

碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀的研究进展

Progress of Galvanic Corrosion between the Graphite Epoxy Composite Materials and Metals

陆 峰^{1,2}, 钟群鹏¹, 曹春晓²

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083;

2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

LU Feng^{1,2}, ZHONG Qun-peng¹, CAO Chun-xiao²

(1 School of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2 Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 综述了碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀与控制方法的研究进展, 着重介绍了碳纤维环氧复合材料的基本特点、碳纤维复合材料与金属电偶腐蚀行为、现代表面分析技术在复合材料电偶腐蚀研究中的应用, 对防止电偶腐蚀的防护措施与理论进行了初步的探讨。

关键词: 腐蚀; 电偶腐蚀; 碳纤维环氧复合材料

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2003) 04-0039-05

Abstract: Some recent research progress in the field of galvanic corrosion and control between graphite epoxy composite materials (GECM) and metals was reviewed. The basic characters of GECM, galvanic corrosion behavior of GECM/metal couples and modern surface analysis technique used for galvanic corrosion research were introduced. Some protective methods and galvanic corrosion control theory were discussed as well.

Key words: corrosion; galvanic corrosion; graphite epoxy composite materials

复合材料重量轻、比强度和比模量高、热膨胀系数小, 是一种发展迅速、前景广阔的新型工程材料。随着航空航天高技术的发展, 先进碳纤维环氧复合材料(Graphite Epoxy Composite Materials, 简称 GECM)的应用日益增长, 美国从 F-14 和 F-15 战斗机就开始采用碳纤维环氧复合材料, 以降低结构重量, 提高推力, 复合材料占总结构重量的 2% ~ 3%, F-18 战斗机中先进复合材料已占总结构重量的 10.3%, 包括水平尾翼、方向舵、垂直稳定板、减速板等, 由 F-14 和 F-15 的次承力结构材料逐步向主承力结构材料过渡。F-22 战斗机中树脂基复合材料的用量已达到 24%, 新一代直升飞机的复合材料用量高达 65% ~ 80%^[1-6]。用树脂基复合材料来代替金属材料制造飞机零部件, 可使零部件重量减少 25% ~ 50%, 先进复合材料在飞机上的用量及其性能水平已成为飞机先进性的重要考核标志之一^[7,8]。

碳纤维环氧复合材料在飞机上的广泛使用, 必然存在碳纤维环氧复合材料与金属材料相互接触的问题。由于碳纤维独特的电化学性能, 其电极电位较正, 与偶接金属材料电连接后, 在腐蚀介质中, 导致电极

电位较负的金属腐蚀速率加快。因此, 研究碳纤维环氧复合材料与金属偶接时, 在腐蚀介质作用下, 两者之间的电偶腐蚀行为及防护方法, 是碳纤维环氧复合材料工程化应用的重要关键技术之一^[9]。本工作主要针对碳纤维环氧复合材料的特点, 着重介绍现代表面分析技术在电偶腐蚀研究中的应用, 对复合材料与金属电偶腐蚀的机理及控制方法予以综述, 希望对碳纤维环氧复合材料的应用有一定的指导作用。

1 碳纤维及其环氧复合材料的基本特点

1.1 环氧树脂基体的作用

环氧树脂具有一系列优良的性能。近 40 年来, 广泛用于碳纤维及其它纤维增强复合材料^[10,11]。复合材料中环氧树脂基体主要有三种作用: (1) 把纤维粘在一起; (2) 分配纤维间的载荷; (3) 保护纤维不受环境的影响。

1.2 碳纤维的特点和基本成分

碳纤维具有低密度、高强度、高模量、耐高温、抗化学腐蚀等特性, 制作碳纤维的主要原材料有三种: 人造丝(粘胶纤维)、聚丙烯腈纤维和沥青, 制造高强

度高模量碳纤维多选用聚丙烯腈为原料。无论用何种原丝纤维来制造碳纤维,都要经过拉丝、牵伸、稳定、碳化、石墨化五个阶段^[7]。碳纤维中主要成分几乎是碳,表 1 列出了几种碳纤维的化学成分。

表 1 几种碳纤维的化学成分^[7]
Table 1 Chemical composition of graphite fiber^[7]

