

铝合金裂纹板的阳极化处理与复合材料补片胶接修理效果

Anodizing Treatment and Its Effects on Properties of Cracked Aluminum Plates Repaired with Composite Patches

杨孚标, 肖加余, 曾竟成, 江大志, 王 遵, 邢素丽
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

YANG Fu-biao, XIAO Jia-yu, ZENG Jing-cheng,
JIANG Da-zhi, WANG Zun, XING Su-li (College of Aerospace and
Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要: 采用磷酸阳极化方法对胶接修理铝合金裂纹板的粘接表面进行了处理, 并用单向碳纤维/ 环氧复合材料补片对铝合金进行了修补。测试了阳极化铝合金的粘接性能、修补结构的静态力学性能和疲劳性能, 考察了粘接表面的阳极化处理对修补结构的静态力学性能和疲劳性能的影响。结果表明, 磷酸阳极化在铝合金表面形成多孔膜, 复合材料补片胶接时胶粘剂能渗透进入阳极化铝合金表面的多孔膜, 在粘接界面上形成一层过渡层, 该过渡层的形成能有效提高其与复合材料的粘接性能, 其粘接副的拉剪强度提高了 104%; 铝合金裂纹板胶接修理前的粘接表面的阳极化处理能大幅度地提高修复结构的静态强度和疲劳寿命, 当用单向碳纤维/ 环氧复合材料补片单面修补时, 修补结构的破坏强度为 418.13 MPa, 恢复到完好板的 93.42%; 修补结构的疲劳寿命相对裂纹板延长了 1.42 倍, 比未阳极化的修补板的疲劳寿命增加了 27.59%。修补前的阳极化处理也使修补结构在一定周次疲劳后的剩余强度有所提高。

关键词: 阳极化; 胶接; 破坏强度; 疲劳寿命

中图分类号: TB323; V267 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)11-0013-05

Abstract: The center-cracked aluminum alloys plates were bonded repaired with unidirectional carbon/epoxy composite patches, some of which were anodized in the aqueous solution of phosphoric acid. The adhesive properties of the anodized plates were investigated. The effect of anodizing on the static and fatigue properties of the repaired structure was analyzed. It is shown that the anodizing produces the porous and micro-rough film on the surface of plates. When the anodized plates are bonded with composite patches, the adhesive penetrates into the film and a transition layer is formed between the alloy and the adhesive. The adhesion is promoted greatly and the maximum lap shear strength of the anodized sample is 104% greater than that of the normal samples. The static and fatigue properties of the repaired plates are improved greatly after anodizing treatment. The failure strength of repaired plates is 418.13 MPa when the plates are anodized, which is 93.42% of that of the no-flaw plates. The fatigue life of repaired plates is 1.42 times longer than that of cracked plates when the plates are anodized, which is 27.59 % longer than that of the normally repaired ones. The residual strength of the repaired plates after a number of fatigue cycles is improved significantly when the cracked plates are anodized before repair.

Key words: anodizing; adhesion; failure strength; fatigue life

铝及铝合金具有力学性能好、质量轻等优点, 已被广泛应用于各行业中, 尤其是对轻量化要求较高的航空航天领域。铝合金构件在服役过程中容易形成腐蚀、裂纹等损伤。为恢复结构的整体性, 从经济角度等因素考虑, 需要对铝合金损伤构件进行修理。复合材

料补片胶接修理与传统的机械修理相比, 具有结构增重小、抗疲劳性能和耐腐蚀性能好、修理时间、成本低等优点, 是一种优质、高效、低成本的结构修理方法^[1-4]。

国外对铝合金损伤构件的复合材料胶接修理技术

高度重视,其研究成果广泛应用于飞机构件的修理,如机翼上蒙皮、下蒙皮、机翼壁板、腹鳍蒙皮、起落架轮毂和舱门框等^[5,6],所用的补片材料为碳纤维/环氧复合材料。国内也已开展复合材料修复技术研究,已应用于飞机复合材料雷达罩、水平尾翼的修补,所用的补片多为碳纤维/环氧复合材料补片^[7-9]。

