

不同FeO比例對FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO渣系高溫特性影響之研究*

Effects of FeO Content on High-temperature Properties in FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO System

林啟明¹ ■ 蘇育瑯² ■ 尤正維³ ■ 吳威德⁴
C.M. Lin, Y.L. Su, C.W. Yu, W. Wu

本研究透過 Thermo-Calc 模擬之預測結果設計出不同 CaO/SiO₂ 與 FeO 比例之 FeO-CaO-SiO₂-5%MgO-5%Al₂O₃ 五元渣配方，接著進行 WDS-XRF 成份分析與 XRD 結晶相鑑定，確認其配方組成。高溫特性分析以 DV III RV 黏度計進行高溫黏度測量，且對樣品進行流動影像觀察，探討不同配方對熔化與流動性能之影響，結合 Thermo-Calc 預測熔點，定義出脫磷與發泡的適用範圍。由結晶相分析結果顯示，本研究渣系之組成相皆由 FeO、Ca₂SiO₄ 與 CaMoO₄ 所構成。由黏度分析中發現，熔渣的黏度受 Ca₂SiO₄ 固相顆粒的影響，且黏度隨 CaO/SiO₂ 提升與 FeO 含量的減少而上升，故 C/S=2.1-9.9%FeO 與 C/S=2.6-20.6%FeO 有較高的黏度特性。高溫發泡量測結果顯示，黏度在 25cP ~ 1810 cP 之間，發泡指數與黏度值呈線性正比關係，且 C/S=2.6-20.6%FeO 在 1560 °C 時發泡指數高達 109.7%，為發泡性能最好之配方。脫磷能力評估方面，經熱力學經驗式計算得知，高 CaO/SiO₂ 且適當的 FeO 含量之脫磷劑能有效提升脫磷能力，而透過實際脫磷試驗結果發現 C/S=2.1-20.0%FeO 在 1530-1550 °C 時脫磷率高達 89.2%。

關鍵詞：不同 CaO/SiO₂ 與 FeO 含量，FeO-based 氧化渣，黏度特性，發泡特性；脫磷能力

In this investigation, we used Thermo-Calc thermodynamics simulation analysis to formulate FeO-CaO-SiO₂-5%MgO-5%Al₂O₃ slag systems with different CaO/SiO₂ and FeO ratio. The actual composition of slag was confirmed by WDS-XRF analysis, the Fe chemical titration, and XRD phase identification. We utilized DV III RV viscometer measurements, high temperature optical image observation, and pre-thermodynamics simulation to investigate the softening, melting and flow properties. We conducted the dephosphorization test and foaming height analysis to determine the optimum composition range of dephosphorization agent and foaming agent in FeO-CaO-SiO₂-5%MgO-5%Al₂O₃ slag system. XRD results revealed that the FeO-based oxidative slag with different CaO/SiO₂ and FeO content were composed of FeO, Ca₂SiO₄ and CaMoO₄. The viscosity of the slags was affected by the Ca₂SiO₄ solid particles; the viscosity increased with increasing CaO/SiO₂ (or decreasing of FeO content), thus CaO/SiO₂=2.1-9.9%FeO and CaO/SiO₂=2.6-20.6%FeO had a higher viscosity. Foaming test results indicated that the viscosity between 25 cP and 1810 cP, was linearly proportional to the foaming index and CaO/SiO₂=2.6-20.6%FeO had the best foaming index of 109.7% in all conditions at 1,560 °C. Dephosphorization capacity assessment showed that in the high basicity and the appropriate FeO content of the dephosphorization agent can effectively improve the ability of dephosphorization. Dephosphorization test results showed that the dephosphorization ability of CaO/SiO₂=2.1-20.0%FeO was up to 89.2% at temperature between 1,530-1,550 °C.

Key words: Different CaO/SiO₂ and FeO content, FeO-based oxidative slag, Viscosity property, Foaming characteristic, Dephosphorization capacity

國立中興大學 金屬研發中心 ¹助理研究員
國立中興大學 材料科學與工程研究所 ²碩士 ³碩士生 ⁴特聘教授

一、前言

電弧煉鋼業有句術語「煉鋼即煉渣」，如何有效調配合適的渣，是提昇鋼鐵冶煉技術重要的關鍵。其中，脫磷是提昇鋼鐵冶煉技術的重要環節，因為磷會以 Fe_2P 的形式析出於鋼鐵晶粒間，硬而脆的析出物將顯著降低鋼的韌性，尤其是回火韌性和衝擊韌性，且隨鋼中碳、氮、氧含量的增加，磷容易在金屬材料進行冷加工時引起裂紋，而磷雜質的脫除主要控制在電弧爐氧化粗煉過程⁽¹⁾。氧化粗煉為利用電能產生電弧後，溫度急速上升，使廢鋼熔解，並配合吹氧助熔的操作，以加速廢鋼熔化與節省電能，但因氧化環境造成 Fe 氧化成 FeO 的鐵損失，在廢鋼料全部熔化後，則開始進入氧化期，也就是粗煉脫磷階段，這一階段中必須將廢鋼中之雜質氧化，會加入 CaO 等脫磷劑將磷大量脫除並去除鋼中氣體與夾雜物⁽²⁾，在氧化粗煉末期，刻意將提高鋼液溫度，配合吹碳操作製造泡沫渣，泡沫渣的產生可以有效提高效率與減少煉鋼成本⁽³⁾。

國外已有相當多文獻提及發泡渣埋弧現象對於電弧爐冶煉生產效率之研究，Huang et al.⁽⁴⁾ 報告指出冶煉過程的發泡渣有利於埋弧現象增加，有效發泡渣的產生能節省電能約 130Kwh/T；Schroeder⁽⁵⁾ 研究發現泡渣埋弧可防止在電極與耐火材料之間起弧而增加爐襯的使用壽命；Pan⁽⁶⁾ 研究中亦提及適當的發泡高度能減少熱散失速率。由上述文獻可知，發泡操作對於電弧爐冶煉是一項不可或缺的製程技術。具有良好發泡性能的脫磷渣，除了可以提高鋼鐵品質，更可以增加電弧爐煉鋼之效率。Li et al.⁽⁷⁾ 藉由磷分配比的實驗得知，鹼度 (CaO/SiO₂) 提升與適當的 FeO 含量才能有效提升脫磷能力，因為過多的 FeO 反而會稀釋 CaO 的脫磷效率，而且現有電弧煉鋼廠的造渣技術，常見操作以加入石灰提升鹼度或是吹氧吹碳改變 FeO 含量這兩者為主，故適當的鹼度與 FeO 含量能有較好的脫磷效果。

