DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4201

钼钒铝铁四元中间合金制备新工艺初探

韩　茜[1,2,3],刘彦峰[1,2,3],张美丽[1,2,3],代卫丽[1,2,3],杨超普[1,2,3],李晓龙[1,2,3],宋家立[1,2,3]

(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:目前,企业制备钼钒铝铁四元中间合金通常使用一步法,此方法生产成本低廉,操作简便。二次真空精炼后可进一步去除合金中的气体、杂质和夹杂物,改善元素分布,减少结晶缺陷和偏析,提高合金质量。但由于铝和铁在热力学上不易发生直接的热反应,因此先通过铝热法制备初级钼钒铝合金,随后在二次真空感应精炼过程中加入适量 Fe,获得钼钒铝铁四元中间合金。通过测试元素含量,分析其物相组成、微观组织形貌及性能,探索高品质钼钒铝铁四元中间合金的制备新工艺。结果表明,真空感应精炼后合金中的 O 和 N 元素含量显著降低且合金表面质量好。Mo30V30Fe5Al35 合金主要由 $V_{0.5}Mo_{0.5}$、Al_5Mo、$Al_{86}Fe_{14}$、Fe_2Mo_3 相组成,且组织较为均匀。所得合金的平均密度和硬度分别为 6.2 g/cm^3 和 68.86 HRC。

关键词:钼钒铝铁四元中间合金;真空感应精炼;物相组成;宏观形貌;显微组织;性能

中图分类号:TG146.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)11-1131-07

Preliminary Exploration of a New Process for Preparing Molybdenum–Vanadium–Aluminum–Iron Quaternary Intermediate Alloy

HAN Xi[1,2,3], LIU Yanfeng[1,2,3], ZHANG Meili[1,2,3], DAI Weili[1,2,3], YANG Chaopu[1,2,3], LI Xiaolong[1,2,3], SONG Jiali[1,2,3]

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

Abstract: At present, relevant enterprises usually use a one-step method to prepare molybdenum-vanadium-aluminum-iron quaternary intermediate alloys, which have a low production cost and simple operation. After secondary vacuum refining, the gas, impurities and inclusions in the alloy can be further removed, the element distribution can be improved, the number of crystallization defects and segregation can be reduced, and the alloy quality can be improved. However, since aluminium and iron do not easily undergo direct thermal reactions via thermodynamics, the primary molybdenum-vanadium-aluminium alloy was first prepared via the thermite method. An appropriate amount of Fe was subsequently added during the second vacuum induction refining process to obtain the molybdenum-vanadium-aluminum-iron quaternary intermediate alloy. By testing the elemental composition and analysing the phase composition, microstructural morphology, and properties, new preparation processes for high-quality molybdenum-vanadium-aluminum-iron quaternary intermediate alloy were explored. The results show that the content of O and N in the alloy decreases significantly and that the surface quality of the alloy is good after vacuum induction refinement. The Mo30V30Fe5Al35 alloy is mainly composed of $V_{0.5}Mo_{0.5}$, Al_5Mo, $Al_{86}Fe_{14}$ and Fe_2Mo_3 phases, and the structure is relatively uniform. The average density and hardness of

收稿日期:2024-10-16

基金项目:陕西省科技厅重点研发计划(S2023-YF-YBGY-0823);陕西省青年创新团队科研计划(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:韩　茜,1988 年生,副教授.研究方向为钒中间合金.Email: haohi2010@qq.com

通信作者:刘彦峰,1982 年生,教授.研究方向为钒系多元合金.Email: slxylyf@126.com

引用格式:韩茜,刘彦峰,张美丽,代卫丽,杨超普,李晓龙,宋家立.钼钒铝铁四元中间合金制备新工艺初探[J].铸造技术,2025,46(11):1131-1137.

HAN X, LIU Y F, ZHANG M L, DAI W L, YANG C P, LI X L, SONG J L. Preliminary exploration of a new process for preparing molybdenum-vanadium-aluminum-iron quaternary intermediate alloy [J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1131-1137.

中国知网　https://www.cnki.net

the obtained alloys are 6.2 g/cm³ and 68.86 HRC, respectively.