类型牌号		高强	中模高强	高模
		T 300, T 400	M 30, T 800	M 40, M 50
成分 / %	C	93 ~ 96	95 ~ 98	99. 7
	N	4 ~ 7	2 ~ 5	0
	H	0	0	0
碱金属 × 10 ⁻⁶		20 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 20

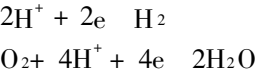
1. 3 碳纤维环氧复合材料电化学特性

碳纤维环氧复合材料保留了碳本身的电化学特性,即具有良好的导电性,较高的电极电位,这些都与贵金属如铂、金等的电化学特性极为相似,当它与某些电极电位较负的金属接触后,金属的腐蚀速率明显加快,在很短的时间内即造成有效破坏^[12-18],因此,研究碳纤维环氧复合材料与金属材料的电偶腐蚀行为及微观腐蚀机理,提出有效的防护措施,对碳纤维环氧树脂基复合材料的进一步使用十分必要。

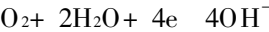
碳纤维环氧复合材料在腐蚀介质中,碳纤维是电子导电相,腐蚀介质是离子导电相,并且在相界面上有电荷的转移,在电荷转移的同时,不可避免地要在两相界面上发生物质的变化(化学变化)。电极体系中,两类导体界面所形成的相间电位,即复合材料与腐蚀介质的内电位差称为电极电位,碳纤维环氧复合材料在腐蚀介质中的电极电位,主要决定于界面层中离子双电层的形成。

碳纤维环氧复合材料在腐蚀介质中,碳纤维作为阴极,在其表面发生析氢或氧还原反应。

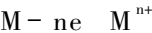
如果腐蚀介质呈酸性,则发生如下反应^[19,20]:



如在中性腐蚀介质中,则发生下列反应:



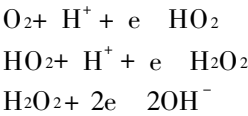
当复合材料与金属偶接时,金属表面发生氧化反应,金属腐蚀的阳极反应相对比较简单,金属总是被氧化成更高的化学价态,



偶接金属转化为金属离子进入腐蚀介质,电子的交换发生在金属和复合材料的表面,复合材料表面发

生还原反应是阴极,金属表面发生氧化反应是阳极。

对碳纤维表面的氧还原反应,其可能的还原机理进一步细化为^[8]:



比较这些反应步骤,可以看到碳纤维表面的电极反应过程十分复杂,且这些氧还原反应都为 O₂ 浓差控制,反应速率受溶解 O₂ 扩散到碳纤维表面的过程控制。

1. 4 碳纤维环氧复合材料本身的腐蚀

碳纤维环氧复合材料本身的腐蚀机理比较复杂,同一时间内有多种影响因素作用于复合材料表面及界面^[11]。复合材料的腐蚀可分为两种主要类型:化学腐蚀和物理腐蚀^[21,22]。

化学腐蚀:腐蚀介质及环境的化学反应使热固性环氧树脂的化学键断裂。热固性环氧树脂是多官能团的,在同一时间内存在一个以上的化学腐蚀反应,并且这种化学腐蚀反应是不可逆的。

物理腐蚀:腐蚀介质及环境与复合材料的相互作用,使碳纤维环氧复合材料的性能发生改变,但没有化学反应发生。如腐蚀介质扩散进入复合材料基体中,物理腐蚀通常是可逆的,当腐蚀介质从复合材料中扩散出来后,复合材料原有的性能可以恢复。

2 碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀研究

通过测量碳纤维的电位、与金属偶接时的电偶电位、电偶电流等电化学测试,盐雾试验、周浸腐蚀试验和湿热试验等户内加速腐蚀试验,电偶腐蚀后偶接材料的力学性能评定和电偶腐蚀对偶接材料的应力腐蚀影响研究等,对电偶腐蚀产生的热力学条件、腐蚀动力学行为、电偶腐蚀机理以及对偶接的金属材料力学性能的影响等进行了全面研究,为树脂基复合材料的应用奠定了良好基础。

