炉渣成分及气氛对含钛高炉渣中 Ti(C,N) 生成行为的影响

陈 茅[1,2*], 陈布新[1,2], 马凯辉[1,2]

(1. 攀钢集团研究院有限公司, 四川 成都 610000; 2. 钒钛资源高质化利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 钒钛磁铁矿高炉冶炼过程中, 炉渣内析出的高熔点碳氮化钛(Ti(C,N))是诱发炉渣黏稠、渣铁分离恶化及炉况失常的重要原因。为明确炉渣成分及气氛条件对 Ti(C,N) 生成行为的影响规律, 通过高温管式炉模拟试验, 系统考察了 TiO_2 含量、二元碱度 R、MgO 及 Al_2O_3 含量, 以及 N_2、Ar、CO、H_2 及其混合气对 Ti(C,N) 生成行为的影响规律。结果表明: TiO_2 含量是决定 Ti(C,N) 生成量的主导因素, 当 TiO_2 含量升高至约 24% 及以上时, Ti(C,N) 生成量明显增加, 这与工业高炉“渣稠”现象高度吻合; 提高炉渣碱度(R)和 MgO 含量均促进 Ti(C,N) 的生成, 而增加 Al_2O_3 含量则略有抑制作用。气氛条件对 Ti(C,N) 生成类型和生成量均有显著影响, 其中 N_2 是 TiN 生成的必要条件, H_2 显著促进 TiC 生成, 而高 CO 分压对 TiC 生成具有一定抑制作用。热力学分析表明, N_2 分压是影响 TiN 与 TiC 竞争生成关系的关键因素, H_2 主要通过增强体系还原性促进低价钛氧化物形成。研究结果可为钒钛磁铁矿高炉冶炼过程中 Ti(C,N) 析出风险评估及低碳高炉渣系-气氛协同调控提供参考。

关键词: 钒钛磁铁矿; 含钛高炉渣; 碳氮化钛; 还原气氛; 微观结构; 热力学分析; 低碳高炉

中图分类号: TF53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2026)05−0012−10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.05.002 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**

听语音 聊科研 与作者互动

Effect of slag composition and atmosphere on the formation behavior of Ti(C,N) in titanium-bearing blast furnace slag

CHEN Mao[1,2*], CHEN Buxin[1,2], MA Kaihui[1,2]

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory for High-Value Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: During the blast furnace smelting of vanadium-titanium magnetite, the precipitation of titanium carbonitride (Ti(C,N)) in the slag is a primary cause of slag thickening, deterioration of slag-iron separation, and furnace operation irregularities. To clarify the influence patterns of slag composition and atmospheric conditions on the formation behavior of Ti(C,N), this study systematically investigated the effects of TiO_2 content, binary basicity (R), MgO and Al_2O_3 contents, as well as N_2, Ar, CO, H_2, and their mixed gases on the formation behavior of Ti(C,N) through simulation experiments in a high-temperature tube furnace. The results indicate that the TiO_2 content is the dominant factor determining the amount of Ti(C,N) generated. When the TiO_2 content rises to approximately 24% or higher, the amount of Ti(C,N) formed increases significantly, which aligns well with the “viscous slag” phenomenon observed in industrial blast furnaces. Increasing slag basicity (R) and MgO content both promote the formation of Ti(C,N), while increasing Al_2O_3 content slightly inhibits it. The atmospheric conditions significantly affect both the type and amount of Ti(C,N), formed. Specifically, N_2 is a necessary condition for

收稿日期: 2026−05−06; **修回日期:** 2026−07−14; **接受日期:** 2026−07−27

作者简介: 陈茅, 1987 年出生, 男, 福建莆田人, 通信作者, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 低碳冶金和钒钛磁铁矿高效绿色综合利用研究, E-mail: ptchenmao@163.com。

the formation of TiN; H_2 markedly promotes the formation of TiC; whereas a high CO partial pressure exhibits a certain inhibitory effect on TiC formation. Thermodynamic analysis reveals that the N_2 partial pressure determines the competitive relationship between TiN and TiC, and H_2 primarily promotes the formation of low-valent titanium oxides by enhancing the reducibility of the system. The findings of this study can provide a reference for assessing the risk of Ti(C,N) precipitation and for the coordinated control of slag systems and atmospheres in low-carbon blast furnace processes during the smelting of vanadium-titanium magnetite.

Key words: vanadium-titanium magnetite; titanium-bearing blast furnace slag; titanium carbonitride; reducing atmosphere; microstructure; thermodynamic analysis; low-carbon blast furnace

0　引言

钒钛磁铁矿是我国重要的战略性共伴生铁矿资源, 兼具显著的经济价值与资源保障意义[1-3]。在高炉冶炼过程中, 含钛炉渣在渣-铁、渣-焦界面处易发生复杂还原反应, 生成高熔点(2 950 ~ 3 160 ℃)的碳氮化钛(Ti(C,N))[4-7]。Ti(C,N) 熔点高、硬度大, 易以颗粒或团聚体形式析出于炉渣中, 导致炉渣黏度升高、流动性变差[8-10], 进而引发高炉透气性恶化、渣铁分离困难甚至炉缸堆积等问题, 严重制约钒钛磁铁矿的高效利用[11-13]。因此, 实现 Ti(C,N) 生成的有效调控, 是保障钒钛磁铁矿高炉稳定顺行的关键。

Ti(C,N) 的生成受炉渣成分、温度、反应时间和气氛条件等多种因素影响[13-14]。Qiu 等人[15] 基于 FactSage 热力学计算指出, 各因素的重要性依次为: 温度>渣中 TiO_2 含量>炉渣碱度>MgO 和 Al_2O_3 含量。李慈颖等人[16] 以工业含 TiO_2 高炉渣和炭黑为原料, 在 N_2 气氛下研究了时间和温度对 Ti(C,N) 形成的影响, 指出 Ti(C,N) 的生成量随时间和温度升高而增加。近年来, Jing 等人[17] 建立了 CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-TiO_2-V_2O_3-FeO 渣系热力学模型, 指出提高碱度和 MgO 含量可降低 TiO_2 活度系数, 并抑制钛氧化物还原。

高炉煤气成分也会影响 Ti(C,N) 的生成。富氢喷吹时, H_2 因分子半径小、扩散快, 可加速气固反应, 进而影响 TiO_2 还原及后续碳氮化进程。研究表明, H_2 能显著改善 TiO_2 还原动力条件, 而 CO 则起抑制作用[18-20]。这种动力学差异可能改变 Ti(C,N) 的形成路径与程度。Lü等人[21] 在研究 TiO_2-C-H_2 体系中 TiC_xO_y 的制备时指出, 与 TiO_2-C 体系相比, TiO_2-C-H_2 体系可在更低温度下实现 TiC_xO_y 的合成, 并有助于缩短反应时间、降低碳耗与碳排放。Rezan 等人[22-23] 也指出, 各类钛氧化物在 H_2-N_2 气氛中的碳热还原速率均高于纯 N_2 气氛。富氧喷吹会降低煤气中 N_2 含量, 改变 Ti(C,N) 中 TiN/TiC 比例, 进而影响其物性。从晶体结构看, N 原子半径略小于 C, Ti-N 键更短、键能更高, 因此提高 N 含量可使 Ti(C,N) 晶体的形成自由能更负, 硬度与热稳定性更强[24]。焦克新等人[25] 也发现, 随着 TiN 含量的增加, Ti(C,N) 生成的吉布斯自由能降低, 生成更容易。

综上可见, 已有研究从热力学计算、试验模拟和工业现象等方面揭示了炉渣成分(TiO_2 含量、炉渣碱度、MgO、Al_2O_3)、温度及反应气氛对 Ti(C,N) 生成的影响, 为认识含钛高炉渣中 Ti(C,N) 析出行为提供了重要基础。然而, 现有研究仍存在一定不足: 一方面, 关于炉渣成分的研究多集中于单一因素影响, 对 TiO_2、碱度、MgO 和 Al_2O_3 等多组分变化下 Ti(C,N) 生成量的定量关系认识仍不充分; 另一方面, 关于气氛作用的研究多侧重于单一还原气体或特定反应体系, 对 N_2、CO、H_2 及其混合气氛下 TiC 与 TiN 竞争生成关系的认识仍有待深化。尤其在“双碳”目标背景下, 富氧鼓风[26-27] 和富氢气体喷吹[28-36] 等低碳高炉炼铁工艺将显著改变高炉内部气氛组成, 如 N_2 分压降低、H_2 含量增加以及 CO 分压变化等, 进而影响含钛炉渣中钛氧化物的还原、碳化和氮化过程。因此, 有必要系统研究炉渣成分和气氛对 Ti(C,N) 生成行为的影响规律。