在复合材料胶接修理技术中,胶接表面的处理较为重要,它决定胶接的强度及修补结构的耐久性^[1,5,9]。由于铝合金与氧的亲合力较强,容易在其表面形成无孔非晶态 Al_2O_3 ,同时由于吸附、溶解、化学反应等原因使其氧化层增厚、表面极性降低。环境中可能存在的其他介质会使其表面更为复杂^[2,3],因此铝合金构件胶接修理前必须对其表面进行处理,以去掉表面层物质,避免在弱氧化层上粘接^[2,10,11]。

可以采用不同方法对铝合金构件胶接表面进行处理^[2,5,10-12],如溶剂清洗与脱脂、砂纸打磨和喷砂、铬硫酸浸蚀、阳极氧化处理、偶联剂处理和溶胶凝胶方法等,其中阳极化处理方法是一种较好的方法。而磷酸阳极化处理工艺是一类弱酸性阳极化处理方法,具有环境友好、毒性小、成本低、工艺参数易控制等优点,可以明显改善铝合金构件待胶接表面的表面状态,有效地提高铝合金胶接构件的耐久性^[2,13,14]。

本工作用磷酸阳极化方法对铝合金表面进行了处理,测试和分析了阳极化铝合金的粘接性能;并根据实际情况,采用复合材料补片对人工预制裂纹的铝合金板进行了修补,考察和分析了胶接修补前铝合金裂纹板胶接表面的阳极化处理对修补结构的静态力学性能和疲劳性能的影响。

1 实验

1.1 原材料

本实验中所用的铝合金为 LY12CZ 合金,厚度为 2~3mm,其基本力学性能为 $E=65.4\text{GPa}$, $\sigma_{0.2}=322\text{MPa}$, $\sigma_b=443\text{MPa}$, $\delta_s=21.7\%$;胶粘剂为黑龙江石油化学研究院提供的双组分聚氨酯改性的环氧胶粘剂,其主要性能为 $E=72.79\text{MPa}$, $\sigma_s=65.54\text{MPa}$, $\tau_s=10.96\text{MPa}$;修复用复合材料补片为单向碳纤维/环氧复合材料,其主要性能为 $E=108\text{GPa}$, $\sigma_b=1224\text{MPa}$;所用的化学药品主要有磷酸、氢氧化钠、碳酸钠等,市购。

1.2 铝合金阳极化处理

将加工、清理过的铝合金板试片在一定浓度的碱液中浸泡 15min,取出后用自来水冲洗 5min,然后在稀磷酸溶液中浸泡 10min,取出后用自来水冲洗

5min,然后对其进行阳极化处理。阳极化完毕后,立即用自来水冲洗 5min,再用去离子水冲洗 5min,然后在 60~70℃下烘干水分,待用。

铝合金板的磷酸阳极化处理工艺流程如图 1 所示,阳极化工艺参数见表 1。

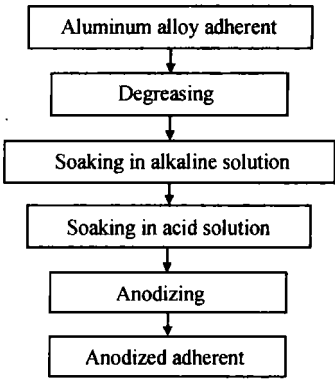


图 1 阳极化处理工艺流程
Fig. 1 Process of an anodizing treatment of aluminum substrates

表 1 LY12CZ 铝合金板阳极化工艺参数
Table 1 Anodizing parameters of the LY 12CZ aluminum substrates

Mass fraction of phosphatic acid / %	Voltage / V	Time / min	Bath temperature / °C
10	10	20	25

