



CO₂在炼钢工艺中的资源化利用现状与展望

邓浩华, 彭 锋, 李 晓

(冶金工业规划研究院, 北京 100013)

摘 要:将CO₂用于炼钢工艺可实现对CO₂资源化利用,是一种绿色化、低成本、高效率 and 易实现的冶炼技术。本文以采用CO₂炼钢工艺为立足点,介绍了近年来CO₂在转炉、电弧炉等流程的应用研究现状和发展情况。同时,结合基于钢铁企业的实际运用情况,概述了CO₂资源化利用在炼钢过程中的可行性和实际效果。CO₂可作为反应气体、保护气体、搅拌气体应用在炼钢工艺过程中,具有生产成本低、热力学条件好、搅拌能力强等优点,应用前景非常广阔。实际生产表明,采用CO₂炼钢可提高铁水脱磷率5%~7%,吨钢节约生产成本9元以上。CO₂在炼钢工艺中的资源化利用将是实现我国钢铁行业高效率、低成本减排的重点研究方向之一。以我国年产粗钢10亿t估算,采用CO₂炼钢工艺可降低钢铁行业CO₂总排放量约5%左右。

关键词:CO₂; 炼钢; 资源化利用; 节能降耗

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00140 **中图分类号:**TF703

Current Situation and Prospects of Resource Application of CO₂ in Steelmaking Process

Deng Haohua, Peng Feng, Li Xiao

(China Metallurgical Industry Planning and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Using CO₂ in steelmaking process can realize the utilization of CO₂ resources, which is a green, low cost, high efficiency and easy to achieve smelting technology. This article was based on the application of steelmaking CO₂ technology, the development and application of CO₂ in the converter and electric arc furnace in recent years were introduced. According to the domestic steel enterprises actual production situation, the practical effects of resource application of CO₂ in energy-saving, consumption reducing, and improving the quality of molten steel in steelmaking process were summarized. It also analyzed the current application status of CO₂ gas as reaction gas, stirring gas, etc. in steelmaking process. Application of CO₂ in steelmaking process had the advantages of lower cost, better thermodynamic conditions, stronger stirring ability, and higher gas calorific value, the application prospects can be very broad. The research results indicate that application of CO₂ in steelmaking process can increase the dephosphorization rate of molten iron by 5% to 7%, and save production costs of over 9 yuan per ton of steel. Resource application of CO₂ in steelmaking process will be one of the key research directions for achieving higher efficiency and lower cost emission reduction in China's iron and steel industry. Based on an estimated annual output of crude steel of 1 billion tons in China, application of CO₂ in steelmaking process can reduce the total CO₂ emissions of the iron and steel industry about 5%.

Key Words: CO₂; Steelmaking; Resource Application; Energy-saving and Consumption Reducing

近年来,CO₂排放引发的环境问题已引起国际社会的广泛关注,欧盟、日本、韩国等世界上的主要产钢地区陆续制定了相应的发展规划和技术路线来实现碳减排目标,见表1。2003年,国际钢铁协会(Worldsteel)公布了11项指标来评价钢铁行业的可持续发展,其中,CO₂排放量作为指标之一被重点关注^[1]。在我国主要碳排放行业中,钢铁行业是纳入全国碳排放交易市场首批8个重点排放行业之一,是履行国家对气候变化目标责任的重要组成部分,CO₂排放量占到国内工业总排放量的15%左右^[2]。当前,我国钢铁工业主要以长流程炼钢为主,占比

约90%,短流程炼钢仅占比10%左右^[3-4],这就导致我国钢铁行业CO₂的排放强度显著高于世界平均水平。“做好碳达峰、碳中和工作”是我国的基本国策,是国家发展的重大战略部署。降低CO₂排放的同时对其进行资源化利用,从而实现钢铁行业低碳化和绿色化,是目前钢铁工业亟待解决的共性问题。

目前,钢铁行业的碳减排思路主要分三种:一是源头治理,即通过开发新工艺、采用能源替代等方式减少使用焦炭等化石能源;二是末端治理,即采用先进的CO₂封存技术,“捕获CO₂”;三是过程控制,即开发CO₂循环利用技术,将其资源化应用于生

表 1 世界各国钢铁工业 CO₂ 减排目标
Table 1 CO₂ emission reduction targets of iron and steel industry around the world

