

[文章编号] 1004-0609(2002)02-0334-04

粉末冶金 TiAl 合金排气门的研制^①

欧阳鸿武, 刘咏, 贺跃辉, 黄伯云
(中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

[摘要] 利用元素粉末冶金方法制备了 TiAl 合金排气阀。为提高排气门杆部的致密度、均匀度, 设计了特有的径向热压工艺, 并从理论上分析了与该工艺相关的压坯密度、致密化和应力变化规律。制备出高径比为 10.7, 密度为 3.79 g/cm^3 的粉末冶金 TiAl 合金汽车发动机排气门。

[关键词] 粉末冶金; TiAl 基合金; 排气门

[中图分类号] TF 124.1

[文献标识码] A

TiAl 合金具有密度低、比强度高、高温力学性能和抗氧化性能好等优点, 其综合性能可满足高性能发动机气门的服役要求, 是替代目前高密度材料排气门的理想材料^[1, 2]。汽车发动机装配 TiAl 合金排气门有一系列优点: 可使弹簧力和惯性力明显降低, 摇臂力降低 25%, 气门杆力降低 45%, 凸轮轴驱动扭矩至少降低 30%; 可以使摇臂和凸轮轴设计轻量化, 保障耐久性; 固定工况降低燃油消耗 1%, 综合节能大于 5%; 明显降低噪声和排放污染^[3]。国内外围绕制备 TiAl 合金排气门开展了广泛深入的研究, 结果表明: 金属永久模离心浇铸和粉末冶金将是制备 TiAl₂ 合金排气门最具实用前途的方法^[4~6]。

与金属永久模离心铸造方法相比, 粉末冶金方法可以获得成分均匀性和晶体细化程度很高的净形产品, 原材料的利用率更高。目前, 采用元素粉末冶金方法制备大高径比 TiAl 合金排气门的困难主要来自两个方面: 其一是 Ti 粉与 Al 粉反应烧结时, 两者的反应是 Al 原子向 Ti 的单向扩散过程, 原来 Al 粉的位置留下空洞, 导致体积膨胀, 烧结件密度低于压坯密度; 其二是常规粉末冶金方法不适宜制备大高径比的零件。因此, 必须探寻适合于制备大高径比零件的热压方法才能获得合格的 TiAl 合金排气门。

热压工艺是一种采用单向或三向压力作用于装在石墨或其它刚性模具中的粉末压坯或松散粉末, 在高温下使粉末产生塑性变形或蠕变的粉末冶金致密化方法, 常用于制备陶瓷和难于烧结的金属和合

金^[7, 8]。但这一方法用于制备大高径比零件时存在不足之处: 其一, 由于轴向施力, 粉末与模具间的摩擦力使轴向压力产生较大的梯度, 导致压坯密度不均匀; 其二, 在压制松散粉末时, 即使粉末与模具间没有发生反应, 由于残余应力的存在, 压坯也难以从模具中脱出。尽管采取相应措施使热压工艺不断完善, 如在准热等静压(pseudo-HIPing or ceracomp process)^[9, 10]中用陶瓷粉末将压坯与模具隔开, 能产生类似于热等静压的效果, 但仍存在热压坯轴向扭曲和尺寸难以控制等问题, 可见传统的热压工艺不适合于制备大高径比零件。热压工艺的这些不足都是由于轴向施力的缘故。如果采用合适的热压模具, 在轴向施压的同时在径向也施压, 将大大降低轴向压力梯度, 使热压坯密度更为均匀, 从而使热压工艺在制备大高径比零件中充分发挥作用。

本文作者采用元素 Ti 与 Al 粉末混合、冷等静压和径向热压相结合的工艺, 按 Ti-47Al-2Cr-2Nb (摩尔分数, %) 成分配比, 制备出了 483Q 柴油机排气门; 着重研究了提高压坯致密度的径向热压工艺, 从理论上分析了与该工艺相关的压坯密度、致密化和应力变化规律。

