

# 多相复合陶瓷刀具材料的设计与制备

许崇海<sup>1</sup>, 艾兴<sup>2</sup>

(1. 山东轻工业学院机电工程系, 济南 250100; 2. 山东大学机械工程学院, 济南 250061)

**[摘要]** 陶瓷材料的多相复合与计算机辅助设计是 21 世纪先进陶瓷材料的重要发展趋势。文章采用理论与实验相结合的方法, 建立了多相复合陶瓷刀具材料力学性能与材料组分之间关系的数学模型, 采用计算机辅助优化设计技术求得材料的最优组分。在此基础上, 利用热压技术制得一种  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  多相复合陶瓷刀具材料, 该材料具有良好的综合力学性能。

**[关键词]** 陶瓷刀具材料; 多相复合; 材料设计; 模型; 力学性能

## 1 引言

根据使用要求, 对陶瓷刀具材料进行计算机辅助设计, 是陶瓷刀具材料研究的重要方向<sup>[1,2]</sup>。刀具材料组成、微观结构和工艺的设计与确定, 其依据是使用要求和材料性能。可以说, 当前陶瓷刀具材料设计势在必行, 而材料设计与计算机密切相关<sup>[3]</sup>。计算机优化设计和仿真技术的出现与发展, 为陶瓷刀具材料的深入研究提供了有力的方法和工具。利用计算机高速度计算和处理多自由度复杂体系的能力, 通过探索组分、工艺、微观结构和物理力学性能之间的定量关系, 并采用计算机辅助设计等方法, 实现由组分到微观结构以及物理力学性能和切削性能的预测, 以此为基础, 反过来进行组分和微观结构设计, 即可满足预期的性能要求。

陶瓷刀具材料的力学性能取决于其微观结构, 而微观结构又取决于材料组分和制备工艺。在很多情况下, 制备工艺参数基本上是稳定的, 随配方不同可作调整。此时, 可近似地认为力学性能是材料组分的唯一响应。但是, 陶瓷刀具材料的制备是一个复杂的过程, 受其影响, 材料的力学性能与各组分之间的响应函数也很复杂, 一般很难推出其理论关系式。为此, 本文基于“黑箱”理论, 运用逐步

回归分析及相应的计算机辅助设计方法, 建立力学性能与材料组分关系的模型, 并对  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  组分系统作了分析, 为后续的多相复合陶瓷刀具材料设计奠定基础。

## 2 力学性能与材料组分的关系

### 2.1 模型的建立

设多相复合陶瓷刀具材料的总相数为  $n$ , 则复合材料的抗弯强度  $\sigma_f$  可分解为以下几部分:

$$\sigma_f = \sum_i \Delta\sigma_i + \sum_{i < j} \Delta\sigma_{i,j} + \dots + \sum_{i < \dots < j < \dots < k} \Delta\sigma_{i,\dots,j,\dots,k} \quad (1)$$

$i, j, k = 1, 2, \dots, n$

式中  $\Delta\sigma_i$  为单一相对复合材料抗弯强度的贡献,  $\Delta\sigma_{i,\dots,j,\dots,k}$  为各相粒子相互作用的交互项。

以各组分的体积分数表示, 则有:

$$\sigma_f = \sum_i b_i V_i + \sum_{i < j} b_{ij} V_i V_j + \dots + \sum_{i < \dots < j < \dots < k} b_{i,\dots,j,\dots,k} V_i \dots V_j \dots V_k, \quad (2)$$

式中  $b_i$  为单相组分的作用系数,  $b_{i,\dots,j,\dots,k}$  为多组分时的作用系数,  $V$  为各组分的体积分数。

具体到某一组三相复合陶瓷刀具材料, 考虑到一般配方设计中常用的 Scheffe 完全三次多项式<sup>[4]</sup>, 所确定的备选自变量列于表 1。为了扩大选择范

围,表中还列出其他一些初等函数作为自变量。

表1 备选自变量

Table 1 Independent variables to be selected

编号	变量	编号	变量	编号	变量	编号	变量
1	$V_1$	4	$V_2^2$	7	$V_1^2 V_2^2$	10	$e^{V_1}$
2	$V_2$	5	$V_1 V_2$	8	$\ln(1 + V_1)$	11	$e^{V_2}$
3	$V_1^2$	6	$V_1 V_2 (V_1 - V_2)$	9	$\ln(1 + V_2)$		

在筛选过程须先把非线性项线性化,即令:

$$\begin{cases} x_1 = V_1 \\ \vdots \\ x_4 = V_2^2 \\ \vdots \\ x_{11} = e^{V_2} \end{cases} \quad (3)$$

