含碳量对铁基熔体基础物性的影响研究

王腾飞，刘征建，张建良，王耀祖，李 洋，王桂林
（北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：在当前碳达峰、碳中和目标的背景下，钢铁行业承担着艰巨的减碳任务，同时也为钢铁行业向绿色环保的低碳冶金方向转型升级提供了机遇。在非高炉炼铁工艺流程中，碳会影响铁水的物性及渣铁界面的反应，而对于正在发展的氢冶金工艺，氢的存在也会对铁中碳的作用行为产生影响。本文从传统高炉冶炼工艺入手，首先对铁水表面张力、渣铁界面张力、铁水黏度及熔化性温度的实验研究方法进行概括，然后分别总结分析了含碳量对铁水表面张力、渣铁界面张力、铁水黏度及熔化性温度的影响。结果表明：含碳量与铁水表面张力没有直接关系，但含碳量会影响氧、硫等表面活性元素的在铁水表面的吸附状况，从而影响表面张力；渣铁界面张力与含碳量、温度、炉渣成分，以及渣铁界面处氧的分布情况有关；随着温度的降低，铁水黏度先升高，当温度降低至铁水熔点以下时，黏度又迅速降低，且随着含碳量的升高，转折点温度降低；铁水熔化性温度呈现先降低后升高的趋势。研究结果可为炼铁工作者理解铁基熔体物理性质的影响因素提供参考，对渣铁分离工作提供理论支撑。

关键词：炼铁；铁碳熔体；表面张力；界面张力；黏度
中图分类号：TF557 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0070－10
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.010

Influence of carbon content on basic physical properties of iron-based melts

WANG Tengfei, LIU Zhengjian, ZHANG Jianliang, WANG Yaozu, LI Yang, WANG Guilin
(*School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Under the current background of carbon peaking and carbon neutrality, the iron and steel industry undertakes the arduous task of carbon reduction, and it also provides an opportunity for the iron and steel industry to transform and upgrade towards green and environmentally friendly low-carbon metallurgy. In the non-blast furnace iron-making process, carbon will affect the physical properties of molten iron and the reaction of the slag-iron interface. For the developing hydrogen metallurgy process, the presence of hydrogen will also affect the behavior of carbon in iron. The traditional blast furnace smelting process is started to firstly summarize the experimental research methods of molten iron surface tension, slag-iron interfacial tension, molten iron viscosity and melting temperature, and to summarize and analyze the effect of carbon content on molten iron surface tension, slag-iron interfacial tension, molten iron viscosity and melting temperature. The results show that the carbon content has no direct relationship with the surface tension of molten iron, but the carbon content will affect the adsorption of surface active elements such as oxygen and sulfur on the surface of molten iron, thereby affecting the surface tension; the interfacial tension of slag iron is related to the carbon content, temperature, slag composition, and the distribution of oxygen at the slag iron interface; with the decrease of temperature, the viscosity of molten iron increases first, and when the temperature decreases below the melting point of molten iron, the viscosity decreases rapidly, and with the increase of carbon content, the

收稿日期：2021－12－20；**修回日期**：2022－01－06
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52174291)
作者简介：王腾飞(1996—)，男，硕士研究生，从事熔融还原炼铁方面的研究。
通讯作者：王耀祖(1991—)，男，副教授，从事炼铁新工艺及智能化方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

temperature at the turning point decreases;the molten temperature of molten iron shows a trend of decreasing first and then increasing. The research results can provide references for iron workers to understand the influencing factors of the physical properties of iron-based melts,and provide theoretical support for the separation of slag and iron.

Key words: iron-making; iron-carbon melt; surface tension; interfacial tension; viscosity

2020 年，习近平主席曾在气候雄心峰会和联合国大会上面向世界承诺，支持《巴黎协定》，为应对气候变化作出更大贡献，并力争完成“在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的双碳目标[1-2]；李克强总理也在第十三届全国人民代表大会第四次会议上提出，落实 2030 年应对气候变化国家自主贡献目标，单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低 13.5%、18%，扎实做好碳达峰、碳中和各项工作制定 2030 年前碳排放达峰行动方案，优化产业结构和能源结构[2-3]。随着环保压力的逐渐增大，积极发展低碳冶金技术，优化传统冶炼工艺流程将是现阶段钢铁行业绿色发展的关键。因此，缩减焦化、烧结、高炉炼铁等生产环节的非高炉炼铁工艺，凭借其流程短、污染小的优势，将成为未来钢铁生产的主流。

在非高炉炼铁过程中，铁矿石的还原反应在熔渣与铁水界面处进行，碳会影响铁水的物性及渣铁界面的反应，而对于正在发展的氢冶金工艺，氢的存在也会对铁中碳的作用行为产生影响。研究铁基熔体物理性质的影响因素和机理，对提高铁水质量至关重要，同时也可以为冶炼操作选择合适的参数提供理论支撑，有着良好的实际意义。广大炼铁工作者已经对基于高炉炼铁工艺条件的铁水物性做过一些研究，但在非高炉炼铁工艺中，含碳量对铁基熔体基础物性的影响研究较少。铁水表面张力是研究反应动力学的重要基础，铁水与炉渣界面张力影响着渣铁分离的顺利进行，而铁水黏度和熔化性温度关系着铁水的流动性，对指导冶炼操作，维持冶炼过程稳定顺行有重要意义[4-8]。本文在参考传统高炉炼铁工艺中碳对铁基熔体物理性质的影响研究的基础上，总结了前人对铁基熔体基础物性的研究方法及进展，以期对研究非高炉及氢冶金工艺背景下的铁水基础物性研究提供参考。

