

# 电子束焊接工件的传导电流特性

周琦<sup>1</sup>, 刘方军<sup>2</sup>, 关桥<sup>2</sup>

(1. 中国兵器科学研究院 宁波分院 浙江 宁波 315103)

2 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

**摘要:** 讨论了电子束焊接过程中电子失去动能的能量转换和电子定向流动的电流传导这两种物理过程, 提出并定义了工件传导电流概念, 设计了专用的多通道电流信号采集系统, 从复杂的电子束焊接动态过程中剥离并定量检测出包涵焊接信息的工件传导电流的动态行为。全面系统地研究了工件传导电流的时域、频域、排序特性、传导比等特性; 发现并证明了传导比可定量地描述焊接动态过程的临界穿透状态; 利用研究获得的传导比均值与输入束流的函数关系建立了可描述电子束焊接过程的动态特性判据。

**关键词:** 电子束焊接; 工件传导电流; 特性; 临界穿透

中图分类号: TG 456.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)11-08-05



周 琦

## 0 序 言

电子束作用金属后将发生非常复杂的微观粒子碰撞等能量交换现象, 当能量密度较大时, 将产生熔化或气化。从束流传输形式看, 形成小孔效应的电子束焊接过程是束流在几种介质的连续传输中能量的耗散过程, 这几种介质包括物质的所有形式: 真空、固态、液态、金属蒸气等离子态<sup>[1~3]</sup>。高速电子与原子核的碰撞是弹性碰撞过程, 电子只是改变运动方向, 不能完成能量转换; 高速电子与原子中电子和晶格中电子的碰撞是非弹性碰撞过程, 是传递能量的主要方式。首先, 这个过程产生了 X 射线和荧光辐射; 其次, 高速原电子损失的能量也激发了次级电子, 其中有弹性散射电子, 损失特征能量的电子, 俄歇电子和能量较低的慢二次电子等<sup>[4~9]</sup>。对于小孔效应过程, 还存在次级电子的二次吸收, 使得其过程更加复杂。

在电子束焊接过程中, 无论工件状态如何, 必将有部分原电子几乎完全失去能量而留在金属内部, 只要金属处于封闭的电路之中, 这些电子必将通过某种介质在电路中流动。其中金属工件既是电子传导介质, 也是封闭电路的一部分。根据 A Sommerfeld 的金属自由电子模型, 在电子束焊接过程中 60 ~ 150 keV 的高能电子, 最后停留在金属内部的电子能量将减小到 10 eV 左右<sup>[6~7]</sup>。

收稿日期: 2005-09-15

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目  
(51461030101HK0101); 宁波市青年博士基金资助项目  
(2004A620002)

试验研究发现, 电子束焊接过程的输入总束流 ( $I_{EB}$ ) 满足以下关系, 即

$$I_{EB} = I_{SC} + I_{PL} + I_{WP} + I_{PE} + I_{other} \quad (1)$$

式中:  $I_{SC}$  是电子束与不完善真空中气体碰撞形成的散射电子;  $I_{PL}$  是带负电的金属等离子喷射溢出后进入非工件的其它导体回路所带走的电子总和, 这部分主要包括二次电子;  $I_{WP}$  是金属工件在电子束焊接回路中所传导的那部分电流, 定义为工件传导电流 ( $I_{WP}$ : beam current through workpiece 简称 BCTW); 如果工件被焊透, 将存在部分穿透束流 ( $I_{PE}$ ); 还可能存在的其它传导途径 ( $I_{other}$ ), 如带负电的金属飞溅物等。在正常焊接条件下, ( $I_{SC} + I_{other}$ ) 占总输入束流的比例很小, 一般可忽略不计; ( $I_{PL} + I_{WP} + I_{PE}$ ) 是电流传导的主要部分; 试验证明, 当工件未穿透时  $I_{PE} = 0$ ,  $I_{PL} + I_{WP}$  占总输入束流的 95% 以上。

以下介绍研究方法和电子束焊接过程的总束流与各分回路电流之间的关系。

## 1 研究方法

试验研究采用的多通道采集等离子喷射电流、工件传导电流和穿透束流的系统电路原理见图 1。电子束作用在工件上完成能量传输的同时, 电子从不同路径传导返回到阳极, 形成多回路电路系统。根据电流在回路中守恒定律, 输入电子束流等于各分回路电流总和<sup>[8]</sup>。隔离法拉第筒采集等离子喷射电流和穿透束流, 再通过导线引出; 工件传导电流的检测过程是将金属工件与工作台绝缘, 再从工件

