

# 微弧氧化电源特性和参数对膜层性能及电能消耗的影响

Effects of Characteristic and Parameters of Power Supply on Micro-arc Oxidation Coatings Property and Energy Consumption

杨 威, 赵玉峰, 杨世彦

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001)

YANG Wei, ZHAO Yu-feng, YANG Shi-yan

(Department of Electrical Engineering, Harbin

Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘要:** 随着微弧氧化技术及其工业应用的发展, 作为关键设备的电源对微弧氧化的影响得到了广泛的关注。综述了电源特性和参数对膜层性能以及工艺能耗影响方面的研究, 总结了电源工作模式和电流密度、电压、频率等电参数对膜层相组成、表面形态、耐蚀性等性能以及工艺能耗的影响规律, 指出电源特性和参数的影响本质上是电源脉冲能量的影响, 能精确控制脉冲能量的电源是今后的发展方向。

**关键词:** 微弧氧化; 电源; 电参数; 膜层性能; 能耗

中图分类号: TG 178 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010) 02-0086-05

**Abstract:** Power supply is one of the key equipments of micro-arc oxidation(MAO) treatment, and it has important influence on MAO. This paper reviewed the effects of characteristic and parameters of power supply, such as controlling modes, current density, voltage, frequency and so on, on the property of MAO coatings, such as phase composition, surface morphology, and corrosion resistance and so on. In addition, the influences of power supply on the energy consumption of MAO treatment were summarized. It was revealed that the effects of characteristic and parameters of power supply are essentially the effects of discharging energy of a single pulse. The power supply which could accurately regulate pulse energy will be the research emphasis.

**Key words:** micro-arc oxidation; power supply; electrical parameter; coatings property; energy consumption

微弧氧化是一种极具发展前景的金属表面改性新技术, 其利用微弧放电的瞬间高温烧结和电解液的冷淬, 在电化学和等离子体化学的作用下, 可直接在工件表面原位生成与基体紧密结合的陶瓷相氧化膜层。微弧氧化膜层致密性好、结合力强, 具有优良的耐磨、耐热、耐蚀及绝缘性能, 因此得到了广泛的关注, 微弧氧化的应用研究也取得了较大的进展<sup>[1, 2]</sup>。

膜层性能一直是微弧氧化应用研究的重点。随着微弧氧化技术工业应用的发展, 工艺能耗过大特别是微弧氧化电源能耗过大的问题日益突出, 降低微弧氧化电能消耗也成为了研究的重要方向。微弧氧化膜层性能和电能消耗受金属基体、电解液体系及组分和电参数等诸多因素的综合影响。铝、镁、钛及其合金在微弧氧化过程中差异很大, 而电解液的体系、组分、浓度、

电导率、酸碱度、温度等都对膜层质量、能量消耗有显著影响<sup>[3-5]</sup>。作为微弧氧化工艺的关键设备, 电源的特性和参数直接影响到膜层的性能, 通过研究, 人们得出了电压、电流密度、脉冲频率、极性和占空比等电参数对膜层微观组织结构、组成元素成分、生长速率、表面形貌以及厚度、粗糙度、耐蚀性、耐磨性等性能的影响规律<sup>[6-9]</sup>。相关研究表明, 电源的拓扑结构、控制方式、脉冲形式等特性对微弧氧化工艺能耗有重要影响<sup>[10-12]</sup>。

为了进一步改善微弧氧化膜层性能, 降低工艺能耗、提高处理效率, 人们对电解液和电参数进行了不断的优化<sup>[13, 14]</sup>。电源是微弧氧化工艺中可以灵活控制的系统环节, 改进电源的特性、优化电源的电参数是以最小能耗获得最佳性能的重要途径。

