [ 15 ] Magnabosco L, Fero P, Bonollo F, *et al.* An investigation of fusion zone microstructure in electron beam welding of copper-stainless steel [ J ] . Materials Science and Engineering A, 2006, 224(1—2): 163—173.
- [ 16 ] 王向斌, 赵晓红, 周石泉, 等. T2 紫铜与 10<sup>#</sup>钢异种金属电子束焊接工艺研究[ J ] . 电焊机, 2005, 35(1): 42—44.
- Wang Xiangbin, Zhao Xiaohong, Zhou Shiquan, *et al.* Welding T2-copper to 10-steel by electron beam[ J ] . Electric Welding Machine, 2005, 35(1): 42—44.
- [ 17 ] 张秉刚, 冯吉才, 吴林, 等. 铬青铜与双相不锈钢异种材料电子束熔钎焊[ J ] . 焊接学报, 2004, 25(4): 43—47.
- Zhang Binggang, Feng Jicai, Wu Lin, *et al.* Melt-brazing chromium-copper to double-phase stainless steel by electron beam[ J ] . Transaction of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 43—47.
- [ 18 ] 张秉刚, 何景山, 曾如川, 等. LF2 铝合金与 Q235 钢加入中间 Cu 层电子束焊接接头组织及形成机理[ J ] . 焊接学报, 2007, 28(6): 37—41.
- Zhang Binggang, He Jingshan, Zeng Ruchuan, *et al.* Microstructures and formation of EBW joint of aluminum alloy LF2 to steel Q235 with transition metal Cu[ J ] . Transaction of the China Welding Institution, 2007, 28(6): 37—41.
- [ 19 ] 刘伟, 陈国庆, 张秉刚, 等. 铜/钛合金电子束焊接工艺优化[ J ] . 焊接学报, 2008, 29(5): 89—93.
- Liu Wei, Chen Guoqing, Zhang Binggang, *et al.* Investigation on process optimization of Cu/Ti electron beam welding[ J ] . Transaction of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 89—93.
- [ 20 ] Yang Shanglei, Xue Xiaohuai, Lou Songnian, *et al.* Electron beam welding of Re and BT5-1 titanium alloy[ J ] . Rare Metals, 2005, 24(3): 293—297.
- [ 21 ] 张秉刚, 陈国庆, 何景山, 等. Ti-43Al-9V-0.3Y/TC4 异种材料电子束焊接(EBW)[ J ] . 焊接学报, 2007, 28(4): 41—45.
- Zhang Binggang, Chen Guoqing, He Jingshan, *et al.* Electron beam welding of dissimilar metal between Ti-43Al-9V-0.3Y and TC4[ J ] . Transaction of the China Welding Institution, 2007, 28(4): 41—45.
- [ 22 ] Zhang Hongtao, He Peng, Feng Jicai, *et al.* Interfacial microstructure and strength of the dissimilar joint Ti3Al/TC4 welded by the electron beam process[ J ] . Materials Science and Engineering A, 2006, 425(1—2): 255—259.
- [ 23 ] Ding J, Wang J N, Hu Z H, *et al.* Joining of gamma-TiAl to low alloy steel by electron beam welding[ J ] . Materials Science and Technology, 2002, 18(8): 908—912.
- [ 24 ] 赵秀娟, 杨德新, 王浩, 等. 硬质合金与碳钢电子束对接焊接头的显微组织[ J ] . 机械工程材料, 2005, 29(5): 21—26.
- Zhao Xiujuan, Yang Dexin, Wang Hao, *et al.* Microstructure of electron beam weld joints between cemented carbide YG30 and carbon steel[ J ] . Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(5): 21—26.
- [ 25 ] Kawamura Y, Kagao S, Ohno Y. Electron beam welding of Zr-based bulk metallic glass to crystalline Zr metal [ J ] . Materials Transactions, 2001, 14(12): 2649—2651.
- [ 26 ] Kim Jonghyun, Kawamura Y. Electron beam welding of the dissimilar Zr-based bulk metallic glass and Ti metal[ J ] . Scripta Materialia, 2007, 56(8): 709—712.
- [ 27 ] Kim Jonghyun, Kawamura Y. Electron beam welding of Zr based BMG/Ni joints: effect of beam irradiation position on mechanical and microstructural properties[ J ] . Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207(1—3): 112—117.

作者简介: 冯吉才, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事新材料及异种材料连接研究. 发表论文 200 余篇.