上直接引出导线。之后各次通过电流传感器流向真空室壁, 再将电流传感器上的电流耦合到电阻上转化为电压信号, 通过 A/D 转换采集卡传输并记录此数据。

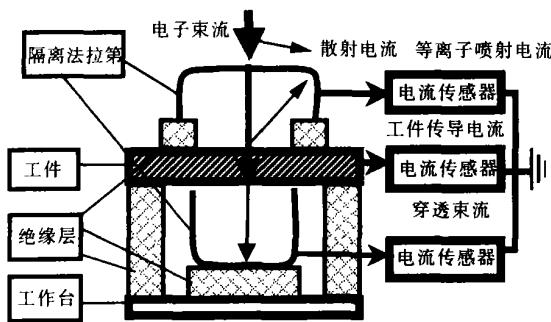


图 1 多通道采集系统电路原理

Fig 1 Circuit theory of multichannel system

## 2 工件传导电流和传导比特性

依据式(1), 仅考虑  $I_{WP}$ 、 $I_{PL}$  和  $I_{PE}$  的关系, 则有

$$I_{EB} = I_{WP} + I_{PL} + I_{PE} \quad (2)$$

当工件未穿透时,  $I_{PE}=0$ ,  $I_{WP}$  和  $I_{PL}$  存在互补特征, 这点可从试验数据得到证实。

### 2.1 工件传导电流的时域特性和频域特性

低碳钢板厚 2~4 mm, 加速电压 140 kV, 焊接速度 3 mm/s, 焊接束流 5.0 mA。在连续穿透焊接过程中被焊熔池及其小孔无明显波动, 图 2a 是焊缝正面外观, 图 2b 是工件传导电流时域图。其时域图表明焊接时信号波动幅度较小且相对均匀, 不同分回

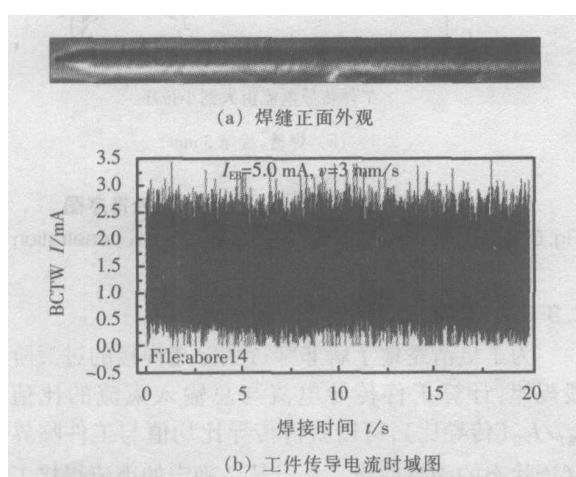


图 2 无明显波动熔池焊缝正面外观和传导电流

Fig 2 Weld top surface and BCTW of molten pool without strong fluctuating cycle

路的电流分配也较稳定。对该时域信号进行快速傅立叶变换可得到频域特性, 在频谱中出现了工频 50 Hz 及其倍频, 说明电源的波动对工件传导电流存在一些影响。由于熔池的流动频率不可能很高, 图 3 将低于 10 Hz 的局部频域显示, 可以看到除直流外没有其它频率的信号存在, 几乎都是噪声。

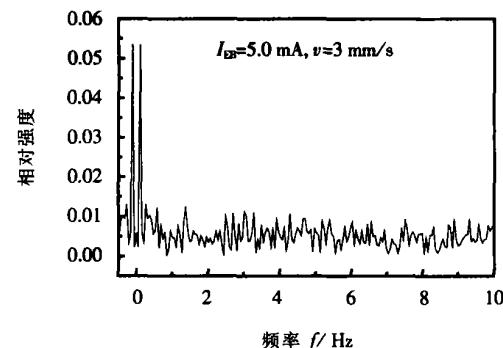


图 3 熔池无明显波动时频率低于 10 Hz 工件传导电流频域图

Fig 3 BCTW frequency domain of molten pool without strong fluctuating cycle under 10 Hz

