

摩托车发动机用 Ti-Al-Fe-Mo 气门的制备及性能表征

陈 峰^{1,2}, 闫志巧¹, 许荣君^{1,2}, 刘 彬², 林国亮³

(1. 广东省科学院 广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650)

(2. 中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083)

(3. 江门天钲金属工业有限公司, 广东 江门 529080)

摘 要: 以 Ti 粉和 Al、Fe、Mo 等元素粉末为原料, 采用粉末冶金工艺制备了 Ti-Al-Fe-Mo 合金, 并最终制成摩托车发动机用钛气门。研究了钛合金制备过程中的组织和性能演变规律, 考察了钛气门的装机试验使用效果。结果表明, 采用粉末冶金工艺制备的 Ti-Al-Fe-Mo 合金具有优良的综合性能, 其抗拉强度为 1232 MPa, 屈服强度为 1186 MPa, 延伸率为 6.5%, 硬度为 49 HRC。在钛合金表面涂覆 TiN 硬质耐磨涂层后, 制成的钛气门可满足摩托车发动机的装机测试要求。与使用钢制气门相比, 使用钛气门可以使发动机的功率和扭矩提高约 12%, 油耗降低 1%, 并显著降低噪音。

关键词: 钛合金; Ti-Al-Fe-Mo; 元素混合法; 粉末冶金; 气门

中图分类号: TF12; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3297-05

减轻发动机运动件的质量对提高发动机的效率意义重大。气门是发动机的关键零部件之一, 用钛合金制造的汽车发动机气门, 不但能减轻质量、延长使用寿命, 而且可降低油耗和提高汽车的可靠性^[1-3]。研究结果表明^[4,5]: 与钢制气门相比, 汽车发动机装配 TiAl 基合金排气门可使弹簧力和惯性力降低 45%、摇臂力降低 25%、凸轮轴驱动扭矩降低 30%。在此基础上, 可以对弹簧、摇臂和凸轮轴进行二次轻量化设计, 使整个气门的传动机构进一步轻量化和优化。同时, 技术状况的耐久性提高, 固定工况油耗降低 1%, 综合节能大于 5%; 明显降低噪声和减少排放污染, 提高车辆的驾乘舒适性。

尽管具有这些优点, 但是由于早期钛气门制造成本较高, 并没有在发动机气门中得到广泛应用, 仅仅主要用于赛车和一些高端车型。20 世纪 90 年代, 日本丰田公司改进了钛气门制造技术, 继而在一系列汽车发动机中采用钛气门, 成为第一家大规模使用钛气门的车企。随后奔驰、宝马、本田等多家车企也大量使用钛气门。雅马哈则在对气门性能要求更高的 250cc 摩托车发动机上也采用了钛气门^[6]。受产品升级换代

和环保标准提高等因素的驱动, 中国车企对钛气门的需求正在日益增加。但上述欧美龙头车企均对钛气门制造技术实施严格保密, 而且限制钛气门对外单独销售。中国虽然差不多在同期开展了钛气门的研究, 却迄今未形成商业化产品。

与汽车发动机相比, 摩托车发动机体积更小, 转速更高, 减轻气门质量的意义更大^[7]。本实验以摩托车发动机用低成本钛气门为研究目标, 采用粉末冶金方法制备了一种 Ti-Al-Fe-Mo 气门, 研究了制备过程中的合金组织与性能演变规律, 考察了钛气门的装机试验效果, 希望能够为钛气门的研发提供参考。

1 实 验

原料粉末为 Ti 粉、Al 粉、Fe 粉和 Mo 粉, 各种粉末的特性如表 1 所示。按 Ti-Al-Fe-Mo 合金的成分设计称取粉末, 在 V 型混料机中混合均匀, 采用冷等静压在 180 MPa 压强下进行成形, 制成 $\Phi 30$ mm 的粗棒料。经 1200 °C、3 h 真空烧结制备烧结坯, 并进一步热轧成 $\Phi 6.5$ mm 的细棒料, 经真空退火后, 热锻成气门毛坯。再经热处理、精加工和表面处理后, 制成

