

陶瓷刀具材料增强增韧机制的研究

李永洪 王晓华 徐 炜

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

潘敏元 潘 明

(西安理工大学特殊陶瓷研究所, 西安 710048)

李远松

(北京粉末冶金研究所, 北京 100078)

摘要 用透射电子显微镜和扫描电子显微镜研究了金属陶瓷增强增韧机制, 并用高压电子显微镜动态拉伸研究了第二相粒子对裂纹扩展的影响。

关键词 金属陶瓷 增强增韧机制 刀具材料

随着高、新技术的发展, 机械加工业对刀具材料也提出了更为严格而苛刻的要求。例如加工硬度更高的材料、更高的切削效率、精加工和实现无人操作等, 这就要求提高刀具材料的强度、韧性、耐磨和耐热冲击性等。因此陶瓷刀具、金刚石刀具等新的加工工具相继出现, 并且用量逐年增加。陶瓷材料具有高熔点、高压缩强度和抗腐蚀性好等特点, 但由于其化学键的离子共价特性、陶瓷材料脆、抗拉强度低和耐冲击性差, 所以作为工具材料, 要在实际中广泛应用, 必须大力提高这些材料的机械性能。围绕着增韧的问题, 在理论上和工艺上都进行了大量的研究工作, 特别是近 10 年来, 陶瓷刀具材料在品种增多和性能提高方面都有了很大的进展。陶瓷刀具材料用量大约以每年 3%~5% 的速度增加。本文叙述对金属陶瓷刀具材料的一些研究结果, 主要涉及利用扫描电子显微镜和透射电子显微对这些材料的微观结构和成分的研究, 着重讨论了这类材料中的一些增强增韧机制。

1 实验程序

本研究所用试样是由 $\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$, $\text{N} + \text{金属}$ 组成的金属陶瓷, 其中也有加一定量 ZrO_2 , 其工艺流程如下:

原料处理 → 配料 → 球磨 → 过筛 → 真空干燥 → 氮流过筛 → 热压。

本研究共用 7 种样品, CM 系列和 NC 系列的差别在于 NC 系列包括氮化物组分, 2# 和 3#, 5# 和 6# 的组分分别相同, 差别在于热压温度。

将所得到的不同工艺条件和组分的试样测抗弯强度、高温硬度和断裂韧性。同时将各组样品做扫描电子显微镜试样和透射电子显微镜试样, 分别在带能谱的 JSM-840 型扫描电子显微镜和 JEM-2000FX 型高分辨分析电子显微镜上进行微观组织和成分的分析及研究, 在 JEM-1000 型高压电子显微镜中进行拉伸原位观察试验。抗弯强度由国家重点实验室 - 西安

交通大学机械强度与振动实验室测试,断裂韧性用直接压痕法和切口梁法、HRA 的测定均由陕西省计量测试研究所完成。

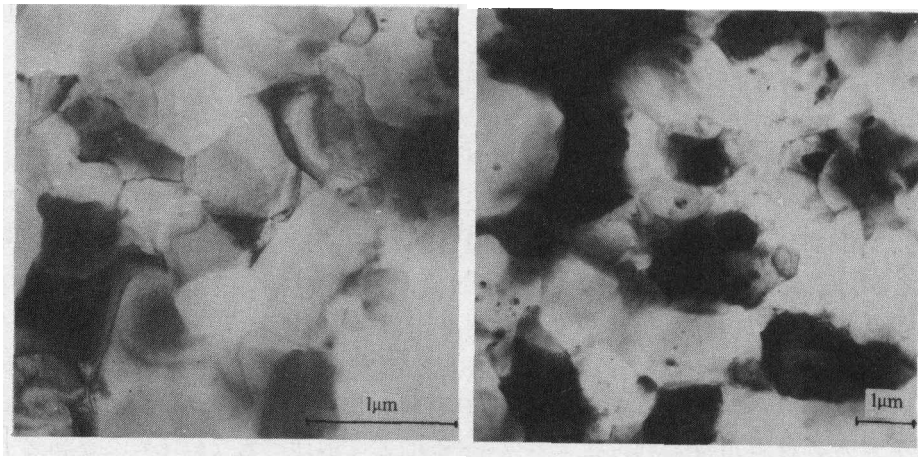
2 结果与讨论

2.1 微观组织对力学性能的影响

表 1 列出了试样抗弯强度、硬度和晶粒尺寸。

表 1

试样号	CM35 1#	CM35 2#	NC40 3#	NC40 4#	NC60 5#	NC60 6#	CM55 7#
σ_b /MPa	1 242	585	1 239	350	1 379	459	1 271
HRA	94.0	93.5	93.5	93.5	94.0	94.0	94.4
晶粒尺寸/ μm	0.65	>1.5	0.65	1.5	0.55	1.5	0.6