在图 2 的焊接条件下再增大束流达 6~9 mA, 此时试板被焊漏。图 4a、b 是焊缝正反面外观。从焊缝外观可看到明显的周期波动, 说明熔池处于波动周期中, 存在于熔池之中的小孔波动周期应与熔池同步, 输入束流的电流再分配受到熔池和小孔波动的制约, 采集的工件传导电流信号波动应该反映焊接过程的波动, 图 4c 是所采集的工件传导电流时域图, 正反映了焊接过程的波动。对该时域信号先去直流分量后再进行快速傅立叶变换得到频域特性, 如图 4d 所示是频率低于 10 Hz 的局部频域特性, 波动的主要频率  $f_1=0.32$  Hz 与根据焊接速度和焊缝外观测量尺寸后计算得到的波动频率吻合。从试验结果得到, 电子束焊接过程的工件传导电流周期波动直接反映了熔池和小孔的周期波动。

对比以上稳态和波动焊接过程, 工件传导电流信号的时域和频域特性反映了电子束焊接动态过程的熔池波动特征, 所以工件传导电流包涵了电子束焊接动态过程的某些信息。

### 2.2 工件传导电流排序及排序特性

电子束焊接 20 低碳钢时工件传导电流时域图见图 5 中浅色线, 将该段时域图的工件传导电流实时值按照从大到小的顺序排列, 形成了图 5 中排序图(深色线)。排序的横坐标仅仅是顺序计数轴, 它的数值仍然参照时域图的横坐标标注。排序图反映了某一连续时段传导电流极大值和极小值之间的差值、中间值的分布以及信号波动情况等。

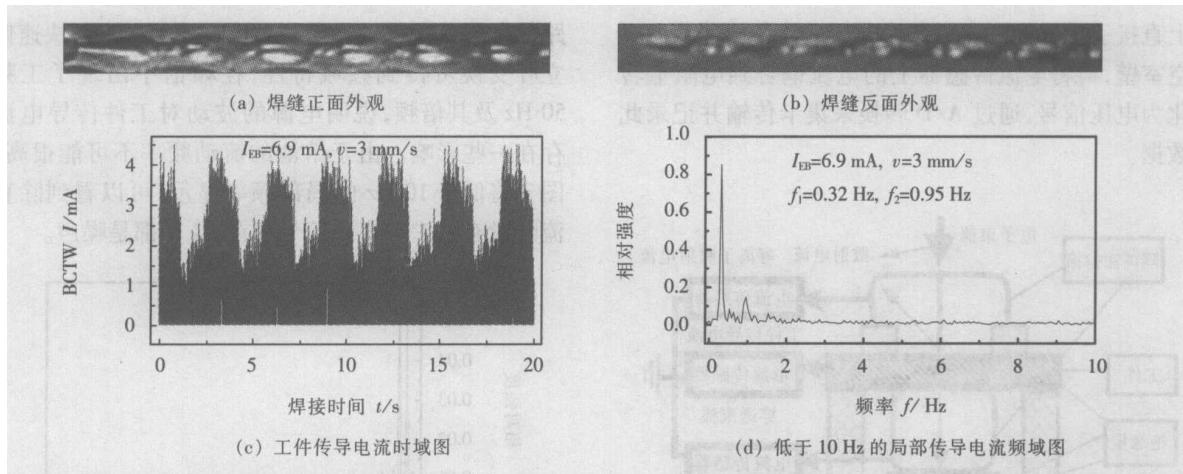


图 4 熔池周期波动的焊缝外观、工件传导电流时域图和局部频域图

Fig. 4 Weld top surface BC TW and part frequency domain of melt pool with strong fluctuating cycle

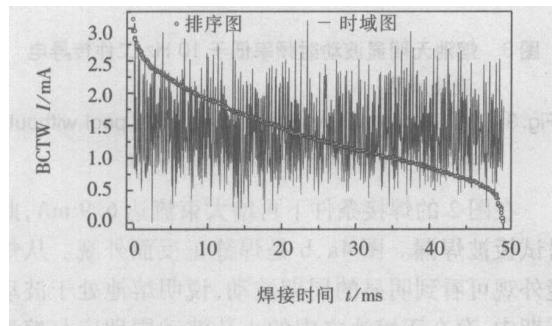
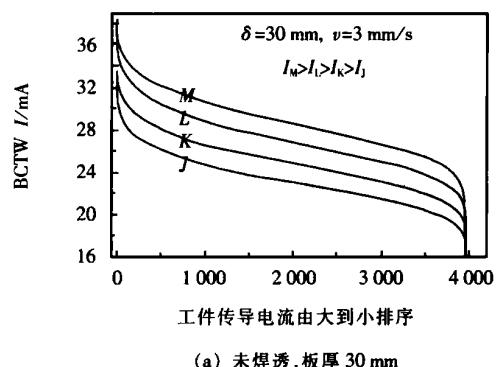


