

铝热法制备 AlV55 合金的组织结构、 成分偏析及氧化膜形成机制

何志敏¹, 张 琦², 张 阳¹, 李晓东¹

(1. 宁夏东方钽业股份有限公司, 宁夏 石嘴山 753000; 2. 宁夏大学, 宁夏 银川 750000)

摘 要:以五氧化二钒和铝粉为原料, 采用铝热法制备 AlV55 钒铝合金, 系统研究了合金锭宏观分层、微观组织、成分分布及杂质行为。结果表明, 铝热反应后合金锭呈现明显上下层分化, 上层组织疏松、含气孔与氧化铝夹杂、钒含量偏低且波动大; 下层组织致密、金属光泽强、钒含量高且均匀。微观上, 上层为针状钒铝固溶体, 下层为鱼骨状钒铝固溶体。成分偏析源于钒、铝扩散速率差异与密度差耦合作用, 上层钒含量约 51.76%, 下层约 58.87%; 上层氧、氮、铁、硅杂质显著高于下层。对合金氧化层进行了分析, 不同颜色的氧化层对应的 V 2p 特征峰的光电子结合能 E_B 不同, V 价态越高, E_B 越大。研究揭示了铝热法钒铝合金组织结构非均匀及氧化色成因, 为工艺优化与高品质钒铝合金制备提供了理论依据。

关键词: 铝热法; 钒铝合金; 成分偏析; 杂质分布; 氧化色

中图分类号: TF841.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0051-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.006

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Microstructure, segregation and oxidation mechanism of AlV55 alloy prepared by aluminothermy

HE Zhimin¹, ZHANG Qi², ZHANG Yang¹, LI Xiaodong¹

(1. Ningxia Orient Tantalum Industry Co., Ltd., Shizuishan 753000, Ningxia, China; 2. Ningxia University, Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: Using vanadium pentoxide and aluminum powder as raw materials, AlV55 vanadium-aluminum alloy was fabricated via the thermite reaction method. The macroscopic stratification, microstructure, elemental distribution and impurity behavior of the alloy ingot were systematically investigated. The results show that distinct upper and lower stratification occurs in the alloy ingot after the thermite reaction. The upper layer features loose microstructure, internal pores and alumina inclusions, with low and highly fluctuating vanadium content. Meanwhile, the lower layer possesses dense microstructure, strong metallic luster, high and uniformly distributed vanadium content. Microscopically, needle-shaped vanadium-aluminum solid solution is formed in the upper layer, while fishbone-shaped vanadium-aluminum solid solution dominates the lower layer. Composition segregation is caused by the coupled effect of diffusion rate difference and density disparity between vanadium and aluminum. The vanadium content is approximately 51.76 wt% in the upper layer and 58.87 wt% in the lower layer. The contents of impurities including oxygen, nitrogen, iron and silicon in the upper layer are remarkably higher than those in the lower layer. Analysis on the oxide layers of the alloy indicates that the binding energy (EB) of V 2p characteristic peaks varies with different colored oxide layers, and higher vanadium valence corresponds to larger binding energy. This study reveals the structural inhomogeneity and

收稿日期: 2026-04-20; 修回日期: 2026-05-07; 接受日期: 2026-05-11

作者简介: 何志敏, 女, 1982 年出生, 宁夏吴忠人, 本科, 高级工程师, 主要从事微合金及高纯金属钒、铬的科研生产研究工作, E-mail: 394434116@qq.com。

oxidation coloration mechanism of vanadium-aluminum alloys prepared by thermite reaction, and provides a theoretical basis for process optimization and high-quality fabrication of vanadium-aluminum alloys.

Key words: thermite process; vanadium-aluminum alloy; composition segregation; impurity distribution; oxidation color

0 引言

钒铝合金是钛合金、高温合金等高端特种材料的关键中间合金,由于它的熔点低于纯金属的熔点,因此更易熔化分散,可使各组元在最终钛合金中实现均匀分布,从而可高效引入钒元素,解决单质钒熔点高、熔解困难、易氧化烧损等难题,在航空航天领域具有不可替代的作用^[1-3]。目前工业化制备方法以铝热法为主,具有流程短、设备投入低、反应自维持等优势,但还原过程剧烈、呈“爆炸式”推进,过程可控性差,普遍存在质量稳定性不足、成分偏析明显、内部孔洞与杂质缺陷等问题,高端航空航天级钒铝合金多依赖于进口,因而制备出高品质钒铝合金是现阶段迫切需要解决的难题^[4]。

