

不同牌号钒铝合金组织结构及 杂质含量的差异

张 琦¹, 姚正午¹, 马治龙², 何志敏^{2*}, 陈彦兄², 倪航星²

(1. 宁夏大学材料与新能源学院, 宁夏 银川 750000; 2. 宁夏东方钽业股份有限公司, 宁夏 石嘴山 753000)

摘 要: 钛合金广泛用于航空航天、汽车制造、医疗等领域, 而制备钛合金的关键材料是钒铝合金, 研究用铝热法生产钒铝合金, 在原料相同的条件下根据不同的物料配比制备出牌号为 AIV55、AIV65、AIV85 的合金, 分析其微观结构、杂质含量以及力学性能。结果表明: AIV55 的杂质含量比 AIV65、AIV85 的低, 但是其微观组织存在裂纹、气孔等缺陷, AIV55 由 Al_8V_5 和钒铝固溶物组成, 因其 Al_8V_5 的组织结构, 其硬度及耐磨性较好; AIV85 的杂质含量较高, 但是其合金产品一致性较好, AIV85 由 AlV_3 组成, 致使其硬度小, 耐磨性差。通过比较可知 AIV65 合金产品的性能较为均衡, 无论是在杂质含量还是力学性能方面都较为优越。

关键词: 钒铝合金; 铝热法; 微观组织; 杂质; 力学性能

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0058-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.007

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Differences in microstructure and impurity content among vanadium–aluminum alloys of various grades

ZHANG Qi¹, YAO Zhengwu¹, MA Zhilong², HE Zhimin^{2*}, CHEN Yanxiong², NI Hangxing²

(1. School of Materials and New Energy, Ningxia University, Yinchuan 750000, Ningxia, China; 2. Ningxia Orient Tantalum Industry Co., Ltd., Shizuishan 753000, Ningxia, China)

Abstract: Titanium alloys are extensively utilized in the aerospace, automotive, and biomedical sectors. Vanadium–aluminum master alloys are key materials for preparing titanium alloys. In this study vanadium–aluminum master alloys of three grades such as AIV55, AIV65, and AIV85 were synthesized via aluminothermic route under identical raw-material inputs while varying stoichiometric ratios. The resulting ingots were characterized with respect to microstructures, impurity inventory, and mechanical response. The results show that AIV55 exhibits the lowest bulk-impurity level; however, its microstructure contains micro-cracks and gas-induced porosity. Phase analysis reveals Al_8V_5 intermetallic and a V-rich solid solution, the former conferring elevated hardness and wear resistance. AIV85, although showing higher tramp-element contents, displays superior inter-ingot consistency; the sole presence of the AlV_3 phase yields reduced hardness and inferior wear performance. AIV65 delivers the most balanced property profile, combining moderate impurity content with advantageous mechanical properties.

Key words: vanadium-aluminum alloy; thermite process; microstructure; impurity; mechanical property

收稿日期: 2025-09-12; 修回日期: 2026-01-06; 接受日期: 2026-01-22

作者简介: 张琦, 2000 年出生, 女, 山东青岛人, 硕士, 研究方向为钒铝合金的冶炼, E-mail: 15908981813@163.com;

*通信作者: 何志敏, 1982 年出生, 女, 宁夏吴忠人, 高级工程师, 研究方向为微合金及高纯金属的科研和生产工作, E-mail: 394434113@qq.com。

0 引言

钒铝合金因其耐腐蚀性、优异的高温性能、高硬度等特点,作为添加剂制备钒钛合金,广泛应用于航空航天、飞机发动机、船舶、核能等领域^[1]。钒以中间合金形式加入钛合金中,钒铝合金低于钒的熔点,在最终合金中能够分布均匀。钒铝合金与钛金属熔合,得到含钒钛合金,因此钒铝合金的质量对含钒钛合金性能有直接影响。钒在钛合金中是一种很强的 β 稳定剂,加入不同比例的钒含量能使合金具有良好的延展性、耐腐蚀性、成形性等优良的性能^[2-3]。根据YS/Y579-2014标准将钒铝合金分为AlV55、AlV65、AlV75、AlV85四个牌号。因为生产技术及发展的差异,国内通常用钒铝55、钒铝65作为添加剂制备钛合金,国外通常以钒铝65、钒铝85作为添加剂制备钛合金^[4]。

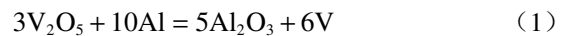
钛合金用钒铝合金的质量要求是纯度高、成分均匀、夹杂少^[5]。全球铝钒中间合金年产70%以上用于航空航天,需求与产量持续高速增长,市场潜力巨大^[6]。钒铝合金的制备方法有一步法、两步法、电铝热法、真空法等。其中一步法为目前国内主流制备方法,一步法设备流程简单、投资少见效快。但是其产品一致性差、杂质含量高、质量不佳;两步法和真空法制备的钒铝合金成分均匀、杂质含量低。但是操作复杂,生产周期长;电铝热法反应过程可控,适合大规模工业生产。由于设备成本较高,工艺控制较为复杂,目前还未大规模使用^[7]。

