

文章编号: 1004- 0609(2000) 01- 0059- 06

粉末冶金 TiAl 基合金排气阀的制备及性能^①

刘 咏¹, 黄伯云¹, 贺跃辉¹, 欧阳鸿武¹, 郭景杰²

(1. 中南工业大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了粉末冶金 TiAl 基合金柴油机排气阀的近型成形技术, 其要点为: 采用元素粉末冶金方法, 以元素 Ti, Al 粉末为主要原料, 首先在刚模中冷压成排气阀菌部; 然后在真空热压炉中, 通过准等静压工艺, 同时实现 TiAl 基合金的反应合成与近型成形; 最后通过真空扩散联接工艺, 使粉末冶金 TiAl 基合金菌部与铸态 TiAl 基合金杆部联接成完整的排气阀零件。通过发动机台架的初步试验表明, 所制备的粉末冶金 TiAl 基合金排气阀表现出良好的服役性能。

关键词: 粉末冶金; TiAl 基合金; 柴油机; 排气阀; 近型成形

中图分类号: TG146

文献标识码: A

TiAl 基合金是一种新型的轻质高温结构材料, 它除了具有高的比强度、比刚度外, 还具有良好的高温抗氧化性能和一定的高温蠕变强度及高温抗疲劳能力, 因而一直备受材料研究工作者们的关注^[1~3]。目前 TiAl 基合金的一个重要应用就是作为发动机的关键工作部件——气门(包括进、排气阀)^[4~7]。采用 TiAl 基合金材料替代目前通用的不锈钢甚至镍基高温合金来制备气门, 其优势在于减轻材料质量及提高工作温度(主要针对不锈钢而言)。而进、排气阀质量的减轻对发动机性能的改善能起至关重要的作用, 这主要体现在以下几个方面^[5, 7]: 1) 与气门相连的弹簧受力减轻了, 气门在气门导管中运动时的摩擦力也相应降低, 发动机的效率得到了提高; 2) 气门与摇臂的冲击力减轻了, 气门的不平衡摇摆运动也得到了改善, 从而降低了噪音; 3) 气门重量减轻后, 气门的开启频率可以大幅度提高, 从而提高了发动机的速度; 4) 气门的运动惯量降低了, 从而显著地减少了气门对阀座的冲击力, 提高了气门阀座的寿命和密封性能, 提高了工作室的燃烧效率。研究表明, 采用轻质 TiAl 基合金材料作气门, 可以使发动机的燃油量降低 5%^[4]。

但是 TiAl 基合金的铸造性能较差, 易产生疏松、缩孔等铸造缺陷。采用粉末冶金方法可以避免上述缺陷, 而且这种方法在复杂零件的近型成形方面具有优势。但是 TiAl 基合金预合金粉末的制备

有一定难度, 成本较高^[7], 限制了粉末冶金 TiAl 基合金的发展。目前, 采用元素粉末冶金方法制备 TiAl 基合金得到了广泛研究^[8~11], 该方法成本较低, 而且所制备出来的材料性能已达到了铸造 TiAl 基合金水平^[12]。

本工作主要致力于采用元素粉末冶金方法制备 TiAl 基合金排气阀, 并初步考查其对发动机的适应性。由于采用常规粉末冶金方法在制备长杆件上有一定难度, 本工作首先采用元素粉末冶金方法制备 TiAl 基合金排气阀的关键部位——菌部, 其杆部采用铸造 TiAl 基合金, 再通过真空扩散联接, 使两部分结合成完整的排气阀。

1 实验过程

1.1 粉末冶金 TiAl 基合金排气阀菌部的制备

将元素 Ti 粉, Al 粉(平均粒度均为 26 μm , 粒度分布如图 1 所示), 按 Ti-48Al(摩尔分数, %)成分分配比, 然后在真空状态下均匀混合 3 h。将混合好的粉末装入特制的金属模内, 在 300 MPa 的压力下成型, 制备成冷压坯。将压坯置于石墨模具中, 周边添充 Al_2O_3 粉末($> 104 \mu\text{m}$), 如图 2 所示装配。整个装置在真空热压炉中, 以 40 MPa 的压力, 在 1350 $^{\circ}\text{C}$ 热压 1 h, 真空度为 1×10^{-3} Pa。然后将热压坯在 1250 $^{\circ}\text{C}$ 及 170 MPa 下进行 4 h 热等静压, 以进一步致密化。