(a)

(b)

图 1 显示成分相同,而工艺条件不同的两个试样的晶粒
(a)相应试样的抗弯强度为 1 239 MPa, (b) 相对应的试样,其抗弯强度为 350 MPa

从表 1 可以看出,凡是抗弯强度在 1 239 MPa 以上的试样,其平均晶粒尺寸都在 0.55 ~ 0.65 μm 范围内,而几个抗弯强度差的试样(成分分别与抗弯强度好的试样一样,但工艺条件不同即热压温度不同),其平均晶粒尺寸 1.5 μm 或大于 1.5 μm 。图 1 示出了一个例子。

抗弯强度好的试样,其微观组织的另一个特点是晶粒尺寸均匀。这是可以理解的,因为抗弯强度 $\sigma_b = \frac{1}{y} \cdot \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a}}$, 式中 K_{Ic} 是断裂韧性, y 是形状系数,是一个常数, a 是材料中的缺陷尺寸。这里所说的缺陷,指的是陶瓷材料制备过程中残留的气孔,多晶体中的粗大晶粒,成型过程中混入的夹杂物以及刀具在加工和使用过程中产生的表面裂纹等。所以,为了提高陶瓷材料的强度和韧性,不仅希望得到小的晶粒,而且晶粒尺寸也要尽可能均匀。这样可以减少应力集中的地点,从而减少裂纹形核的地点。同时由于应力集中的消除,就防止了裂纹的扩展。我们观察的抗弯强度高的试样,都具有这样的微观组织特征。

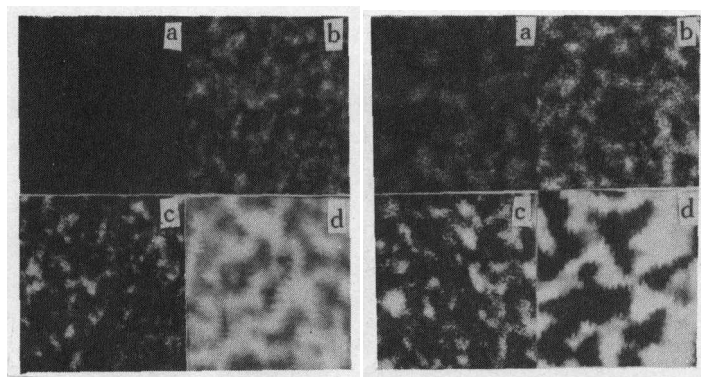


图 2 3#(左图)和 4#(右图)试样的扫描电子显微镜象

a, b, c 分别为 Al, Ti 和 W 的面扫描象, d 为 SEM 象, W 是硬质合金球磨时引入的

2.2 成分对力学性能的影响

由于机械加工业中,被加工的材料多种多样,加工的要求也各不相同,目前还没有一种万能的刀具可以满足各类切削加工的要求. 因此刀具材料研究者们不得不研究各种不同类型不同成分的材料来满足刀具生产的要求. 即使是同一组分,由于配比的改变,性能也会有很大差异,尽管其工艺条件一样. 在本研究中,由于试样主成分(W, Ti)C, N 和 Al_2O_3 的比例改变,抗弯强度就显著改变. 例如 NC40 和 NC60 两种试样,由于这种成分比例上的变化,NC40 的抗弯强度为 1 239 MPa,而 NC60 的抗弯强度为 1 379 MPa(均为算术均值). 另外,扫描电子显微镜能谱分析的结果表明,抗弯强度有差别的样品,其成分分布也有明显差别. 图 2 分别为 3# 和 4# 试样的扫描电子显微镜照片. 对比图 2 左右图,可以看出,左图的成分分布更为均匀,这和 3# 样品的性能比 4# 样品性能好这一事实是一致的.

