第 15 卷　第 3 期　　复　合　材　料　学　报　　Vol 15　No. 3
1998 年　8 月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　August　1998

亚微米级 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的断裂行为

赵永春　武高辉
(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

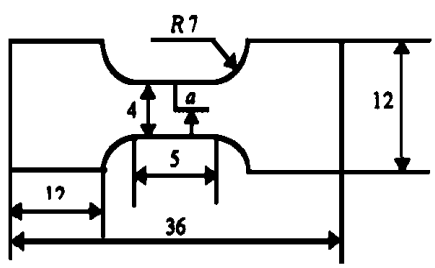
摘　要　本文通过对亚微米级 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的 SEM 的动态拉伸观察, 研究了该材料的微观断裂行为及其与宏观力学性能的关系, 定量地描述了亚微米级 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的断裂过程, 并讨论了该种复合材料的断裂机制。

关键词　亚微米, Al_2O_3颗粒, 复合材料, 断裂
中图分类号　TB331

作者研究开发的亚微米级 Al_2O_3颗粒增强铝基复合材料以其良好的精加工和二次加工性能及高强度、高塑性和高尺寸稳定性等优异机械性能, 展示了该种材料广阔的应用前景, 成为国内外关注的先进复合材料[1~3]。目前, 人们对 Al_2O_3颗粒增强铝基复合材料的断裂机制进行了许多有益的研究[4~5]。通常认为, 颗粒的加入往往伴随着复合材料断裂韧性的下降。一般情况下, 铝合金的平面应变断裂韧性大致在25～75MPa•m$^{1/2}$, 而与此同时, 复合材料的断裂韧性为7～25MPa•m$^{1/2}$[6]。许多研究者提出, 颗粒增强复合材料断裂韧性下降的原因主要包括: (1) 基体组织; (2) 界面特性; (3) 颗粒的分布; (4) 颗粒的尺寸及体积分数等。但对于亚微米级颗粒增强复合材料的断裂行为的研究还未见报道。为了进一步了解亚微米级 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的断裂特性, 本文采用 SEM 动态拉伸原位观察技术, 利用单边缺口试样(SENS), 在观察 Al_2O_{3P}/6061复合材料裂纹萌生、长大、扩展的同时, 定量地观量其断裂过程, 以期了解并揭示亚微米级 Al_2O_3颗粒在复合材料断裂过程中的作用和影响。

1　材料及实验方法

采用压铸工艺制备了 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料, 基体铝合金的成分如表1所示。颗粒的平均尺寸为0.4μm, Al_2O_3颗粒的体积分数分别为0%、22%、33% (记为 V_f0; V_f0.22; V_f0.33)。Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的力学性能如表2所示。单边缺口试样尺寸是根据 SEM 设备要求所设计的, 见图1。试样缺口用电火花切割, 宽度约为0.25mm, 缺口尖端半径约为80μm。动态拉伸实验是在 HITACHI S-570扫描电镜上进行的,



thickness d= 1.50; crack a= 1.75
图1　单边缺口试样尺寸示意图
(Configuration of the specimen with a single-side notch)

收修改稿、初稿日期: 1997-04-25, 1997-01-05

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

该设备可自动记录载荷-位移曲线, 最大载荷为200kg。在加载过程中, 定量地测量主裂纹的扩展长度和COD 之间的关系以及材料的R 曲线。在试样断裂后, 对断口进行SEM 观察分析。对于材料脆性评定方法采用K_0/K_{1c}比值法, 其中 K_0是裂纹开始萌生时的应力强度因子; K_{1c}是试样的断裂韧性。如果K_0/K_{1c}较小, 即 裂纹萌生、长大、扩展的过程较长, 则复合材料表现为韧性断裂。当K_0/K_{1c}趋近于1时, 复合材料则表现为脆性断裂。

表1 6061铝合金的成分 (Chemical composition of 6061 aluminum alloy) (wt%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Al
0.43	0.75	0.22	0.36	1.26	< 0.15	< 0.05	< 0.05	余量

表2 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料(铸造材)的力学性能

(Mechanical properties of Al_2O_{3P}/6061Al composites) (as cast)

材料	体积率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
6061Al	0	246	324	70.5
Al_2O_{3P}/6061Al	22	401	495	112
Al_2O_{3P}/6061Al	33	422	504	113

2 实验结果

图2(a)、2(b)分别是V_f0.22和V_f0.33 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的SEM 照片。从中可以看出, V_f0.33的复合材料中的颗粒分布比较均匀, 而V_f0.22的复合材料则在基体中存在许多颗粒贫化区, 这些贫化区的大小约为30～60μm, 分布较均匀。

