doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2024. 217

钢中钛含量对钢包引流砂烧结的影响

刘奇明[1,2]，袁　康[1,2]，王勇源[3]，邓志银[1,2]，朱苗勇[1,2]
（1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室，沈阳 110819；
2. 东北大学 冶金学院，沈阳 110819；3. 河南通宇冶材集团有限公司，河南 南阳 474500）

摘　要：为了揭示含钛钢中 Ti 对引流砂烧结的作用机制，实验室实验考察了钢中不同 Ti 含量对硅质、铬质和锆质这三类引流砂烧结行为的影响.结果表明：随着钢中 Ti 含量的升高，钢液作用下引流砂烧结产生的液相明显增多；液相内的 SiO_2 和 MnO 等会与 Ti 发生反应，造成液相中 Ti_2O_3 的含量升高；钢中的 Ti 能够降低引流砂内部液相的熔点，促进液相生成，进而加速引流砂烧结，同时，在 Ti 的作用下，锆质引流砂发生分解，形成大量细小氧化锆颗粒，颗粒收缩后产生大量气孔；硅质引流砂的烧结程度最为严重.综合考虑使用效果与生产成本，铬质引流砂是生产含钛钢的理想材料.

关键词：引流砂；烧结；含钛钢；液相
中图分类号：TF 70　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-6620(2026)05-0501-09

Effect of titanium content in steel on sintering of ladle filler sands

Liu Qiming[1,2], Yuan Kang[1,2], Wang Yongyuan[3], Deng Zhiyin[1,2], Zhu Miaoyong[1,2]
(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Henan Tongyu Metallurgy Materials Group Co., Ltd., Nanyang 474500, China)

Abstract: To reveal the impact mechanism of Ti element in Ti-bearing steel grades on the sintering of ladle filler sands, laboratory experiments were conducted to investigate the effect of different Ti contents on the sintering behaviors of silica-based, chromite-based and zircon-based filler sands. The results show that with the increase of Ti content in steel, the liquid phase generated in the sintered sands increases significantly under the impact of liquid steel. The components (e.g., SiO_2 and MnO) in the liquid phase react with dissolved Ti in steel, leading to the rise of Ti_2O_3 content in the liquid phase. Ti in steel can lower the melting point of the liquid phase inside the sintered filler sands, and promote the formation of the liquid phase. Meanwhile, under the impact of Ti, zircon-based filler sands decompose into many fine zirconia particles, and a large number of pores are formed after the shrinkage of the sintered grains. The sintering degree of silica-based filler sands is the severest. Considering both the performance and cost, chromite-based filler sands are more suitable for Ti-bearing steel grades.

Key words: filler sands; sintering; Ti-bearing steel; liquid phase

引流砂是钢包滑动水口的关键填充物，主要作用是隔绝钢液与滑板.连铸开浇时，打开滑板，未烧结的引流砂会顺着滑动水口流出；烧结后的引流砂因失去支撑而被钢液静压力破碎，与钢液一起流入中间包，该过程称为“钢包自动开浇”[1-3].在实际生产过程中，钢包常出现无法自动开浇的情况，需采取烧氧引流操作.这不仅会造成钢液污染，打乱生产节奏，还存在较大的安全隐患[4-5].因此，钢铁企业常将钢包自动开浇率视为一个重要的洁净生产指标.

学者们认为，引流砂过厚的烧结层、引流砂顶部冷凝的钢液，以及钢液渗透进入引流砂均是钢包不能自动开浇的重要原因[6-9].其中，引流砂烧结是最主要的原因.目前，钢铁企业使用的引流砂

收稿日期：2024-08-08.
基金项目：国家自然科学基金项目（51804068，U20A20272）；中央高校基本科研业务费资助项目（N2325035）.
作者简介：刘奇明（2002—），男，本科生.
通讯作者：邓志银（1986—），男，博士，教授，E-mail：dengzhiyin@ neu. edu. cn.
引文格式：刘奇明，袁康，王勇源，等. 钢中钛含量对钢包引流砂烧结的影响［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：501-509.（Liu Qiming，Yuan Kang，Wang Yongyuan，et al. Effect of titanium content in steel on sintering of ladle filler sands［J］. Journal of Materials and Metallurgy，2026，25（5）：501-509.）

主要有硅质、铬质、锆质和镁橄榄石质等多种材质.众多学者针对引流砂开展了大量研究工作[10-24].研究表明:引流砂的烧结过程本质为液相演变过程,烧结过程中生成的液相量越多,引流砂的烧结现象就越显著[15-16];同时,引流砂自身的化学成分、粒径等物性参数,也会对其烧结行为产生影响[19-24].近年来,钢液对引流砂烧结行为的影响逐渐受到学界关注,钢中合金元素的种类与含量对引流砂烧结行为具有显著影响[15-16, 20-24].目前,Mn、Al对引流砂烧结行为的影响机制已得到较为深入的阐释[20-24],可为工业生产中提升钢水自动开浇率提供重要的理论参考.

含钛钢凭借优异的使用性能与良好的成本优势,在工业生产及日常生活领域中应用广泛.但Ti的引入也会引发一系列生产难题,主要包括钢液可浇性变差、TiN夹杂物滋生等问题[25].与此同时,含钛钢成分体系复杂,Ti对引流砂烧结行为的作用机制尚不明确,有待进一步探究.基于此,本文通过开展实验室试验,探究不同Ti含量(质量分数,下同)的钢种对硅质、铬质、锆质这三类不同引流砂烧结行为的影响,揭示Ti影响引流砂烧结的内在作用机制,旨在为工业生产提升钢包自动开浇率提供理论支撑.

1 实验

引流砂原料分别为铬铁矿砂(CR)、石英砂(S)和锆英砂(ZR),成分如表1所列.实验使用的钢种成分如表2所列.实验前,将这些钢种切割成质量约为100 g的小块,并打磨去除表层的氧化层.