Key words: molybdenum-vanadium-aluminium-iron quaternary intermediate alloy; vacuum induction refining; phase composition; macroscopic morphology; microstructure; performance

随着钛合金的不断发展，对中间合金的需求日益增加。当前，钛合金制备过程中所需的合金元素均通过中间合金形式引入，以解决烧损和高熔点元素不易熔入等问题，同时对原材料的影响不大，从而提高合金的质量和性能[1-3]。钛合金中添加钼钒铝铁中间合金后能使材料具有高强度，良好的抗腐蚀性能、淬透性、抗氧化性/耐热性与冷加工性等优异性能[4-6]。国内制备钼钒铝铁四元中间合金的企业较少，东港市东方高新金属材料有限公司、四川省东宇信息技术有限责任公司及商洛天野高新材料有限公司目前制备的钼钒铝铁四元中间合金均为一步法所得的初级产品[7-8]。此方法生产成本低廉，操作简便，但产品成分均匀性及杂质元素含量相对于两步法工艺产品差。通过二次真空精炼，可进一步去除合金中气体、杂质和夹杂物，改善元素分布，减少结晶缺陷和偏析，提高合金质量[9-12]。钒铝系中间合金常用的二次真空精炼工艺有真空感应精炼、真空自耗电弧精炼和电子束精炼[13]，真空自耗电弧精炼虽能耗比低、耗时短、成本低，但除气效果一般且需制备自耗电极；电子束精炼虽然除气效果好，但能耗大、耗时长、成本高且效率低；而真空感应精炼除气效果好、能耗较低、精炼速度快且精炼过程易于控制[14]。此外，由于铝与铁的物理化学性质存在显著差异，二者在热力学上难以直接发生热反应[15]，即便反应能够进行，也需依赖极高温度条件驱动，进而造成显著的能耗增加。因此本文先采用铝热法制备出符合行业标准的初级钼钒铝合金，随后在二次真空感应精炼过程中加入适量 Fe，获得钼钒铝铁四元中间合金，通过测试各元素含量，分析物相组成、微观组织形貌及性能，探索高品质钼钒铝铁四元中间合金的制备新工艺。

1 实验材料与方法

以 V_2O_5(纯度 99%，质量分数，下同)、MoO_2(纯度 99.9%)、MoO_3(纯度 99.9%)和铝粉(纯度 99.85%)为原料，采用铝热法制备合格的初级 Mo40V40Al20 合金。再将该初级合金置于真空感应熔炼炉的石墨坩埚中，配以适量铁粉(纯度 99.9%、粒径 1 mm)，抽真空稳定至 180~200 Pa，并以 0.1 L/min 通入氩气，然后以 10 ℃/min 的速率加热，温度升至 1 750 ℃完全熔化后保温 10 min，随后在真空下完成浇注并保持真空至完全凝固，制备 Mo30V30Fe5Al35 合金。

利用 PANalytical Axios 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)、钢研纳克 ONH5500 型 N-H-O 测定仪、钢研纳克 CS-3000G 型 C-S 分析仪检测所得合金的各元素含量，德国 Bruker D8 Advance 型 XRD 射线衍射仪、LEICA D MI3000 M 型光学显微镜(OM)、德国 ZEISS Sigma 300 型扫描电子显微镜(SEM)及牛津 OXFORD 型 EDS 能谱分析仪等手段分析所得合金的物相组成及组织形貌，测试合金的密度、硬度等参数，探讨该工艺制备钼钒铝铁四元中间合金的物相组成、微观组织形貌及其性能，为高品质钼钒铝铁四元中间合金的制备提供一定参考。

2 实验结果及讨论

2.1 元素分析

初级 Mo40V40Al20 钼钒铝合金及二次真空感应精炼后 Mo30V30Fe5Al35 合金的化学成分如表 1 所示。可见铝热法制备的初级钼钒铝合金符合有色金属行业标准 YS/T 1023-2015，二次真空感应熔炼后的四元中间合金主元素 V 和 Fe 与设计成分差异小于 1%，Mo 元素与设计成分差异小于 3.3%，均在误差允许范围内。

与初级合金对比可知，真空感应精炼后，合金中 O 元素含量由 0.06%降低到 0.03%，N 元素含量由 0.05%降至 0.03%。这是因为真空条件下，炉内抽力增大，除杂效果显著。真空感应熔炼后 C 含量增多是因为熔炼时石墨坩埚中的 C 渗入合金中，后续应考虑使用刚玉坩埚避免影响 C 含量。

真空感应熔炼是通过将材料加热至熔点以上，使气态氧、氮等从熔体中释放出来，从而达到脱气目的。真空感应熔炼中常用的脱氧元素包括 C、Al、Si

表1 不同合金化学成分

Tab.1 Components of different alloys

(mass fraction/%)

Alloy	chemical composition							
	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	Al
Primary molybdenum-vanadium-aluminium alloy	40.52	40.34	0.19	0.12	0.02	0.06	0.05	Bal.
Molybdenum-vanadium-aluminium-iron alloy	33.26	30.94	4.34	0.17	1.47	0.03	0.03	Bal.

