

電弧爐煙塵與別種廢棄物混合處置之應用

張 萬 權* 譯

壹、前 言

固化 (solidification) 及固定 (fixation) 兩種處理方式，對於企圖將電弧爐 (Electric Arc Furnace; EAF) 煙塵轉化成無毒廢棄物，使此種最後廢棄物易於儲存或掩埋而無須特別之處置，是目前極具吸引力的兩項技術。但是，必須注意的是如果煙塵成份中含大量之鹼度 (Alkalinity)，則將耗費可觀之酸性物質 (acid)，以調整煙塵之酸鹼值 (pH)，方能達到所需之效果。

要解決上述問題，我們可將其他產業之廢酸 (waste acid) 與煙塵混合，利用彼此之酸鹼度，達到中和，而解決困擾及成本壓力。而且在煉鋼廠內常有酸洗廢水之產生，正可用來與煙塵混合處理。

以下本文將對下列幾點予以討論

- (1) 固化技術之操作程序。
- (2) 固化技術在電弧爐煙塵處理之應用 (單獨處理或是另有添加其他廢棄物)。
- (3) 固化技術之經濟效益。
- (4) 經過固化程序後，討論煙塵成份浸析實驗 (leach test) 之結果。

貳、固化技術之操作程序

本文所討論之技術是具有專利之「二段式」 (two step) 程序。

第一步驟 在含鐵化合物 (iron-bearing) 及矽土 (siliceous material) 兩種物質存在下，來酸化煙塵。

第二步驟 在以矽化鈣 (calcium silicate) 為基質 (matrix) 的狀況下，使用石灰 (lime) 來提高 pH 值並產生金屬矽酸鹽 (metal silicate) 之混合物。

這種處理方式其最主要特徵乃在於當使用「二段式」程序來調整 pH 值時，在以矽酸鹽為基質的狀況下，其中可被浸析出的元素 (leachable materials) 會發生一種「共沉澱」 (co-precipitation) 的現象。

在煙塵中這些 可被浸析出之金屬元素是以化學鍵結合之 固體物存在，而不僅是膠囊化 (encapsulated) 存在。因此它們無法以簡單的機械方法予以分離釋放。通常這些待處理之煙塵本身並不具足夠之矽土或二氧化矽 (silicate) 來達到固化的目的。因此，我們常須另行添加矽酸鹽化合物。在煉鋼廠內，磨碎的爐渣 (crushed slag) 是一項既方便又適用的矽酸鹽來源，但不幸的是，其中有時會含過多的石灰 (氧化鈣)。

* 金屬工業發展中心污染防治組實習員

我們若用浸析方法來化驗電弧爐煙塵，可發現其成份之種類及數量隨著廢鐵來源之不同而有很大的變化。一般常見的組成成份有、鈣、氯、鐵、鉛、鎳、鋅等。在這些金屬中，鉛似乎是最易浸析出來但也是最難被固定 (fix) 之元素。同時，因為這些元素的浸析範圍相當廣泛，使得固化技術更顯得具體可行。我們幾乎只須應用一些簡單的技術，即可將所有元素給固定。雖然在回收過程中須藉著某些分離 (seperation) 步驟來回收所需元素。此外，如果我們無法分離出這些元素，則在回收過程後之廢棄物勢必要再做進一步的處理。

以最簡單的方式來講，這種固化過程是使用一個或多個分批式反應爐 (batch reactors) ，然後將廢棄物及所需之添加物依著上述之順序投入，而達到固化的目的。

參、固化技術之經濟效益分析

在本文爾後之討論，我們先成立幾點假設：

- (1)電弧爐煙塵之處理量為 1,000 ton/month。
- (2)煙塵中含20%之氧化鈣 (CaO)。
- (3)以低二氧化矽之爐渣當做矽酸鹽添加物。
- (4)廢酸內含 5 % 硫酸 (sulfuric acid) 及 8 % 之鐵 (iron)。
- (5)處理廠以 5 turns/week 進行處理。
- (6)所有費用以美元計算。

圖一是表示此種處理廠 (專責電弧爐煙塵) 典型的簡化流程。工廠內所有的設備及建造費用，估計約為\$700,000元。而表一則為其操作費用狀況。

從表一分析可知，電弧爐煙塵之處理費用約 106元/ton。這與目前一般處置之費用 (40 ~ 50元/ton) 相比，顯得過高。但是不可避免的，將來由於環保標準的提高，簡易的土地掩埋方式勢不被允許，而處理成本也必將大幅提高。

