第 16 卷 第 2 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 2
1999 年 5 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA May 1999

Al_2O_3/TiC 复合陶瓷高温弯曲强度与弯曲切口强度研究

赵 康 王 泓 鄢君辉 郑修麟
(西北工业大学材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要 研究了 Al_2O_3/TiC 复合陶瓷的高温弯曲断裂强度和弯曲切口强度。实验结果表明, 该材料在600℃以下, 弯曲强度基本没有变化, 800℃时弯曲强度开始下降。600℃弯曲切口强度与室温切口强度变化规律相同, 可以由室温弯曲切口强度关系式预测。800℃时切口敏感性降低, 弯曲切口强度与室温下切口强度的变化规律不同。另外, 对弯曲强度试样结果进行统计处理, 分析表明该陶瓷材料的室温和高温弯曲强度和弯曲切口强度均符合Weibull 分布; 相同温度的弯曲强度与切口强度的Weibull 模数基本相同; 高温弯曲切口强度分散性均小于室温弯曲切口强度分散性。该结果为陶瓷构件在高温下的安全可靠性设计提供了指导。

关键词 弯曲强度, 弯曲切口强度, Weibull 分布, Al_2O_3/TiC 陶瓷
中图分类号 TQ 174; O 346

金属陶瓷是一种迅速发展的新型陶瓷。由于金属陶瓷具有良好的抗氧化性, 抗热震性, 因而在航空、航天、能源及机械制造领域广泛使用[1,2]。Al_2O_3/TiC 是一种应用广泛的新型金属复合陶瓷, 主要用做耐高温耐磨损结构零件。目前还是一种新型刀具材料, 随着数控机床切削速度的提高, 以及高硬度材料的加工, 对刀具的耐磨性和高温性能提出了更高的要求。因而研究该陶瓷的高温强度是非常重要的。另一方面在零件设计中常存在几何不连续结构, 如台阶、螺纹、连接孔等, 这将造成应力集中, 广义上称"切口"。以往对韧性材料的切口强度进行了广泛的研究[3], 陶瓷材料切口敏感, 随着先进陶瓷材料的推广应用, 研究陶瓷材料切口强度显得十分重要[4]。目前对陶瓷材料的切口强度研究还很少, 而且仅限于室温条件的切口研究[4,5]。高温切口强度研究尚未见报道。本文中对 Al_2O_3/TiC 陶瓷材料的高温弯曲强度和切口强度及其分布进行了实验研究, 为该材料在高温下的安全可靠性设计提供了指导。

1 实验方法

试验用材料为 Al_2O_3/TiC, 成分列于表1。将该成分粉末经过160小时球磨, 平均粒径为: 0.5～0.7 μm, 真空干燥处理后热压, 热压工艺为: 1750 ℃×15 min×25 MPa。试样经过切割、磨削和手工研磨最终尺寸为3 mm ×4 mm ×36 mm, 切口部分由高精度光学磨床加工, 切口深度均为0.9 mm, 切口半径为0.5 mm 和1.2 mm, 见图1所示。查得应力集中系数分别为[6]: 3.2和2.0。试验设备为 EA-10型岛津电液伺服疲劳试验机, 载荷精度为0.1 %, 加载方式采用

收修改稿、初稿日期: 1998-04-28, 1997-12-18

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

位移控制, 加载速率控制为0.1 mm/min。试样在空气介质中加热, 炉温控制精度在±1℃。试验温度选取了800 ℃、600 ℃和20 ℃, 试件加热到预定温度后保温20 min。每种试验条件均做8件。弯曲断裂强度 σ_f 和切口强度 σ_{bN} 按下式计算:

$$\sigma_f = 3PL/2bh^2 \tag{1}$$

$$\sigma_{bN} = 3PL/2b(h-d)^2 \tag{2}$$

式中: P—断裂载荷, L—试样跨距(取30 mm), b—试样宽度, h—试样高度, d—切口深度。

表1 Al_2O_3/TiC 陶瓷的主要成分范围

Table 1 Compositions of Al_2O_3/TiC ceramics

组成	Al_2O_3	TiC	Mo、Ni、MgO 等
含量/wt%	55~60	35~40	5

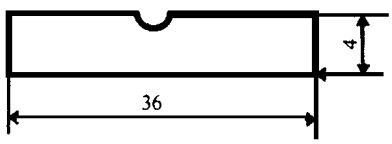

图1 切口试样图

Fig. 1 Scheme of notch flexure specimen

2 实验结果与分析

2.1 高温弯曲断裂强度

将试验测定的弯曲断裂载荷 P, 分别带入式(1)和式(2)计算出弯曲断裂强度与切口强度。然后对不同温度的弯曲断裂强度与切口强度分别求算术平均值进行分析。图2是不同温度下的弯曲强度和切口强度。由图2可以看出该陶瓷材料在600℃以下弯曲断裂强度基本没有变化, 在800℃, 弯曲断裂强度有一些降低。这说明含有少量的金属粘结剂的 Al_2O_3/TiC 复合陶瓷材料在800℃已经出现了软化。不同应力集中下的弯曲切口强度(K_t= 3.2, 2.0), 也有类似的变化规律。从断口观察可以发现600℃以下断口呈现出明显的脆性断裂, 而800℃下可以看到少量的塑性变形。如图3所示。