中国知网 https://www.cnki.net

和 Ca 等，其通过不同的脱氧机制，有效去除合金液中的氧气，提高合金质量[16]。高温高真空有利于氧在金属与真空界面的解吸和去除，O 与 V、Al 有很强的结合力，V 熔体中 O 难以气体 O_2 形式去除，一般以碳氧化物 CO 或金属氧化物 Al_2O_3 和 VO 等形式去除。真空感应熔炼脱 N 主要依赖于在高温高真空条件下，N 在合金中的溶解度降低，从而通过增加精炼时间来提高脱 N 效率。本试验中二次真空感应精炼后，合金中 O、N 元素的含量明显减少。

2.2　宏观形貌分析

图 1 为初级钼钒铝合金及二次真空感应精炼后合金的宏观形貌。未真空精炼的初级合金表面明显氧化，二次真空感应精炼合金表面呈银白色。

在合金熔炼过程中，非真空环境中的氧气、水蒸气等气体可能会与合金中元素发生反应，形成氧化物或其他化合物附着在合金表面，导致表面粗糙不平。在真空条件下，这些反应被有效抑制，从而减少了表面污染和粗糙化的可能性。在合金制备过程中，若合金内部存在气泡或气孔，这些缺陷会在合金凝固时形成表面凹陷或突起，导致表面不平整。而在高真空环境下，合金中气体能被有效排出，从而减少了缺陷形成，使得合金表面更加光滑。因此，二次真空感应精炼合金表面质量更好。

2.3　XRD 物相分析

图 2 为初级钼钒铝合金及真空精炼钼钒铝铁合金的 XRD 图。可知，初级钼钒铝合金中主要物相为 $V_{05}Mo_{05}$ 相，真空感应精炼时加入 Fe 元素后，钼钒铝铁合金中除了 $V_{05}Mo_{05}$ 相以外，还存在 $Al_{86}Fe_{14}$、Al_5Mo、Fe_2Mo_3 和 V_8C_7 相。

2.4　金相组织分析

图 3 是初级钼钒铝合金及真空精炼钼钒铝铁合金的显微组织。由图 3a 可知，初级 Mo40V40Al20 合金由颗粒状及少量短棒状的组织组成，结合 XRD 结果可知，这些颗粒状及少量短棒状的第二相应为 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相。由图 3b 可知，真空精炼添加 Fe 元素后，合金中形成粗大棒状组织。

2.5　SEM+EDS 分析

图 4 为真空感应精炼钼钒铝铁合金在不同倍数

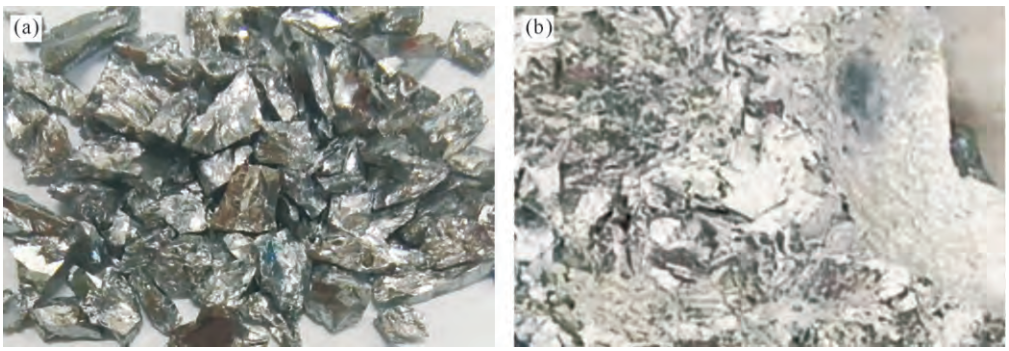


图 1　不同合金宏观形貌：(a) 初级钼钒铝合金；(b) 钼钒铝铁合金

Fig.1　Macroscopic morphologies of different alloys: (a) primary Mo-V-Al alloy; (b) Mo-V-Al-Fe alloy

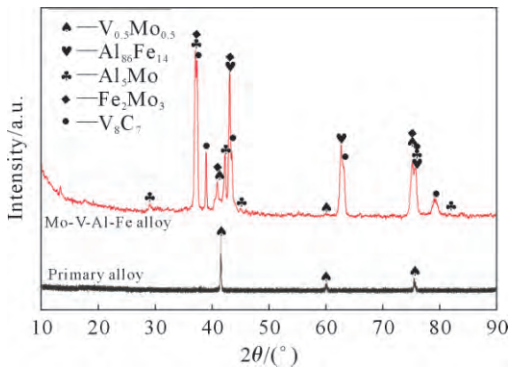


图 2　不同合金 XRD 谱

Fig.2　XRD patterns of different alloys

的扫描电镜下的微观组织形貌，与图 3b 形貌一致，合金中存在大量粗大的棒状第二相。从图 4 中 2000 倍的显微组织中可以观察到，黑色棒状相上还存在亮白色颗粒和亮白色棒状相。

