

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.4146

钼钒铝三元中间合金的制备及组织性能研究

王路扬¹, 代卫丽^{1,2,3}, 韩茜^{1,2,3}, 刘彦峰^{1,2,3}, 张美丽^{1,2,3}, 宋月红^{1,2,3}, 王康¹

(1. 商洛学院 化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000; 2. 陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000; 3. 陕西省矿产资源清洁高效转化与新材料工程研究中心, 陕西 商洛 726000)

摘要: 为获得实收率高、过程可控、碳含量低的钒钼铝三元中间合金, 通过铝热反应及其过程调控制备出 Mo35-V45-Al20、Mo40-V40-Al20 和 Mo45-V35-Al20 3 种合金, 并探讨了不同合金的微观组织及性能差异, 为生产高品质钼钒铝三元中间合金奠定基础。结果表明, 利用铝热法制备的 Mo35-V45-Al20、Mo40-V40-Al20 和 Mo45-V35-Al20 3 种合金元素含量均符合行业标准, 主要物相均为 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相。Mo40-V40-Al20 合金在 1 370.4 °C 开始出现一个小的吸热峰, 该峰可能是 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相开始熔化的峰。随 Mo 含量增加, 合金中 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 第二相数量增多, Mo40-V40-Al20 合金的第二相颗粒细小、分布更均匀; 同时合金密度明显增大, 且 Mo40-V40-Al20 合金硬度最大, 为 71.24 HRC。

关键词: 钼钒铝三元中间合金; 物相组成; 显微组织; 性能

中图分类号: TG13

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)07-0725-06

Preparation and Study of the Microstructure and Properties of Molybdenum Vanadium Aluminium Ternary Intermediate Alloy

WANG Luyang¹, DAI Weili^{1,2,3}, HAN Xi^{1,2,3}, LIU Yanfeng^{1,2,3}, ZHANG Meili^{1,2,3},
SONG Yuehong^{1,2,3}, WANG Kang¹

(1. Department of Chemical Engineering and Modern Material, Shangluo University, Shangluo 726000, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo 726000, China; 3. Shanxi Engineering Research Center for Mineral Resources Clean & Efficient Conversion and New Materials, Shangluo 726000, China)

Abstract: To obtain ternary intermediate alloys of vanadium, molybdenum and aluminium with high actual yields, controllable processes and low carbon contents, Mo35-V45-Al20, Mo40-V40-Al20 and Mo45-V35-Al20 alloys were prepared through aluminothermic reactions and process control. The differences in the microstructures and properties of different alloys were also explored, laying a foundation for the production of high-quality ternary intermediate alloys of molybdenum, vanadium and aluminium. The results reveal that the elemental contents of the Mo35-V45-Al20, Mo40-V40-Al20, and Mo45-V35-Al20 alloys prepared via the heating process meet the industry standards and that the main phase of the three alloys is the $V_{0.5}Mo_{0.5}$ phase. A small endothermic peak appears in the Mo40-V40-Al20 alloy at 1 370.4 °C, which is likely the peak corresponding to the initiation of melting of the $V_{0.5}Mo_{0.5}$ phase. With increasing Mo content, the number of $V_{0.5}Mo_{0.5}$ second phase particles in the alloy increases, and the second phase particles in the Mo40-V40-Al20 alloy are finer and more evenly distributed. Moreover, the alloy density significantly increases. The maximum hardness of the Mo40-V40-Al20 alloy is 71.24 HRC.

Key words: molybdenum vanadium aluminium ternary intermediate alloy; phase composition; microstructure; performance

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划(S2023-YF-YBGY-0823); 国家级大学生创新创业训练项目(202411396019); 陕西省青年创新团队科研计划项目(24JP055); 商洛学院科研平台发展专项(23KYZX03); 2023 年陕西高校青年创新团队(秦岭钒资源低碳高效利用创新团队); 秦创原“科学家+工程师”队伍建设(2025QCY-KXJ-092)

作者简介: 王路扬, 2003 年生, 学士。研究方向为钒合金材料的制备。Email: 2349262466@qq.com

通信作者: 刘彦峰, 1982 年生, 博士, 教授。研究方向为钒合金的制备与研发。Email: slxylyf@126.com

引用格式: 王路扬, 代卫丽, 韩茜, 刘彦峰, 张美丽, 宋月红, 王康. 钼钒铝三元中间合金的制备及组织性能研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 725-730.