1.3 试样准备和性能测试

根据 GB7124-86 国家标准和美国 ASTM D1002^[15] 标准测试铝合金粘接副的拉剪强度。按照要求配制双组分的环氧胶粘剂,静置后均匀涂覆在铝合金试片的表面,搭接、加压并固化,固化温度为 100℃,时间为 1h。拉剪强度测试原理和试样尺寸如图 2 所示,在 WDW-100 微机控制万能试验机上进行。

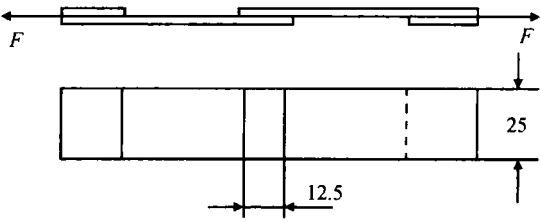


图 2 拉剪强度测试示意图
Fig. 2 Schematic drawing of the single-lap joint

采用热压成型工艺对含疲劳裂纹的铝合金板进行修补。修复用补片为模压成型的单向碳纤维/环氧复合材料,其尺寸为 80mm×60mm×1.32mm,修补时补片的纤维方向平行于载荷方向,即补片的纤维方向垂

直裂纹。

在复合材料补片和裂纹板的粘接表面均匀涂覆聚氨酯改性的环氧胶粘剂，静置片刻后将补片胶接到板的裂纹部位，放入压力成型机中加热、加压固化，固化制度如图 3 所示。修补结构的示意图见图 4。

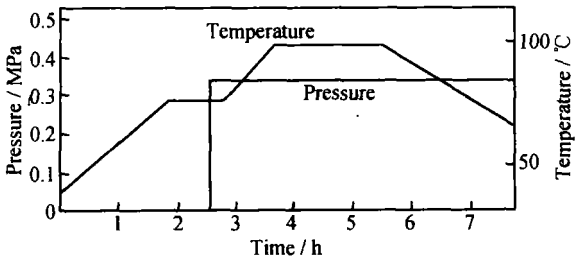


图 3 裂纹板的复合材料修补固化制度
Fig. 3 Curing process of cracked plate bonded with composite patch

按照国家标准 GB1447- 83 测试试样的静态力学性能。试样的静态力学性能测试在微机控制的 WDW 万能实验机上进行。试件安装到试验机上后，载荷逐渐增加，直至试件在裂纹处发生断裂为止，用引伸仪测试裂纹中心开孔位移。按照国家标准 GB3075- 82 测试试样的疲劳性能。试样的疲劳性能测试同样在 PLG-100C 高频疲劳实验机上进行，正弦波加载，最大应力水平 $\sigma_{MAX}=100\text{MPa}$ ，载荷比 $R=0.1$ ，用卡尺测量铝合金板的裂纹长度。裂纹中心开孔位移和裂纹长度的测试示意图如图 5。

采用 KYKY-2800 型扫描电镜对阳极化后铝合金表面和断面形貌、铝合金和复合材料补片的粘接界面进行观察。

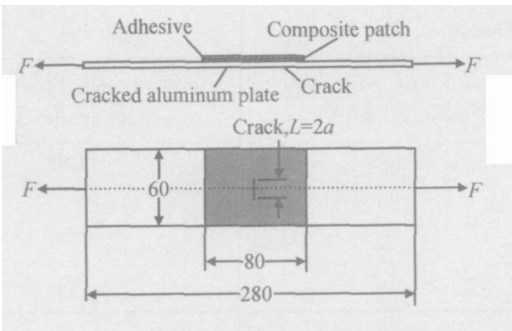


图 4 复合材料补片修补裂纹板
Fig. 4 Schematic drawing of cracked plate bonded with composite patch

