

Mo、V 和 Ag 对粉末冶金 Ti-5Al 合金组织与力学性能的影响

肖代红, 杨宝刚, 申婷婷, 袁铁锤, 贺跃辉, 王守仁

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 采用元素混合法制备粉末冶金 Ti-Al-Mo-V-Ag 合金, 通过金相观察、扫描电镜及力学性能测试等方法研究 Mo、V 和 Ag 的添加及烧结温度对 Ti-5Al 合金的烧结行为、显微组织与力学性能影响, 并对其作用机制进行探讨。结果表明: 1 350 °C 烧结时, V 与 Mo 的添加能改善烧结合金的压缩强度, 单独添加 Ag 时, 则降低基体合金的综合性能, 但当 Ag 与 Mo、V 同时添加到基体合金中时, 改变合金的显微组织, 提高烧结合金的致密度与抗压缩强度, 致密度能达到 96%, 抗压缩强度达到 1 782 MPa。同时, 烧结温度不同时, 相同成分的粉末冶金 Ti-5Al 合金的显微组织与性能也表现出不同的特征。

关键词: 钛合金; 微合金化; 烧结温度; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.23

文献标志码: A

Effects of Mo, V and Ag additions on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti-5Al alloy

XIAO Dai-hong, YANG Bao-gang, SHEN Ting-ting, YUAN Tie-chui, HE Yue-hui, WANG Shou-ren

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

Abstract: The powder metallurgy (P/M) Ti-Al-Mo-V-Ag alloys were processed by powder metallurgy using the blended elemental (BE) technique. The effects of Mo, V and Ag additions and sintering temperature on the microstructures and mechanical properties of the Ti-5Al alloys were investigated using optical microscope, scanning electron microscope and mechanical properties tests. The results show that adding Mo or V elements improves the compression strength of the based alloys after sintering at 1 350 °C, and Ag element addition decreases the properties of Ti-5Al alloy. However, adding Ag element with Mo and V elements increases the density and compressive strength of P/M Ti-5Al alloy. The relative density and compressive strength of the Ti-5Al-4Mo-4V-5Ag alloy are 96% and 1 782 MPa, respectively. Moreover, the sintering temperature also affects the microstructures and properties of the PM Ti-5Al based alloys.

Key words: titanium alloys; microalloying; sintering temperature; microstructure; mechanical properties

钛合金具有密度低、比强度高、屈强比高、塑韧性好、耐腐蚀性好等优点, 在军工和民用等领域具有广阔的应用^[1-2]。扩大钛合金市场的瓶颈是钛的提取、熔炼、机加工很难, 从而导致生产成本高^[3-4]。粉末冶金技术由于在零部件近净形方面具有优势, 能大大提高材料利用率, 降低加工成本, 并能获得均匀细小的显微组织, 因此成为降低钛合金成本的重要技术^[3-6]。粉末冶金钛合金的研究主要集中在混合元素法((BE)、预合金法(PA)和快速凝固法(RS)等 3 种方法上,

其中混合元素法无论是经济效益、成分选择及微观组织设计上, 都比其它两种方法优越^[7-8]。BE 法钛合金产品的主要应用是工业钛过滤器、叶轮或整体叶盘等形状复杂的零件, 如俄罗斯的伊尔 114 飞机发动机高压压气离心机叶轮和发动机轴支撑件。由于铝具有密度低、在钛中的固溶度大(质量分数超过 6%)等特点, 使得其成为钛合金中主要合金化元素之一。

目前已研制的低铝含量(2%~6%)粉末冶金钛合金因具有较高强度、良好耐热抗蠕变性能, 而受到广泛

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51021063); 国家杰出青年科学基金资助项目(50825102); 粉末冶金国家重点实验室创新基金资助项目(PM2010); 中国博士后科学基金特别资助项目(200801348); 湖南省科技计划博士后专项资助项目(2009RS3025)

收稿日期: 2010-06-28; **修订日期:** 2010-09-28

通信作者: 肖代红, 副教授, 博士; 电话: 0731-88877880; E-mail: xdh0615@163.com

的关注^[9-12]。由于合金化元素对粉末冶金钛合金具有重要影响^[13]，为此，本文作者拟采用元素混合法制备 Ti-5Al 基合金，通过低压烧结，研究 Mo、V 和 Ag 等的添加及不同烧结温度对基体合金的组织与性能影响，为实际工业生产提供可行性参考。