国家	减排目标
欧盟	到 2030 年, 欧洲钢铁工业 CO ₂ 排放量将比 2018 年减少 30% (比 1990 年减少约 55%), 到 2050 年将减少 80% ~ 95%
韩国	2030 年工业领域计划减排 CO ₂ 为 9 860 万 t
日本	2020 年, 日本钢铁业的 CO ₂ 排放量将比 2005 年减少 200 万 t; 到 2030 年, CO ₂ 减排量比 2005 年减少 900 万 t
中国	CO ₂ 排放力争 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和

产过程中。CO₂ 化学性质较为稳定, 无毒无害, 不可燃烧, 可与某些元素在一定条件下发生化学反应。鉴于 CO₂ 广泛存在于钢铁企业生产过程中^[5-6], 将 CO₂ 资源化应用于炼钢工艺中可实现 CO₂ 的减排以及降本增效, 达到一举两得的目的。本文基于国内外多家科研机构与企业对 CO₂ 炼钢工艺的研究与生产应用情况, 概述了 CO₂ 在钢铁生产过程中的资源化利用效果, 旨在为我国钢铁行业的绿色低碳转型, 实现高质量发展提供相关资料。

1 CO₂ 在炼钢工艺中的研究与应用现状

1.1 CO₂ 用于炼钢的理论研究

CO₂ 与氧气相比, 其氧化性较弱, 在高温条件下可与铁水中的 [C]、[Si]、[Mn] 等元素发生氧化反应^[7-9]。同时, 还会产生 CO, 从而增加煤气量, 提高煤气热值, 见表 2。

表 2 CO₂ 参与的氧化反应和相应 $\Delta G_0 = A + BT$ 关系式^[10]
Table 2 Oxidation reactions with CO₂ and the corresponding relation of $\Delta G_0 = A + BT$ ^[10]

化学反应式	A/(J·mol ⁻¹)	B/(J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)
[C]+CO ₂ =2CO	144 700	-135.48
1/2[Si]+CO ₂ =1/2(SiO ₂)+CO	-117 290	16.37
[Mn]+CO ₂ =(MnO)+CO	-122 050	38.66
[Fe]+CO ₂ =(FeO)+CO	4 343	-13.65

注: 式中, A、B 为常数; T 为温度, K

此外, 在特定温度条件下, CO₂ 气体可替代 N₂、Ar 和 C₂H₂, 作为炼钢搅拌气体和保护气体使用。不过与 Ar 和 N₂ 不同的是 CO₂ 可以与 [Si]、[Mn]、[Fe] 进行氧化反应, 并且在反应过程中气体的体积保持不变, 但由于存在 CO₂ 与 [C] 的氧化反应, 在转炉冶炼中期脱碳反应较为剧烈时, 可产生两倍于 CO₂ 体积的 CO, 增大了对熔池的搅拌能力^[11-12], 提高了铁水脱碳、脱磷等反应速率, 并且 CO₂ 的制取成本要远低于氩气。

1.2 CO₂ 作为炼钢反应气体的应用

将 CO₂ 应用于炼钢工艺, 其经济、社会、环境效益将非常显著。可减少温室气体排放, 降低炼钢过

程中烟尘和铁损的产生, 降低冶炼成本。

1.2.1 转炉顶吹 CO₂ 炼钢工艺

在转炉顶吹氧气炼钢过程中, 由于氧化反应较为剧烈, 导致富含氧化铁的烟尘产生量较大, 容易造成吹炼铁损高。同时, 采用传统的转炉顶吹工艺冶炼低碳钢时, 在吹炼末期, 脱碳反应急剧减弱, 炉渣氧化性提高, 导致炉衬侵蚀较为严重, 而且在后续钢液精炼过程中, 会增加脱氧合金的消耗量^[6, 13]。因此, 在转炉吹氧过程中混入一定量的 CO₂, 在对铁水进行脱碳的同时, 也可有效地降低钢中溶解氧的浓度以及渣中 (FeO) 的含量。此外, 与采用纯氧吹炼相比, CO₂ 可降低氧化反应热效应, 改善脱磷反应的热力学条件, 促进反应进行^[14]。通过 30 t 转炉顶吹 CO₂ 炼钢工艺脱磷工业实验研究表明, 采用 CO₂ 工艺, 出钢温度控制在 1 600 ~ 1 640 °C, 可提高铁水脱磷率约 7%, 降低钢渣中氧化铁含量约 5%^[15-17]。