因制备钒铝合金的战略性及必要性,国内外学者针对钒铝合金的研究较为深入,和平志等^[8]研究了提高一步法钒铝合金回收率的关键:原料先密实再投料,确保接触均匀、损耗低;选用低Fe、Si原料及高品位 V_2O_5 可减少喷溅、降低杂质并提升回收率。Sun等^[9]对AlV55合金进行真空熔炼时,发现2000 Pa Ar气氛可将Al挥发损失由真空(60 Pa)的11.48%降至0.58%,金属利用率显著提高。优化参数后,合金C、O、N含量分别低至0.03%、0.007 3%、0.013%,满足商业要求。李建兵等^[10]通过控制原料 V_2O_5 中 $w(\text{Fe}) \leq 0.06\%$ 、 $w(\text{Si}) \leq 0.06\%$,铝粉中 $w(\text{Fe}) \leq 0.07\%$ 、 $w(\text{Si}) \leq 0.05\%$;CaO中 $w(\text{SiO}_2) \leq 0.20\%$, CaF_2 中 $w(\text{SiO}_2) \leq 0.10\%$,可使钒铝合金产品 $w(\text{Fe}) < 0.18\%$ 、 $w(\text{Si}) < 0.18\%$ 。提高单位反应热至3 200 kJ/kg可将氧降至约0.02%,再升热对降氧无益。石墨炉壁涂CaO保护层可同时降碳并延

长使用时间。以上研究均是对于单一牌号的钒铝合金的工艺条件进行调控,制备得到高品质合金。然而市场上应用较多牌号合金的微观组织结构和性能对比较少,以此为切入口,对AlV55、AlV65、AlV85展开研究,通过探究各牌号组织结构、杂质缺陷以及力学性能,以便根据使用场景选取合适的牌号。

1 钒铝合金生产工艺

铝热法生产钒铝合金主要是用铝还原氧化钒,此过程中放出大量的热量,以保证反应能够正常进行,过量的铝和钒形成合金,合金和冶炼渣因为密度的不同而分离开,反应方程如式(1)(2)所示。



计算主反应式(1)的吉布斯自由能变^[11],见公式(3)。

$$\Delta_r G_m^\theta = \sum \Delta_f G_m^\theta (\text{生成物}) - \sum \Delta_f G_m^\theta (\text{反应物}) \quad (3)$$

其中, $\Delta_r G_m^\theta$ 为反应的标准摩尔吉布斯自由能变, $\sum \Delta_f G_m^\theta (\text{生成物})$ 为生成物的标准生成自由能, $\sum \Delta_f G_m^\theta (\text{反应物})$ 为反应物的标准生成自由能,单位为kJ/mol,并且当 $\Delta_r G_m^\theta < 0$ 时,反应能自发正向进行。

$$\text{求得 } \Delta_r G_m^\theta = -3\,703.3 \text{ kJ/mol} < 0$$

单位热效应是指单位质量反应物释放的热量,在铝热反应高温中,标准吉布斯自由能变约等于标准焓变,即 $\Delta_r G_m^\theta \approx \Delta H_{298}^\theta$

单位热效应公式见式(4)。

$$q = \frac{|\Delta H_{298}^\theta|}{\text{反应物总质量}} = \frac{3\,703.3}{0.815\,44} = 4\,542.5 \text{ kJ/kg} \quad (4)$$

其中, q 为单位热效应,表示按单位反应进度时所吸收或放出的热量,能同时表征能量释放速度与质量燃烧速度两个物理量,单位为kJ/kg。 $|\Delta H_{298}^\theta|$ 为标准情况下生成物与反应物在常温下的生成热之差,单位为kJ/mol。

吉布斯自由能小于零,反应能自发进行,反应放热为4 542.5 kJ/kg,通常情况下,一步法制钒铝合金自热条件为单位炉料热 $\geq 2\,730$ kJ/kg。所以反应放出的热量能够满足钒铝合金反应的要求,并且可通过添加冷却料的方式将热量调控到反应可自发进行的范围内,以避免反应过于激烈造成喷溅^[12]。

2 试验材料及测试方法

通过对比 AIV55、AIV65、AIV85 合金在微观组织结构、杂质含量、力学性能方面的影响。结合不同场景选取合适的合金产品。

2.1 试验材料和流程

试验所用原料见表 1。采用铝热法制备 AIV55、AIV65、AIV85, 制备流程见图 1。

2.2 测试方法

1) 微观表征

使用发射电子扫描显微镜以及配备的 EDS 能对样品表面形貌、元素分布进行分析。

2) 元素含量测试

合金样品中的 C 元素用红外碳硫仪测试, O、N 元素用氧氮仪测试, Al、Si、Fe 元素用 ICP 测试, 采用硫酸亚铁铵滴定法分析样品中的 V 含量。

3) 硬度测试

在维氏硬度仪上对钒铝合金进行显微硬度测试, 测试力为 49~98 N, 保持时间为 5~10 s。共测试 10 个点的显微硬度, 取其平均值作为最后显微硬度值。

4) 磨损测试

使用多功能往复摩擦试验机完成对试样的磨损性能测试。测试时间为 10 min, 测试过程中施加的载荷为 5 N, 使用直径为 6 mm 的 Al_2O_3 陶瓷球作为磨球。

