

# 采用线膨胀系数可控 $ZrO_2-TiO_2$ 陶瓷模具的钛合金高精度超塑成形

蒋少松<sup>1</sup>, 赫晓东<sup>2</sup>, 张凯锋<sup>1</sup>, 高鹏<sup>1</sup>, 李保永<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001; 3. 北京航星机器制造公司, 北京 100013)

**摘要:** 对线膨胀系数可控的  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具及钛合金高精度超塑成形进行了系统研究。探讨了  $TiO_2$  体积分数和相对密度对  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数的影响规律, 并引入相对密度修正模型——Turner 模型来准确预测复合陶瓷材料的线膨胀系数。采用压痕法检测了与 TC4 钛合金等膨胀系数的  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具的超塑成形精度。在  $925^\circ C$  下, 利用  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具进行超塑成形, 其使用性能良好。结果表明:  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数随  $TiO_2$  体积分数的增加而减小, 随相对密度的增加而增加。采用线膨胀系数优化的  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具, 成形精度误差大幅降低, 不超过 0.1%, 且陶瓷模具具有足够的热机械性能进行超塑成形, 使用性能优良。

**关键词:** 超塑成形; 陶瓷模具; 成形精度; 线膨胀系数 (LEC); TC4 钛合金

**DOI:** 10.3969/j.issn.1005-5053.2012.4.002

**中图分类号:** TG146.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2012)04-0008-07

采用钛合金超塑成形技术制造的航空航天结构件, 既可提高结构的抗疲劳、抗腐蚀特性, 又可满足质量轻、强度高的目标, 同时还可缩短制造周期, 与传统的加工工艺相比, 有很大的优势<sup>[1-5]</sup>。然而, 在钛合金超塑成形中, 由于实验温度较高, 成形模具与工件均会产生不同程度的热膨胀。钛合金的线膨胀系数在  $(8 \sim 10) \times 10^{-6} \text{ }^\circ C^{-1}$  之间, 而超塑成形中常用的耐热钢模具的线膨胀系数则在  $(13 \sim 18) \times 10^{-6} \text{ }^\circ C^{-1}$  之间, 成形材料的线膨胀系数远小于成形模具的线膨胀系数。对于尺寸大, 形状不规则的钛合金零件进行超塑成形时, 线膨胀系数的差异不仅会造成零件难以脱模、尺寸精度降低等问题, 还会导致工件的形状畸变。尺寸越大的工件, 线膨胀差异引起的成形精度降低问题会越严重。

为了解决线膨胀系数差异导致成形精度降低问

题, 本工作引入了陶瓷模具。除了独特的耐高温、耐磨、耐蚀性能以外, 陶瓷模具还具备价格低, 质量轻, 摩擦系数低, 成形能耗少, 制品尺寸精度和表面精度高等诸多优点, 是一种较为理想的模具材料<sup>[6,7]</sup>。虽然其具有韧性差的缺点, 但超塑成形所需要的成形压力小, 模具负载小, 因此, 陶瓷模具在超塑成形中的应用, 即能发挥其高温性能好的优点, 又能避免其韧性差的缺点, 具有很好的应用前景<sup>[8,9]</sup>。国内外很多研究者已将陶瓷模具作为传统超塑成形耐热钢模具的替代者进行开发使用。Boeing 公司的 Sanders D G 开发了硅石玻璃陶瓷模具, 并采用该陶瓷模具成功地超塑成形出喷气发动机宽弦风扇叶<sup>[10]</sup>。法国的 Bernhart G 等将体积分数较低的短金属纤维混合入陶瓷模具以增加其强度, 即使某一处已经发生断裂, 模具整体仍然保持着较高的强度<sup>[11]</sup>。

更为重要的是, 陶瓷模具的线膨胀系数可以通过不同的材料组分配比来控制, 使制作与钛合金等膨胀系数的模具成为可能。而目前国内外文献鲜有将控制线膨胀系数引入到陶瓷模具中以提高超塑成形精度的报导。鉴于此, 本工作将系统地研究通过控制  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具的线膨胀系数来提高 TC4 钛合金超塑成形的精度。

收稿日期: 2011-12-07; 修订日期: 2012-02-07

基金项目: 哈尔滨工业大学重点实验室开放基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助, HIT. KLOF. 2010043)