北京科技大学朱荣教授团队通过采用冶金反应热力学分析, 结合热态实验研究了二氧化碳与氧气的混合喷吹炼钢工艺^[18]。根据热平衡理论计算得出, CO₂ 可参与钢液中 [C] 的氧化反应, 并且在转炉炼钢中, CO₂ 喷入量控制在 13% 以内, 同时减少废钢加入量, 可满足转炉炼钢过程中对热量的需求。随后, 课题组采用真空电弧炉进行了热态实验, 进一步证明了在满足炼钢过程热量要求的前提下, 在氧气射流中配加一定量的 CO₂ 可进行铁水脱碳反应, 从而达到冶炼的目的。此外, 该课题组对采用 CO₂ 炼钢对烟尘产生量的影响进行了研究^[19], 发现利用 CO₂ 来减少炼钢过程中产生的烟尘量, 既循环利用 CO₂ 减轻了温室效应, 又提高了金属收得率, 可作为一种节能减排新思路。

目前, 作为转炉采用 CO₂ 炼钢工艺已完成首钢京唐 300 t 转炉炼钢 CO₂ 资源化应用的示范工程, 实现吨钢烟尘减排 9.95%、吨钢废钢铁料消耗降低 3.73 kg、吨钢煤气量增加 5.2 m³、吨钢 CO₂ 减排量 20 kg 以上^[20], 直接经济效益可达到 9 元/t 以上。

1.2.2 转炉底吹CO₂炼钢工艺

近年来,在转炉底吹CO₂炼钢工艺方面,日本对其进行了广泛的研究。采用该工艺后,熔池的搅拌能力得到了明显改善,提高了铁水去夹杂的能力。同时,由于CO₂参与脱碳反应的热效应相对降低,使得铁水脱磷的热力学条件得到了改善。日本福山厂的180 t和250 t转炉通过采用底吹CO₂炼钢技术,降低了生产成本,提高了铁水脱磷率。日本住友金属工业公司将含有CO₂的转炉废气作为底吹气体进行炼钢生产,同时回收熔池反应生成的CO,提高了转炉煤气热值^[21]。

20世纪90年代,鞍山钢铁也进行了转炉底吹CO₂炼钢工艺研究,结果表明,采用CO₂作为底吹气体,其搅拌效果较好。在鞍钢转炉工艺条件下,吹炼中后期可确保成品钢种的 $w[N]<50\times 10^{-6}$ 。同时,CO₂与O₂适当混合,可有效地控制喷嘴出口处形成蘑菇头的大小,有利于提高喷嘴寿命^[22]。太原钢铁集团通过采用CO₂替代底吹氩气用于炼钢工艺,发现将CO₂作为底吹气体可提高脱碳效率,降低吨钢冶炼成本^[23]。张家口宣化钢铁对150 t转炉进行CO₂底吹工艺改造后,铁水脱磷率明显提高,钢水中氮含量显著下降。同时还发现与常规底吹氧气工艺相比,冶炼时间明显缩短,吨钢氧气的消耗量也显著下降,从而降低了炼钢生产成本^[24]。

1.2.3 CO₂用于电弧炉炼钢工艺

鉴于底吹CO₂技术在转炉炼钢工艺中的成功应用,北京科技大学的研究人员开展了喷吹CO₂电弧炉炼钢工艺研究^[17]。结果表明,在电弧炉冶炼过程中,底吹CO₂可增大熔池搅拌能力,提高炉渣碱度以及金属收得率,改善铁水脱硫、脱磷反应的动力学及热力学条件,铁水脱硫率可提高7%左右,铁水脱磷率可提高5%左右。目前,该项技术已在西宁特钢、天津钢管实现了实际生产应用,并取得了良好的经济效益和社会效益。

1.2.4 石灰石分解生成CO₂用于转炉炼钢工艺

造渣在炼钢过程中是一项至关重要的环节,对于铁水脱硫反应和脱磷反应^[25],石灰都是不可或缺

的组分^[26],传统的炼钢工艺是在吹炼过程中,直接向熔池中加入石灰进行造渣。不同于采用石灰造渣转炉炼钢工艺,采用石灰石替代石灰进行造渣时,在熔池中首先会发生石灰石分解反应($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$),然后分解生成的石灰再参与铁水脱磷反应^[27-32],CO₂作为氧源参与铁水氧化反应生成CO,提高煤气热值。

