

論文の内容の要旨

論文題目 ランス多機能化技術による溶鋼脱ガス処理の高効率化の研究
氏名 平岡照祥

【研究の背景】

鋼材のあらゆる需要分野において、使用環境が苛酷になるだけでなく、加工工程では、その省工程化あるいは高速・連続化、成形の複雑化、塗装工程の簡略化あるいは無塗装化、検査の省略化あるいは無人化、などが進められ、その結果鋼材品質に対する要求の厳格化・高度化が急速に高まった。一方で、鋼材価格は急速に低下し、鉄鋼業は、高度の品質要求に応えながら製造コストの極限までの低減を模索した鉄鋼精錬プロセスを、(溶銑予備処理+転炉や電気炉の一次精錬+各種二次精錬)に機能分化することによってコストと品質の最適バランスを実現している。

近代製鋼法における二次精錬法に求められる機能は、(1)脱ガス、(2)化学成分微調整、(3)脱炭、(4)酸化物除去、(5)脱硫、(6)溶鋼温度微調整、(7)非金属介在物の形態制御、などである。

真空脱ガス法は、処理コストや処理能力の点で初期段階では高価な高級鋼を対象として発展してきた。しかし、1980年代中頃から薄鋼板の連続焼鈍プロセスの普及が始まったこと、および、自動車用薄鋼板に安価で高性能の溶融亜鉛メッキ鋼板が大量に使用され始めたことによって、極低炭素が要求されるIF鋼(Interstitial Free Steel)の需要が急激に膨らみ、真空脱ガス法が大量消費の普通鋼に適用されることとなった。さらに最近では環境問題からハイブリッドカーが普及し始めており、そのモーターに使用される電磁鋼板は軽量高性能という要求から極低炭素・極低硫黄が要求される。このような極低炭素鋼に対する市場要求の高まりから、RH処理法の一層の生産性向上、処理コスト低減、脱ガス性能の向上が喫緊の課題となった。

現在主流の二足連続循環真空脱ガス法(RH法)の課題は、(1)真空槽内へ飛散する溶鋼粒の壁面への凝固堆積による溶鋼汚染と処理の中断、(2)処理による溶鋼温度低下を補償するため前工程の転炉精錬における出鋼温度の高温化、(3)溶鋼脱硫の高効率化、である。

これらの課題を全て解決する手段として、(1)真空槽内への純酸素噴射用ラバールノズルの設置による脱炭反応促進、(2)該ノズルへ設けた副孔への燃料ガス吹き込みによる高温火炎の生成による真空槽および溶鋼の加熱、(3)該火炎を利用した脱硫剤の加熱噴射による溶鋼脱硫反応の高効率化、を想起したが、このようなラバールノズルは存在しなかったために、このバーナーを「多機能バーナー」と命名し、この方法の可能性の追求と実機化条件確定の研究に着手した。

【燃料ガスの選定と安定火炎生成条件】

LNG-酸素混合ガスの混合比、燃焼圧力、燃焼温度を変化させた燃焼速度実験により、(1)1:2.3の混合比の時に燃焼速度が最大であること、(2)燃焼速度は温度の1/2乗、圧力の1/0.5乗に比例すること、を見出した。さらに、Andrewsの研究結果を使って乱流における燃焼速度を計算し、(3)上記の混合ガスが大気圧下において安定した火炎を形成する条件として $1.2 > 13 d_e > 0.7$ 、を見出した。(d_e:ノズル出側の直径)

【副孔を有するラバールノズル内のガス噴流挙動】

副孔を有するラバールノズルにおけるガス噴流の挙動を把握するために、副孔の位置、ノズルを取り巻く雰囲気圧力、ガス流速を変化させた実験を行い、下記のことが明らかになった。なお、A_e、A_tは、各々ラバールノズルの出側およびスロート部の断面積である。p₀はガスの元圧、p_Eはノズル出側の背圧を示す。

(1)いずれの条件下でも副孔の存在そのものはガス流れに影響を及ぼさない。(2)A_e/A_t=25のノズルを大気圧下においてLNG-酸素混合ガス燃焼バーナーとして使用する場合、ノズル出口におけるガス流速分布は、単純円筒管からのガス流れとして扱うことができる。この条件下では、副孔から吹込んだガスは、主孔からのガスと極めて均一に混合され、ノズル出口において安定した火炎を形成する、と推察された。(3)大気圧下においてLNG-酸素混合ガス燃焼を円滑に行うためには、A_e/A_t>17の領域が適当である。(4)過膨張領域では、適正膨張条件が $p_E/p_0=0.073$ の場合において、背圧条件が $p_E/p_0=0.073\sim 0.15$ 程度乖離しても、ノズル出口の流速は、ラバール型ノズル特有の超音速噴流が得られた。背圧条件が $p_E/p_0=0.15\sim 0.40$ と適正膨張条件からさらに乖離しても、ノズル出口の流速分布において中心部では音速以上であった。(5)過膨張領域で副孔からガスを流す場合、副孔からのガス量の増加と共にノズル出口のマッハ数は増加した。また、副孔からのガス量の多いほど、衝撃波の発生位置は上流側へ移動した。