1 实验

试验用钛合金的名义成分如表 1 所列，原料为钛粉、钼粉、铝粉、银粉、铝-钒中间合金粉，平均晶粒尺寸分别为 48、1.5、2.6、0.7 及 74 μm 。按照配比称量粉末后，在行星式球磨机中通过氩气保护进行湿磨 24 h 后，在真空干燥箱中干燥处理。干燥后的粉末采用钢模压制成型，压力为 300 MPa。压坯在 5 MPa 氩气环境中进行低压烧结，烧结温度分别为 1 150、1 250 和 1 350 $^{\circ}\text{C}$ 。烧结后样品密度采用阿基米德排水法测量。试样抛光后采用 Kroll 试剂腐蚀并进行金相观察。压缩测试的样品尺寸采用 $d\ 6\ \text{mm}\times 7\ \text{mm}$ ，加

载速率为 1 mm/min。断口观察在 FEI-Nano230 型场发射扫描电镜上进行。

表 1 试验合金的名义成分
Table 1 Nominal composition of samples

Alloy No.	Mass fraction/%				
	Al	Mo	V	Ag	Ti
1	5	—	—	—	Bal.
2	5	4	—	—	Bal.
3	5	—	—	5	Bal.
4	5	—	4	—	Bal.
5	5	4	4	—	Bal.
6	5	4	4	5	Bal.

2 结果与分析

2.1 合金的显微组织

3 种不同烧结温度下的金相显微组织如图 1、2 及 3 所示。很明显，在相同烧结温度下，不同成分的

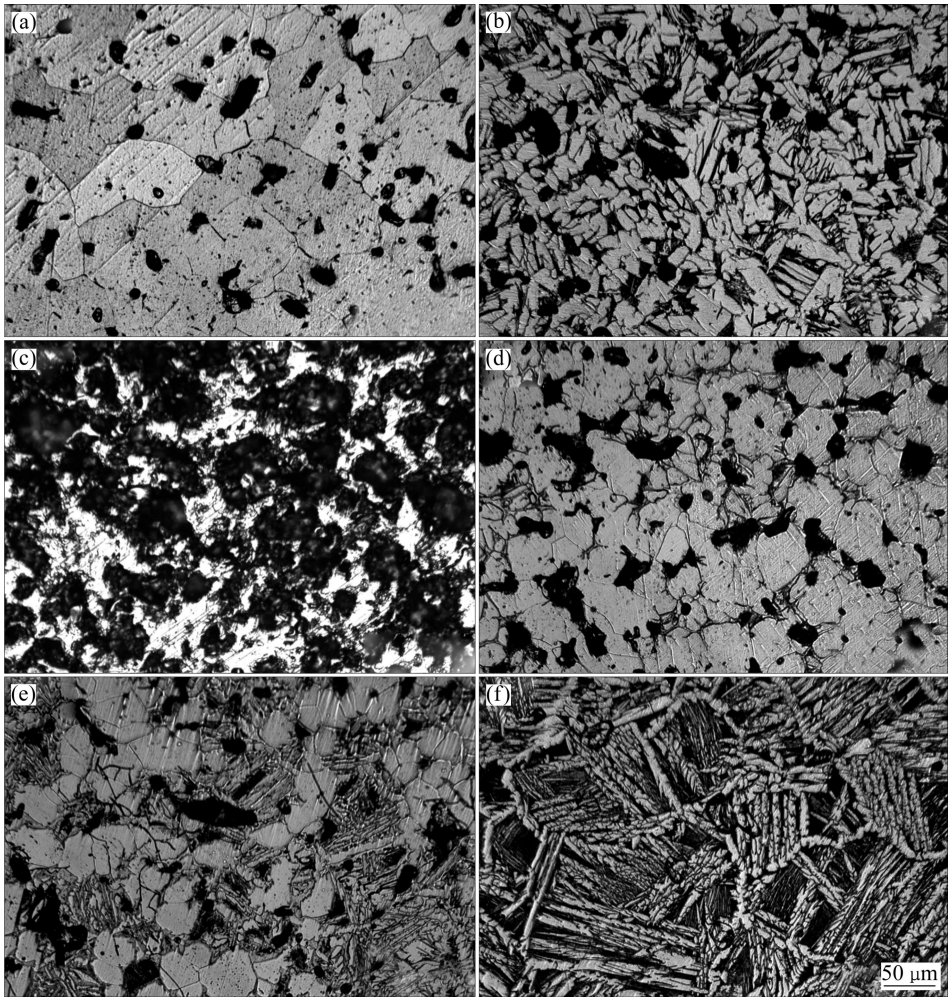


图 1 试样在 1 350 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后的金相组织
Fig.1 Optical microstructures of samples after sintering at 1 350 $^{\circ}\text{C}$: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4; (e) Alloy 5; (f) Alloy 6