这样,抗弯强度与材料组分的关系可用下面的广义线性模型来近似:

$$\sigma_f = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_i x_i + \dots + a_l x_l \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, l$

式中  $x_i = x_i(V_1, V_2, \dots, V_n)$ ,  $l$  为自变量个数,此处  $l = 11$ 。这样,就建立了抗弯强度与材料组分之间的关系:

$$\sigma_f = f_3(V_i) \quad (5)$$

同理,可以建立断裂韧性和硬度与材料组分之间的关系。根据逐步回归方法计算原理<sup>[5]</sup>,采用 QBASIC 编制了相应的计算软件与优化设计软件。

## 2.2 结果与分析

采用热压法制备材料,制备工艺见文献[6],采用三点弯曲法测定材料的抗弯强度,采用维氏硬度计 HV-120 测定材料的显微硬度,断裂韧性采用压痕法测量。为了消除系统误差的影响,选择相对密度 > 98% 的致密试样的力学性能测试结果及其相应组分作为研究数据。对于  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  陶瓷刀具材料,相应的测试结果见表2、表3和表4。

通过逐步回归计算分析,得到如下统计模型:

$$\begin{aligned} \sigma_f = & 487 - 6\,724 V_2 - 1\,943 V_1^2 - 3\,365 V_1 V_2 + \\ & 3\,960 V_1 V_2 (V_1 - V_2) + 1\,173 \ln(1 + V_1) + \\ & 8\,710 \ln(1 + V_2) \end{aligned} \quad (6)$$

该方程的复相关系数  $R = 97.3\%$ , 剩余均方差的估计值  $\hat{\sigma} = 24 \text{ MPa}$ , 回归模型的检验统计值  $F = 23.7 > F_{0.01}(2, 12) = 6.93^{[5]}$ , 因此,该回归模型在  $\alpha = 0.01$  的水平上是高度显著的,而且高的

表2  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  陶瓷刀具材料组分系统的抗弯强度

Table 2 Flexural strength of  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  ceramic tool materials

编号	$V_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ /%	$V_{\text{SiC}}$ /%	$V_{(\text{W}, \text{Ti})\text{C}}$ /%	$\sigma_{\text{FE}}$ /MPa	$\sigma_{\text{FP}}$ /MPa	$\Delta\sigma_f$ /MPa
1	100	0	0	501	487	14
2	90	10	0	564	579	-15
3	80	20	0	609	623	-14
4	70	30	0	627	619	8
5	60	40	0	576	570	6
6	90	0	10	629	642	-13
7	80	0	20	702	727	-25
8	70	0	30	765	751	-14
9	60	0	40	728	723	5
10	80	10	10	728	700	28
11	70	10	20	731	744	-13
12	60	10	30	693	718	-25
13	70	20	10	712	718	-6
14	60	20	20	729	728	1
15	60	30	10	678	697	-21
16	70	15	15	753	740	13

注:  $\sigma_{\text{FE}}$  为实验值,  $\sigma_{\text{FP}}$  为预测值,  $\Delta\sigma_f = \sigma_{\text{FE}} - \sigma_{\text{FP}}$

表3  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  陶瓷刀具材料组分系统的断裂韧性

Table 3 Fracture toughness of  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  ceramic tool materials

编号	$V_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ /%	$V_{\text{SiC}}$ /%	$V_{(\text{W}, \text{Ti})\text{C}}$ /%	$K_{\text{ICE}}$ /MPa·m <sup>1/2</sup>	$K_{\text{ICP}}$ /MPa·m <sup>1/2</sup>	$\Delta K_{\text{IC}}$ /MPa·m <sup>1/2</sup>
1	100	0	0	3.82	3.78	0.04
2	90	10	0	4.58	4.65	-0.07
3	80	20	0	5.02	5.08	-0.06
4	70	30	0	5.17	5.15	0.02
5	60	40	0	4.91	4.89	0.02
6	90	0	10	4.61	4.54	0.07
7	80	0	20	4.84	4.99	-0.15
8	70	0	30	5.2	5.15	-0.05
9	60	0	40	5.06	5.01	0.05
10	80	10	10	5.11	5.13	-0.02
11	70	10	20	5.18	5.3	-0.12
12	60	10	30	5.02	5.18	-0.16
13	70	20	10	5.21	5.29	0.08
14	60	20	20	5.25	5.19	0.06
15	60	30	10	4.93	5.08	-0.15
16	70	15	15	5.32	5.34	-0.02