基于底吹转炉和顶吹转炉工艺的开发,从20世纪80年代开始,已有通过从转炉底部向熔池喷吹石灰石粉,利用其分解产生的CO₂解决底吹搅拌气源的研究。21世纪初期,日本开始提出采用石灰石粉剂替代石灰进行转炉造渣炼钢工艺^[33]。近年来,由于钢铁行业面临的节能减排压力,很多钢企开展了石灰石替代石灰用于转炉造渣的生产实践探索,并取得了不错的效果^[34-35]。邯钢集团在260 t转炉上进行了石灰石替代部分石灰直接造渣炼钢的工艺研究,结果表明,在满足熔池热量要求的前提下,石灰石平均加入量控制在3.5~3.8 t/炉,普碳钢和低碳钢的脱磷率有所提高,石灰消耗分别由10.3、10.2 t/炉降低到8.4、8.5 t/炉,吨钢转炉煤气回收量可增加至150 m³,吨钢成本降低2元以上^[36]。

1.3 CO₂用于转炉炼钢溅渣护炉工艺

溅渣护炉技术是20世纪90年代炼钢工艺发展过程中的一项重大技术变革。该技术是利用转炉氧枪系统喷吹氮气,将高氧化镁含量的炼钢终渣喷溅在炉衬表面上,形成高熔点熔渣层,起到保护耐火砖的作用,从而提高转炉炉衬使用寿命,减少耐火材料损耗,降低生产成本^[16,37]。

近年来,中国科学院研究发现采用CO₂替代氮气可对转炉进行溅渣护炉操作。首先,在溅渣护炉阶段,向炉内的高温炉渣配加一定比例的焦炭粉等添加剂,然后通过转炉氧枪喷吹富含CO₂的超音速射流,将熔渣喷溅至转炉内衬表面,在炉壁上形成高熔点溅渣层,从而起到保护炉衬,提高转炉炉衬寿命的目的。与此同时,CO₂与焦炭粉在高温下发生化学反应生成CO,CO和CO₂混合烟气通过分离回收,CO₂再次作为溅渣护炉的喷吹气体,CO作为

表3 不同工艺的实际应用效果

Table 3 Actual application effects of different processes

工艺	典型企业	应用效果
转炉顶吹CO ₂	首钢集团	实现吨钢烟尘减排9.95%,废钢铁料消耗降低3.73 kg/t钢,煤气量增加5.2 m ³ /t钢
转炉底吹CO ₂	宣钢集团	铁水脱磷率升高1.44%,钢铁料消耗降低0.8 kg/t钢
电炉喷吹CO ₂	西宁特钢,天津钢管	冶炼终点氮含量降低至 43×10^{-6}
石灰石造渣	邯钢集团	煤气回收量提高至150 m ³ /t

炼钢厂烘烤气体使用^[38]。CO₂用于转炉炼钢溅渣工艺可实现绿色炼钢生产过程,具有一定的经济效益、社会效益和环境效益。目前该种工艺已取得了发明专利,但尚未实现大规模应用。

1.4 CO₂用于连铸保护气体工艺

在钢水浇注过程中,为了防止钢液的二次氧化以及钢液增氮的发生,需要采用保护浇注措施。传统工艺是采用氩气对浇注水口进行密封,从而起到隔绝高温钢液与空气的作用。国内某钢厂采用 99.9% 的 CO₂ 代替氩气作为保护连铸保护气体^[39]。研究表明,采用 CO₂ 保护浇铸可获得与氩气相同的效果,还可以降低钢水中的夹杂物含量 16.6%。在冶炼对氧含量要求不严格的钢种时,可采用 CO₂ 代替氩气作为保护连铸保护气体。

2 结论和展望

CO₂ 在钢铁冶炼流程的资源化利用,适用于钢铁冶炼流程。通过提纯钢铁企业石灰窑尾气、热电厂尾气、热风炉尾气、转炉煤气、高炉煤气等气源中的 CO₂, 并将其应用于转炉、电炉等工序,利用 CO₂ 的反应吸热、气泡增殖、强化搅拌等高温反应特性,实现转炉冶炼工序的冶金指标改善、节能降耗。其优势主要包括以下几点。

(1) 与 Ar、N₂ 气体相比,CO₂ 生产成本较低,广泛存在于钢铁生产过程中,如石灰窑、转炉、电炉废气等。

(2) CO₂ 参与铁水氧化反应的热效应相对较低,可在一定程度上起到调节熔池温度的作用。反应过程中产生的 CO 有利于增加转炉煤气量和煤气热值。

(3) CO₂ 与钢液中的 [C] 反应时,可产生 2 倍于 Ar 和 N₂ 通入量的 CO,大大地提高了对熔池的搅拌能力,改善了反应的动力学条件。

(4) CO₂ 密度大于空气,易于将熔池或炉内的空气排出,起到保护钢液的作用。

(5) 以现有的技术水平,按吨钢使用 100 kg CO₂,年产粗钢 10 亿 t 估算,可回收利用 CO₂ 约 1 亿 t,降低钢铁行业 CO₂ 排放量约 5% 左右。