1　碳对铁水物理性质影响的研究进展

1.1　铁水表面张力的研究方法

表面张力是重要的液体物理化学性质参数，是影响多相体系相间传质和反应的关键因素之一，也是研究熔体界面反应动力学的基础。铁水表面张力与铸件表面和内部质量有密切的关系，铁水表面张力会影响铸件产生气孔。铁水要形成一个半径为 R 的气泡，需要的压力：

$$P = P_{\mathrm{h}} + P_{\mathrm{a}} + \frac{2\sigma}{R} \tag{1}$$

式中：P_{h} 为铁水静压力，$\mathrm{N/m^2}$；P_{a} 为大气压力，$\mathrm{N/m^2}$；σ 为铁水表面张力，N/m；$\frac{2\sigma}{R}$为铁水表面张力所产生的附加压力，$\mathrm{N/m^2}$。

由式(1)可知，铁水表面张力越大，要形成气泡并长大所需要的气泡压力越大。即铁水表面张力越大，越不容易产生气泡[9]。

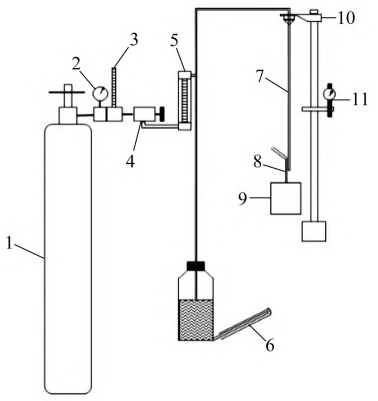
表面张力的测量方法很多，总体上可分为动态法和静态法两类。动态测量方法主要有毛细管波法和振荡射流法，但其测量误差较大，实际应用很少；静态测量方法主要有毛细管上升法、最大气泡压力法、座滴法和电磁悬浮法等[10-13]。

用气泡最大压力法测量铁水表面张力的装置如图 1 所示。图 1 中，气体使用高纯度氩气，以确保吹入铁水的气体不含氧和水，防止其影响测量精度。氩气由氩气瓶释放，流经压力表，流量计，经针阀调节后流入浮子流量计，使气体流量达到合适范围。气体分别进入毛细管和斜压计，斜压计与水平面成 30°夹角。摇动毛细管夹持器使其下降，当管口达到铁水表面时暂停，然后调整百分表的零点，继续下移夹持器横臂，使毛细管插入铁水适当深度。表面张力可以通过式(2)计算：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\sigma=\frac{gr_{管}}{2}\left[\frac{1}{2}(\rho_m h_{末}-\rho_m h_{始})-\rho_{铁水}h_{铁水}\right] \quad (2)$$

式中：σ 为铁水表面张力，N/m；g 为重力加速度，取 9.80 m/s^2；$r_{管}$ 为毛细管半径，m；ρ_m 为斜压计内液体密度，kg/m^3；$h_{始}$ 为毛细管接触铁水表面时，斜压计内液柱高度，m；$h_{末}$ 为气泡压力最大时，斜压计内液柱高度，m；$\rho_{铁水}$ 为铁水容器中铁水的密度，kg/m^3；$h_{铁水}$ 为毛细管插入铁水中的深度，m。



1—氩气瓶；2—压力表；3—流量计；4—针阀；5—流量计；6—斜压计；7—毛细管夹持器；8—毛细管；9—铁水容器；10—夹持器横臂；11—百分表。

图1 气泡最大压力法实验装置[14]

Fig. 1 Schematic diagram of the maximum bubble pressure method

用座滴法在纯氩气气氛中测量液体 Fe-C-S-O 合金表面张力的实验装置如图 2 所示。在整个实验过程中，这个装置被放置在一个单独的熔炉中，熔炉温度保持在 700 ℃，样品的温度通过放置在样品正上方的热电偶进行测量。铁块中含有少量的碳和硫，样品用磨料抛光，并用丙酮清洗表面，然后将样品放置在氧化铝坩埚中进入熔炉，同时用液压将氧化铝底座抬高，直到样品高度与炉壳的两个石英窗孔对齐，然后用真空泵将炉腔抽到大约 1 Pa 的压力，氩气通入含有样品的炉腔，将包含石墨加热元件的外室抽空，在整个实验过程中不断通入氩气，以避免对加热元件的任何损坏。将炉体加热到所需温度，让样品保持液滴状约 10 min，使用 X 射线设备以 1 帧/s 的速度拍摄 1 min 左右的视频，对给定样本在给定温度下拍摄的视频进行分析，得到不同时间间隔的图像，对多幅图片进行分析，并取平均值作为其表面张力值[15]。

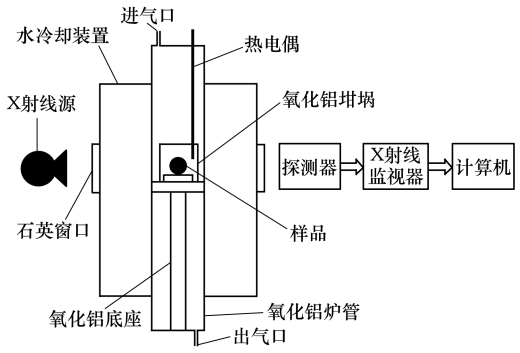


图2 座滴法实验装置[15]

Fig. 2 Schematic diagram of sessile drop method

除上述传统方法外，还可以用电磁悬浮液滴振荡法，其原理是通过叠加静磁场抑制熔体内对流和振荡变形。该方法可以有效避免容器对样品的污染以及容器壁对熔体的影响，有利于提升高温熔体表面张力的测量精度[16-18]。

1.2 渣铁界面行为的研究

为了实现“零碳炼铁”，未来非高炉炼铁工艺中可能会将还原剂从天然气转向氢气。然而，生产出来的铁必须经过熔炼才能精炼，为了生产高质量的钢铁产品，还需要将铁水从炉渣中分离出来。同时，其他还原剂无法代替碳而不影响铁水的质量，而渗碳反应引起的铁熔化是渣铁分离的主要因素，Fe-C 熔体界面张力的增加是渣铁分离的条件，因此即使在“零碳炼铁”中，要使分离顺利，也需要一定量的碳[19-22]。