国内外对其研究的方向主要集中在收率的提高、制备方法的改进,气体含量的控制等方面。和平志等^[5]学者围绕一步铝热法制备钒铝合金的过程调控开展了系统性试验研究,重点考察了原料投料方式、初始杂质赋存形态与含量、原料纯度等级等关键参数对铝热反应动力学过程、产物物相组成及钒元素回收率的作用机制,所得结论为后续工艺参数的定向优化提供了重要的理论支撑。黎明等^[6]则针对钒铝合金冶炼过程中钒元素回收率的提升路径开展了针对性分析。总体而言,现有研究虽已对原料粒度与钒收率的关联规律、合金表面氧化膜的形成机理有所提及,但尚未针对反应后合金锭的宏观形貌差异、组织结构演化特征,以及不同工艺条件下氧化膜呈色差异的内在成因开展系统性的深入探究。笔者以 AlV55 合金为对象,在单位反应热 3 250 kJ/kg 条件下,采用宏观观察、共聚焦显微、SEM-EDS 及氧氮氢分析等手段,系统揭示了铝热法钒铝合金组织结构演变、成分偏析及杂质行为,对氧化层进行了探讨,为工艺调控与高品质钒铝合金规模化生产提供支撑。

1 试验部分

1.1 钒铝合金的制备

试验用片装 V_2O_5 经雷蒙磨磨制,粒度 $\leq 0.075\ \mu\text{m}$ (-200 目),纯度 $\geq 99.0\%$;工业级球形铝粉粒径

45 ~ 75 μm ,纯度 $\geq 99.5\%$;造渣剂 CaO、 CaF_2 纯度均大于 98%。以石墨坩埚为反应容器,单炉投料量以 200 kg V_2O_5 为基础进行配比计算,并进行 3 炉次重复验证,确保结果可重复。

将上述 V_2O_5 、铝粉及造渣剂置于 V 型混料机混合 4 h, 60 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥 12 h; 装入石墨坩埚,酒精引燃上部点火方式引发铝热还原反应,控制单位反应热量稳定维持在 3 250 kJ/kg。反应完成后静置冷却 24 h 以上,避免空气对流与二次污染。冷却后按上、下层分层取样,破碎研磨至粒径 0.075 μm (≤ 200 目),统一制样后开展表征测试,保证取样与检测一一对应。主反应如式(1)所示。



1.2 样品表征与性能测试

使用 SU5000 型号的扫描电子显微镜(SEM)和能量色散 X 射线谱仪(EDS)对上下层典型区域进行形貌与成分分析,每炉上下层各取 6 个检测点,取平均值以降低误差。采用 X 射线衍射光谱分析样品的物相组成,用 Jade6 对比标准 PDF 卡片,分析判断物相的组成。X 射线光电子能谱对钒铝合金的氧化层进行价态分析,使用 Advantage 软件对 XPS 数据进行分峰拟合。采用氧氮氢分析仪测定 O、N 含量,采用电感耦合等离子体光谱(ICP)测定 Fe、Si 等杂质含量。所有检测均在同一工艺条件、同一设备、同一参数下完成,保证数据可比性与试验稳定性。

2 结果与讨论

2.1 合金锭宏观分层特征

对铝热反应后的合金进行去渣出炉,合金饼碎裂成数块,合金上下层出现结构特征差别,且断口有明显氧化色,如图 1 所示。

从图 1 可以看到合金锭的宏观形貌和结构特征差别,将合金分为两个区域:区域 1(上层)的组织疏松,夹杂氧化铝熔渣,内部存在明显气孔与缩孔缺陷,表面呈现黄、蓝、灰相间的暗淡色泽,无明显金属光泽;区域 2(下层)的组织致密,无肉眼可见熔渣夹杂,断口呈现明亮的金属光泽。