参考文献

[1] 赵 沛,董鹏莉. 碳排放是中国钢铁业未来不容忽视的问题[J]. 钢铁, 2018, 53(8): 1-7.
 [2] 李 晓. 我国炼钢工艺低碳技术发展方向[J]. 冶金经济与管理, 2019(4): 21-24.
 [3] 王新江. 中国电炉炼钢的技术进步[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 1-8.

目前,CO₂ 的相关技术在炼钢工序陆续的得到应用,在烧结、高炉、轧钢等工序的工业试验也正在进行的,研究结果显示出较大应用前景。CO₂ 炼钢工艺技术是一种绿色化、低成本、高效率 and 易实现的冶炼技术,具有应用范围广、节能减排和降本增效的技术优势,具有很强的应用推广潜力。但该工艺仍然存在一些问题有待研究。例如,喷吹 CO₂ 的最佳加入量和加入时间、熔池温度变化规律、CO 回收量等。在未来的一段时间内,随着 CO₂ 回收技术的不断完善以及 CO₂ 炼钢技术的不断进步和工艺优化,势必将对我国低碳炼钢技术的发展起到一定的推动作用,促进我国钢铁工业的绿色化和低碳化。CO₂ 在炼钢工艺中的资源化利用,将是实现我国钢铁行业高效率、低成本减排的重点研究方向之一。

3 发展建议

就目前而言,炼钢技术发展相对成熟,但面对日益严重的 CO₂ 减排问题和环境保护的压力,我国需继续加强钢铁企业对低碳发展前沿技术研究,重视绿色低碳发展的战略重要性,具体建议如下。

(1) 政府应加强政策引导。大力推广高效、先进的节能低碳、环保的冶炼工艺和设备,提升钢铁行业的整体水平,尤其是要做好碳的捕集、CO₂ 资源化利用前沿技术以及短流程炼钢技术的统筹规划和顶层设计。同时,对于积极采用 CO₂ 资源化利用前沿技术和短流程炼钢工艺的企业,应加大政策倾斜力度。

(2) 积极推广工业示范。汇聚国内优势科研单位,进行联合攻关,选择有条件、有积极性的钢铁企业作为 CO₂ 资源化利用项目的试点,有序开展工业示范项目。

(3) 钢铁企业应加强与高校、研究机构的技术交流。积极开展 CO₂ 资源化利用的技术攻关与推广,同时加强与业内权威咨询机构交流合作,掌握技术发展的最新动向和实施效果,积极制定低碳发展战略规划,为企业赢得更广阔的发展空间。

[4] 陈 煜,赵瑞敏,魏光升. 电炉炼钢工程的系统工程思考[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 74-79.
 [5] 周韦慧,陈乐怡. 国外二氧化碳减排技术措施的进展[J]. 中外能源, 2008, 13(3): 7-13.
 [6] 严红燕,罗 超,胡晓军,等. CO₂ 在钢铁工业资源利用现状[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(6): 26-30.