表1 原始矿砂成分(质量分数)

Table 1 Compositions of original sand grains (mass fraction) %

原始颗粒	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	TFe	MgO
CR	45.78	1.27	15.47	20.05	9.37
S	–	98.60	–	–	–
ZR	31.92	5.45	0.21	0.02	–

表2 实验钢种成分(质量分数)

Table 2 Compositions of experimental steels (mass fraction) %

钢种	C	Si	Mn	Ti	Cr	Al
Ⅰ	0.22	0.18	0.89	–	0.89	0.014
Ⅱ	0.21	0.23	0.90	0.07	1.12	0.020
Ⅲ	0.22	0.23	0.90	0.20	1.12	0.040

实验配制了3种引流砂,分别为FS1(铬质,85%CR+15%S)、FS2(锆质,100%ZR)和FS3(硅质,100%S).笔者团队发现[15-16],压制的砂片对其烧结行为的影响较小,故本实验仍使用引流砂片(直径20 mm,质量8 g).制备引流砂片时,在配制的引流砂颗粒中加入几滴5%PVA黏结剂并混合均匀,再放入模具中,用压片机在20 MPa下压制成片;之后,放入马弗炉在500 ℃下保温3 h,使黏结剂彻底挥发.

实验所用设备为高温动力学炉.该实验炉主要由水冷淬火室和氧化铝反应炉管组成,各组件通过O型圈进行密封,如图1(a)所示.实验方案如表3所列.实验前,参照图1(b)将引流砂片和钢块放入氧化铝坩埚(纯度>99.3%,外径36 mm,内径30 mm,高60 mm)中,再将氧化铝坩埚置于石墨保护坩埚内,并通过升降系统将其移到淬火室中.之后,密封淬火室,抽真空后通入高纯氩气.实验过程中,氩气流量(标准状态)设定为0.2 L/min,温度设定为1 600 ℃.当达到目标温度时,通过升降系统将石墨保护坩埚缓慢降至炉内.到达目标位置后,实验开始计时(t=0 min).实验结束后,将石墨保护坩埚快速提升至淬火室,并立即通入高流量氩气淬火,淬火结束后,取出样品制样.

使用扫描电子显微镜(SEM,Zeiss EVO 18)和附带EDS能谱仪分析引硫砂的物相和形貌.需要指出的是,选取引流砂靠近钢液侧的区域进行分析;当采用EDS分析烧结物相时,至少选取30个点.此外,利用图像分析软件统计烧结后的物相占比,其中,液相先通过EDS分析和相图确定,然后利用图像分析测量液相区域.为了尽可能减小误差,3次测量后取平均值.

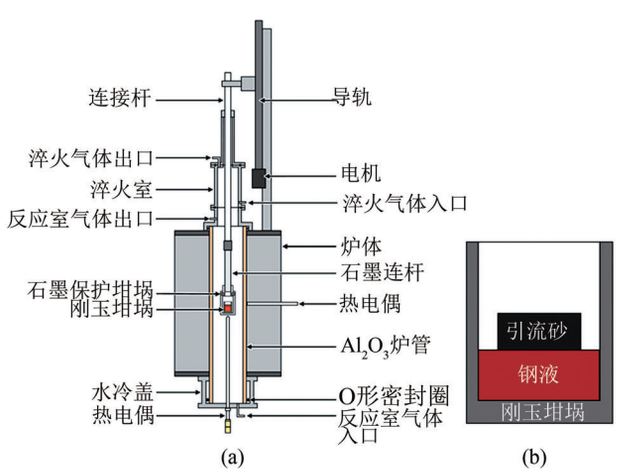


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

(a)—实验炉;(b)—砂片放置.

表 3　实验方案

Table 3　Experimental conditions

炉号	温度/℃	时间/min	钢种	引流砂	
				种类	颗粒质量占比
1	1 600	60	Ⅰ	FS1	85%CR+15%S
2	1 600	60	Ⅱ	FS1	85%CR+15%S
3	1 600	60	Ⅲ	FS1	85%CR+15%S
4	1 600	60	Ⅰ	FS2	100%ZR
5	1 600	60	Ⅱ	FS2	100%ZR
6	1 600	60	Ⅲ	FS2	100%ZR
7	1 600	60	Ⅰ	FS3	100%S
8	1 600	60	Ⅱ	FS3	100%S
9	1 600	60	Ⅲ	FS3	100%S

2　实验结果与分析

2.1　Ti 含量对铬质引流砂烧结的影响

图 2 为铬质引流砂 FS1(85%CR,15%S)在不同钢液作用下烧结 60 min 后的 SEM 图片.

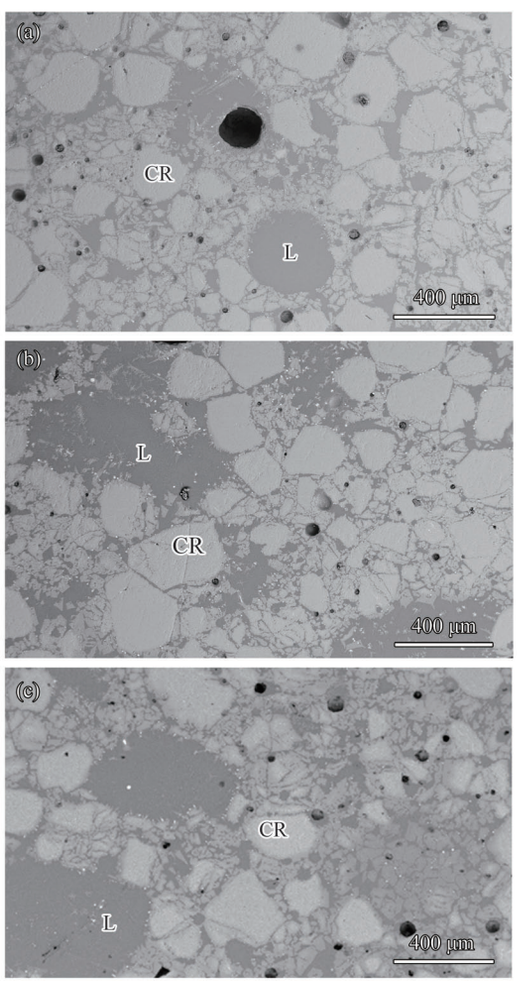


图 2　不同钢液作用下引流砂 FS1 烧结后 SEM 照片

Fig. 2　SEM images of sintered FS1 filler sand under impact of different steel grades

(a)—钢种Ⅰ;(b)—钢种Ⅱ;(c)—钢种Ⅲ.