WANG L Y, DAI W L, HAN X, LIU Y F, ZHANG M L, SONG Y H, WANG K. Preparation and study of the microstructure and properties of molybdenum vanadium aluminium ternary intermediate alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 725-730.

近年来,随着我国经济的持续向好发展及在航空航天、国防等领域综合实力的稳步提升,钛和钛合金产品的需求呈现增长趋势。作为制备宇航级钛合金的必备原料,钒铝中间合金的需求亦随之增长^[1-5]。

目前应用最为广泛的 Ti-6Al-4V 钛合金中常以钒铝中间合金的形式进行添加,其中 Al、V 可提高钛合金的强度,改善其抗氧化性能,提高其塑性等^[6-8]。钛合金中另一种常见的添加元素 Mo 可进一步提升钛合金的室温和高温强度、淬透性、热稳定性,其强化作用与 V 元素相当^[9-10]。因此, Ti-8Al-1Mo-V 也是钛合金中重要的合金,其常温强度与 TC4 和 TA7 相近,但具有更高的高温强度、蠕变、热稳定性、低密度、高弹性模量、好的焊接性能等,在航空航天发动机部件、涡轮叶片、喷嘴、压气机叶盘等需要高强度和耐高温性能的零件及汽车引擎零件,连杆、活塞和排气系统组件等领域有广泛的应用前景^[11-14]。在该类钛合金中, Mo、V、Al 常以 Al-Mo 和 Al-V 的形式加入,但这种制备工艺容易导致钛合金内部组织不均匀、AlMo₃ 夹杂相等问题^[15],严重时导致钛合金制品的报废。相比之下,钒钼铝三元及多元中间合金可以克服钛合金中的成分偏析、降低成本、减少杂质含量等优势,成为多组元钛合金的重要原料,是中间合金领域的重要发展方向。然而,当前世界范围内仅德国和美国掌握高端钒钼铝三元及多元中间合金的制备技术,并实现了产业化生产,我国航空级钒中间合金尚处于研发阶段,参与研发的高校及企业非常少,该类产品大多依靠进口^[16-17]。同时,国内目前制备的钒钼铝合金仍存在钼、钒实收率低、成本高、合金碳含量高等问题,直接制约了钛合金及高温合金产品的应用推广。因此,为解决上述问题,本文采用可控的铝热实验制备该三元合金,并对其微观组织及性能进行探讨,为生产高品质钒钼铝三元中间合金奠定一定研究基础。

1 实验材料及方法

实验以 V₂O₅(纯度 99%)、MoO₂(纯度 99.9%)、MoO₃(纯度 99.9%)和 Al 粉(纯度 99.85%)为原料,添加回炉料作为反应的热抑制剂。选择镁砖熔池发生反应,利用镁砖进行砌筑、打结、养生、烘烤,烘烤后的熔池冷却至 100 °C 以下方可使用。采用镁粉、细铝和过氧化钙按质量比 1:6:6 配比作为点火剂,既不会产生多余的杂质,也保证了点燃效率。之后利用铝热法制备 Mo35-V45-Al20、Mo40-V40-Al20 和 Mo45-V35-Al20 初级钒钼铝三元中间合金。其中

原料烘干温度为 70~80 °C,烘干时间不少于 24 h,装炉温度为 30~60 °C。

为了对铝热反应过程进行控制,首先根据合金成分要求设计配方,随后通过配方计算软件计算试验所需的反应热,按照计算结果并结合实际需求,对回炉料的添加量进行设计,此后按照上述 Al、MoO₂、MoO₃、回炉料的配比准确称取。将配好的料置于混料机中混料,为了保证反应原料充分混合,混料时间定为 10 min。将混合均匀的物料装入堆砌好的镁砖熔池中,配好点火剂放入原料上方中心处,引燃点火剂。反应后冷却 24 h,拆开镁砖取出合金和炉渣分别称重,通过喷砂、人工打磨等方式清除合金表面的氧化膜、疏松、夹杂物等。