收稿日期: 2018-10-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51404077); 广东省自然科学基金 (2015A030313775); 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项 (2017GDASCX-0117, 2018GDASCX-0117, 2019GDASYL-0402006); 广东省公益研究与能力建设专项 (2017A070701029); 广州市科技计划项目 (ZWY201704003, 201508030032)

作者简介: 陈 峰, 男, 1979 年生, 博士生, 高级工程师, 广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650, 电话: 020-61086127, E-mail: chenfengsu@163.com

表 1 原料粉末的特性

Table 1 Characteristics of raw powders

Powder	$D_{50}/\mu\text{m}$	$\omega_C/\%$	$\omega_H/\%$	$\omega_O/\%$	$\omega_N/\%$	Processing method
Ti	69.8	-	0.013	0.25	0.006	HDH
Al	19.7	0.006	0.019	0.24	0.017	GA
Fe	25.3	0.007	0.0001	0.16	0.024	CD
Mo	5.55	0.009	0.017	0.23	0.009	RO

Notes: HDH: hydride/dehydride; GA: gas atomization; CD: carbonyl decomposition; RO: reduction oxide

符合尺寸要求的摩托车发动机用钛气门。最后进行装机试验,包括磨机+拉高速试验、启动耐久试验和速度特性试验。详细的制备流程见图 1 所示。

采用排水法测试合密度。通过扫描电镜(SEM)和金相显微镜(OM)观察微观组织和断口形貌。采用 X 射线衍射仪(XRD)对材料进行物相分析。用 HR-150A 型洛氏硬度计测试硬度(HRC)。按照 GB6397-86《金属拉伸试验试样》取样,用美国 Instron 8802 型力学试验机进行拉伸性能测试。

2 结果与分析

2.1 合金的制备与组织演变过程

粉末冶金钛合金的研究主要集中在混合元素法(BE)^[8,9]、预合金法(PA)^[10,11]和快速凝固法(RS)^[12,13]等 3 种方法上。其中混合元素法具有优越的性价比优势,而且在合金成分选择和显微组织设计上具有更高的自由度,因此成为制备低成本钛合金最有潜力的工艺之一。此外,采用廉价的 Fe、相对廉价的 Mo 取代 V 作为 β 稳定元素可以显著降低钛合金的原料成本^[14,15]。已有较多报道采用混合元素法制备 Ti-Al-Fe-Mo 系合金^[16,17]。因此本研究也选择了 Ti-Al-Fe-Mo 这一合金体系,并通过混合元素法制备热轧的棒料。由于还需进行后续致密化处理,因此棒料在真空烧结工序中采用了

1200 °C 这一较低的烧结温度,得到的烧结坯的密度较低,为 4.23 g/cm³,相应的致密度为 92.7%。

图 2 是真空烧结后 Ti-Al-Fe-Mo 合金的 XRD 图谱。可以看出,该合金是一种 $\alpha+\beta$ 钛合金。图 3 给出了烧结坯的微观组织。在图 3a 所示的背散射电子衍射(BSED)照片中,黑色区域为孔隙,其形状为近球形,大小不均匀,尺寸相差比较大。浅色区域为 β -Ti 相,深色区域为 α -Ti 相。晶界由 β -Ti 构成, α -Ti 呈层片状从晶界向晶内生长,片层之间被 β -Ti 隔开。同一晶粒内部,片层的取向基本相同。从图 3b 所示的金相(OM)照片可以看出,原始晶界比较完整,大部分晶粒由 α -Ti 相和 β -Ti 相共同组成, α -Ti 在晶内按相同的取向呈层片状排列,局部有少量粗大的 β -Ti 晶粒。由图 3 可以判断烧结态合金的组织为粗大的魏氏组织。

为了进一步提升合金的致密度和细化晶粒,对烧结态合金棒料进行热轧和退火处理。图 4a 和 4b 分别是垂直于轧制方向的合金热轧态和退火态的 SEM 照片。从图 4a 可以看出,烧结态合金经热轧处理后,孔隙消失,材料致密度得到有效提高。而且此前烧结态合金中的魏氏组织被完全破坏,无论是 α -Ti 还是 β -Ti 都沿变形方向被拉长,并发生了扭曲和断裂,呈现出热轧加工特有的形变组织。经真空退火后(图 4b),形变组织消失,再结晶形成了等轴晶,并且在 β -Ti 相内

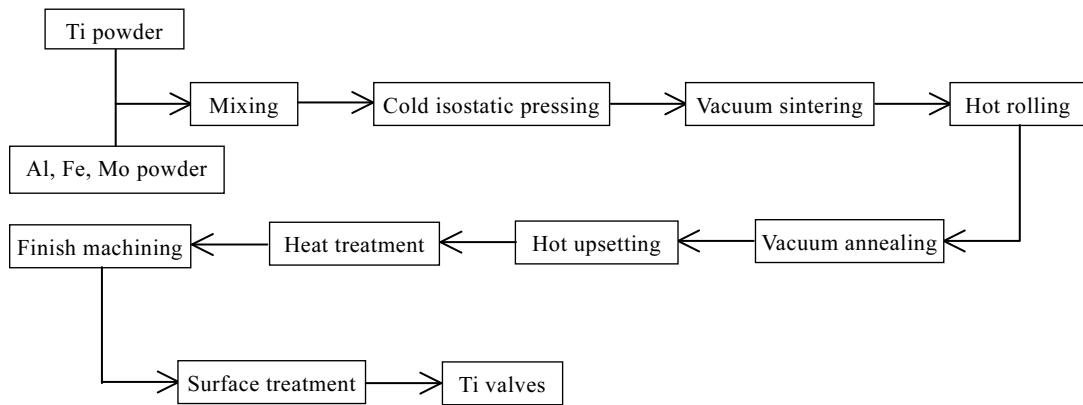


图 1 钛气门的制备流程

Fig.1 Manufacturing process of Ti valves

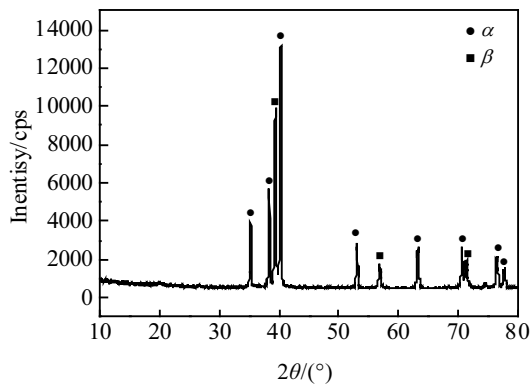


图 2 烧结态 Ti-Al-Fe-Mo 合金的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of the sintered Ti-Al-Fe-Mo alloy

析出了针状的次生 α -Ti。

将退火后的细棒料的一端热锻成锥面, 制成气门毛坯后, 再进行固溶时效处理, 对锥面和端面不同部位取样进行组织分析, 取样部位、气门端面和锥面的微观组织见图 5 所示。对比图 5b 和 5c 发现, 热锻不会明显改变合金的组织, 其锥面和端面的组织基本相同, 均出现了大量的细小、针状 α -Ti 相。大量细小的针状 α -Ti 相相互交错, 将晶粒分割成了很多细小的亚结构, 在一定程度上产生了细化晶粒的效果。

2.2 不同状态的合金性能

表 2 列出了不同状态下合金的性能。可以看出, 烧结态合金的抗拉强度和延伸率都比较低, 分别为 912 MPa 和 5.13%, 这和烧结态合金致密度不高和组织粗大有关(图 3)。热轧态合金基本全致密, 并且合金组织发生了细化(图 4a), 因此其强度和延伸率较烧结态有大幅度提升, 抗拉强度达到 1217 MPa, 延伸率提升至 8.32%, 抗拉强度和延伸率较烧结态分别提高了 33.4% 和 62.2%, 硬度为 40 HRC。与热轧态相比, 真空退火态合金的强度和硬度均有所降低, 分别为 996 MPa 和 38 HRC, 延伸率则大幅度上升, 达到了 16.85%。固溶时效态合金的强度和硬度是所有状态中最高的, 其抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 1232 MPa、1186 MPa 和 49 HRC, 延伸率比热轧态和退火态有所降低, 为 6.5%。

2.3 钛气门装机试验

对热处理后的气门进行精加工, 然后采用物理气相沉积(PVD)工艺在其表面涂覆 TiN 硬质耐磨涂层, 制成气门成品。将钛气门成品装入摩托车发动机中进行磨机+拉高速试验和启动耐久试验等装机测试。磨机+拉高速试验工况为: 先在 3000 r/min 工作 1 h, 再在 6000 r/min 工作 1 h, 最后在 11500 r/min 工作 15 min;

启动耐久试验工况为: 反复启动 1000 次。经磨机+拉高速试验和启动耐久试验后, 气门杆部、锥部未见磨损, 锁夹槽等部位均未见变形(图 6), 表明所制备的钛气门能满足装机试验的要求。

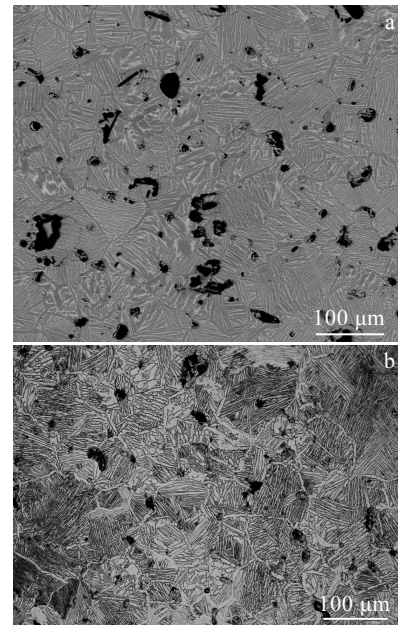


图 3 烧结态 Ti-Al-Fe-Mo 合金的微观组织

Fig.3 Microstructures of the sintered Ti-Al-Fe-Mo alloy: (a) BSEI image and (b) OM image

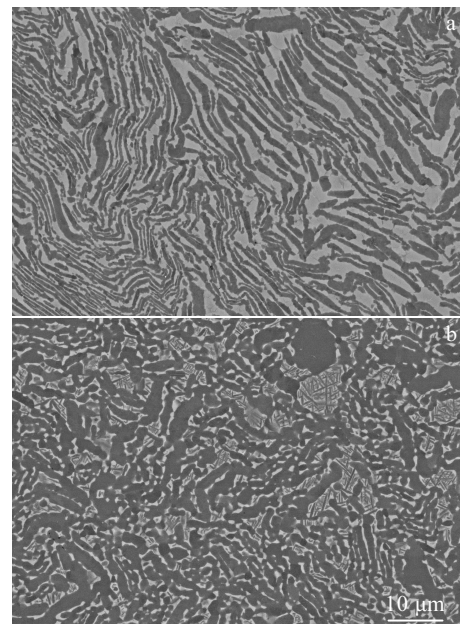


图 4 热加工态合金的 SEM 照片 (垂直于轧制方向)

Fig.4 SEM images of the heat-processed alloys (vertical to the rolling direction): (a) in the rolling state and (b) in the annealing state

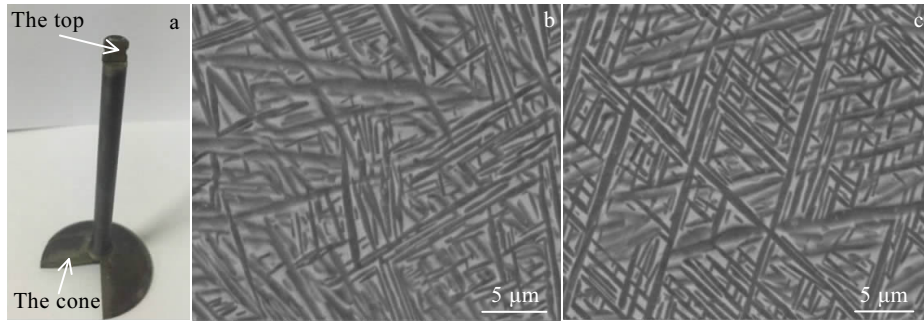


图 5 取样部位及固溶时效后气门的微观组织

Fig.5 Sampling site (a) and SEM images of valves after solution and aging: (b) the top and (c) the cone

表 2 不同状态的合金性能

Table 2 Properties of alloys at different states

Alloy state	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Hardness(HRC)
Sintering	912	891	5.13	-
Hot rolling	1217	1156	8.32	40
Annealing	996	896	16.85	38
Solution and aging	1232	1186	6.50	49



图 6 钛气门装机试验后的宏观照片

Fig.6 Photographs of Ti valves after the on-board test: (a) the overall morphology, (b) the top, and (c) the cone

摩托车发动机的性能测试结果见图 7 所示。图中对比了普通钢制气门和钛气门对摩托车发动机功率和扭矩随转速的影响，其中测试钢制气门采用的发动机为常规顶杆式 250 mL 发动机，测试钛气门分别采用了 250 mL 顶杆式和摇臂式两种发动机。从图 7a 和 7b 可以看出，对于 3 种检测情况，输出功率均随转速的升高而提高，扭矩则随转速的升高先升高后降低。但装配钛气门发动机的功率和扭矩均明显高于装配传统钢制气门发动机的功率和扭矩。而且对于顶杆式和摇臂式这两种不同类型的发动机，在相同的转速下，装配钛气门的摇臂式发动机的功率和扭矩大于顶杆式发动机的功率和扭矩，这表明摇臂式发动机可以更有效地发挥钛气门的减重作用。

与目前常用的钢制气门相比较，钛合金气门质量减轻约 40%，可以提升发动机功率和扭矩约 12%，同时试

验过程中还发现固定工况降低油耗 1%，明显降低噪声。此外，整个发动机传动机构的零部件还有进一步轻量化

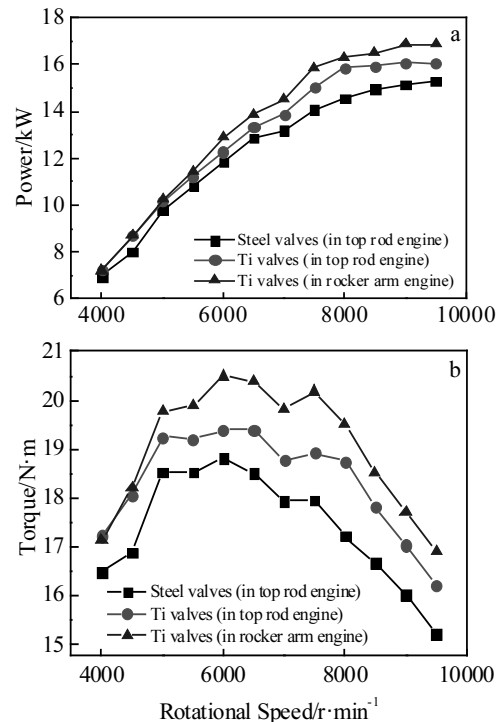


图 7 摩托车发动机的性能测试结果

Fig.7 Performance test results of the motorcycle engine: (a) relationship between power and rotational speed; (b) relationship between torque and rotational speed

和优化的空间, 这将有助于进一步提升发动机的效率。

3 结 论

1) 采用粉末冶金工艺可制备出综合性能优良的 Ti-Al-Fe-Mo 合金, 其抗拉强度、屈服强度、延伸率和硬度依次为: 1232 MPa、1186 MPa、6.5%和 49 HRC。

2) 在钛气门表面制备 TiN 硬质耐磨涂层后, 气门的机械性能可满足磨机+拉高速试验和起动耐久试验等装机测试要求。

3) 与钢制气门相比, 钛合金气门质量减轻约 40%, 可以提升发动机功率和扭矩约 12%, 降低油耗 1%, 明显降低噪声。

参考文献 References

- [1] Yang Yuchun(杨遇春), Wang Yan(王 燕). *Rare Metals*(稀有金属)[J], 1997, 21(5): 371
- [2] Tomiichi Wu Hai(村山武海), Liu Kexin(刘克鲜), Ma Ge(马戈). *Foreign Diesel Locomotive*(国外内燃机车)[J], 2000(6): 39
- [3] Wang Yuzhou(王宇宙), Dong Jianxin(董建新). *Materials Review*(材料导报)[J], 2016, 30(7): 87
- [4] He Shiwen(何世文), Ouyang Hongwu(欧阳鸿武), Liu Yong(刘咏). *Automobile Technology & Material*(汽车工艺与材料)[J], 2004(2): 29
- [5] Hoyer U, Rahnavardi P, Sheng Hanrong(盛汉荣). *Foreign Internal Combustion Engine*(国外内燃机)[J], 2000(2): 43
- [6] Leyens C, Peters M, Chen Zhenhua(陈振华). *Titanium and Titanium Alloys*(钛与钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 350
- [7] Lan Yong(蓝 勇). *Motorcycle*(摩托车)[J], 2017(9): 86
- [8] Tang Huiping(汤慧萍), Huang Baiyun(黄伯云), Liu Yong(刘咏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(9): 677
- [9] Jia M T, Gabbitas B, Bolzoni L. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 255: 611
- [10] Liu Y, Chen L F, Tang H P *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 418(1-2): 25
- [11] Xu Xiaoyan, Nash Philip. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 607: 409
- [12] Wei S L, Huang L J, Chang J *et al. Materials Letters*[J], 2016, 175: 291
- [13] Suwarno S, Solberg J K, Maehlen J P *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 582: 540
- [14] Kosaka Y, Fox S P, Faller K *et al. Journal of Materials Engineering and Performance* [J], 2005, 14(6): 792
- [15] Froes F H, Eylon D, Eichelman G E *et al. JOM*[J], 1980, 32(2): 47
- [16] Yan Z Q, Chen F, Cai Y X *et al. Powder Technology*[J], 2013, 246: 345
- [17] Liu Y, Chen L F, Wei W F *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2006, 22(4): 465

Preparation and Property Characterization of Ti-Al-Fe-Mo Valves for Motorcycle Engines

Chen Feng^{1,2}, Yan Zhiqiao¹, Xu Rongjun^{1,2}, Liu Bin², Lin Guoliang³

(1. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

(2. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

(3. Jiangmen TYAN Metal Industry Company Limited, Jiangmen 529080, China)

Abstract: Ti-Al-Fe-Mo alloy was prepared by a powder metallurgy method with titanium, aluminum, molybdenum and iron powders as raw materials, and the alloy was used to fabricate valves for motorcycle engines. The microstructure as well as property evolution of the alloy during the preparing process was investigated. The performance of motorcycle engines assembled with Ti valves was also tested. The results show that Ti-Al-Fe-Mo alloy prepared by powder metallurgy has excellent comprehensive performances with ultimate tensile strength 1232 MPa, yield strength 1186 MPa, elongation 6.5% and hardness 49 HRC. The fabricated valves after coating TiN can meet the requirement of on-board tests of the motorcycle engine. Compared to steel valves, Ti valves can improve the power and torque of the motorcycle engines by about 12%, reduce fuel consumption rate by 1% and also lower the noise significantly.

Key words: titanium alloys; Ti-Al-Fe-Mo; element blending; powder metallurgy; valves

Corresponding author: Yan Zhiqiao, Ph. D., Senior Engineer, Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, P. R. China, Tel: 0086-20-61086127, E-mail: zhiqiaoyan@163.com