基于此, 笔者采用高温管式炉模拟试验, 系统考察炉渣成分参数(二元碱度 R、TiO_2 含量、MgO 含量、Al_2O_3 含量)及典型气氛条件(N_2、Ar、CO、H_2 及其混合气)对 Ti(C,N) 生成行为的影响规律, 并结合热力学分析揭示其调控机理, 以期为钒钛磁铁矿高炉冶炼过程中 Ti(C,N) 析出控制及低碳冶炼条件下的渣系优化提供理论依据。

1　试验方法

试验设备为立式管式炉, 如图 1 所示, 反应腔体采用内径为 50 mm 的刚玉管, 具有优异的致密性与气密性, 可通入不同还原性气体并维持稳定气氛。炉温由 1800 型 $MoSi_2$ 加热元件提供, 并通过炉壁 B 型热电偶进行精确测量与调控。样品上方另设一支 B 型热电偶, 用于实时监测样品实际温度。所有热电偶均定期经中国计量科学研究院校准, 温度精

度为±2 ℃。试验表明，在 1 500 ℃ 下，炉内恒温区长度约为 8 cm，确保石墨坩埚完全处于恒温区内。炉管下端设有活动密封盖，其正下方为水淬容器。试验使用纯度≥99.5%、直径为 1 mm 的钼丝悬挂石墨坩埚（Ø30 mm×30 mm），反应结束后开启设备底部密封盖，将样品坠入水淬容器中实现快速冷却（坠落时间<0.6 s），从而停止继续反应并保留高温下的物相组成。

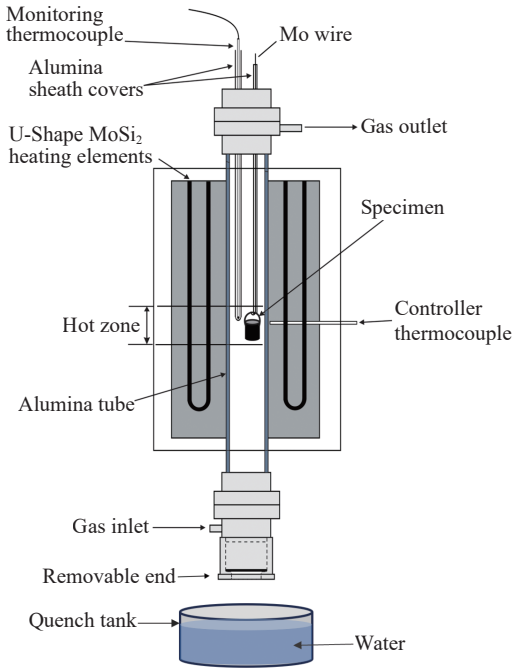


图 1 立式管式炉结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of the vertical tube furnace

根据攀钢高炉终渣主要成分，试验采用高纯化学试剂配制合成高炉渣，主要原料（固体原料的成分后文均指质量分数）包括 SiO_2（99.99%）、$CaCO_3$（99.5%）、MgO（99.9%）、Al_2O_3（99.99%）、TiO_2（99.9%）及石墨 C（99.95%）。为确保 TiO_2 被充分还原，石墨用量设定为理论需求量的 1.2 倍。分别以炉渣成分及反应气体组分（后文均指体积分数）为变量制定了试验方案，如表 1 所示（其中，R 为化学碱度，表示为 m_{CaO}/m_{SiO_2}）。其中，通过在 TiCN1~TiCN17 固定气氛下的试验，考察炉渣起始成分的影响；试验 TiCN18~TiCN22 固定炉渣起始成分，考察气氛的影响。按试验方案精确称量各原料并混匀后，取 10 g 混合样置于石墨坩埚中。为避免升温过程中的预反应，样品首先置于炉顶低温区（≤80 ℃）。管式炉按预定程序升温至目标温度，并以 3 L/min 的流速通入高纯 N_2（99.999%）吹扫炉膛，出气口连接压力计，维持炉内微正压，防止空气倒灌。待炉温达到设定值后，根据试验方案切换为设定反应气氛，并继续通气稳定一定时间，以充分置换炉内原有气氛，随后将坩埚迅速降入恒温区并开始计时。

表 1 不同条件下 Ti(C,N) 生成试验方案

Table 1 Experimental schemes for Ti(C,N) formation under different conditions

No.	R	Initial composition/%					Temperature/℃	Atmosphere
		CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	TiO_2		
TiCN1	1.1	38.3	34.7	8.0	14.0	5.0	1 500	N_2
TiCN2	1.1	35.6	32.4	8.0	14.0	10.0	1 500	N_2
TiCN3	1.1	30.4	27.6	8.0	14.0	20.0	1 500	N_2
TiCN4	1.1	29.3	26.7	8.0	14.0	22.0	1 500	N_2
TiCN5	1.1	28.3	25.7	8.0	14.0	24.0	1 500	N_2
TiCN6	1.1	27.2	24.8	8.0	14.0	26.0	1 500	N_2
TiCN7	1.1	26.2	23.8	8.0	14.0	28.0	1 500	N_2
TiCN8	1.1	25.1	22.9	8.0	14.0	30.0	1 500	N_2
TiCN9	1.1	19.9	18.1	8.0	14.0	40.0	1 500	N_2
TiCN10	1.1	14.7	13.3	8.0	14.0	50.0	1 500	N_2
TiCN11	0.9	26.5	29.5	8.0	14.0	22.0	1 500	N_2
TiCN12	1.0	28.0	28.0	8.0	14.0	22.0	1 500	N_2
TiCN13	1.2	30.5	25.5	8.0	14.0	22.0	1 500	N_2
TiCN14	1.1	30.4	27.6	6.0	14.0	22.0	1 500	N_2
TiCN15	1.1	28.3	25.7	10.0	14.0	22.0	1 500	N_2
TiCN16	1.1	30.4	27.6	8.0	12.0	22.0	1 500	N_2
TiCN17	1.1	28.3	25.7	8.0	16.0	22.0	1 500	N_2
TiCN18	1.1	29.3	26.7	8.0	14.0	22.0	1 500	Ar
TiCN19	1.1	29.3	26.7	8.0	14.0	22.0	1 500	CO
TiCN20	1.1	29.3	26.7	8.0	14.0	22.0	1 500	H_2
TiCN21	1.1	29.3	26.7	8.0	14.0	22.0	1 500	CO-$N_2$①
TiCN22	1.1	29.3	26.7	8.0	14.0	22.0	1 500	CO-$N_2$②

Note:①:30%CO-70%N_2;②:65%CO-35%N_2

需要特别说明的是，从热力学角度分析，在无限反应时间和充足碳源条件下，当温度高于 1 284 ℃（TiC 生成）或 1 199 ℃（TiN 生成）且存在 N_2 时，TiO_2 将按（1）（2）反应式完全转化为 TiC 和 TiN。因此，控制试验条件，在固定反应时间 60 min 内进行。

$$TiO_2(s)+3C(s)=TiC(s)+2CO(g)\ \Delta G_1 = 524\,130-336.55T(J/mol) \quad (1)$$

$$TiO_2(s)+2C(s)+0.5N_2(g)=TiN(s)+2CO(g)\ \Delta G_2 = 379\,189-257.54T(J/mol) \quad (2)$$

反应结束后，将样品研磨并送至四川攀研技术有限公司进行化学成分分析，重点测定 TiC 与 TiN 的含量。Ti(C,N) 总含量定义为 TiC 与 TiN 含量之和。由于样品中可能存在 Ti^{2+}、Ti^{3+}和 Ti^{4+}等多种价态，所有钛氧化物含量均统一折算为 TiO_2，以便于讨论。此外，部分淬火块样经镶样、抛光后，使用扫描电子显微镜 SEM-EDS（日本电子 JSM-7001F 型）获取微观结构和相成分。

2 结果与讨论

2.1 炉渣成分的影响

不同成分炉渣反应后的化学成分及二元碱度 R 结果如表 2 所示。由表 2 可见，各组试样反应后 TiO_2 含量均低于初始值，说明试验过程中 TiO_2 发

生了不同程度的还原, 并进一步参与 Ti(C,N) 生成。基于 TiCN1 ~ TiCN17 的试验结果, 可得到起始炉渣中 TiO_2 含量、二元碱度、MgO 和 Al_2O_3 含量对 TiC、TiN 及 Ti(C,N) 生成的影响规律, 如图 2(a) ~ (d) 所示。

表 2　含钛高炉渣反应后样品化学成分分析结果

Table 2　Chemical compositions of reacted titanium-bearing blast furnace slag samples

No.	R	Chemical composition/%							
		CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	TiO_2	TiN	TiC	Ti(C,N)
TiCN1	1.08	38.12	35.22	7.95	13.68	4.17	0.51	0.35	0.86
TiCN2	1.10	36.24	32.83	8.05	13.98	6.13	1.46	1.31	2.77
TiCN3	1.12	30.85	27.55	8.49	14.06	15.51	2.16	1.39	3.55
TiCN4	1.12	29.75	26.51	8.24	14.25	17.27	2.30	1.68	3.98
TiCN5	1.12	28.99	25.88	8.33	14.21	17.95	2.78	1.85	4.63
TiCN6	1.11	27.32	24.65	8.32	14.35	18.61	3.71	3.04	6.75
TiCN7	1.09	26.50	24.32	7.84	14.19	19.02	4.76	3.37	8.13
TiCN8	1.09	26.16	23.98	8.23	14.25	18.19	5.68	3.51	9.19
TiCN9	1.12	21.58	19.33	8.54	14.37	23.04	9.42	3.72	13.14
TiCN10	1.09	15.74	14.39	8.79	14.07	31.07	11.86	4.08	15.94
TiCN11	0.95	27.37	28.95	8.24	14.32	17.92	2.0	1.19	3.19
TiCN12	1.04	28.76	27.78	8.41	14.26	17.31	2.14	1.33	3.47
TiCN13	1.23	31.35	25.51	8.28	14.20	15.90	2.57	2.19	4.76
TiCN14	1.12	31.10	27.67	6.40	14.32	17.65	1.84	1.01	2.86
TiCN15	1.11	28.56	25.81	10.23	14.12	16.72	2.58	1.98	4.56
TiCN16	1.09	30.32	27.82	8.41	12.35	16.89	2.40	1.80	4.20
TiCN17	1.09	28.02	25.80	8.25	15.99	18.18	2.18	1.58	3.77

2.1.1　TiO_2 含量的影响

图 2(a) 表明, 起始炉渣中 TiO_2 含量对 Ti(C,N) 生成具有显著影响。随着 TiO_2 含量从 5% 提高至 50%, Ti(C,N) 总生成量整体呈明显上升趋势, 其中 TiN 增幅远大于 TiC。当 TiO_2 含量较低时, Ti(C,N) 生成量整体较小; 随着 TiO_2 含量增加, Ti(C,N) 生成量逐步升高; 当 TiO_2 含量提高至 24% 及以上时, Ti(C,N) 生成量明显加快, 其中 TiN 增长尤为显著, 表明该区间为 Ti(C,N) 快速析出的敏感范围。

结合表 2 数据可见, 当 TiO_2 含量由 24% 进一步提高时, TiN 成为推动 Ti(C,N) 总量增加的主要贡献相, 而 TiC 虽同步增加, 但增幅相对较缓。这说明, 在高 TiO_2 渣条件下, Ti(C,N) 析出风险的增加不仅与渣中 TiO_2 供给量增大有关, 也与 TiN 生成更容易发生密切相关。该结果与工业上高钛渣条件下炉渣黏度升高、流动性恶化的现象相吻合[37], 表明 TiN 大量析出是高 TiO_2 条件下 Ti(C,N) 总量显著增加的重要原因。

上述结果说明, TiO_2 含量对 Ti(C,N) 生成的影响在 24% 附近表现出明显的阈值行为。其原因在于, 当 TiO_2 含量较低时, 渣中可参与深度还原和碳氮化反应的含钛组分有限, Ti(C,N) 生成主要受 Ti 源供给限制, 因此生成量较低且增长缓慢。随着 TiO_2 含量升高, 炉渣中含钛结构单元和可还原钛氧化物含量增加, TiO_2 向低价钛氧化物转化的趋势增强, 为后续 TiC 和 TiN 的形核长大提供了更充足的物质基础。当 TiO_2 含量接近或超过 24% 后, 体系中钛氧化物的局部浓度进一步升高, 在石墨碳和 N_2 气氛共同作用下, Ti(C,N) 析出进入快速增长阶段, 其中 TiN 含量的快速升高是推动 Ti(C,N) 总量非线性增加的主要原因。因此, 约 24% 可认为是研究成分范围和试验条件下 Ti(C,N) 快速析出的敏感区间。在钒钛磁铁矿高炉冶炼过程中, 当终渣 TiO_2 含量接近或超过 24% 时, 应重点关注 Ti(C,N) 快速析出带来的操作风险, 并通过渣系优化或气氛调控抑制其过量生成。

2.1.2　二元碱度的影响

图 2(b) 表明, 随着二元碱度 R 由 0.9 提高至 1.2, Ti(C,N) 总生成量由 3.19% 增加至 4.76%, 其中 TiC 增幅大于 TiN, 说明提高碱度对 TiC 生成的促进作用更为明显。其原因在于, 随着 $m(CaO)/m(SiO_2)$ 比值的提高, 作为网络修饰子的碱性氧化物 CaO 含量相对增加, 而作为网络形成子的酸性氧化物 SiO_2 含量相对减少, 这使得炉渣结构的聚合程度降低、结构趋于简化, 黏度相应下降[38], 反应物扩散和界面传质条件得到改善, 从而有利于 TiO_2 还原以及后续碳化、氮化反应的进行。

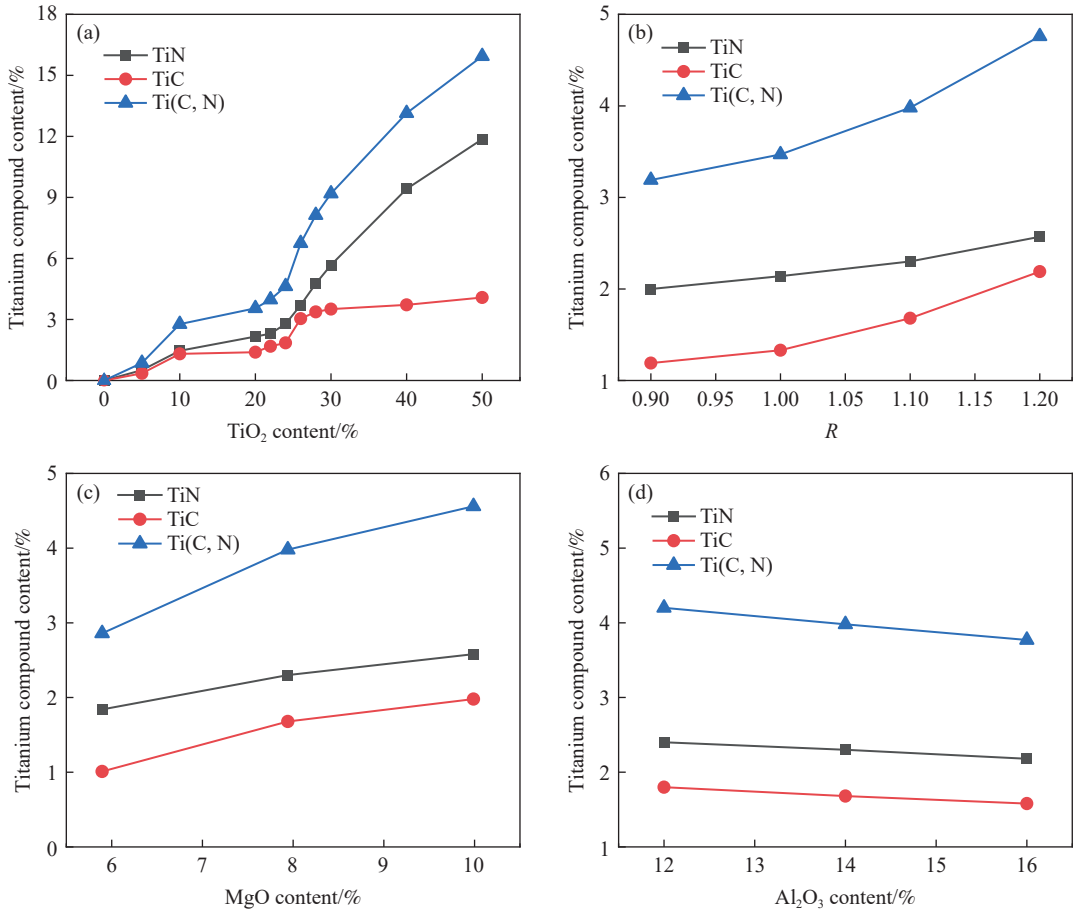
从工程角度看, 提高碱度虽有利于改善部分炉渣性能, 但在含钛高炉渣体系下也可能同步促进 Ti(C,N) 析出。因此, 在钒钛磁铁矿高炉冶炼中, 碱度调控不宜仅从流动性出发, 而应综合考虑其对 Ti(C,N) 生成行为的影响。

2.1.3　MgO 含量的影响

图 2(c) 可以看出, 当 MgO 含量由 6.0% 提高至 10.0% 时, Ti(C,N) 总生成量由 2.86% 增至 4.56%, TiN 和 TiC 含量均呈上升趋势, 说明在该试验条件下, 提高 MgO 含量有利于 Ti(C,N) 生成。

需要指出的是, MgO 对 Ti(C,N) 生成的影响具有明显的条件依赖性。已有研究表明, MgO 可通过改变含钛渣中 TiO_2 的存在状态, 降低 TiO_2 活度或活度系数, 从热力学上抑制钛氧化物深度还原及 Ti(C,N) 生成[17,39]。因此, 从平衡热力学角度看, MgO 对 Ti(C,N) 生成可能具有一定抑制作用。然而, Ti(C,N) 生成不仅受 TiO_2 活度控制, 还受熔渣流动性、反应物扩散和渣-碳界面接触条件影响。MgO 含量升高可改善炉渣流动性、降低扩散阻力[40], 使 TiO_2 或低价钛氧化物与固体碳之间的接触和传质更加充分, 从而促进 TiC 和 TiN 生成。笔者所在团队的前期研究也表明, 在反应时间固定的情况下, 高黏度会降低 Ti(C,N) 的生成速度, 从而减少渣中 Ti(C,N) 的含量, 而低黏度的渣更有利于 Ti(C,N) 的

形成[13]。因此，上述 MgO 促进 Ti(C,N) 生成的结果说明，在强还原、充足碳源和固定反应时间条件下，MgO 改善炉渣流动性和促进界面传质的动力学作用占主导。



(a)TiO_2 含量；(b)二元碱度；(c)MgO 含量；(d)Al_2O_3 含量

图 2 起始渣成分对 Ti(C,N) 生成规律的影响

Fig. 2 Effects of initial slag composition on Ti(C,N) formation

2.1.4 Al_2O_3 含量的影响

图 2(d) 显示了当 Al_2O_3 含量由 12.0% 提高至 16.0% 时，Ti(C,N) 总生成量由 4.20% 降至 3.77%，表明提高 Al_2O_3 含量对 Ti(C,N) 生成具有一定抑制作用。在本研究碱度条件下，Al_2O_3 增加会增强炉渣网络结构，提高炉渣黏度[41]，从而抑制反应物扩散和气体传输，不利于 TiO_2 还原及后续 Ti(C,N) 析出。

不过，Al_2O_3 对炉渣性能的影响并非孤立存在，其作用还与碱度、MgO 含量以及温度条件密切相关。因此，在工业应用中，Al_2O_3 调控仍需与其他组分协同优化。

2.1.5 炉渣成分与 Ti(C,N) 生成量的经验关联

为初步表征试验条件下炉渣成分变化与 Ti(C,N) 生成量之间的关联，在上述单因素试验结果的基础上，选取二元碱度，TiO_2、Al_2O_3、MgO 含量作为自变量，以反应后样品中 Ti(C,N) 总量为因变量，建立了炉渣成分-Ti(C,N) 生成量的经验数学模型。需要说明的是，该模型仅用于归纳所考察的试验条件及成分范围内各因素对 Ti(C,N) 生成量的相对影响和变化趋势，普遍适用性尚未验证。

考虑到前述结果表明 TiO_2 对 Ti(C,N) 的影响具有显著的非线性特征(尤其在 24% 附近存在明显的阈值行为)，而二元碱度、MgO 与 Al_2O_3 的取值区间相对较窄，其作用更接近一阶修正效应，因此采用“TiO_2 非线性项+其余组分线性项”的多元回归形式，以在有限样本数量下兼顾拟合精度与模型稳定性。

为降低不同变量量纲差异及潜在共线性对回归系数的影响，对自变量进行中心化处理，碱度 R 定义如下：$R=R'-1.1$、$w_{TiO_2}=w'_{TiO_2}-22\%$、$w_{MgO}=w'_{MgO}-8\%$、$w_{Al_2O_3}=w'_{Al_2O_3}-14\%$。随后采用最小二乘法对 Ti(C,N) 与各自变量之间的关系进行回归分析，其中，w'_{TiO_2}、

w'_{MgO}、$w'_{Al_2O_3}$和 R'为所计算的炉渣TiO_2、MgO 和Al_2O_3的质量分数和二元碱度。得到 Ti 含量w_{Ti}(生成 Ti(C,N)的质量分数)的经验关联式如式(3)所示。

$$w_{Ti} = 4.275 + 0.457\,6w_{TiO_2} + 0.010\,62w_{TiO_2}^{\ 2} - 0.000\,431w_{TiO_2}^{\ 3} + 5.767R + 0.425w_{MgO} - 0.107\,5w_{Al_2O_3} \quad (3)$$

拟合决定系数(R^2): 0.984, 均方根误差(RMSE): 0.681。

该公式适用于R'为 0.9 ~ 1.2, w'_{TiO_2}为 5% ~ 50%、w'_{MgO}为 6% ~ 10%、$w'_{Al_2O_3}$为 12% ~ 16% 的试验成分, 用于描述炉渣成分变化对 Ti(C,N) 析出量的定量影响。由模型系数可见, TiO_2 对 Ti(C,N) 生成量的影响确实呈现出明显的非线性特征。R 和 Al_2O_3 含量对 Ti(C,N) 生成量有显著影响, 其中 R 表现为负向影响, Al_2O_3 含量表现为正向影响。

图 3 为经验模型计算值与试验实测值的对比。多数数据点位于对角线附近, 说明模型对 Ti(C,N) 生成量的整体变化趋势具有较好的描述能力。结合图 2 可知, 当炉渣中 TiO_2 含量超过 24% 后, Ti(C,N) 生成量明显加快。图 3 中高 Ti(C,N) 含量区的数据点与对角线吻合较好, 表明该模型能够较好反映高 TiO_2 条件下 Ti(C,N) 快速增加的特征。

但在低 TiO_2 含量区, Ti(C,N) 生成量较低, 部分计算值与实测值存在一定偏差。这说明该模型更适合用于判断 Ti(C,N) 的总体变化趋势和高 TiO_2 渣系的析出风险, 而不宜作为低 TiO_2 区间的精确预测模型。

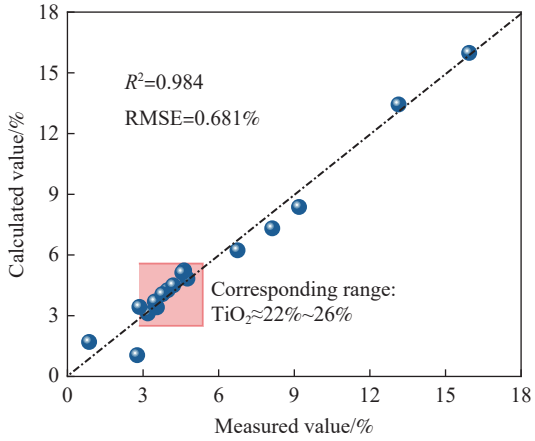


图 3　Ti(C,N) 计算值与实测值的对比关系

Fig. 3　Comparison between calculated and experimental Ti(C,N) contents

2.2　气氛的影响

在基准条件(1 500 ℃、R=1.1、w_{TiO_2}=22%)下, 不同气氛条件反应后的化学分析结果见表 3, 相应变化规律如图 4 所示。由表 3 和图 4 可见, 气氛不仅影响 Ti(C,N) 总生成量, 也显著影响稳定产物类型。

表 3　不同气氛条件下反应后样品化学成分分析结果

Table 3　Chemical compositions of reacted samples under different atmospheric conditions

No.	Atmosphere/%	R	Chemical composition/%							
			CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	TiO_2	TiN	TiC	Ti(C,N)
TiCN18	Ar	1.12	29.52	26.42	8.24	14.08	20.26	0	1.48	1.48
TiCN19	CO	1.09	29.52	27.16	8.56	14.29	19.06	0	1.42	1.42
TiCN20	H_2	1.13	30.87	27.36	8.26	14.87	15.44	0	3.20	3.20
TiCN21	CO-$N_2$①	1.14	29.88	26.31	8.31	14.25	18.41	1.07	1.78	2.85
TiCN22	CO-$N_2$②	1.11	29.69	26.64	8.37	14.26	18.57	0.88	1.58	2.46

Note:①:30%CO-70%N_2;②:65%CO-35%N_2

在 100%Ar 和 100%CO 气氛下, 产物中均未检测到 TiN, 仅生成少量 TiC, 说明在无 N_2 条件下 TiN 无法生成。进一步比较可见, CO 气氛下 TiC 含量略低于 Ar 气氛, 表明高 CO 分压并未促进 TiC 生成, 反而由于反应平衡作用对 TiC 生成产生一定抑制。这说明, CO 在该体系中的作用并不单纯表现为“还原性增强”, 其高分压还会影响反应(1)平衡, 从而抑制碳对 TiO_2 的深度还原。

与此不同, 在 100%H_2 气氛下, TiC 含量明显升高至 3.20%, 说明 H_2 能够显著促进 TiC 生成。其主要原因在于, H_2 具有较强还原能力, 可加快 TiO_2 向低价钛氧化物转化, 为后续碳化反应提供更有利条件。该结果表明, 在无 N_2 条件下, 气氛对 Ti(C,N) 生成的影响主要体现在对 TiC 生成程度的调控上, 而 H_2 在研究条件下表现出最强促进作用。

在含 N_2 气氛下, 产物中均检测到 TiN, 表明 N_2 是 TiN 生成的必要条件。在 100%N_2 条件下, 样品中同时生成 TiC 和 TiN, 且 TiN 含量高于 TiC, 说明在该条件下氮化反应占据主导。为模拟高炉内富氧冶炼条件, 进一步考察了 CO-N_2 混合气氛的影响。结果表明, 在 30%CO-70%N_2 气氛下, Ti(C,N) 总生成量为 2.85%; 当 CO 比例提高至 65% 时, Ti(C,N) 总生成量进一步降至 2.46%。这说明, 在含 N_2 体系中提高 CO 比例, 同样会抑制 TiN 和 TiC 的生成。综上可知, N_2 主要决定 TiN 能否生成, 而 H_2 和 CO 则主要通过改变体系还原性和平衡条件影响 TiC 及 Ti(C,N) 总量。

图 5 给出了不同气氛条件下反应后样品的微观

结构。为确认图中的物相类型，对图中典型区域进行了 EDS 点分析，结果见表 4。其中，图 5(a) 中白色析出相主要富集 Ti、C 和 N，而 Ca、Si、Al、Mg、O 等基体渣相元素含量较低，说明该区域主要为 Ti(C,N) 相；其周围灰色连续相主要富集 Ca、Si、Al、Mg 和 O，可判定为硅酸盐基体渣相。图 5(b) 和图 5(c) 中白色析出相均主要表现为 Ti 和 C 富集，N 元素不明显，结合表 3 中 100%CO 和 100%H_2 气氛下 TiN 含量均为 0 的化学分析结果，可判定其主要为 TiC 相。上述 EDS 点分析结果与化学成分分析结果一致，进一步证明了不同气氛条件下 Ti(C,N) 或 TiC 的析出行为。

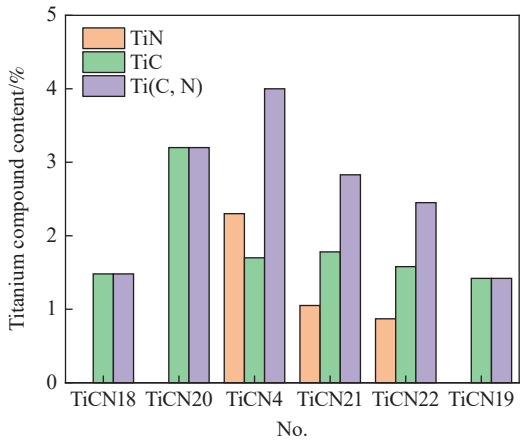
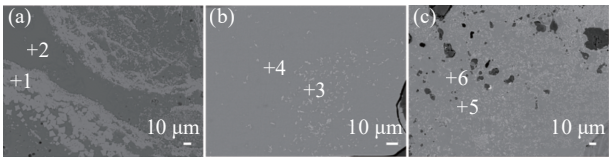


图 4 不同气氛条件对 Ti(C,N) 生成规律的影响

Fig. 4 Effects of atmospheric conditions on Ti(C,N) formation



(a)30%CO-70%N_2; (b)100%CO; (c)100%H_2

图 5 不同气氛下碳氮化钛样品微观结构

Fig. 5 Microstructures of samples after the Ti(C,N) formation experiments under different atmospheres

表 4 图 5 中典型区域 EDS 点分析结果(原子百分比)

Table 4 EDS point analysis results of typical regions in Fig. 5 (Atom percent) %

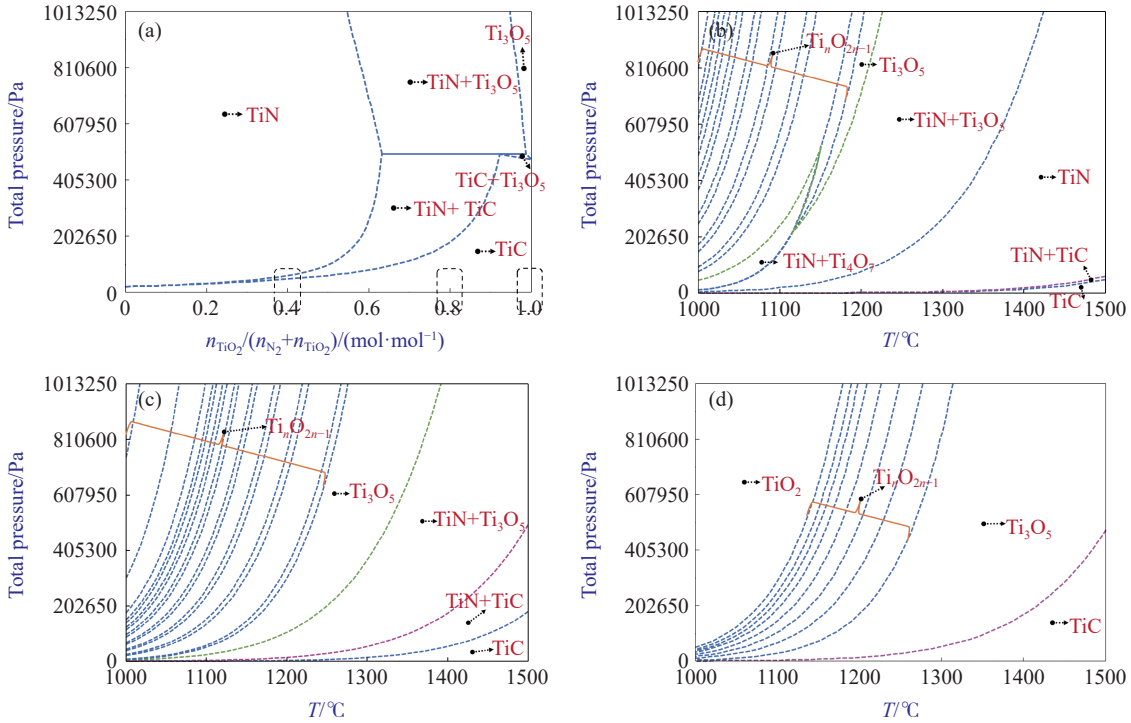
Point	Ti	C	N	Ca	Si	Mg	Al	O
1	48.19	29.96	19.96	0.42	0.37	0.12	0.13	0.84
2	5.66	0.12	0.22	13.14	10.80	5.12	3.44	61.51
3	48.99	49.06	0.31	0.46	0.34	0.11	0.16	0.57
4	5.74	0.31	0.47	12.71	10.91	5.16	3.38	61.32
5	48.67	49.20	0.58	0.43	0.35	0.13	0.19	0.46
6	4.72	0.28	0.83	13.47	11.15	5.05	3.56	60.94

由图 5(a) 可见，在 30%CO-70%N_2 气氛下，样品中 Ti(C,N) 颗粒数量较多，并出现明显团聚，表明该条件下 Ti(C,N) 生成量较高且易发生聚集长大。由图 5(b) 可见，在 100%CO 气氛下，颗粒数量明显减少，分布较为分散，说明高 CO 分压条件下 Ti(C,N) 生成受到抑制。由图 5(c) 可见，在 100%H_2 气氛下，颗粒数量较 100%CO 条件明显增加，但整体仍以分散析出为主，表明 H_2 显著促进了 TiC 生成。图 5 所示微观形貌变化与表 3 和图 4 反映的规律一致，从微观尺度进一步印证了气氛调控对 Ti(C,N) 生成行为的显著影响。

为从热力学角度解释不同气氛条件下的试验现象，采用 FactSage 软件对相关体系进行了平衡计算。图 6 表明，N_2 含量、总压和温度共同影响体系平衡相区，其中 N_2 分压对稳定产物类型起决定作用。图 6(a) 显示，在 1 500 ℃ 条件下，随着 $n_{TiO_2}/(n_{TiO_2}+n_{N_2})$ 比值降低，即体系中 N_2 比例提高，稳定相由 TiC 逐步向 Ti(C,N) 和 TiN 转变，说明提高 N_2 分压有利于氮化反应进行。图 6(b) 表明，在较高 N_2 含量条件下，随温度升高，体系主要进入 TiN 稳定区。图 6(c) 表明，当 N_2 含量降低后，TiN 稳定区缩小，而 TiC 及 Ti(C,N) 共存区扩大。图 6(d) 进一步表明，在更低 N_2 分压条件下，TiN 稳定范围继续减小，TiC 逐渐成为优势稳定相。总体来看，N_2 分压不仅决定 TiN 能否稳定生成，而且决定 TiN 与 TiC 之间的竞争关系。

在明确 N_2 对相选择具有主导作用的基础上，进一步考察 H_2 的影响。图 7(a)表明，随着 $n_{H_2}/(n_{H_2}+n_{N_2})$ 比值增加，体系还原性增强，TiC 稳定区扩大，而 TiN 稳定区缩小，说明 H_2 有利于体系沿还原-碳化路径转化。当 H_2 含量较高时，碳化反应更具优势，TiC 更容易成为稳定产物。进一步将 H_2 与 N_2 作用分离后可见，图 7(b)表明 H_2 本身主要通过增强体系还原能力，促进 TiO_2 向低价钛氧化物转化并降低其还原起始温度，从而为后续碳化或氮化反应创造条件。然而，TiN 还是 TiC 的最终生成，仍取决于体系中是否存在足够的氮源或碳化条件。也就是说，气氛一方面通过改变还原程度影响钛氧化物转化深度，另一方面通过是否提供 N_2 等反应物决定最终钛化物类型，从而共同控制 Ti(C,N) 生成行为。

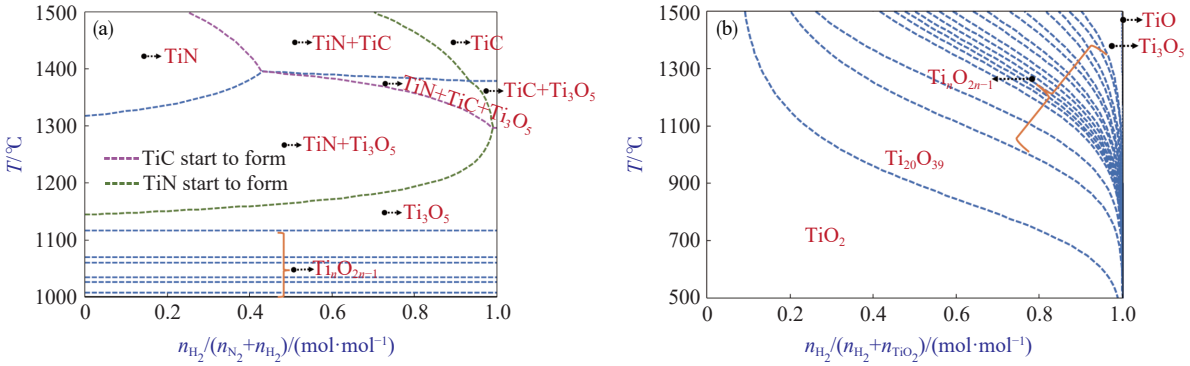
需要指出的是，FactSage 计算结果反映的是平衡条件下各相的稳定区间，而试验结果是在恒温 60 min 条件下获得，实际过程还受到反应时间、传质及界面反应等因素影响。因此，热力学计算主要用于解释不同条件下稳定产物类型及变化趋势，而不直接对应试验中的绝对生成量。



(a)温度为 1500 ℃ 时总压、$n_{TiO_2}/(n_{TiO_2}+n_{N_2})$ 比值变化; (b)$n_{TiO_2}/(n_{TiO_2}+n_{N_2})$ 比值为 0.4 时总压、温度变化; (c)$n_{TiO_2}/(n_{TiO_2}+n_{N_2})$ 比值为 0.8 时总压、温度变化; (d)$n_{TiO_2}/(n_{TiO_2}+n_{N_2})$ 比值为 1.0 时总压、温度变化

图 6　不同总压、N_2 含量、温度下 N_2+TiO_2+C 三元体系平衡相图

Fig. 6　Equilibrium phase diagrams of the N_2-TiO_2-C ternary system under different total pressures, N_2 contents, and temperatures



(a)H_2-N_2-TiO_2-C 四元体系; (b)H_2+TiO_2 体系

图 7　不同 H_2 分压及温度下, 不同体系下的平衡相图(101 325 Pa)

Fig. 7　Equilibrium phase diagrams for different systems at different H_2 partial pressures and temperatures (101 325 Pa)

综上所述, TiO_2 含量、渣系组成和气氛条件均会显著影响 Ti(C,N) 析出行为。对于钒钛磁铁矿高炉冶炼而言, 当终渣 TiO_2 含量接近或超过 24% 时, 应重点警惕 Ti(C,N) 快速析出导致的炉渣黏度升高和流动性恶化。尤其是在局部高温、强还原或局部 TiO_2 富集条件下, Ti(C,N) 析出风险可能进一步增加。

在渣系控制方面, 高 TiO_2 条件下不宜单纯通过提高碱度或 MgO 含量改善炉渣性能, 否则可能进一步促进 Ti(C,N) 生成; 应结合 Al_2O_3 含量、炉渣流动性及高炉操作要求综合优化造渣制度。在气氛控制方面, 研究结果表明, 富氢条件虽然有利于强化铁氧化物还原, 但也会促进 TiO_2 向低价钛氧化物转化, 为后续碳化反应创造有利条件, 从而增加 TiC 生成的潜在风险。高熔点 TiC 颗粒的析出和聚集可能引起炉渣黏度升高、流动性下降及渣铁分离恶化。因此, 未来钒钛磁铁矿高炉采用富氢喷吹时, 不应仅关注铁氧化物还原效率和碳减排效果, 还需综合考虑富氢气氛与炉渣 TiO_2 含量、炉缸热状态、渣-焦接触条件及 N_2 分压之间的协同作用, 合理调控富氢

程度、炉渣成分和热制度，以降低 TiC 过量生成的潜在操作风险。需要指出的是，上述认识基于实验室模拟条件，实际高炉中的影响程度仍需结合工业试验进一步验证。

3 结论

基于高温反应-快速淬火-成分分析技术，系统研究了不同炉渣成分和气氛条件下 TiC、TiN 及 Ti(C,N) 的生成行为。主要结论如下：

1）TiO_2 含量是影响 Ti(C,N) 生成的主导因素。在研究条件下，当炉渣中 TiO_2 含量升高至 24% 及以上时，Ti(C,N) 生成量明显增加，其中 TiN 增幅更为显著，表明该区间为 Ti(C,N) 快速析出的敏感范围。

2）炉渣成分对 Ti(C,N) 生成具有显著影响。在研究成分范围内，提高二元碱度 R 和 MgO 含量均会促进 Ti(C,N) 生成，而提高 Al_2O_3 含量则表现出一定抑制作用。

3）气氛条件不仅影响 Ti(C,N) 生成量，也影响稳定产物类型。N_2 是 TiN 生成的必要条件；H_2 通过增强体系还原性显著促进 TiC 生成；高 CO 分压则对 TiC 生成具有一定抑制作用。热力学分析表明，N_2 分压是影响 TiN 与 TiC 竞争生成关系的关键因素，H_2 主要通过促进钛氧化物向低价态转化而有利于 TiC 生成。

4）富氢喷吹在强化还原的同时可能增加含钛炉渣中 TiC 生成风险，未来低碳钒钛高炉应重视富氢量、炉渣成分与 Ti(C,N) 生成间的协同调控。

参考文献

[1] Yan Zhengpei, Zheng Shili, Zhang Ying, et al. Sodium carbonate roasting and mild acid leaching of vanadium titanomagnetite concentrates: Vanadium extraction and residue sodium decrease[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 1132-1144.

[2] 陈露露. 我国钒钛磁铁矿资源利用现状[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(10): 31-33.
Chen Lulu. Current situation of vanadium-titanium magnetite resource utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015, 33(10): 31-33.

[3] Chen Junwei, Chen Weibin, Mi Liang, et al. Kinetic studies on gas-based reduction of vanadium titanomagnetite pellet[J]. Metals, 2019, 9(1): 95.

[4] 邓青宇. 钒钛磁铁矿高炉冶炼过程中碳氮化钛形成条件与调控机制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2012.
Deng Qingyu. Research on the formation of Ti(C, N) and regulation mechanism in blast furnace process treating vanadic titanomagnetite[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2012.

[5] Zheng Kui, Wang Wei, Huang Tao, et al. Influence of temperature and slag composition on wetting behavior of titanium-containing blast furnace slag and tuyere coke[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2025, 32(10): 3298-3307.

[6] Zhang Guopeng, Shen Fengman, Zhang Shen, et al. Oxidation kinetics and mechanism of TiC with simulated blast-furnace gases[J]. Steel Research International, 2024, 95: 2300519.

[7] Zhang Guopeng, Shen Fengman, Zhang Tianqing, et al. Effect of TiC and Ti(C, N) on the viscosity of CaO-SiO_2-8.25%MgO-15%Al_2O_3-30%TiO_2 slags[J]. Metallurgical Research & Technology, 2025, 122: 106.

[8] Xie Honggen, Yu Wenzhou, You Zhixiong, et al. The effect of titanium carbonitride on the viscosity of high-titanium-type blast furnace slag[J]. Metals, 2019, 9(4): 395.

[9] Liu Yuxin, Zhang Jianliang, Zhang Guohui, et al. Influence of Ti($C_{0.3}N_{0.7}$) on viscosity of blast furnace slags[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2017, 44(8): 609-618.

[10] Zhen Yulan, Zhang Guohua, Chou K C. Viscosity of CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2 melts containing TiC particles[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(1): 155-161.

[11] Sui Jiaheng, Yang Songtao, Wang Qi, et al. Influence of blast furnace burden with different TiO_2 contents on the process of reduction and slag formation in cohesive zone[J]. ISIJ International, 2025, 65(4): 521-532.

[12] 黄家旭, 龙盘忠. 含钛高炉渣碳热还原时熔渣泡沫化原因分析[J]. 轻金属, 2019(8): 46-50.
Huang Jiaxu, Long Panzhong. Causes analysis for slag foaming in the carbothermal reduction process of Ti-bearing blast furnace slag[J]. Light Metals, 2019(8): 46-50.

[13] Chen Mao, Chen Buxin, Jiang Yang, et al. Study of Ti(C, N) formations in TiO_2-containing slags[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2025, 56(1): 1018-1028.

[14] 张国鹏, 沈峰满, 章苇玲, 等. TiO_2 碳热还原机理及影响因素的研究[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2025, 46(11): 66-72.

Zhang Guopeng, Shen Fengman, Zhang Weiling, et al. Research on mechanism and influencing factors of TiO_2 carbothermal reduction[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2025, 46(11): 66-72.

[15] Qiu Guibao, Ma Shiwei, Deng Qingyu, et al. Study on the formation of Ti(C, N) between blast furnace hot metal and slag bearing high TiO_2[J]. Metalurgia International, 2012, 17(4): 94-99.

[16] 李慈颖, 高运明, 李亚伟, 等. 碳热还原氮化攀钢高钛高炉渣制取 Ti(C, N) 的研究[J]. 耐火材料, 2007, 41(2): 113-117.
Li Ciying, Gao Yunming, Li Yawei, et al. Preparation of Ti(C, N) from Pangang high-titanium blast furnace slag by carbothermal reduction and nitridation[J]. Refractories, 2007, 41(2): 113-117.

[17] Jing Jianfa, Wang Shuai, Guo Yufeng, et al. A thermodynamic model for predicting activity of $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-TiO_2-V_2O_3$-FeO slags during electric furnace smelting process[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(9): 2156-2172.

[18] Chen Buxin, Li Yehui, Chen Mao, et al. Effect of low-carbon atmosphere on Ti(C, N) formation in vanadium titanomagnetite blast furnace[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2026, 57(4): 2211-2225.

[19] Dang Jie, Fatollahi-fard F, Pistorius P C, et al. Synthesis of titanium oxycarbide from titanium slag by methane-containing gas[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(1): 123-131.

[20] Dang Jie, Fatollahi-fard F, Pistorius P C, et al. Synthesis of titanium oxycarbide from concentrates of natural ilmenite (weathered and unweathered) and natural rutile, using a methane-hydrogen gas mixture[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(5): 2440-2446.

[21] Lü Zhipeng, Dang Jie, Sun Hui. Synthesis of titanium oxycarbide in TiO_2-C-H_2 system[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 252: 123272.

[22] Rezan S A, Zhang Guangqing, Ostrovski O. Carbothermal reduction and nitridation of ilmenite concentrates[J]. ISIJ International, 2012, 52(3): 363-368.

[23] Rezan S A, Zhang Guangqing, Ostrovski O. Phase development in carbothermal reduction and nitridation of ilmenite concentrates[J]. High Temperature Materials and Processes, 2012, 31(4-5): 381-388.