由图 2 可知:引流砂烧结后的物相主要为铬铁矿(CR)和液相(L),此外,也能找到少量孔洞.图 3 给出了引流砂烧结后测量得到的液相占比.从图 2 和 3 中可以看出,随着钢中的 Ti 含量的升高,引流砂中的液相明显增多.这表明钢中 Ti 有利于引流砂中液相的生成,能够促进铬质引流砂的烧结.

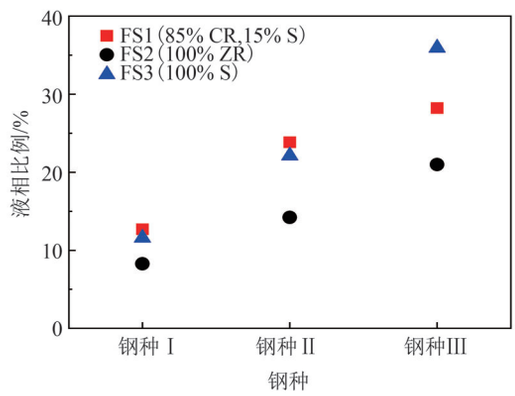


图 3　不同钢液作用下引流砂烧结液相比例

Fig. 3　Liquid fraction in sintered ladle filler sands under impact of different steel grades

表 4 中列出了引流砂液相的具体成分.从表 4 中可看出,在钢液作用下,铬质引流砂 FS1 烧结后的液相中 Cr_2O_3、FeO 和 MgO 含量较低,而 SiO_2、Al_2O_3 和 MnO 含量较高.随着 Ti 含量的升高,Ti_2O_3 和 Al_2O_3 含量呈上升趋势,而 FeO、MgO、SiO_2 和 MnO 含量呈下降趋势.

图 4 为铬质引流砂 FS1 在不同钢液作用下烧结 60 min 后的元素面扫描图.从图 4 中可以看出,引流砂烧结后的液相以 SiO_2-Al_2O_3-MnO 体系为主.随着钢中 Ti 含量的升高,液相中的 Ti 分布明显增多.此外,Si 主要富集于液相,Cr 则大量保留在铬铁矿物相中,相比之下,液相中 Cr_2O_3 含量较少,这与表 4 数据高度吻合.综合表 4 和图 4 可知,液相中 Al_2O_3 含量呈持续上升趋势.笔者团队前期研究表明[21-23],钢中的 Al 会与 FeO、MnO 和 SiO_2 发生反应,从而使液相中这些氧化物含量降低,Al_2O_3 含量升高[见式(1)~(3)].钢种Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的 Al 含量存在明显区别(表 2),这也是不同试样液相 Al_2O_3 含量出现差异的重要原因.铬质引流砂原料基本不含 Mn,液相中的 MnO 来源于钢中 Mn 与引流砂组分的相互作用,对应反应见式(4)和(5)[20-24].

$$3FeO(s)+2[Al]=\!=\!=(Al_2O_3)+3[Fe] \quad (1)$$

$$3MnO(s)+2[Al]=\!=\!=3[Mn]+(Al_2O_3) \quad (2)$$

$$3SiO_2(s)+4[Al]=\!=\!=3[Si]+2(Al_2O_3) \quad (3)$$

$$(FeO)+[Mn]=\!=\!=[Fe]+(MnO) \quad (4)$$

$$SiO_2(s)+2[Mn]=\!=\!=[Si]+2(MnO) \quad (5)$$

表 4 引流砂液相平均成分(质量分数)

Table 4 Average compositions of liquid phase in sintered sand pellets (mass fraction) %

炉号	钢种	引流砂	SiO_2	Al_2O_3	MnO	Cr_2O_3	FeO	MgO	Ti_2O_3
1	Ⅰ	FS1	58.0	13.4	17.9	1.2	5.4	4.1	–
2	Ⅱ	FS1	56.3	14.6	15.0	2.3	3.8	4.0	4.0
3	Ⅲ	FS1	55.4	16.6	12.2	2.5	2.4	3.4	7.5
4	Ⅰ	FS2	57.1	24.8	17.7	–	0.4	–	–
5	Ⅱ	FS2	57.2	20.0	18.9	–	0.3	–	3.6
6	Ⅲ	FS2	43.6	11.4	34.4	–	0.6	–	10.0
7	Ⅰ	FS3	62.4	3.2	32.5	–	1.9	–	–
8	Ⅱ	FS3	68.6	6.3	22.6	–	1.2	–	1.3
9	Ⅲ	FS3	76.4	8.0	8.9	–	1.0	–	5.7