1 实验过程与结果

径向热压模如图 1 所示。模具由上、下压头和内、外模构成, 内模与外模采用锥面配合, 内模沿轴向切开分为左右两半。将待热压的初坯装入内模后, 左右两片内模间形成一定的间隙(1~2 mm)。其工作原理为: 当温度升到一定程度, 压坯软化,

① [基金项目] 国家“八六三”计划资助项目(715-005-0040)

[收稿日期] 2001-07-05; [修订日期] 2001-10-08

[作者简介] 欧阳鸿武(1964-), 男, 副教授, 博士。

这时内模在下压头作用力的推动下沿外模内壁锥面向上运动, 逐步缩小这一间隙直至完全消失, 由此对热压坯产生径向压力使压坯致密。通过控制压头的行程(左右内模的间隙)使热压坯达到设计的致密度。

过程的收缩, 热压坯的最终密度为 ρ_f , 有

$$\rho_f = \frac{\rho_c D_c^2}{D_h^2}$$

(1)

由式(1), 可根据压坯的原始直径、密度和所需的密度, 设计相应模具的内径。

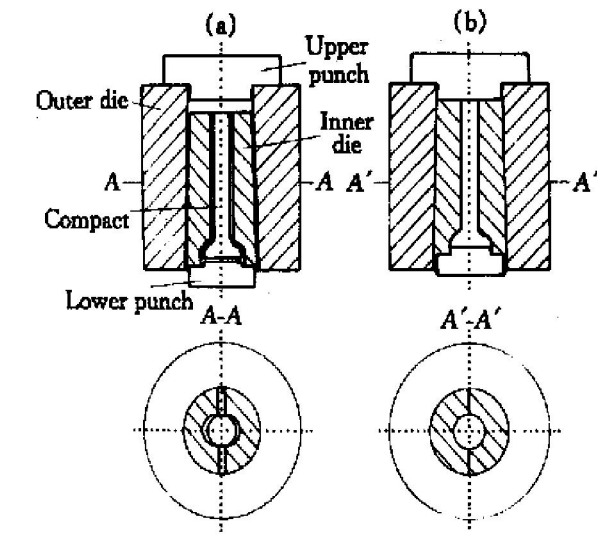


图 1 热压模示意图

Fig. 1 Sketch of hot-pressing die

(a) —Before pressing; (b) —After hot pressing

实验过程分为元素粉末冷压坯的制备、径向热压坯和机加工 3 个阶段。元素 Ti 粉、Al 粉及其它元素粉在真空混料罐中混料 2 h 后获得混合均匀的 Ti-47Al-2Cr-2Nb 粉, 将粉末装入橡胶套中用 280 MPa 的压力进行冷等静压, 压制出热压所需的初坯(粉末冷压坯密度约为理论密度的 80%)。将冷压坯装入热压模中进行热压, 热压参数列于表 1 中。实验测得热压坯孔隙率小于 3%, 密度达 3.79 g/cm³。经机械加工后, 制备出如图 2 所示的 TiAl 基合金 483Q 柴油机排气门。满足行业标准 ZBT08001-90 的技术要求。

表 1 TiAl 合金排气门的热压工艺参数

Table 1 Hot-pressing parameters of TiAl based exhaust valve

α	D_c	ρ_c	D_h	ρ_f	θ_0	v
$/(^\circ)$	/mm	$/(g \cdot cm^{-3})$	/mm	$/(g \cdot cm^{-3})$	/%	$/(m \cdot s^{-1})$
2.8	14.2	3.3	12.5	3.79	20	0.005