2 结果与讨论

2.1 阳极化铝合金粘接性能

采用双组分聚氨酯改性的环氧胶粘剂将铝合金试

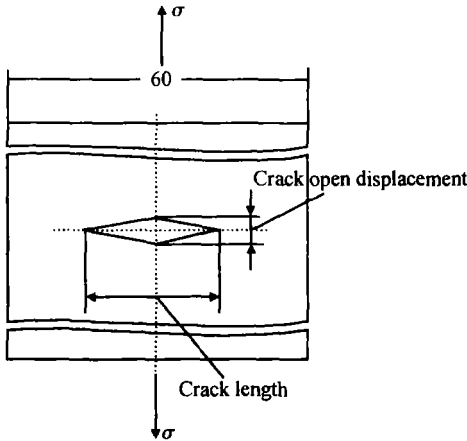


图 5 裂纹长度和裂纹中心张开位移测试示意图
Fig. 5 Measuring of the crack length and crack open displacement

片、阳极化后的铝合金试片或复合材料试片粘接，形成不同类型的粘接副，利用万能试验机测试其拉剪强度，结果见表 2，表中数据为 4 个试样测试结果的平均值。

从上表可知，铝合金试片阳极化后其抗拉剪性能大幅度提高。当粘接副均为阳极化铝合金时，其拉剪强度提高了 238%。当一个粘接副复合材料，阳极化后的铝合金/复合材料的拉剪强度提高了 104%。

铝合金粘接表面阳极化能使其胶接性能大幅度的提高。铝合金表面的阳极化处理过程中，铝合金晶胞在电场作用下发生电解质溶液的溶解过程^[10-13,16]，在其表面形成凹凸不平、多孔的蜂窝状的膜。电解质溶液不仅能溶解铝合金晶胞，同时溶解已形成的孔格壁，造成部分已形成的膜孔边消失，形成不同尺度的膜孔，并且电解质溶解孔格壁的不同部位，形成孔格的互相贯通，如图 6。铝合金表面的阳极化处理形成的多孔膜，修理时胶粘剂能够渗入膜孔中，在表面形成一层过渡层，从而形成较好的机械连接。图 7 为铝合金磷酸阳极化处理前后与胶粘剂之间胶接界面的断面。铝合金试片经过阳极化处理，在粘接界面之间出现了一定厚度的过渡层。

阳极化处理能够在铝合金表面生成极性的 $\gamma-\text{Al}_2\text{O}_3$ 等氧化物，该氧化物层能有效地提高其界面上与极性胶粘剂之间的色散力和范德华力，同时可能与胶粘剂中的极性基团之间形成共价键结合，所有这些因素均有利于提高粘接副之间的胶接强度。

2.2 裂纹板修复后的静态力学性能

将不同的测试试件安装到 WDW-100 万能实验机上，逐渐加载，直至试件发生断裂为止，同时记录破坏强度和一定载荷下的裂纹中心张开位移，其中加载速率为 2mm/min，实验结果如表 3 所示。当铝合金板存

表 2 阳极化铝合金表面的粘接性能
Table 2 The adhesion strength of aluminum specimen

	Aluminum / Aluminum	Anodized alumin um/ Aluminum	Alum inum/ Composite	Anodized alumin um/ Com posite
Lap-shear strength/ MPa	13. 59	45. 99	15. 95	32. 54