① 基金项目: 国家“863”高技术基金资助项目 715- 005- 0040
作者简介: 刘 咏(1973-), 男, 博士研究生

收稿日期: 1999- 01- 02; 修订日期: 1999- 05- 15

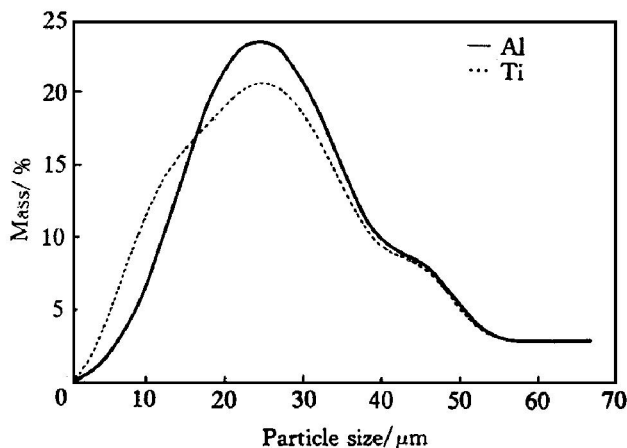


图 1 原料 Ti, Al 粉末的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of Ti, Al powders

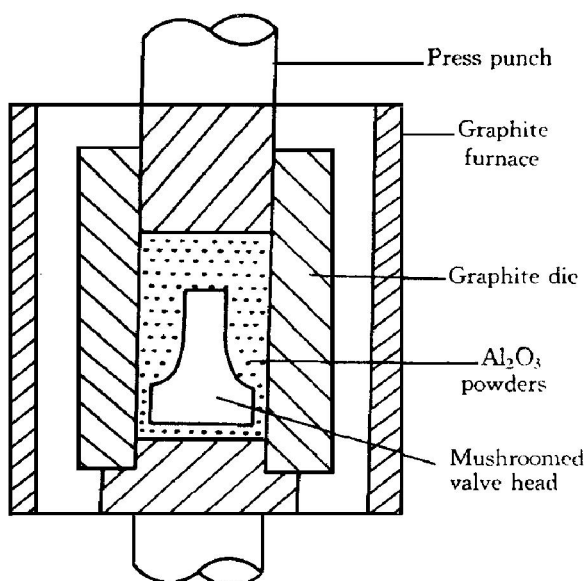


图 2 排气阀菌部的热压装置示意图

Fig. 2 Hot pressing assembly of mushroomed exhaust valve head

1.2 铸造 TiAl 基合金杆部的制备

采用磁悬浮熔炼方法制备出 Ti-33Al-3Cr-0.5Mo (质量分数, %) 合金铸坯。将铸坯在 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 170 MPa 下进行 4 h 热等静压, 以消除铸造缺陷。从铸坯中线切割出杆状样, 样品尺寸为 $d10\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。

1.3 真空扩散联接及后序处理

将粉末冶金 TiAl 基合金排气阀菌部与铸造 TiAl 基合金杆部在 Gleeble 1500 型热模拟机上扩散联接, 如图 3 所示。操作条件为: 真空度 $2 \times 10^{-4}\text{ Pa}$, 升温速率 $250\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, 联接温度 $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 施加外压 40 MPa , 保温时间 0.5 h 。联接好的样品还需经过热处理, 调整粉末冶金 TiAl 基合金排气阀菌

部的显微组织, 热处理工艺为 $1380\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.5\text{ h} + 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 8 h 。由于在发动机中, 排气阀的装配精度要求很高, 采用上述方法制备出的排气阀还需进行精加工, 加工后的排气阀尺寸如图 4 所示。