2 热压致密化过程的理论分析

2.1 压坯密度计算

设压坯的初始直径为 D_c , 初始密度为 ρ_c , 热压终了压坯直径为 D_h , 热压模锥角为 α , 忽略烧结

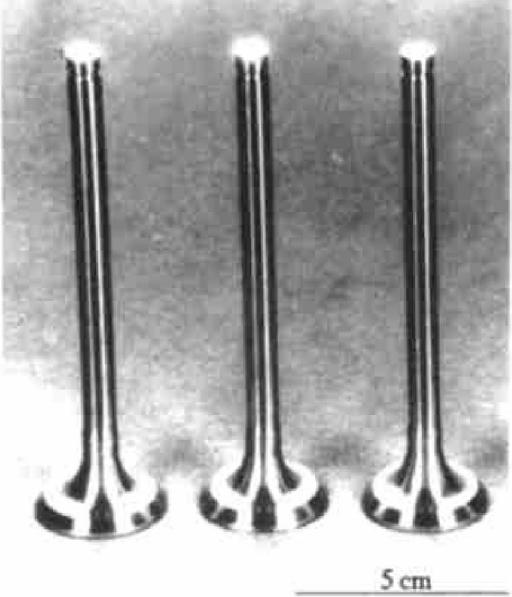


图 2 TiAl 基合金 483Q 柴油机排气门

Fig. 2 Appearance of machined TiAl based exhaust valve of 483Q engine

2.2 致密化过程分析

设理论密度变化为零, 热压坯的体积变化率为 e , 有^[11]

$$e = \frac{\dot{v}}{V_0} = \frac{\dot{\theta}}{1 - \theta}$$

(2)

以及

$$e = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = 2\dot{\epsilon}_x = 2d \ln \frac{D}{D_c} = \frac{2}{D} \cdot \frac{\partial D}{\partial t}$$

(3)

式中 θ 为压坯的孔隙率; $\dot{\theta}$ 为孔隙率的变化速率; D 为热压过程中压坯直径; V 为压坯体积; V_0 为压坯初始体积; $\dot{v}$ 为压坯的体积变化速率。并有

$$D = D_c - \Delta D = D_c - \frac{2}{\tan \alpha} \Delta h$$

(4)

式中 Δh 为压头的位移量。设压头的移动速度 v 不变, 因此有

$$\Delta h = vt$$

(5)

结合式(3), (4)和(5), 得到

$$e = \frac{-4v}{D \tan \alpha}$$

相应地有

$$\frac{\dot{\theta}}{1 - \theta} = \frac{-4v}{D \tan \alpha} = \frac{-4v}{D_c \tan \alpha - 2vt}$$

(6)

通过积分, 得到

$$\ln \frac{1 - \theta_0}{1 - \theta} = 2 \ln(1 - kt)$$

因此得出

$$\theta = 1 - \frac{1 - \theta_0}{(1 - kt)^2} \quad (7)$$

式中 θ_0 为压坯的初始孔隙率; $k = \frac{2v}{D_c \tan \alpha}$

式(7)表明粉末冶金压坯在径向热压中的致密化过程。

2.3 应力分析

内模的受力情况如图 3 所示, 作用在压头上的力应等于内外模相对运动时产生的摩擦阻力。 $F_2 = F_1 \cdot \sin \alpha$, $F_1 = F_3 \cdot \mu$ 并有 $F_1 \cos \alpha + \sigma_c A = F_3 \sin \alpha$, $F_1 \sin \alpha + F_3 \cos \alpha = F_2$, 得到

$$F_2 = \frac{\sigma_c A (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha} \quad (8)$$

式中 F_1 为内外模接触面之间的摩擦力; F_2 为通过压头施加在内模上的作用力; F_3 为内外模正压力; τ_f 为摩擦应力; A 为粉末压坯与内模的接触面积; μ 为摩擦因数; σ_c 为压坯的屈服强度。