## 1 电源特性和电参数对膜层性能的影响

### 1.1 脉冲形式

微弧氧化电源的输出脉冲形式对膜层性能有重要的影响。文献[10]对正向正弦波、正向矩形波脉冲和正负矩形波脉冲三种脉冲形式的作用进行了比较,文献[11]则比较了恒定电流、单向脉冲和正负向脉冲的影响,结果都表明采用正负双向脉冲,生成的膜层致密度高、硬度高、耐磨耐蚀性能更好。负脉冲对膜层突出的尖端部分有溶解作用,使膜层厚度减小,但负脉冲作用时可以使阴离子扩散到阳极附近,使正脉冲作用时氧化反应更加充分,因此,虽然膜层厚度减小,但膜层变得光滑、平整,粗糙度降低,耐蚀度提高,而且负脉冲个数越多,膜层厚度越薄,表面粗糙度越低<sup>[15]</sup>。正、负脉冲的电流密度比值也是影响膜层性能的重要因素,当该值增加时,膜层的显微硬度、耐蚀性呈先增大后减小的趋势,因而存在一个最优的电流密度比<sup>[16]</sup>。

### 1.2 电流密度

一般认为,电流密度是微弧氧化过程中最基本也是最重要的电参数,它是决定氧化过程能否进行的重要指标,是影响膜层性能和质量的决定性因素。钛、镁、铝合金在微弧氧化过程中,相组成都随电流密度变化而变化<sup>[17,18]</sup>,一般随着电流密度增大,晶化程度不断提高。随着电流密度的增大,微弧放电能量增大,熔融物增多,放电微孔孔径增大,因此氧化膜层生长速率增大,膜层厚度随之增加,但粗糙度增大。氧化膜层都是致密层、疏松层双层结构,而膜层的性能主要取决于致密层。随电流密度的增大,致密层的生长速率增大,但电流密度有一极值,当超过此值时致密层生长速率减小,相应地膜层中致密层比例缩小<sup>[17]</sup>。同样,膜层的耐蚀性、硬度也有随电流密度升高而呈现先增大后减小的趋势<sup>[19,20]</sup>。可以看出,对膜层性能而言,存在着最佳电流密度,比较发现,利用不同的金属基体、不同的电解液体系,最佳电流密度值也存在差异<sup>[19,21]</sup>。

### 1.3 电压

在微弧氧化工艺中,电源必须提供足够高的电压,使工作电压突破法拉第区,以保证对膜层薄弱部位的击穿,进而产生微弧放电现象,因此所加的处理电压超过氧化膜的临界电击穿电压是氧化过程得以进行的必要条件。采用不同的基体材料、不同的电解液体系,起弧电压差别较大,加工钛时起弧电压比加工镁时要高百伏左右;电解液电导率越高,起弧电压越低<sup>[4]</sup>。当电压低于起弧电压时,膜层实际是一层钝化膜,膜层表面呈半透明状;当电压高于起弧电压时,则出现微弧放电,在膜层表面形成大量相对均匀的微孔,内部形成一

层与基体紧密结合的致密氧化膜;而当电压过高时,形成的微弧氧化膜层结构比较疏松<sup>[22]</sup>。

电压对铝、镁、钛的影响大致相同<sup>[23,24]</sup>,随着电压的升高,膜层的厚度增加,显微硬度有所增加,弹性模量、结合强度也随之升高。当电压升高到一定程度时,进入弧光放电阶段,膜层微观组织结构发生变化,表面微孔孔径增大,凹凸起伏变得明显,微孔密度减小。这时,虽然膜层厚度进一步增加,但膜层比较疏松,粗糙度增大,耐蚀性、显微硬度都有所降低,因此存在着最佳电压值使膜层性能达到最优。另外,脉冲平均电压以及脉冲峰值电压都对膜层相组成有显著的影响<sup>[25]</sup>。