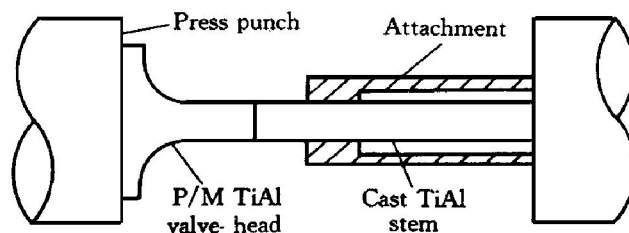


图 3 排气阀菌部与杆部的扩散联接示意图

Fig. 3 Diffusion bonding between mushroomed head and stem of exhaust valve

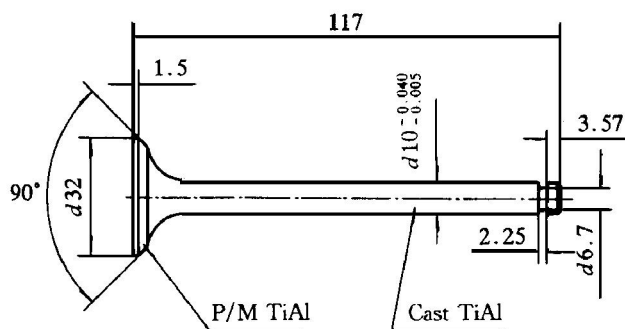


图 4 成品排气阀外形及尺寸 (mm)

Fig. 4 Shape and dimension of the exhaust valve finished

1.4 显微组织观察

真空热压后的样品, 扩散联接后的样品及热处理后的样品均经过常规金相样品制备过程, 在金相显微镜及 X650 扫描电镜下观察其显微组织。

1.5 发动机台架试验

该试验在 483Q 型柴油发动机 (湖南华裕发动机制造有限公司) 上进行。该发动机的工况与普通柴油发动机的工况对比如表 1 所示。在发动机的第一、二缸内安装粉末冶金 TiAl 基合金排气阀, 进气阀及第三、四缸的排气阀均不变。装配好的发动机首先经过无负荷磨合 2 h (发动机工况为 $n = 600 \sim 1000\text{ r/min}$, $N = 0\text{ kW}$), 然后带负荷磨合 4 h (发动机工况为 $n = 600 \sim 4000\text{ r/min}$, $N = 0 \sim 46\text{ kW}$); 再进行全负荷发动机速度特性测试, 即在不同的固定转速下, 测发动机的最大马力; 最后在 4000 r/min 的额定转速下, 进行全负荷 ($N = 46 \pm 2\text{ kW}$) 耐久试验。试验过程由 DN2 型内燃机台架测试系统检测发动机的各项性能数据。

表 1 483Q 型柴油发动机主要特性及与
其它同类型柴油发动机的比较

Table 1 Comparison between main
specifications of 483Q type diesel and
those of other type diesel

Specification	483Q type diesel	Other type diesel
Rotating rate, r/min	4 000	3 000~ 3 600
Average piston rate, m/s	13. 33	10~ 12
Average effective pressure/ kPa	662(Max. 826)	620~ 650
Torque storage/ %	24. 7	10~ 18

2 试验结果

2.1 粉末冶金排气阀坯料的外观

冷压成型后的排气阀菌部压坯, 形状较复杂, 存在台阶及高径比较大的部分(细杆部), 但外形规整, 无分层、开裂等缺陷。与冷压坯相比, 热压坯尺寸在径向的变化不大, 在轴向(加压方向) 变化较大, 达 25%。热压坯的外形也较规整, 无弯曲、气孔等缺陷。

2.2 显微组织

热压后材料内的孔隙分布及显微组织如图 5 所示。从图中可以看出, 经过 1 350 ℃真空热压后, 材料内的残余孔隙已经很少, 且均为闭孔隙, 致密度达 98%; 热压后显微组织为细小的双态组织, 即主要由 α₂/ γ 层片状晶团和等轴的 γ 晶粒组成。其中 α₂/ γ 层片状晶团的尺寸平均约 50 μm, γ 晶粒的尺寸平均约 20 μm。经过 1 250 ℃热等静压后, 材料内的残余孔隙已被完全消除, 但显微组织变化不大。粉末冶金 TiAl 基合金与铸态 TiAl 基合金经真空扩