利用 XRF(X 射线荧光光谱仪)、N-H-O 测定仪、C-S 分析仪检测所得合金的元素含量,采用 XRD、OM、SEM 等测试手段分析制得初级钒钼铝合金的物相组成及组织形貌,采用 Image-Pro Plus 软件对组织中的深色相含量进行统计。同时,测试合金的密度、硬度等参数,探讨不同合金成分对其组织性能的影响。

2 实验结果及讨论

对反应过程、产品质量及渣金分离效果等进行记录。结果显示,该钒钼铝三元合金的铝热反应较为充分、平稳,反应时长为 25 s。表面无夹渣,侧面及底面无深洞,渣金界面清晰、分离良好。合金内部无夹渣,无肉眼可见的分层、分区等明显偏析特征,且无明显氧化、气孔、缩孔等典型缺陷。综上可知,所制备的样品反应热控制合理,表观质量良好,其表面及内部宏观形貌符合行业标准(YS/T 1023-2015)。

(1)元素检测分析 利用 XRF、N-H-O 测定仪及 C-S 分析仪对所制得 Mo35-V45-Al20、Mo40-V40-Al20 和 Mo45-V35-Al20 3 种钒钼铝合金的化学成分进行检测,结果见表 1。其中 Mo35-V45-Al20 为自研牌号,Mo40-V40-Al20 和 Mo45-V35-Al20 为行业标准牌号,对比元素含量可知,均符合有色金属行业标准 YS/T 1023-2015。此外,本研究还对 Mo、V 的实收率(最终产品中元素的含量占该元素理论含量的百分比)进行了分析,结果显示其实收率分别为 91.1%和 91.4%,较市场上常规工艺 90%的回收率有一定提升。

(2)XRD 物相分析 图 1 为 3 种钒钼铝合金的 XRD 衍射图。由图可知,3 种合金主要物相为立方晶系的 V_{0.5}Mo_{0.5} 相,其衍射峰在约 41.25°、59.77°及 75.21°处出现,分别对应 V_{0.5}Mo_{0.5} 的 (110)、(200)和

表 1 钼钒铝合金化学成分
Tab.1 Chemical compositions of the molybdenum vanadium aluminium alloys

Samples	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	Al
Mo35-V45-Al20	34.60	45.70	0.15	0.08	0.02	0.06	0.05	Bal.
Mo40-V40-Al20	40.52	40.34	0.19	0.12	0.02	0.06	0.05	Bal.
Mo45-V35-Al20	45.39	35.82	0.18	0.12	0.02	0.05	0.04	Bal.

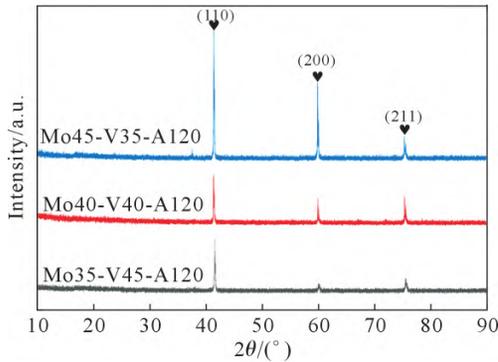


图 1 钼钒铝合金 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of molybdenum vanadium aluminium alloys

(211)晶面。在 XRD 谱中未观察到 Al 的衍射峰,这可能是由于 Al 在铝热反应中被消耗而含量较低或是固溶至基体中所致。随着 Mo 含量的增加, $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相的衍射峰强度增大, $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相含量可能增多。

(3)DSC 结果分析 选用德国耐驰 TA 型差式扫描量热仪,选择 Mo40-V40-Al20 合金样品,在氩气氛下从 30 °C 升温至 1 505 °C,升温速率为 20 °C/min,使用 Al_2O_3 坩埚,测试结果(图 2)。由图 2 中的 DSC 曲线可知,在 1 370.4 °C 开始出现一个弱吸热峰,鉴于该合金中只有 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 一种相,因此该峰可能是 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相开始熔化的峰。由图 2 中的 TG 曲线可知,在 1 499 °C 时质量变为原来的 99.44%,质量损失率 0.56%,这一质量损失可能是合金制备过程中由铝热反应的高温效应导致的 Al 或部分杂质烧损所致。