图 5 工件传导电流时域图和排序图

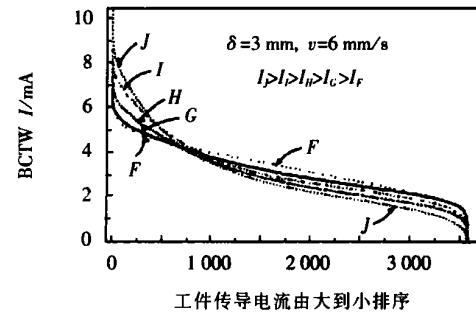
Fig. 5 Time domain and sequence of BCTW

当工件未焊透时,随着束流增加,传导电流排序曲线几乎成平移趋势,工件传导电流差值除很少的最大和最小段外中间的差值基本稳定,图 6a( $J \sim M$  束流依次增大)是焊接束流不同、30 mm 厚低碳钢、未焊透条件下排序图,中间工件传导电流值的分布斜率几乎相等。当工件从非焊透到焊透时,传导电流排序曲线最大与最小差值增大,工件传导电流波动也增大,排序曲线中段斜率增大,下降趋势增大,出现工件传导电流值很小,甚至接近或达到零;在穿透焊下,随着输入束流增大,工件传导电流差值变化增大(最大值接近输入束流而最小值接近零),即工件传导电流波动范围增大,图 6b( $F \sim J$  束流依次增大)是焊接束流不同、3 mm 厚低碳钢、完全焊透条件下工件传导电流排序曲线。这时焊接过程产生了大量的飞溅,熔池稳定性变差甚至不形成熔池。

从工件传导电流的排序特性(曲线的斜率)可以得到熔池的波动剧烈程度、熔深穿透变化等焊接过程的动态特性。



(a) 未焊透,板厚 30 mm



(b) 焊透,板厚 3 mm

图 6 未焊透和焊透条件下工件传导电流排序图

Fig. 6 Sequence of BCTW on partial and full penetration

### 2.3 工件传导电流的传导比特性

为了更清楚地了解非穿透到穿透焊接的过渡阶段规律,计算工件传导电流与总输入束流的比值  $I_{WP}/I_{EB}$ (传导比),可以获得传导比均值与工件临界穿透状态的函数曲线。先以某一确定的束流焊接工件,再不断增大输入束流,直到束流与工件的焊接状态转化成完全穿透焊,甚至切割状态,利用多通道采集系统实时采集工件传导电流,计算求得各次传导

比均值, 最终建立传导比均值与输入束流函数关系, 见图 7。图中左曲线是 3 mm 厚低碳钢试验结果, 右曲线是 7.9 mm 厚低碳钢试验结果, 图中箭头所指为曲线极大值。

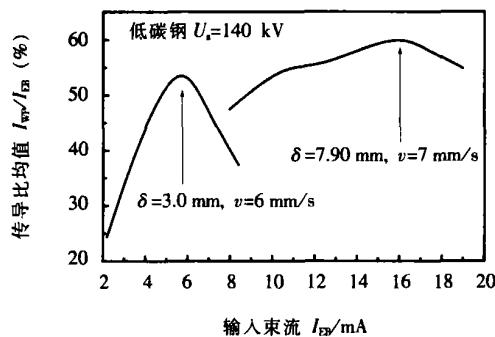


图 7 传导比均值与输入束流函数关系

Fig. 7 Function between average BCTW ratio and EB current

试验发现了传导比均值与输入束流的函数规律, 穿透工件前, 传导比均值基本都与输入束流呈增长趋势, 束流增大到一定程度, 工件被穿透; 在临界穿透附近传导比均值趋于稳定达到一个峰值; 穿透工件后, 传导比均值随束流增大呈下降趋势。传导比均值与输入束流函数曲线存在极值点, 该极值表征了电子束焊接过程临界穿透状态。