發泡性能方面，Pilon et al.⁽⁸⁾ 以發泡指數進行量化，發現發泡指數 Σ 與高溫黏度 μ (Pa·sec)、密度 ρ (kg/m³) 與表面張力 σ (N/m) 成如式 -1 經驗式之關係⁽⁸⁾：

$$\Sigma = k \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma}} \dots\dots\dots \text{式 -1}$$

其中，黏度影響氣泡通過渣層時的速度，適當的黏度可延長氣泡在渣中停留時間，使泡沫相對穩定而不易消泡，提高發泡性能；表面張力影響氣泡之自由能，發泡渣自由能較小，系統穩定性較高，泡沫壽命相對較長；另一方面，密度對發泡性能的影響與表面張力較為相似，密度較小的熔渣有利於泡沫的穩定，這是因為當氣泡存在於密度較小的熔渣時，對氣泡的壓力小，氣泡就不易溢出，從經驗式可知黏度與發泡指數成正比關係，對發泡的影響程度也最嚴重⁽⁸⁾。Bhoi⁽⁹⁾ 提出氧化粗煉對鋼-渣界面施以吹碳操作能讓渣中 FeO 還原，增加熔渣黏度，使泡沫最大化；Taschler⁽¹⁰⁾ 的研究發現 CaO 可以提高熔渣的黏度，使發泡指數提高，由此發現 CaO 與 FeO 對於黏度特性之影響是完全相反，因為 CaO 為高熔點鹼性氧化物，其含量增加會使渣中 Ca₂SiO₄ 之固相顆粒變多，黏度提升；而 FeO 於渣中為助熔劑，能使渣的熔點降低，流動性增加。

綜合以上文獻之敘述，鹼度 (CaO/SiO₂) 與 FeO 含量為影響氧化粗煉中脫磷與發泡效率的

兩大成份因子，又因脫磷與發泡對於渣性的熔化特性與流動行為要求有所差異，在電弧爐煉鋼氧化脫磷階段，熔點低且流動性較好的氧化渣系能促進鋼-渣界面之反應動力，進而幫助鋼液中磷雜質脫除；發泡階段則需要高熔點且具有一定黏度的氧化渣系，增加發泡高度與泡沫穩定性，來避免電極與爐襯受弧光輻射而損壞。

二、研究方法

2.1 FeO-based 氧化渣之配方設計

本研究熔渣配方設計，考量到現行電弧爐鋼廠造渣技術，主要以添加石灰提升鹼度 (CaO/SiO₂) 與吹氧、吹碳作用改變渣中 FeO 含量兩種方式來調整鋼渣成份，且在文獻研究中提及鹼度與 FeO 在熔渣中的比例皆會對於高溫物理特性有顯著影響。因此，本研究設計出下列 6 組不同鹼度 (CaO/SiO₂) 與 FeO 含量配方，如表 1 所示。

表 1 FeO-based 氧化渣之配方設計

Chemical composition, wt.%						
Formula	CaO/SiO ₂	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO
A1	2.5	57.1	22.9	5	5	10
A2		50	20	5	5	20
A3		42.9	17.1	5	5	30
B1	3.0	52.5	17.5	5	5	20
B2		45	15	5	5	30
B3		37.5	12.5	5	5	40

2.2 不同氧化渣之高溫預熔處理

本研究所設計之 6 組樣品依照配方比例調配後放入鉬坩鍋中，其所使用之各氧化物純度如表 2 所示，然後使用週波頻率為 30-100 kHz，功率為 25 kW，於小型週波感應爐進行加熱。待配方均勻熔解後，將熔融的渣液以水淬方式冷卻至室溫，取部分配方進行研磨與過篩後，進行 WDS-XRF 成份分析、FeO 含量的化學濕式滴定、XRD 結晶相的鑑定以及高溫流動影像分析，取約 140 公克塊狀熔渣配方進行黏度與脫磷試驗，其預熔方法示意圖如圖 1 所示。

表 2 本研究所使用之熔渣藥品列表

藥品來源與純度	
CaO	99% (CHONEYE PURE CHEMICALS)
SiO ₂	99% (CHONEYE PURE CHEMICALS)
MgO	99% (CHONEYE PURE CHEMICALS)
Al ₂ O ₃	98% (CHONEYE PURE CHEMICALS)
Fe ₂ O ₃ · 2H ₂ O	99% (SIGMA-ALDRICH)