铁水和炉渣的分离过程主要包括 3 个步骤：第一阶段，铁矿石和焦炭发生直接接触，发生还原反应；第二阶段，炉渣中的铁氧化物发生熔融还原；第三阶段，由于渗碳，金属和炉渣分离成两相。铁水与炉渣界面张力的增大是渣铁分离的主要原因，即使是低碳炼铁工艺，也会添加少量的碳来使渣铁分离顺利进行[23]。

测量渣铁界面张力时，会受到表面活性元素以及熔渣与容器反应等因素的干扰，最常用的方法是 X 射线液滴法和毛细管压力测量法。X 射线液滴法是通过对液滴形状的拟合，来测量动态变化中渣铁界面张力变化，其主要缺点是随着界面张力的变化，液滴面积会不断变化，

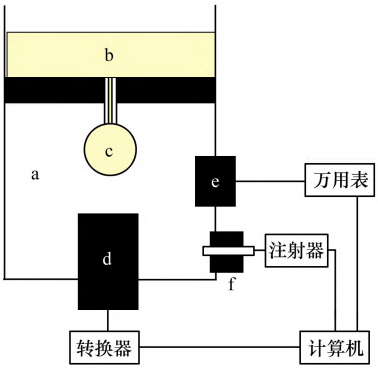
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而实际上可以通过金属液滴体积和形状的变化而得到界面面积的变化。

用毛细管压力法测量渣铁界面张力的试验装置如图 3 所示。该试验装置由两个装有两种液体的堆叠容器组成，并通过玻璃毛细管连接，上部容器与大气相连，下部容器封闭，液滴形成于玻璃毛细管尖端处，位于在封闭的腔室中，通过压力传感器测量界面处压力差，而液滴半径可以通过图像测量得到的液滴体积计算得到。渣铁界面张力计算见式(3)。

$$\Delta P_{\mathrm{cap}}(\mathrm{t}) = \frac{2\gamma(t)}{R(t)} \tag{3}$$

式中：ΔP_{cap}为毛细管压力差，N/m^2；$R(t)$为液滴曲率半径，m；$\gamma(t)$为渣铁界面张力，N/m[24]。



a—液体 1；b—液体 2；c—毛细管和液滴；d—压电杆；e—压力传感器；f—真空管。

图 3　毛细管压力法实验装置[24]

Fig. 3　Diagram of the capillary pressure tensiometer

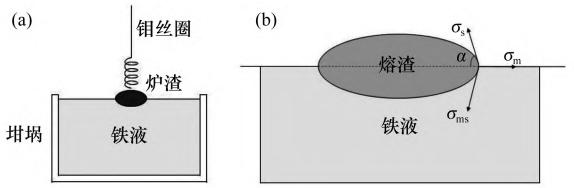
毛裕文等[25]采用浮滴法测量渣铁界面张力的实验装置及原理图如图 4 所示。图 4 中，在高温炉中心的正上方开一小孔，待坩埚中生铁熔化后，使用钼丝圈将圆柱状的熔渣放置于铁液表面，待渣滴稳定后对渣铁进行拍照，通过式(4)计算得到渣铁界面张力。

$$\sigma_{\mathrm{ms}}^2 = \sigma_{\mathrm{m}}^2 + \sigma_{\mathrm{s}}^2 - 2\sigma_{\mathrm{m}}\sigma_{\mathrm{s}}\cos\alpha \tag{4}$$

式中：σ_{ms}为渣铁界面张力，N/m；σ_{m}为铁液表面张力，N/m；σ_{s}为熔渣表面张力，N/m；α为熔渣与金属间接触角，rad。

1.3　铁水黏度及熔化性温度的研究

铁液的黏度被认为是影响炉缸侵蚀的重要



（a）浮滴法实验装置；（b）浮滴法测渣铁界面张力原理示意

图 4　浮滴法测渣铁界面张力示意[25]

Fig. 4　Schematic diagram of floating drop method

因素之一，在钢铁冶炼过程中，铁水黏度过高也会导致粘罐问题的发生，不利于渣铁分离过程的进行[23,26-27]，因此讨论铁水成分对于铁水黏度的影响，对于维持钢铁冶炼过程的稳定顺行，维持高炉长寿有重要意义。经前人[28-29]的研究，黏度计算模型已较为成熟，由于其只适用于部分简单渣系，因此黏度的试验测量方法仍是最直接有效的方法，其主要有旋转法、震荡法、细管法等[30-33]。

旋转法测铁水黏度的原理为在两个圆筒之间填充待测液体，匀速转动内圆筒，在黏滞力作用下，两筒之间的待测液体在水平方向上形成速度梯度。当黏滞力作用在内圆筒上，改变内筒原有转矩，通过测量转矩的变化便可间接获得待测液体的黏度[34]。

用振荡黏度计测量铁水黏度的装置如图 5 所示。图 5 中，坩埚通过悬杆悬挂在炉内，与悬杆相连的镜面由薄铂合金丝悬挂，振荡通过给予启动器的旋转力来实现。在检测系统中，反射镜反射来自激光源的激光，通过监测点的时间差由光电晶体管记录下来，通过计算机处理的数据可以计算出铁水的黏度。

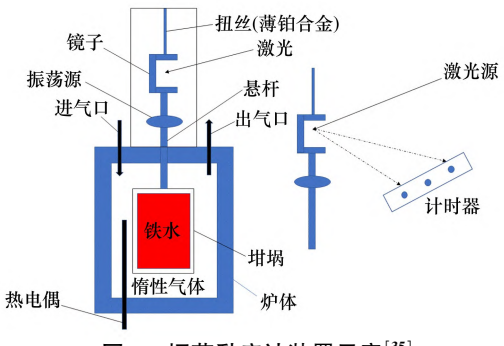


图 5　振荡黏度计装置示意[35]