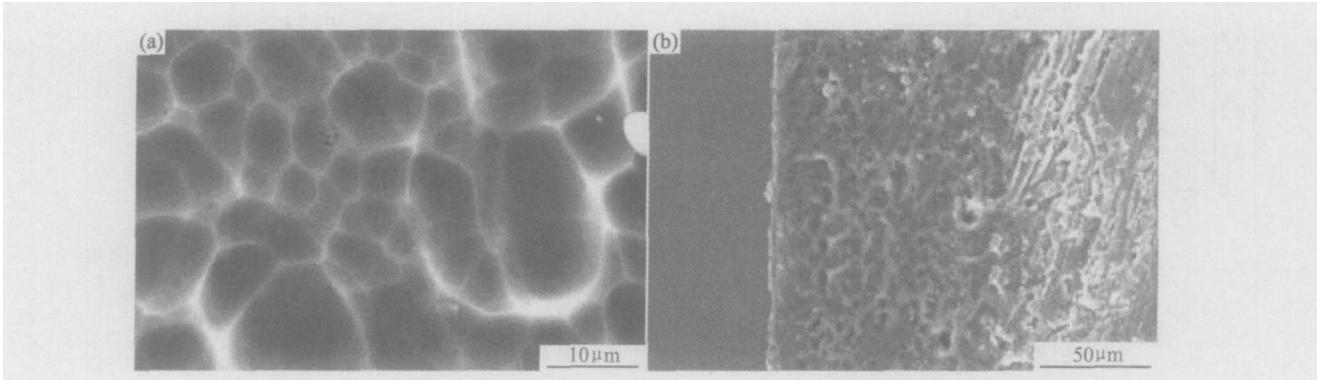


图 6 铝合金阳极化后 SEM 照片 (a) 表面; (b) 断面
Fig. 6 SEM photos of the anodized aluminum (a) surface; (b) cross-section

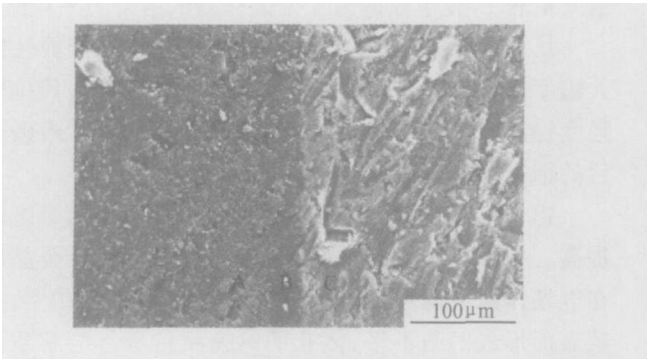


图 7 阳极化铝合金粘接界面的 SEM 照片
Fig. 7 SEM photo of bonding interface of the anodized plate

在疲劳裂纹时, 板的承载能力大大降低, 而经过复合材料修补后板的承载能力大大恢复。铝合金板宽度为 60mm 时, 若其中心存在长度为 12. 5mm 的疲劳裂纹, 板的破坏强度只有完好板的 70. 31%。采用单向碳纤维/ 环氧复合材料补片单面胶接修补后, 修补后虽然结构的质量增加了 1. 26%, 但其破坏强度却提高了 12. 02%, 恢复到完好板的 82. 33%, 即铝合金裂纹板经过复合材料补片胶接修补后其破坏强度具有一定程度地提高。若在复合材料单面胶接修补前对铝合金板的粘接表面进行阳极化处理, 其破坏强度提高了

表 3 铝合金裂纹板破坏强度
Table 3 Failure strength of cracked aluminum alloy plates

	Fatigue cracked plate	Cracked plate bonded with composite patch	Anodized cracked plate bonded with composite patch
Failure strength/ MPa	311. 48	364. 74	413. 83
Ratio to the failure strength of non-flaw plate/ %	70. 31	82. 33	93. 42
Critical crack open displacement/ mm	-	0. 10	0. 12

23. 11%, 恢复到完好板的 93. 42%, 即胶接修理前的铝合金板的阳极化处理能大大提高修补结构的静态破坏强度。
图 8 为在静态载荷作用下, 复合材料单面修复后的铝合金裂纹板的裂纹中心张开位移与板的应力之间的关系。从图 8 可以看出, 修补结构的裂纹扩展存在两个阶段, 在低应力水平下, 裂纹中心张开位移随载荷的增大而线性缓慢增大, 即裂纹缓慢扩展; 当应力高于

某一临界值时, 对应于某一临界裂纹张开位移, 同时对应于某一临界裂纹长度时, 板的承载能力下降, 裂纹中心开口位移快速增加, 即裂纹快速扩展。粘接在裂纹板上的复合材料补片的主要作用是部分承担结构的载荷^[2, 4, 17, 18], 通过补片的架桥作用能有效地延缓或阻止裂纹的扩展。胶接修理前对铝合金粘接表面进行阳极化处理, 能改善复合材料补片与铝合金之间的粘接性能, 充分发挥补片的架桥作用, 延缓或阻止裂纹的扩