由 Mansfeld^[23] 首先应用零电阻电流计来测量电偶腐蚀中的电偶电流值,这种测量方法采用高阻抗的腐蚀电流测量仪,比传统的外观检查、失重测量法更为准确、迅速。Miller^[8] 研究了碳纤维环氧复合材料与不同金属材料在海水中的腐蚀电位及电偶电流,根据电偶对电流密度值的大小,提出了判断碳纤维环氧复合材料与金属接触在海水腐蚀环境条件下的相容性原则。根据 Cl⁻ 离子浓度、pH 值、温度、氧浓度等影响因素,对树脂基复合材料/金属的电偶腐蚀进行了较为全面的研究,排列出了各种金属材料与碳纤维环氧复合材料偶接时,在腐蚀环境及介质中产生电偶腐

蚀的相对次序。

D M Aylor 和 J N Murray 认为^[24]：在静止的腐蚀海水中，由于 O₂ 的阴极还原反应，阴极区 OH⁻ 离子浓度大大增加，pH 值使 CaCO₃ 和 Mg (OH)₂ 沉淀在碳纤维环氧复合材料表面，腐蚀电流显著降低，在流动的海水腐蚀介质中，由于 O₂ 浓度的增加和阴极腐蚀产物膜的不易生成，腐蚀速率较快。

在 3.5% 的氯化钠溶液中，碳纤维环氧复合材料的稳定电位高达 170mV (SCE)，B A Miller^[25] 经过大量的研究，对中性条件下 3.5% NaCl 溶液中，采用零电阻电流计 ZRA (Zero-Resistance Ammeter) 和重量损失方法，对 23 种合金 (钢、不锈钢、铝合金、镍基合金和钛合金等) 与碳纤维环氧复合材料开路电位和电偶腐蚀电流进行了深入研究，其电偶腐蚀相容性见表 2。

表 2 碳纤维环氧复合材料与金属材料的电偶相容性
(3.5%NaCl, 22 ± 10)^[25]

Table 2 Galvanic compatibility between graphite epoxy composite materials and alloys

序号	材料	开路电位/ mV (SCE)	电偶电流/ (μA/cm ²)
1	4340	- 534 ± 4	21. 7
2	2020-T 651	- 724 ± 5	17. 9
3	300M	- 330 ± 5	17. 2
4	AF1410	- 358 ± 30	15. 7
5	7075-T 6	- 775 ± 5	12. 5
6	MA-87 (73)	- 868 ± 3	10. 4
7	4130	- 537 ± 55	10. 4
8	2024-T 6	- 656 ± 12	10. 3
9	1020	- 543 ± 15	9. 9
10	2024-T 3	- 652 ± 25	8. 7
11	SS440C	- 391 ± 7	8. 2
12	MA-87 (72)	- 862 ± 3	7. 1
13	60% Al6061+ 30% Graphite	- 868 ± 10	5. 2
14	SS301	- 174 ± 65	2. 24
15	Be-Cu	- 225 ± 5	1. 42
16	SS304	- 210 ± 46	1. 40
17	PH17-7	- 252 ± 23	1. 05
18	AFC-77	- 318 ± 70	1. 03
19	Inconel	- 364 ± 100	0. 435
20	Inconel X	- 175 ± 25	0. 055
21	Rene 41	- 437 ± 110	0. 037
22	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	- 359 ± 29	0. 001
23	Ti-6Al-4V	- 343 ± 4	0. 000

从表 2 中可以看出，碳纤维环氧复合材料与大部分合金的电位差在 0.5 ~ 1.0V 之间，腐蚀电位的顺序与电偶腐蚀电流密度的顺序是不相一致的，电偶序只能从热力学上粗略估计电偶腐蚀效应，电偶腐蚀反应的动力学主要由电偶腐蚀电流来决定。Miller 认为：

$i_g < 5\mu A/cm^2$ ，允许使用； $5\mu A/cm^2 < i_g < 15\mu A/cm^2$ ，采取防护措施后可以使用； $i_g > 15\mu A/cm^2$ ，不允许接触使用。

有标准根据平均电偶电流密度 i_g 值的大小，将电偶腐蚀敏感性分为 A, B, C, D, E 共 5 级^[26]。不同的碳纤维环氧复合材料，其腐蚀电位的变化不大，未发现某一种碳纤维环氧复合材料与金属的电偶腐蚀效应更小。

A R G Brown 等^[27]研究了铝合金成分、Cl⁻ 离子浓度、溶液的 pH 值、温度及溶液中离子特性对碳纤维环氧复合材料与铝合金电偶腐蚀效应的影响，分别选择了一种高模量和一种高强度的碳纤维，并对比研究了碳纤维表面氧化对电偶腐蚀电流的影响。