Fig. 5　Schematic diagram of the oscillating viscometer

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

熔化温度是炉渣加热时完全熔化为液相的温度或液态炉渣冷却时开始析出固相的温度，但是熔化温度较低，在较低温度下能完全熔化的炉渣，其流动性并不一定好。更具有实际意义的是炉渣的熔化性温度，即炉渣从不能流动转变为能自由流动的温度。研究铁基熔体的物性，对于明确炼铁生产过程及反应机理，指导炼铁操作有着重要的意义。

熔体黏度随温度变化曲线如图 6 所示，取黏度 - 温度曲线斜率为 - 1 时所对应的温度作为该样品的熔化性温度，对于没有明显黏度突变点的酸性渣，普遍采用该方法确定熔渣的熔化性温度。

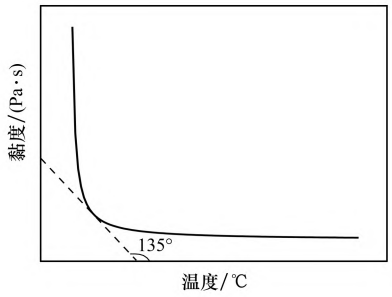


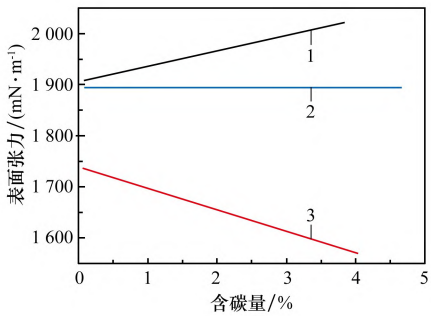
图 6 典型黏度 - 温度曲线[30]

Fig. 6 Typical Viscosity-Temperature curves

2 含碳量对铁水物料性能的影响

2.1 含碳量对铁水表面张力的影响

含碳量对铁水表面张力的研究尚未得到一致的结论(图 7)。KAWAI 等[36]认为含碳量的增加会降低铁水表面张力；JIMBO 等[37]认为含碳量的增加会提高铁水表面张力；而 JOONHO 等[38]则认为碳对于铁水表面张力没有影响，铁水中的碳是通过影响其他活性元素的吸附情况来间接影响表面张力的。

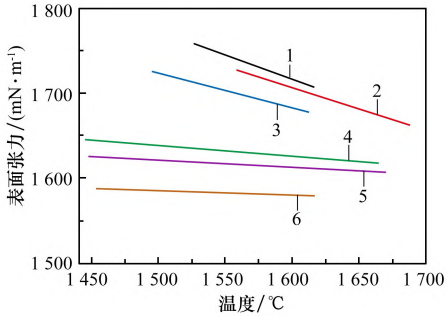


1—JIMBO 数据；2—JOONHO 数据；3—KAWAI 数据。

图 7 1 873 K 时 Fe-C 熔体表面张力与碳浓度的关系[39]

Fig. 7 Carbon concentration dependence of surface tension of Fe-C melt at 1 873 K

KAWAI 等[36]用无柄液滴法研究铁碳合金表面张力，结果如图 8 所示。由图 8 可知，随着温度的升高和含碳量的增加，铁碳合金表面张力逐渐减小，而温度对其表面张力的影响程度随着含碳量的增加而减弱。



含碳量/%：1—0.09；2—0.38；3—1.00；4—2.20；5—3.00；6—4.00。

图 8 Fe-C 合金表面张力与温度和含碳量的关系[36]

Fig. 8 Temperature and carbon concentration dependence of surface tension of Fe-C melt

JIMBO 等[37]研究了 1 550 ℃时铁碳合金表面张力随含碳量变化趋势，结果如图 9 所示。由图 9 可知，随着含碳量的增加，铁水表面张力逐渐增加，考虑到部分学者的结论是张力随含碳量增加而降低，本文认为他们的实验结果是含碳量的增加对硫表面活性的增加而引起的。因此，又研究了不同含硫量的铁碳合金中含碳量对铁水表面张力的影响，如图 10 所示。由图 10 可知，对于硫含量为 0.001% 的铁碳合金，随着含碳量的增加，表面张力呈线性增加趋势；对于含硫量为 0.007%，含碳量为 4% 的铁碳合金，其表面张力基本不随含碳量的增加而改变；而对于含硫量为 0.020%，含碳量为 4% 的铁碳合金，随着含碳量的增加，表面张力会降低。可以认为在含硫量为 0.001 ~ 0.007 的范围内，碳会增加硫的活性，从而导致铁水表面张力下降，而同时碳本身会导致铁水表面张力增加，二者作用抵消，从而造成了铁水表面张力不随含碳量增加而改变的现象。当含硫量在 0.005% 以上时，Fe-4% C-S 合金表面大部分位置可能被

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

硫和铁所覆盖，碳吸附对被吸附元素之间相互作用的影响可以忽略。在 Fe-C-S 合金中，只有在含硫量小于 0.005% 时，含碳量对铁水表面张力的影响才会显现出来。

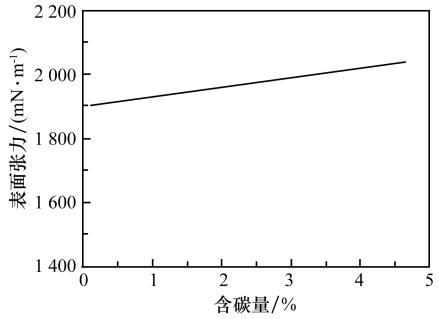
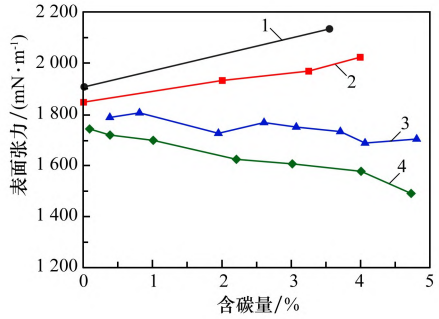