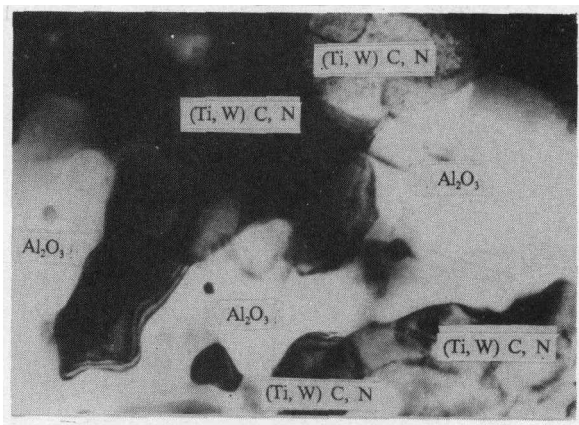


图 3 NC60 试样的显微照片

图 3 是在 JEM-2000FX 高分辨分析电子显微镜上拍摄的透射显微照片,各晶粒的能谱分析结果标在上面. 从照片上可以看出,凡是有 W 分布的区域,都测到 Ti. 从图 2 中 Ti 和 W 的面扫描象可以看到同样的分布情况. 能量损失谱分析表明,这些晶粒中还含有 C 和 N(见图 4),因此可以判定这些区域是(Ti, W)C, N. 性能好的样品,不仅其成分分布均匀,而且在所有的试样中也未发现气孔和空洞. 图 5 是 NC60 试样的电子显微照片,如照片中所标明那样在晶界处和三角晶界交叉处都存在粘结金属相. 这说明所选粘结金属对各种陶瓷相的润湿性很好. 粘结相的选择是很重要的,特别是在多相复合陶瓷中. 例如本研究中,因为既有 Al_2O_3 和 Al_2O_3 之间的或(Ti, W)C, N 之间的结合,又有 Al_2O_3 和(Ti, W)C, N 之间的结合,所以粘结金属应选择对两者有尽可能小的润湿角.