在电偶腐蚀效应研究中，除了电化学极化的影响，要特别注意阴阳极面积比，对于大气和海洋腐蚀，总是把阳极面积设计得比阴极面积要大很多，浓差极化控制的电偶腐蚀过程，阳极溶解的速率正比于阴阳极面积比。

可推出： $r_A = r_0(1 + A_c/A_A)$

其中： r_0 是阳极未偶接时的腐蚀速率；

A_c 和 A_A 分别代表阴极和阳极面积。

Bellucci^[28, 29]的研究表明，对铝合金、4340 钢，电偶电流与金属阳极的面积无关，其大小与阴极面积成正比。对于不锈钢和 Ti-6Al-4V 钛合金，电偶电流值与阴阳极面积均有关，但并不明显，从电偶腐蚀反应过程动力学观点来看，电偶腐蚀受阳极表面金属的活性溶解和阴极表面的氧还原反应控制，钛合金可以安全地与碳纤维接触使用，不锈钢应注意活化状态的影响。

3 电偶腐蚀的防护及控制方法

3.1 发生电偶腐蚀的基本条件

发生电偶腐蚀必须同时具备以下三个条件^[9]：

(1) 存在腐蚀电解质，对大多数电偶腐蚀来说，腐蚀电解质主要是指凝结在表面上的、含有某些腐蚀介质 (如氯化物、硫酸盐等) 的水膜和海水，腐蚀电介质必须连续存在于不同的金属或非金属之间，构成腐蚀电池的离子导电支路。

(2) 存在两种或两种以上不同金属或非金属，它们在所处腐蚀介质中的稳定电位应有一定电位差。

(3) 导电连接，两种金属或金属与非金属直接接

触或通过其它导体连接, 构成腐蚀电池的电子导电支路。

3.2 电偶腐蚀的控制方法

电偶腐蚀是腐蚀类型的一种主要破坏形式, 研究电偶腐蚀理论及方法在近年来得到了迅速的发展, 电偶腐蚀的反应历程、机理及防护方法也在不断完善和发展。同时具备上述三个条件, 也就是在热力学上具备了产生电偶腐蚀的条件, 但热力学的可能性只表明产生电偶腐蚀的趋势和倾向, 电偶腐蚀的速率只能由腐蚀动力学方面的因素决定。热力学条件对电偶腐蚀的产生可作出否定回答, 如果不具备发生电偶腐蚀的热力学可能性, 则不会产生电偶腐蚀, 只要设法破坏其中任一条件, 便可阻止电偶腐蚀的发生。所以, 防护措施是否有效, 如铝合金表面阳极化后涂漆, GECM 表面涂漆或共固化一层玻璃布后再涂漆等, 关键是在腐蚀介质中, 保证金属与 GECM 之间有良好的绝缘性^[15-18]。对于密封也是同样的道理, 阻止了腐蚀介质的侵入或渗入。电偶腐蚀防护措施是否可靠, 归结于在腐蚀环境条件下防护措施的有效性及其寿命长短。

4 现代表面分析技术在电偶腐蚀研究中应用

过去的 30 年, 由于现代表面分析技术的发展, 对电偶腐蚀的作用机理、腐蚀反应历程研究有了更为有利的研究手段和方法。特别是现代表面分析技术对界面反应、腐蚀动力学规律、表面微观结构与形貌的研究有了重大的突破, 对电偶腐蚀机理的研究可以达到分子和原子的水平。电偶腐蚀效应主要作用在金属与金属或金属与复合材料接触的界面, 对表面形貌、界面特征、界面反应影响的深入研究, 使我们对电偶腐蚀的机理及规律有了更为清晰、明确的阐述^[30]。

采用现代表面分析技术和方法, 大大推进了腐蚀机理的理论研究及防护措施的实际应用, 在原子和分子的水平上, 对电偶腐蚀作用机理、反应动力学等规律有了更为深入的研究。腐蚀过程主要发生在金属与腐蚀介质的界面上, 由于阴极材料的存在, 促进了阳极性金属的腐蚀。对腐蚀产物膜, 其化学特性、形成机理、分子取向和厚度等进行研究, 是电偶腐蚀机理研究的重要研究内容。应用单一的表面分析技术和方法, 不可能获得所有的信息, 有时需要两种或多种表面分析技术的组合。表 3 给出了常用的几种表面分析技术和方法。