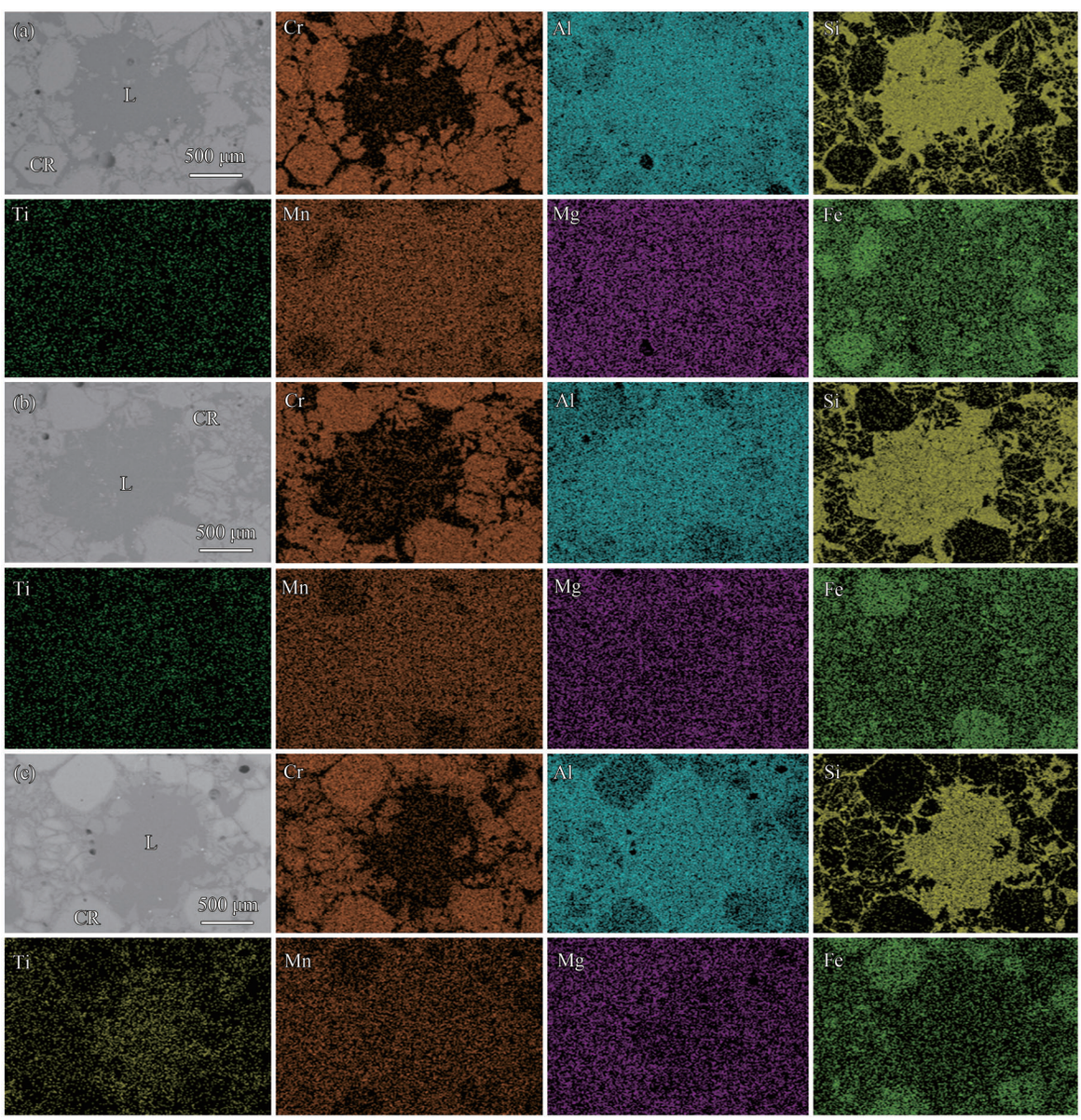


图 4 不同钢液作用下引流砂 FS1 烧结面扫描图

Fig. 4 Elemental mappings of sintered filler sand FS1 under impart of differet steel grad

(a)—钢种Ⅰ; (b)—钢种Ⅱ; (c)—钢种Ⅲ.

此外，从表 4 中还可看出，$w(Al_2O_3)$ 的变化仅为 3%左右，而 $w(Ti_2O_3)$ 上升至 7.5%，这说明 Ti 在烧结过程中也发挥了重要作用.随着钢中 Ti 含量的升高，铬质引流砂烧结后的液相中 FeO、MnO 和 SiO_2 含量下降，液相中 Ti_2O_3 含量上升.根据上述反应式，可以推测出钢中的 Ti 与 FeO、MnO 和 SiO_2 发生了反应[见式(6)~(8)]，这会使液相中 Ti_2O_3 含量进一步升高.

$$3(FeO)+2[Ti]=\!=\!=3Fe(s)+(Ti_2O_3) \quad (6)$$

$$3MnO(s)+2[Ti]=\!=\!=3[Mn]+(Ti_2O_3) \quad (7)$$

$$3SiO_2(s)+4[Ti]=\!=\!=3[Si]+2(Ti_2O_3) \quad (8)$$

与常规铝镇静钢(钢种Ⅰ)相比，含钛钢(钢种Ⅱ和Ⅲ)中的 Ti 会促进铬质引流砂的烧结，生成的液相以 SiO_2-Al_2O_3-MnO 系为主.为明确引流砂内液相熔点的演变规律，本文依据表 4 给出的液相成分，在 SiO_2-Al_2O_3-MnO 三元相图[26]中标记出各对应组分点位，结果见图 5.由于 MnO、FeO 和 MgO 结构相似，Al_2O_3、Ti_2O_3 与 Cr_2O_3 结构相似，故将这些结构相似的氧化物一起统计.从图 5 中可看出，随着钢中 Ti 含量的升高，铬质引流砂(炉号 1~3)烧结后对应的液相线温度降低.这表明 Ti 参与了反应，铬质引流砂烧结后液相的熔点降低，有利于液相生成.

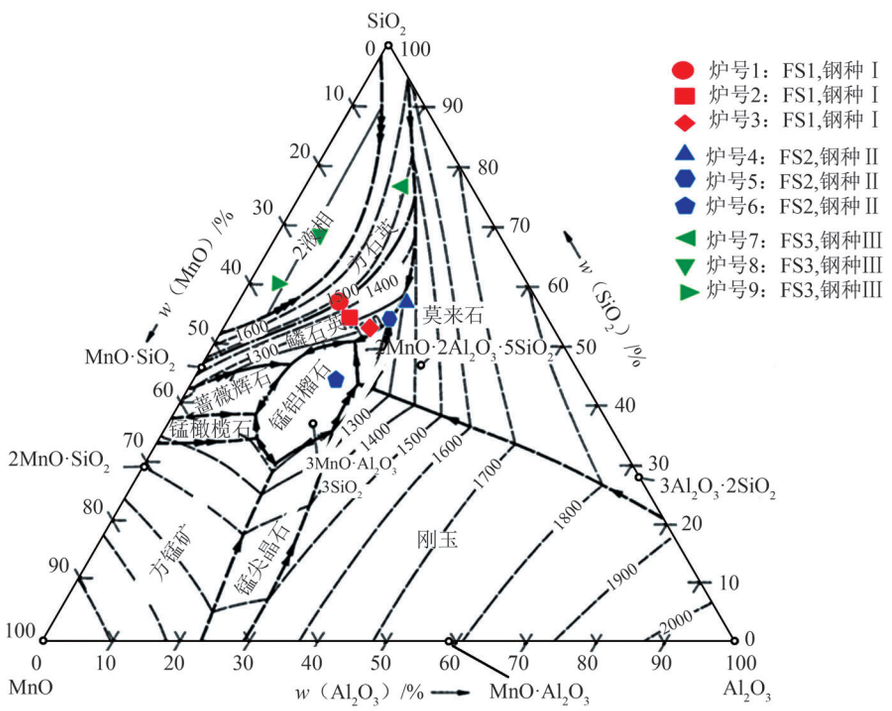


图 5　SiO_2-Al_2O_3-MnO 三元相图[26]