#### 2.4 变截面的工件传导电流特征

斜面不锈钢试样的最大板厚 31 mm, 最薄 6 mm, 平面朝上, 见图 8。焊接加速电压 140 kV、束流 24 mA、焊接速度 3 mm/s, 同时采集工件传导电流和穿透电流两路分路电流信号, 对它们的时域图进行 11 点平均滤波处理得到图 9。工件传导电流和穿透电流存在对应关系, 在临界穿透处工件传导电流出现不稳定现象——负脉冲, 之后的稳态切割过程中工件传导电流相对较稳定。

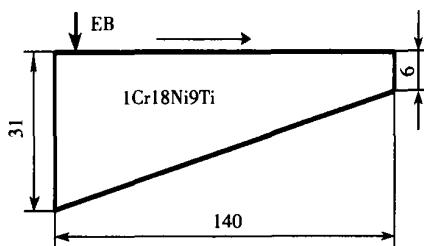


图 8 斜面不锈钢工件示意图

Fig. 8 Stainless steel workpiece of inclined back

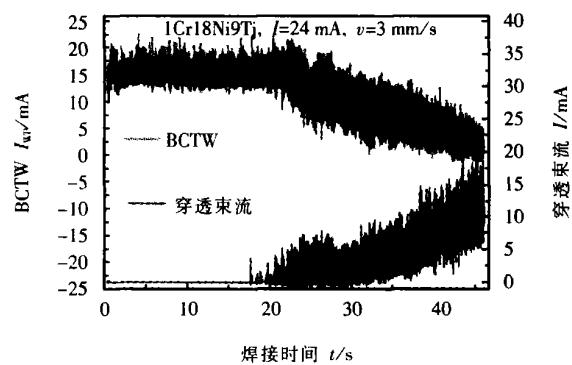


图 9 斜面工件两分路时域平均滤波图

Fig. 9 Tw in filtering wave curves of time domain about BCTW and penetration current

通过观测和研究工件传导电流信号的时域图和频域图, 发现该信号实时反映了电子束焊接动态过程的某些特征, 这些特征可以表征电子束焊接过程产生的一些现象。工件传导电流可以表征稳定焊接过程中没有特征波动的熔池、非稳定焊接过程中非周期波动熔池和周期波动熔池的状态; 它的传导比可以表征焊接过程的临界穿透状态等。通过对工件传导电流现象和特性的研究, 认识工件传导电流信号与熔池动态行为之间的某些内在关系, 这些关系为进一步开发电子束焊接过程的监测或控制系统提供了技术基础。

### 3 结 论

(1) 在分析电子束焊接过程中各分回路电流传导的基础上, 提出并定义了电子束焊接过程的工件传导电流概念。利用设计的多通道电流采集系统, 较系统地研究了低碳钢工件传导电流的时域和频域特性、排序特性、传导比特性等, 证实了工件传导电流是一支包涵电子束焊接动态信息的信号。

(2) 试验发现并证明了传导比均值可定量描述电子束焊接过程的临界穿透状态, 利用传导比均值与输入束流的函数关系建立了描述电子束焊接过程的动态特性判据。

(3) 工件传导电流信号反映了电子束焊接过程的熔池稳定性、临界穿透状态, 这些研究的发现为进一步开发电子束焊接过程的监测或控制系统提供了基础。

### 参考文献:

- [1] 米勒 R B. 强流带电粒子束物理学导论 [M]. 刘锡三, 张兰芝译. 北京: 原子能出版社, 1990. 329–330.

- [ 2 ] 劳逊 J.D. 带电粒子束物理学 [M]. 施仕潮, 钱锦昌, 刘兰芬, 译. 北京: 原子能出版社, 1988. 272 - 282.
- [ 3 ] 唐天同, 刘纯亮. 电子束与离子束物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 95 - 150.
- [ 4 ] 朱唯干, Chu W K, MayerNicolet 著. 背散射分析技术 [M]. 邹世昌, 林成鲁, 译. 北京: 原子能出版社, 1986. 25 - 30.
- [ 5 ] 朱祖福, 沈锦德, 许志义, 等. 电子显微镜 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984. 15 - 28.
- [ 6 ] 德克尔 A J 固体物理学 [M]. 高联佩 译. 北京: 科学出版社, 1965. 115 - 120.
- [ 7 ] 刘大璋. 固态物理电子学 [M]. 香港: 新兴图书公司出版. 台票 1979. 80 - 90.
- [ 8 ] 徐淑华, 宫淑贞. 电工电子技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 50 - 55