### 1.4 频率

目前的微弧氧化电源多采用脉冲电源,脉冲频率对膜层相组成、膜层微观组织结构以及膜层性能有较大影响。在固定占空比的条件下,改变频率实际上是改变单个脉冲的作用时间。当频率较低时,脉冲作用时间长,微弧放电的持续时间相应也长,单脉冲放电能量大<sup>[8]</sup>,导致膜层表面微孔尺寸增大,致密层比例降低,因而表面粗糙度增加,结合强度降低;当频率较高时,由于放电时间短、放电次数多,所以微孔孔径减小、密度增加,粗糙度相应降低。在频率较低时,随着频率的增加,放电次数增多,膜层生长速率增大,当频率增大到一定值时,虽然放电次数增多,但单脉冲放电时间缩短,放电能量减小,过短的反应时间影响了反应的充分性<sup>[26]</sup>,因而膜层生长速率开始下降。当脉冲频率大于4kHz时,其生长速率几乎与频率无关<sup>[8]</sup>。虽然随频率的升高,膜层总厚度降低,但膜层中致密层所占比例是逐渐上升的<sup>[21]</sup>。对于纯钛、铝合金,改变频率可以调整某些氧化物在膜层中的含量,从而可以改善膜层性能<sup>[8,21]</sup>。

### 1.5 占空比

微弧氧化脉冲电源的占空比是影响基体表面放电特征的重要因素。在保持脉冲频率一定的情况下,脉冲占空比决定了单脉冲的放电时间。在恒压方式下,随着占空比增大,脉冲放电强度增加,生长速率变快,反应更剧烈,微孔孔径增大,膜层表面粗糙度增加。特别是在高频的情况下,占空比的影响更加显著。在恒流方式下,由于电流密度维持不变,虽然占空比增大,增加了脉冲放电时间,但是电压却降低了,最终氧化膜的生长速率几乎不变,相同时间内制备的氧化膜厚度差异不大<sup>[27]</sup>。当占空比过大时,膜层增长速度反而变慢,而且由于单脉冲能量过大易出现膜层的飞溅和烧蚀现象。文献[27]认为在恒压方式下通过改变占空比控制氧化膜的形成更为有效,但文献[9]认为,采用恒流氧化方式,涂层的生长速率比恒压方式明显增加,如

果对脉冲占空比进行分级式调节可以进一步改善涂层的表面结构。实验表明, 存在最优的占空比, 使膜层性能最优<sup>[9]</sup>。另外, 对于钛、铝等合金, 随占空比的改变, 其膜层相组成变化较大<sup>[9]</sup>。

### 1.6 脉冲能量

电流密度、电压、频率、占空比等电参数都会影响膜层的相组成和表面形态, 进而影响膜层性能。从研究结果中可以发现, 这些电参数的影响规律有类似之处, 针对不同的基体和电解液, 在其他电参数不变的情况下, 总是存在着一个最优的电参数能使膜层性能达到最佳。

实质上, 电源的电参数对膜层的影响就是脉冲能量对膜层的影响。电源的各个电参数都可以归结为脉冲能量的作用, 微弧放电的火花就是脉冲能量的直接外在表现, 陶瓷膜层就是这种能量的作用结果<sup>[28, 29]</sup>。电压越高, 单个脉冲能量越大; 改变频率或占空比, 脉冲作用时间改变, 从而改变单个脉冲的能量; 而电流密度则是脉冲能量在宏观上的表征。因此改变这些电参数实质上都是对脉冲能量的改变, 所以它们的影响规律实际上也都是相似的, 也就是说存在着一个最优的脉冲能量能使膜层性能达到最佳。而脉冲能量是由这些电参数共同作用、共同影响的结果, 因此必须对多个电参数进行优化才能找到最优的脉冲能量。

电源的控制方式决定了脉冲能量的施加方式, 因此间接地影响了膜层的性能。文献[12]分析了恒压方式和恒流方式下不同的能量规律, 发现在能量相同的情况下, 膜层表面特征是相似的, 但是采用恒流方式时终止电压更高。在氧化过程中, 阶段性较强, 因此分阶段控制脉冲能量效果更好。文献[30]的分析表明, 采用恒流微弧氧化方式, 并采用分级式控制参数, 对不同生长阶段的能量参数进行调整, 可以提高膜层性能。在氧化后期提高电源频率的同时, 适当降低占空比, 可以获得质量好且厚度大的膜层。