图 9　1 550 ℃铁碳合金表面张力随含碳量变化趋势[37]

Fig. 9　Carbon concentration dependence of surface tension of Fe-C melt at 1 550 ℃



含硫量/%：1—0.0003；2—0.001；3—0.007；4—0.020。

图 10　不同含硫量的铁碳合金表面张力随含碳量变化趋势[38]

Fig. 10　Carbon and sulphur concentration dependence of surface tension of Fe-C melt

由于氧是一种强的表面活性元素，因此氧的存在不利于分析含碳量对 Fe-C 熔体表面张力的影响，即控制氧活性是探究含碳量对 Fe-C 熔体表面张力影响行为的关键。研究发现当氧分压小于 10^{-10} Pa 时，可消除其对于熔体表面张力的影响。MOROHOSHI 采用了 Ar-He-CO-CO_2 混合气体的气液平衡法，在保持低碳活性的情况下精确控制氧活性，证实了铁水表面张力与含碳量无关，铁水表面张力是氧活度和温度的函数[39]：

$$\sigma = (1\ 925 \pm 65) - (0.455 \pm 0.034) \times (T - 1\ 808) - 0.155T\ln\{1 + e[\frac{(4.27 \pm 0.04) \times 10^4}{T} - (10.1 \pm 0.3)]a_{O_2}^{1/2}\} \quad (5)$$

式中：σ 为铁水表面张力，mN/m；T 为热力学温度，K；a_{O_2}为氧活度。

由于使用密度恒定的铁水进行张力计算，没有考虑碳对铁水密度的影响，而铁水密度随着含碳量的增加而减小，JIMBO 等[37]考虑熔体密度并重新计算熔体表面张力，发现 Fe-C 熔体的表面张力与含碳量无关。此外，实验发现，在 1 873 ~ 1 973 K 温度下，当 $a_{O_2} = 10^{-12}$，碳活性为$10^{-3} \sim 10^{-2}$时，Fe-C-O 熔体的表面张力与碳活性无关，考虑到熔体中氧和碳的相互作用，可将表面张力定义为碳、氧浓度和温度的函数。碳本身对表面张力没有影响，然而，碳会降低熔体中的氧活性，从而增加了表面张力[40]。YIN 等[41]通过对铁碳界面进行分子动力学模拟研究发现，铁水表面吸附的氧原子与距离其最近的碳原子之间的距离约为 1.40×10^{-10} m，而 C-O 单键约为 1.36×10^{-10} m，这表明碳原子与氧原子之间为化学吸附。KOJIMA 等[42]对Fe-C 合金表面熔化行为进行动力学模拟分析发现，熔化温度随含碳量的增加而降低，而熔融相最外层没有 C 原子存在，导致表面活性效应不显著。

FUKUYAM 等[43]研究渗碳及脱碳过程中铁水表面张力的变化情况发现，在渗碳过程中，在气相氧活性$\log_{a_{O_2}} = -12$ 时，改变气体组成引起的温度变化在 15 K 以内时，表面张力显著降低至 1 650 mN/m，随后在 300 s 内逐渐增大后保持不变。他们认为整体渗碳过程可以分为以下 5 个反应：

$$CO(g) = CO(ad) \quad (6)$$

$$CO(ad) = C(ad) + O(ad) \quad (7)$$

$$C(ad) = [C], O(ad) = [O] \quad (8)$$

$$O(ad) + CO(g) = CO_2(ad) \quad (9)$$

$$CO_2(ad) = CO_2(g) \quad (10)$$

式中：ad 代表在铁水表面。

并且，铁水表面张力的迅速下降由式(6)和式(7)引起，由于这两个反应的发生，导致铁水表面吸附的氧原子增加，而氧是表面活性元素，因此会出现上述情况；根据式(7)和式(8)，被

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

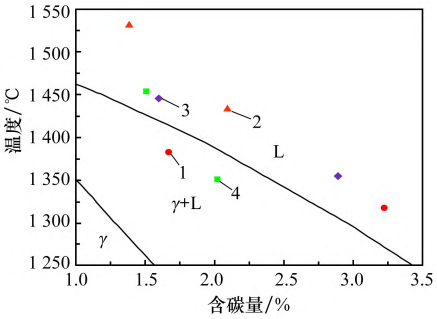
吸附的碳原子溶解到铁熔体中，使铁水表面张力降低；而根据式(9)和式(10)，铁水表面吸附的氧原子与 CO 气体发生反应，生成 CO_2 气体，在这一过程中，铁水表面张力增大。脱碳过程中表面张力的变化行为也可以解释为铁水表面吸附氧原子数的变化。

总结前人经验可以得出，由于氧是一种强表面活性元素，其存在会影响含碳量对铁水表面张力的控制行为，因此须在控制氧分压低于 10^{-10} Pa 的条件下进行含碳量对铁水表面张力影响行为的研究[40]。在此条件下的实验表明，铁水表面张力的变化可能并非是由含碳量的变化直接导致的，而是含碳量的变化引起氧和硫等表面活性元素的吸附情况发生变化而间接引起的，铁水表面张力是氧活度和温度的函数，即随着氧活度的增加和温度的升高，铁水表面张力呈下降趋势。

2.2 含碳量对渣铁界面行为的影响

OHNO 等[23]观察了加热过程中的渣铁分离现象，当开始出现 Fe-C 熔体时，样品形状发生改变，初渣渗出到表面，随着反应进行，液态熔渣逐渐呈球形，最终完成渣铁分离。