Email: fengjc@hit.edu.cn

**Abstract:** In order to improve the welding efficiency, triple-electrode high-speed CO<sub>2</sub> fillet welding process was adopted based on the twin-electrode CO<sub>2</sub> welding and the effect of welding conditions on weld geometry parameters was analyzed. The results show that weld geometry parameters are more or less the same by DCEP/DCEN/DCEP and DCEN/DCEP/DCEN polarities. Leg length, penetration and weld width increase with the speed slowdown and welding combination parameters increase, but leg length has a maximum limit. Middle-electrode offset plays an important role in welding geometry parameters and the leg length is the smallest when the electrodes shift from one side to the other side is  $\pm 30\text{mm}$  in this experiments. In addition, the leg length and weld width gradually decrease with increasing the distance of wire to wire.

**Key words:** triple-electrode high speed CO<sub>2</sub> fillet welding; polarities; electrodes shift; weld geometry parameters

#### **Elimination and evaluation of welding residual stress in sterilizers welded by combined process**

ZHANG Yiliang<sup>1</sup>, LIU Jinyan<sup>1</sup>, ZHAO Ebing<sup>2</sup>, XU Xuedong<sup>1</sup>, CHENG Hongwei<sup>2</sup> (1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Chaoyang Special Equipment Inspection Institute of Beijing, Beijing 100021, China). p 97—101

**Abstract:** Observing that cracks appear simultaneously on multi-location near weld on intracavity of domestic vacuum, we investigate a series of studies on welding residual stress and its corresponding elimination methods. We design seven types of combined-structure plates and quantitatively measure the residual stress distribution by X-ray method based on the characteristics of discontinuous welding of different steel in sterilizers. The results show that welding residual stress of all seven types of boards reaches yield stress and causes the stress corrosion and corrosion fatigue which are main reasons of the intracavity cracking of sterilizers. In addition, residual stress resulted from carbon dioxide welding is 10%–22% higher than manual welding, and residual stress is indifferent with rebar type. After experimental verification of post-welding watering quick-cooling technology to eliminate the residual stress, we conclude that watering quick-cooling can effectively reduce the surface residual stress by 50%–70% and increase fatigue limit by 12%–14% on watering surface. Reducing welding residual stress is an important way to solve the problem of cracking in the intracavity of sterilizers.

**Key words:** weld; residual stress; X-ray method; sterilizer; crack

#### **Character analysis of negative polarity weak plasma arc overlaying welding**

LIU Zhengjun, YANG Yang, ZHAO Qian, ZHANG Shixin (School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China). p 102—104

**Abstract:** The essential characteristics of overlaying welding, the influence of the flow and content of protective air on energy density, the arc radial pressure distribution, the heat distribution of plasma arc, the combustion stability and static characteristic of negative

polarity weak plasma arc are analyzed. The results indicate that the arc pressure of negative polarity weak plasma arc is homogeneous, the radial distribution graph of arc voltage, the radial distribution graph of arc current and the distribution area of cathode spot all have saucer shape, the energy of cathode spot takes up 50% than that of the effective energy, 90% of the current distributes in the annular area of internal diameter of 10 mm, and changing the flow capacity of protective air can control energy density. The cathode electrode atomising action of negative polarity weak plasma arc can effectively improve the combine condition of overlaying metal and basal metal, which makes negative polarity weak plasma arc be one of the perfect thermal resource at dissimilar material overlaying welding.

**Key words:** negative polarity; weak plasma arc; arc energy; arc pressure

#### **In-situ detection of weld metal thermal cycle of 10CrMo910 steel**

HU Yanhua, CHEN Furong, XIE Ruijun, LI Haitao (College of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China). p 105—107

**Abstract:** 10CrMo910 steel was welded by using proper parameters for solving the problem of cold crack and local hardening in the weld or adjacent metal weld of 10CrMo910 steel. Thermo-couples were laid in welded seam during welding to record temperatures in situ, and in-situ detection of thermal cycle about weld metal was realized. The detected maximum temperature during thermal process was 1701 °C and above 401 °C than the reported results about heat-affected zone. The welding thermal cycle curves with oil-cooled, air-cooled and sand-cooled for different cooling rates of welded joint were obtained.

**Key words:** weld metal; welding thermal cycle; in-situ detection

#### **Research status analysis of electron beam welding for joining of dissimilar materials**

FENG Jikai, WANG Ting, ZHANG Binggang, CHEN Guoqing (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p 108—112

**Abstract:** Electron beam welding (EBW) in the field of joining dissimilar materials has been a subject of interest in recent years based on special features of EBW, e. g. high energy density, accurately controllable beam size and location, low residual stress and pollution-free weld. Numerous successful results have been achieved, and some of them have already been exploited in industrial production. Since EBW is a fusion welding method, difficulties associated with metallurgical phenomena still exist. This paper is aimed to have an analysis of the research status of electron beam welding for the joining of dissimilar materials. A summary of the existing problems and solutions during electron beam welding of different type of dissimilar material joint has been conducted and the key points of research in future are also proposed.

**Key words:** dissimilar materials; electron beam welding; research status