散联接后, 联接界面附近的显微组织如图 6 所示。从图中可以看出, 虽然铸态 TiAl 基合金的显微组织为粗大(500 μm) 的全层片组织, 但与细小双态组织的接合良好。联接界面呈锯齿形, 无明显的孔洞出现。经过热处理后, 菌部的显微组织如图 7 所示。从图中可以看出, 其显微组织属于细小全层片组织, 层片晶团的平均尺寸约 50 μm。

2.3 台架试验

经过精加工后的粉末冶金 TiAl 基合金排气阀如图 8 所示。安装了粉末冶金 TiAl 基合金排气阀后, 发动机的速度特性试验结果如图 9 所示。从图中可以看出, 随着转速的提高, 发动机的最大功率也稳步提高, 表明发动机性能正常。在耐久性试验中, 发动机的各项主要指标随时间的变化如图 9(b) ~ (d) 所示。结果表明, 随着试验进行发动机的功率和排气温度很快达到最大值, 并趋于稳定, 而比油耗开始缓慢下降, 随后虽然略有波动, 但总的趋势在不断下降, 并逐渐稳定。这表明发动机的性能正常。经过台架试验后, 粉末冶金 TiAl 基合金排气阀外形完好, 无明显损伤及氧化皮剥落现象。

3 讨论

3.1 粉末冶金 TiAl 基合金的反应合成及全致密化

元素 Ti, Al 粉末在 Al 的熔化点以前(约 640 ℃) 就开始发生剧烈的放热反应, 反应的最终产物为 TiAl 和 Ti₃Al, 但通常伴有中间产物 TiAl₃^[8]。在后序的反应烧结中, 通过元素的反应扩散可以消除中间产物, 而反应后的显微组织和相组成与反应烧结温度有重要关系。通常还要通过后序热处理调

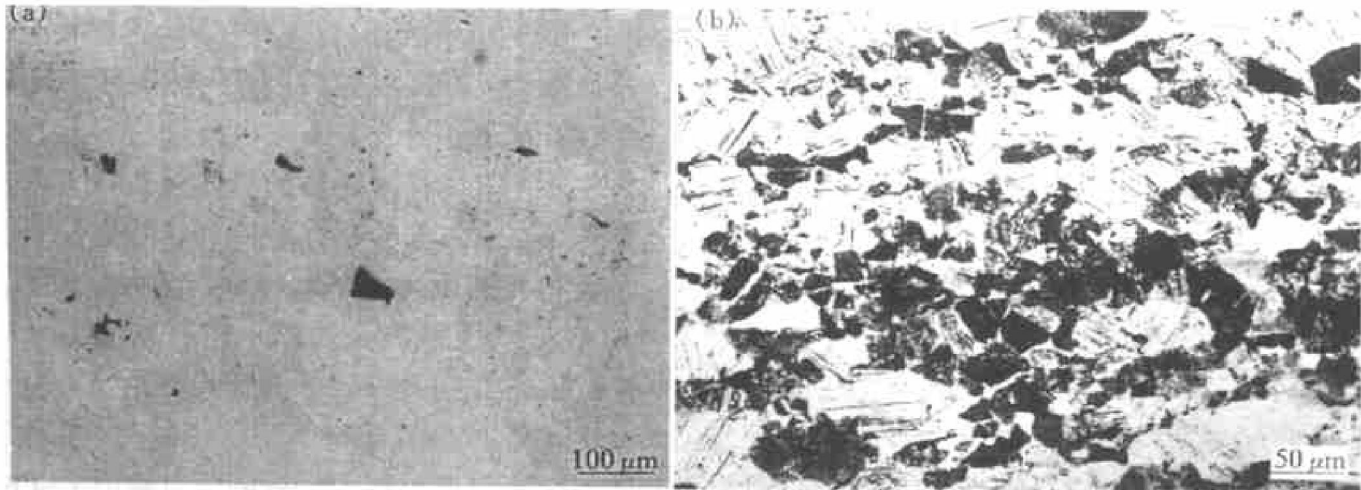


图 5 热压后排气阀菌部内的孔隙分布及显微组织

Fig. 5 Porosity distribution and microstructure in hot pressed exhaust valve head