作者简介: 蒋少松(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事新型钛合金、铝合金、镁合金、Ti 基金属间化合物等多种先进材料的超塑成形及其精度控制研究, (E-mail) jiangss600\_2005@163.com。

## 1 $ZrO_2$ - $TiO_2$ 陶瓷线膨胀系数测试

采用  $ZrO_2$  和  $TiO_2$  陶瓷混合粉体来烧制陶瓷模具,氧化锆陶瓷价格便宜,易烧结,强度和断裂韧性都非常优异,是普遍使用的结构陶瓷之一。氧化钛陶瓷的加入可以改善模具表面粗糙度,并能有效避免模具与 TC4 板材发生反应。实验所使用的  $ZrO_2$

和  $TiO_2$  粉体均为商业用粉体,为河北鹏达新材料科技有限公司生产。两种粉体的基本参数如表 1 所示,由生产厂家提供。两种陶瓷粉末采用机械混合法混合,在 QM-ISP2L 球磨机上混合 12h,球磨介质为无水乙醇,磨球为氧化铝磨球。将球磨后的混合粉末浆体放入干燥炉,在  $100^\circ\text{C}$  时干燥 12h,然后将其人工粉碎后用细筛过筛,即得到制造  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷的原始粉料。

表 1  $ZrO_2$  和  $TiO_2$  的基本参数  
Table 1 Basic properties of 3Y- $ZrO_2$  and  $TiO_2$

Material	Density/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Purity/%	Young's modulus /GPa	LEC( $925^\circ\text{C}$ )/ $10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$
$ZrO_2$	5.75	99.8	205	9.6
$TiO_2$	4.20	99.0	282	8.2

线膨胀系数测试试样为  $\phi 10\text{mm} \times 50\text{mm}$  的圆柱体,采用模压成形法制作试样粉坯,无压烧结烧制  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷试样,RPZ-03P 全自动高温热膨胀仪及烧结后的试样如图 1 所示。升温速率为  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,测量的温度区间为  $5^\circ\text{C}$ 。由于 TC4 钛合

金超塑成形温度为  $930^\circ\text{C}$ ,因此测量了  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷在  $200 \sim 925^\circ\text{C}$  的线膨胀系数,测量在空气下进行。根据数据采集结果,该仪器自动计算生成材料的平均线膨胀系数,每种试样测量三组后取平均值。



图 1 RPZ-03P 热膨胀测试仪 (a) 及  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷测试试样 (b)

Fig. 1 The RPZ-03P thermal dilatometer (a) and  $ZrO_2$ - $TiO_2$  ceramic cylinder specimen (b)

### 1.1 $TiO_2$ 体积含量对 $ZrO_2$ - $TiO_2$ 陶瓷线膨胀系数的影响

由于  $TiO_2$  的线膨胀系数较低 ( $8.2 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $ZrO_2$  的线膨胀系数较高 ( $9.6 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ), 而 TC4 钛合金的膨胀系数 ( $8.92 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ) 处于两者之间,因此可以通过调节陶瓷粉末的比例来改变其膨胀系数,从而获得与 TC4 膨胀系数接近的陶瓷成分配比。为了研究  $TiO_2$  的体积含量对  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷的影响规律,测试了  $1550^\circ\text{C}$  烧制的不同  $TiO_2$  体积分数 (0%, 15%, 30%, 40%, 55%) 的  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数。

实验结果如图 2 所示,5 种不同体积配比的  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数均随着温度的升高而增大。当  $TiO_2$  体积分数为 0 时,  $ZrO_2$  陶瓷在  $930^\circ\text{C}$  时的线膨胀系数为  $9.6 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ , 与生产厂商提供的数据相同。当体积分数分别为 15%, 30%, 40%, 55% 时,  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷在  $925^\circ\text{C}$  时的线膨胀系数分别为  $9.2 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $8.8 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $8.7 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$  和  $8.5 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。随着  $TiO_2$  含量的增加,  $ZrO_2$ - $TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数降低。