注:  $K_{\text{ICE}}$  为试验值,  $K_{\text{ICP}}$  为预测值,  $\Delta K_{\text{IC}} = K_{\text{ICE}} - K_{\text{ICP}}$

复相关系数也证明了这一点。该模型的预测误差 < 5%。第16组的验证试验结果也表明:该统计模型能够用以描述  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  多相复合陶瓷刀具材料组分系统的抗弯强度与材料组分之

表 4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 陶瓷刀具材料  
组分系统的硬度

Table 4 Hardness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C ceramic  
tool materials

编号	V <sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> /%	V <sub>SiC</sub> /%	V <sub>(W,Ti)C</sub> /%	H <sub>E</sub> /GPa	H <sub>P</sub> /GPa	ΔH /GPa
1	100	0	0	18.14	18.18	-0.04
2	90	10	0	18.46	18.41	0.05
3	80	20	0	18.65	18.62	0.03
4	70	30	0	18.81	18.81	0
5	60	40	0	18.92	18.98	-0.06
6	90	0	10	18.52	18.57	-0.05
7	80	0	20	18.79	18.83	-0.04
8	70	0	30	18.92	18.97	-0.05
9	60	0	40	19.06	19.02	-0.04
10	80	10	10	18.81	18.75	0.06
11	70	10	20	19.11	18.97	0.14
12	60	10	30	18.92	19.08	-0.06
13	70	20	10	18.79	18.92	-0.13
14	60	20	20	19.14	19.09	0.05
15	60	30	10	19.06	19.07	-0.01
16	70	15	15	19.07	18.96	0.11

注：H<sub>E</sub> 为试验值，H<sub>P</sub> 为预测值，ΔH = H<sub>E</sub> - H<sub>P</sub>

间的关系。

为了便于进一步直观分析，相应于式 (6) 模型的等值线图如图 1 所示。可见，随增强相 SiC 和 (W,Ti)C 的增加，材料的抗弯强度也逐渐提高，在达到最大值后又有所降低。相对于 SiC 而言，(W,Ti)C 改善 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 陶瓷刀具材料抗

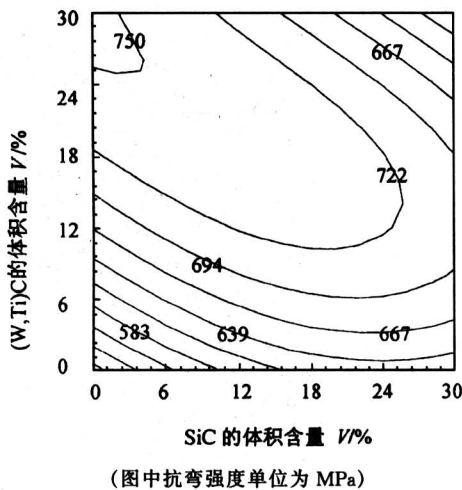


图 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 抗弯强度与  
材料组分的关系

Fig.1 Relationship between the flexural strength  
and the compositions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C  
ceramics(the unit of the flexural strength is MPa)

弯强度的幅度更大。

同理, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 陶瓷刀具材料组分系统断裂韧性 K<sub>IC</sub> 和硬度 H 统计模型分别为:

$$K_{IC} = 3.78 - 42.21 V_1 - 27.8 V_1 V_2 - 11.84 V_2^2 + 53.551 \ln(1 + V_1) + 9.29 \ln(1 + V_2) \quad (7)$$

$$H = 18.18 - 11.47 V_2 - 4.22 V_1 V_2 + 2.39 \ln(1 + V_1) + 16.16 \ln(1 + V_2), \quad (8)$$

检验结果表明，这两个回归模型在 α = 0.01 的水平上都是高度显著的。

值得注意的是，由于本文所建立的统计模型并未涉及材料的显微结构与强化韧化机理，因而有一定的局限性。虽然式(6)~(8)仅适于本文所研究的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 陶瓷刀具材料组分系统，但相应的原理和方法却具有一定的普遍性，可以推广到其他陶瓷材料组分系统的设计过程。

### 3 材料的优化设计与制备

对于多相复合陶瓷刀具材料，在材料性能可能达到的范围内，根据刀具材料组分对力学性能的要求，合理确定一些临界值，再通过优化设计，就可以确定一个力学性能组合的“良好”区域，从而大大缩小材料组分的备选区域，减少试验工作量。

对于多相复合陶瓷刀具材料，令：

$$\begin{cases} \sigma_t > \sigma_{tC} \\ K_{IC} > K_{ICC} \\ H > H_C \end{cases} \quad (9)$$