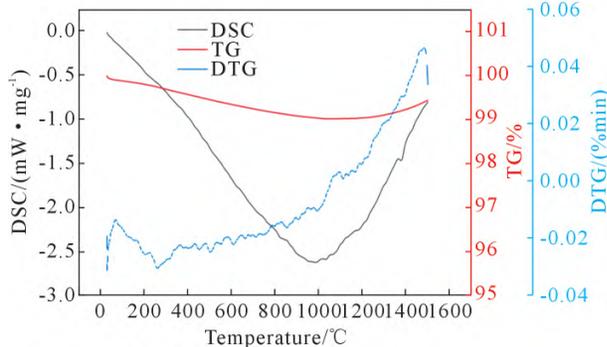


图 2 Mo40-V40-Al20 合金 DSC、TG 及 DTG 曲线

Fig.2 DSC, TG and DTG curves of the Mo40-V40-Al20 alloy

(4)金相组织分析 图 3 为 3 种不同成分合金在 200 倍光学显微镜下的微观组织。由图可知,制备的

合金组织由两相组成,结合 XRD 结果可知,浅色的基体相为 $V_{0.5}Mo_{0.5}$,除此之外还含有深色相,该相的组成需进一步检测分析。对比图 3a~c 可知,当 Mo 含量为 35% 时,组织中以 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 为主,深色相较少,仅为 5.6%。随着 Mo 含量增加至 40%,深色相分布更加细小、均匀,且含量增加至 10.3%。当 Mo 含量增加至 45%,深色相所占比例进一步增加至 20.5%,且发生团聚现象。这可能是由于 Mo 元素增多时,Al、 V_2O_5 和 MoO_2 、 MoO_3 较大的物性差异导致原料混合不均匀,使深色相在形成过程中发生团聚。图 4 SEM 照片显示,合金组织含有两相,其中深色

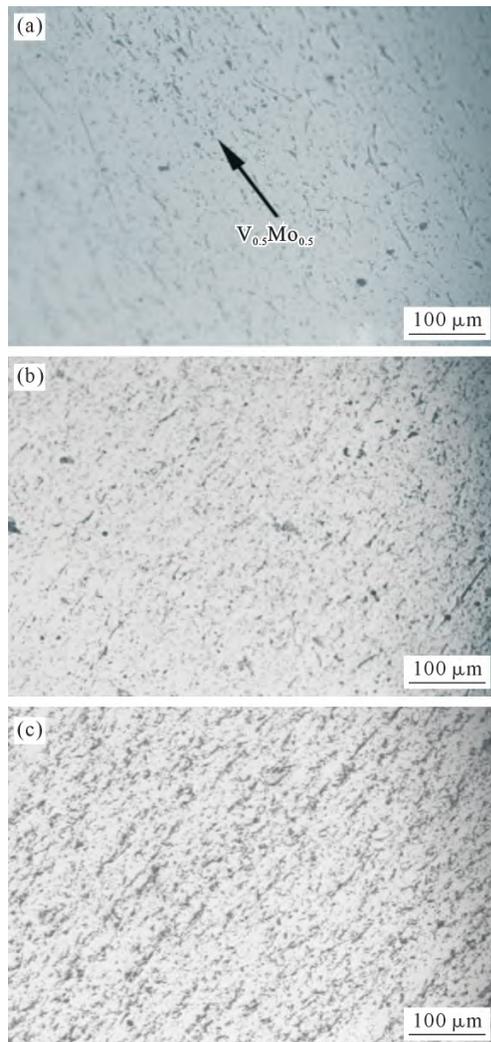


图 3 3 种合金的金相组织:(a) Mo35-V45-Al20; (b) Mo40-V40-Al20; (c) Mo45-V35-Al20

Fig.3 OM images of three samples: (a) Mo35-V45-Al20; (b) Mo40-V40-Al20; (c) Mo45-V35-Al20