这种现象可以通过 Turner 公式来解释,两相复合材料线膨胀系数的 Turner 表达式为<sup>[12]</sup>:

$$a = \frac{a_p V_p E_p + a_m V_m E_m}{V_p E_p + V_m E_m}$$

式中:  $a$ ,  $V$  和  $E$  分别为线膨胀系数, 体积分数和弹性模量;  $p, m$  分别指两相颗粒。

因  $\text{TiO}_2$  的线膨胀系数比  $\text{ZrO}_2$  的小, 所以  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷的线膨胀系数随  $\text{TiO}_2$  引入量的增加而减小是合理的。

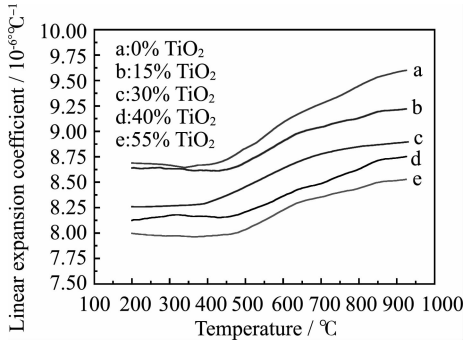


图 2 不同  $\text{TiO}_2$  体积分对线膨胀系数影响

Fig. 2 Curves of different volume fraction of  $\text{TiO}_2$  effect on linear expansion coefficient

## 1.2 烧结后相对密度对 $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$ 陶瓷线膨胀系数的影响

由于超塑成形具有成形力小、速率慢、模具不受冲击等特点, 因此对于  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷模具而言, 意味着其不需要绝对高的致密度就能满足成形要求。鉴于此, 本工作研究了不同相对密度对  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷线膨胀系数的影响规律。四组  $\text{TiO}_2$  体积分数为 30% 的  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  曲线如图 3 所示, 相对密度为 0.92, 0.86, 0.80 和 0.75 时对应的  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷粉坯分别在 1550 $^{\circ}\text{C}$ , 1450 $^{\circ}\text{C}$ , 1400 $^{\circ}\text{C}$  和 1350 $^{\circ}\text{C}$  烧结而成, 相对密度分别为 0.92, 0.86, 0.80 和 0.75。与之对应, 陶瓷在 925 $^{\circ}\text{C}$  时的线膨胀系数分别为  $9.04 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $8.91 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $8.85 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  和  $8.78 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。线膨胀系数随着陶瓷相对密度的降低而降低。这是因为随着相对密度的减小, 陶瓷材料的气孔率增加, 材料内的颗粒之间充斥着更多的气孔。随着温度的升高, 材料粒子的振幅增加, 但其膨胀效果被材料内部的气孔所吸收, 反映在宏观上, 就是材料线膨胀系数的相对减小。

## 2 修正的 Turner 计算模型的提出

为了对比本研究中实验值与模型计算值的差异, 采用 Turner 方程计算了不同  $\text{TiO}_2$  体积分时  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷的线膨胀系数, 并与本工作的实验数

据进行了比较。如图 4 所示, Turner 模型的预测值与实验值接近, 且数据变化趋势相同, 但实测值比 Turner 模型的预测值略小。由于本工作中所测试的不同  $\text{TiO}_2$  体积分数的  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷是在 1550 $^{\circ}\text{C}$

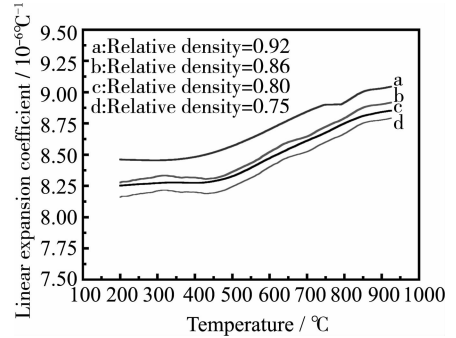


图 3 不同相对密度对线膨胀系数的影响

Fig. 3 Curves of different relative density effect on linear expansion coefficient

时无压烧结而成, 因此没有达到绝对致密, 相对致密度为 0.92。由于  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷的线膨胀系数与相对密度有关, 随着相对密度的降低而减小, 因此不难理解实验数据小于模型数据。