V_f0.22的复合材料在加载初期时, 没有发现裂纹及滑移线, 随着载荷的增加, 在颗粒富集区中颗粒的界面处开始出现一些微裂纹。此时, 经计算K_0/K_{1c}= 0.85。当载荷的进一步加大, 微裂纹开始沿界面连接形成主裂纹并沿与拉伸轴垂直的方向扩展。继续加载, 如图3(a)所示, 裂纹将主要沿贫化区与富集区的交界处开裂。当裂纹难以绕过贫化区时, 裂纹尖端首先在贫化区钝化并产生许多滑移线, 随着应力的增加, 在原裂纹尖端附近萌生许多沿滑移线开裂的新裂纹。

(a) V_f= 22% (b) V_f= 33%

图2 复合材料显微组织的SEM 照片 (SEM microscopy of microstructure of Al_2O_{3P}/6061Al composites)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(a) V_f= 22%　　(b) V_f= 33%

图3　复合材料裂纹扩展的SEM 照片　(SEM microscopy of crack spread in Al_2O_{3P}/6061Al composites)

对于V_f0.33的复合材料, 由于颗粒细小且分布均匀、弥散, 裂纹萌生形核很难观察。当载荷增加到开始出现微裂纹时, K_0/K_{1c}经计算为0.92。微裂纹主要在Al_2O_3颗粒与基体的界面处形成。继续加载, 裂纹将沿与拉伸轴垂直的方向经颗粒与基体的界面扩展, 见图3(b)。当载荷增加至应力强度因子为9.6时, 会出现突发性扩展, 随即失效断裂。

对失效断口进行SEM 观察发现: V_f0.22复合材料的断面上有两种不同的韧窝, 一种韧窝小而浅, 如图4(a) 所示。另一种韧窝大而深, 如图4(b)所示。这是由于颗粒富集区和贫化区不同的断裂形式所引起的。由于贫化区中的颗粒间距较大, 颗粒间相互约束引起的界面上的三维约束力较小, 颗粒周围的基体可以充分地协调变形, 因而由贫化区颗粒引起的韧窝较大较深。而富集区中的颗粒间距小, 界面上的三维约束力相对较高, 颗粒周围的基体协调变形能力较弱, 因而表现为断口上的韧窝小而浅。同样, 对于V_f0.33的复合材料, 虽然颗粒分布十分均匀, 但由于颗粒十分细小, 颗粒含量较高, 使得颗粒间基体的变形空间减小, 界面上的三维约束力较高, 从而导致韧窝较浅减小, 见图4(c)。

图5为载荷-缺口根部张开位移曲线, 从中可以看出, 随着颗粒体积分数的增加, 材料的断裂过程变短。根据试验数据计算出该材料应力强度因子, 示于表3。

表3　Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料(铸造材)的断裂韧性

(Fracture toughness of Al_2O_{3P}/6061Al composites (as cast))

材料	体积率/%	K_0	K_{1c}	K_0/K_{1c}
6061Al	0	21.3	36.8	0.58
Al_2O_{3P}/6061Al	22	9.6	11.3	0.85
Al_2O_{3P}/6061Al	33	8.8	9.6	0.92

在材料断裂过程中, 随着载荷的变化, 材料对开裂的阻力也有变化, 如图6所示。Al_2O_3颗粒的含量越高, 材料对裂纹的阻力则越低。6061铝合金对裂纹的阻力明显高于V_f0.33的复合材料。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(a) 颗粒富集区的断口 V_f= 22% (b) 颗粒贫化区的断口 V_f= 22% (c) 复合材料断口形貌 V_f= 33%

(V_f= 22%, in particulate-rich zone) (V_f= 22%, in particulate-poor zone) (V_f= 33%, in normal zone)

图4 复合材料断口形貌的 SEM 照片(SEM fractographs of the Al_2O_{3P}/6061Al composite)

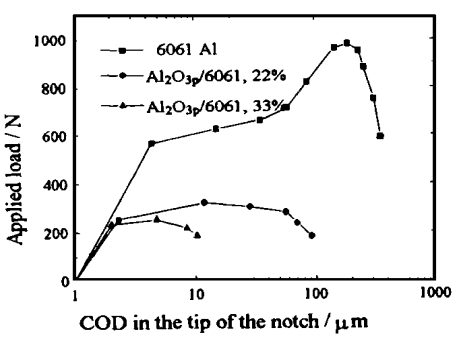


图5 载荷-缺口根部张开位移曲线

(Crack opening displacement *vs* load curves for composite)

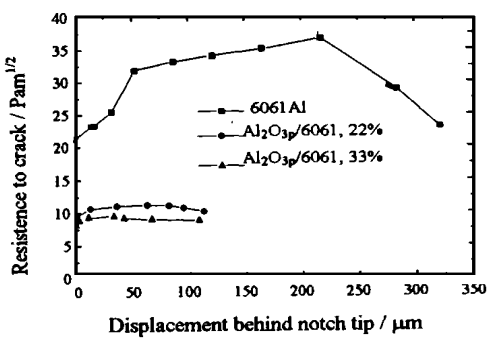


图6 复合材料的阻力曲线

(Crack resistance curves for composite)