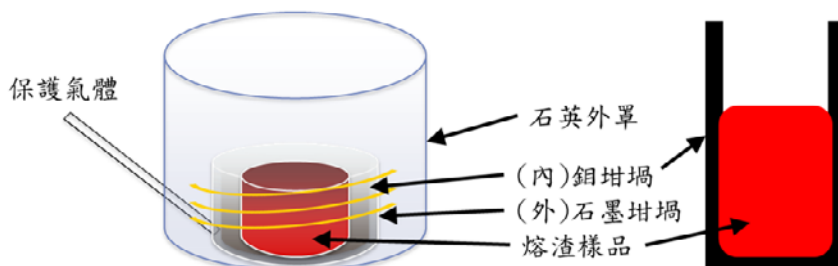


圖 1 高溫預熔處理方法示意圖

2.3 成份分析與相鑑定

鋼錠品質分析採用火花放電光譜分析儀 (Spark) 進行 C、Si、Mn、P 與 S 等元素的成份分析。本實驗化學濕式分析主要用於分析渣樣中 Fe^{2+} 濃度，來換算 FeO 的比例。圖 2 為 Fe 化學滴定操作流程圖，第一部分 Fe^{2+} 滴定的原理為，先使用無氧化性之混酸將渣樣中的氧化物溶解，使 FeO 固體轉變成 Fe^{2+} 的水溶液，接著加入氧化還原指示劑，進行氧化還原滴定，直到滴定終點使氧化還原指示劑變色，紀錄氧化劑使用量後即可計算出 Fe^{2+} 之濃度。為了避免 Fe^0 對 Fe^{2+} 濃度測定的誤判，必須額外的第二部分單獨滴定 Fe^0 ，以確認其含量，並於最終分析濃度中扣除，其滴定原理為使用 Fe^0 元素的歸宗反應，使 Fe^0 反應為 Fe^{2+} 溶液，經過抽氣過濾後再次進行氧化還原滴定，即可計算得到原始熔渣中所含的 Fe^0 含量。本實驗委託中鋼公司利用波長散佈式 X 光螢光光譜儀 (WDS-XRF)，進行各氧化物的定量分析，將預熔後水淬之渣樣磨碎，取 30g 粒徑為 $75\mu\text{m}$ 的粉末，進行 WDS-XRF 分析，其分析元素為 CaO 、 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 MoO_3 、T-Fe 等。本研究以 MAC-MXP3 型的高解析 X-射線繞射分析儀 (XRD) 進行不同氧化渣之相鑑定分析，繞射儀靶材材料為銅靶，其特性波長為 1.54056\AA ，操作電壓為 40kV，操作電流 30mA，以 $2^\circ/\text{min}$ 的繞射速率，繞射角度 2θ 為 $20^\circ \sim 80^\circ$ 區間進行分析，得到數據結果利用 JCPDS Card 資料庫進行組成相的鑑定。

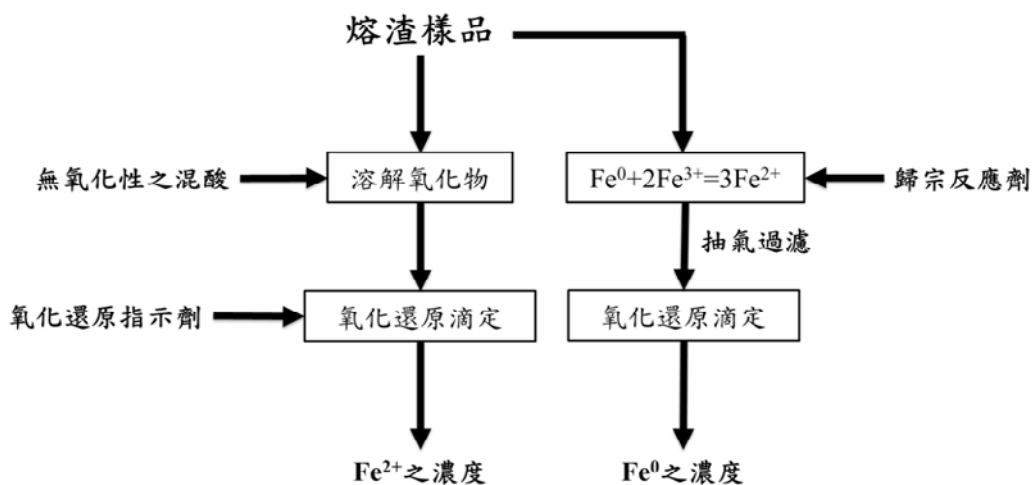


圖 2 Fe 化學濕式滴定操作流程圖

2.4 熔渣高溫黏度量測

熔渣之高溫黏度量測是利用 Brookfield LVDVIII RV 黏度計，搭配升降式電阻高溫爐當作加熱爐體進行黏度量測，其示意圖如圖 3 所示。本實驗使用 Pure-Mo 材料當轉子與坩鍋，以避免渣系在升溫過程成份改變，而升溫條件由室溫開始分兩階段，第一階段以 10°C/min 之升溫速率加熱至 1350°C；第二階段以 2°C/min 進行升溫直至 1600°C。待熔渣部分液化時，開始將鉬轉子緩慢降入坩鍋之中，並將鉬轉子固定於距離鉬坩鍋底部 10mm 處。黏度計轉速設定為 20rpm，並開始記錄黏度計之 τ 值與升溫溫度變化的關係，待升溫至 1600°C 後結束實驗，並將 τ 值依照由黏度標準樣所得的換算公式，轉換為黏度值。

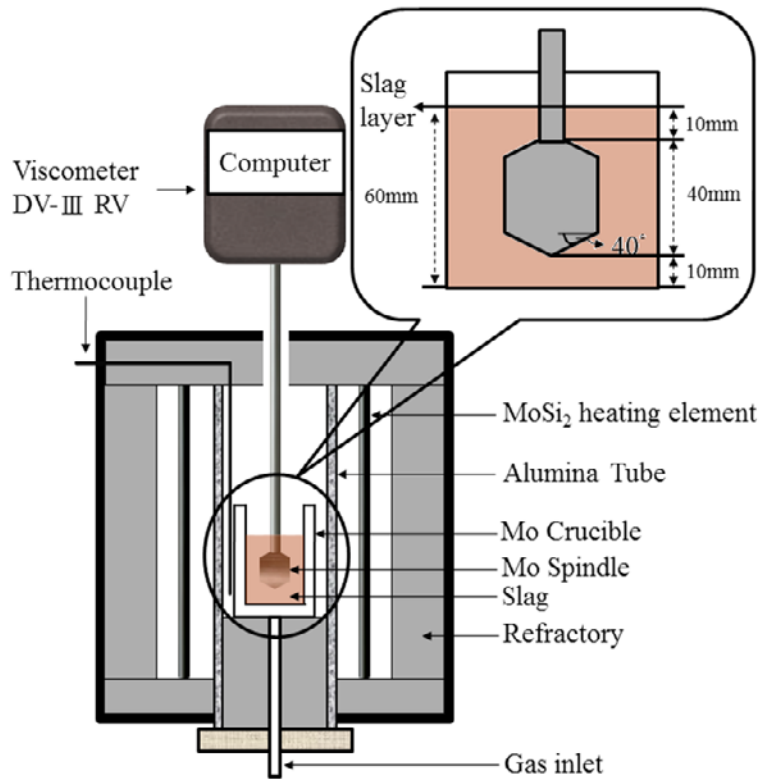


圖 3 高溫黏度量測示意圖

2.5 高溫發泡能力評估

本研究藉由文獻指出發泡指數 $\Sigma = \Delta V / Q$ ，其中 Q 為氣體速率 (m^3/sec)， V 為泡沫渣體積 (m^3)，當固定爐體截面積時則 $\Sigma = \Delta h / j$ ，其中 j 代表氣體通過爐體截面的速率 (m/s)， h 則代表泡沫渣增加的高度 (m)，因此在固定流速之條件下可以進行熔渣高度變化之測量來評估發泡指數。因熔渣具有導電性的特性，以吹管浸入熔渣中，作為固定電極，另一支根據高度的位移以及電極間的電訊號進行渣液介面的判斷。發泡高度的量測，在室溫下預先架設石墨坩堝、鉬坩鍋、石英罩與電壓感測馬達於固定位置，精準量測待測樣品 100g 重，然後倒入鉬坩鍋中，將兩隻熱電偶分別接觸鉬坩鍋壁與待測樣品底部，做溫度校正，然後作電極零點校正，如圖 4 所