展,特别是延缓裂纹进入快速扩展阶段。在本实验条件下,复合材料补片单面修补后,修理结构的裂纹中心临界张开位移为 0.10mm 和 0.12mm,即阳极化处理能提高修理结构的裂纹中心的临界张开位移,即提高修理结构的临界裂纹长度,延缓裂纹扩展进入快速扩展阶段。

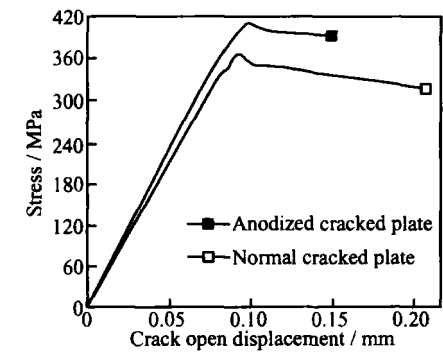


图 8 裂纹铝合金板修复后的裂纹中心张开位移
Fig. 8 Crack open displacement of plates

2.3 裂纹板修复后的疲劳性能

在 PLG-100C 高频疲劳试验机上分别测试铝合金裂纹板和复合材料单面修补的铝合金板的疲劳寿命,最大应力水平为 $\sigma_{max} = 100\text{MPa}$, 载荷比 $R = 0.1$, 正弦波加载,实验结果如表 4。从表 4 可知,铝合金裂纹板经过复合材料补片胶接修理后,结构的疲劳寿命大大提高。人工预制裂纹长度为 10mm 的铝合金板,经过 10000 周次的疲劳,产生长度为 12.5mm 的疲劳裂纹,不进行修补时,试样经过 32106 周次的疲劳实验后失效;若采用复合材料单面修补,其疲劳寿命为 60942 周次,增加了 28836 周次;复合材料胶接修理前对铝合金裂纹板的粘接表面进行阳极化处理,其疲劳寿命为 77758 周次,增加了 45652 周次,即其疲劳寿命延长了 1.42 倍。与未阳极化处理的修理结构相比,疲劳寿命提高了 27.59%,即复合材料单面胶接修补前对铝合金裂纹板的修补表面进行阳极化处理,能大大延长修理结构的疲劳寿命。

表 4 铝合金裂纹板的疲劳寿命

Table 4 Fatigue life of cracked aluminum plates

	Fatigue cracked plate	Cracked plate bonded with composite patch	Anodized cracked plate bonded with composite patch
Fatigue life/cycle	32106	60942	77758

修补结构中裂纹板的裂纹长度决定其疲劳寿命,同时也决定修补结构疲劳后的剩余强度。将复合材料单面修补的铝合金裂纹板在疲劳试验机上经过 50000

周次的疲劳实验后,然后在 WDW-100 微机控制万能试验机上进行静态力学性能测试,测试其试样的剩余强度和一定周次疲劳后其疲劳裂纹的长度,结果如表 5 所示。从表 5 可知,铝合金裂纹板在复合材料补片胶接修理前对其粘接表面进行阳极化处理,其修补结构经过一定周次的疲劳作用后,其裂纹长度远远小于未处理的修补结构,即复合材料胶接修理前对铝合金裂纹板的粘接表面进行了阳极化处理,改善了复合材料补片和裂纹板的粘接性能,充分发挥复合材料补片的作用,有效地延缓和阻止裂纹的扩展,降低铝合金裂纹板的裂纹扩展速率,使修理结构具有较高的疲劳寿命,同时修理结构疲劳后的剩余强度较高。

表 5 疲劳后铝合金裂纹板的特性

Table 5 Properties of cracked aluminum plates after 50000 cycles fatigue

	Crack length/mm	Residual strength/MPa
Cracked plate bonded with composite patch	37.64	256.93
Anodized cracked plate bonded with composite patch	31.72	379.24