相有球形和短棒状两种形貌。球形的主要成分为 Al, 固溶少量的 V, 不含钼; 而短棒状相中含有 Al、V 和 Mo 3 种成分, 基体中以 V 为主, 还含有 Al 和 Mo, 此时 Mo 的质量分数达到 33.54%。基体的 EDS 结果显示 Al、V 和 Mo 的质量分数分别为 15.56%、50.90% 和 33.54%, 这和该合金的目标成分(20%、45% 和 35%)较为相似。结合上述物相分析可知, 浅色相为固溶 Al 的 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相, 而深色相为铝的固溶体。

(5)合金组织演变过程分析 主原料 Al、 V_2O_5 、 MoO_2 、 MoO_3 在铝热反应中涉及以下 3 个主反应式:

$$3V_2O_5 + 10Al = 6V + 5Al_2O_3$$

$$\Delta H = -3\,192\,179 + 198.803T + 85.464 \times 10^{-3}T^2 - 2.4377 \times 10^5 T^3 \quad (1)$$

$$MoO_2 + 4Al = 3Mo + 2Al_2O_3$$

$$\Delta H = -1\,696\,489.14 + 1.347T - 78.3195 \times 10^{-3}T^2 + 23.163 \times 10^5 T^1 \quad (2)$$

$$MoO_3 + 2Al = Mo + Al_2O_3$$

$$\Delta H = -1\,765\,258.35 + 6.906T - 12.81825 \times 10^{-3}T^2 + 14.8215 \times 10^5 T^1 \quad (3)$$

首先对铝热反应过程热效应进行调控。单位热效应是判断单位质量释放的热效应的数值, 热值过低, 会导致反应不完全甚至不能正常维持, 熔渣、合金分离效果差, 影响产品品质; 热值过高, 则容易造成产物飞溅甚至爆炸^[18]。相关研究表明, 当炉料的单位热效应大于 2 721.42 J/g 时, 铝热反应点火后可自动进行。而当该数值大于 4 500 J/g 时反应剧烈, 可能产生爆炸^[19]。因此, 为了提高产品的品质及实验的安全性, 有必要对体系中的热效应进行计算和

调控。基于已有热力学数据, 利用 FactSage 热力学软件对反应式(1)~(3)的单位热效应 q ^[20]及其他热力学参数进行了计算, 计算结果如表 2 所示。由表可知, 铝热反应式(1)~(3)的单位热效应均超过 2 721.42 J/g, 说明本实验的铝热反应能够自发进行。但如此高的反应热会引起热值会引起安全事故, 因此, 本实验通过向主成分中添加 10%左右的回炉料, 调控 Mo、V 的含量等方式调整体系热量, 使单位热效应控制在 2 300~4 500 J/g。

表 2 热力学参数计算结果
Tab.2 Results of thermodynamic parameter calculations

$\Delta G_{2,473}^0 / (kJ \cdot mol^{-1})$	$q / (J \cdot g^{-1})$	$T_{ad} / ^\circ C$
-429	4 567.060	3 003.46
-413.901	5 620.092	-
-	6 165.097	2 126.85

其次对组织演变规律进行分析。式(1)~(3)的自由能如图 5 所示。由图可知, 反应式(1)的自由能最低, 最容易反应, V 优先被还原出来。还原所产生的热量对整个体系进行加热, 最高温度达 3 003.46 °C, 还原出的 V 被熔化。同时, 高温使 MoO_2 还原为 Mo, 随着该反应的结束, 体系的温度降低。当温度降低至 1 300 °C 以下时, MoO_3 被还原, 还原放出的热量使得体系的温度升至 2 126.85 °C。此时, V 仍处于液态, 而 Mo 处于固体, V 和 Mo 将形成单一的熔体相, 其熔点为 1 370.4 °C(见图 2 中 DSC 的结果)。在体系温度从 2 126.85 °C 降至 1 370.4 °C 之前, 该熔体一直保持在液态, 将会溶解较多的 Al。随着体系进一步冷却, 该熔体转变为固熔体, 而成为合金中的基体相, 因此, 在 XRD 的结果中显示 V 与 Mo 形成的