Fig. 5　Phase diagram of SiO_2-Al_2O_3-MnO[26]

2.2　Ti 含量对锆质引流砂烧结的影响

图 6 为锆质引流砂 FS2(100%ZR)在不同钢液作用下烧结 60 min 后的 SEM 照片.

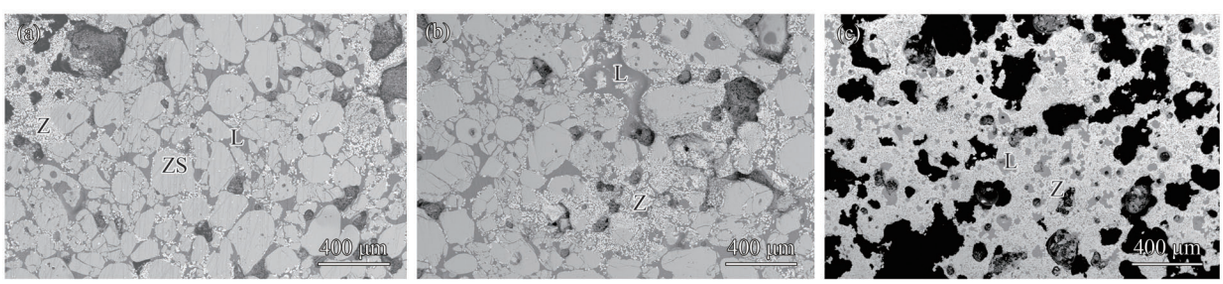


图 6　不同钢液作用下引流砂 FS2 烧结后的 SEM 照片

Fig. 6　SEM images of sintered filler sand FS2 under impact of different steel grades

(a)—钢种Ⅰ；(b)—钢种Ⅱ；(c)—钢种Ⅲ.

图6(a)和(b)中的物相主要为硅酸锆(ZS)、氧化锆(Z)和液相(L),而图6(c)中则主要为氧化锆(Z)和液相(L),还有一些孔洞.随着钢中Ti含量的升高,锆质引流砂烧结后形成了大量的氧化锆颗粒.这表明钢中Ti加速了锆质引流砂中硅酸锆的分解,同时因烧结收缩而形成了较多孔洞.对比图6与图2并结合图3可知,锆质引流砂烧结后的液相占比明显低于铬质引流砂.

图7为锆质引流砂(FS2)在不同钢液作用下烧结60 min后的元素面扫描图.

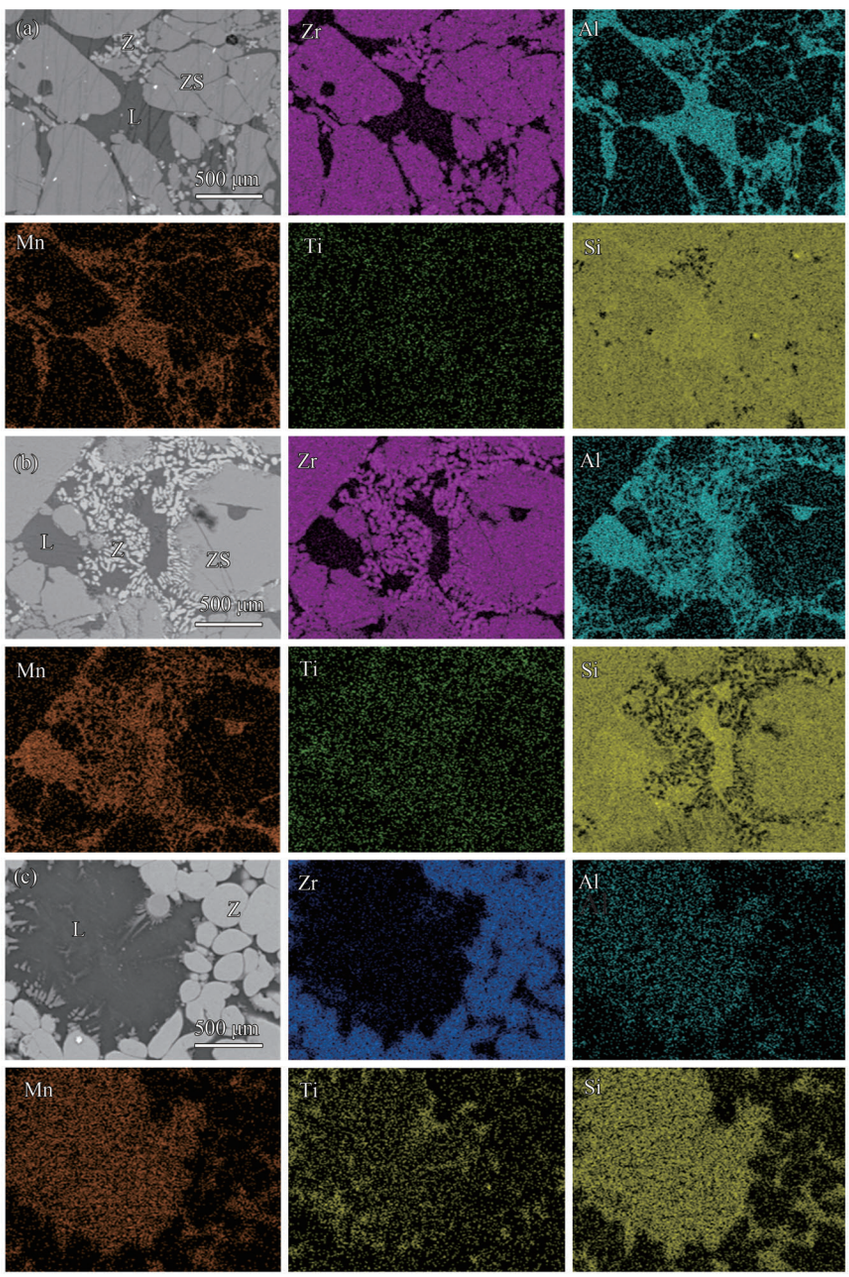


图7 不同钢液作用下引流砂FS2烧结面扫描图

Fig. 7 Elemental mappings of sintered filler sand FS2 under impact of different steel grades

(a)—钢种Ⅰ;(b)—钢种Ⅱ;(c)—钢种Ⅲ.