图 6 排气阀菌部与铸态杆部联接界面处的显微组织(×500)

Fig. 6 Microstructure in interface of exhaust valve head and its as-cast stem

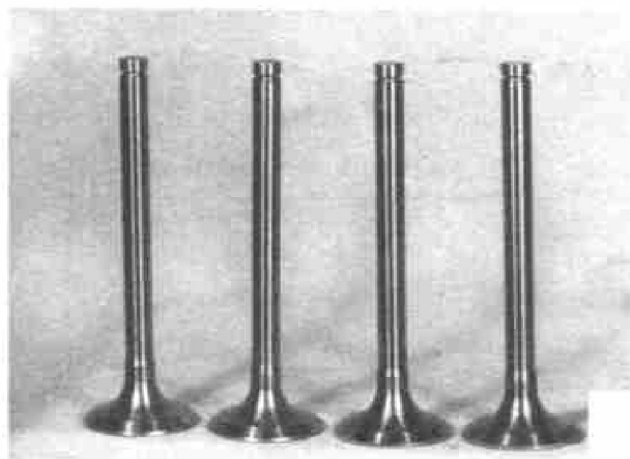


图 8 经过机加工后的排气阀零件

Fig. 8 Appearance of machined exhaust valve 的强度^[16]。细小双态组织虽在高温下具有超塑性,但这也从另一方面表明其高温强度的不足。而全层片组织的高温强度及蠕变强度较高,因此排气阀菌部还需进行热处理以调整显微组织。将细小双态组织加热到 α 单相区,使该显微组织在热处理温度下转化为 α 单相,在冷却过程,从 α 晶粒中析出 γ 板条,得到 α_2/γ 层片晶团,然后在 1000 °C 进行稳定化处理,从而最终得到全层片组织。从前面的结果中也可以看出,粉末冶金 TiAl 基合金的显微组织比铸态 TiAl 基合金的细小得多。这主要归因于采用粉末冶金方法的合成材料温度远低于铸造方法的温度(熔点以上),因而能较好地控制最终显微组织,得到细小的全层片组织。采用元素粉末冶金方法制备 TiAl 基合金的另一重要问题是致密化。在不加外压时,元素 Ti, Al 粉末在反应过程中,由于 Al 的偏扩散造成 Kirkendall 效应及 Al 熔化后残余的孔隙,使得反应后的压坯中孔隙度较大并发生较大的体积膨胀。这些残余孔隙都必须在随后的烧结过程中予以消除。但是由于粉末 TiAl 的后序烧结中一般不出现液相,孔隙的消除过程很缓慢。施加外压后,一方面可以抑制 TiAl 压坯在反应过程中的体积膨胀,另一方面可以使反应后大的残余孔隙发生塌陷;而且在随后的烧结过程中,通过扩散蠕变作用,使大部分小孔隙闭合。由于石墨模具不能承受很大的压力,因此热压的压力一般都不大(< 40 MPa),少量残余孔隙不能完全消除。但是在后序热等静压过程中,外界压力高达 170 MPa,可以完全消除残余孔隙。值得一提的是,在本工作中,排气阀在热压过程中受到的压力是由 Al_2O_3 粉末从各个方向传递过来的,与热等静压中气体传压一样,是三向压力。但是 Al_2O_3 粉末的传压均匀性比气体传压差,因此这三向压力不完全相同,这种加压