【待機中真空槽内耐火物加熱および真空処理中溶鋼加熱操業】

上記の研究で解析したノズル特性をもとに実機用多機能バーナーを設計し、100トンヒートの実機RH設備を使って加熱操業を試みた。

(1)真空脱ガス処理は間欠的に行われるため、待機中に真空槽内耐火物温度が低下し、溶鋼粒が真空槽内で凝固堆積する。計算による推定では、耐火物表面温度が1370℃以上であればこの現象は発生しないことが予想された。多機能バーナーを使用すると、例えば1250℃まで低下していた耐火物を5分以内、最短条件では1分程度で1400℃まで加熱可能であり、処理終了と同時に真空槽内加熱を行うことで、真空槽内の鋼の堆積は完全に防止された。また、耐火物温度が常時1400℃以上に保持されることから、耐火物のスポーリングが防止され、寿命も50%以上延長された。(2)大気圧下での真空槽内耐火物加熱操業においては、投入熱量の約70%が耐火物加熱に使用された。(3)化学成分調整後の溶鋼を多機能バーナーで加熱しても、化学成分に変化は無く、投入熱量の約50%が溶鋼加熱に使用され、その結果15分加熱で溶鋼温度を20℃上昇させることができた。

【真空脱炭反応速度の改善について】

炭素含有量10ppm台の鋼材を得るためには、真空処理前の溶鋼中酸素濃度が約300ppm以上必要で、それには転炉精錬で溶鋼中炭素を300ppm程度まで低下させる必要があることが経験的に知られていた。真空処理初期に多機能バーナーから純酸素を2~3分間吹き付ける操業を行ったところ、溶鋼中酸素濃度が300ppm以上に上がり、以降は酸素を止めても脱炭反応は順調に進行し、従来と同じ時間で同程度の低炭素鋼が得られた。また、溶鋼中酸素が十分に確保された後は、多機能バーナーのガスをLNG-酸素混合ガスに変えて燃焼させることによって溶鋼加熱が可能となった。真空脱炭処理中に溶鋼加熱を行っても、脱炭速度に変化は見られず、同様な極低炭素鋼が得られた。この溶鋼加熱は、LNG流量が200Nm³/hの場合、0.5℃/minであった。この場合の熱効

率は約 50%であった。

【溶鋼脱硫反応促進操業について】

高合金鋼においては、粗溶鋼に対して多量の合金添加が行われるため、合金からの硫黄の増加を防げず、極低硫黄鋼の製造では、合金添加後の溶鋼脱硫が必要である。一般的に、高合金鋼は脱ガス処理を要する場合が多く、RH 処理で合金添加後の脱硫が採用されるようになった。従来は、溶鋼中へ CaO と CaF₂ の混合粉体（以後、脱硫用フラックスと称する。）を、浸漬管下部から吹込むか真空槽上部からパイプを通して添加する方法が採られていた。この場合、脱硫用フラックス 5kg/t-steel の添加で溶鋼温度が 10℃低下する。さらに、脱硫用フラックスの融点を下げて反応効率を上げる目的で、反応には直接寄与しない CaF₂ を 40%添加しており、CaF₂ による耐火物損傷も大きかった。この課題解決の目的で、多機能バーナーで脱硫用フラックスを加熱添加する方法を試みた。結果は次の通りであった。(1) 同量・同組成の脱硫用フラックスを添加する場合、多機能バーナーで加熱添加する方が、単純吹き付けした場合に比較して、反応効率が 2 倍程度改善された。(2) CaF₂ 添加比率を 40%から 20%に下げると、単純吹き付け法では反応効率が低下する。しかし、多機能バーナーで添加した場合、脱硫用フラックスが固液共存の粒滴状態で添加されるため、反応効率の低下は見られなかった。(3) 多機能バーナーでの脱硫用フラックス添加では、溶鋼温度の低下は見られなかった。

【結言】

多機能バーナーの開発により、現在残された RH 法の課題はほぼ解決され、大量消費鋼材への適用を可能とした。多機能バーナーは RH 法のみならず、全ての二次精錬プロセスに適用可能であり、今後その用途が拡大されることが予想される。