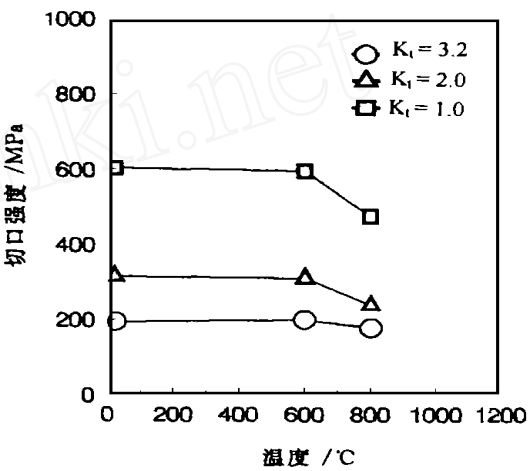

图2 不同温度下弯曲强度的变化结果

Fig. 2 The relationship between the flexure strength and temperature

图3 试样断口形貌 Fig. 3 SEM fractographs

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

2.2　切口强度与应力集中的关系

文献[7]对切口件的断裂过程进行了分析, 并假定切口根部材料单元的断裂面形成裂纹, 而裂纹形成后立即引起切口件的断裂, 从而导出脆性材料的切口强度表达式

$$\sigma_{bN} = \sigma_f / K_t \tag{3}$$

式中: σ_{bN} 为切口强度, σ_f 为断裂强度, 即弯曲强度。K_t 为应力集中系数。在室温下该式已经得到不同陶瓷材料的证明[5]。

根据式(3)并利用光滑试件测定的高温弯曲强度的平均值($K_t = 1$), 可以求出不同温度的切口强度

$$600℃ \quad \sigma_{bN} = 603/K_t \ \text{MPa} \tag{4}$$

$$800℃ \quad \sigma_{bN} = 475/K_t \ \text{MPa} \tag{5}$$

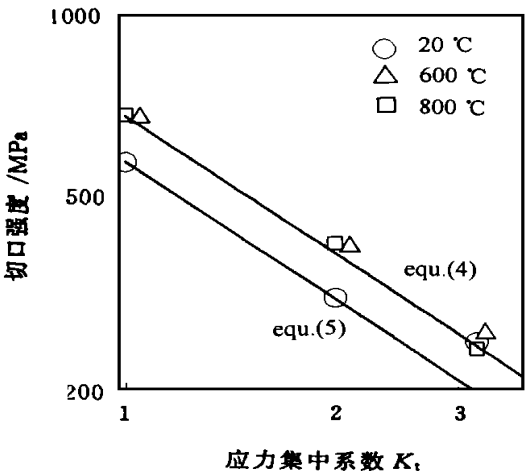

图4　高温弯曲切口强度与应力集中 K_t 的关系

Fig. 4　The relationship between notch flexure strength and stress concentration factors(K_t)

将式(4)和式(5)绘于强度与应力集中系数组成的双对数坐标图上, 如图4, 由此可见, 600 ℃试验值与按照式(3)预测结果相吻合, 即符合室温条件下的切口强度规律。而800 ℃切口强度在 $K_t = 3.2$ 时相差较大, 表现出高温切口效应降低, 因而按式(3)预测是相对过于保守。高温陶瓷材料的切口强度变化规律还需要进一步研究。

2.3　弯曲强度概率分布

由于陶瓷材料的强度分散性较大, 因而要对实验结果采用统计方法处理。目前流行的方法是按Weibull 分布处理。将 Al_2O_3/TiC 复合陶瓷材料的弯曲断裂强度与切口强度的实验结果分别按升高的顺序重新排列, 以平均秩作为试件失效概率 F 的估计值[8]。并画在Weibull 坐标纸上, 如图5所示, 进行线性回归分析。经过线性相关性检验[9], 可以认为该材料在各温度下的弯曲断裂强度与切口强度都符合Weibull 分布。另外, 对反映分散性的Weibull 模数, 即回归直线斜率分析可以看出: 在相同温度下, 弯曲断裂强度和切口强度的Weibull 模数基本相同, 具体模数值分别为: 20 ℃, $m = 4.4 \pm 0.3$; 600 ℃, $m = 4.9 \pm 0.2$; 800 ℃, $m = 5.1 \pm 0.2$。显然该材