该宏观分层现象直接导致合金锭上下层在成分均匀性、杂质含量与组织性能上产生显著差异。

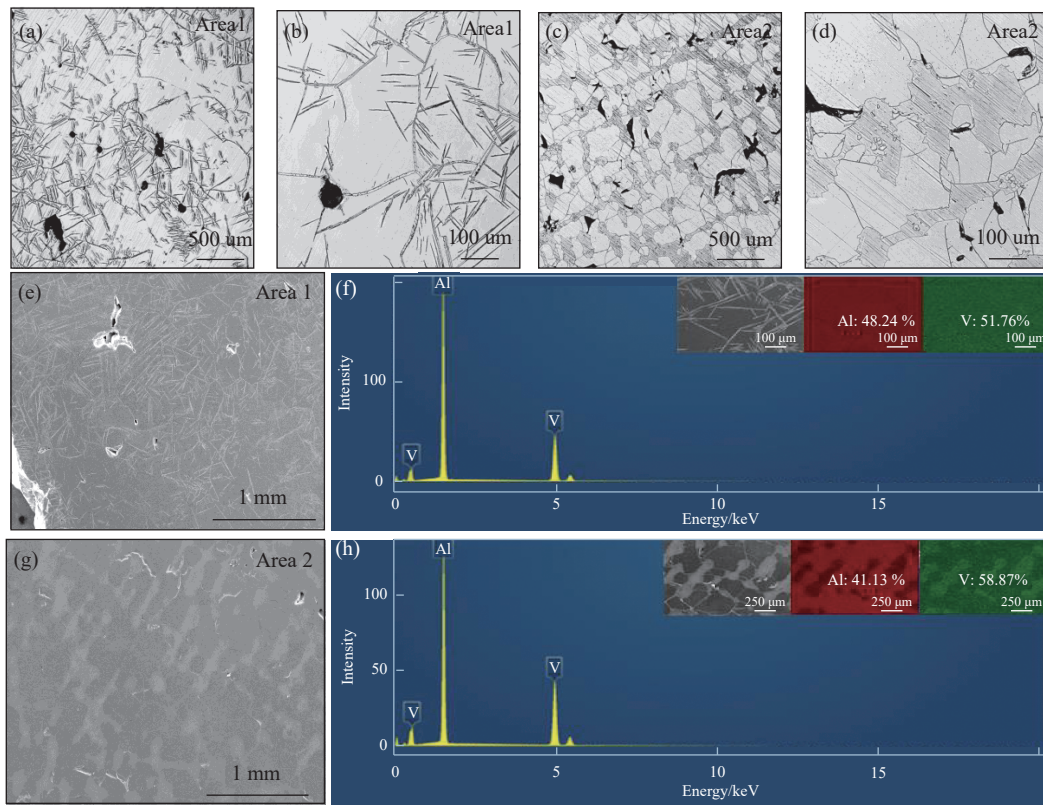
2.2 微观组织形貌

为了进一步研究上下层的具体组织结构,采用共聚焦显微镜和 SEM-EDS 进行探究,如图 2 所示。由图 2(a)~(d) 的共聚焦显微形貌可见,合金锭上下层的微观组织形态存在明显差异:上层合金以针状钒铝固溶体组织为主,合金组织疏松,孔隙率较高;而下层合金呈现典型的鱼骨状钒铝固溶体形貌,合金组织致密、组织连续性更好,晶粒内部可见微裂纹;图中黑色区域为氧氮化物夹杂或气孔缺陷,直观反映出合金内部存在成分偏析;图 2(e)~(h) 的 SEM-EDS 分析结果进一步验证了上述差异。结合 EDS 能谱定量结果,上层合金中钒的平均质量分数约为 51.76%,下层合金中钒的平均质量分数约为 58.87%。



图 1 AlV55 合金锭宏观分层情况

Fig. 1 Macroscopic stratification of AlV55 alloy ingot



(a)(b) 上层 AlV55 共聚焦显微组织; (c)(d) 下层 AlV55 共聚焦显微组织; (e)(g) 上、下层钒铝合金的 SEM 图; (f)(h) 上、下层钒铝合金的 EDS 图

图 2 AlV55 合金显微组织与能谱分析

Fig. 2 Microstructure and energy spectrum analysis of AlV55 alloy

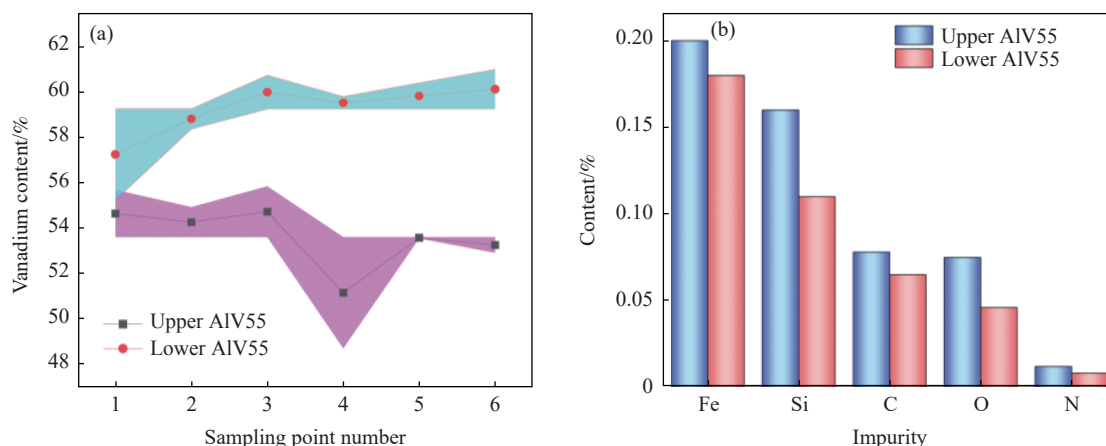
钒铝合金的成分偏析本质上是凝固过程中溶质再分配与元素扩散行为共同作用的结果,可从微观扩散动力学与宏观重力分异两个尺度展开分析。从微观机制来看,合金凝固过程依次经历完全液相、固液两相共存与完全固相三个阶段,其中固液共存阶段的元素扩散能力差异是引发成分偏析的核心因素^[7]。钒与铝的扩散系数存在显著差异,二者在液态下的扩散系数 D_L 均处于 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,而固态