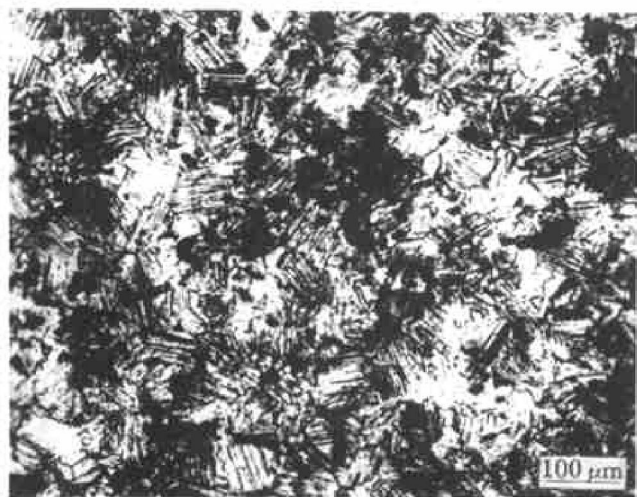


图 7 经过热处理后排气阀菌部的显微组织

Fig. 7 Microstructure of heat treated valve head

整材料中 TiAl/Ti₃Al 的含量比值及显微组织^[13, 14]。本工作对 Ti-48% 混合元素粉末所采用的热压温度(1350 °C)位于 Ti-Al 相图的(α + γ)两相区的高温区,即在反应温度下得到的最终平衡产物为 α -Ti₃Al 和 γ -TiAl。在冷却过程,从 α -Ti₃Al 中析出 γ 板条,得到 α_2/γ 层片组织。因此,最后得到由 α_2/γ 层片晶团和 γ 等轴晶粒组成的细小双态组织。该种组织的室温延性较好,在高温下具有超塑性^[15]。当具有双态组织的粉末冶金 TiAl 基合金与具有粗大层片组织的铸态 TiAl 基合金在 1160 °C, 40 MPa 的轴向压力下联接时,细小双态组织在联接界面处发生超塑性变形,填充了界面处的凹凸不平处,使两个界面首先发生机械啮合,随后通过扩散使界面达到冶金结合,从而保证了联接件