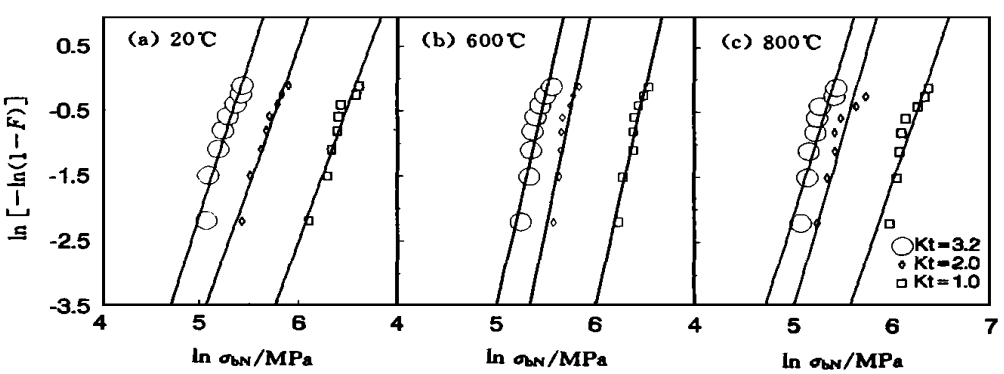

图5　Al_2O_3/TiC 复合陶瓷高温切口强度的Weibull 分布

Fig. 5　Weibull distribution of notch flexure strength of Al_2O_3/TiC ceramics

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

料室温模数值最小, 说明分散性最大。而在800 ℃的模数值明显增加, 说明高温分散性减小, 这可能是由于高温下表面缺陷有一定弥合, 引起强度分散性降低。该结果对Al_2O_3/TiC 复合陶瓷材料在高温下可靠性分析具有实际指导意义。

3 结 论

(1) Al_2O_3/TiC 复合陶瓷材料在600℃以下弯曲断裂强度与切口强度没有显著的变化, 在800℃以上, 弯曲断裂强度与切口强度开始下降。

(2) Al_2O_3/TiC 复合陶瓷材料在600℃以下, 不同应力集中的弯曲切口强度可用室温切口强度关系式预测。800℃的切口强度与室温切口强度变化规律不同, 表现出高温切口敏感度降低。

(3) Al_2O_3/TiC 复合陶瓷高温和室温弯曲断裂强度及切口强度均符合Weibull 分布。相同温度的弯曲强度及切口强度的Weibull 模数基本相同。高温下弯曲强度及切口强度的分散性明显降低。

参 考 文 献

1 李荣久. 陶瓷-金属复合材料. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 227～230

2 [日]樱井良文. 陈俊彦, 王余君译. 新型陶瓷材料及其应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 248～253

3 Joe Wolf. Aerospace structural metals handbook. Belfour Stulen Inc, 1974. 7～14

4 Wang Fenghui, Zheng Xiulin, Lu Meixu. Notch strength of ceramics and statistical analysis. *Eng Fracture Mechanics*, 1995, 52(5): 417～421

5 鄢君辉, 赵康, 郑修麟. 陶瓷材料切口强度及概率分布的研究. 无机材料学报, 1997, 13(4): 449～456

6 西田正孝. 应力集中. 北京: 机械工业出版社, 1986. 414～420

7 Zheng Xiulin. On a unified model for predicting notch strength and fracture toughness of metals. *Eng Fract Mech*, 1989, 33(5): 685～695

8 Fernandez J, Chao J, Duran J, *et al*. Estimation lower-bound fracture parameters for brittle materials. *J Mater Sci Letters*, 1993 (12): 1493～1496

9 潘维栋. 数理统计方法. 上海: 上海教育出版社, 1980. 122～132

HIGH TEMPERATURE NOTCH FLEXURE STRENGTH AND ITS PROBABILITY DISTRIBUTION OF Al_2O_3/TiC CERAMICS

Zhao Kang Wang Hong Yan Junhui Zheng Xiulin

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Notch flexure strength of Al_2O_3/TiC ceramics was tested at 20℃, 600℃and 800℃. Results show that the flexure strength keeps constant up to 600℃, and notch flexure strength can be calculated by equation (3). At 800℃, the flexure strength decreases, and the notch flexure strength doesn't obey equation (3) as the notch sensitivity decreases. The probability tests at high temperature show that the flexure strength and notch flexure strength follow Weibull distribution. The Weibull modules of various K_t are a constant at the same testing temperature. The dispersion of the values of flexure strength and notch flexure strength at 800℃ is lower than that at 20℃.

Key words notch flexure strength, flexure strength, probability distribution, Al_2O_3/TiC ceramics

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