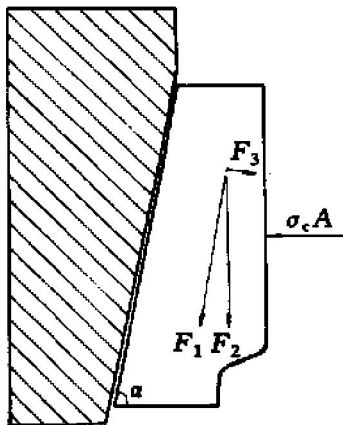


图 3 内模受力情况分析

Fig. 3 Forces on inner die

热压过程中, 当温度达最高点, 并保温 1 h 后, 对压坯施加压力。随着压力的增加, 内模的位移量相应增加, 热压坯的致密度也随之不断提高。随着粉末压坯密度的增加, 压坯的屈服强度将增大, 因此, 在压坯的致密化过程中, 压头的作用力也需相应加大。当压坯全致密后, 位移量不再随压力的提高而变化。热压过程孔隙率的变化曲线如图 4 所示, 与式(7)基本一致。在一定的热压速率下, 孔隙率与时间几乎呈线性关系。

实验测得压坯密度为 3.79 g/cm^3 , 图 5 所示为压坯的孔隙率和显微组织情况。从图 5 可以看出: 温度达到 1350°C 后, 材料内还存在一些残留孔隙, 但大多数为封闭孔隙; 热压后的部分显微组织为细小的双态组织, 即主要由 α_2/γ 层片状晶团和 γ 晶粒组成, 晶粒尺度大致为 $40 \mu\text{m}$ (铸造方法获得的晶

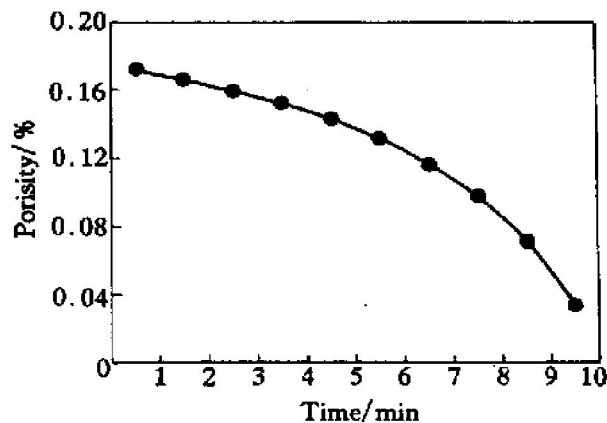


图 4 热压过程孔隙率变化曲线

Fig. 4 Change of porosity during hot-pressing

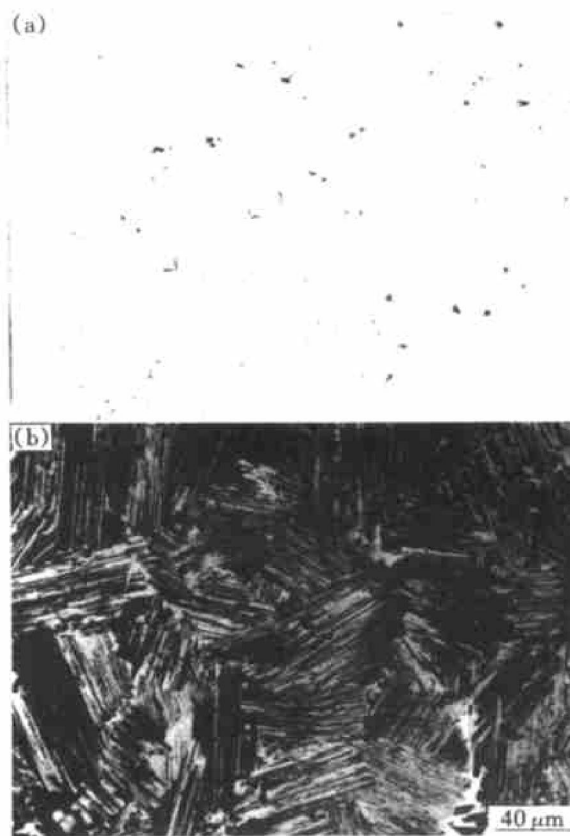


图 5 热压 TiAl 合金排气门的孔隙分布和显微组织

Fig. 5 Porosity and microstructure of TiAl valve by hot-pressing

(a) —Porosity; (b) —Microstructure

粒尺度大致为 $700 \sim 1000 \mu\text{m}$)。从以上的试验和分析可以看出粉末冶金方法在消除成分偏析, 制备组织均匀、细小的材料及近型成型方面有显著优势。