下 Al 的扩散系数 D_S 分别为 $10^{-14} \sim 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, V 的扩散系数 D_S 仅为 $10^{-16} \sim 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[8]。可见无论液态还是固态,铝原子的扩散能力均显著高于钒原子,且固态下的差异更为突出。这就导致凝固推进过程中,扩散速率更快的铝原子更易向残余液相中迁移,而钒原子因扩散动力学受限,更容易被截留在已凝固的固相中,由此形成固液相间的成分差异,催生微观成分偏析。从宏观尺度来看,铝热反应释放的大量

反应热使还原生成的金属钒与过量铝完全熔融形成高温熔体,体系内元素同时受到重力场的作用。由于金属钒的密度(6.0 g/cm^3)显著高于铝(2.7 g/cm^3),富钒的液相组分与先析出的初生相会在重力驱动下逐渐向熔体底部沉降富集,而富铝的轻组分则向上迁移,最终在铸锭竖直方向上形成明显的宏观分层现象。微观与宏观效应相互叠加、协同耦合,共同决定了铝热法钒铝合金锭的整体成分分布特征与组织形貌规律,受此双重机制共同作用,合金锭上层区域钒元素占比偏低、铝含量相对较高,下层区域则呈现钒元素富集、铝含量偏低的分布特征。结合 SEM 和 EDS 能谱图分析:合金上层钒含量为 51.76% 左右,下层钒含量为 58.87% 左右,上下层的成分差异与上述偏析形成机制的理论分析

完全吻合。

在合金区域取 6 个点进行钒含量和杂质含量测试,得到如图 3 所示的数据。由图 3(a)可知,上层钒铝合金的最大钒含量是 54.71%、最小钒含量是 51.13%,极差为 3.58%。下层钒铝合金的最大钒含量是 59.99%、最小钒含量是 57.24%,极差为 2.75%。上层钒含量的方差 s^2 为 1.79,下层钒含量的方差 s^2 为 1.19,对比可知,上层合金的钒含量波动幅度显著大于下层,成分均匀性更差,这主要是由于反应喷溅效应以及合金上层直接与熔渣接触,导致成分波动加剧;下层合金处于相对稳定的熔体环境,成分一致性更好。由于合金为铝热反应后自然冷却,因此可排除冷却速率过快导致熔体未充分沉降引发偏析的可能。



(a)上、下层钒铝合金的钒含量; (b)上、下层钒铝合金的杂质含量

图 3 钒铝合金钒及杂质元素分布

Fig. 3 Vanadium content and impurities distribution of AlV55 alloy

由图 3 (b) 杂质元素分布结果可以看出:与造渣剂直接接触的合金上层, Fe、Si 质量分数分别为 0.20%、0.16%,而下层对应为 0.18%、0.11%。上层杂质含量更高的原因在于原料中的杂质元素在熔融态下部分与 CaO、CaF₂ 造渣剂结合进入渣相上浮,未被充分捕集的 Fe、Si 元素则富集于合金上层区域。气体杂质呈现相同规律:上层合金 O、N 质量分数分别为 0.075%、0.012%,下层对应为 0.046%、0.008%,这是由于铝热反应过程剧烈,熔体喷溅过程中卷入空气,靠近大气环境的合金上层更容易裹挟气体夹杂,最终导致氧氮含量升高。

2.3 氧化层分析

由图 4 可以看到,钒铝合金表面由上至下出现不同的氧化色,不同炉次的合金外观出现氧化色的颜色也不相同,图 4(a)~(d)显示了不同氧化色的合金,图 4(e)为冷却后的氧化铝基渣,图 4(f)为不同颜色合金的 XRD。