图 11 是碳浓度与渣铁分离温度的关系，其中，4 种渣系在渣铁分离温度下的部分物理性质如表 1 所示。从图 11 可以看出，随着含碳量的增加，渣铁分离温度下降，并且有部分渣铁分离温度位于液相线以下，表明铁完全熔化并非渣铁分离的必要条件。在炉渣成分不变的情况下，随着含碳量的增加，渣铁界面张力上升。当碳浓度较低时，Fe-C 熔体的界面张力随着 SiO_2 质量分数的增加而降低，而随着碳浓度的增加，这种趋势减弱[23]。



1—炉渣 A；2—炉渣 B；3—炉渣 C；4—炉渣 D。

图 11 渣铁分离温度与含碳量关系

Fig. 11 Relationship between the metal-slag separation temperature and carbon concentration in the iron part after the metal-slag separation

表 1 不同炉渣在渣铁分离温度下的部分物理性质[23]

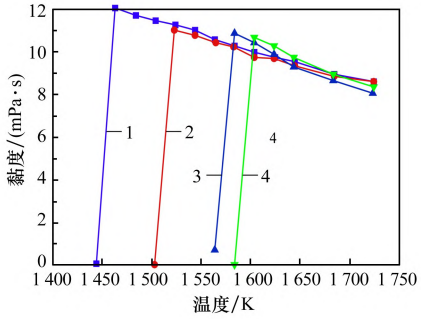
Table 1 Slag compositions at the separation temperatures with physical properties and liquid phase ratios

试样	分离温度/℃	含碳量/%	液相铁占比/%	炉渣成分(质量分数)/%			液相渣占比/%	表面张力/(mN·m^{-1})	界面张力/(mN·m^{-1})
				Al_2O_3	CaO	SiO_2			
炉渣 A	1 376	1.67	66.2	20.5	37.9	41.6	100.0	444	1 210
	1 317	3.22	100.0	20.5	37.9	41.6	100.0	443	1 260
炉渣 B	1 527	1.39	100.0	30.0	36.8	33.2	100.0	475	1 220
	1 421	2.09	100.0	28.6	36.0	35.4	83.4	466	1 230
炉渣 C	1 444	1.60	100.0	21.0	25.6	53.4	100.0	407	1 186
	1 353	2.89	100.0	17.3	26.9	55.8	80.6	398	1 236
炉渣 D	1 453	1.51	100.0	21.0	22.1	56.9	100.0	397	1 175
	1 351	2.02	74.2	17.2	22.6	60.2	80.5	385	1 192

2.3 含碳量对铁水黏度及熔化性温度的影响

图 12 为含碳量及温度对铁水黏度的影响。由图 12 可知，随着温度的降低，铁水黏度先升高后降低，并且可以发现，随着含碳量的升高，转折点温度降低。由于当坩埚内的铁水开始沉淀或凝固时，坩埚内体与坩埚侧壁的摩擦阻力变小，会导致黏度降低，因此可以认为转折点前后的黏度分别对应铁水的黏度性质和凝固性质。转折点温度略高于相图中液相线温度，可以用碳在铁水中的析出来解释：含碳量越高，在铁水中越容易析出，随着[C]=C 反应的进行，析出速度取决于碳向界面扩散的速度。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



含碳量/%：1—4.5；2—4.0；3—3.5；4—3.0。

图 12　含碳量及温度对铁水黏度的影响[35]

Fig. 12　Effects of carbon concentraition and temperature on the viscosity of molten iron

滕新营等[44-45]指出，对于 Fe-C 二元合金熔体，当含碳量在 2.00% 至 Fe-C 二元合金的共晶点所对应含碳量这一区间内，同一温度下，合金熔体的过热度增大会增大合金熔体的自由容积，进而降低合金熔体的黏度。在较高温度下，Fe-C 合金的黏度会出现随时间延长先下降后上升的现象，可能是因为碳原子均匀分布于液态合金中，碳原子与铁形成类似面心立方排列的有序区域；当温度降至熔点附近时，部分结合力较强的 Fe-C 原子团的共价键被破坏，液态合金黏度下降；当游离碳原子聚集成尺寸较大的石墨原子团时，熔体中原子扩散能力降低，使得合金黏度增大。碳元素除了与 Fe 相互影响外，还可能由于含碳量过高，随温度降低，碳元素与铁水中的 V、Cr、Ti 等元素相互作用，形成高熔点的质点从铁水中析出，从而影响铁水黏度。

文光远等[46]在攀钢生铁中配加不同量的高纯石墨碳粉，得到不同含碳量的试样，对试样分析发现。随着含碳量的升高，铁水熔化性温度呈现先降低后升高的趋势，熔化性温度最低为 1 180 ℃，对应的含碳量为 4.4%。查阅 Fe-Ti-C相图可以发现，含碳量 4.4% 恰好是共晶点，在降低铁水温度时液相中析出的固相物质最少。

3　结　论

本文通过阐述国内外研究学者对碳在铁基熔体中的作用行为进行的研究，得到如下结论。

（1）铁水表面张力与铁产品表面和内部质量密切相关，含碳量与其没有直接关系，但含碳量会影响氧、硫等表面活性元素的在铁水表面的吸附状况，从而影响其表面张力。

（2）渣铁界面张力的增大是渣铁分离的重要条件，因此许多低碳炼铁工艺有时也会添加少量碳，以促进渣铁分离的顺利进行。渣铁界面张力与含碳量、温度、炉渣成分，以及渣铁界面处氧的分布情况有关。

（3）黏度过高会造成炉缸侵蚀，不利于渣铁分离的进行，随着温度的降低，铁水黏度先升高，当温度降低至铁水熔点以下，黏度又迅速降低，且随着含碳量的升高，转折点温度降低；炉渣的熔化性温度，即炉渣从不能流动转变为能自由流动的温度，对指导高炉操作有重要意义，随着含碳量的升高，铁水熔化性温度呈现先降低后升高的趋势。

参考文献：

[1] 习近平．在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]．中华人民共和国国务院公报，2020(28)：3.
XI Jinping. Address at the general debate of the seventy-fifth session of the united nations general assembly[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2020(28):3.