## 2 电源特性和电参数对工艺能耗的影响

微弧氧化工艺能耗较高, 严重制约了该技术的大规模工业化应用, 成为发展的主要障碍。高能耗主要表现在微弧氧化电源的电能利用率低, 纯铝及 LC4 硬铝合金在微弧氧化过程中总电流效率只有 10% ~ 30%<sup>[31]</sup>, 大量电能转化为热能, 浪费在溶液升温中, 而为保证电解液的稳定, 要使用冷却设备及时降温, 又要消耗相当部分的电能<sup>[14]</sup>。另外, 微弧氧化的处理效率较低, 一般电流密度为 5~40 A/dm<sup>2</sup>, 因此处理大面积工件比较困难。为了促进微弧氧化的工业化应用, 低

能耗、高处理效率的氧化技术已经成为目前研究的重点。除了通过调整电解液、优化添加剂等方法外, 调节电源特性和电参数也是重要的方法, 而且由于电源的各个特性参数大多能独立调节, 因此相对于电解液而言调节电源的特性和参数来降低能耗更为方便。

### 2.1 电流密度

文献[32]给出了单位能耗的定义, 并采用双极脉冲电源, 研究了在恒流方式下电流密度对单位能耗的影响。随电流密度增大, 单位能耗先减小后增大。在电流密度较小时, 随电流密度增大, 膜层成膜速率的增幅大于脉冲电压的增幅, 因而单位能耗下降, 随电流密度进一步增大, 膜层成膜速率的增幅开始小于脉冲电压的增幅, 导致单位能耗上升。过大的电流密度不但会带来较大的单位能耗, 而且这些过多的能量还容易导致膜层的烧蚀。

### 2.2 频率

频率对单位能耗也有相似的影响, 随频率的升高, 单位能耗先减小后增大。频率较低时, 脉冲作用时间长, 由于易出现弧光放电现象, 相当部分能量会损失在发光发热上, 所以单位能耗较大。随着频率增大, 脉冲作用时间变短, 微弧放电次数增多, 膜层成膜速率增大, 从而使单位能耗减小。当频率进一步增大时, 过短的脉冲时间影响了反应充分性, 膜层成膜速率随之降低, 导致单位能耗增大<sup>[26]</sup>。

### 2.3 控制方式

从调节电源工作模式入手来降低能耗是一个重要的研究方向。文献[14]指出微弧氧化工艺能耗较高的原因, 是过多的电能转化为热能而散失掉, 通过改进电源放电模式, 采用纯方波窄脉冲直流脉冲电源可以提高能量利用率。文献[33]提出了微弧氧化瞬间能量的递增和递减速率理论, 并以此为依据设计电源, 使单位面积加工的电流密度大幅度降低, 从而使工艺能耗降低, 目前已应用于大面积工件加工中。铝、钛及其合金在微弧氧化过程都呈现出明显的阶段性, 各阶段膜层生长规律不同, 表现出的电学特性也不相同<sup>[34]</sup>, 因此人们提出分阶段提供能量的方法, 即根据不同生长阶段所需的能量大小, 对电参数进行阶梯式控制, 尽量延长膜层的均匀生长阶段, 减少不必要的能量损失<sup>[35]</sup>。另外, 临界起弧电流密度和起弧电压是控制膜层进入均匀生长阶段的关键因素, 因此对能耗也有一定的影响<sup>[13, 36]</sup>。

### 2.4 脉冲能量

针对能量消耗, 对电源特性和参数进行优化实质上就是对脉冲能量的优化。如果脉冲能量过小, 膜层的生长会受到阻碍, 而脉冲能量过大, 会造成能量的损

失而且膜层易被破坏。微弧氧化过程各阶段膜层变化显著,所需能量也是变化的,所以电源所施加的脉冲能量要根据氧化阶段的不同做出调整,以满足膜层生长的需要。如果微弧氧化电源具有精确控制脉冲能量的能力,能根据氧化不同阶段的不同特性,发出适当能量的脉冲来适应负载的需要,那么就能有效地提高脉冲能量的利用率,从而降低微弧氧化工艺的能耗。微弧氧化系统是完整的电加工系统,对于微弧氧化电源而言,系统的其他部分就是它的负载,若要对电源特性和参数进行优化,必须掌握其负载特性。虽然关于负载的静态特性和简化模型的研究取得了一定的进展<sup>[37]</sup>,但由于微弧氧化过程比较复杂,目前还无法获得比较完善的负载动态模型,因此关于能量脉冲的作用机理和作用效能的研究进展缓慢。