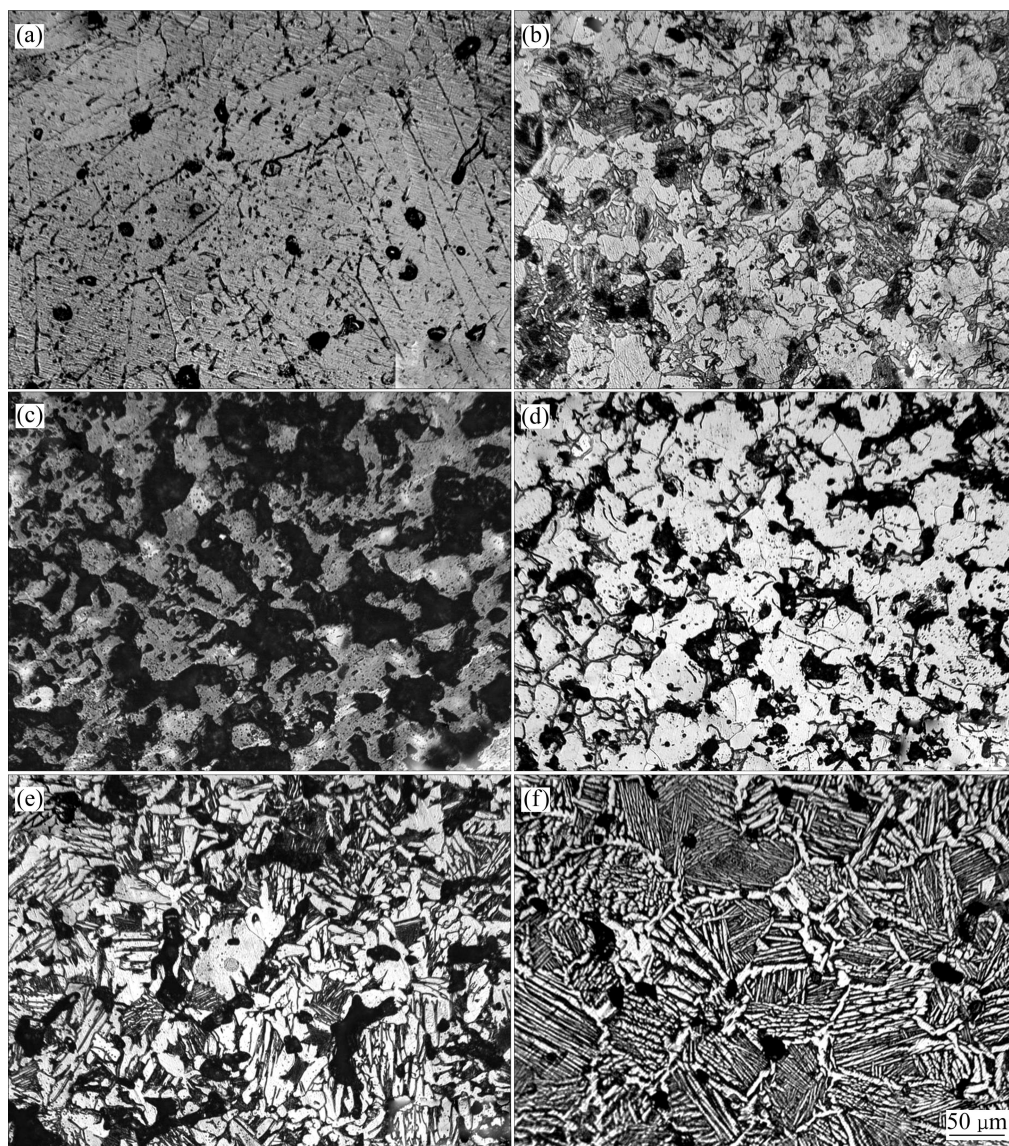


图 2 试样在 1250 °C 烧结后的金相组织

Fig.2 Optical microstructures of samples after sintering at 1250 °C: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4; (e) Alloy 5; (f) Alloy 6