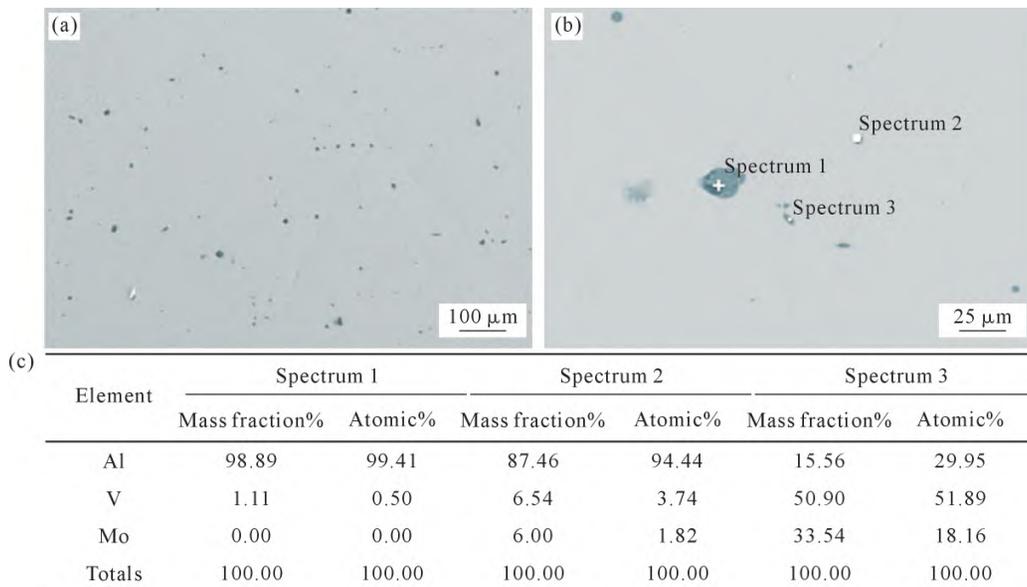


图 4 Mo35-V45-Al20 合金:(a, b) SEM 图;(c) EDS 分析
Fig.4 Mo35-V45-Al20 alloy:(a,b) SEM images;(c) EDS analysis

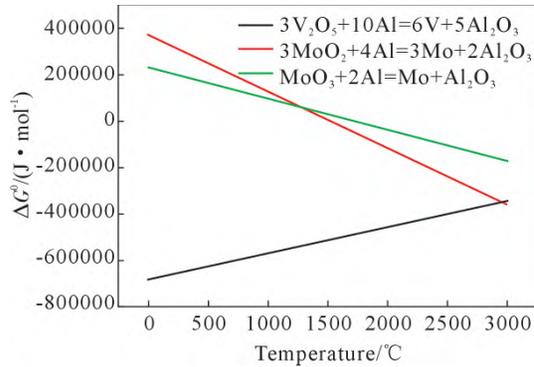


图5 体系自由能与温度的关系曲线

Fig.5 Relationships between the free energy and temperature

固溶体衍射峰。由于 Al 与该固溶体在晶体结构、晶格常数等方面的差异,在降温过程中 Al 将脱溶析出(见图 4 中深色相)。但由于 Al 在铝热过程中存在的损耗(图 2)或是部分仍然固溶于固溶体中(图 4)而使得 Al 的衍射峰无法显示。

(6)密度及硬度分析 以阿基米德排水法为基础,采用上海舜宇恒平科学仪器有限公司生产的 FA1104J 型密度天平进行测试,结果如图 6 所示。可知,3 种合金的平均密度分别为 5.809、5.853 和 6.460 g/cm³,随着 Mo 含量的增加,V 含量的减少,合金密度明显增大,这是因为一方面 Mo 元素的密度为 10.2 g/cm³,显著高于 V 元素的密度 6.11 g/cm³,其含量的增加使得样品的密度增加。另一方面,结合 XRD 分析可知,随着 Mo 含量的增多,铝热反应所引起的体系的温度降低,减少了 Al 的损耗,进而提高了材料的密度。