[2] 习近平．开启全球应对气候变化新征程[J]．瞭望，2020(51)：6－7.
XI Jinping. Embark on a new global journey to tackle climate change[J]. Outlook, 2020(51):6－7.

[3] 李克强．政府工作报告——2021 年 3 月 5 日在第十三届全国人民代表大会第四次会议上[EB/OL](2021－03－25)[2021－12－18]. http://www.gov.cn/guowuyuan/zfgzbg.htm.
LI Keqiang. Government work report-delivered at the fourth session of the 13th national people's congress on march 5, 2021[EB/OL](2021－03－25)[2021－12－18]. http://www.gov.cn/guowuyuan/zfgzbg.htm.

[4] 张晓华，师学峰，赵凯，等．非高炉炼铁工艺流程发展现状及前景展望[J]．矿产综合利用，2020(2)：8－15.
ZHANG Xiaohua, SHI Xuefeng, ZHAO Kai, et al. Development status and prospect of non blast furnace ironmaking process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):8－15.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[5] 朱仁良. 关于未来炼铁技术发展的探讨[C]//中国金属学会. 2019年全国高炉炼铁学术年会摘要集. 北京:冶金工业出版社,2019:14-20.
ZHU Renliang. Discussion on the future development of ironmaking technology [C]//The Chinese Society for Metals. Abstract collection of 2019 national BF ironmaking academic annual conference. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019:14-20.

[6] 应自伟,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析[J]. 河北冶金,2019(6):1-7;31.
YING Ziwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current situatioin and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process[J]. Hebei Metallurgy, 2019(6):1-7; 31.

[7] 李新创,李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁,2019,54(8):224-231.
LI Xinchuang, LI Bing. Low carbon transition path of China's iron and steelindustry under global temperature-control target [J]. Iron and Steel, 2019, 54(8):224-231.

[8] 郑少波. 氢冶金基础研究及新工艺探索[J]. 中国冶金,2012,22(7):1-6.
ZHENG Shaobo. Basic research on hydrogen metallurgy and new ironmaking idea-process [J]. China Metallurgy, 2012, 22(7):1-6.

[9] 李汉麟,黄列群. 球墨铸铁皮下气孔与铁水表面张力关系的探讨[J]. 现代铸铁,1989(2):50-53.
LI Hanlin, HUANG Liequn. Relation of pinhole of ductile iron casting to surface tension of melted iron [J]. Modern Cast Iron, 1989(2):50-53.

[10] 范建峰,袁章福,柯家骏. 高温熔体表面张力测量方法的进展[J]. 化学通报,2004,67(11):802-807.
FAN Jianfeng, YUAN Zhangfu, KE Jiajun. Development in measuring surface tension of high temperature molten liquid [J]. Chemistry Bulletin, 2004, 67(11):802-807.

[11] 李大勇,石德全,李峰,等. 液态合金表面张力检测技术研究与应用的进展[J]. 铸造,2004,53(1):12-17.
LI Dayong, SHI Dequan, LI Feng, et al. Research and application development of the techonology for testing melt surface tension[J]. China Foundry, 2004, 53(1):12-17.

[12] 窦磊,李建强,袁章福. 微重力环境下的表面张力及无接触测量[J]. 空间科学学报,2009(1):150-153.
DOU Lei, LI Jianqiang, YUAN Zhangfu. Comprehension and non-contact measurement of surface tension under microgravity [J]. Chinese Journal of Space Science, 2009(1):150-153.

[13] ZHOU Y Z, GAYDOS J. Criteria for evaluating the accuracy of surface tension values from digital vision vision systemes[J]. Journal of Adhesion, 2004, 80(10-11):1017-1053.

[14] 苏应龙. 液体金属的表面张力与冶金质量的控制[J]. 新技术新工艺,1985(5):4-6.
SU Yinglong. Surface tension and metallurgical quality control of liquid metals [J]. New Technology & New Process, 1985(5):4-6.

[15] DIVAKAR M, HAJRA J P, JAKOBSSON A, et al. Thermodynamics of surfaces and adsorption in the Fe-C-S-O system[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2000, 31(2):267-276.

[16] MATSUSHITA T, WATANABE T, HAYASHI M, et al. Thermal, optical and surface/interfacial properties of molten slag systems[J]. International Materials Reviews, 2011, 56(5-6):287-323.

[17] 石德全. 液态合金表面张力快速检测及相关质量参数实时评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2007.
SHI Dequan. Research on fast tesing surface tension of the molten alloy and real time evaluating relative quality parameters[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007.

[18] 冯林,石万元. 静磁场对电磁悬浮熔融液滴表面张力测量影响的研究[J]. 工程热物理学报,2021,42(7):7.
FENG Lin, SHI Wanyuan. The influence of static magnetic field on measurements of surface tension of an electromagnetically levitated molten droplet[J] Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(7):7.

[19] HYUNSOO K, GYU K J, YASUSHI S J I. The role of molten slag in iron melting process for the direct contact carburization: wetting and separation [J]. ISIJ International, 2010, 50(8):1099-1106.

[20] MICHAEL W, CHAPMA N, et al. Observations of the mineral matter material present at the coke/iron interface during coke dissolution into iron[J]. ISIJ International, 2007, 47(7): 973-981.

[21] OHNO K I, MIKI T, SASAKI Y, et al. Carburization degree of iron nugget produced by papid heating of powdery iron, iron oxide in slag and carbon mixture[J]. ISIJ International, 2008, 48(10):821-826.

[22] OHNO K I, KAIMOTO M, MAEDA T, et al. Effect of slag melting behavior on metal-slag separation temperature in powdery iron, slag and carbon mixture [J]. ISIJ International, 2011, 51(8):1279-1284.