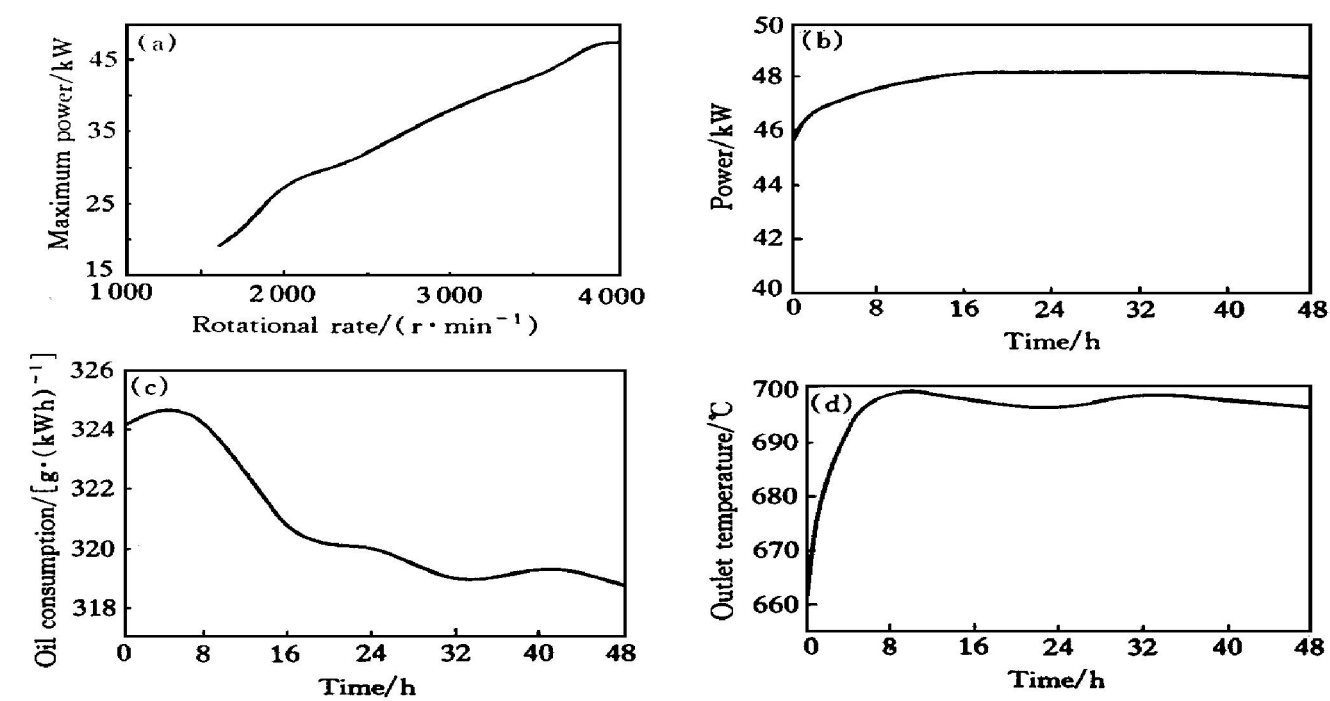


图 9 使用粉末冶金法制成的排气阀的发动机台架性能试验结果

Fig. 9 Diesel properties curves measured during stand test using exhaust valve made by P/M
(a) —Power vs rotary rate; (b) —Power; (c) —Fuel consumption; (d) —Temperature of exhaust valve outlet

方式也被称为“准等静压”(PseudorHIP)^[17]。

3.2 排气阀的台架性能试验

发动机台架试验的工况对排气阀的综合性能是一个严格的考验。排气阀在发动机中的受力状态比较复杂,而且各个部分的可能破坏方式不同,如图 10 所示^[5]。排气阀的工作温度可达 800℃以上,因此在排气阀的菌部及锁夹部位主要是高温疲劳破坏,菌部还存在高温蠕变破坏;杆部的顶部及排气阀座相配合的锥面主要是受冲击和磨损。各个部位受的应力大小也不同,受应力最大的地方为菌部的圆弧处(图 10 中 A 处)和锥面,可达 35~70 MPa,而且当排气阀的安装发生失配时,则该区的弯曲应力可达 100~250 MPa^[5]。本工作所采用的 483Q 型柴油机的工况比普通柴油机的工况更为苛刻,主要表现为高额定转速,高扭矩(见表 1)。如果排气阀在试验中出现问题,将会直接反映到发动机性能指标上,如排气阀锥面严重磨损会使气门间隙变小,发动机的密封性能变差,导致发动机工作室中的燃烧不充分,从而使功率下降,比油耗增加。但是,本试验的结果表明粉末冶金TiAl基合金排气阀能够较令人满意地在这种苛刻的工况中运行。

4 结论

1) 通过元素粉末冶金方法与准等静压工艺相结

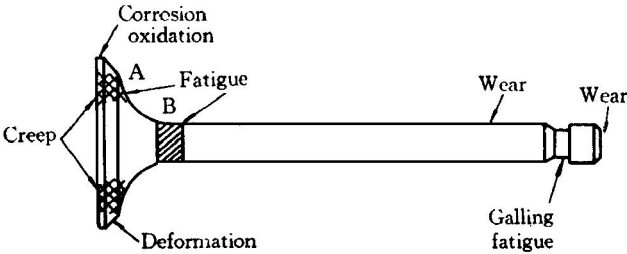


图 10 排气阀的破坏方式及位置^[5]

Fig. 10 Possible destruction fashions and positions of exhaust valve in diesel

合,一步完成了粉末冶金 TiAl 基合金排气阀的材料合成与近型成形。

2) 通过真空扩散联接,制备出了界面接合良好的排气阀联接件。

3) 通过发动机台架的初步试验表明,所研制的粉末冶金 TiAl 基合金排气阀表现出较好的服役性能。

REFERENCES

[1] Shibue Kazuhisa, Kim M S, Kumagai M, *et al.* Activity of P&D on γ -TiAl in SLM [J]. Sumitomo Light Met Tech Rep, 1994, 35(3, 4): 210~ 220.
[2] Kim Y W. Ordered intermetallic alloys, Part III: Gamma titanium aluminides [J]. JOM, 1994, 46(7): 30~ 39.

- [3] Kim Y W. Gamma titanium aluminides: their status and future [J]. JOM, 1995, 47(7): 39~ 41.
- [4] Bondarev B I, Elagin D V, Molotkow A V, *et al.* Metal science and engineering: aspects of TiAl based binary alloys investigations [A]. In: Kim Y W, Wagner R, Yamaguchi M eds. Gamma Titanium Aluminides, TMS [C]. 1995: 803~ 810.
- [5] William E, Dowling Jr, William T, *et al.* Development of TiAl based automotive engine valves [A]. In: Mat Res Soc Symp Proc, MRS [C]. 1995, 364: 757~ 767.
- [6] Jones P E, Porter W J, Keller M M, *et al.* Microstructure/property studies supporting development of low cost processes for TiAl automotive valves [A]. In: Mat Res Soc Symp Proc, MRS [C]. 1995, 364: 769~ 774.
- [7] Susan E, William E, Dowling Jr, *et al.* Titanium aluminide automotive engine valves [A]. In: Kim Y W, Wagner R, Yamaguchi M eds. Gamma Titanium Aluminides, TMS [C]. 1995: 41~ 52.
- [8] Wang G X and Dahms M. An Overview: TiAl based alloys prepared by elemental powder metallurgy [J]. PMI, 1992, 24(4): 219~ 225.
- [9] Yang J B, Teoh K W and Hwang W S. Preparation of $\alpha_2 + \gamma$ type TiAl intermetallics from elemental powders by solid state hot pressing [J]. Mater Sci Tech, 1997, 13(8): 695~ 701.
- [10] Hidenori K. Dimension change of Ti/Al elemental powder compacts during combustion synthesis [J]. J Japan Soc of Powder Powder Metall, 1994, 41(5): 518.
- [11] LIU yong, HUANG Ba-ryun, HE Yue-hui, *et al.* Microstructures of TiAl based alloys prepared by hot pressing elemental powders [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(13): 397~ 402.
- [12] Lee T K, Mosunov E I and Hwang S K. Consolidation of gamma TiAl-Mn-Mo alloy by elemental powder metallurgy [J]. Mater Sci Eng, 1997, A239~ 240: 540~ 545.
- [13] Rawers J C and Wrzesinski W. Heat treatment of reaction sintered hot-pressed TiAl [J]. Scripta Metall et Mater, 1990, 24(10): 1985~ 1990.
- [14] Wang G X and Dahms M. Influence of heat treatment on microstructure of Ti-35% Al prepared by elemental powder metallurgy [J]. Scripta Metall et Mater, 1992, 26(5): 717~ 722.
- [15] HE Yue-hui, HUANG Ba-ryun and LIU Yong. Viscous and rheologic superplastic technique [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(1): 48~ 51.
- [16] HE Yue-hui, HUANG Ba-ryun, LIU Yong, *et al.* Solid-state joining of TiAl based alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica (in Chinese), 1998, 34(11): 1167~ 1172.
- [17] Taguchi K, Ayada M, Ishihara K N and Shingu P H. Near-net shape processing of TiAl intermetallic compounds via pseudo HIP-SHS route [J]. Intermetallics, 1995, 3: 91~ 98.

Manufacture and properties of powder metallurgy TiAl-based valves

LIU Yong¹, HUANG Ba-ryun¹, HE Yue-hui¹, OUYANG Hong-wu¹, GUO Jing-jie²

1. State Key Laboratory for Powder Metallurgy,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China;

2. College of Material Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China

Abstract: The manufacturing method and properties of P/M TiAl based exhaust valves were investigated. The P/M TiAl based exhaust valves were prepared through elemental powder metallurgy (EPM), i. e. elemental Ti, Al powders were used as raw material. Firstly, the mixed elemental powders were cold-pressed into a mushroomed head of the valve. Then the compacts were pseudo-HIPed, in which both the material synthesis and near net shaping were realized at one step. Finally, the P/M TiAl based mushroomed valve heads were connected with the as-cast TiAl based valve stems through diffusion joining technique. The primary results in diesel stand test using those valves prepared above showed that the diesel properties have met the requirements for practical application.

Key words: powder metallurgy; TiAl based alloy; diesel exhaust valve; near net shaping

(编辑 朱忠国)