表 1 用于制备中间合金的试验材料

Table 1 Experimental materials for preparation of master alloys

Material name	Specification/%	Particle size range/ μm
V_2O_5	99	-595
Al	99.9	-149
CaO	99.9	-74
CaF_2	99.9	-74

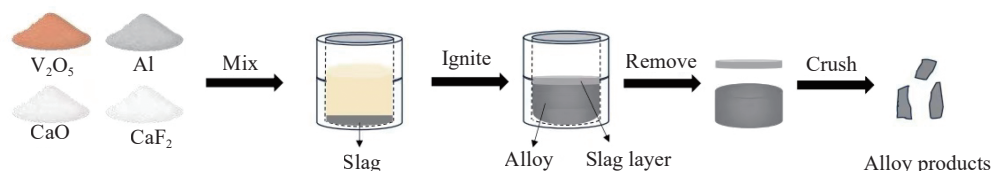


图 1 钒铝合金制备流程

Fig. 1 Preparation procedure of vanadium-aluminum alloy

3 结果讨论

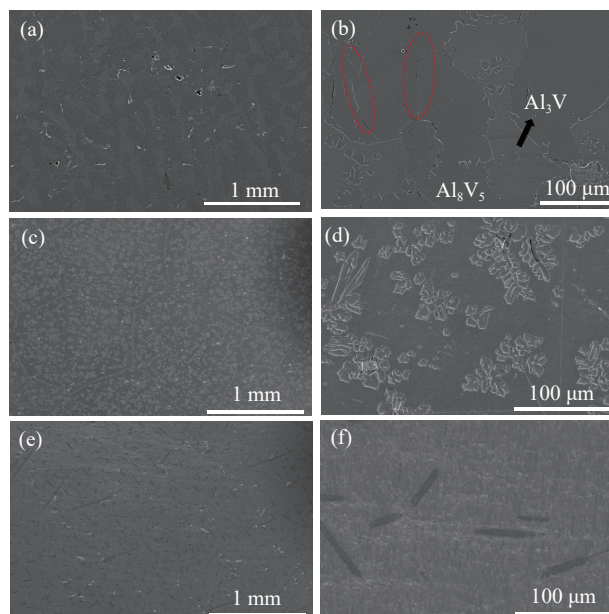
3.1 微观组织

结合其二元相图^[13]以及图 2 三种牌号钒铝合金 SEM 微观形貌图可知, AIV55 合金中存在气孔和裂痕, 析出的钒铝固溶物相结构较 AIV65、AIV85 形状大且不规则, 合金组织均一性效果不佳。这些裂纹不仅降低了合金的强度, 使合金易碎, 而且这些裂纹还使气体(N_2 、 O_2)容易渗透到合金中, 导致合金中 N 和 O 含量的增加。原因为钒铝合金首先在高温条件下生成初生相 V, 当温度降低时, 发生包晶反应生成 Al_8V_5 , 如式(5)所示。V 与 Al_8V_5 虽同为体心立方, 但晶格常数差异显著。包晶转变时, 单个晶胞体积骤增。剧烈的体积变化引发晶格畸变与微观应力, 且随相变量增加而加剧^[14]。



AIV65 中随着钒含量的增加, 晶粒形状逐渐趋于规则, 结合钒铝合金二元凝固相图以及图 3 XRD 物相检测得知 AIV65 合金处于包晶反应的初生包晶相区^[15]。以 Al_8V_5 为主, 由于铝含量减少、钒含量增加, Al_8V_5 的比例较 AIV55 合金少, 因晶胞体积导

致晶格畸变, 从而在宏观上反应的裂痕也较少, 从 SEM 微观形貌图 2(c)(d) 中可以得到验证。



(a)(b) AIV55; (c)(d) AIV65; (e)(f) AIV85

图 2 不同牌号钒铝合金的 SEM 微观形貌

Fig. 2 SEM images showing micrographs of different grades vanadium-aluminum alloys

图 2(e)(f)中 AIV85 的合金组织结构缺陷少,结合图 3 XRD 测试结果得知 AIV85 合金以 AlV_3 相为主。适用于更高要求的使用场合。钒铝合金主要以添加剂的形式加入其他成分中,均匀的微观形貌更有利于其在应用过程中发挥出良好的添加剂作用。

对三种牌号 AIV55、AIV65、AIV85 的钒铝合金进行 XRD 测试,由图 3 可知 AIV55 以 Al_8V_5 、 Al_3V 两相为主, AIV65 以 Al_8V_5 为主, AIV85 以 AlV_3 为主。晶格参数数据见表 2,其中 Al_8V_5 的晶胞体积较大为 $0.775\ 48\ \text{nm}^3$,所以在 AIV55 包晶反应中,因晶胞体积骤变而在合金组织中产生裂纹,造成合金的质量、均一性变差。

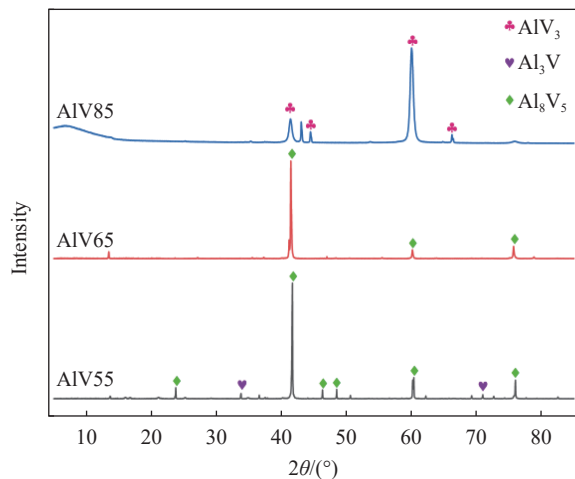


图 3 不同牌号钒铝合金的 XRD 图

Fig. 3 XRD patterns of different grades vanadium-aluminum alloys

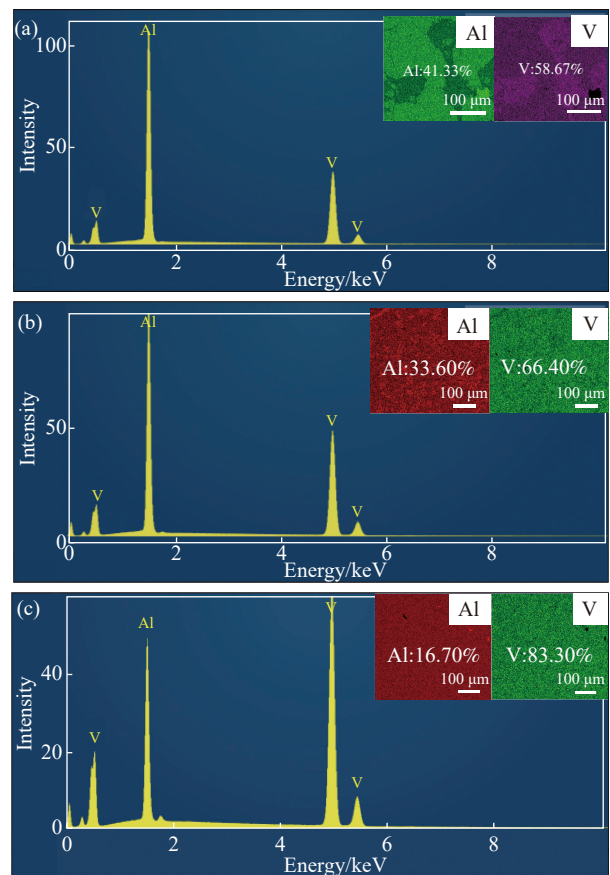
表 2 晶格参数
Table 2 lattice constant

Phase	a/nm	b/nm	c/nm	V/nm^3
Al_8V_5	9.234	9.234	9.234	0.775 48
Al_3V	3.775	3.775	8.320	0.785 04
AlV_3	4.926	4.926	4.926	0.119 53

从 SEM-EDS 能谱(图 4)中可以看到 AIV55 的钒含量为 58.67%, AIV65 的钒含量为 66.40%, AIV85 的钒含量为 83.30%, 分别都符合钒铝合金各牌号的钒含量要求。其中 AIV55 的钒、铝元素分布图可以清晰看到物相轮廓,而当钒含量逐渐增加,在 AIV65、AIV85 中钒铝元素分布图的轮廓模糊不清可见,表明两种元素均匀分布在合金内部,合金的均一性程度更好。

3.2 杂质含量

测得的三种合金杂质数据如表 3 所示,对比国家标准 YS/T 579-2014, AIV85 的 Fe、Si 含量较高,分别为 0.22%、0.19%。其原因为随着钒含量的增加,原料 V_2O_5 的投入量也随之增加,而原料中含 Fe、Si 等杂质元素,所以合金产品 AIV85 中铁、硅含量较高。试验样品的坩埚是高纯石墨坩埚,炉衬材料的差别也会导致合金中的杂质含量不同,见图 5 熔炼过程杂质来源示意图,以氧化镁坩埚作为反应容器时,因为炉衬材料中含铁硅氧化物在高温条件下合金熔液将杂质冲刷进入合金中,以石墨坩埚作为反应容器时,碳为其主要材质,在使用过程中,将碳杂质引入导致杂质含量较高^[16-17]。目前采取有效措施降低石墨坩埚的渗碳效果^[18],例如攀钢集团刚玉涂层石墨坩埚制备钒铝 85 合金,其杂质含量较为均衡^[19]。综上所述,采用刚玉涂层的石墨坩埚耐材更优。



(a) AIV55; (b) AIV65; (c) AIV85

图 4 不同牌号钒铝合金的 EDS 图

Fig. 4 EDS spectra of different grades vanadium-aluminum alloys

3.3 硬度测试

钒铝合金作为合金添加剂制备出钛合金,应用

场景多用于航空航天等场所,对硬度要求较高,使其能够在高应力、高应变环境中正常使用。图6为三种合金的硬度测试数据。

表3 三种合金杂质含量

Table 3 Impurity content of three different master alloys

Designation	Fe	Si	O	N	C
AIV55	0.18	0.1	0.036	0.02	0.064
AIV65	0.20	0.15	0.062	0.016	0.072
AIV85	0.22	0.19	0.087	0.025	0.089

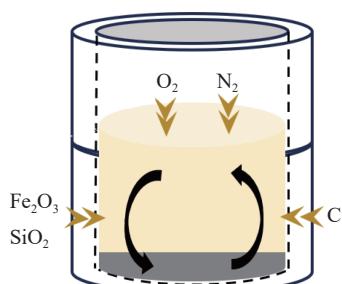
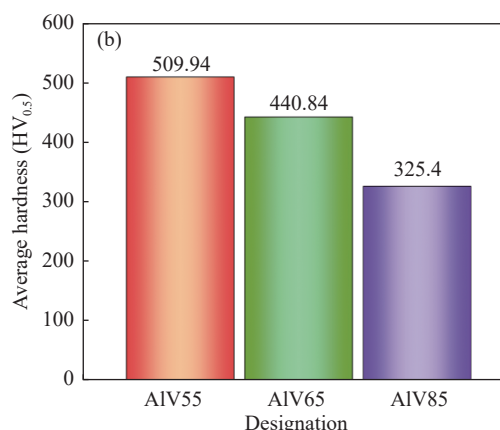
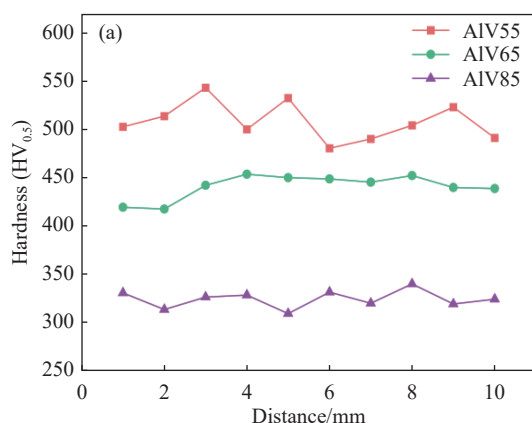