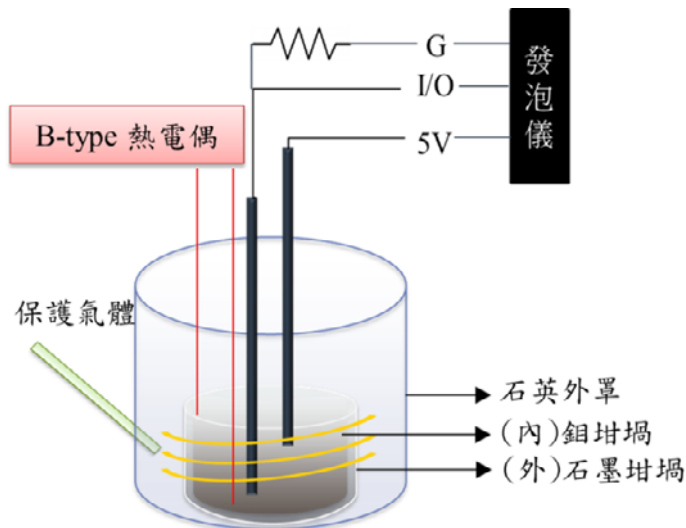


圖 4 高溫發泡裝置示意圖

示。前置作業完成後，利用週波感應爐進行升溫，待樣品熔化後調整週波功率，使其降至預測溫度，開始移動電極開始下降，量測初始液面高度，固定流速吹氣，將移動電極再次下降，量測發泡高度即可以得知發泡指數。

2.5 脫磷試驗方法

本研究利用週波感應熔解爐進行脫磷試驗，將鋼筋放入 ZrO_2 坩堝內，待鋼筋完全熔解後進行溫度的量測，然後透過調整功率使脫磷溫度控制在 $1530-1550^{\circ}C$ ，接續將 A2、A3、B2 與 B3 等四組預定脫磷劑投入 ZrO_2 坩堝內，開始進行脫磷試驗，且不同反應時間下，拍攝影像觀察其液化情形，於 10 分鐘後取出熔渣並且出鋼，進行後續的分析，藉由鋼錠 0min 與 10min 之磷含量的差異來了解脫磷性能。

表 3 各組配方之 WDS-XRF 的化學成份分析結果

Sample	Chemical composition (wt.%)					
	CaO	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO/ SiO ₂
A1	53.0	24.2	9.9	6.2	6.7	2.2
A2	45.0	21.3	20.0	6.6	7.1	2.1
A3	39.7	18.7	29.6	5.3	6.7	2.1
B1	49.5	19.3	20.6	5.0	5.7	2.6
B2	42.0	15.6	30.2	7.2	5.1	2.7
B3	32.6	12.4	43.2	7.1	4.7	2.6

三、分析結果與討論

3.1 不同氧化渣之成份分析與相鑑定結果

利用 WDS-XRF 與化學濕式滴定進行熔渣氧化物的成份分析，其分析所得的結果如表 3 所示，由表中得知 Al_2O_3 含量分布於 5.0 ~ 7.2 之間； MgO 含量為 4.7 ~ 7.1 之間； CaO/SiO_2 比例則分別落在 2.1 ~ 2.2 與 2.6 ~ 2.7 間，六組的 FeO 分別為 9.2、18.7、25.8、19.0、25.6 與 36.6。此外由於 CaO 在大氣環境下並不穩定，傾向發生潮解反應，造成配方中 CaO 的損失，因此實際成份之鹼度跟原先設計的成份有所落差。預熔後的 6 組配方進行 XRD 相鑑定發現，不同鹼度下改變 FeO 含量 (9.9-43.2wt.%) 皆由 FeO 、 Ca_2SiO_4 、 CaMoO_4 所構成，如圖 5 所示。 CaMoO_4 會出現在 XRD 相鑑定結果，是因為本研究使用鉬坩鍋進行預熔實驗，於高溫時鉬會從坩鍋壁析出並形成 CaMoO_4 的相，但對於高溫熔渣特性不會有所影響，因此由 XRD 相鑑定結果判斷 $\text{FeO-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系會以 Ca_2SiO_4 與 FeO 為主。

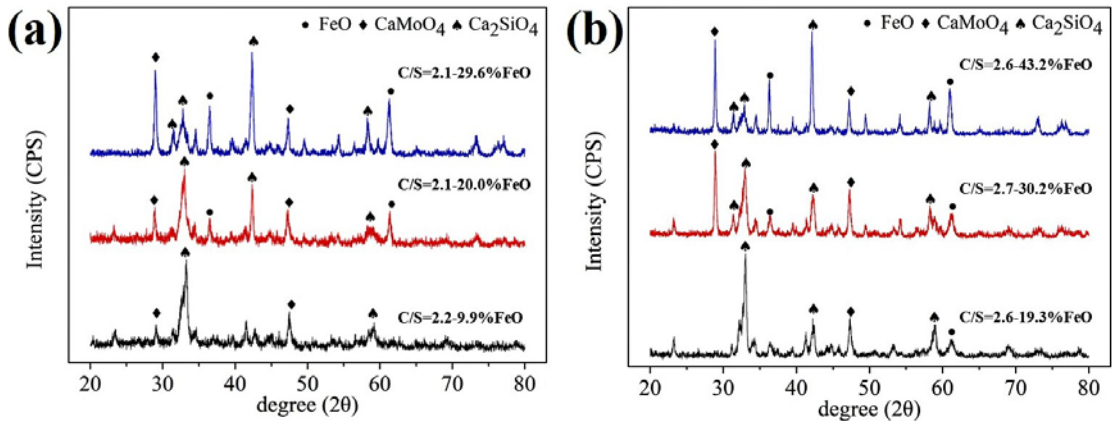


圖 5 不同 FeO 含量之 XRD 分析結果：(a) $\text{CaO}/\text{SiO}_2=2.1$ ；(b) $\text{CaO}/\text{SiO}_2=2.6$