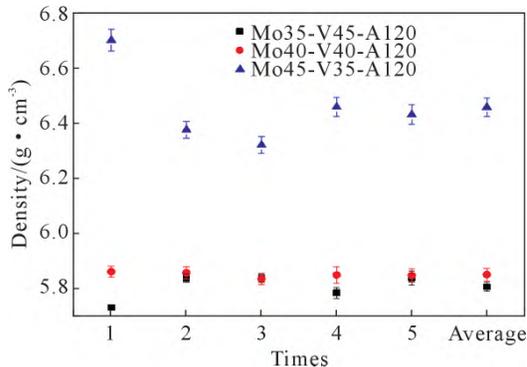


图6 3种合金的密度曲线

Fig.6 Densities of the three samples

3 种合金的硬度测试结果如图 7 所示。由图可知,3 种合金的平均硬度分别为 69.30、71.24 和 70.00 HRC。其中 Mo40-V40-A120 合金的硬度最大,结合金相组织分析可知,该合金中第二相细小且分布更均匀,起到一定的阻碍位错运动的作用,从而提高了合金硬度^[21]。同时,该合金较其他两种合金的密度更大,这也会提高材料的硬度。

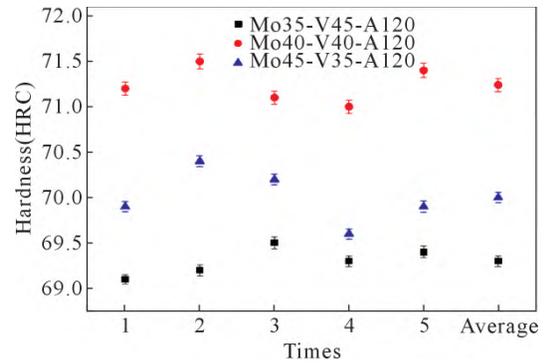


图7 3种合金的硬度曲线

Fig.7 Hardnesses of the three samples

3 结论

(1)利用铝热法制备 Mo35-V45-A120、Mo40-V40-A120 和 Mo45-V35-A120 3 种合金的元素含量均符合行业标准,3 种合金的主要物相均为 V_{0.5}Mo_{0.5} 相。

(2)Mo40-V40-A120 合金在 1 370.4℃ 开始出现一个弱吸热峰,该峰可能是 V_{0.5}Mo_{0.5} 相开始熔化的峰。

(3)随着 Mo 含量的增多,合金中第二相数量增多,Mo40-V40-A120 合金中第二相细小且分布更均匀。

(4)随着 Mo 含量的增加,合金密度明显增大;Mo40-V40-A120 合金的硬度最大为 71.24 HRC。

参考文献:

- [1] 安仲生,陈岩,赵巍,淮金. 2023 年中国钛工业发展报告[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(3): 1-8.
AN Z S, CHEN Y, ZHAO W, HUAI J. 2023 China titanium industry development report [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(3): 1-8.
- [2] 杨悦. 为中国钒钛产业高质量发展掌舵领航[N]. 中国冶金报, 2024-05-15(003).
- [3] 杨轶. 简析钒市场需求结构及未来发展趋势[J]. 冶金管理, 2023 (18): 113-120.
YANG Y. Brief analysis of demand structure and future development trends in the vanadium market [J]. China Steel Focus, 2023 (18): 113-120.
- [4] 吴晴,张照志,潘昭帅,张泽南,徐恒逸. 2020-2035 年我国钒需求预测[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 48-56.
WU Q, ZHANG Z Z, PAN Z S, ZHANG Z N, XU H Y. Forecast of China's vanadium resource demand from 2020 to 2025 [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(5): 48-56.
- [5] 李毅,赵永庆,曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 280-282.
LI Y, ZHAO Y Q, ZENG W D. Application and development of aerial titanium alloys [J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 280-282.
- [6] 孙诗淋. 航空航天级钒铝中间合金制备工艺研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.