Ti-5Al 基合金的组织明显不同。经 1350 °C 烧结后(见图 1), 随着添加合金元素的不同, 合金中孔隙数量及显微组织明显不同, 合金 1 为 α 型合金; 而添加 Mo 的合金 2, 显微组织由原始 β 晶粒及粗大片状 α 相组成。含 Ag 合金 3 中, 孔隙数量较多且粗大, 合金 4 的主要组织为等轴 α 相及少量 β 相, 而合金 5 是典型的 $\alpha+\beta$ 双态组织, 由等轴 α 相、原始 β 晶粒、 β 晶粒内的片状 α 相及 α 晶团组成。当同时含 Mo、V、Ag 时, 合金 6 的组织为魏德曼组织(Widmanstaetten structure), 这种组织由原始 β 晶粒、片状 α 相及 α 晶团组成。经 1250 °C 烧结后(见图 2), 合金 1 为 α 型合金, 合金 3 中孔隙数量较多且粗大, 合金 2 与 4 的主要组织为等

轴 α 相及少量 β 相, 合金 5 是典型的 $\alpha+\beta$ 双态组织, 而合金 6 的组织为魏德曼组织。当降低烧结温度至 1150 °C 后(见图 3), 合金 1 与 2 为 α 型合金, 合金 3 中孔隙数量较多且粗大, 合金 4 的主要组织为等轴 α 相及少量 β 相, 合金 5 是典型的 $\alpha+\beta$ 双态组织, 而合金 6 的组织为魏德曼组织。

另外, 对相同成分的合金, 不同烧结温度下, 其显微组织也有明显的不同。对合金 1, 当烧结温度降低时, 合金尽管均为 α 型合金, 但晶粒尺寸减小。而合金 2 的烧结温度从 1350 °C 降低到 1150 °C 时, 其组织也发生了明显的变化, 1350 °C 时, 合金的组织由 α 相与 β 相组成, 而 1150 °C 时, 合金的组织为 α 相。

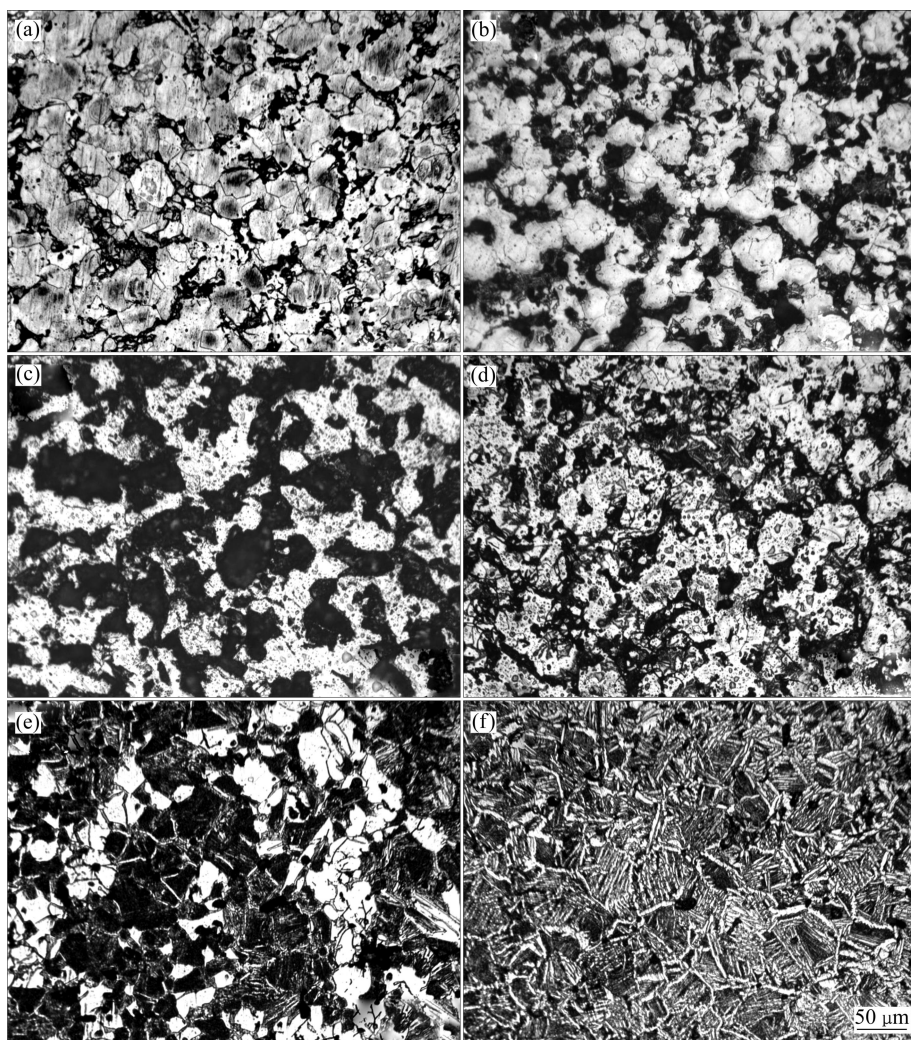


图 3 试样在 1 150 °C 烧结后的金相组织

Fig.3 Optical microstructures of samples after sintering at 1 150 °C: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4; (e) Alloy 5; (f) Alloy 6