3.2 Thermo-Calc 熱力學模擬結果

本研究 $\text{FeO-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系之 Thermo-Calc 熱力學模擬結果如圖 6 所示，其中相圖 Y 軸為攝氏溫度，X 軸皆為 CaO 的重量分率，固定成份 5% MgO 與 5% Al_2O_3 並改變 FeO 含量繪製出四張熱力學平衡相圖。由相圖可以看出低鹼度時為 Ca_2SiO_4 固相析出區，隨鹼度上升會從 Ca_2SiO_4 轉換 Ca_3SiO_5 固相析出區，甚至到高鹼度時為純 CaO 的固相析出區，另一方面，隨 FeO 含量增加， MgO 固相析出區的比例也隨之增加，而其液相線熔點有下降趨勢。各相圖的虛線代表各組配方分別對應不同鹼度下的液相線熔點，計算結果如表 4 所示，由表中可知在 FeO 含量較高的組別 (A2、A3、B2、B3)，其固相析出隨溫度增加而快速減少，而 A1 與 B1 在 1550°C 下仍保有 20% 以上固相分率。因為在電弧爐氧化粗煉脫磷溫度約 $1530\text{-}1550^\circ\text{C}$ ，若此時脫磷渣的完全液化，可以促進鋼-渣介面之反應動力，幫助脫磷；而氧化粗煉發泡溫度為 1550°C 以上，若此時發泡渣保有一定黏度，可以有效提升發泡能力。

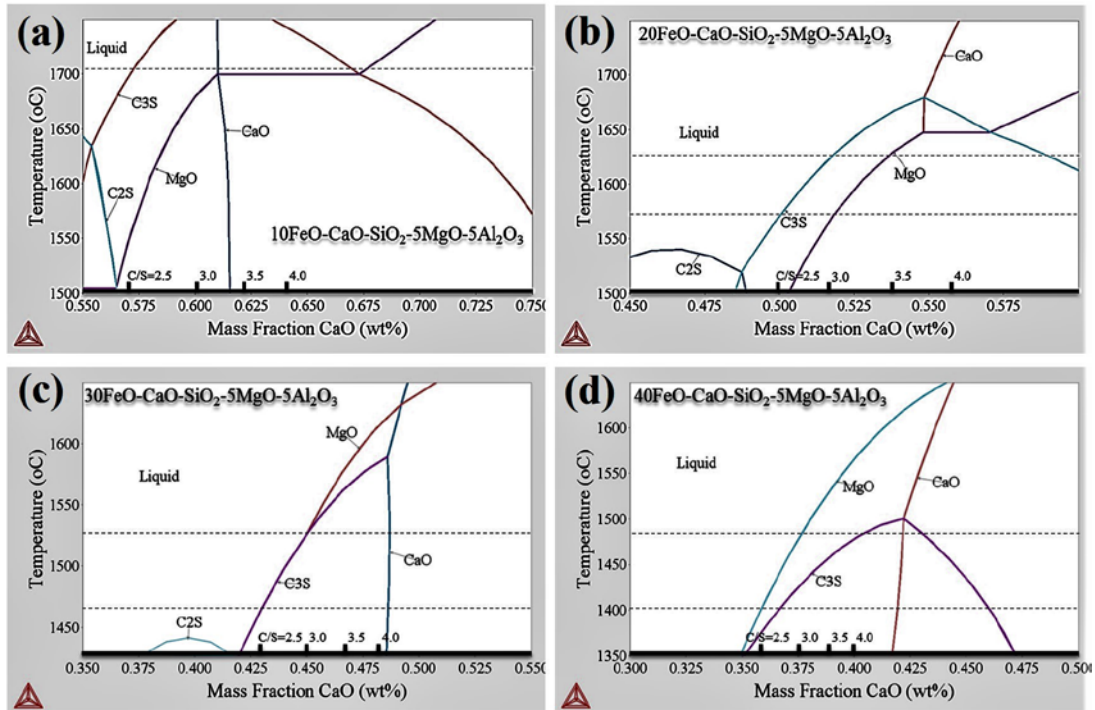


圖 6 Thermo-Calc 平衡相圖模擬結果：(a)10FeO；(b)20FeO；(c)30FeO；(d)40FeO

表 4 各組配方之固相分率與模擬熔點

Sample	Solid fraction(%)							Melting Point (°C)
	1350°C	1400°C	1450°C	1500°C	1550°C	1600°C	1650°C	
A1	-	-	-	-	28.8	21.6	12.7	1704
A2	-	25.6	21.6	14.2	5.1	-	-	1575
A3	19.7	11.9	3	-	-	-	-	1465
B1	-	-	-	-	22.6	11.1	-	1601
B2	-	25.7	16.6	6.5	-	-	-	1503
B3	16.4	6.5	0.2	-	-	-	-	1489

3.3 高溫黏度量測結果

本研究將 6 組渣樣以旋轉擺錘法進行高溫黏度量測，其結果如表 5 所示，由表中可以發現到相同的趨勢為黏度會隨 FeO 的含量增加而降低，而 A1 與 B1 在 1550°C 下仍保有 1300cP 以上的黏度，在 FeO 含量較高的組別 (A2、A3、B2、B3) 則在 1460°C 下就剩下不到 100cP 的黏度特性。針對黏度的量測結果，進一步針對 FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 渣系探討不同鹼度對氧化鐵含量之黏度關係，如圖 7 所示。首先，由 Seok et al.⁽¹¹⁾ 研究發現低鹼度渣系在 1450°C 下，10-20%FeO 含量之氧化渣黏度降到接近 250cP，接近完全液化，其流動性可適用於脫磷製程，

但無法發泡；接續探討 Lee et al.⁽¹²⁾ 對於高鹼度渣系的研究，發現 10-20%FeO 含量之氧化渣在 1600°C 下都保有 500 cP 以上的黏度，而且黏度隨著 FeO 含量下降有趨緩的趨勢，其黏稠性可適用於發泡製程，但無法脫磷。最後，由本研究 C/S=2.1-2.2 與 2.6-2.7 區間的渣系可知，在 1550°C 時，藉由 FeO 含量的改變能控制黏度在適當發泡區與完全液化區，此特性也符合鋼廠的造渣操作，在前端脫磷使用高 FeO 的渣，藉由吹碳使 FeO 轉為發泡渣，整個冶煉製程就不需要二次換渣，以節省成本。