图 4(f)呈现了合金的 XRD 物相表征结果:黑色氧化膜中检测出的氧化物组分为 V₂O₃;蓝色氧化膜对应的氧化物相成分为 VO₂;黄色氧化膜中则识别出 V₂O₅ 物相。

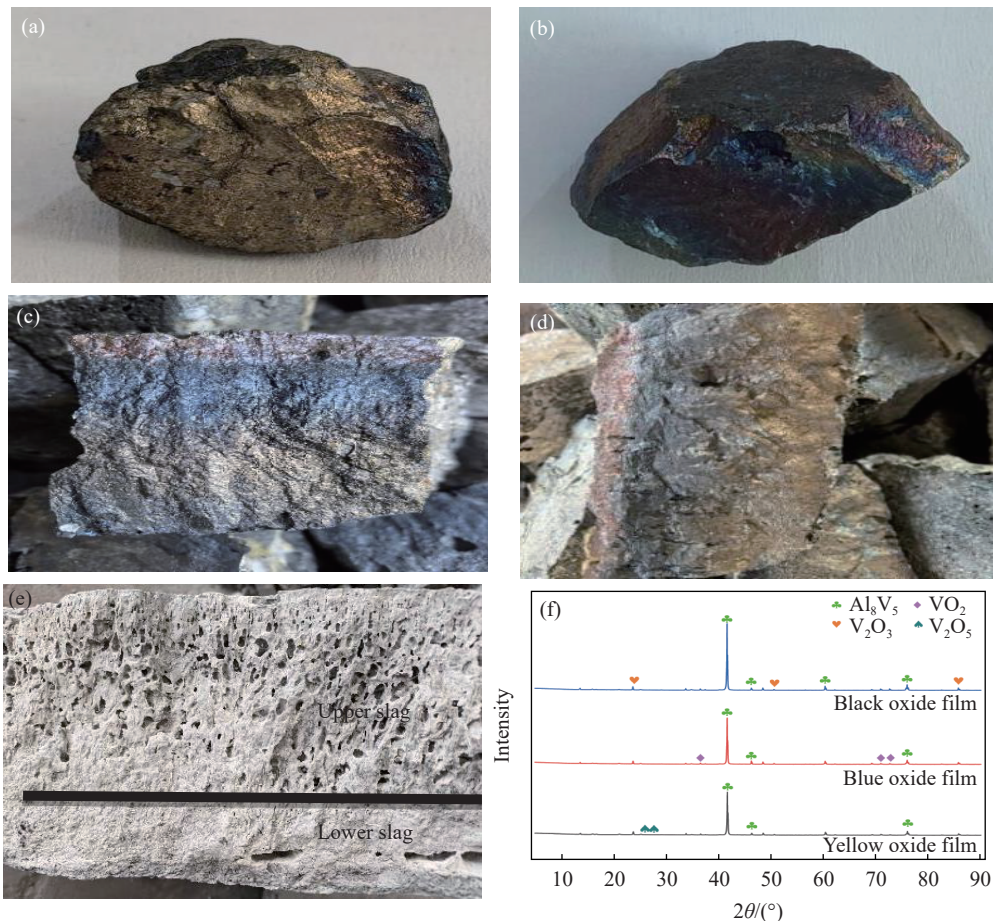
氧化过程形成氧化膜的反应式^[9],见式(2)~(5)。



在钒铝反应过程中,铝优先将五氧化二钒还原为液态金属钒,随后体系中过量的铝和新生液态金属钒进一步发生包晶反应,生成 Al₈V₅ 金属间化合物相。该物相在凝固收缩过程中易萌生微裂纹缺陷,待反应趋于终止、体系温度回落时,裂纹界面处的钒与铝组分均存在接触氧化的可能性^[10]。

图4(e)的氧化铝基渣呈现出和空气接触的上层渣气孔大,和合金液面接触的下层渣较为密实,气孔小,尤其是底部接触层。氧化铝熔渣本身氧晶格饱和,不溶解自由氧^[11-12],但在反应过程中物料和空气中的 O_2 、 N_2 及 H_2O 被卷入反应溶液中,由于 Al_2O_3 基熔渣熔点高,粘度大,因此熔渣中的气体来不及逸出,和空气接触的上层渣液便已凝固,将气体封在渣液中,造成渣中的气孔较多。下层渣紧贴钒铝合金液,由于渣液自上而下的凝固方式使后凝固的合金液吸附渣液中的气体,从而导致下层较上层渣密实,气孔小。加上渣-合金界面氧氮分压梯度,导致熔渣本体氧分压>合金界面氧分压>合金内部

氧分压,随着渣液自上而下的凝固,形成单向扩散驱动力^[13-15];合金液全程吸附渣液中的氧、氮离子,从界面向基体内部形成连续的氧、氮浓度梯度,且钒属于典型的过渡族金属元素,其价态覆盖范围较宽,可在-1~+5价变化,在钒铝反应体系的氧化进程中,钒元素价态随氧化程度加深逐步升高,依次经历+2、+3、+4、+5价的逐级演化,由于不同价态的钒氧化物具备差异化的光学呈色特性,最终使得合金产物表面的氧化膜呈现出各不相同的外观色泽^[16],最终造就了上黄-中蓝-下黑的分层氧化变色结构。对合金表面的氧化膜进行X射线光电子能谱分析,其结果见图5及表1。



(a) 黄色氧化层; (b) 蓝色氧化层; (c)(d) 黑色氧化层; (e) 氧化铝基渣层; (f) 合金表面的黑色、蓝色、黄色氧化层 XRD

图4 钒铝合金氧化形态、渣层结构与物相表征

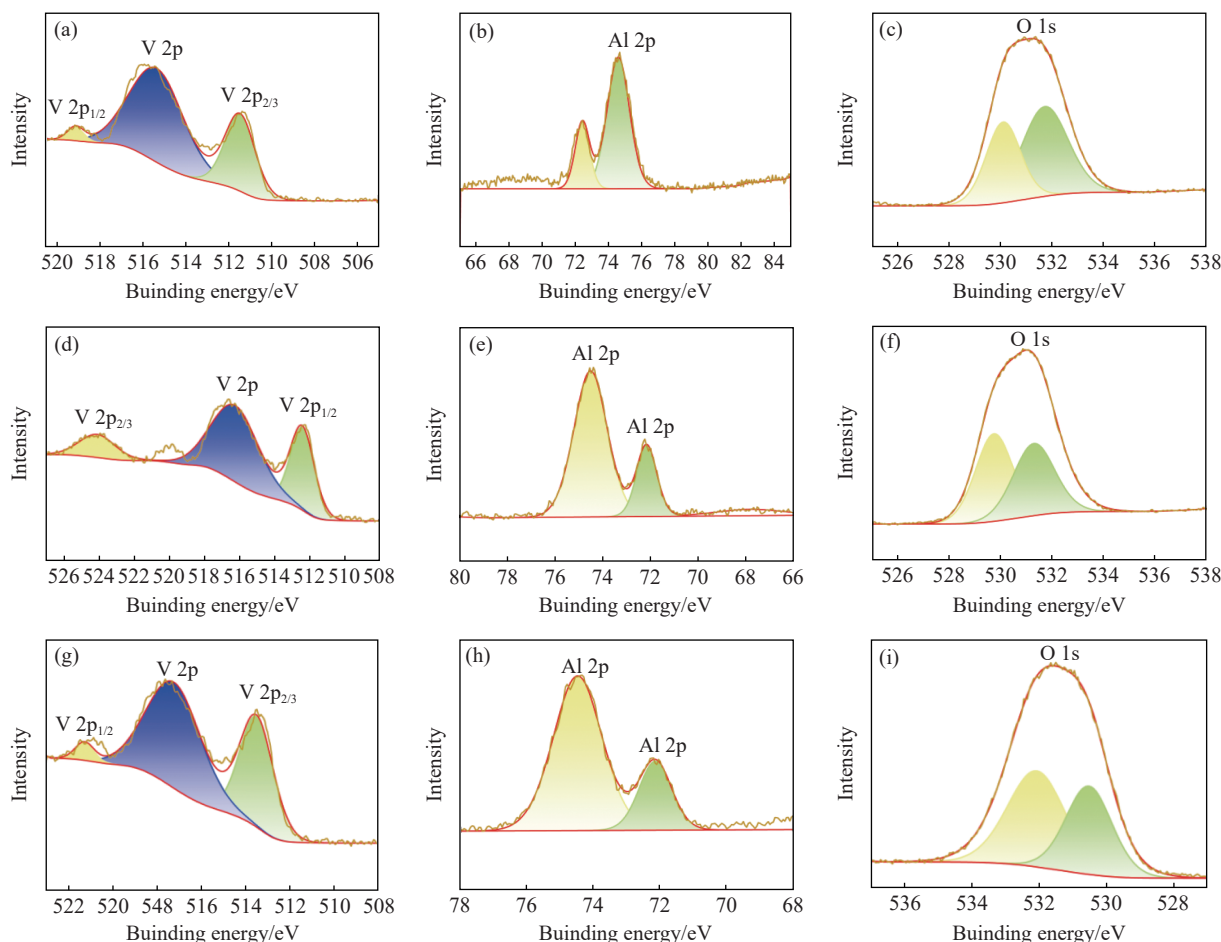
Fig. 4 Oxidation morphology, slag structure and phase characterization of V-Al alloy