合金 3 在不同烧结温度下烧结后,均含有大量的空隙,只是孔隙数量不同。而对合金 6,不同烧结下的组织均为魏德曼组织,只是片状 α 相的厚度不同,1 350 °C 烧结时的 α 相的厚度较 1 150 °C 大。

粉末冶金钛合金的显微组织主要受合金成分影响,尽管 Mo、V、Ag 均为 β 相稳定元素,但所起的作用却不同。Mo 与 V 元素是同晶型 β 相稳定元素,它们与 β 相晶格类型相同,可无限固溶于 β 相中,无化合物相产生,主要起到固溶强化作用。而 Ag 元素是一种共析型 β 相稳定元素,与钛会发生共析转变,生成 TiAg 化合物相(见图 5(f)),较强烈降低 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相点,使得合金中易生成片状组织^[4]。烧结温度不同时,由于各元素扩散激活能不同,所产生的组织也不同,而高温烧结有助于合金元素的扩散,使 β 相稳定元素在基体合金中的固溶更为充分,从而在炉冷过程中,

得到有效的析出。

2.2 合金的力学性能

对 1 350 °C 烧结试样进行密度测试显示(见图 4(a)),合金 1 的相对密度达到了 90%;添加 4%Mo 合金 2 的相对密度达到了 93%;添加 5%Ag 合金 3 的密度则降低至 79%;而在基体合金中添加 4%V 时,合金 4 的相对密度相对合金 1 的没有明显变化;当同时在基体合金中添加 4%Mo 和 4%V 时,合金 5 的相对密度达到 94%;而在合金 5 的基础上,再添加 5%Ag 后,合金 6 的相对密度提高到 96%以上。对烧结态合金进行压缩性能测试显示(见图 4(b)),基体合金的抗压强度达到了 1 485 MPa,而含 Mo 合金 2 的抗压强度提高到了 1 634 MPa,但只添加 Ag 或 V 的合金 3 和 4 的抗压强度分别只有 385 MPa 和 901 MPa。

而同时添加 Mo 和 V 的合金 5 的抗压缩强度达到 1 531 MPa, 当在合金 5 的基础上进一步添加 5%Ag 时, 合金 6 的抗压缩强度则达到 1 782 MPa。

1 250 °C 烧结后的性能如图 4(c)与(d)所示, 合金 1 的致密度为 88%, 合金 2 的致密度则为 92%, 合金 3 的致密度则降低到 78%, 合金 4 的致密度为 85%, 合金 5 的致密度提到 91%, 当同时添加 Mo、V 和 Ag 时, 合金 6 的致密度进一步提到 94.5%。压缩性能测试显示, 合金 1、2、5 和 6 的抗压缩强度分别达到了 1 356、1 427、1 498 和 1 601 MPa。

经 1 150 °C 烧结后(见图 4(e)与(f)), 6 种合金的致密度分别为 85.7%、89.6%、74.5%、82.7%、90.7%和 93%; 而抗压缩强度分别为 1 250、1 332、287、513、1 400 和 1 580 MPa。1 250 °C 及 1 150 °C 烧结后, 合金成分对材料的致密度及压缩性能的影响与 1 350 °C 时相类似。

上述表明, 在 Ti-5Al 合金中单独添加 Mo 或 V, 并不改变基体合金的致密度, 而单独添加 Ag 则降低了基体合金的密度, 但 Ag 与 Mo、V 同时添加时, 基体合金的密度反而得到提高。而抗压缩强度表明, 在