图 5 为钼钒铝铁合金的元素分布图。由图可知，粗大黑色棒状相对应区域 V 元素含量最多，且包含少量 Mo 元素，而 Al 元素和 Fe 元素几乎没有，因此可推断粗大黑色棒状相应为 VMo 相。灰色区域 Mo、Al、Fe 元素含量较多，V 元素含量较少，可推断灰色区域的相大部分由 Al、Fe、Mo 元素组成，少部分为 V 元素组成的相。

图 6 为钼钒铝铁合金不同形貌组织的 EDS 能谱。图 6 中谱图 1 为黑色棒状相的能谱图，可知黑色棒状相的 V、Mo 原子占比较多，Al、Fe 原子占比很少，因此结合前述分析可知，黑色棒状相为 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相。谱图 2 为黑色棒状相上亮白色相的能谱图，可知亮白色相的 V 原子占比较多，Mo、Al、Fe 原子的量较少，结合各元素分布及 XRD 分析可知，黑色棒状相上亮白色相应为 Al_5Mo 相。图谱 3 为灰色区域的能谱图，可知 Al 原子占比相对较多，其余 3 种元素几乎均等，结合图 5c 灰色区域 V 元素含量较少，

中国知网　https://www.cnki.net

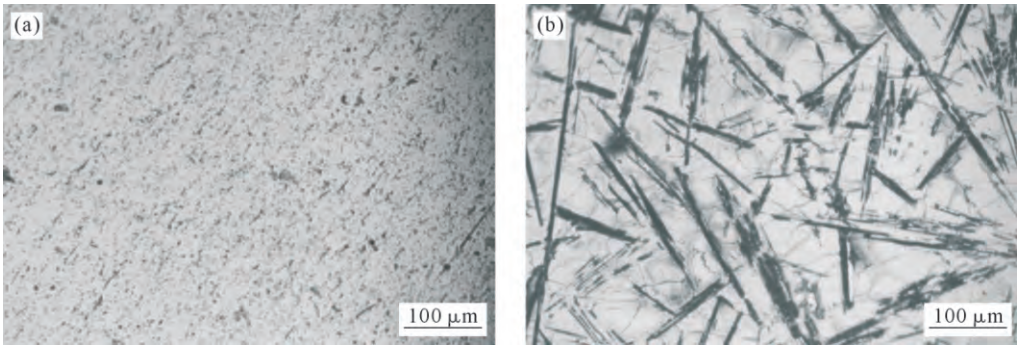


图 3 不同合金微观组织：(a) 初级钼钒铝合金；(b) 钼钒铝铁合金

Fig.3 Microstructures of different alloys: (a) primary Mo-V-Al alloy; (b) Mo-V-Al-Fe alloy