### 3 结束语

电源是微弧氧化工艺的关键设备,电源的特性和参数对氧化膜层的相组成、厚度、表面形态以及耐蚀性、耐磨性等性能有重要的影响,同时也是影响工艺能耗的关键因素。电源的特性和参数的影响实质上就是电源脉冲能量的影响,合适的脉冲能量不仅能有效地提高膜层性能,还能有效地降低工艺能耗。对电源的特性和参数的优化实质上是对脉冲能量的优化,能精确控制脉冲能量来适应负载需要的微弧氧化电源是未来的研究重点。

#### 参考文献

- [1] 王德云,东青,陈传忠,等.微弧氧化技术的研究进展[J].硅酸盐学报,2005,33(09):1133-1138.
- [2] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A, et al. Plasma electrolysis for surface engineering[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122(2-3): 73-93.
- [3] HUANG P, XU K, HAN Y. Study of the elastic modulus of the micro-arc oxidation layer in different electrolytes[J]. Journal of Advanced Materials, 2007, 39(2): 37-40.
- [4] 蒋百灵,张先锋.不同电导率溶液中镁合金微弧氧化陶瓷层的生长规律及耐蚀性[J].稀有金属材料与工程,2005,34(3):393-396.
- [5] 张岱岚,白新德,李洪义,等.电解液参数对铝合金微弧氧化膜层结构和性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2007,36(8):1447-1451.
- [6] YEROKHIN A L, SHATROV A, SAMSONOV V, et al. Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process[J]. Surface and Coating Technology, 2005, 199(2-3): 150-157.
- [7] JIN F Y, CHU P K, XU G D, et al. Structure and mechanical properties of magnesium alloy treated by micro-arc discharge oxidation using direct current and high-frequency bipolar pulsing modes[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435: 123-126.
- [8] 李全军,吴汉华,汪剑波,等.脉冲频率对纯钛微弧氧化膜生长特性的影响[J].无机材料学报,2006,21(2):488-492.
- [9] 王亚明,雷廷权,蒋百灵,等.交流窄脉冲占空比调制对钛合金微弧氧化陶瓷涂层的影响[J].稀有金属材料与工程,2005,34(2):329-333.
- [10] 白基成,郭永丰,李立青,等.双极性微弧氧化脉冲电源加工LY12铝合金工艺试验研究[J].中国机械工程,2008,19(11):1274-1277.
- [11] 张荣发,单大勇,韩恩厚,等.电流模式对镁合金微弧氧化膜性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2006,35(9):1392-1395.
- [12] 陈柳珠,李卫.钛表面恒流微弧氧化及其能量规律[J].稀有金属材料与工程,2008,37(4):682-685.
- [13] 钟涛生,蒋百灵,李均明.铝合金微弧氧化电流密度的临界条件研究[J].材料保护,2005,38(8):16-18.
- [14] 严志军,朱新河,程东,等.低能耗铝合金表面微弧氧化工艺研究[A].第六届全国表面工程学术会议论文集[C].兰州:中国机械工程学会,2006.972-977.
- [15] 陈宏,冯忠绪,郝建民,等.负脉冲对铝合金微弧氧化的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(1):96-98.
- [16] 吴汉华,汪剑波,龙北玉,等.电流密度对铝合金微弧氧化膜物理化学特性的影响[J].物理学报,2005,54(12):5743-5749.
- [17] 谢发勤,陈仲昌,胡宗纯,等.电流密度对Ti6Al4V微弧氧化膜形貌和性能的影响[J].电镀与环保,2007,27(3):31-34.
- [18] 王乃丹,龙北玉,吴汉华,等.单极性脉冲电流密度对铝合金MAO膜相结构和微结构的影响[J].吉林大学学报(理学版),2005,43(5):645-649.
- [19] 郭洪飞,安茂忠,徐莘,等.电流密度对镁合金微弧氧化过程及氧化陶瓷膜性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2005,34(10):1554-1557.
- [20] YANG G L, LU X Y, BAI Y Z, et al. The effects of current density on the phase composition and microstructure properties of micro-arc oxidation coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 345(1-2): 196-200.
- [21] 辛铁柱,赵万生,刘晋春.电源参数对铝合金表面微弧氧化陶瓷膜的影响研究[A].第11届全国特种加工学术会议专辑[C].重庆:中国机械工程学会,2005.486-489.
- [22] 王燕华,王佳,张际标.镁合金微弧氧化过程中不同电压下获得膜层的性能研究[J].中国腐蚀与防护学报,2005,25(5):267-270.
- [23] WEI D Q, ZHOU Y, JIA D C, et al. Influence of applied voltage on the structure of micro-plasma oxidized titanium-based coatings formed in an electrolyte containing nano-HA and calcium salts and phosphate[J]. Key Engineering Materials, 2008, 368-372: 1209-1211.
- [24] 刘荣明,郭锋,李鹏飞.电压对铝合金微弧氧化陶瓷层形成的影响[J].材料热处理学报,2008,29(1):137-140.
- [25] 朱瑞富,王志刚,肖桂勇,等.电极电压对纯钛表面微弧氧化陶瓷膜结构及特性的影响[J].硅酸盐学报,2008,36(5):631-635.
- [26] 张以忱,徐辉,杨英福.铝合金表面微弧氧化脉冲频率优化研究[A].第八届全国真空冶金与表面工程学术会议[C].沈阳:中国真空学会,2007.33-40.
- [27] 胡宗纯,谢发勤,吴向清.不同控制方式下占空比对钛合金微