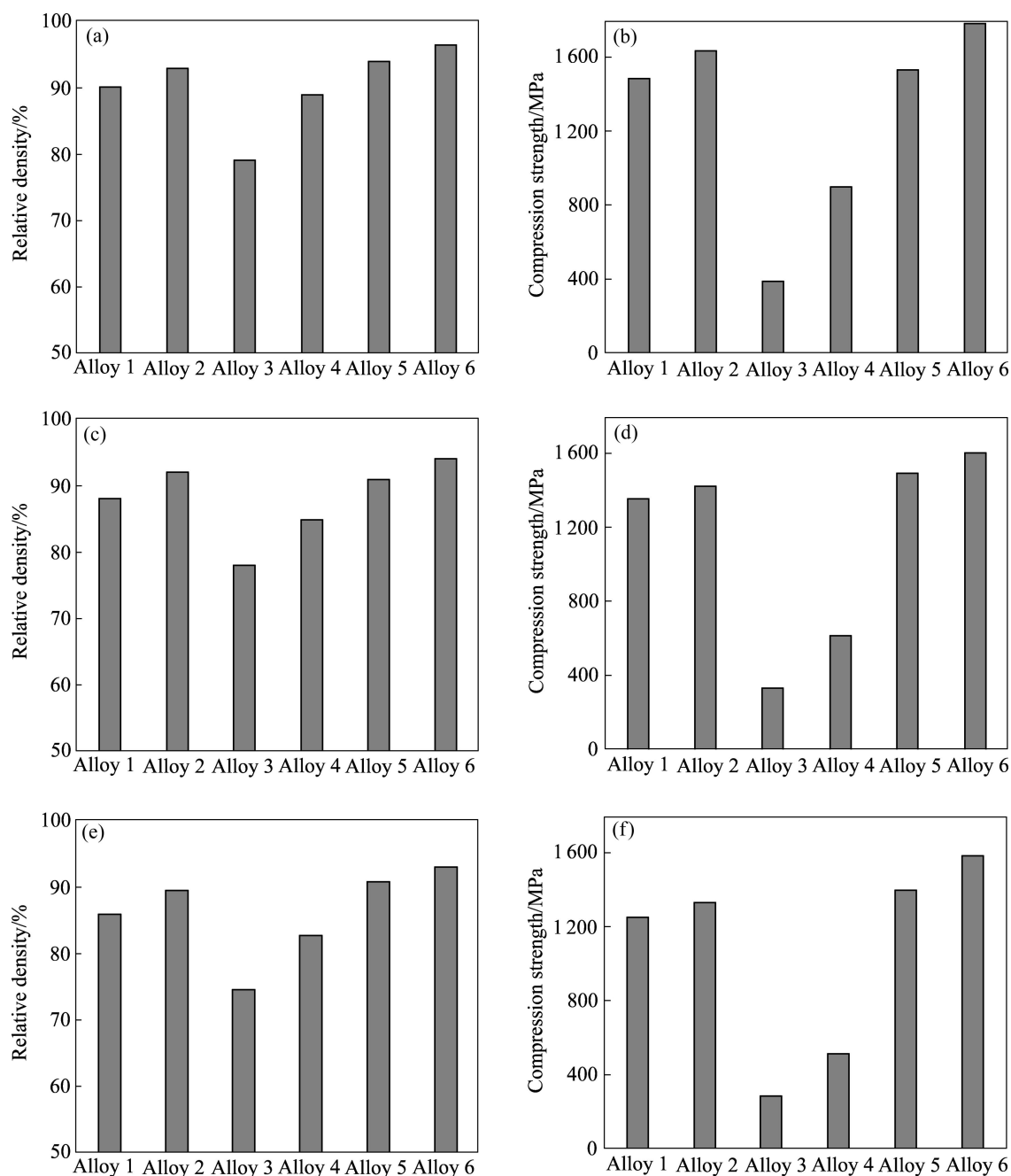


图4 试样在 1 350、1 250 及 1 150 °C 烧结后的性能比较

Fig.4 Properties comparison of samples after sintering at 1 350 °C((a), (b)), 1 250 °C((c), (d)) and 1 150 °C((e), (f))

Ti-5Al 基合金中单独添加 V 或 Ag 时, 合金的抗压缩强度并未提高, 但同时添加 Mo、V 和 Ag 时, 合金的抗压缩强度明显提高, 显示出 Ag 只有通过 Mo 与 V 共同添加时, 才能发挥其作用。

同时分析也显示, 对相同成分的 Ti-5Al 基粉末冶金合金, 随着烧结温度的降低, 合金的致密度与抗压缩强度分别降低。如合金 6 在 1 350 °C, 合金的致密度与压缩强度分别达到 96% 与 1 782 MPa; 而经 1 150 °C 烧结后, 合金的致密度与抗压缩强度分别降低到 93% 与 1 580 MPa。

根据图 4 的结果可知, 不同成分合金的强度与其

致密度有一定的关系。DUCKWORTH^[15]认为, 随着致密度的增大, 烧结合金的强度具有呈指数增大趋势。而本研究中, 由于合金成分及烧结温度的不同, 烧结体的致密度也不同, 其中合金 3 的致密度最低, 而合金 6 的致密度最高, 因此, 合金 6 的抗压缩强度也相应最大。