由图5的合金表面黑色、蓝色、黄色氧化层的XPS数据及表1拟合出的结果可以看到,该氧化层主要由V、O、Al三种元素组成,这一物相结论与XRD结果相互印证,XPS全谱中可清晰观测到V 2p、Al 2p、O 1s特征峰。原子价态的变化会改变有效核电荷强度与核外电子的屏蔽效应:当

元素价态升高、失去外层电子时,核外电子云对原子核的屏蔽作用随之减弱,内层电子受到的原子核束缚力增强,最终表现为光电子结合能 E_b 的升高。内层电子结合能的偏移本质上由原子电子结构变化驱动,其作用机制可划分为初态效应与终态效应两类^[17-19],XPS谱图中观测到的化学位

移是两种效应共同作用的结果。其中初态效应占据主导地位: 因为V为典型过渡组元素, 2p轨道存在未成对电子, 光电子激发过程中会产生多重价态分裂, 在谱图出现多重分裂峰(卫星峰/震激峰)。这类特征峰是过渡金属价态的核心标识, 峰强度与元素价态直接相关, 也是鉴别钒元素金属价态的重要依据之一。此外, 在钒铝合金体系中,

V 2p_{1/2}与V 2p_{3/2}两条轨道峰面积比并不遵循通常规律面积1:2^[20-21]的理论比例。对不同色泽氧化层的分峰拟合结果显示: 黑色氧化层的V 2p特征峰结合能为515.34 eV, 蓝色氧化层为516.19 eV; 黄色氧化层为517.20 eV, 三者分别对应V的+3价到+5价态, 整体呈现出价态越高, 对应光电子结合能越大的变化规律。



(a)黑色氧化层的V 2p; (b)黑色氧化层的Al 2p; (c)黑色氧化层的O 1s; (d)蓝色氧化层的V 2p; (e)蓝色氧化层的Al 2p; (f)蓝色氧化层的O 1s; (g)黄色氧化层的V 2p; (h)黄色氧化层的Al 2p; (i)黄色氧化层的O 1s

图5 合金表面的黑色、蓝色、黄色氧化层XPS

Fig. 5 XPS of black, blue and yellow oxide layers on alloy surface

表1 黑色、蓝色、黄色氧化层各自对应V 2p的价态

Table 1 Valence states of V 2p corresponding to black, blue and yellow oxide layers

XPS	V2p	Valence state
Black	515.34	+3
Blue	516.19	+4
Yellow	517.20	+5

3 结论

1) 铝热反应后合金锭呈现明显上下分层, 上层组织疏松, 含气孔与氧化铝夹杂, 钒含量约51.76%,

且波动较大; 下层组织致密、金属光泽强, 钒含量约58.87%, 且分布均匀。

2) 微观上, 上层为针状钒铝固溶体, 下层为鱼骨状钒铝固溶体。成分偏析由钒与铝的扩散速率差异及密度差耦合作用所致。上层氧、氮、铁、硅杂质含量显著高于下层, 与造渣剂接触、反应飞溅及气体夹杂密切相关。