---

**作者简介:** 周 琦, 1967年9月出生, 工学博士, 高级工程师。主要从事电子束焊接及表面改性, 单、双丝熔化极氩弧焊等研究工作。获国家专利2项, 省部级成果奖1项, 发表论文24篇。

E-mail cheezhou@yahoo.com.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

**Characteristic and recognition of ultrasonic TOFD signal and image for planar defect** CHI Da-zhao, GANG Tie, YUAN Yuan, LV Pin  
 (State Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p1 - 4

**Abstract:** Considering several typical planar defects that were common flaws in thick aluminum weld, the characteristics of Ultrasonic TOFD (time of flight diffraction) was studied. Ultrasonic TOFD A-scan signal and B, D-scan image were analyzed and interpreted. Linearization was introduced in processing B and D-scan image. The results show that planar defect can be effectively recognized, located and sized by the characteristics of the received signal and image. Linearization effectively improves time resolution of the received images, which makes the characteristics of the defect more markedly and leads to more accurate quantitative measurement.

**Key words:** ultrasonic TOFD; characteristic and recognition; planar defect; linearization

**Joining of TiAl intermetallic by self-propagating high-temperature synthesis** CAO Jian, FENG Ji-cai, LI Zhuo-ran ( State Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p5 - 7

**Abstract:** A novel approach for joining TiAl by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) was studied in the study. The Ti, Al and C powders with large exothermic enthalpy and the assisted electromagnetic field were applied in the joining processing. The typical joint was composed of three reaction zones. Adjacent to the TiAl base metal, a dark TiAl<sub>3</sub> reaction layer was observed on the interface. The TiC particles and Ti-Al compounds were found in the interlayer. It was also noted that in every condition the porosity could not be avoid due to the differences in specific volume between products and reactants, the evaporation of impurities, and the expansion of the gas trapped in the porosity of the reactant compact. In order to solve these problem, Ag-Cu brazing foils were placed between the powder compacts and the TiAl substrate. It was considered that molten Ag-Cu in the filler during SHS reaction improved the wettability of interlayer to TiAl substrate and filled well into the holes in the reaction products of the interlayer. In this way, the density could be increased and the joint quality could be improved.

**Key words:** TiAl alloys; self-propagating high-temperature synthesis (SHS); joining; microstructure

**Study of the BCTW's phenomenon and characteristics in EBW**

ZHOU Qi<sup>1</sup>, LIU Fang-jun<sup>2</sup>, GUAN Qiao<sup>2</sup> (1. Ningbo Sub-academy of the National Weapons Science Research Academy, Ningbo 315103, Zhejiang, China; 2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 3. Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China). p8 - 12

**Abstract:** Two physical processes of the energy conversion and the current conduction were analyzed in the dynamic process of EBW. According to the characteristics of EBW process, the beam current through workpiece during EBW process was studied using the special multichannel device to collect current signal. The characteristics of the time domain, frequency domain, sequencing, conducting ratio of BCTW were investigated by experiment. The function between average ratio of BCTW and input electron beam was recognized and peak value of the function was the turning point of the critical penetration state in the dynamic process of EBW.

**Key words:** electron beam welding; beam current through workpiece; characteristic; critical penetrating

**Protection of polymer matrix composite material with ceramic coatings** GUO Mian-huan, LIU Ai-guo, GAO Jia-shuang, ZHAO Min-hai (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p13 - 16

**Abstract:** The bond coating of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> light ceramic were sprayed on the carbon fiber reinforced polyimide composite substrate with Al powder sprayed by plasma spraying. And the adhesive strength, thermal cycling resistance, erosion resistance, and heat insulation of the bond coatings were tested. The results showed that, coatings with plasma spray Al bonding layer are better than those with arc spraying Al or Zn bonding layer. Erosion losses of the sample with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating are less than 1/3 of that of the PMC substrate. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> coatings can provide effective erosion- and thermal-resistance for the PMC substrate, and the thermal-resistance of the ZrO<sub>2</sub> coating is better than that of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating.