

铝热还原 FeV50 合金杂质成分预测 及控制研究

余 彬, 叶明峰, 王 宁, 黄 云, 高雷章, 尹丹凤, 陈海军

(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, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 分析了铝热还原 FeV50 合金制备过程典型杂质元素的热力学行为及其赋存状态, 考察了特定熔渣特性条件下杂质元素在熔渣和合金中的分配规律, 制定了原料杂质元素的控制标准。结果表明: 铝热还原体系典型杂质元素迁移及其赋存状态与熔炼阶段和熔渣特性相关。铝热还原过程中, Fe、Mn、Si、C、P、S 等弱还原性杂质元素在热力学上具有被金属铝还原并进入合金相的可行性, 还原后的 Fe、Mn、Si 元素以单质形式存在, 而 C、P、S 则可能与合金基体元素 V 和 Fe 反应生成 VC、Fe₃P 和 FeS。铝热反应结束后, 合金中非金属杂质逐渐向熔渣扩散, 其扩散能力主要由熔渣特性决定。在以钒氧化物还原为主导的特定熔渣组成条件下, Si、Mn、C、P 和 S 在合金中的平均分配系数分别为 76.9%、89.7%、255.0%、87.6% 和 28.7%, 对应满足 FeV50-A 标准要求的单位原料杂质控制上限分别为 4.0%、1.0%、0.6%、0.13% 和 0.12%。

关键词: 铝热还原; FeV50; 合金成分; 分布规律; 控制标准

中图分类号: TF044

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0025-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.005

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Impurities composition prediction and control of FeV50 alloy by aluminothermal reduction

YU Bin, YE Mingfeng, WANG Ning, HUANG Yun, GAO Leizhang, YIN Danfeng, CHEN Haijun

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The thermodynamic behavior of typical impurity elements in the preparation process of FeV50 alloy by aluminum thermal reduction and their stable occurrence state in the alloy were analyzed, and the distribution law of impurity elements under specific slag characteristics conditions was investigated. The control standards for impurity elements were established. The results indicate that the migration and occurrence of typical impurity elements in aluminum thermal reduction system are related to the smelting stage and slag characteristics. During the aluminum thermal reduction process, weak reducing impurity elements such as Fe, Mn, Si, C, P, S, etc. have the thermodynamic feasibility to be reduced by metallic aluminum and entering the alloy phase. The reduced Fe, Mn, and Si exist in elemental form, while C, P, and S may react with the alloy matrix elements V and Fe to form VC, Fe₃P, and FeS, respectively. After the aluminothermal reaction, non-metallic impurities in the alloy gradually diffuse into the slag, and their diffusion ability is mainly determined by the characteristics of the slag. Under specific slag composition conditions dominated by vanadium oxide reduction, the average distribution coefficients of Si, Mn, C, P and S in the alloy are 76.9%, 89.7%, 255.0%, 87.6% and 28.7%, and

收稿日期: 2024-07-08

基金项目: 四川省重大科技专项 (2023ZDZX0004)

作者简介: 余彬, 1987 年出生, 男, 四川内江人, 博士研究生, 正高级工程师, 长期从事钒钛产品高效制备理论、工艺及产业化应用等研究工作, E-mail: robinyjc@sina.com。

the corresponding upper limits of impurity control for unit raw materials that meet the FeV50-A standard requirements are 4.0%, 1.0%, 0.6%, 0.13%, and 0.12%, respectively.

Key words: aluminothermal reduction, FeV50, alloy composition, distribution regularity, control standards

0 引言

钒是一种重要的战略合金元素,享有“现代工业味精”的美誉。它能与钢中的碳、氮反应形成细小且弥散的难熔金属碳氮化物,起到细晶强化和沉淀强化作用^[1-2]。添加少量钒即可提高钢材的强韧性、延展性或耐热性,显著改善钢材综合力学性能^[3]。作为应用最为广泛的含钒微合金化中间合金,FeV50 合金主要采用直筒炉铝热一步还原工艺进行制备^[4-5]。当前,钒铁合金制备过程最主要的关注点在于冶炼收率的提高和冶炼成本的降低,此外,为保证生产的钒铁合金在市场正常流通销售,大宗钒铁合金产品均需满足钒铁国家标准 GB/T4139-2012 的质量要求。同时,随着我国冶金技术,尤其是特种钢材冶炼技术的快速发展以及对高端钢铁产品的旺盛需求,对于钒铁合金添加剂的质量要求变得更加苛刻。

描述钒铁合金产品质量的关键指标包括破碎性能和化学组成。破碎性能影响产品一次成品率,是企业端关注的重要指标。相关研究表明,FeV50 合金室温相随 Al 含量增加逐渐从 σ 相向 α 相转变,其临界 Al 含量为 0.8%^[6-7]。化学组成主要影响产品成分合格率,是应用端关注的重要指标,对企业效益、业界影响力产生重大影响。不同品级 FeV50 合金(FeV50-A、FeV50-B、FeV50-C)的主要限定杂质元素包括 Al、Si、Mn、C、P、S,对于铝热还原工艺而言,FeV50 合金成分合格率主要与原料组成及熔渣特性相关^[8]。由于缺乏系统的铝热还原杂质元素脱除机理和分布规律研究,无法实现钒铁合金产品质量的精准预测和有效控制。当前 FeV50 合金生产企业只能通过牺牲钒收率、提高原料纯度等方式来满足客户对于低/高 Al、Mn 等定制化合金产品的需求,从而严重限制冶炼原料的选择范围以及生产企业的经营效益。如何在提高钒铁合金冶炼原料适应性和保证钒铁合金冶炼收率的前提下实现 FeV50 合金杂质元素的稳定控制,不仅有利于 FeV50 合金成分合格率及品级率的提高,同时也有利于拓展 FeV50 合金产品在特殊钢中的多元化应用。

笔者在铝热还原体系杂质元素热力学行为及其稳定赋存状态研究基础上,通过统计特定熔渣特性

条件下 FeV50 合金制备过程典型杂质元素在原料和合金中的分布规律和分配比,制定并形成 FeV50 合金原料杂质成分控制标准,从而为高品质 FeV50 合金制备以及低品位含钒二次资源综合利用提供理论支撑。

1 试验研究方法

1.1 试验原料

研究所采用的试验原料主要包括含钒物料、铁质料、还原剂和造渣剂等,均为工业级产品,对应原料成分范围如表 1 所示。 V_2O_5 、 V_2O_3 和 FeV50 细粉等含钒物料大都满足中国国家标准(GB/T 4139-2012、GB/T 40301-2021)和中国冶金行业标准(YB/T 5304-2017)的相关成分要求,除尘灰(PD, Precipitator dust)、富集料(EM, Enriched materials)、钒铁细粉(FeV)等含钒物料以及铁质料、还原剂和造渣剂等辅材成分满足某公司企业标准(QB-2021)要求。造渣剂有效成分含量高于 90.0%,粒径范围为 10.0 ~ 50.0 mm;铁质料包括钢屑和钒渣球磨铁粒(BMIG, Ball-milled iron grit),粒径范围为 3.0 ~ 10.0 mm;还原剂主要为切削铝豆,粒径范围为 1.0 ~ 5.0 mm。

1.2 试验方法

以 10.0 t 钒源作为入炉标准,在综合配铝系数为 1.05 的条件下,基于理论铁需求量的 95.0%、造渣剂添加量和炉衬侵蚀量为理论产渣量的 15.0% 和 10.0%、炉料热量 3 300 kJ/kg 的炉料热量需求和配料准则,将反应原料按上述比例进行充分混配后平铺于反应载体,在常压条件下以电辅热的方式促发铝热自蔓延反应,待物料完全熔化后持续供电,以维持体系温度在 1 800 °C 以上,反应结束后随炉冷却至常温后拆分炉体/锭模,获得冶炼刚玉渣和钒铁合金锭,称重取样后对其化学成分和物相组成进行分析表征。

试验过程总配铝量和配铁量分别按式 (1) 和式 (2) 计算。

$$M_{Al} = \sum_i^n (M_i m_i \eta) \div w_{Al} \quad (1)$$

$$M_{Fe} = \sum_i^n (M_i w_{Vi}) \div r_{V/Fe} \quad (2)$$

式中, M_i 和 m_i 分别为单炉冶炼过程不同含钒物料

入炉量和还原剂消耗量, kg; η 为综合配铝系数; w_{Al} 和 w_{Vi} 分别为铝和不同含钒物料 TV (Total vanadium), %; $r_{\text{V/Fe}}$ 为钒铁合金中钒和铁的质量比, kg/kg。

以 50 炉次工业生产数据作为统计样本, 以入炉

原料杂质元素质量分数为输入变量, 以 FeV50 合金杂质元素质量分数为决策变量, 分别对 Si、Mn、C、P、S 等元素在原料和合金中的分布规律进行线性拟合, 获得原料中典型杂质元素的控制标准。

表 1 试验原料化学成分及杂质含量分布
Table 1 Chemical compositions and impurities content of raw materials

原料	纯度 /%	杂质元素含量 /%					标准
		Si	Mn	C	P	S	
钒源	V ₂ O ₃	60.8 ~ 64.5*	0.02 ~ 0.10	0 ~ 0.25	0 ~ 0.10	0 ~ 0.04	GB/T 40301-2021
	V ₂ O ₅	98.0 ~ 99.2	0.02 ~ 0.15	0 ~ 0.30	0 ~ 0.05	0 ~ 0.04	YB/T 5304-2017
	FeV	47.6 ~ 51.8*	0.30 ~ 2.00	0 ~ 0.45	0 ~ 0.25	0 ~ 0.10	GB/T 4139-2012
	PD	12.3 ~ 16.8*	0.50 ~ 3.00	0 ~ 0.35	0 ~ 0.45	0 ~ 0.10	QB-2021
	EM	16.2 ~ 25.5*	0.30 ~ 2.50	0 ~ 0.15	0 ~ 0.35	0 ~ 0.15	QB-2021
铁源	Fe	99.4 ~ 99.7	0 ~ 0.10	0 ~ 0.10	0 ~ 0.15	0 ~ 0.04	QB-2021
	BMIG	95.3 ~ 97.8	0 ~ 0.25	0 ~ 0.20	0 ~ 0.20	0 ~ 0.08	QB-2021
还原剂	Al	99.0 ~ 99.5	0 ~ 0.05	0 ~ 0.05	0 ~ 0.06	0 ~ 0.05	QB-2021
造渣剂	CaO	90.0 ~ 93.5	0 ~ 0.20	0 ~ 0.05	0 ~ 0.15	0 ~ 0.05	QB-2021

注: *为TV

2 结果与讨论

2.1 铝热还原体系典型杂质元素脱除和控制热力学

2.1.1 典型杂质元素的热力学行为

作为钒铁合金还原熔炼过程的主要还原剂, 合金铝含量主要取决于配料精准性和还原高效性。配铝系数过低会影响钒收率, 配铝系数过高将导致铝含量超标。结合生产实际和实践经验, 单炉综合配铝系数一般为 1.05 ~ 1.08, 对应合金铝含量往往能够有效控制在 2.0% 以下。Fe 是钒铁合金的基体元素, Mn、Si、C、P、S 是钒铁合金的典型杂质元素, 属于弱还原性金属/非金属。Fe、Mn、Si、P 主要来源于含钒原料及辅料, 且大都以氧化物形式赋存, S 主要以硫酸盐形式赋存, C 主要来源于石墨电极, 其主要赋存状态为游离碳。上述杂质在铝热还原过程可能涉及的化学反应及对应标准生成吉布斯自由能如图 1(a) ~ (d) 所示。

由图 1 可知, Fe、Si、Mn、C、P、S 等杂质元素在铝热还原体系中的反应标准生成吉布斯自由能均为负值, 说明弱还原性金属/非金属杂质均能够被金属铝还原并作为副产物进入 Fe-V 熔体。由于 Si、C 具有较强的还原性, 可作为还原剂与 V、Fe、Mn 等氧化物发生反应, 因此铝热还原过程 Si 和 C 的反应限度不仅取决于合金 Al 含量, 还与原料 Si 含量、渗碳量以及渣中 TV 等因素有关, 且上述影响因素存在动态平衡。

2.1.2 典型杂质元素在合金中的赋存状态

由于 Fe、Mn、Si 具备一定的金属特性, 且在 Fe-

V 熔体中与 Fe 和 V 无限互溶, 因此铝热反应结束后被还原进入合金相的 Fe、Mn、Si 主要以单质的形式赋存。C、P、S 等元素则可能与 Fe-V 熔体中的基体元素发生反应生成碳化物、磷化物和硫化物, 基于 FactSage 8.0 热力学软件 “Predom” 计算模块所得 1 800 °C 时的化学平衡如图 2(a) ~ (c) 所示。

由图 2 可知, 在 CO、P₂O₅、SO₂ 分压低于 101.3 kPa 条件下, V-Fe 熔体中 C、P、S 的稳定赋存状态主要由体系对应元素的活度或作用浓度决定。其中, C 能与基体元素反应生成碳化铁和碳化钒, 碳化物的稳定赋存状态随体系 C 活度的增加逐渐从 V₂C 转变为 Fe₃C, 其物相转变路径为 V→V₂C→V₁₀C₈→Fe₃C。P 能与基体元素反应生成磷化铁, 磷化物的稳定赋存状态随体系 P 活度的增加逐渐从 Fe₃P 转变为 FeP₂, 其物相转变路径为 Fe₃P→Fe₂P→FeP→FeP₂。S 能与基体元素反应生成 FeS 和 V₂S₃, 且 FeS 的稳定性强于 V₂S₃。结合 FeV50 合金产品国家标准及铝热还原 FeV50 合金冶炼实际, 合金 C、P、S 质量分数分别不高于 1.0%、0.1% 和 0.1%, 对应 Fe-V 熔体各杂质元素的活度分别不高于 10⁻²、10⁻³ 和 10⁻³, 因此还原进入 FeV50 合金中的 C、P、S 主要以 V₂C、Fe₃P 和 FeS 的形式存在。

当铝热反应结束后, 合金中 V₂C、Fe₃P 和 FeS 在一定熔渣特性条件下与熔渣特定成分反应并逐渐向熔渣和空气中迁移, 直至渣金反应达到平衡。其反应产物主要包括磷酸盐、硫酸盐以及 CO、SO₂、P₂O₅ 等挥发性气体, 从而实现非金属杂质元素的脱

除。影响上述杂质元素脱除效率的主要因素包括熔池温度、炉渣成分、合金成分及原料成分等。高温、高碱度、低氧化性和良好的流动性熔渣有利于 S 的

脱除^[9]；高碱度、高氧化性、充分的熔池搅动以及适当的温度有利于合金中 P 的脱除^[10]；高温、高氧化物性有利于 C 的脱除。

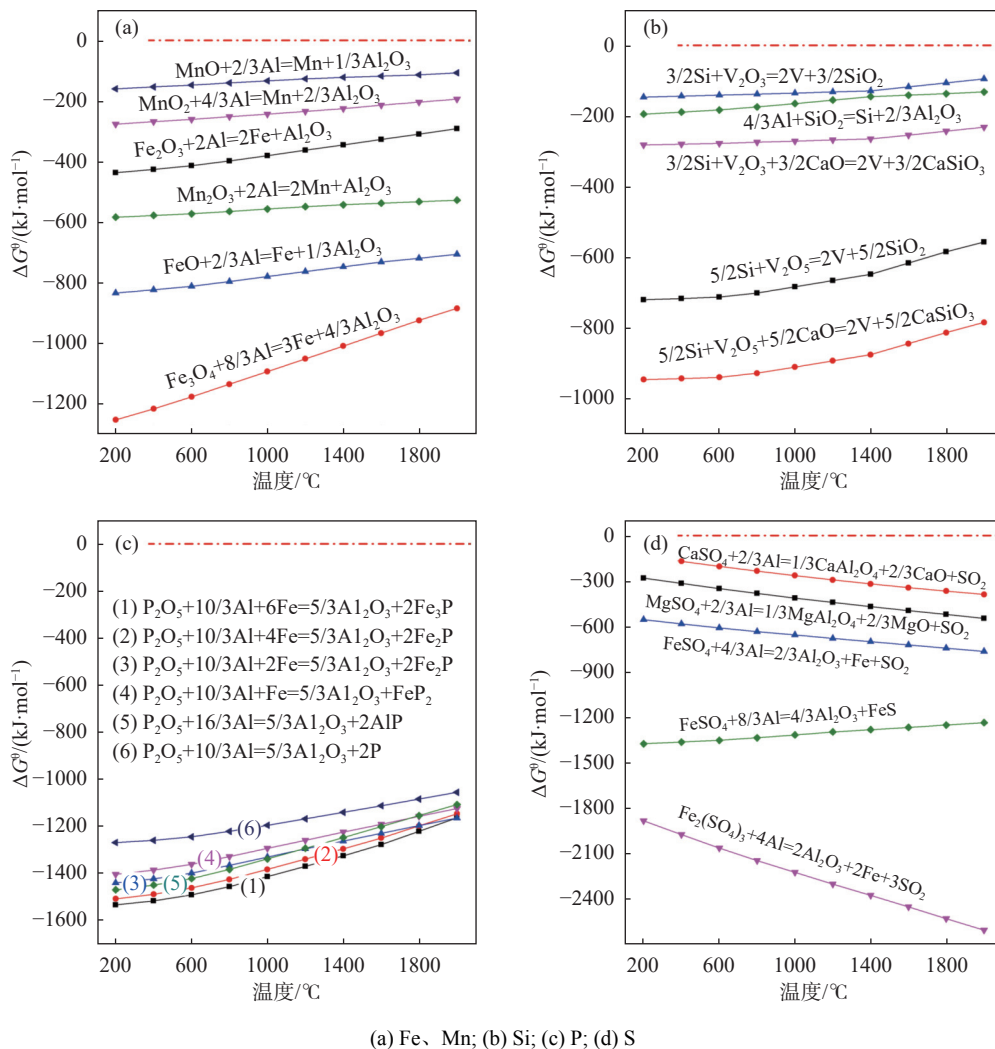


图 1 铝热还原体系典型杂质元素涉及的化学反应及对应标准生成吉布斯自由能

Fig. 1 Reactions and ΔG^θ of typical impurity elements in aluminothermal reduction system

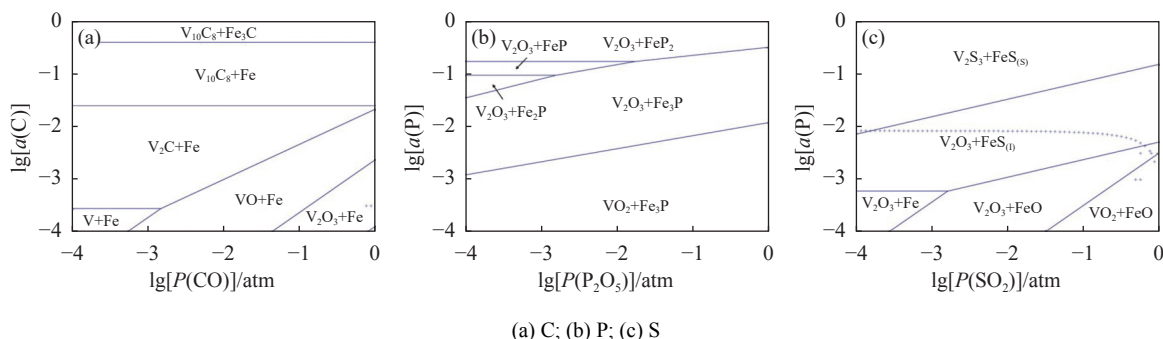
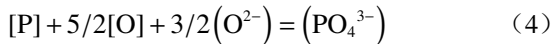


图 2 V-Fe 熔体中 C、P、S 的稳定赋存状态

Fig. 2 Stable occurrence state of C, P and S in V-Fe melt

综上分析可知,大渣量铝热还原钒铁合金制备体系中,C、P、S 等非金属杂质元素的迁移可分为铝热还原前后两个阶段。第一阶段为铝热反应开始时

原料中非金属杂质元素向合金的扩散;第二阶段为铝热反应结束后合金中非金属杂质向熔渣和空气扩散,其主要扩散形式如式(3)~(5)所示。



2.2 典型杂质元素分布规律及控制标准

对于铝热还原 FeV50 合金制备体系,熔渣成分和熔渣特性调控重点在于促进钒氧化物的高效还原和钒铁合金的快速沉降,实际生产过程中熔渣主要成分为 $Al_2O_3=65\% \sim 80\%$ 、 $MgO=10\% \sim 15\%$ 、 $CaO=10\% \sim 15\%$,并不能完全满足有利于上述大部分杂质元素脱除的热力学条件。因此,在特定熔渣组成

和冶炼条件下,钒铁合金典型杂质元素的脱除和控制主要取决于入炉原料杂质总含量及其在熔渣和合金熔体中的分配比,明确典型杂质元素在原料及合金中的分配规律,便能确定对应杂质元素在铝热还原体系的脱除限度,从而为 FeV50 合金杂质成分的预测和控制提供数据支撑。

2.2.1 典型杂质元素的分布规律

通过统计以 V_2O_3 为主要含钒原料、 V_2O_5 为次要含钒原料(原料配比 8:2)的配料模式下,原料和对应 FeV50 合金杂质元素含量的关系如图 3(a)~(e) 所示。

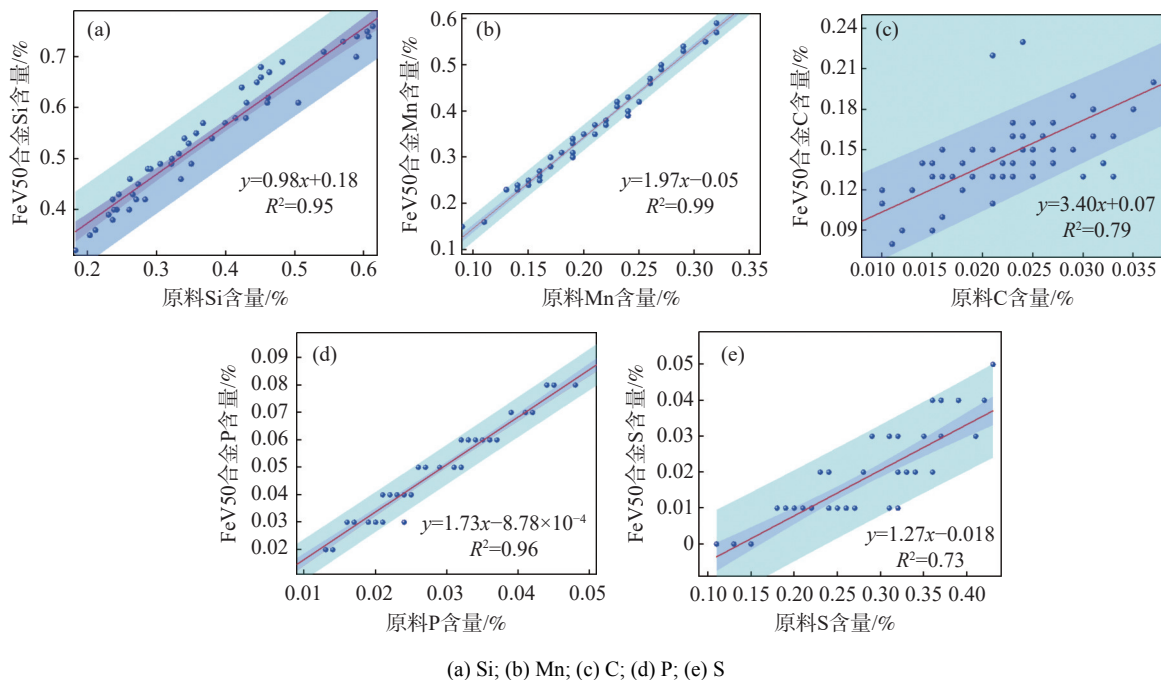


图 3 典型杂质元素在原料和合金中的分布规律

Fig. 3 Distribution law of typical impurities in raw material and alloy

由图 3(a) 可知,原料和对应 FeV50 合金 Si 含量存在显著的线性相关性,相关系数达到 0.95。FeV50 合金中杂质元素 Si 质量分数随原料 Si 质量分数的提高而提高,当原料 Si 质量分数从 0.30% 提高至 0.60% 时,FeV50 合金平均 Si 质量分数从 0.38% 提高至 0.77%,对应 FeV50 合金 Si 质量分数的 95% 置信区间和预测区间偏差范围分别为 $\pm 0.01\%$ 和 $\pm 0.07\%$ 。由图 3(b) 可知,原料 Mn 含量与对应 FeV50 合金 Mn 含量的线性相关系数达到 0.99。当原料 Mn 质量分数从 0.10% 提高至 0.35% 时,FeV50 合金平均 Mn 质量分数从 0.15% 提高至 0.64%,对应 FeV50 合金 Mn 质量分数的 95% 置信区间和预测区间偏差范围分别为 $\pm 0.01\%$ 和 $\pm 0.03\%$ 。由图 3(c) 可知,原料 C 含量与对应 FeV50 合金 C 含量的线性相关性相对较弱,其

相关系数为 0.79。虽然 FeV50 合金中 C 质量分数整体与原料 C 质量分数呈正相关,但合金中 C 含量的分布随机性极强,在原料 C 质量分数为 0.01% ~ 0.04% 区间范围内,对应 FeV50 合金 C 质量分数的 95% 置信区间和预测区间偏差范围分别达到 $\pm 0.02\%$ 和 $\pm 0.30\%$ 以上,且 C 在合金中的分配比达到 226.2% ~ 568.6%。说明钒铁合金产品 C 含量受到以石墨电极异常熔蚀或熔断等特殊情况的严重影响。由图 3(d) 可知,原料 P 含量与对应 FeV50 合金 P 含量呈线性正相关,其相关系数达到 0.96。当原料 P 质量分数从 0.01% 提高至 0.05% 时,FeV50 合金平均 P 质量分数从 0.016% 提高至 0.086%,对应 FeV50 合金 P 质量分数的 95% 置信区间和预测区间的偏差范围分别为 $\pm 0.002\%$ 和 $\pm 0.09\%$ 。由图 3(e) 可知,原料与 FeV50 合金 S 含量的线性相关

性相对较弱,其相关系数为 0.73。原料 S 质量分数从 0.015% 提高至 0.04% 时, FeV50 合金平均 S 质量分数从 0.001% 提高至 0.033%, 对应 FeV50 合金 S 质量分数的 95% 置信区间和预测区间的偏差范围为 $\pm 0.004\%$ 和 $\pm 0.012\%$ 。

2.2.2 原料杂质成分控制标准

实际生产过程中, Si、Mn 等杂质来源除钒氧化物之外, 还来源于还原剂、铁质料以及打结料等其他辅料。因此, 在分析冶炼体系典型杂质脱除热力学条件的前提下, 需进一步明确固定入炉原料标准条件下各杂质元素在熔渣和合金中的分配系数(杂质进入合金的比例), 从而确定杂质元素的脱除难度及脱除效率, 为钒铁合金杂质成分控制提供数据支撑。

为统一混合原料实际入炉的杂质元素总量, 笔

者以混合原料中钒元素的总质量为计算基准对原料平均杂质元素含量进行计算, 同时定义原料中对应杂质元素进入合金的比例为分配系数, 并作为衡量杂质元素脱除效率的一项指标。单位金属钒原料典型杂质元素含量与对应 FeV50 合金成分的关系如图 4 所示。由图可知, FeV50 合金中 Si、Mn、P、S 等杂质元素含量与对应原料杂质含量整体呈线性相关, 上述杂质元素在统计范围内的分配系数分别为 56.9% ~ 93.4%、80.6% ~ 96.8%、79.3% ~ 98.6% 和 0 ~ 63.5%, 平均分配系数分别为 76.9%、89.7%、87.6% 和 28.7%。同时 Si、Mn、P 元素的分配系数具有较强的线性相关性; 由于合金 S 元素整体处于较低水平, 甚至处于检测下限, 说明当前熔渣体系和冶炼条件有利于 S 的脱除, 并导致 S 元素的分配系数存在显著偏差。

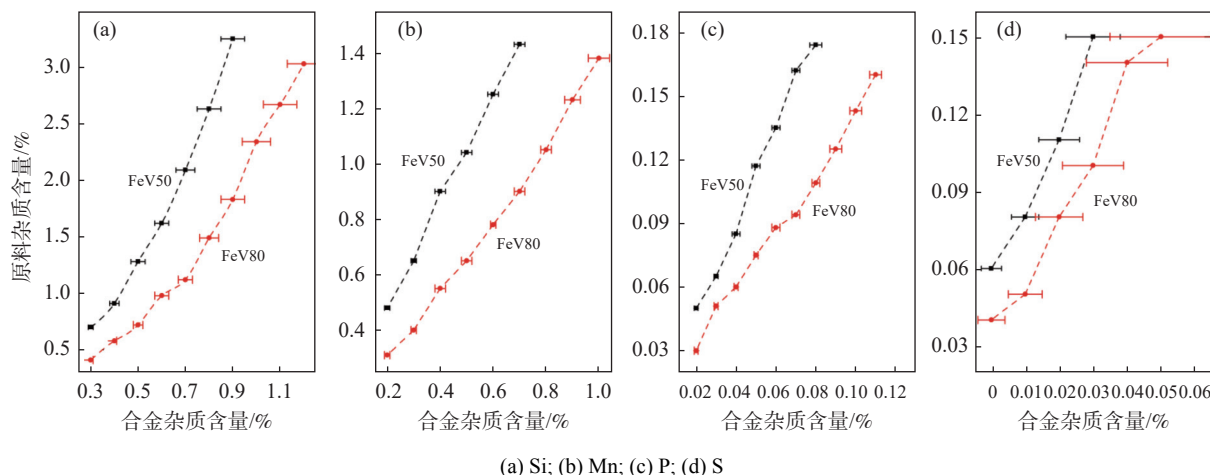


图 4 FeV50 合金典型杂质元素的分布
Fig. 4 Distribution of typical impurities in FeV50

此外, 由图 5 所示的不同牌号钒铁合金 C 含量分布可知, FeV50 和 FeV80 合金 C 含量整体符合正态分布, 有少量偏离分布的异常超标炉次出现。

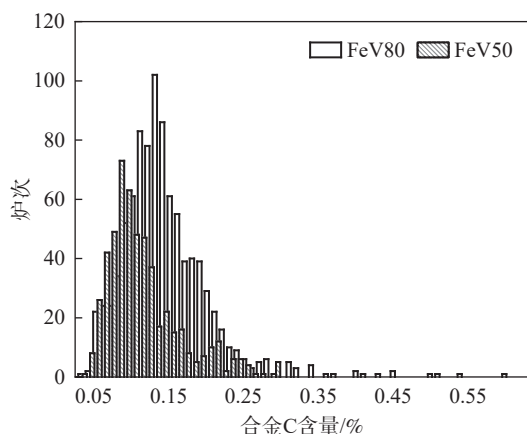


图 5 FeV50 合金和 FeV80 合金 C 含量分布
Fig. 5 Distribution of C content in FeV50 and FeV80

FeV80 合金 C 含量显著高于 FeV50 合金, 对应产品平均 C 质量分数分别为 0.12% 和 0.16%。由于合金中 C 含量呈随机性分布, 各炉次原料平均 C 含量与合金产品 C 含量不存在显著的对应关系, 统计成分范围内 C 在合金中的分配比甚至达到 200% 以上。说明在实际冶炼过程中, 石墨电极异常熔蚀和断裂会导致停留在渣金界面的游离碳持续向合金渗碳, 导致合金碳含量超标。

FeV50 合金牌号及对应化学成分要求如表 2 所示。根据表 2 所述不同牌号 FeV50 合金成分标准以及上述 FeV50 合金典型杂质元素分布规律, 形成了不同牌号钒铁合金产品原料典型夹杂成分对应控制标准如表 3 所示。由表 3 可知, 合金 Si、Mn 和 C 元素超标概率极低, 对应原料杂质成分含量的控制标准较为宽泛, 一般情况下原料杂质含量均未达到对应控制限; P、S 元素具有较高超标风险, 对应原

料杂质含量控制标准较为严苛。通过对合金成分分布规律的统计分析以及原料杂质控制标准的制定,一方面可在保证不同牌号钒铁合金产品质量要求的情况下,有效改善冶炼原料来源途径,扩大原料采购和使用渠道,为低成本原料替代和二次资源综合利用提供数据支撑;一方面可根据客户对钒铁合金杂质成分的特殊要求,通过调整入炉原料杂质含量等方式满足不同客户对于低杂质成分含量的定制化合金产品需求,进一步拓宽钒铁合金在特殊钢领域的应用。

表2 FeV50 合金成分标准(GB/T 4139-2012)

Table 2 Composition standards of FeV50 alloy (GB/T 4139-2012)