表 5 各組配方不同溫度下之黏度

Sample	Viscosity (cP)						100cP
	1400°C	1460°C	1475°C	1500°C	1550°C	1575°C	
A1	-	-	-	-	1700	1150	>1600°C
A2	-	1139	975	562	82	36	1538°C
A3	28	28	27	25	22	-	<1370°C
B1	-	-	-	-	1358	870	>1600°C
B2	-	1134	746	183	28	26	1507°C
B3	454	64	59	43	36	34	1431°C

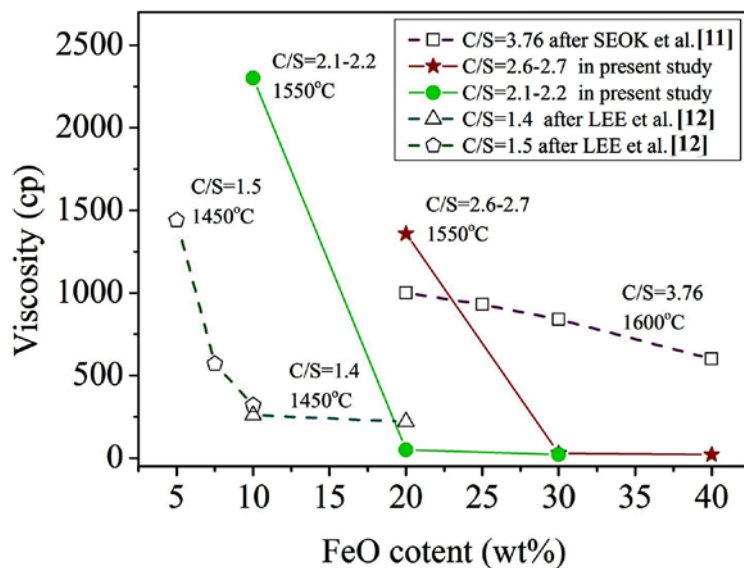


圖 7 不同鹼度 (CaO/SiO₂) 下 FeO 含量與黏度的關係圖

3.4 高溫發泡量測結果

本研究利用熔渣導電之特性設計迴路量測電位與熔渣位置之關係來得知發泡特性。表 6 為各組別於 1500~1600°C 溫度區間發泡量測結果，由兩組 A1 與 B1 高熔點渣發現 1560°C 時發泡指數分別為 1.021 與 1.097，為 6 組配方中發泡性能最好，因為熔渣中會具有高熔點的固態顆粒，

這些顆粒增加了熔渣的黏度，有利於熔渣的發泡性和泡沫穩定性。而 FeO 為表面活性物質與助熔劑，隨著 FeO 含量的增加表面張力減小，黏度降低，所以不利於泡沫渣的形成和穩定。本研究將發泡指數與黏度量測數據進行對照，可得知發泡指數與黏度間的關係如圖 8 所示，由圖中可以發現在黏度 25cP ~ 1810 cP 之間，發泡指數與黏度數值呈線性正比關係，並且可計算出發泡高度與黏度 μ (cP) 之關係式，如式 -2 所示：

$$\Delta H/H_0 = 2 \times 10^{-4} \mu + 0.6552 \quad \text{式-2}$$

表 6 各組於不同溫度下之發泡指數

Sample	Foaming index ($\Delta H/H_0$)					
	1500°C	1550°C	1560°C	1575°C	1585°C	1600°C
A1	-	-	1.021	0.965	-	0.742
A2	0.615	0.719	-	-	-	-
A3	0.731	-	-	-	-	-
B1	-	-	1.097	0.927	0.851	-
B2	0.696	0.598	-	-	-	-
B3	0.377	-	0.318	0.318	-	-

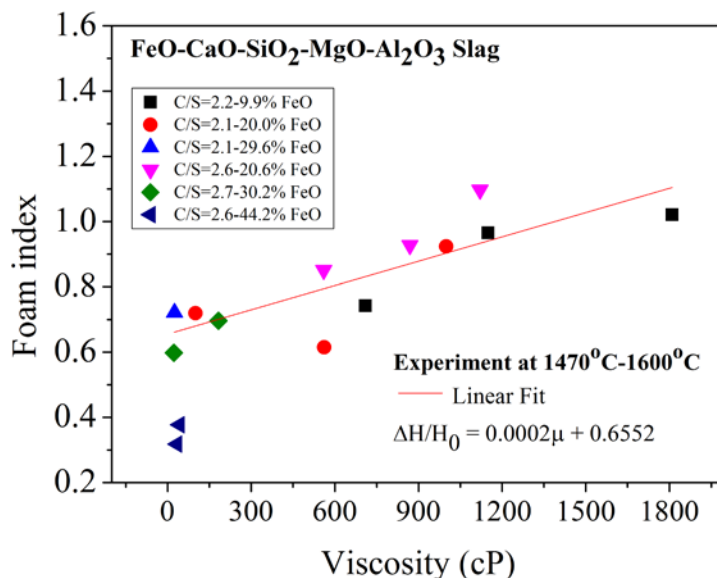


圖 8 發泡指數與黏度特性間之關係圖

圖 9 為透過鉬吹管在固定吹速下製造穩定氣泡於渣層中的發泡機制，綜合發泡指數與黏度量測結果，整理出以下機制：

- (1) 低黏度的熔渣，在氣泡生成時，液態渣因親和力包覆在氣泡外圍保護氣泡浮出液面，但因氣泡間的合併而發生消泡作用，使發泡渣無法維持；
- (2) 高黏度的熔渣，具有 Ca_2SiO_4 固態顆粒，此固態顆粒會優先與氣泡產生大分子泡沫，此泡沫合併的阻力變大，氣泡不容易逸出，消泡時間得到延長，發泡效果越好。
- (3) 中間過渡黏度的熔渣，具有部分 Ca_2SiO_4 固態顆粒， Ca_2SiO_4 團聚的泡沫會維持在渣層上方，下層的泡沫由氣泡補充，但上下渣層泡沫的消泡速率有所落差，下層泡沫會優先破裂而導致發泡渣層下降，反覆氣泡上升使發泡渣較不穩定。