3 讨 论

从亚微米级 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的动态拉伸的结果来看, 该种材料的变形及断裂与大颗粒增强复合材料有很大的不同。首先, 由于增强体十分细小, 在裂纹萌生之前, 颗粒参与基体晶粒的协同变形能力很强, 体现出较高的塑性[7]。J. Yang 和 C. Cady 等人对13μm～165μm 的 SiC 颗粒增强铝基复合材料的研究结果表明: 增强颗粒尺寸越小, 复合材料的流变能力越强[8]; 其次, 裂纹萌生后, 该种材料的断裂过程很短, 即裂纹扩展的阻力很小, 见图6。我们知道, 颗粒增强复合材料的断裂韧性主要是由裂纹前端的基体变形能力所控制, 而这种变形能力又与颗粒间距有关。H. J. Kim 等研究表明[9], 颗粒越细小, 体积分数越高, 材料的塑性变形区(PZ)越小, 从而使得断裂韧性越低, 当颗粒尺寸为12μm 时, V_f0.3复合材料的塑性变形区仅为60.0×18.4μm。因而, 对于颗粒尺寸仅为0.4μm 的复合材料来说, 其塑性变形区将进一步减小, 从而导致复合材料的断裂韧性降低。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Hahn 和 Rosenfild 给出了颗粒尺寸与断裂韧性的关系[6]:

$$K_c = [2\sigma_{ys}E(\pi/6)^{1/3}D]^{1/2}V_f^{-1/6} \quad (1)$$

其中: σ_{ys}为复合材料的屈服强度; E 为复合材料的弹性模量; D 为颗粒尺寸; V_f 为颗粒体积分数。经计算, 在满足平面应变判据 $B \geq 2.5(K_{1c}/\sigma_s)^2$ 的条件下(式中: B 为试样厚度; σ_s 为材料的屈服强度; K_c 为材料的断裂韧性。), V_f0.22和 V_f0.33的 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料的断裂韧性分别为7.5MPa•m$^{1/2}$和6.3MPa•m$^{1/2}$, 略低于实测值。这可能是由于公式(1)中没有考虑到增强颗粒形状的影响。本实验条件下, Al_2O_3颗粒为近似球形, 而通常较大颗粒的形状为尖角形或片状。因此, 建立在通常颗粒基础上的公式(1)所预测的值要低于本实验的实测值。

4 结　论

在扫描电镜下动态观察了单边缺口试样的断裂过程, 得到如下结果:

1 V_f0.22的 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料裂纹萌生部位主要为 Al_2O_3颗粒富集区, 裂纹主要沿富集区边缘及贫化区中颗粒与基体的界面扩展, 颗粒的贫化区对材料韧性有一定贡献;

2 V_f0.33的 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料裂纹主要在颗粒与基体的界面处萌生并沿界面扩展, 裂纹前端基体的变形量较小, 使得材料的断裂韧性较低;

3 亚微米级 Al_2O_{3P}/6061Al 复合材料, 具有高强度、高塑性及低断裂韧性的特点, 这与其组织特性有关;

4 K_0/K_{1c}可较客观地评价复合材料的断裂行为。

参 考 文 献

1 Wu G H, Zhao Y C, Kono N, Watanabe H. Key Eng Mat, Vol 104～107 Part 1, Trans tech publ Aedermannsdorf, Switzerland, 1995. 467～474

2 Wu G H, Zhao Y C, Kono N, Watanabe H. ibid, 647～654

3 Wu G H, Ma S L, Kono N, Watanabe H. ibid, 459～466

4 Llorca J, Poza P. Mater Sci & Eng, 1994, A185: 25～31

5 Wu Gaohui, Kono Norio, Watanabe Hisafuji, Takahashi Tsuneo. Scripta Metall, 1993, 28: 683～688

6 Davidson D L. Metall Trans, 1991, 22A (1): 113～119

7 赵永春, 马森林, 武高辉. 亚微米级 Al_2O_{3P}/6061复合材料的显微组织与力学性能. 96 中国材料研讨会论文集

8 Yang J, Cady C, Hu M S, Zok F, Mehrablan R, Evans A G. Acta Metall Mater, 1990, 38(12): 2613～2619

9 Kim H J, Kobayashi T, Yoon H S. Mater Sci & Eng, 1992, A154: 35～41

FRACTURE BEHAVIOR OF 6061Al ALLOY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH SUBMICRON Al_2O_3 PARTICULATES

Zhao Yongchun　　Wu Gaohui

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract　In the present study, the fracture behavior of Al_2O_{3P}/6061Al alloy composites and the relationship between fracture process and mechanical properties were studied by SEM dynamic tensile stage. The fracture process of the composites was depicted quantitatively, and the toughness of the composites was discussed.

Key words　submicron, Al_2O_3 particulates, composites, fracture

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net