2.3 合金的断口组织

对 1 350 °C 烧结后合金的压缩断口进行 SEM 观察 (见图 5), 合金中均含有孔洞, 这是由于烧结过程中, 并没有完全致密化所产生的。同时添加 Mo、V 的合

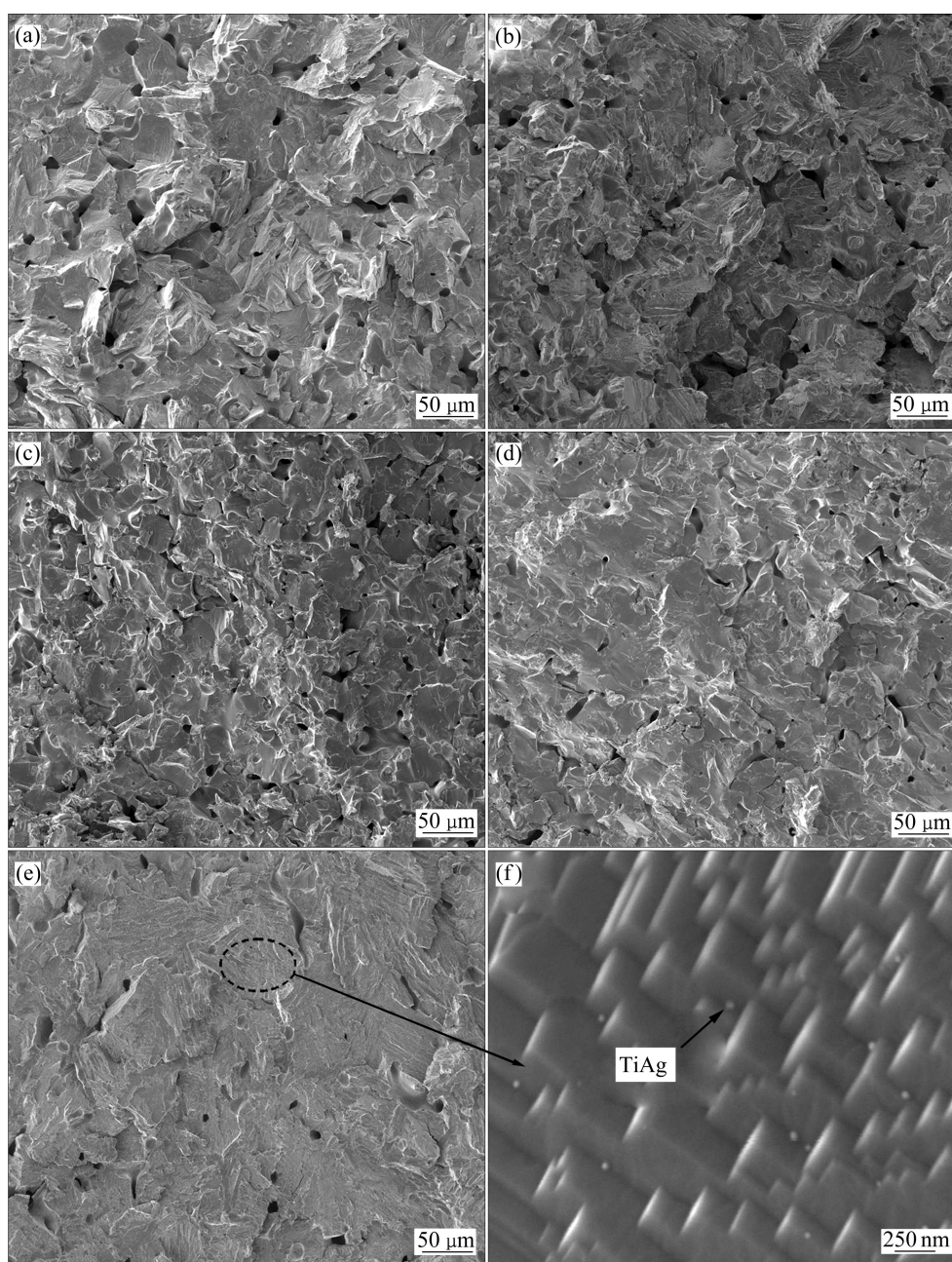


图 5 合金在 1 350 °C 烧结后的压缩断口形貌

Fig.5 Compressive fracture surface morphologies of alloys 1(a), 2(b), 4(c), 5(d) and 6((e), (f)) after sintering at 1 350 °C