3) 合金表面形成黑、蓝、黄三种氧化膜, 分别对应钒的+3、+4、+5价氧化物, 氧化膜颜色由钒的价态差异决定。

参考文献

- [1] 高敬. 钛合金用 Al-V 中间合金的生产研究概况[J]. 钢铁钒钛, 2001(1): 69-71.
Gao Jing. Progress in production of Al-V master alloys for titanium alloys[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2001(1): 69-71.
- [2] Chen Junxiu, Yan Fawang, Chen Bolei, et al. Assessing the tribocorrosion performance of Ti-6Al-4V, 316 stainless steel and Monel K500 alloys in artificial seawater[J]. Materials and Corrosion, 2013, 64(5): 394-401.
- [3] Shih Weijen, Wang Suzhao, Li Wanglong, et al. The phase transition of calcium phosphate coatings deposited on a Ti-6Al-4V substrate by an electrolytic method[J]. Journal of alloys and compounds, 2007, 434: 693-696.
- [4] 万贺利, 徐宝强, 李东明, 等. 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 Heli, Xu Baoqiang, Li Dongming, et al. Domestic research status of aerospace-grade Al-V master alloys[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 11-18.
- [5] 和平志, 陈卓, 李彦宏, 等. 一步法制备钒铝合金的影响因素探究[J]. 钛工业进展, 2017, 34(5): 41-44.
He Pingzhi, Chen Zhuo, Li Yanhong, et al. Study on influencing factors of one-step preparation of vanadium-aluminum alloy[J]. Titanium Industry Progress. 2017, 34(5): 41-44.
- [6] 黎明, 明宪权. 提高钒铝合金冶炼回收率的途径探讨[J]. 铁合金, 2000(4): 11-13.
Li Ming, Ming Xianquan. Discussion on approaches to improving smelting recovery rate of vanadium-aluminum alloy[J]. Ferro-Alloys, 2000(4): 11-13.
- [7] 周尧和, 毛协民, 李金富. 凝固科学技术与材料[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 123-125.
Zhou Yaohe, Mao Xieming, Li Jinfu. Solidification science, technology and materials[M]. Beijing: Science Press, 2002: 123-125.
- [8] 李洪桂. 冶金原理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Li Honggui. Metallurgical principles[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [9] 李东明, 贾立根, 于继洋, 等. 钒铝合金氧化膜的控制[J]. 河北冶金, 2020(2): 38-42.
Li Dongming, Jia Ligen, Yu Jiyang, et al. Control of oxide film on vanadium-aluminum alloy[J]. Hebei Metallurgy, 2020(2): 38-42.
- [10] 李晓东, 陈彦兄, 孙小满, 等. 钒铝合金的组织结构对抗氧化性能的影响及提升措施[J]. 湖南有色金属, 2025, 41(5): 74-76, 104.
Li Xiaodong, Chen Yanxiong, Sun Xiaoman, et al. Effect of microstructure on oxidation resistance of vanadium-aluminum alloy and improvement measures[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2025, 41(5): 74-76, 104.
- [11] Kim Y, Min D J. Viscosity and structural investigation of high-concentration Al_2O_3 and MgO slag system for FeO reduction in electric arc furnace processing[J]. Metals, 2021, 11(8): 1169.
- [12] Fincham C J B, Richardson F D. The behaviour of sulphur in silicate and aluminate melts[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1954, 223(1152): 40-62.
- [13] 王敏, 包燕平, 崔衡, 等. $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 精炼渣氮行为[J]. 工程科学学报, 2010, 32(2): 172-177.
Wang Min, Bao Yanping, Cui Heng, et al. Nitrogen behavior of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ refining slag[J]. Chinese Journal of Engineering, 2010, 32(2): 172-177.
- [14] 王博辰, 任英, 邝霜, 等. 铝脱氧钢与 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 精炼渣反应动力学研究[J]. 金属学报, 2025, 61(9): 1315-1328.
Wang Bochen, Ren Ying, Kuang Shuang, et al. Kinetics study on reaction between aluminum-killed steel and $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ refining slag[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(9): 1315-1328.
- [15] 项长祥, 杨斯馥. 合成渣对钢液吸氮的保护作用[J]. 工程科学学报, 1998, 20(2): 122-125.
Xiang Changxiang, Yang Sifu. Protective effect of synthetic slag on nitrogen absorption of molten steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 1998, 20(2): 122-125.
- [16] 代卫丽, 刘彦峰, 左恒, 等. 钒铝合金表面氧化物的成因机理研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(2): 59-65.
Dai Weili, Liu Yanfeng, Zuo Heng, et al. Study on formation mechanism of surface oxides on vanadium-aluminum alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(2): 59-65.
- [17] Siegbahn K M B, Nordberg R, Fahlman A, et al. ESCA: atomic, molecular and solid state structure studied by means of electron spectroscopy[M]. Uppsala: Almqvist & Wiksells, 1967.
- [18] Moulder J F, Stickle W F, Sobol P E, et al. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy[M]. Minnesota: Perkin-Elmer Corporation, 1992.
- [19] Wagner C D. Chemical shifts of Auger lines, and the Auger parameter[J]. Faraday Discussions of the Chemical Society, 1975, 60: 291-300.
- [20] Gupta R P, Sen S K. Calculation of multiplet structure of core p-vacancy levels. II[J]. Physical Review B, 1975, 12(1): 15-19.
- [21] Briggs D, Seah M P. Practical surface analysis volume 1: auger and X-ray photoelectron spectroscopy[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.