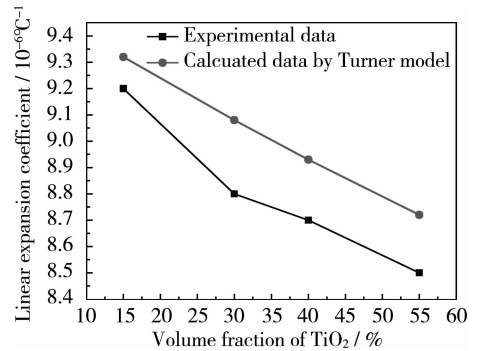


图 4 实验值与 Turner 模型计算值比较

Fig. 4 Comparison of experimental data and data calculated by Turner model

由于  $\text{ZrO}_2$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷的线膨胀系数与材料组成成分和材料相对密度均有关系, 而 Turner 公式没有考虑气孔对线膨胀系数的影响, 因此在实验测定值和计算值之间常常出现误差<sup>[13,14]</sup>。鉴于此, 工作过程中对 Turner 公式进行了修正, 将相对密度引入到 Turner 公式中, 修正后的 Turner 公式为:

$$a_c = \sqrt[3]{d} \left( \frac{a_p V_p E_p + a_m V_m E_m}{V_p E_p + V_m E_m} \right)$$

式中:  $a$  为线膨胀系数;  $d$  为相对密度;  $V$  为体积分;  $E$  为弹性 (杨氏) 模量;  $c$  表示两相复合材料;  $m$  和  $p$  表示材料的两相。

为了烧制出与 TC4 钛合金线膨胀系数 ( $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 相同的 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷模具,同时验证修正后的 Turner 公式的准确性,根据修正的 Turner 模型计算出 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷的线膨胀系数为  $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  时的五种不同粉料配比及相应的相对密度的计算值,如表 2 所示。并对这五组数据进行了实验验证,五组不同配比的试样被模压成形,并在不同烧结温度、不同保温时间的条件下烧结为与之相对应的相对密度。对五组试样的线膨胀系数进行了测试,测试结果与计算结果的比较如图 5 所示。

结果表明,实验数据与修正的 Turner 公式的计算数据基本吻合。该公式在一定程度上能准确地反映相对密度对陶瓷模具的影响。为了达到目标膨胀系数  $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,随着 TiO<sub>2</sub> 含量的增加,所需要的相对密度也随之增加。该实验清楚地表明,通过调整 TiO<sub>2</sub> 的含量和 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷的相对密度,可以精确控制其线膨胀系数。

表 2 线膨胀系数为  $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  时不同 TiO<sub>2</sub> 体积分数及相对应的相对密度计算值

Table 2 Different volume fraction of TiO<sub>2</sub> and corresponding calculated relative density as the LEC controlled to be  $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Volume fraction/ %	Relative density	Sintering temperature/°C
10	0.85	1450
15	0.88	1500
20	0.90	1520
27	0.92	1550
35	0.97	1650

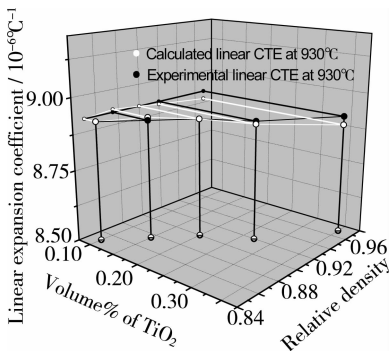


图 5 线膨胀系数为  $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  时计算值与实验值比较  
Fig. 5 Comparison of calculated data and experimental data as LEC controlled to be  $8.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

### 3 压痕法测试与 TC4 钛合金等膨胀系数陶瓷模具的成形精度

为了进一步验证采用与 TC4 钛合金等膨胀系数的 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷模具超塑成形时的成形误差,采用超塑成形压痕法来测试其精度。采用模压法成形,在 1550°C 无压烧结了两个直径 12mm,长度 15mm, TiO<sub>2</sub> 体积分数为 27%, 相对密度为 0.92 的 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷圆柱(如图 6 所示),并将其固定在带有两个孔的 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷底座上,如图 7 所示。由于两个孔的中心距离难以测量,因此中心间距距离  $L_0$  采用下式计算。

$$L_0 = (X_4 - X_1) - \frac{X_2 - X_1}{2} - \frac{X_4 - X_3}{2}$$

ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷圆柱的线膨胀系数与 TC4 钛合金膨胀系数基本相同,如图 8 所示。采用超塑成形在厚度为 0.8mm 的 TC4 平板上成形出两个陶瓷圆柱的印痕,然后对室温下其印痕位置及尺寸进行测量,通过对比陶瓷圆柱的间距  $L_0$  与其在 TC4 钛合金印痕之间的间距  $L_1$  来衡量陶瓷模具与 TC4 之间成形的精确性。超塑成形实验在自行研制的 1000kN 超塑成形机上进行,超塑成形后 TC4 钛合金板上的压痕如图 9 所示。