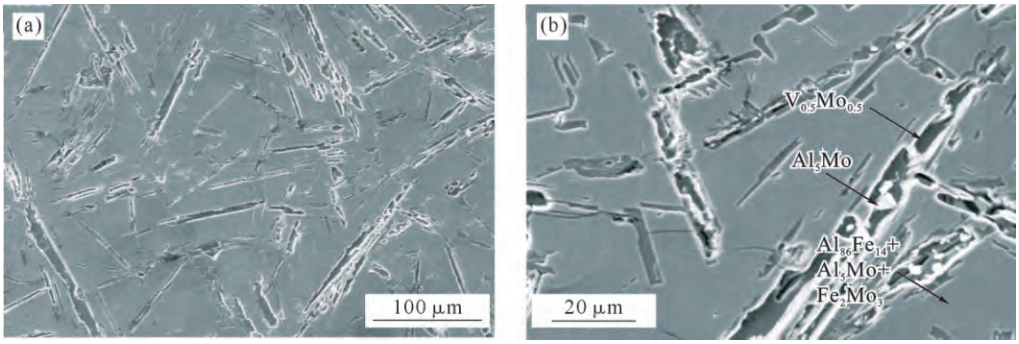


图 4 钼钒铝铁合金显微组织：(a) 500×; (b) 2 000×

Fig.4 Microstructure of the Mo-V-Al-Fe alloy: (a) 500×; (b) 2 000×

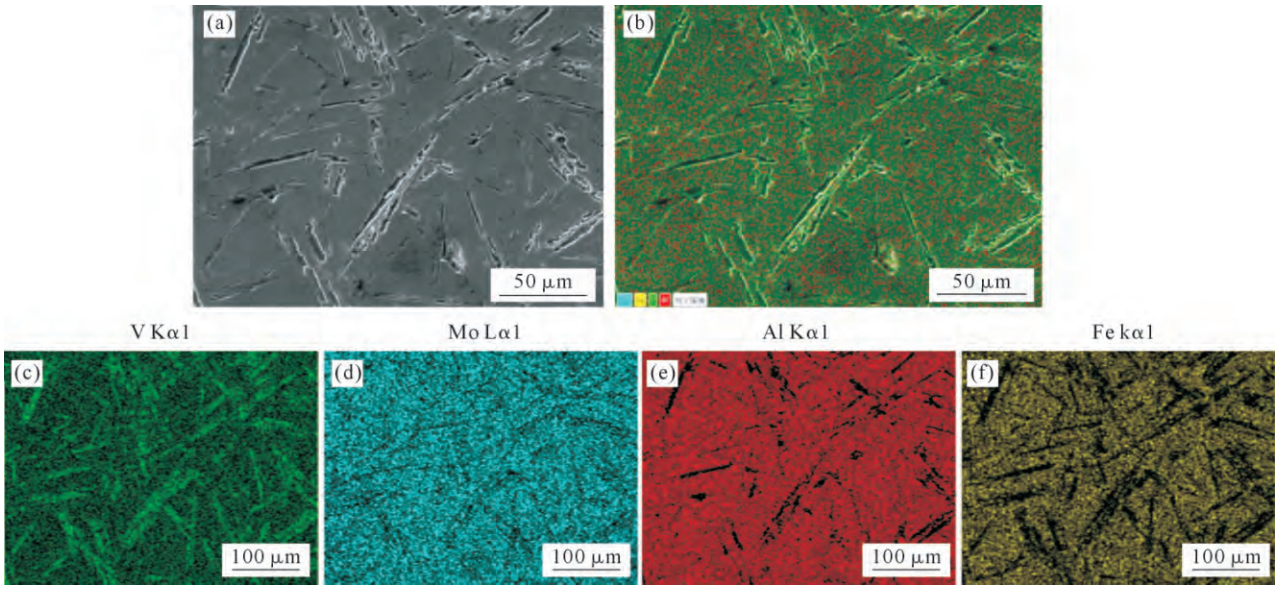


图 5 钼钒铝铁合金精炼合金元素分布：(a) 显微组织；(b) EDS 分层；(c~f) V、Mo、Al、Fe 元素面扫

Fig.5 Elemental distribution of the Mo-V-Al-Fe refined alloy: (a) microstructure; (b) EDS stratification map; (c~f) EDS maps of V, Mo, Al, and Fe

因此灰色区域应为 $Al_{86}Fe_{14}$、Al_5Mo 和 Fe_2Mo_3 的混合相，且含有少量 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相。

由于该合金后续试验中要降低 C 含量至 0.02% 以内，因此本文并未详细分析 XRD 中 V_8C_7 相的形貌特征。

2.6 密度及硬度分析

利用上海舜宇恒平科学仪器有限公司生产的 FA1104J 型密度天平对同一样品进行多次密度测试。由于合金是在真空感应熔炼中直接浇注到石墨坩埚中并冷却，取中间部分进行密度测试。初级钼钒铝合金及真空精炼钼钒铝铁合金的密度测试结果如表 2，曲线如图 7。可知，初级 Mo40V40Al20 钼钒铝合金平均密度为 5.853 g/cm^3，真空精炼Mo30V30Fe5Al35 钼钒铝铁合金为 6.2 g/cm^3，密度的变化与元素含量不同及各元素密度不同相关。