- 弧氧化膜的影响[J]. 电镀与环保, 2006, 26(5): 23–25.
- [28] 王燕华, 王佳, 张际标. AZ91D 镁合金微弧氧化过程中的火花放电现象研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 267–271.
- [29] YEROKHIN A L, SNIZHKO L O, GUREVINA N L, et al. Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(17): 2110–2120.
- [30] 张先锋, 蒋百灵. 能量参数对镁合金微弧氧化陶瓷层耐蚀性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(3): 141–143.
- [31] 薛文斌, 邓志威, 来永春, 等. 铝微弧氧化电流效率的测定[J]. 电镀与精饰, 1998, 20(3): 1–4.
- [32] 张以忱, 徐辉, 董连俊. 微弧氧化过程中电流密度对膜层性能的影响[A]. 第八届全国真空冶金与表面工程学术会议[C]. 沈阳: 中国真空学会, 2007. 246–251.
- [33] 蒋百灵, 李均明, 时惠英, 等. 微弧氧化技术在镁合金防护处理中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2003, (5): 24–27.
- [34] 吴汉华, 龙北红, 龙北玉, 等. 钛合金微弧氧化过程中电学参量

的特性研究[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6537–6542.

- [35] 李文芳, 黄京浩, 张永君, 等. 镁合金微弧氧化过程中参数对成膜效果的影响和优化[J]. 材料工程, 2006, (2): 51–55.
- [36] 严志军, 朱新河, 程东, 等. 影响铝合金微弧氧化起弧电压的因素[J]. 金属热处理, 2007, 32(11): 81–83.
- [37] YAO Z P, JIANG Z H, XIN S G, et al. Electrochemical impedance spectroscopy of ceramic coatings on Ti-6Al-4V by micro-plasma oxidation[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(16–17): 3273–3279.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977018)

收稿日期: 2009-01-06; 修订日期: 2009-08-07

作者简介: 杨威(1978–), 男, 博士研究生, 从事大功率特种电源研究工作, 联系地址: 哈尔滨市西大直街 92 号哈尔滨工业大学 403 信箱(150001), E-mail: yangv@hit.edu.cn