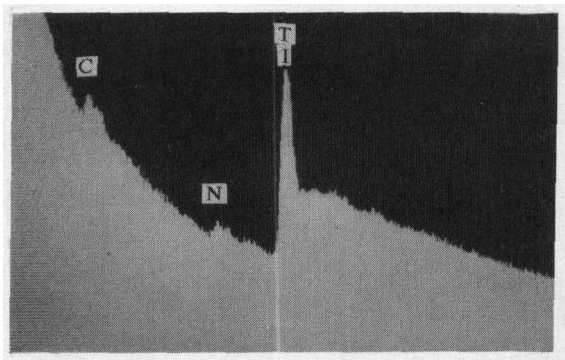


图 4 NC60 试样的电子能量损失谱

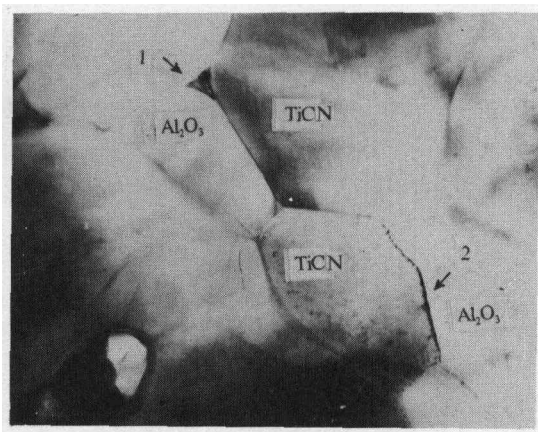


图 5 晶界和三角界交叉的粘结金属

图中 1、2 为粘结金属

2.3 几种增强增韧机制的观察

当作用在材料上的应力超过一定值时,就会在材料中某些应力集中区域或薄弱点产生空

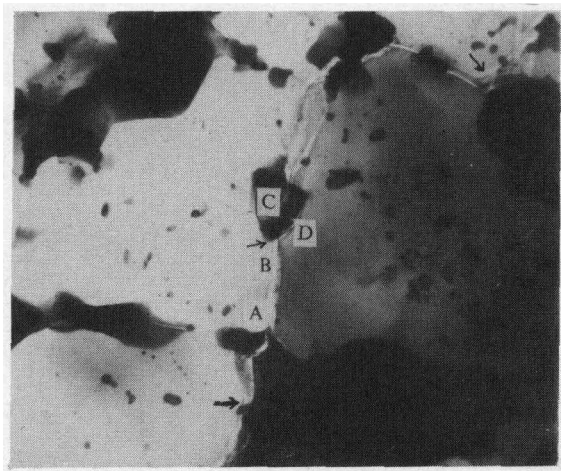


图 6 第二相粒子对裂纹扩展的影响

洞或微裂纹。当应力足够大时,裂纹就要扩展。在 Al_2O_3 中,无论裂纹沿晶界扩展,还是穿过晶界在晶内扩展,裂纹两边都平直。当裂纹在穿过 Al_2O_3 晶粒再遇晶界时,裂纹可能偏离原传播方向,但裂纹的宽度基本不变。

如果裂纹尖端遇到其它相,此时裂纹就会受阻而停止向前扩展。在这样的情况下,如果继续加大应力,则会有两种可能发生:一是裂纹改变传播方向,以薄弱区为路径扩展。二是将第二相粒子拉破,裂纹穿过第二相粒子继续向前扩展。图 6 中裂纹 AB 在传播过程中,

遇到粒子 C 的阻碍,就改变方向,向 D

传播,这就是裂纹折射增韧机制。裂纹所偏离的角度与第二相粒子的取向和位置有关。EVANS 等^[1]的计算结果表明,在折射增韧机制起作用时,材料增韧的增韧效果与第二相粒子的形状和所占的体积比有关。另外还观察到由于第二相粒子的作用,发生裂纹分叉的现象,如图 6 中箭头所指的地方。这就使传播裂纹尖端集中的应力分散到基体中,从而阻止裂纹的进一步扩展,这也就提高了陶瓷工具抗破损的能力。裂纹传播路径上有的粒子被拉断,图 7 是在高压电子显微镜内对这一过程进行拉伸动态观察的一个例子。

请注意箭头所指处。裂纹首先被第二相粒子 A 折射,裂纹传播方向改变。在裂纹的尖端的另一粒子受到拉应力,已开始形成微裂纹。从图 7(a)到 7(b)中消光轮廓的变化,可知箭头所指处受到的应力。当进一步增大拉应力时,粒子被拉断,应力松弛,消光轮廓即消失,见