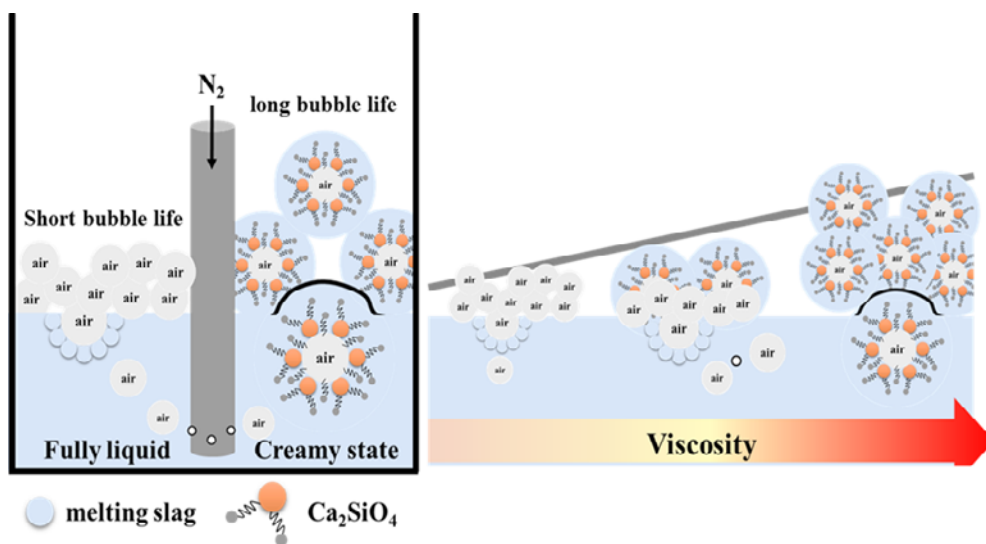


圖 9 發泡與黏度關係間之機制圖

3.5 高溫脫磷能力評估結果

本研究已完成脫磷試驗評估，其各組之脫磷能力評估結果如表 7 所示，而不同組別經不同時間脫磷下之渣液化外觀照片如圖 10 所示。結合表 7 與圖 10 的結果可以發現四組配方均達 70% 以上，A2 脫磷劑之脫磷率為 89.2%，鋼錠 P 含量從原本之 0.0915wt.% 降至 0.0099 wt.%，從圖 10(a) 可以發現在反應 4 分鐘後有發泡的情形發生，促進鋼 - 渣界面的反應動力，並配合適當的 CaO/FeO 比例，使 A2 脫磷劑具有最高脫磷效率；A3 脫磷劑之脫磷率為 84.8%，鋼錠 P 含量從原本之 0.092wt.% 降至 0.014wt.%，從圖 10(b) 可以發現其液化情況比 A2 快速，但因過多 FeO 含量稀釋 CaO 的脫磷能力，因此脫磷效率有所下降；B2 脫磷劑之脫磷率為 87.4%，鋼錠 P 含量從原本之 0.058wt.% 降至 0.0073wt.%；B3 脫磷劑之脫磷率為 73.4%，鋼錠 P 含量從原本之 0.094wt.% 降至 0.025wt.%，從圖 10(d) 發現其液化情況為四組最好，反應 2 分鐘後已完全液化，但因 CaO/FeO 比例為四組最低，因此 B3 脫磷劑的脫磷效率最差。

表 7 不同組別之脫磷試驗結果

組別	時間	Chemical composition (wt.%)					脫磷率, %
		C	Si	Mn	P	S	
A2	0min	0.0061	<0.010	<0.010	0.0915	0.028	89.2
	10min	0.0057	<0.010	<0.010	0.0099	0.026	
A3	0min	0.0081	<0.010	<0.010	0.0920	0.020	84.8
	10min	0.0065	<0.010	<0.010	0.0140	0.017	
B2	0min	0.0066	<0.010	<0.010	0.0580	0.021	87.4
	10min	0.0073	<0.010	<0.010	0.0073	0.020	
B3	0min	0.013	<0.010	<0.010	0.0940	0.024	73.4
	10min	0.0078	<0.010	<0.010	0.0250	0.021	