(上接第 80 页)

## 4 结论

(1) 通过自制电磁场辅助钎焊装置对铝基复合材料进行了成功连接, 在适当电磁场参数的复合作用下(磁场强度皆为 0.5T, 交变电流频率为 100Hz, 电流峰值为 70A), SiC 强化颗粒的行为得到了有效的控制, 避免了 SiC 强化相颗粒在界面处的偏聚行为, 获得了 SiC 强化相颗粒在钎缝中均匀分布铝基复合材料钎焊接头。

(2) 电磁力随电流峰值的增加而不断增加, 使得钎缝内部的 SiC 强化相得到了更大的移动速度, 从而使得更多的强化相脱离凝固界面, 钎缝内部强化相分布更加趋于均匀、钎缝变得更加致密。

### 参考文献

- [1] 郝斌, 段先进, 崔华, 等. 金属基复合材料的发展现状 & 展望[J]. 材料导报, 2005, 19(7): 64–68.
- [2] 于治水, 李瑞峰, 祁凯. 金属基复合材料连接方法研究综述[J]. 热加工工艺, 2006, 35(7): 44–48.
- [3] 王少刚, 徐九华, 姜澄宇. 铝基复合材料焊接中的若干技术问题[J]. 宇航材料工艺, 2006, (4): 1–6.
- [4] 陈章兰, 高向东, 陈永平, 等. 铝基复合材料连接技术研究现状及展望[J]. 焊接技术, 2005, 34(5): 6–8.
- [5] 许志武, 吕世雄, 闫久春, 等. 非连续增强铝基复合材料固相焊接研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(5): 593–598.
- [6] 王强, 王春江, 庞雪君, 等. 利用强磁场控制过共晶铝硅合金的凝固组织[J]. 材料研究学报, 2004, 18(6): 568–576.
- [7] 王俊, 孙宝德, 疏达, 等. 材料研究中的电脉冲技术[J]. 材料导报, 1999, 13(2): 19–21.

- [8] HANS C. Influence of an electric or magnetic field on the liquid-solid transformation in materials and on the microstructure of the solid[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287(2): 205–212.
- [9] 李克, 孙宝德, 李天晓, 等. 利用高频磁场分离 Al 熔体中的非金属夹杂[J]. 金属学报, 2001, 37(4): 405–410.
- [10] SHU Da, SUN Bao-de, LI Ke, et al. Particle trajectories in aluminium melt flowing in a square channel under an alternating magnetic field generated by a solenoid[J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 1385–1390.
- [11] ZHONG Y B, REN Z M, DENG K. Theoretical analysis to the inclusion-removal efficiency of purifying liquid metal contained in triangle and rectangular pipe by traveling magnetic field[J]. Acta Metall Sin, 1999, 35: 503–508.
- [12] 钟云波, 任忠鸣, 孙秋霞, 等. 电磁场中金属凝固界面前沿颗粒的排斥/吞没行为[J]. 金属学报, 2003, 39(12): 1269–1275.
- [13] 孙秋霞, 钟云波, 任忠鸣, 等. 电磁场对金属凝固界面前沿颗粒行为及分布的影响[J]. 金属学报, 2005, 41(3): 321–325.
- [14] UHLMANN D R, CHALMERS B, JACKSON K A. Interaction between particles and a solid-liquid interface[J]. J Appl Phys, 1964, 35: 2986–2993.
- [15] SHANGGUAN D, AHUJA S, STEFANESCU D M. An analytical model for the interaction between an insoluble particle and an advancing solid/liquid interface[J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23A: 669–680.

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(50875160); 上海市教委重点学科资助项目(J51402); 上海市科委攻关资助项目(071005120)

收稿日期: 2008-12-18; 修订日期: 2009-08-25

作者简介: 于治水(1960–), 男, 教授, 博士, 现从事新材料连接技术, 联系地址: 上海市龙腾路 333 号上海工程技术大学材料工程学院(201620), E-mail: yu\_zhishui@163.com