图 6 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷圆柱

Fig. 6 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> ceramic circular column

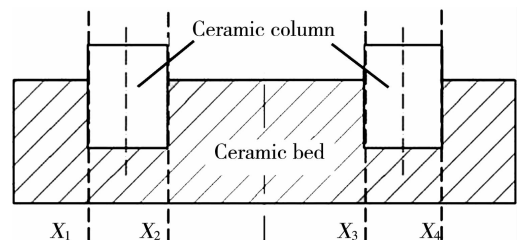


图 7 陶瓷圆柱及底座

Fig. 7 Ceramic circular column and common bed

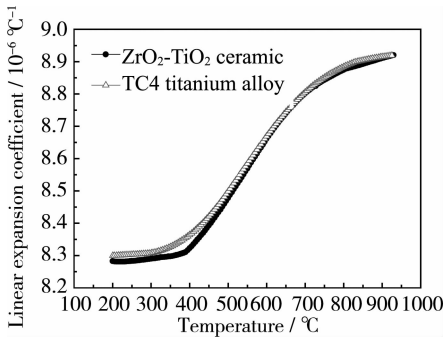


图8  $ZrO_2-TiO_2$ 陶瓷与TC4钛合金的膨胀系数比较

Fig. 8 Comparison of thermal expansion coefficient of  $ZrO_2-TiO_2$  ceramic die and TC4 titanium alloy

为准确的测量超塑成形尺寸精度,进行了三次

压痕实验。实验后, $X_1, X_2, X_3$ 和 $X_4$ 之间的距离在测量显微镜下测试,分别测量三次后取平均值,测量计算后的 $L_0$ 值为 $28059\mu m$ ,而压痕中心之间的距离 $L_1$ 的三组值如表3所示。可知,印痕间距 $L_1$ 与圆柱间距 $L_0$ 的误差在 $25.0 \sim 58.5\mu m$ 之间,最大误差不超过 $59\mu m$ ,即不超过原始尺寸的 $0.1\%$ 。因此,TC4等膨胀系数的陶瓷超塑成形精确度很高,基本与陶瓷圆柱原始距离相同。超塑成形结束后,陶瓷圆柱还可再次放入压痕中且无间隙。因此可知,采用与TC4钛合金等膨胀系数的 $ZrO_2-TiO_2$ 陶瓷模具,在超塑成形中与TC4钛合金具有相同的热膨胀和热收缩,冷却过程中两者之间差异很小,模具的名义尺寸基本等于零件的名义尺寸,超塑成形精度有了大幅度提高。

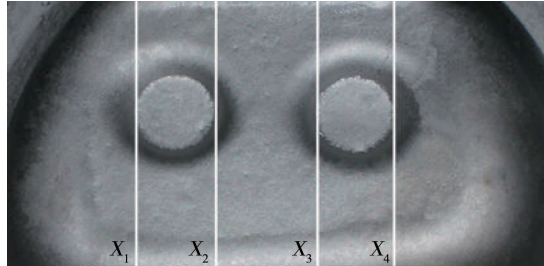


图9 TC4钛合金压痕

Fig. 9 Impression of TC4 titanium alloy

表3 TC4压痕尺寸测量  
Table 3 Measurement of impression dimension

$X_1/\mu m$	$X_2/\mu m$	$X_3/\mu m$	$X_4/\mu m$	$L_1/\mu m$	Error/ $\mu m$
0	11976	28012	40032	28034.0	25.0
0	11988	27997	39992	28000.5	58.5
0	12031	28009	40081	28029.5	29.5