图5 熔炼过程杂质来源

Fig. 5 Impurity sources throughout the smelting process



(a) AIV55、AIV65、AIV85 的维氏硬度; (b) 三种合金的平均维氏硬度

图6 三种合金硬度测试

Fig. 6 Hardness testing of three different master alloys

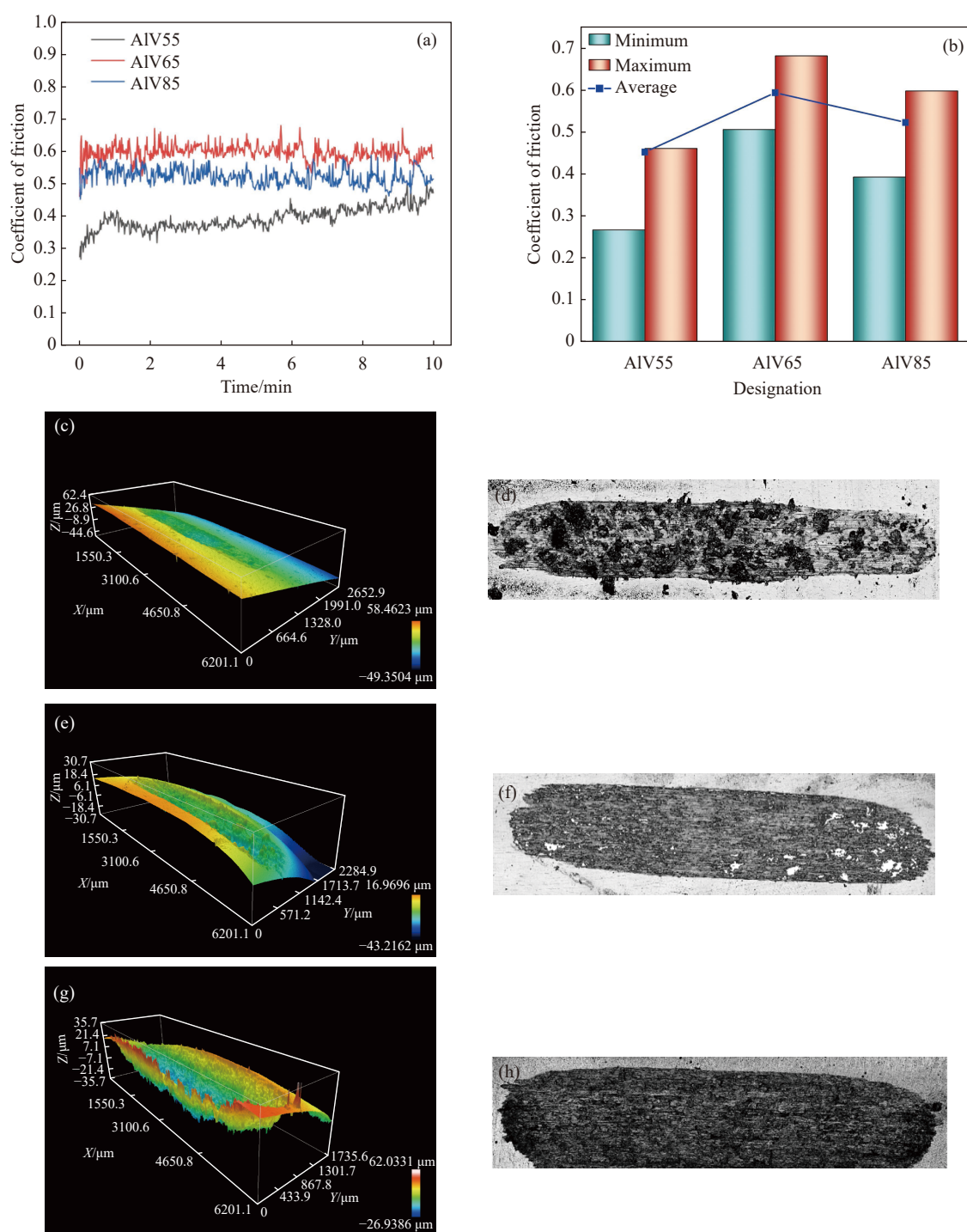
3.4 摩擦磨损测试

干摩擦是研究合金与对磨体系、磨损机理的有效方法,摩擦系数代表了合金产品与氧化铝对磨球之间的相互作用强度,从图7(a)(b)中得知,AIV55的平均摩擦系数最小,为0.452 5,AIV85的摩擦系数次之,为0.522 77,AIV65的摩擦系数最大,为0.593 6。AIV55因含铝量高,大量形成 Al_3V 金属间化合物,整体合金硬度显著高于AIV85,AIV85以钒基固溶体为主,硬度较低。如图7(c)~(h)所示,在磨粒磨损中,高硬度的AIV55表面能有效抵抗磨粒的“犁沟作用”,即磨粒在表面切割形成沟槽并剥离

由图6可知,AIV55、AIV65、AIV85的平均维氏硬度依次减小,AIV55的平均维氏硬度($\text{HV}_{0.5}$)为509.94;AIV65的平均维氏硬度($\text{HV}_{0.5}$)为440.84,AIV85的平均维氏硬度($\text{HV}_{0.5}$)为325.4。各合金固溶体及基体相组成的差异导致其硬度有所不同:AIV55合金中铝含量较高, Al_3V 为主要强化相,具有面心立方晶体结构,原子排列高度有序。小半径钒原子嵌入大半径铝原子形成的晶格间隙中,因尺寸差异产生强烈的晶格畸变,同时铝与钒的电负性差异较小,形成较强的金属-共价混合键,键能较高。这种结构稳定且难以变形,导致其硬度极高。AIV85合金铝含量最低,以 AlV_3 相占主导,高温稳定性好,脆性低于 Al_8V_5 ,通常为体心立方结构,大比例的钒原子形成主体晶格,小比例铝原子填充间隙。由于钒原子间的金属键本身较强,但铝的加入量少,晶格畸变程度远低于 Al_3V ,且键合以金属键为主,键能低于 Al_3V ^[20]。因此,其硬度显著较低,在三者中最低,但高温强度更优。

材料,而AIV85因硬度低,磨粒更容易在表面产生深度犁沟,导致更多材料被剥离,磨损率更高。在干摩擦的过程中,摩擦产生热量,可使钒铝合金中的铝元素和空气中的氧气反应,生成一层 Al_2O_3 氧化膜,氧化膜在不断被磨掉和重新生成的过程之中形成一种动态平衡,因钒铝55中的铝含量最高,所以更容易生成氧化膜,抵御摩擦的损伤^[21-23]。

从3D形貌磨痕图可以看到,AIV85的磨痕最深,磨损率最大。在实际应用场合中可结合硬度数据,选取合适的合金产品添加到钛中,制备钛合金。



(a) 摩擦系数; (b) 最小、最大、平均摩擦系数; (c) (d) AIV55 磨痕形貌; (e) (f) AIV65 磨痕形貌; (g) (h) AIV85 磨痕形貌