初级钼钒铝合金及真空精炼钼钒铝铁合金的硬度测试结果如表 3，曲线如图 8。可知，初级Mo40V40-Al20 钼钒铝合金的平均硬度为 71.24 HRC，真空精

中国知网 https://www.cnki.net

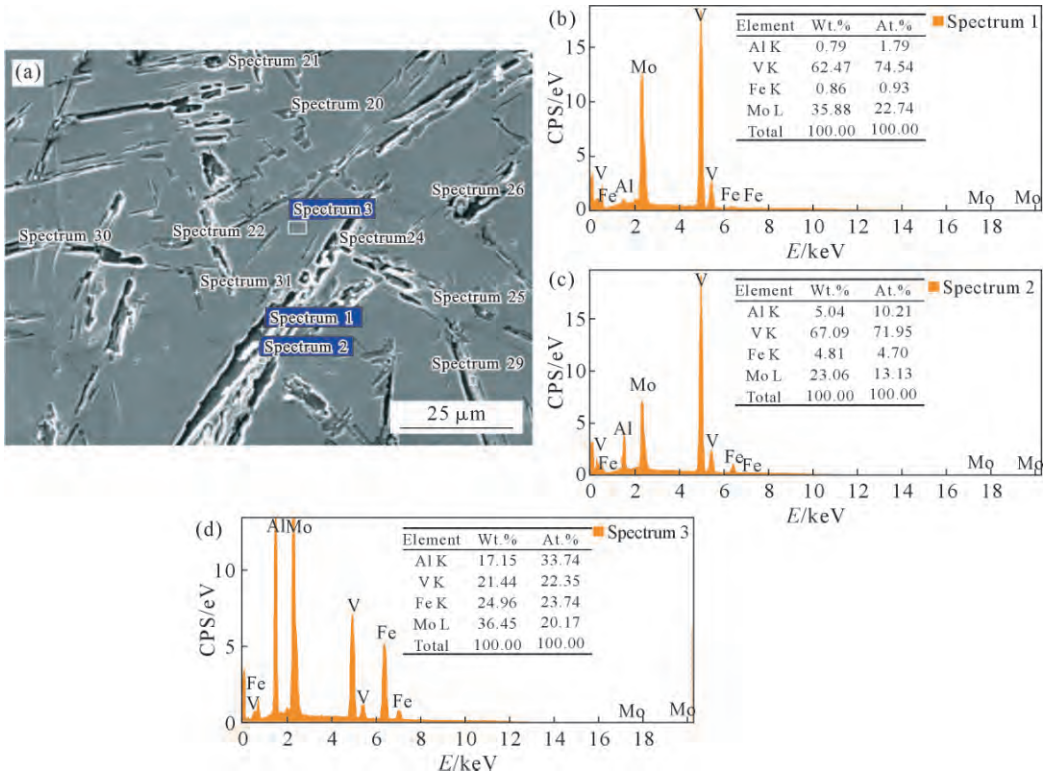


图 6　钼钒铝铁合金中不同形貌组织 EDS 点扫结果：(a) 显微组织；(b) 黑色棒状组织；(c) 白色颗粒及棒状组织；(d) 浅灰色组织

Fig.6　EDS spectra of structures with different morphologies in Mo-V-Al-Fe alloys: (a) microstructure; (b) black rod-like structure; (c) white particles and rod-like structure; (d) light gray structure

表 2 不同合金密度

Tab.2 Density of different alloys

Alloy	Density/(g·cm^{-3})					Average density/(g·cm^{-3})
	1	2	3	4	5	
Primary Mo-V-Al alloy	5.864	5.860	5.837	5.852	5.850	5.853
Mo-V-Al-Fe alloy	6.220	6.200	6.190	6.210	6.200	6.200

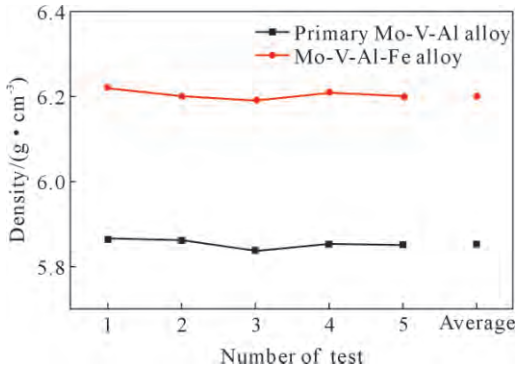


图 7　合金密度曲线

Fig.7　Density curves of the alloys

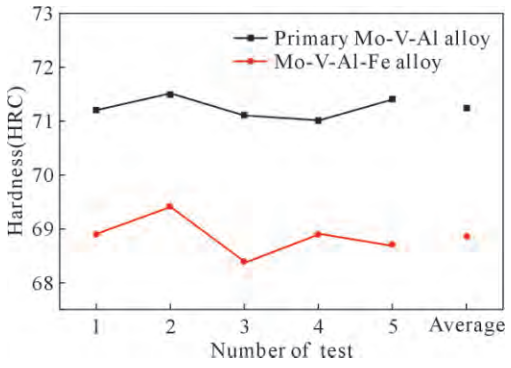


图 8　合金硬度曲线

Fig.8　Hardness curves of the alloys

表3 不同合金硬度

Tab.3 Hardness of different alloys

Alloy	Hardness(HRC)					Average hardness(HRC)
	1	2	3	4	5	
Primary Mo-V-Al alloy	71.2	71.5	71.1	71.0	71.4	71.24
Mo-V-Al-Fe alloy	68.9	69.4	68.4	68.9	68.7	68.86