[24] 胡文斌, 张龙, 王建江, 等. Ti(C, N) 材料的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(23): 29-33.
Hu Wenbin, Zhang Long, Wang Jianjiang, et al. Research progress of Ti(C, N) materials[J]. Materials Review, 2010, 24(23): 29-33.

[25] 焦克新, 张建良, 刘征建, 等. 高炉炉缸含钛保护层物相及 $TiC_{0.3}N_{0.7}$ 形成机理[J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 190-198.
Jiao Kexin, Zhang Jianliang, Liu Zhengjian, et al. Mineralogical phase and formation mechanism of titanium-bearing protective layers in a blast furnace hearth[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 190-198.

[26] 董择上, 薛庆国, 左海滨, 等. 氧气高炉喷吹焦炉煤气数学模型[J]. 钢铁, 2017, 52(4): 18-24.
Dong Zeshang, Xue Qingguo, Zuo Haibin, et al. Mathematical model analysis on coke oven gas injection into oxygen blast furnace[J]. Iron and Steel, 2017, 52(4): 18-24.

[27] Zhang Shushi, Zhang Jianliang, Wang Zhenyang, et al. Advancements in oxygen blast furnace technology and its application in the smelting of vanadium-titanium magnetite: A comprehensive review[J]. Minerals Engineering, 2024, 212: 108732.

[28] 唐珏, 储满生, 李峰, 等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金, 2020(8): 1-6, 51.
Tang Jue, Chu Mansheng, Li Feng, et al. Current status and future trends of hydrogen metallurgy development in China[J]. Hebei Metallurgy, 2020(8): 1-6, 51.

[29] Lan Chenchen, Hao Yuejun, Shao Jiannan, et al. Effect of H_2 on blast furnace ironmaking: A review[J]. Metals, 2022, 12(11): 1864.

[30] 杜诚波, 刘征建, 张建良, 等. 氢气含量对含铁炉料还原及软熔性能的影响[J]. 中国冶金, 2018, 28(12): 9-23,35.
Du Chengbo, Liu Zhengjian, Zhang Jianliang, et al. Effect of hydrogen content on reduction and softening-melting properties of iron bearing charges[J]. China Metallurgy, 2018, 28(12): 19-23, 35.

[31] Gao Xudong, Zhang Run, You Zhixiong, et al. Use of hydrogen-rich gas in blast furnace ironmaking of V-bearing titanomagnetite: Mass and energy balance calculations[J]. Materials, 2022, 15(17): 6078.

[32] Sun Mengmeng, Pang Kanglin, Gu Zeyu, et al. Analysis of the theory and practice of hydrogen-enriched blast furnace ironmaking[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 127: 702-716.

[33] Meijer K, Denys M, Lasar J, et al. ULCOS: Ultra-low CO_2 steelmaking[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009, 36(4): 249-251.

（下转第 29 页）

[10] 张俊燕, 金龙哲, 王丽颖, 等. 贫煤、贫瘦煤用作高炉喷吹煤的可行性研究[J]. 煤炭科学技术, 2006(10): 62-65.
Zhang Junyan, Jin Longzhe, Wang Liying, et al. Feasibility study on using lean coal and meager-lean coal for blast furnace injection[J]. Coal Science and Technology, 2006(10): 62-65.
[11] 刘仁生, 赵兵, 房连增, 等. 潞安贫煤、贫瘦煤与其他煤混合喷吹的优化选择[J]. 煤炭技术, 2010, 29(1): 219-221.
Liu Rensheng, Zhao Bing, Fang Lianzeng, et al. Optimal selection of Lu'an lean coal and meager-lean coal blending with other coals for injection[J]. Coal Technology, 2010, 29(1): 219-221.
[12] 丁智敏. 高炉大喷煤及两段式喷煤的模拟研究和工业实践[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
Ding Zhimin. Simulation study and industrial practice of large PCI and two-stage PCI in blast furnace[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
[13] Chai Yifan, Zhang Jianliang, Shao Qiujun, et al. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace[J]. High Temperature Materials and Processes, 2019, 38: 42-49.
[14] 陈川, 程树森. 高炉煤粉燃烧率通用模型[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(2): 226-234.
Chen Chuan, Cheng Shusen. General model for combustion rate of pulverized coal in blast furnace[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(2): 226-234.
[15] 朱秋平, 王申洋, 曹成, 等. 兰炭在高炉中的燃烧率以及添加兰炭后的经济效益计算[J]. 烧结球团, 2026, 51(1): 238-246.
Zhu Qiuping, Wang Shenyang, Cao Cheng, et al. Combustion rate of semi-coke in blast furnace and economic benefit calculation after adding semi-coke[J]. Sintering and Pelletizing, 2026, 51(1): 238-246.
[16] Jia Jinzhang, Wu Yumo, Zhao Dan, et al. Study on combustion reaction products and free radicals of aliphatic hydrocarbon functional groups in coal based on ML potential MD[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 10144-10144.
[17] Qiu Shuxing, Reddy Raman G, Huang Xianyou, et al. Relationships between combustion behavior in air and the chemical structure of bituminous coal during combustion processes[J]. Energies, 2022, 15(14): 5154-5154.
[18] 鄢晓忠, 邱靖, 尹艳山, 等. 褐煤中官能团对其燃烧特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 169-174.
Yan Xiaozhong, Qiu Jing, Yin Yanshan, et al. Effect of functional groups in lignite on its combustion characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 169-174.
[19] Sheng Changdong. Char structure characterised by Raman spectroscopy and its correlations with combustion reactivity[J]. Fuel, 2007, 86(15): 2316-2324.

编辑　邓淑惠

(上接第 21 页)

[34] 刘学燕, 毛雪芹, 薄涛, 等. 济钢 4 号高炉喷吹焦炉煤气工业试验[J]. 炼铁, 2019, 38(2): 39-41.
Liu Xueyan, Mao Xueqin, Bo Tao, et al. Industrial test of coke oven gas injection in No. 4 blast furnace of Jinan Iron and Steel[J]. Ironmaking, 2019, 38(2): 39-41.
[35] 王月秋, 赵冬云, 刘颖. 鞍钢鲅鱼圈高炉喷吹焦炉煤气技术[C]//中国钢铁年会论文集, 2013.
Wang Yueqiu, Zhao Dongyun, Liu Ying. Technology of coke oven gas injection in blast furnace of Bayuquan, Ansteel[C]//Proceedings of China Iron and Steel Annual Conference, 2013.
[36] 高建军, 朱利, 克俊超, 等. 晋南钢铁高炉喷吹富氢气体工业化实践[J]. 钢铁, 2022, 57(9): 42-48.
Gao Jianjun, Zhu Li, Ke Junchao, et al. Industrialized application of hydrogen-rich gas injection into blast furnace of Jinnan Steel[J]. Iron and Steel, 2022, 57(9): 42-48.
[37] Li Guang, Wang Shuai, Guo Yufeng, et al. Progress in melting-flow characteristics of titanium-bearing blast furnace slag[J]. Metals, 2026, 16(7): 707.
[38] 许仁泽, 张建良, 常治宇, 等. 二元碱度与 Al2O3 对酒钢炉渣流动性的影响[J]. 冶金能源, 2018, 37(5): 26-29.
Xu Renze, Zhang Jianliang, Chang Zhiyu, et al. Effects of binary basicity and Al2O3 on fluidity of slag in Jiuquan Iron and Steel[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2018, 37(5): 26-29.
[39] Yao Chaoquan, Zhang Jianliang, Li Xinyu, et al. Thermodynamic analysis for formation of Ti(C, N) in blast furnace and factors affecting TiO2 activity[C]//TMS 2015 Supplemental Proceedings. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015: 887-893.
[40] 何环宇, 王庆祥, 曾小宁. MgO 含量对高炉炉渣粘度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(6): 11-13,21.
He Huanyu, Wang Qingxiang, Zeng Xiaoning. Effect of MgO content on viscosity of blast furnace slag[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(6): 11-13,21.
[41] 严志明. 铝硅酸盐基高炉渣结构和性能基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Yan Zhiming. Basic research on structure and properties of aluminosilicate-based blast furnace slag[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

编辑　邓淑惠