现代表面分析技术与方法的发展, 提供了研究腐蚀过程中腐蚀介质分子与金属表面原子相互作用的有效工具, 分析金属原子的轨道运动和与之相互作用的腐蚀介质的分子运动, 通过研究表面金属原子的电

表 3 常用的现代表面分析技术和方法^[30]

Table 3 Modern surface analysis technology and methods^[30]

表面分析技术	原理	所获信息
Low-energy electron diffraction (LEED)	低能电子弹性背散射	表面及吸附物的原子结构
X-ray and UV photoelectron spectroscopy (XPS and UPS)	原子中的电子发射	表面和电子结构的化学成分
Auger electron spectroscopy (AES)	X 射线或离子轰击表面原子产生的电子发射	表面的元素成分
High resolution electron energy loss spectroscopy (HREELS)	低能电子非弹性散射产生的表面原子振动激发	吸附物的结构和粘接
Ion scattering spectroscopy (ISS)	惰性气体离子的非弹性背散射	表面的原子结构和成分
Secondary ion mass spectroscopy (SIMS)	离子束诱导表面原子作为正和负离子发射	表面的化学成分
Thermal desorption spectroscopy (TDS)	热诱导吸附剂的脱附和成分变化	吸附能、吸附剂成分
Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS)	发射光电子波和背散射波间的 X 射线吸附干涉效应	吸附物的成分、表面原子的数目和相互距离
Reflectance absorption infrared spectroscopy (IRRAS)	红外发射产生的表面分子振动激发	吸附物的振动结构和粘接
Raman and surface enhanced (RAMAN) Raman spectroscopy (SERS)	光子散射	吸附物的振动结构

子结构、能量对腐蚀产物形成的影响, 可以从分子或原子的观点, 比较清晰的阐述电偶腐蚀机理及规律, 建立电偶腐蚀表面及界面反应的动力学模型。

5 结束语

碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀行为及防护方法的研究, 应在下列方面进一步完善:

(1) 碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀动力学反应历程等有待进一步系统研究, 完善电偶腐蚀中微区电化学腐蚀行为及腐蚀机理、微区腐蚀环境和电极电位的模拟与测量, 探索和建立电偶腐蚀控制的动力学理论和有效评定方法。