#### 4 采用 $ZrO_2-TiO_2$ 陶瓷模具的TC4

##### 钛合金超塑成形

为了进一步测试 $ZrO_2-TiO_2$ 陶瓷模具在超塑成形中的使用性能,制作了 $ZrO_2-TiO_2$ 筒形陶瓷模具。实验材料为在球磨机中混合后的 $TiO_2$ 体积分数为27%的 $ZrO_2$ 和 $TiO_2$ 混合粉末,黏结剂为聚乙烯醇,工艺流程与压痕法测试圆柱试样基本相同。在 $1550^\circ C$ 无压烧结后可得到线膨胀系数与TC4钛合金等同的陶瓷模具(如图10所示)。

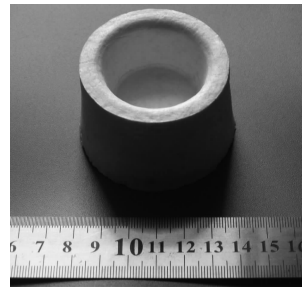


图10 与TC4钛合金等膨胀系数相匹配的 $ZrO_2-TiO_2$ 陶瓷模具

Fig. 10  $ZrO_2-TiO_2$  ceramic die with the same thermal expansion coefficient with TC4

为了防止陶瓷模具受压破裂,将陶瓷模放置于下模内,陶瓷模高度略低于下模,下模作为受压体,上模和下模接触以密封气体。由于陶瓷模具表面粗糙度较好,且本身为陶瓷材料,因此不使用润滑剂。超塑成形的 TC4 钛合金为厚度 0.5mm,直径 80mm 的圆形板料。将板料放置于上、下模之间后,开启冷却水系统后开始升温,升温速率为  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。当温度到达  $925^\circ\text{C}$  后,保温 30min。冷却至室温时模具出炉,TC4 筒形件可以很容易地从陶瓷模具中取出,不需要撬取。取出后还能将其再次放入陶瓷模具,且与陶瓷模具贴合紧密,说明 TC4 筒形件的尺寸与筒形件尺寸完全相同。超塑成形后的 TC4 筒形件如图 11 所示。其表面质量和精确度均高于耐热钢模具成形件。这表明  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具在  $925^\circ\text{C}$  具有较好的热机械性能进行超塑成形,使用性能优良。由于其一系列的优点且与 TC4 钛合金线膨胀系数相同,因此有理由相信  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具在钛合金超塑成形领域具有很大的发展潜力。



图 11 使用陶瓷模具超塑成形的 TC4 钛合金筒形件

Fig. 11 TC4 titanium alloy cylinder of superplastic forming using ceramic die

## 5 结论

(1)随着  $TiO_2$  含量的增加, $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数降低。这是因为  $TiO_2$  的线膨胀系数小于  $ZrO_2$  的线膨胀系数,根据 Turner 公式可知该现象是合理的。同时,随着  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷相对密度的增加,线膨胀系数随之增加。可以理解为随着温度的升高,材料粒子的振幅增加,但其膨胀效果被材料内部的气孔所吸收。反映在宏观上,就是材料线膨胀系数相对减小。

(2)对 Turner 公式进行了修正,将相对密度  $d$  引入到 Turner 公式中,修正后的 Turner 公式为:

$$a_c = \sqrt[3]{d \left( \frac{a_p V_p E_p + a_m V_m E_m}{V_p E_p + V_m E_m} \right)}$$

。实验数据与修正的

Turner 公式的计算数据吻合度很高,说明该公式能较准确地预测  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷的线膨胀系数。

(3)TC4 钛合金超塑成形压痕法成形精度测量结果表明,采用  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具的超塑成形精度大幅提高,尺寸误差不超过  $59\mu\text{m}$ ,不超过名义尺寸的 0.1%,大幅提高了钛合金的超塑成形精度。

(4)使用  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具在  $925^\circ\text{C}$  超塑成形了 TC4 钛合金筒形件,结果表明陶瓷模具具有较好的热机械性能进行超塑成形,且成形后 TC4 筒形件可以很容易地从陶瓷模具中取出,不像使用耐热钢模具那样需要撬取。说明  $ZrO_2-TiO_2$  陶瓷模具不仅使用性能良好,且超塑成形精度大幅提高。