3 结论

- (1) 阳极化在铝合金表面形成多孔膜,胶接修补时胶粘剂能渗透进入阳极化铝合金表面的多孔膜,在粘接界面上形成一层过渡层。
- (2) 铝合金粘接表面的阳极化能有效提高粘接性能,其与复合材料形成的粘接副其拉剪强度提高了 104%。
- (3) 复合材料胶接修补前的铝合金裂纹板粘接表面的阳极化能大幅度地提高修复结构的静态强度,单向碳纤维/环氧树脂复合材料补片单面修补后其破坏强度为 413.83MPa,恢复到完好板的 93.42%。
- (4) 阳极化处理能有效提高其修补结构的疲劳寿命和一定疲劳周次下的剩余强度。

参考文献

[1] 陈绍杰. 复合材料结构修理指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[2] BAKER A A. Bonded Repair of Aircraft Structure[M]. Dordrecht, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1988.

[3] 徐建新. 损伤金属结构的复合材料胶接修补技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学博士学位论文, 1996.

[4] 孙宏涛. 复合材料胶接修补止裂技术的理论及试验研究[D]. 西安: 西北工业大学博士论文, 1998.

3 结论

(1) 用(Ni, Mo)作助烧剂, 在 1530 °C制备了致密的复合陶瓷刀具材料 TiB₂-TiN-(Ni, Mo), 烧结过程中生成的 MoNi 相能够避免脆性金属硼化物的生成。

(2) 随第二相 TiN 颗粒含量的增加, 材料的晶界不断得到强化, 使材料从以沿晶断裂为主转变为有大量的穿晶解理和沿晶断裂共同作用的断裂方式, 复合材料的增韧机制主要是金属颗粒桥连和裂纹偏转。

(3) 第二相颗粒 TiN 的加入大幅度改善了复合陶瓷材料的力学性能, 当 TiN 的含量达到 30% 时材料的综合力学性能最好, 抗弯强度比单相 TiB₂ 材料提高了约 187%, 断裂韧度也达到了 7.25 MPa·m^{1/2}。

参考文献

- [1] WANG W M, FU Z Y, WANG H, et al. Influence of hot pressing sintering temperature and time on microstructure and mechanical properties of TiB₂ ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22: 1045– 1049.
- [2] ZHANG G J, JIN Z Z, YUE X M. Effects of Ni addition on mechanical properties of TiB₂-SiC composites prepared by reactive hot-pressing (RHP) [J]. Journal of Material Science, 1997, 32: 2093– 2097.
- [3] EINARSRUD M A, HAGEN E, PETERSEN G, et al. Pressureless sintering of titanium diboride with nickel, nickel boride and iron additives[J]. J Am Ceram Soc, 1997, 80(12): 3013– 3020.
- [4] 苗明清, 傅正义, 张金咏, 等. TiB₂ 基金属陶瓷的显微结构与力学性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(1): 64– 67.
- [5] GONZALEZ R, BARANDIKA M G, ONA D, et al. New binder phases for the consolidation of TiB₂ hardmetals [J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 216: 185– 192.
- [6] BHAUMIK S K, DIVAKAR C, SINGH A K, et al. Synthesis and sintering of TiB₂ and TiB₂-TiC composite under high pressure [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 279: 275– 281.
- [7] LI L H, KIM H K, KANG E S. Sintering and mechanical properties of titanium diboride with aluminum nitride as a sintering aid [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22: 973– 977.
- [8] 李荣久. 陶瓷-金属复合材料[M]. 第二版. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [9] 理查德 J 布鲁克. 陶瓷工艺(17A 卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] BAUMGARTNER H R, STEIGER R A. Sintering and properties of titanium diboride made from powder synthesized in a plasma-arc heater [J]. J Am Ceram Soc, 1984, 67(3): 207– 212.
- [11] 穆柏春. 陶瓷材料的强韧化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [12] LUNDE O, OLSEN B, NISANCIOGLU. Pre treatment of AA6060 aluminum alloy for adhesive bonding[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2002, 22: 143– 150.
- [13] ASTRID B, FABRICE L, JOHN W. Anodising as pre treatment for structural bonding[J]. International Journal of Adhe-