- SUN S L. Research of fabricating technology of vanadium aluminum master alloy for aerospace[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [7] 马朝辉. 电铝热法制备高品质钒铝合金及冶炼渣综合利用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- MA C H. Study on preparation of high quality V-Al alloy by electro-aluminothermic process and comprehensive utilization of melting slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [8] 万贺利, 徐宝强, 李东明, 杨斌, 戴永年. 航空航天级钒铝中间合金的国内研究现状[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 11-18.
- WAN H L, XU B Q, LI D M, YANG B, DAI Y N. Research status of aerospace grade vanadium aluminum intermediate alloy in China[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (National Science), 2019, 44(2): 11-18.
- [9] 张明玉. TC10 钛合金热处理及包覆叠轧过程组织演变与力学性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- ZHANG M Y. Study on microstructure evolution and mechanical properties of TC10 titanium alloy during heat treatment and cladding rolling process [J]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [10] 黄伯云. 新型合金材料-钛合金[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- HUANG B Y. New alloy material - titanium alloy[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [11] SHI X H, CAO Z H, FAN Z Y, ECKERT J, QIAO J W. Static coarsening behavior of equiaxed α phase in Ti-8Al-1Mo-1V alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31: 1628-1640.
- [12] 王非, 王梅改. Ti811 合金的高温氧化行为[J]. 铸造技术, 2011, 32(4): 507-510.
- WANG F, WANG H G. High temperature oxidation behavior of Ti811 alloy[J]. Foundry Technology, 2011, 32(4): 507-510.
- [13] 刘亚楠, 孙荣禄, 张天刚, 牛伟. Ti811 合金表面激光熔覆涂层微观组织及性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 123-132.
- LIU Y N, SUN R L, ZHANG T G, NIU W. Microstructures and properties of laser cladding coating on Ti811 alloy surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 123-132.
- [14] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 周建宇, 彭文静. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
- JIN H X, WEI K X, LI J M, ZHOU J Y, PENG W J. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-292.
- [15] 乔敏. 中国钛合金用多元中间合金[J]. 世界有色金属, 2019(6): 1-3.
- QIAO M. Multinary master alloys for titanium alloys in China[J]. World Nonferrous Metal, 2019(6): 1-3.
- [16] MAGNONE E, JEON S I, PARK J H, LEE Y T. High-performance boron-doped vanadium-aluminum alloy membranes for hydrogen separation[J]. Materials Letters, 2012(73): 47-49.
- [17] KUMAR S, TAXAK M, KRISHNAMURTHY N. Hydrogen absorption kinetics of V-Al alloy[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013(112): 5-10.
- [18] 苑子凯, 黄召阔, 于继洋, 滕艾均, 常智. 航空航天级 AIV85 中间合金制备热力学及动力学研究[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(1): 37-43.
- YUAN Z K, HUANG Z K, YU J Y, TENG A J, CHANG Z. Thermodynamic analysis and reaction kinetic for the preparation of aerospacegrade AIV85 master alloy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2024, 34(1): 37-43.
- [19] 尹丹凤. 自蔓延高温合成金属钒的热力学研究[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2014(1): 37-39.
- YI D F. Study on thermodynamics of vanadium self-propagating high-temperature synthesis[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2014(1): 37-39.
- [20] 乌红绪, 罗亚红, 唐军利, 厉学武. 硅铝热法冶炼钼铁炉料热效应的探讨[J]. 中国铝业, 2018, 42(2): 45-49.
- WU H X, LUO Y H, TANG J L, LI X W. Research on the thermal effect of smelting molybdenum iron for the unit furnace charge with silicons-aluminothermy[J]. China Molybdenum Industry, 2018, 42(2): 45-49.
- [21] 郑浩然, 陈民芳, 李祯, 由臣, 刘德宝. MgO 改性 HA 对 Mg-Zn-Zr/m-HA 复合材料组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(10): 1364-1376.
- ZHENG H R, CHEN M F, LI Z, YOU C, LIU D B. Effects of MgO modified HA nanoparticles on the microstructure and properties of Mg-Zn-Zr/m-HA composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(10): 1364-1376.

(责任编辑: 宫文婧)