[23] OHNO K I, NATSUI S, SUKENAGA S, et al. Numerical approach to somprehend for effect of melts physical properties on iron-slag separation behaviour in self-reducing pellet[J]. ISIJ International, 2020, 60(12):2695-2704.

[24] RAVERA F, FERRARI M, LIGGIERI L, et al. Adsorption and partitioning of surfactants in liquid-liquid systems[J].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Advances in Colloid & Interface Science, 2000, 88(1 – 2): 129 – 177.

[25] 毛裕文,罗维忠,陆富荣,等. 含钛高炉渣与生铁间表面张力测定[J]. 钢铁,1987(4):14 – 17.
MAO Yuwen, LUO Weizhong, LU Furong, et, al. Determination of interface tension between blast furnace slag containing titanium oxides and hot metal[J]. Iron and Steel, 1987(4): 14 – 17.

[26] 郁庆瑶,张龙来,林成城. 高炉炉渣流动性的实验研究[J]. 宝钢技术,2002(3):37 – 40.
YU Qingyao, ZHANG Longlai, LIN Chengcheng. Research of blast furnace slag fluidity[J]. Baosteel Technology, 2002(3): 37 – 40.

[27] 李玉华. 高炉渣成份对其流动性影响的试验研究[C]//中国金属学会. 第八届全国冶金工艺理论学术会议论文专辑. 北京:冶金工业出版社,2005:528 – 531.
LI Yuhua. Experimental study on the influence of composition of blast furnace slag on its fluidity[C]//The Chinese Society for Metals. Paper album of the 8th National Academic Conference on Metallurgical Process Theory. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 528 – 531.

[28] GUO Zhi, TENG Li. Viscosity of silicate melts[J]. Journal of the Ceramic Association Japan, 1982, 90 – 95.

[29] LIDA T, SAKAI H, KITA Y, et al. Equation for estimating viscosities of industrial mold fluxes[J]. High Temperature Materials & Processes, 2000, 19(3 – 4): 153 – 164.

[30] 顾攀. 含钒铬铁水黏度及熔化性温度研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
GU Pan. Investigation on viscosity and melting temperature of V-Cr containing hot metal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[31] 胡玉盆. Al_2O_3 对高炉渣冶金性能的影响及黏度预测模型[D]. 沈阳:东北大学,2016.
HU Yupen. Effect of Al_2O_3 on metallurgical properties of BF slag and viscosity prediction model[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.

[32] 唐续龙,马明生. 熔渣黏度模型介绍及其预报效果比较[J]. 中国有色冶金,2015(1):18 – 23;55.
TANG Xulong, MA Mingsheng. Introduction of slag viscosity model and comparison of prediction effect[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2015(1): 18 – 23; 55.

[33] HAN Chen, CHEN Mao, ZHANG Weidong, et al. Viscosity model for iron blast furnace slags in SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO system[J]. Steel Research International, 2015, 86(6): 678 – 685.

[34] 王华. 高钛高炉渣变稠规律的实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
WANG Hua. Experimental study on thickening mechanism of blast furnace slag bearing titanium[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[35] DENG Y, ZHANG J L, JIAO K X. Viscosity measurement and prediction model of molten iron[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(8): 773 – 777.

[36] KAWAI Y, MORI K, KISHIMOTO M, et al. Surface tension of liquid Fe-C-Si alloys[J]. Tetsu-to-Hagane, 1974, 60(1): 29 – 37.

[37] JIMBO I, CRAMB A W J I I. Computer aided interfacial measurements[J]. ISIJ International, 1992, 32(1): 26 – 35.

[38] LEE J, MORITA K J S R. Effect of carbon and sulphur on the surface tension of molten iron[J]. Steel Research, 2002, 73(9): 367 – 372.

[39] MOROHOSHI K, UCHIKOSHI M, ISSHIKI M, et al. Surface tension of liquid iron as functions of oxygen activity and temperature[J]. ISIJ International, 2011, 51(10): 1580 – 1586.

[40] MOROHOSHI K, UCHIKOSHI M, ISSHIKI M, et al. Effects of carbon and oxygen on Fe-C-O melt surface tension[J]. ISIJ International, 2013, 53(8): 1315 – 1319.

[41] YIN Y, LI W, SHEN H, et al. Molecular dynamics simulations of iron/graphite interfacial behaviors: Influence of oxygen[J]. ISIJ International, 2018, 58(6): 1022 – 1027.

[42] KOJIMA R, SUSA M J S, MATERIALS T O A. Melting of thin γFe-C films having(100), (110) and (111) surfaces in terms of molecular dynamics simulation[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2004, 5(5 – 6): 677 – 682.

[43] FUKUYAMA H, MOROHOSHI K, UCHIKOSHI M, et al. Dynamic surface tension behavior of liquid iron during carburization and decarburization processes[J]. ISIJ International, 2014, 54(9): 2109 – 2114.

[44] 滕新营. 铁基合金的液态结构与物性研究[D]. 济南:山东大学,2002.
TENG Xinying. Study on liquid structure and physical properties of Fe-based alloys[D]. Jinan: Shandong University, 2002.

[45] 滕新营,刘含莲,王焕荣,等. Fe-C 共晶合金的液态结构和粘度[J]. 钢铁研究学报,2002,14(3):5 – 8.
TENG Xinying, LIU Hanlian, WANG Huanrong, et al. Liquid structure and viscosity of Fe-C eutectic alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(3): 5 – 8.

[46] 文光远,鄢毓章,周培土,等. 攀钢高炉铁水的性质[J]. 钢铁钒钛,1996,17(3):24 – 29.
WEN Guangyuan, YAN Yuzhang, ZHOU Peitu, et al. Properties of hot meal in blast furnace at panzhihua iron and steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1996, 17(3): 24 – 29.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net