- [7] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 3版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [8] 齐向盛, 甘力强, 李新. 工业废气二氧化碳应用研究进展[J]. 科技创新导报, 2008, 5(24): 13+15.
- [9] 朱荣, 王雪亮, 刘润藻. 二氧化碳在钢铁冶金流程应用研究现状与展望[J]. 中国冶金, 2017, 27(4): 1-4+10.
- [10] 冯佳, 年武, 李晨晓, 等. 石灰石在转炉中与铁水相互作用研究[J]. 材料与冶金学报, 2014, 13(2): 119-124.
- [11] 何平, 邓开文. 转炉中底吹CO₂熔池搅拌能的探讨[J]. 化工冶金, 1989(3): 89-94.
- [12] Nagasaka T, Fruehan R J. Reaction kinetics of CO₂-H₂O gas mixtures with liquid Fe-C alloys [J]. ISIJ International, 1994, 34(3): 241-246.
- [13] 万雪峰, 曹东, 刘祥, 等. CO₂在转炉中的应用技术研究[J]. 炼钢, 2015, 31(4): 38-41.
- [14] 赵斌, 张娜, 彭国宏, 等. 复吹转炉双联工艺冶炼X80管线钢脱磷试验研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 52-55.
- [15] 吕明, 朱荣, 毕秀荣, 等. 二氧化碳在转炉炼钢中的应用研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(S1): 126-130.
- [16] 朱荣, 毕秀荣, 吕明. CO₂在炼钢工艺的应用及发展[J]. 钢铁, 2012, 47(3): 1-5.
- [17] 王欢, 朱荣, 刘润藻, 等. 二氧化碳在电弧炉底吹中的应用研究[J]. 工业加热, 2014, 43(2): 12-14+17.
- [18] 靳任杰, 朱荣, 冯立新, 等. 二氧化碳-氧气混合喷吹炼钢实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(S1): 77-80.
- [19] 毕秀荣, 刘润藻, 朱荣, 等. 转炉炼钢烟尘形成机理研究[J]. 工业加热, 2010, 39(6): 13-16.
- [20] 朱荣, 吕明, 武文合, 等. 二氧化碳在炼钢的资源化应用技术[N]. 世界金属导报, 2018-09-11.
- [21] 王雪亮. 300吨转炉喷吹CO₂炼钢工艺技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [22] 李纯宝, 韩晔. 低吹CO₂的复吹技术在鞍钢转炉上的应用[J]. 炼钢, 1996, 12(4): 19-25.
- [23] 陈双兵, 白斌, 郑新国, 李强. CO₂替代Ar净化钢液工艺研究[J]. 山西冶金, 2014, 37(3): 22-23.
- [24] 于春强. 转炉底吹二氧化碳技术的应用[J]. 河北冶金, 2022(10): 35-38+44.
- [25] 杨东亚, 彭其春, 童志博, 等. 210 t转炉氧枪射流性能优化与工业应用[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 15-21.
- [26] 宋延成, 刘吉刚. 150 t转炉脱磷炉渣控制工艺的实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 44-47.
- [27] 梁永昌, 唐海燕, 李京社, 等. 石灰石替代部分石灰进行脱磷的实验分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(5): 83-88.
- [28] 宋文臣, 李宏, 郭洛方, 等. 石灰石代替石灰造渣炼钢减排CO₂的研究[J]. 中国冶金, 2012, 22(6): 49-53.
- [29] Deng H H, Wang N, Chen M, et al. Dissolution Behaviour of Limestone in Converter Slag: Evolution of microstructure and reaction interface [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(4): 417-423.
- [30] Chen M, Deng H H, Wang N, et al. Limestone Dissolution in converter slag: kinetics and influence of decomposition reaction [J]. ISIJ International, 2018, 58(12): 2271-2279.
- [31] Deng H H, Wang N, Chen M, et al. Kinetic study on decomposition and dissolution of limestone in converter slag [C]//10 th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Cham: Springer, 2019: 693-703.
- [32] 李晨晓, 郝华强, 王书桓, 等. 唐钢60 t转炉石灰石替代部分石灰造渣炼钢的工业试验[J]. 特殊钢, 2017, 38(6): 16-18.
- [33] Maruoka N, Ito A, Hayasaka M, et al. Effect of CO₂ content in quicklime on dissolution rate of quicklime in steelmaking slags [J]. ISIJ International, 2017, 57(10): 1684-1690.
- [34] 郭征, 佟溥翹, 钱国钧, 等. 底吹CaCO₃粉剂转炉复合吹炼法的研究[J]. 炼钢, 1993, 9(2): 25-30.
- [35] 秦登平, 杨建平, 危尚好, 等. 100 t顶吹氧气转炉石灰石造渣炼钢技术的分析和工艺实践[J]. 特殊钢, 2014, 35(5): 34-36.
- [36] 张春杰, 郝强, 王玉生, 等. 石灰石部分替代石灰转炉炼钢技术研究与应用[J]. 炼钢, 2015, 31(5): 47-50.
- [37] 王玺, 刘广强, 韩鹏, 等. 260 t转炉用五孔旋流氧枪的数值模拟[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 21-24.
- [38] 袁章福, 赵宏欣, 潘贻芳, 等. CO₂用于转炉炼钢溅渣护炉的方法: CN1974793A[P]. 2007-06-06.
- [39] 李全, 王欢, 朱荣, 等. 二氧化碳作为连铸保护气体的试验研究[J]. 连铸, 2015, 40(2): 5-9.