结合表4和图7可以看出:锆质引流砂烧结后形成的液相仍为SiO_2-Al_2O_3-MnO系;Zr主要分布在硅酸锆(ZS)和氧化锆(Z)颗粒中,而液相中Zr含量较低;液相主要组元为MnO、SiO_2、Al_2O_3、Ti_2O_3,MgO和FeO含量极低.随着钢中Ti含量的升高,液相中SiO_2和Al_2O_3含量均呈下降趋势,MnO和Ti_2O_3含量均呈上升趋势.这很可能是因为Al_2O_3和SiO_2与钢中Ti发生了反应,使Al_2O_3和SiO_2含量降低,而Ti_2O_3含量升高,具体反应如式(8)和(9)所示.此外,锆质引流砂烧结后的液相中几乎不存在Cr_2O_3,这表明钢中Cr对引流砂的烧结行为影响微小.值得注意的是,炉号4中引流砂

液相的$w(Al_2O_3)$达到 24.7%，远高于原始引流砂中的含量.这表明钢液中 Al 同样与液相中 SiO_2、FeO 反应生成了 Al_2O_3[见式(1)和(3)].还可以发现，锆质引流砂原始砂中几乎也没有 Mn，故液相中的 MnO 来源于钢中的 Mn[见式(4)和(5)].

$$Al_2O_3(s)+2[Ti]=\!=\!=2[Al]+(Ti_2O_3) \quad (9)$$

与铬质引流砂处理类似，在 SiO_2-Al_2O_3-MnO 三元相图中也标出了锆质引流砂烧结后对应的液相成分(见图 5).随着钢液中 Ti 含量不断提高，锆质引流砂烧结后的液相线温度逐步降低.由此可以证实，钢中的 Ti 参与了锆质引流砂的烧结反应，降低了液相熔点，进而加速引流砂的烧结进程.与常规铝镇静钢(钢种Ⅰ)相比，含钛钢(钢种Ⅱ、Ⅲ)内的 Ti 会促使引流砂中的硅酸锆发生剧烈分解，生成大量微细氧化锆颗粒.由图 7(c)可知，Si 基本富集于液相，说明在 Ti 的作用下，Si 的分解反应进行得十分充分.

2.3　Ti 含量对硅质引流砂烧结的影响

图 8 为硅质引流砂 FS3(100%S)在不同钢液作用下烧结 60 min 后的 SEM 照片.

如图 8 所示，烧结后的物相主要为石英(S)和液相(L).随着钢中 Ti 含量的升高，硅质引流砂烧结后的液相占比显著增大(见图 3).这表明钢中的 Ti 同样会促进硅质引流砂产生液相，推动烧结过程.结合图 3 结果能够发现，在含钛钢的作用下，硅质引流砂液相占比的增幅高于另外两种试验用引流砂.

图 9 给出了硅质引流砂 FS3 在不同钢液作用下烧结后的元素面扫图.原始硅质引流砂不含 Fe、Mn.结合表 4 与图 9 可知，烧结形成的液相中 FeO 质量分数超过 1%，证明钢液基体参与了引流砂的烧结反应.另外，炉号 7 中试样的$w(MnO)$高达 32.5%，说明烧结过程同样发生了式(4)和(5)所示的化学反应.

随着钢中 Ti 含量的升高，硅质引流砂烧结液相内的 Al_2O_3、SiO_2 和 Ti_2O_3 含量均逐步升高.液相中富集大量 Al_2O_3，其原因是钢中的 Al 会与 SiO_2、MnO、FeO 发生反应，消耗上述氧化物，对应反应见式(1)~(3).与之类似，钢中的 Ti 与液相中的 SiO_2、MnO、FeO 发生反应，造成液相中 Ti_2O_3 含量上升，对应反应见式(6)~(8).与此同时，石英相(S)持续溶解，使得液相 SiO_2 含量不断提高.由图 9(c)可见，Si 在液相与石英相之间的边界趋于模糊，这是由石英不断溶解，液相中 SiO_2 逐步接近饱和造成的.本文中同样在三元相图中标注出硅质引流砂对应的液相组成(见图 5)，结果显示，随着钢中 Ti 含量的升高，硅质引流砂的液相线温度持续降低.