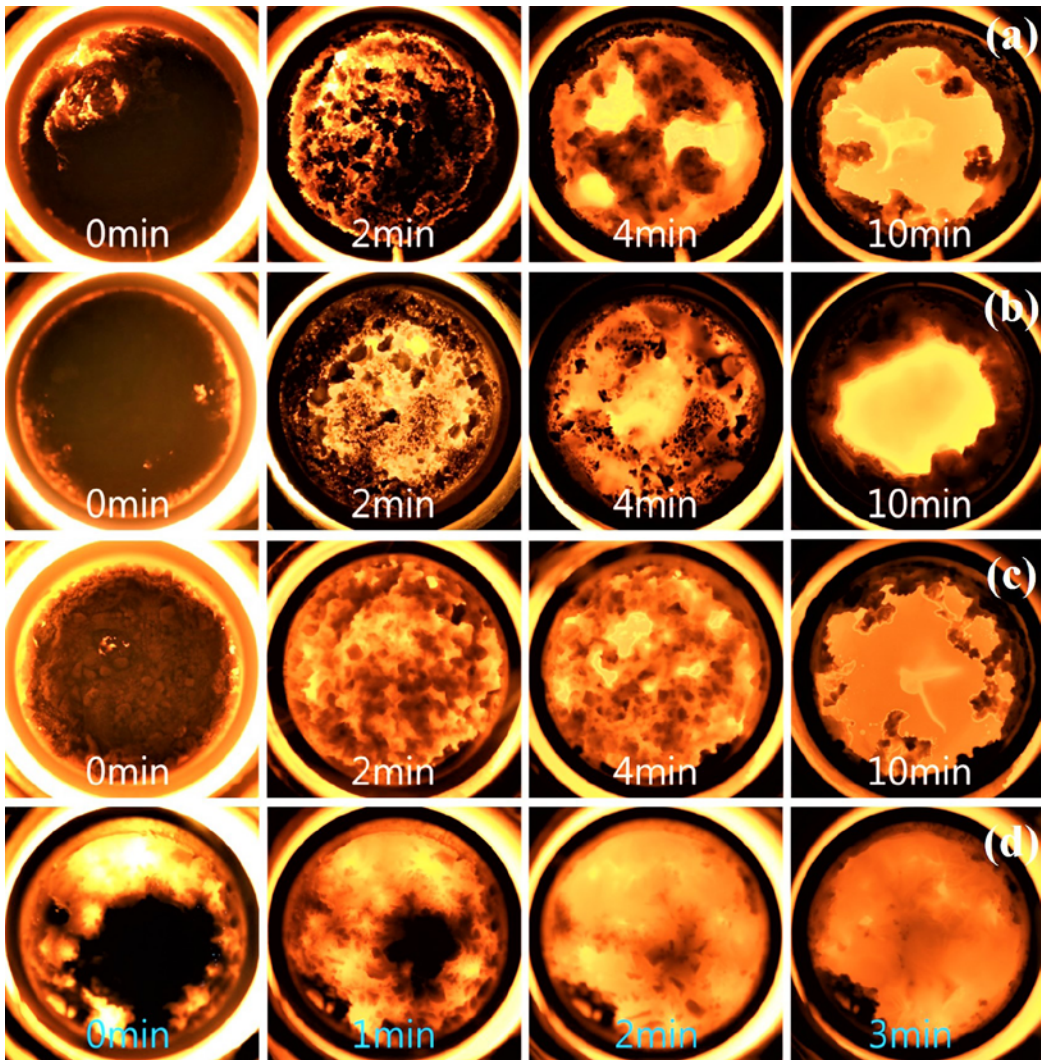


圖 10 不同時間脫磷下之渣液化外觀照片：(a)A2 組；(b)A3 組；(c)B2 組；(d)B3 組

四、結 論

本研究設計六組 $x\text{FeO}-y(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-5\%\text{MgO}-5\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 氧化渣系，其中 $x=10\sim 40\%$ 、 $y=2.5$ 與 3.0 ，探討不同鹼度下，改變 FeO 比例對結晶相、固相分率、黏度值、發泡性與脫磷能力等之影響。結果顯示 $\text{FeO}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-5\%\text{MgO}-5\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 五元渣系之高溫組成相主要是由 FeO 與 Ca_2SiO_4 所構成。由高溫黏度結果顯示，熔渣的黏度特性會隨 FeO 含量增加而降低，而熔渣成份為 $9.9\%\text{FeO}-53\%\text{CaO}-24.2\%\text{SiO}_2-6.7\%\text{MgO}-6.2\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 1550°C 時有最大的黏度值 (1700cP)，而 FeO 含量高於 29.6% 時，黏度值快速下降至 100cP 以下。高溫發泡量測結果顯示，黏度在 $25\text{cP} \sim 1810\text{cP}$ 之間，發泡指數與黏度值呈線性關係，關係式為： $\Delta H/H_0=0.0002\mu+0.6552$ 。當黏度值高於 1300cP 且固相分率達 20% 以上時，具有較好發泡性能。熔渣成份為 $20.6\%\text{FeO}-49.5\%\text{CaO}-19.3\%\text{SiO}_2-5.7\%\text{MgO}-5\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 1560°C 時發泡指數高達 109.7% ，為發泡性能最好之配方。當黏度值低於 183cP 且固相分率達 10% 以下時，其熔渣具備脫磷反應必要的流動性能。熔渣成份為 $20\%\text{FeO}-45\%\text{CaO}-21.3\%\text{SiO}_2-7.1\%\text{MgO}-6.6\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 $1530-1550^\circ\text{C}$ 時脫磷率高達 89.2% ，為脫磷性能最好之配方。

五、致 謝

本研究承蒙科技部 (MOST 106-2218-E-005-020)、(MOST 107-2218-E-005-002) 與 (MOST 107-2218-E-005-008) 提供經費，方能順利完成，特此表達由衷感謝。

六、參考文獻

- (1) 林偉凱，泛談國內電弧爐之使用效率概況與未來之發展方向，金屬中心，第 1-3 頁，西元 2007 年。
- (2) 劉根來，煉鋼原理與工藝，冶金工業出版社，第 95-96 頁，西元 2006 年。
- (3) 蕭連華、戴棟、崔寶民、劉翠花，“唐鋼電弧爐泡沫渣埋弧冶煉的實踐與探討”，河北冶金，第二期，第 22-77 頁，西元 2001 年。
- (4) 黃同軍，史連君，曹小軍，“電爐泡沫渣工藝”，特鋼技術，第二期，第 33-35 頁，西元 1990 年。
- (5) D. L. Schroeder, "Advantages of foaming slag control in EAF operation," Steel Times, Vol. 228, No. 10, pp. 368, 2000.
- (6) X. W. Pan, "Energy improvement in induction furnace using foaming slag with variation of carbon injection," Journal of Energy in Southern Africa, Vol. 26, No. 2, pp. 64-73, 2015.
- (7) J. C. Li, Q. Lu, X. J. Liu, S. H. Zhang, and D.H. Liu, "Phosphorus capacity of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{Fe}_x\text{O}$ slag," Journal of Iron and Steel research, Vol. 22, No. 5, pp. 377-381, 2015.
- (8) L. Pilon and R. Viskanta, "Minimum superficial gas velocity for onset of foaming," Chemical Engineering and Processing, Vol. 43, No. 2, pp. 149-160, 2004.
- (9) B. Bhoi, A. K. Jouhari, and H. S. Ray, "Smelting reduction reactions by solid carbon using induction durance: foaming behavior and kinetics of FeO reduction in $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ slag," Ironmaking and Steelmaking, Vol. 33, No. 3, pp. 245-252, 2006.
- (10) T. Taschler, "Refractory materials for the copper and lead industry," Tehran International Conference on Refractories, Vol. 4, pp. 4-6, 2004.
- (11) S. H. Seok, S. M. Jung, Y. Seok, and D. J. Min, "Viscosity of highly basic slags," ISIJ International, Vol. 47, No. 8, pp. 1090-1096, 2007.
- (12) Y. S. Lee, D. J. Min, S. M. Jung, and S. H. Yi, "Influence of basicity and FeO content on viscosity of blast furnace type slags containing FeO," ISIJ International, Vol. 44, No. 8, pp. 1283-1290, 2004. *