图7 AIV55、AIV65、AIV85 的摩擦磨损数据

Fig. 7 Tribological data for AIV55, AIV65 and AIV85

4 结论

1)通过对三种不同牌号钒铝合金微观组织的研究,得知:AIV55以 Al_8V_5 为基体相,析出鱼骨状的 Al_3V 钒铝固溶体。其中 Al_8V_5 为脆性相,它的存在导致合金内部出现裂纹缺陷,AIV65处于包晶反应

的初生包晶相区,以 Al_8V_5 为主,AIV85以 Al_3V 为主,析出的固溶体形貌规则均匀。不过AIV85中的杂质含量较高。

2)对三种合金进行力学性能测试,AIV55的硬度高,且在磨损过程中能够生成氧化铝薄膜,减小磨损的程度。因其产品均一性不佳,所以硬度数

据波动较大, AIV65 硬度介于 AIV55、AIV85 之间, 摩擦系数最大, 原因可能为其铝含量处于“临界区间”, 既无法形成连续 Al_2O_3 保护膜, 又因高钒导

致膜层脆化、热失稳, 最终氧化膜润滑失效, 金属直接接触, 摩擦系数最大。AIV85 的硬度最小、磨损率最大。

参考文献

- [1] 李东明, 卢明亮, 万贺利, 等. 电铝热法生产钒铝合金的研究[J]. 河北冶金, 2017(11): 37-41, 57.
Li Dongming, Lu Mingliang, Wan Heli, et al. Study on the production of vanadium-aluminum alloy by electro-aluminothermic process[J]. Hebei Metallurgy, 2017(11): 37-41, 57.
- [2] 吴欢, 赵永庆, 葛鹏, 等. β 稳定元素对钛合金 α 相强化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(5): 805-810.
Wu Huan, Zhao Yongqing, Ge Peng, et al. Effect of β stabilizing elements on the strengthening behavior of titanium α phase[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(5): 805-810.
- [3] 刘晏硕, 徐诺, 徐国建, 等. 钒激光熔沉钛合金组织及性能的作用机制[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 66-75.
Liu Yanshuo, Xu Nuo, Xu Guojian, et al. Mechanism of vanadium on microstructure and properties of titanium alloy by laser melting deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 66-75.
- [4] 王永钢, 文本超, 沙志忠. 钒铝合金物性浅析[J]. 金属功能材料, 2020, 27(6): 51-56.
Wang Yonggang, Wen Benchao, Sha Zhizhong. Comparative analysis on properties of V-Al alloy[J]. Metallic functional Materials, 2020, 27(6): 51-56.
- [5] 李楠, 马力言, 曹瑞, 等. 钛合金用钒铝中间合金技术概述[J]. 金属世界, 2021(4): 25-28.
Li Nan, Ma Liyan, Cao Rui, et al. Overview of vanadium-aluminum master alloy technology for titanium alloy[J]. Metal World, 2021(4): 25-28.
- [6] Xu Yang, Jiao Handong, Wang Mingyong, et al. Direct preparation of V-Al alloy by molten salt electrolysis of soluble NaVO_3 on a liquid Al cathode[J]. Alloys Compd, 2019, 779: 22-29.
- [7] 李建兵. 钒铝合金的生产方法综述[J]. 铁合金, 2017, 48(6): 13-15.
Li Jianbing. Summary on the process of producing vanadium-aluminum alloy[J]. Ferro-Alloys, 2017, 48(6): 13-15.
- [8] 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 the factors influencing the preparation of V Al alloys by one-step method[J]. Titanium Industry Progress, 2017, 34(5): 41-44.
- [9] Sun Bin, Wan Heli, Xu Baoqiang, et al. Study on Al evaporation during AIV55 melting and alloy preparation[J]. Metals, 2024, 14, 466.
- [10] 李建兵, 陈彦兄, 李晓东, 等. 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 Jianbing, Chen Yanxiong, Li Xiaodong, et al. 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.
- [11] 蔡炳新. 基础物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Cai Bingxin. Fundamentals of Physical Chemistry[M]. Beijing, Science Press, 2002.
- [12] 尹丹凤, 陈海军, 鲜勇, 等. 铝热法制备钒铝合金的热力学研究[C]//钒钛资源综合利用产业技术创新战略联盟, 中国钢铁工业协会钒业分会. 第二届钒产业先进技术交流会议论文集. 攀钢集团研究院有限公司钒钛资源综合利用国家重点实验室, 2013: 123-125.
Yin Danfeng, Chen Haijun, Xian Yong, et al. Study on the novel method for preparing vanadium-aluminum alloy using calcium vanadate in electro-aluminothermic process[C]// Strategic Alliance for Technological Innovation in the Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Vanadium Industry Branch of the China Iron and Steel Association. Proceedings of the 2nd Advanced Technology Exchange Conference on the Vanadium Industry. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., 2013: 123-125.
- [13] Wang Li, Wan Heli, Xiong Heng, et al. Investigation and study on the novel method of preparing Al-V alloy by electrode assisted heating[J]. J Mater Res Technol, 2020, 9(5): 10576-10584.
- [14] 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 the formation of surface oxide of vanadium aluminum alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(2): 59-65.
- [15] 刘志光. 航空航天钛合金用中间合金——钒铝 65 合金[J]. 钛工业进展, 2014, 31(1): 12-14.
Liu Zhiguang. The master alloy of VAl65: 35 used for aerospace[J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(1): 12-14.
- [16] 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 Zhaohui. Study on preparation of high quality V-Al alloy by electro-aluminothermic process and comprehensive