金5(见图5(d))相对合金1(见图5(a))、合金2(见图5(b))和合金3(见图5(c)),孔洞数量减少。而在合金5中添加Ag时,合金6(见图5(e))中的孔洞明显减少。这与图4(a)中合金相对密度的变化一致。从图5中也看到,5种合金的断裂主要都是穿晶断裂与沿晶断裂。但进一步分析显示,在合金2、5及6中,有片状痕迹,特别是合金6中的片状相更为明显,能谱测试显示这些片状相是 α 相。对合金6中片状相的高倍组织分析表明(见图5(f)),这些片状相由平均尺寸120 nm的层片状组成,在层片之间有纳米级的球状TiAg化合物,这些化合物可起到弥散强化作用。

3 结论

1) 在Ti-5Al合金中,单独添加5%Ag或4%V时,合金的致密度及抗压缩强度降低,而添加4%Mo则提高了合金的致密度与抗压缩强度。

2) 当5%Ag元素与4%Mo及4%V同时添加时,合金的致密度及抗压缩强度明显得到提高。1350℃烧结后,Ti-5Al-4Mo-4V-5Ag合金的致密度与抗压缩强度分别达到96%与1782 MPa。

3) Mo、V和Ag的添加改变基体合金的物相组成及显微组织,含4%Mo、4%V和5%Ag的Ti-5Al合金为典型魏德曼组织,片状析出相中含有纳米级的TiAg化合物相。

4) Ti-5Al基合金随着烧结温度的提高,其致密度与抗压缩强度得到提高。

REFERENCES

- [1] MOISEYEV V N. Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications[M]. Wikipedia: Taylor & Francis Group, 2008: 147-153.
- [2] LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003: 351-368.
- [3] 汤慧萍, 刘咏, 韦伟峰, 陈丽芳. 添加稀土元素对粉末冶金Ti合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 244-249.
TANG Hui-ping, LIU Yong, WEI Wei-feng, CHEN Li-fang. Effect of rare-earth element addition on microstructure and mechanical properties of P/M titanium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(2): 244-249.
- [4] HANSON A D, RUNKLE J C, WIDMER R, HEBEISEN J C. Titanium near net shapes from elemental powder blends[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1990, 26(2): 157-164.
- [5] ROBERTSON I M, SCHAFFER G B. Design of titanium alloy for efficient sintering to low porosity[J]. Powder Metallurgy, 2009, 52(4): 311-315.
- [6] 汤慧萍, 黄伯云, 刘咏, 欧阳洪武. 粉末冶金钛合金致密化研究的进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(9): 677-680.
TANG Hui-ping, HUANG Bai-yun, LIU Yong, OUYANG Hong-wu. Progress in the densification of powder metallurgical titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(9): 677-680.
- [7] TAKAHIRO F, OGAWA A, OUCHI C, TAJIMA H. Microstructure and properties of titanium alloy produced in the newly developed blended elemental powder metallurgy process[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213(1/2): 148-153.
- [8] SUN F S, OSOURCE Y K. Development of cost effective blended elemental powder metallurgy Ti alloys[C]// ORLANDO L. Innovations in Titanium Technology. Warrendale (PA): TMS, 2007: 19-27.
- [9] 赵瑶, 贺跃辉, 江垚. 粉末冶金Ti6Al4V合金的研制进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(2): 70-78.
ZHAO Yao, HE Yue-hui, JIANG Yao. Progress of powder metallurgy Ti6Al4V alloy[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2008, 13(2): 70-78.
- [10] TAMIRISAKANDALA S, BHAT R B, RAVI V A. Powder metallurgy Ti-6Al-4V-xB alloys: processing, microstructure, and properties[J]. JOM, 2004, 56(5): 60-63.
- [11] AZEVEDO C R F, RODRIGUES D, NETO F B. Ti-Al-V powder metallurgy (PM) via the hydrogenation dehydrogenation (HDH) process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 353(1/2): 217-227.
- [12] IVASISHIN O M, SAVVAKIN D G, FROES F, MOKSON V C. Synthesis of alloy Ti-6Al-4V with low residual porosity by a powder metallurgy method[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2002, 41(7/8): 382-390.
- [13] LIU Yong, CHEN Li-fang, WEI Wei-feng, TANG Hui-ping. Improvement of ductility of powder metallurgy titanium alloys by addition of rare earth element[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2006, 22(4): 465-469.
- [14] 莫畏. 钛[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 252-257.
MO Wei. Titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 252-257.
- [15] DUCKWORTH W. Discussion of ryshkewitch paper[J]. Journal of American Ceramics Society, 1953, 36: 68-75.

(编辑 李艳红)