- sion & Adhesives 2003, 23: 401– 412.
- [14] OSBORNE J H, BLOHOWIAK K Y, TAYLOR S R, et al. Testing and evaluation of nonchromated coating systems for aerospace applications[J]. Progress in Organic Coatings 2001, 41: 217– 225.
- [15] ASTM D 1002-01, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal to Metal) [S]. Pennsylvania, USA: Annual Book of ASTM Standards, 2001.
- [16] 曾华梁, 杨家昌. 电解和化学转化膜[M]. 北京: 轻工业出版社, 1987.
- [17] 陈麓, 蔡其巩, 王仁智, 等. 工程断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [18] WANG Q Y, PIDAPARTI R M. Static characteristics and fatigue behavior of composite repaired aluminum plates[J]. Composite Structures, 2002, 56: 151– 155.

基金项目: 教育部优秀青年教师资助计划(No. 2003-79); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20030422012)

收稿日期: 2005-11-28; 修订日期: 2006-04-20

作者简介: 谷美林(1977–), 女, 博士生, 主要从事切削加工和高性能陶瓷刀具材料方面的研究, 联系地址: 山东大学南区, 机械工程学院博 2004, 济南市经十路 73 号(250061)。

(上接第 17 页)

- [5] BAKER A A. Fiber composite repair of cracked metallic aircraft components: practical and basic aspects[J]. Composites, 1987, 18(4): 293– 307.
- [6] BAKER A A. Reinforcement of the F-111 wing pivot fitting with a boron/epoxy doubler system materials engineering aspects[J]. Composites, 1993, 24(6): 511– 521.
- [7] 陈绍杰. 用复合材料技术修理金属飞机结构[J]. 航空制造工程, 1996, (9): 33– 34.
- [8] 陈绍杰. 飞机复合材料结构修理—世纪之交复合材料的现状与发展[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1998. 42– 47.
- [9] 徐建新. 复合材料补片胶接修理技术的研究进展[J]. 航空学报, 1999, (4): 381– 383.
- [10] 赵云峰. 表面处理对硅橡胶胶粘剂胶接性能的影响[J]. 化学与粘合, 2001, (2): 49– 51.
- [11] 陈明安, 张新明, 蒋志军, 等. 铝及铝合金表面处理后的表面特征和粘接特性[J]. 化学与粘合, 2001, (6): 262– 267.
- [12] LUNDE O, OLSEN B, NISANCIOGLU. Pre treatment of AA6060 aluminum alloy for adhesive bonding[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2002, 22: 143– 150.
- [13] ASTRID B, FABRICE L, JOHN W. Anodising as pre treatment for structural bonding[J]. International Journal of Adhe-

sion & Adhesives 2003, 23: 401– 412.

- [14] OSBORNE J H, BLOHOWIAK K Y, TAYLOR S R, et al. Testing and evaluation of nonchromated coating systems for aerospace applications[J]. Progress in Organic Coatings 2001, 41: 217– 225.
- [15] ASTM D 1002-01, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal to Metal) [S]. Pennsylvania, USA: Annual Book of ASTM Standards, 2001.
- [16] 曾华梁, 杨家昌. 电解和化学转化膜[M]. 北京: 轻工业出版社, 1987.
- [17] 陈麓, 蔡其巩, 王仁智, 等. 工程断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [18] WANG Q Y, PIDAPARTI R M. Static characteristics and fatigue behavior of composite repaired aluminum plates[J]. Composite Structures, 2002, 56: 151– 155.

收稿日期: 2005-09-08; 修订日期: 2006-04-05

作者简介: 杨孚标(1967–), 男, 副教授, 在职博士研究生, 从事聚合物基复合材料成型与修复方面的研究, 联系地址: 湖南长沙国防科学技术大学航天与材料工程学院 502 教研室(410073)。