- utilization of melting slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [17] 于继洋, 李东明, 贾立根, 等. 电铝热法冶炼钒铝合金的炉衬打结工艺[J]. 河北冶金, 2021(2): 37-41.
Yu Jiyang, Li Dongming, Jia Ligen, et al. Lining knotting of smelting vanadium-aluminum alloy by electric aluminothermic method[J]. Hebei Metallurgy, 2021(2): 37-41.
- [18] 李兰杰, 万贺利, 王方, 等. 一种用于石墨坩埚的涂层料浆及其制备和应用方法: 202210248159. X[P]. 2022-07-05.
Li Lanjie, Wan Heli, Wang Fang, et al. A coating slurry for graphite crucibles and its preparation and application method: 202210248159. X[P]. 2022-07-05.
- [19] 高雷章, 陈海军, 尹丹凤, 等. 一种降低石墨坩埚渗碳的涂层及其制备方法: 202311140687.4[P]. 2023-12-05.
Gao Leizhang, Chen Haijun, Yin Danfeng, et al. A coating for reducing carburization of graphite crucibles and its preparation method: 202311140687.4[P]. 2023-12-05.
- [20] 史忠兵, 马凤仓, 王飞, 等. Al-V 系二元相图的计算、评估及其活度[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(4): 222-228.
Shi Zhongbing, Ma Fengcang, Wang Fei, et al. Calculation, assessment and activity of the Al-V binary phase diagram[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(4): 222-228.
- [21] 李善军, 牛成强, 万强, 等. 渗层强化的果园运输机驱动轮耐磨性能[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 176-186.
Li Shanjun, Niu Chengqiang, Wan Qiang, et al. Wear resistance of the driving wheels of orchard conveyor with coating strengthening[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024. 40(2): 176-186.
- [22] 宋芊汀, 徐映坤, 徐坚. (TiZrNbTa)₉₀Mo₁₀ 高熵合金与 Al₂O₃ 干摩擦条件下的滑动磨损行为[J]. 金属学报, 2020, 56(11): 1507-1520.
Song Qianting, Xu Yingkun, Xu Jian. Dry-sliding wear behavior of (TiZrNbTa)₉₀Mo₁₀ high-entropy alloy against Al₂O₃[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(11): 1507-1520.
- [23] 王兰, 丁红燕, 刘爱辉, 等. TC4 合金在不同摩擦体系中磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2449-2454.
Wang Lan, Ding Hongyan, Liu Aihui, et al. Wear performance of TC4 alloys in different tribo-systems[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2449-2454.

编辑 唐肖

(上接第 50 页)

- [15] 李楠. Ti-22Al-24Nb-0.5Mo 合金组织设计与变形行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
Li Nan. Microstructure design and deformation behavior of Ti-22Al-24Nb-0.5Mo alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [16] 金淼, 李文权, 郝硕, 等. 固溶温度对 Mn-N 型双相不锈钢拉伸变形行为的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(4): 436-444.
Jin Miao, Li Wenquan, Hao Shuo, et al. Effect of solution temperature on tensile deformation behavior of Mn-N-bearing duplex stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(4): 436-444.
- [17] 刘智恩. 材料科学基础[M]. 第 5 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
Liu Zhien. Fundamentals of materials science[M]. 5th ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019.
- [18] Baker I. Recovery, recrystallization and grain growth in ordered alloys[J]. Intermetallics, 2000, 8(9-11): 1183-1196.
- [19] Sun Shichen, Fang Hongze, Hao Jiaqi, et al. Formation behavior of subcrystals and its strengthening and toughening mechanism by coupling with α phase in titanium alloys during forging at various temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 336: 118705.
- [20] Zhao Yanan, Ma Zongqing, Yu Liming, et al. The simultaneous improvements of strength and ductility in additive manufactured Ni-based superalloy via controlling cellular subgrain microstructure[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 68: 184-190.
- [21] 赵子博, 王清江, 刘建荣, 等. 两种可用于描述晶粒变形传递倾向性的物理量: 滑移位向差和孪生取向差[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(5): 703-706.
Zhao Zibo, Wang Qingjiang, Liu Jianrong, et al. Two physical quantities to describe the tendency of grain deformation transfer: slip misorientation and twinning misorientation[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(5): 703-706.

编辑 徐飞翔