(2) 环境介质、力学因素与电偶腐蚀共同作用的条件下, 复合材料电偶腐蚀对高强度铝合金、高强度钢应力腐蚀性能及反应历程影响的研究。

(3) 在常规盐雾、周浸、自然环境暴露腐蚀试验过程中, 相互接触的结构之间存在缝隙, 致使缝隙闭塞区内腐蚀环境恶化, 从而使缝隙内与复合材料相接

触的金属腐蚀加剧,在电偶腐蚀研究中,如何区分缝隙腐蚀影响与电偶腐蚀影响,目前还有较大的困难。

参考文献

- [1] 王荣国等主编. 复合材料概论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- [2] 航空航天材料咨询研究组. 航空航天材料咨询报告 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] 美国国家研究委员会著. 90 年代的材料科学与材料工程 [M]. 北京航空材料研究所航空信息中心译. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [4] 梁志勇等. 面向 21 世纪的美国复合材料产业及先进复合材料技术 [A]. 复合材料的现状与发展—第十一届全国复合材料学术会论文文集(毛天祥主编) [C]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2000.
- [5] 陈华辉等. 现代复合材料 [M]. 北京: 中国物资出版社, 1998.
- [6] 贺福, 王茂章. 碳纤维及其复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [7] B A Miller. The Galvanic Corrosion of Graphite Epoxy Composites Materials Coupled with Alloys [R]. AD-A019 322, 1975.
- [8] 李金桂, 赵阎彦. 腐蚀和腐蚀控制手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [9] H Lee and K Neville. Handbook of Epoxy Resins [M]. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [10] C A May. Epoxy Resins: Chemistry and Technology [M]. New York: Marcel Dekker, 1988.
- [11] W C Tucker, R Brown, L Russell. Corrosion Between a Graphite/Polymer Composite and Metals [J]. J of Compos Mater, 1990, 24 (1): 92- 102.
- [12] D M Aylor, J N Murray. Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behavior of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals [R]. AD-A256 072, 1992.
- [13] R Brown, T J Rockett. Blistering of Graphite/Polymer Composites Galvanically Coupled with Metals in Sea Water [R]. AD-A272 773, 1993.
- [14] Lu Feng. Effects of Graphite Epoxy Composite Materials on the Corrosion Behavior of LY12CZ Aluminum Alloy [A]. In: 7th Asian-Pacific Corrosion Control Conference [C]. Beijing, 1991, (8): 19- 23.
- [15] 陆峰, 马颐军. 复合材料 30CrMnSiA 接触腐蚀的研究 [J]. 材料工程, 1992, (5): 31- 33.
- [16] Lu Feng, Shen Wenyan, Li Jinggui. Galvanic Corrosion Between Graphite Epoxy Composite Materials and LY12CZ Aluminum Allo [J]. ACTA METALLURGICA SINICA, 1996, 9 (6): 669.
- [17] 陆峰, 沈文雁. 不同环境对 GECM 和 30CrMnSiA 钢电偶腐蚀的影响 [J]. 材料工程 (增刊), 1996: 35- 37.
- [18] M G Fontana, N D Greene. 腐蚀工程 [M]. 左景伊译. 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [19] 李荻. 电化学原理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [20] P A Schweitzer. Corrosion Engineering Handbook [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1996.
- [21] P Fischer, J J Deluccia. Environmental Effects on Composite Materials [R]. ASTM-STP 602, Philadelphia, PA, USA, 1976: 50- 66.

- [22] F Mansfeld. The Relationship Between Galvanic Corrosion Current and Dissolution Rates [J]. Corrosion, 1973 (29): 403- 405.
- [23] D M Aylor, J N Murray. The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behavior of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals [R]. AD-A256072, 1992.
- [24] B A Miller, S G Lee. The Effect of Graphite-Epoxy Composites on the Galvanic Corrosion of Aerospace Alloys [R]. AD-A035029, 1976.
- [25] HB5374-78. 不同金属电偶腐蚀电流测定方法 [S].
- [26] A R G Brown, D E Coomber. Behavior of Couples of Aluminum and Plastics Reinforced with Carbon Fiber in Aqueous Salt Solution [J]. Br Corros J, 1972, 7 (9): 232- 235.
- [27] F Bellucci. Galvanic Corrosion Between Nonmetallic Composites and Metals. I. The Effect of Dissimilar Metal and of Temperature [J]. Corrosion, 1991, 47 (10): 808- 819.
- [28] F Bellucci. Galvanic Corrosion Between Nonmetallic Composites and Metals. II. Effect of Area Ratio and Environmental Degradation [J]. Corrosion, 1992, 48 (4): 281- 291.
- [29] S Shah. Surface and Interface Characterization in Corrosion [C]. Houston, Texas: NACE International, 1994.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999065004)

收稿日期: 2002-04-19

作者简介: 陆峰 (1965-), 男, 研究员, 从事金属腐蚀与防护研究工作, 联系地址: 北京 81 信箱 5 分箱 (100095)。

* * * * *

(上接第 16 页)

参考文献

- [1] Beatrice Lay, Maurice Boivin. J Mater Proc Technol, 1995, 55: 261.
- [2] C A Standford-Beale, T W Clyne. Comp Sci Technol, 1989, 36: 121.
- [3] L Geng, S Ochiai, J Q Hu, C K Yao. Mater Sci Eng, 1998, A246: 302.
- [4] Z Xiong, L Geng, C K Yao. Comp Sci Technol, 1990, 39: 117.
- [5] 张文龙, 吴培莲, 王德尊, 等. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31: 5.
- [6] N J Sorensen, S Suresh, V Tvergaard, A Needleman. Mater Sci Eng, 1995, A197: 1.
- [7] M Dong, S Schmauder, T Bidlingmaier, A Wanner. Comput Mater Sci, 1997, (9): 121.
- [8] N J Sorensen. Acta Metal Mater, 1993, 41: 2973.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50071008)

收稿日期: 2003-02-12

作者简介: 李爱滨 (1968-), 女, 博士, 主要研究方向是金属基复合材料。联系地址: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 433[#] (150001)。