炼 Mo30V30Fe5Al35 钼钒铝铁合金为 68.86 HRC。可见初级钼钒铝合金的硬度高于二次钼钒铝铁合金。结合组织及相分析可知，由于初级钼钒铝合金中的 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相为黑色颗粒状，二次钼钒铝铁合金中的 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相为黑色棒状，且二次钼钒铝铁合金中黑色棒状相上亮白色 Al_5Mo 相也大部分为棒状，颗

中国知网　https://www.cnki.net

粒状第二相能更好地分散和承载外加载荷，从而表现出较高的硬度。相比之下，棒状相由于其连续性和长度，可能在应力集中方面表现较差，导致其硬度相对较低[17]。

综上所述，由于目前还没有钼钒铝铁四元中间合金的行业标准，因此参考钼钒铝三元中间合金的行业标准，可知，所得 Mo30V30Fe5Al35 合金 O 及 N 含量均大幅度低于钼钒铝三元中间合金行业标准中的 0.1%，满足要求。Mo30V30Fe5Al35 合金中由 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相、Al_5Mo 相、$Al_{86}Fe_{14}$ 相和 Fe_2Mo_3 相形成的微观组织较为均匀，而中间合金的组织具有遗传效应，即不同组织形态的中间合金在相同工艺条件下对最终合金的细化或变质效果存在显著差异[18-21]。因此，组织均匀的钼钒铝铁中间合金对最终钛合金性能的影响也至关重要，密度及硬度的试验数据可为最终钛合金的生产提供一定参考。

3 结论

(1)利用铝热法制备的初级 Mo40V40Al20 合金的元素含量符合行业标准，二次真空感应熔炼后的Mo30V30Fe5Al35 合金元素均在误差允许范围内。对比可知，真空感应精炼的合金中 O 元素含量由 0.06%降低到 0.03%，N 元素含量由 0.05%降至 0.03%，除杂效果显著。

(2)未真空精炼的初级合金表面明显氧化，二次真空感应精炼合金表面呈银白色。

(3)初级 Mo40V40Al20 合金中的第二相主要为黑色颗粒状 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相；二次真空感应熔炼后的 Mo30V30Fe5Al35 合金中的黑色棒状相为 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相，黑色棒状相上分布着亮白色颗粒状及棒状Al_5Mo 相，灰色基体为 $Al_{86}Fe_{14}$、Al_5Mo 和 Fe_2Mo_3 混合相，且含有少量 $V_{0.5}Mo_{0.5}$ 相。

(4)初级 Mo40V40Al20 钼钒铝合金的平均密度和硬度分别为 5.853 g/cm^3 和 71.24 HRC，真空精炼 Mo30V30Fe5Al35 钼钒铝铁合金的平均密度和硬度分别为 6.2 g/cm^3 和 68.86 HRC。

参考文献：

[1] 穆苗苗. Al-V-B 中间合金的制备及细化能力研究[D]. 太原：中北大学，2023.
MU M M. Study on preparation and refining ability of Al-V-B master alloy[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.

[2] 辛社伟，刘向宏，张思远，周伟，李倩，郭荻子，郭萍，张平祥. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. 稀有金属材料与工程，2023, 52(11): 3971-3980.
XIN S W, LIU X H, ZHANG S Y, ZHOU W, LI Q, GUO D Z, GUO P, ZHANG P X. An overview on research and development of low cost titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(11): 3971-3980.

[3] 王海舟. 难熔及中间合金分析[M]. 北京：科学出版社，2009.

[4] 李楠，马力言，曹瑞，化涛，吕华江，张晋. 钛合金用钒铝中间合金技术概述[J]. 金属世界，2021(4): 25-28.
LI N, MA L Y, CAO R, HUA T, LYU J H, ZHANG J. Overview of vanadium-aluminum master alloy technology for titanium alloy[J]. Metal World, 2021(4): 25-28.

[5] 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 (Natural Science), 2019, 44(2): 11-18.

[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 technologyh of vanadium aluminium master alloy for aerospace[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

[7] 四川省东宇信息技术有限责任公司. 一种铝钒钼铁合金制备工艺：CN201510979243.9[P]. 2017-07-04.
Sichuan Province Dongyu Information Technology Co., Ltd. Preparation process of aluminum-vanadium-molybdenum ferroalloy: CN201510979243. 9[P]. 2017-07-04.

[8] 张忠士. 一种铝钒钼铁中间合金及其制备方法：CN200310119085.7[P]. 2007-01-10.
ZHANG Z S. Aluminum-vanadium-molybdenum ferro-alloy and preparation method: CN200310119085.7[P]. 2007-01-10.