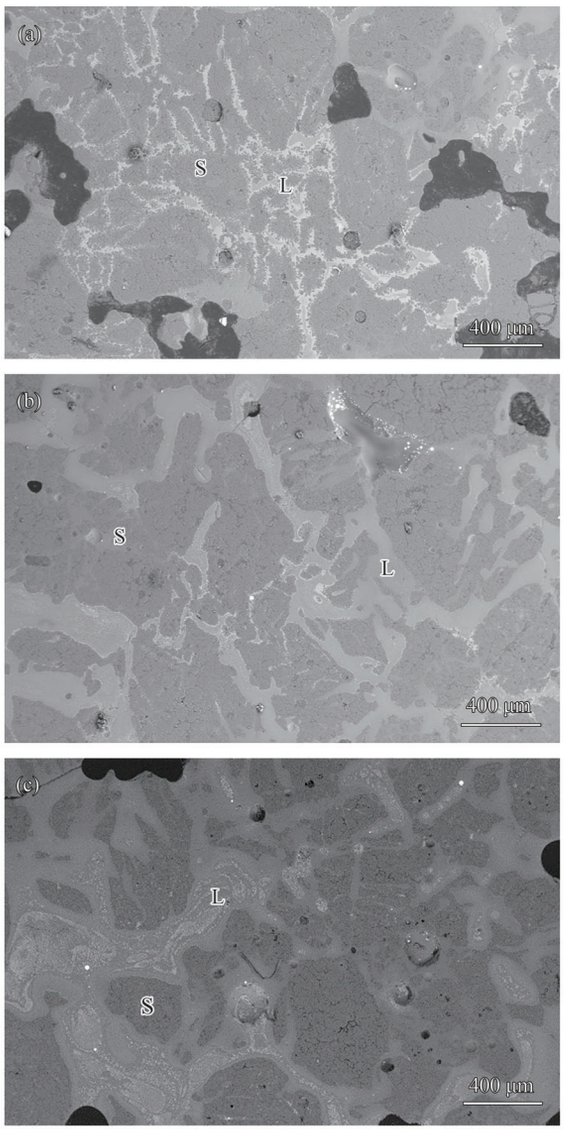


图 8　不同钢液作用下引流砂 FS3 烧结后的 SEM 照片

Fig.8　SEM images of sintered filler sand FS3 under impact of different steel grades

(a)—钢种Ⅰ;(b)—钢种Ⅱ;(c)—钢种Ⅲ.

如上所述，尽管 3 种引流砂材质各不相同，但钢中 Ti 带来的影响基本一致：Ti 均会参与烧结反应，促使引流砂产生更多液相，进而加剧烧结程度.因此，在含钛钢的实际生产中，必须重视 Ti 对引流砂烧结的强化效应.结合实验结果来看：在含钛钢作用下，锆质引流砂因大量分解收缩会形成较多气孔，容易引发钢液渗透问题；硅质引流砂的烧结程度最为严重，且在特定温度下会产生体积膨胀，降低自身流动性，甚至造成绷料.综合使用效果与生产成本，铬质引流砂依旧是理想材料，不过现场应用还需要结合钢种成分、引流砂原料配比等条件综合优化.

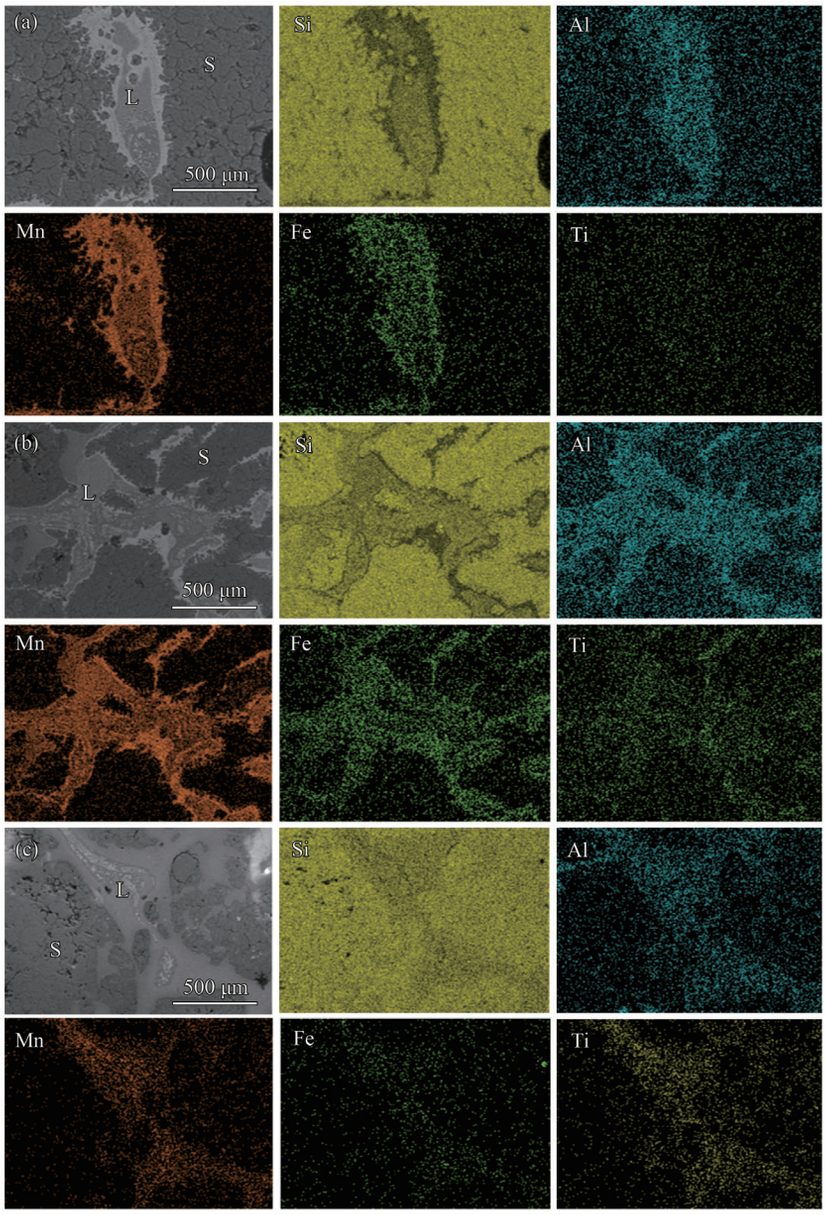


图9 不同钢液作用下引流砂FS3烧结面扫描图

Fig. 9 Elemental mappings of sintered filler sand FS3 under impout of different steel grades

(a)—钢种Ⅰ(无Ti);(b)—钢种Ⅱ(0.07%Ti);(c)—钢种Ⅲ(0.20%Ti).

3 结论

(1)随着钢中Ti含量的升高,钢液作用下烧结形成的引流砂液相显著增多.钢中的Ti降低了液相熔点,有利于液相生成,进而促进引流砂烧结.

(2)钢中Ti含量越高,引流砂液相内Ti_2O_3含量越高.钢中的Ti能够与液相中的SiO_2、MnO等组分发生反应,造成液相中Ti_2O_3富集.

(3)在Ti的影响下,锆质引流砂发生分解,生成大量微细氧化锆颗粒,收缩后形成大量气孔;硅质引流砂的烧结程度最为严重.综合使用效果与生产成本,铬质引流砂依然是较为理想的选择.

4 参考文献

[1] 邓志银,彭朋,朱苗勇. 钢包引流砂烧结与钢包自动开浇率提升研究进展[J]. 钢铁,2022,57(1):1-12.
(Deng Zhiyin,Peng Peng,Zhu Miaoyong. State of art in study on sintering of ladle filler sands and improvement of ladle free-opening rate[J]. Iron & Steel,2022,57(1):1-12.)

[2] Bergman Å. Ladle free-opening performance[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1988, 17(4): 188.

[3] 钟凯,王崇,张启东,等. 提高加盖钢包自开率的研究与实践[J]. 中国冶金,2019,29(3):36-42.
(Zhong Kai,Wang Chong,Zhang Qidong,et al. Research and practice on improving free-opening rate of covered ladle[J].

China Metallurgy,2019,29(3):36-42.)

[4] 祝洪喜,邓承继,白晨,等. 钢包用引流材料的特性与控制参数[J]. 炼钢,2008,24(5):49-53.
(Zhu Hongxi, Deng Chengji, Bai Chen, et al. Features and influence factors of stuffing sand used for ladle [J]. Steelmaking,2008,24(5):49-53.)

[5] Kovačič M,Jurjovec B,Krajnc L. Ladle nozzle opening and genetic programming [J]. Computer Methods in Materials Science,2013:147-152.

[6] Breithaupt M, Kobel J, Schalast R. Improving ladle preparation safety[J]. Steel Times International. 2021, 45(4): 53-55.

[7] Bombeck M A , Janssen M , Dannert C, et al. Fundamental research on the functionality of well fillers[J]. Stahl und Eise, 2016, 136: 35-42.

[8] Rief A, Figueiredo A O, Fasching M, et al. Ladle well filler sands for all needs [J]. RHI Magnesita Worldwide, 2022: 34-40.

[9] Tseng T T,Wu H M,Chen C N,et al. Refractory filler sands with core - shell composite structure for the taphole nozzle in slide-gate system of steel ladles[J]. Ceramics International, 2012,38(2):967-971.

[10] Da Cruz R T,Pelisser G F,Bielefeldt W V,et al. Free opening performance of steel ladle as a function of filler sand properties [J]. Materials Research,2016,19(2):408-412.

[11] Liu Y B,Wang J J,Zhang L F,et al. Laboratory investigation on quantitative effect of ladle filler sands on the cleanliness of a bearing steel[J]. Metallurgical Research & Technology,2022, 119(2):204.

[12] Jin C J, Deng C J, He P X. High-temperature performance study of chromium-containing stuffing sand for ladles [J]. Baosteel Technical Research,2015; 9(4): 16-19.

[13] Kobayashi Y,Todoroki H,Kirihara F,et al. Sintering behavior of silica filler sands for sliding nozzle in a ladle [J]. ISIJ International,2014,54(8):1823-1829.

[14] Janssen M,Greinacher J,Bombeck M A,et al. Chromite based ladle well fillers - the key to free opening[C]//AISTech 2016 Steel & Technology Conference Proceedings, [S. l.]: [s.n.], 2016.

[15] Deng Z Y, Glaser B, Bombeck M A, et al. Effects of temperature and holding time on the sintering of ladle filler sand with liquid steel [J]. Steel Research International, 2016, 87(7):921-929.

[16] Deng Z Y,Glaser B,Bombeck M A,et al. Mechanism study of the blocking of ladle well due to sintering of filler sand[J]. Steel Research International,2016,87(4):484-493.

[17] Jiang Z, He Y, Jiang X, et al. Thermal-conductivity measurements for filling materials for sliding gates and their effects on free-tapping performance of steel ladle[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters),1999,12(5):1125.

[18] Pan H, Ko Y. Microstructural and morphological changes of silica and chromite packing sands for sliding gate system for steel ladles after heating at temperature [J]. Ironmaking and Steelmaking,1992,19(5):390-393.

[19] Yuan K,Deng Z Y,Zhu M Y. Effect of carbon on sintering behavior of chromite-based ladle filler sands[J]. Steel Research International,2024,95(5):2300670.

[20] Yang B R,Deng Z Y,Zhu M Y. Effect of zircon addition on the sintering of chromite-based ladle filler sands [J]. Ironmaking & Steelmaking,2022,49(4):355-363.

[21] 袁康,杨博然,邓志银,等. 莫来石和氧化铝对高锰高铝钢用铬质引流砂烧结的影响[J]. 钢铁研究学报,2022,34(1):35-42.
(Yuan Kang,Yang Boran,Deng Zhiyin,et al. Effect of mullite and alumina addition on sintering of chromite-based ladle filler sands used for high Mn-high Al steels[J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(1):35-42.)

[22] 邓魏凯,杨博然,郭栩萍,等. 氧化铝对铬质引流砂烧结行为的影响[J]. 中国冶金,2022,32(8):32-39.
(Deng Weikai, Yang Boran, Guo Xuping, et al. Effect of alumina addition on sintering behavior of chromite-based ladle filler sands[J]. China Metallurgy,2022,32(8):32-39.)

[23] Yang B R,Deng Z Y,Zhu M Y. Sintering behavior of new chromite-alumina mixed ladle filler sands for high Mn-high Al steel grades[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022,53(6):3979-3991.

[24] Deng Z Y, Yang B R, Zhu M Y. Laboratory study on the sintering behavior of zircon-based ladle filler sands[J]. Steel Research International,2021,92(9):2100071.

[25] 霍向东,董锋,彭政务,等. 钛微合金高强钢控轧控冷工艺研究[J]. 钢铁钒钛,2014,35(6):35-40.
(Huo Xiangdong,Dong Feng,Peng Zhengwu,et al. Study on controlled rolling and cooling technology of Ti micro-alloyed high strength steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2014,35(6):35-40.)

[26] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh). Slag atlas [M]. 2nd ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995.