## 参考文献:

- [1] LUO Y, LUCKEY S G, FRIEDMAN P A. Development of an advanced superplastic forming process utilizing a mechanical pre-forming operation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12/13): 1509 - 1518.
- [2] XING H L, WANG C W, ZHANG, K F. Recent development in the mechanics of Superplasticity and its applications [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/2/3): 196 - 202.
- [3] CHARIT I, MISHRA R S. High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy via friction stir processing [J]. Materials and Engineering (A), 2003, 359(1/2): 290 - 296.
- [4] 丁桦, 张凯锋. 材料超塑性研究的现状与发展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1059 - 1067. (DING H, ZHANG K F. Current status and developments in superplastic studies of materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1059 - 1067.)
- [5] 韩文波, 张凯锋, 王国峰. Ti6Al4V 合金多层板结构的超塑成形/扩散连接工艺研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(6): 29 - 33. (HAN W B, ZHANG K F, WANG G F. Superplastic forming and diffusion bonding for multilayer structure of Ti-6Al-4V Alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(6): 29 - 33)
- [6] CUTARD T, CAILLEUX E, LOURS P, BERNHART G. Structural and mechanical properties of a refractory concrete for superplastic forming tools [J]. Ind Ceram, 1999, 19(7/8): 100 - 105.
- [7] BATE P S, SHAW G R, HANCOCK M A, et al. Superplastic forming with ceramic lost-wax dies [J]. J Mater Proc Technol, 1995, 47(3/4): 361 - 368.
- [8] MURAKAMI H. Dental application of superplastic forming

- for titanium complete denture bases [J]. Aichi Gakuin Daigaku Shigakkai Shi, 1989, 27(3):61-69.
- [9] CURTIS R V. Stress - strain and thermal expansion characteristics of a phosphatebonded investment mould material for dental superplastic forming [J]. J Dentistry, 1998, 296(3):251-258.
- [10] SANDERS D G. Reinforced ceramic dies for superplastic forming operations [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 48(6):350-355.
- [11] BERNHART G, NAZARET F, CUTARD T. Fibre reinforced refractory castables: an alternative solution for SPF die manufacturing [J]. Mater Sci Forum, 2007, 551/552:37-42.
- [12] KINGERY W D, BOWEN H K, UHLMANN D R. Introduction to ceramics [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975, 21: 125-128.
- [13] LOMMENS P, DE MEYER C, BRUNEEL E, K. *et al.* Synthesis and thermal expansion of  $ZrO_2/ZrW_2O_8$  composites [J]. J Euro Ceram Soc, 2005, 25(16):3605-3610.
- [14] HSIEH C L, TUAN W H. Elastic and thermal expansion behavior of two-phase composites [J]. J Mater Sci Eng (A), 2007, 425(1/2):349-360.

## High Precision Superplastic Forming of Titanium Alloy Using $ZrO_2$ - $TiO_2$ Ceramic Die with Controllable Linear Expansion Coefficient

JIANG Shao-song<sup>1</sup>, HE Xiao-dong<sup>2</sup>, ZHANG Kai-feng<sup>1</sup>, GAO Peng<sup>1</sup>, LI Bao-yong<sup>3</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Beijing Hangxing Machinery Manufacturing Company, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The  $ZrO_2$ - $TiO_2$  ceramic die with controllable linear expansion coefficient (LEC) and the high precision superplastic forming were studied. The influence of  $TiO_2$  fraction and relative density on linear expansion coefficient of  $ZrO_2$ - $TiO_2$  ceramic was analyzed. The Turner model was modified and the relative density was introduced into the model. The forming accuracy of ceramic die with the similar LEC to TC4 titanium alloy was measured. The  $ZrO_2$ - $TiO_2$  deep cylinder ceramic die was fabricated and its performance was evaluated by the superplastic forming experiment at 925°C. The results show that the LEC decreases with the increment of volume fraction of  $TiO_2$  and increases with the rising of relative density. The modified Turner model more accurately predicted. Using the  $ZrO_2$ - $TiO_2$  ceramic die with optimal LEC, the forming accuracy deviation significantly reduced and not exceed of 0.1%. The ceramic die owns enough sufficient thermal mechanical properties and excellent performance.

**Key words:** superplastic forming; ceramic die; forming accuracy; linear expansion coefficient (LEC); TC4 titanium alloy