[9] 李龙飞，林腾昌，梁强，贺庆，张阳. 精炼时间对真空感应熔炼 C-HRA-3 合金氧含量及夹杂物特征的影响[J]. 铸造，2023, 72(6): 654-660.
LI L F, LIN T C, LIANG Q, HE Q, ZHANG Y. Effect of refining time on oxygen content and inclusion characteristics of C-HRA-3 alloy during vacuum induction melting[J]. Foundry, 2023, 72(6): 654-660.

[10] 汤皓元，张玮，孙彦华，谢诚，李玉章，陈越，冯绍棠. 真空度对真空感应炉熔炼铜镁合金镁含量的影响[J]. 铸造技术，2022, 43(5): 382-384.
TANG H Y, ZHANG W, SUN Y H, XIE C, LI Y Z, CHEN Y, FENG S T. Effect of vacuum degree on Mg content of vacuum induction furnace melting Cu-Mg alloy[J]. Foundry Technology, 2022, 43(5): 382-384.

[11] 常全举. 真空感应冶炼高纯钢氮氧含量控制研究[D]. 沈阳：东北大学，2015.
CHANG Q J. Research on nnitrogen and oxygen control in ultra-clean steel melted by vacuum induction furnace[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

[12] 叶文成，谷宇，王岩. Inconel 601 镍基高温合金真空感应熔炼脱氧工艺研究[J]. 铸造，2024, 73(11): 1529-1533.
YE W C, GU Y, WANG Y. Deoxidation during vacuum induction melting of Inconel 601 alloy[J]. Foundry, 2024, 73(11): 1529-1533.

[13] WAN H L, XU B Q, LI L J, YANG B, LI D M, DAI Y N. A novel

中国知网 https://www.cnki.net

method of fabricating Al-V intermetallic alloy through electrode heating[J]. Metals, 2019, 9(5): 558.

[14] 孙斌. 真空感应精炼制备 55 钒铝合金的研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2024.
SUN B. Research on the preparation of 55 vanadium aluminum alloy by vacuum induction refining[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024.

[15] 李建兵，陈彦兄，李晓东，麻建军. 铝热法制备钒铝合金过程中 Fe、Si、O、C 等杂质的控制[J]. 湖南有色金属，2023, 39(4): 68-71.
LI J B, CHEN Y X, LI X D, MA J J. Control of Fe、Si、O、C and other impurities in the process of aluminothermic preparation of vanadium aluminum alloys[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39(4): 68-71.

[16] 李红娟. 基于热力学计算的铝合金化超高碳钢的研究[D]. 天津：河北工业大学，2005.
LI H J. Study of ultrahigh carbon steel with addition of Al on the base of thermodynamic calculation[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2005.

[17] 黄润华，郭威，吕书林，王锦程，吴树森. 原位自生富 Fe 相增强 Mg-Cu-Ag-Gd-Fe 非晶复合材料的制备及其力学性能[J]. 铸造，2024, 73(7): 941-946.
HUANG R H, GUO W, LYU S L, WANG J C, WU S S. Fabrication and mechanical properties of in-situ Fe-rich phase reinforced Mg-Cu-Ag-Gd-Fe amorphous alloy matrix composites[J]. Foundry, 2024, 73(7): 941-946.

[18] WANG C Y, WANG Y H, LI Y, ZHANG W F. Effect of texture inheritance on microstructure of beta C titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(10): 3382-3386.

[19] 袁国，张元祥，王洋，方烽，李振垒，王国栋. 薄带铸轧凝固组织的低能晶界及遗传效应[J]. 钢铁，2023, 58(9): 157-166.
YUAN G, ZHANG Y X, WANG Y, FANG F, LI Z L, WANG G D. Low-energy grain boundaries and their hereditary effects on microstructures in strip casting[J]. Iron & Steel, 2023, 58(9): 157-166.

[20] 彭晓东，杨艳，李俊辰，杨红，魏群义，魏国兵. Mg-4Sr 中间合金的微观组织及其在 AZ91D 镁合金中的组织遗传效应研究[J]. 材料导报，2012, 26(14): 1-4, 16.
PENG X D, YANG Y, LI J C, YANG H, WEI Q Y, WEI G B. Study on microstructure and structure heredity of Mg-4Sr master alloy in AZ91D magnesium alloy[J]. Materials Reports, 2012, 26(14): 1-4, 16.

[21] 申玉彬，于占举，张海鹏，张波. 铝钛硼中间合金对 A356 合金组织遗传效应研究[J]. 铸造技术，2020, 41(5): 437-439.
SHEN Y B, YU Z J, ZHANG H P, ZHANG B. Study on microstructure heredity effects of Al-Ti-B master alloy on A356 alloy[J]. Foundry Technology, 2020, 41(5): 437-439.

（责任编辑：杨浩雪）

中国知网　https://www.cnki.net