3 结论

1) 提出适用于制备大高径比粉末冶金 TiAl 基合金排气门的径向热压工艺。

2) 理论分析了径向热压工艺中粉末压坯的致密化过程。

3) 采用热压工艺制备出高径比为 10.7, 密度为 3.79 g/cm^3 的 TiAl 基合金排气门。

[REFERENCES]

- [1] WANG Qian, SUN Zheng-ming, Hitoshi Hashimoto. Synthesis of TiAl from sponge Ti and Chip Al through a mechanical alloying-pulse discharge sintering process [J]. Materials Transactions, JIM, 2000, 41(5): 551– 554.
- [2] Dowling W E, Allison J E Jr, Swank L R, et al. New Engine Design and Engine Component Technology [M]. 1993. 30– 38.
- [3] Villame Dowling Jr, Williamt Donlon, Johe Allison. Development of TiAl-based automotive engine valves [J]. Materials Research Society, 1995. 757– 767.
- [4] Hoyer U, Rahnavardi P. 轻质材料气门 [J]. 国外内燃机, 2000(2): 43– 49.
Hoyer U, Rahnavardi P. Light material valves [J]. Foreign Internal Combustion Engine, 2000(2): 43– 49.
- [5] 刘 咏, 黄伯云. 粉末冶金 TiAl 基合金排气阀的制备及性能 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(1): 64– 67.
LIU Yong, HUANG Bai-yun. Manufacture and properties of powder metallurgy TiAl-based valves [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(1): 64– 67.
- [6] 欧阳鸿武, 黄伯云, 刘 咏. TiAl 基合金发动机排气阀的制备和台架试验 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(Suppl. 1): 60– 63.
OUYANG Hong-wu, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, et al. Development of TiAl-based automotive engine exhaust valves [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(Suppl. 1): 60– 63.
- [7] Panansky E, Gutmanas E Y. Pressure-assisted reactive synthesis of titanium aluminides from dense 50Al-50Ti elemental powder blends [J]. Metall Mater Trans, 1996, 27A: 2130– 2139.
- [8] Liu Y, Huang B Y, He Y H. Synthesis of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy through elemental powder metallurgy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(4): 570.
- [9] American Metal Society. Metal Handbook [M]. 9th edition, ASM, 1985. 7.
- [10] Mahajan Y R, Eylon D. Modification of titanium powder metallurgy alloy microstructures by strain energizing and rapid omnidirectional compaction [J]. Powder Metall Int, 1985, 17(2): 75.
- [11] Olevski E, Dudek H J, Kaysser W A. HIPing conditions for processing of metal matrix composites using the continuum theory for sintering-I theoretical analysis [J]. Acta Mater, 1996, 44(2): 707.

Development of powder metallurgy TiAl-based alloy automotive exhaust valve

OUYANG Hong-wu, LIU Yong, HE Yue-hui, HUANG Bai-yun

(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University,
Changsha 410083, China)

[Abstract] In order to manufacture TiAl-based alloy automotive exhaust valve, a new powder densification and near net shaping technique (named as radial hot pressing) was suggested. The density of the powder compact, the densification equation and stress equation for radial hot pressing have been determined theoretically. By this technique, TiAl-based alloy automotive valve with large height-to-diameter ratio of 10.7 has been obtained, and its density up to 3.79 g/cm^3 , which has proven the feasibility of radial hot pressing experimentally.

[Key words] powder metallurgy; TiAl-based alloy; valve

(编辑 龙怀中)