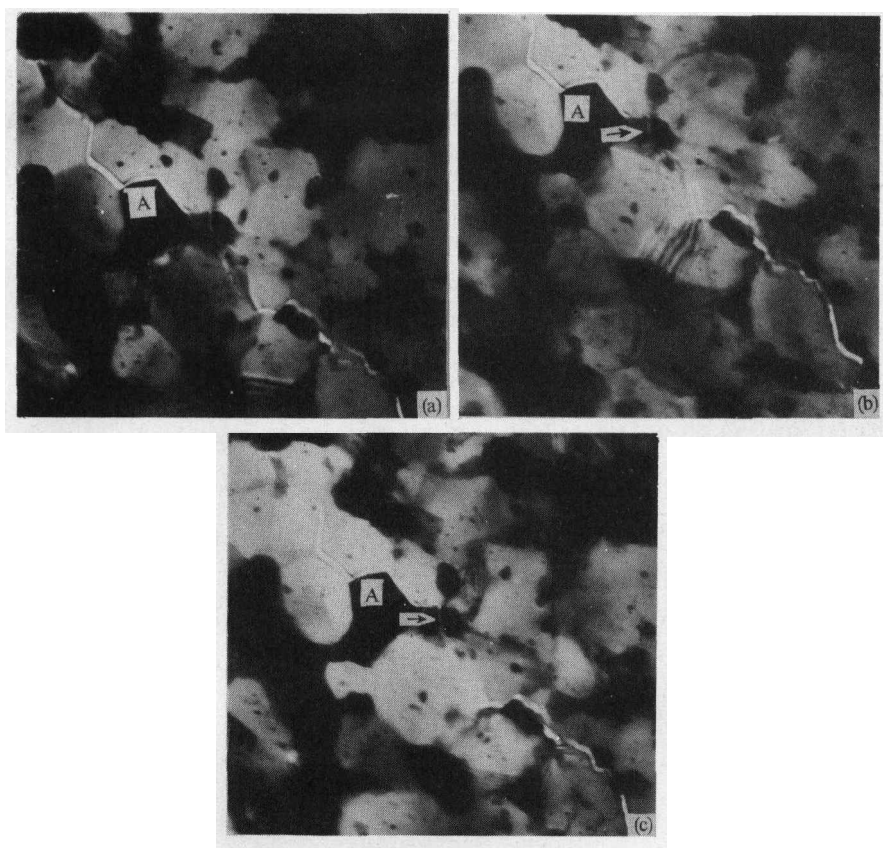


图 7 在高压电子显微镜内拉伸动态试验中观察第二相粒子被拉断的动态过程

(a) 裂纹传播过程中与第二相粒子 A 相遇, 被粒子 A 折射而改变传播方向, 裂纹尖端另一粒子由于受到应力, 开始形成微裂纹 (见图中箭头所指处), (b) 可看到消光轮廓发生变化, 然后粒子被拉断 (见图 (c))

图 7(c). 显然, 这些第二相粒子对提高金属复合陶瓷材料的强度有利. 另外从被拉断粒子的断裂面看, 也存在某种程度的塑性变形特征, 所以它们实际上对材料也有一定的增韧作用.

在图 8 中, 可看到一个裂纹止于晶粒 A 内. 电子衍射分析和形貌特征均说明这是 $m\text{-ZrO}_2$ 粒子, 本文部分作者和其他研究者曾在电子显微镜内对氧化锆增韧氧化铝陶瓷材料的 $t\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$ 马氏体相变进行过动态观察¹⁾, 包括电子辐照产生的局部热应力和拉伸应力引起的应力诱发马氏体相变过程. 前一种实验主要是研究应力诱发马氏体相变

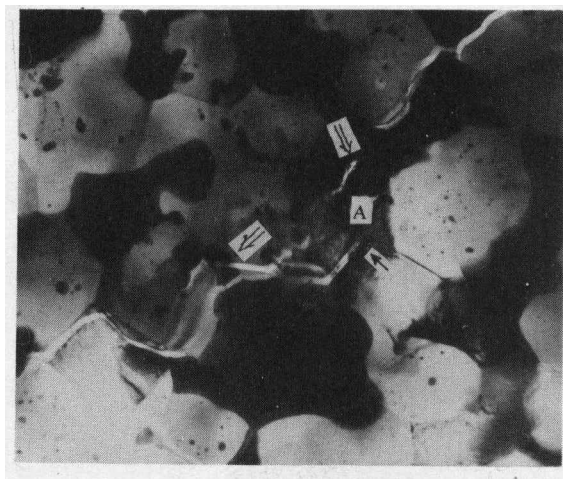


图 8 裂纹止于第二相粒子

1) 徐 昕. 氧化锆增韧氧化铝材料的电镜研究. 研究生论文, 1988, 8

的物理过程,而后一种实验则侧重于研究材料中裂纹扩展与这种相变的交互作用过程,即侧重于材料的增强增韧机制的研究.所以图 8 也提供了一个在本复合陶瓷材料中 ZrO_2 粒子相变阻止裂纹扩展,即相变增韧机制起作用的实例.在图 8 中还可以看到在晶粒中存在着许多小的粒子,其大小为几纳米至几十纳米.可以想象,在存在着这种纳米粒子的材料中,位错要发生运动就困难得多.因此这些粒子的存在对提高材料的强度有好处.在材料受到应力时,这些位错是很难发生滑移的,即使是在形变时产生新位错,也会因为这些粒子的钉扎作用而很难发生滑移.不过从试验结果看,这种微小粒子只起增强的作用,而对韧性的改善并不显著.

从原则上讲,凡是减少裂纹萌生和阻止裂纹扩展的因素都对材料的增强增韧有作用.

3 结束语

(1) 陶瓷材料的力学性能,与其成分和微观组织有密切关系.

(2) 本研究观察到的一些增强增韧机制有 (a) 裂纹折射, (b) 裂纹分叉, (c) $t\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$ 马氏体相变, (d) 晶粒细化, (e) 弥散在基体中的纳米粒子.

参 考 文 献

- 1 Evans A G. Crack deflection processes-I. Theory Acta Met, 1983, 31: 565