式中下标 C 表示力学性能的临界值。

以式 (9) 为基础，具体到 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 组分系统，令：

$$\begin{aligned} \sigma_{tC} &= 730 \text{ MPa}, K_{ICC} = 5.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}, \\ H_C &= 19 \text{ GPa}, \end{aligned} \quad (10)$$

则可得到相应的“良好”区域如图 2 中阴影所示。只要在此区域内取一组分点，即可得到具有良好综合力学性能的多相复合陶瓷刀具材料。

取 V<sub>SiC</sub> = 15 %、V<sub>(W,Ti)C</sub> = 15 % 的组分点，采用热压工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 陶瓷刀具材料，其各项力学性能指标分别为：抗弯强度 753 MPa，断裂韧性 5.32 MPa·m<sup>1/2</sup>，硬度 19.07 GPa。这说明，本文的设计方法是可行的。

表 5 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-(W,Ti)C 多相复合陶瓷刀具材料组分系统单一力学性能的优化结果，表中

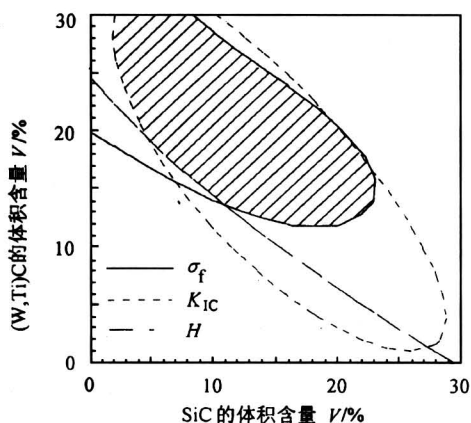


图2  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  陶瓷的力学性能优化区域

Fig.2 The optimum field of the mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  ceramics

也给出了与相应最优组分所对应的其他力学性能指标值。各项力学性能并不在同一组分点处达到最优值,有些甚至差别较大。正因为如此,进行复相陶瓷刀具材料设计才显得尤为重要。

#### 4 结论

建立多相复合陶瓷刀具材料力学性能与材料组分之间的关系,并以 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ 系陶瓷刀具材料为例作了实验与验证,说明该模型是正确的,所采用的方法是可行的。

表5  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  多相复合陶瓷刀具材料组分系统的力学性能优化结果

Table 5 The optimum results of the mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  multiphase composite ceramics

$V_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ /%	$V_{\text{SiC}}$ /%	$V_{(\text{W}, \text{Ti})\text{C}}$ /%	$\sigma_{f\text{max}}$ /MPa	$K_{\text{ICmax}}$ /MPa·m <sup>1/2</sup>	$H_{\text{max}}$ /GPa
69	10	21	748 (最优值)	5.32	18.99
68	15	17	743	5.34 (最优值)	18.99
51	29	20	691	4.78	19.21 (最优值)

#### 参考文献

- [1] 郭景坤. 关于先进结构陶瓷的研究[J]. 无机材料学报, 1999, 14(2): 193~198
- [2] Ai Xing, Li Zhaoqian, Deng Jianxin. Development and perspective of advanced ceramic cutting tool material[J]. Key Eng Mater, 1995, 108~110(1): 98~112
- [3] 郭景坤. 从复合材料到多相材料[J]. 材料研究学报, 2000, 14(2): 124~126
- [4] 柯作楷. 陶瓷材料配方组成——性能关系的计算机模拟[J]. 陶瓷, 1987, (5): 16~19
- [5] 周纪芾. 实用回归分析方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 102~117
- [6] 许崇海. 复相陶瓷刀具材料设计、仿真及其应用研究[D]. 济南: 山东工业大学机械工程学院, 1998

## Design and Fabrication of Multiphase Composite Ceramic Tool Materials

Xu Chonghai<sup>1</sup>, Ai Xing<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250100, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**[Abstract]** The multiphase composite and the computer aided design of the ceramics are two significant trends in the development of the advanced ceramic materials in the 21st century. Mathematical models have been built for the description of the relationships between the mechanical properties and the material compositions of the multiphase composite ceramic tool material with the combination of both theoretical and experimental methods. The optimum compositions of the material have also been achieved by means of the computer aided optimization technology. Then, an advanced  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$  multiphase composite ceramic cutting tool material is fabricated with hot pressing technology. The material is found to possess high comprehensive mechanical properties, which proves that the method proposed in the present study is reasonable and feasible for the design of multiphase composite ceramic tool materials.

**[Key words]** ceramic tool material; multiphase composite; material design; model; mechanical property