牌号	成分要求/%					
	V	C	Si	P	S	Al
FeV50-A	48.0 ~ 55.0	≤0.4	≤2.0	≤0.06	≤0.04	≤1.5
FeV50-B	48.0 ~ 55.0	≤0.6	≤3.0	≤0.10	≤0.06	≤2.5
FeV50-C	48.0 ~ 55.0	≤5.0	≤3.0	≤0.10	≤0.06	≤0.5

表3 不同牌号钒铁合金冶炼原料的典型杂质的控制标准

Table 3 Control standards for typical impurities of raw materials in different grades of ferrovanadium alloy

牌号	原料杂质控制上限/%				
	Si	Mn	C	P	S
FeV50-A	4.0	1.0	0.6	0.13	0.12
FeV50-B	4.0	1.0	0.8	0.18	0.15
分配比	56.9 ~ 93.4	80.6 ~ 96.8		79.3 ~ 98.6	0 ~ 63.5

3 结论

1) 铝热还原钒铁合金制备过程中, Fe、Mn、Si、C、P、S 等弱还原性金属/非金属杂质元素具备被协同还原的热力学可行性, 还原后的 Fe、Mn、Si 元素以单质形式存在, 而 C、P、S 则可能与合金基体元素 V 和 Fe 反应生成 VC、Fe₃P 和 FeS。

2) 铝热反应结束后, 合金中部分非金属杂质逐渐向熔渣扩散, 其扩散能力主要由熔渣特性决定。在以促进钒氧化物强化还原和高效沉降为主导的熔渣体系下, Si、Mn、C、P 和 S 在合金中的平均分配系数分别为 76.9%、89.7%、255.0%、87.6% 和 28.7%, 对应满足 FeV50-A 标准要求的单位原料杂质控制上限分别为 4.0%、1.0%、0.6%、0.13% 和 0.12%。

3) 通过对 FeV50 制备过程 Fe、Mn、Si、C、P、S 等典型杂质元素的热力学行为及其在合金中分配系数的确定, 以及原料典型杂质元素控制标准的制定, 能够有效改善冶炼原料来源途径, 为低成本原料替代和二次资源再综合利用提供数据支撑; 还可根据客户对合金杂质成分的特殊要求, 满足对于低杂质成分含量的定制化合金产品需求, 进一步拓宽钒铁合金在特殊钢领域的应用。

参考文献

- [1] HUANG D X. Vanadium recovery steelmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 16-17.
(黄道鑫. 提钒炼钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 16-17.)
- [2] YANG C F, ZHANG Y Q, WANG R Z. Metallurgical principles and applications of vanadium steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 20-25.
(杨才福, 张永权, 王瑞珍. 钒钢冶金原理与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 20-25.)
- [3] YU B, SUN Z H, ZHOU H, *et al.* Theoretical application and factors influencing casting settlement of FeV50 alloy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(12): 1822-1827.
(余彬, 孙朝晖, 周恒, 等. FeV50 合金浇铸沉降理论的应用及其影响因素[J]. 工程科学学报, 2017, 39(12): 1822-1827.)
- [4] ZHU S Y. Technical research on smelting high ferrovanadium by electroaluminothermal method[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1993, 14(1): 37-39.
(朱胜友. 电铝热法冶炼高钒铁的技术研究[J]. 钢铁钒钛, 1993, 14(1): 37-39.)
- [5] YU B, YUAN T C, SHI J J, *et al.* Preparation of high-quality FeV50 alloy by an improved SHS-EAH multi-stage process[J]. Ceramics International, 2023, 49(10): 15114-15121.
- [6] XIAN Y. Effects of Al content on phase transformation in FeV50 alloy and its mechanism[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(5): 14-18.
(鲜勇. Al 含量对 FeV50 合金相变的影响及机理研究[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(5): 14-18.)
- [7] XIAN Y, ZHENG H X, ZHAI Q J, *et al.* A two-dimensional structure map for prediction of the transition-metal laves phases[J]. Computational Materials Science, 2016, 125: 1-7.
- [8] YE M F, YU B, HUANG Y, *et al.* Trend and control of P in FeV50 smelting process of large-scale tilting furnace[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(4): 36-41.
(叶明峰, 余彬, 黄云, 等. P 元素在倾翻炉 FeV50 冶炼中的走向与控制[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(4): 36-41.)
- [9] TANG Z X, ZHANG S C, HU J L. Aluminum and oxygen equilibrium relation and deep desulfurization in smelting cast steel[J]. Foundry Equipment and Technology, 2014, 6: 44-45.
(唐钟雪, 张生存, 胡进林. 铸钢冶炼过程中的 Al、O 平衡关系及深度脱 S 处理[J]. 铸造设备与工艺, 2014, 6: 44-45.)
- [10] YU B, SUN Z H, PAN C, *et al.* Study on carbon content control for FeV80 alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(5): 37-41.
(余彬, 孙朝晖, 潘成, 等. FeV80 合金碳含量控制研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(5): 37-41.)