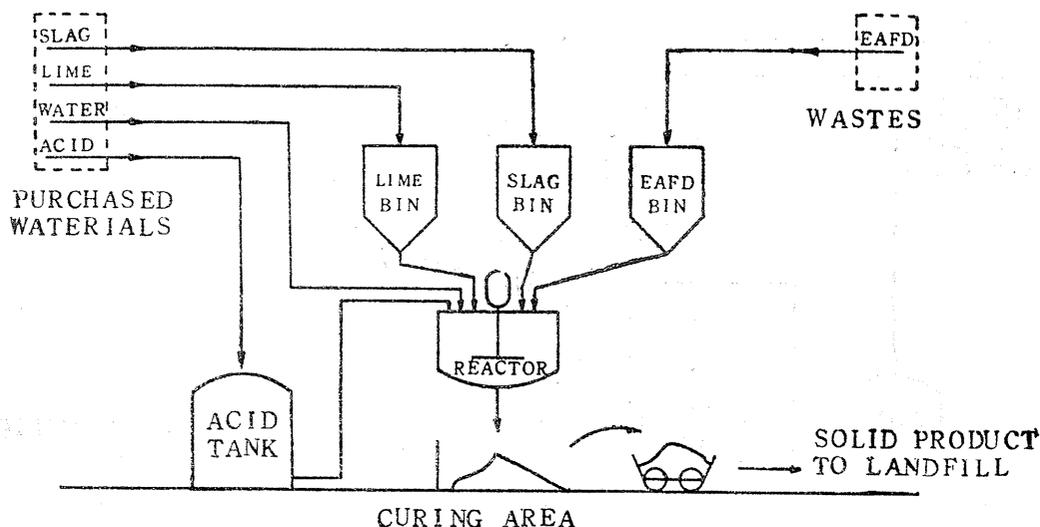


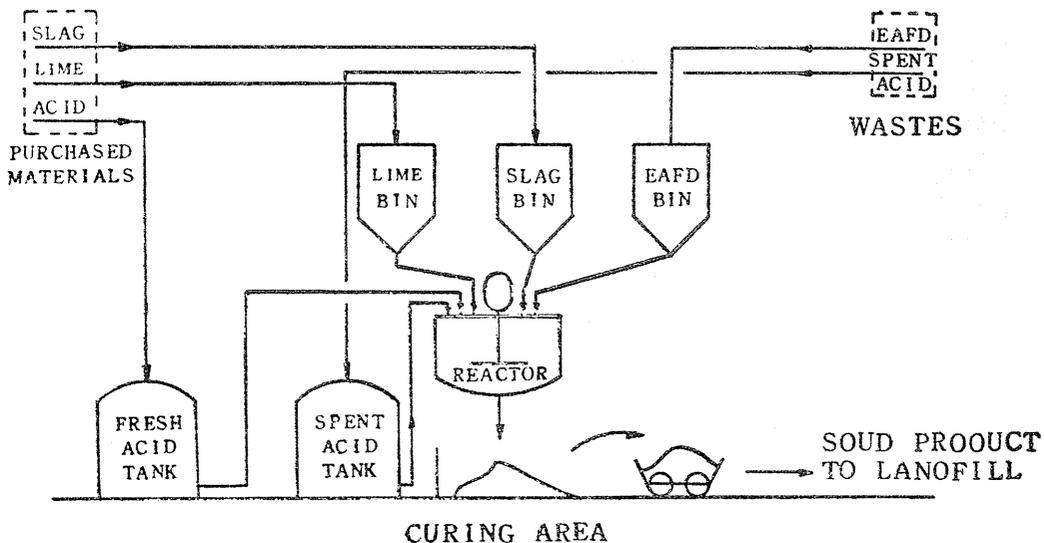
圖 1 Solidification process for treating EAFD alone

表一 COST OF SOLIDIFYING EAFD ALONE

Item	Amount	Unit Cost, \$	\$/yr
<u>Materials</u>			
Acid	3590 tpy	100	359,000
Slag	5000 tpy	5	25,000
Lime	2990 tpy	60	179,400
	Total materials		563,400
<u>Utilities</u>			
Water	5400 mgal	1	5,400
Power	140 MWh	50	7,000
Product handling & disposal	43,700 tpy	10	437,000
	Total utilities		449,400
<u>Operating Miscellaneous</u>			
Labor	1 man		30,000
Maintenance	5% of capital/y		35,000
Taxes/Ins.	2% of capital/y		14,000
Capital charges	25%		175,000
	Total Oper/misc		254,000
	Total		\$ 1,266,800

圖二為另一種處理流程。它與表一的差別在於多了一項廢酸來源及貯存室。

在圖二的方法中，爲了要使電弧爐煙塵與爐渣能充分取應，大約須要55,000噸的廢酸方可完成。所以工廠的規模及成本也會提高，估計總成本達 1,250,000元。表二爲其操作成本之情形。



圖二 Solidification process for treating EAFD with spent acid

表 2 COST OF SOLIDIFYING EAFD IN CONJUNCTION WITH ACIDIC WASTES

Item	Amount	Unit Cost, \$	\$/yr
<u>Materials</u>			
Acid	2300 tpy	100	230,000
Slag	5000 tpy	5	25,000
Lime	9890 tpy	60	593,400
	Total materials		843,400
<u>Utilities</u>			
Power	280 MWh	50	14,000
Product handling & disposal	82,400 tpy	10	824,000
	Total utilities		838,000
<u>Operating Miscellaneous</u>			
Labor	1 man		30,000
Maintenance	5% of capital/y		62,500
Taxes/Ins.	2% of capital/y		25,000
Capital charges	25%		312,500
	Total Oper/misc		430,000
	Total		\$ 2,116,400

在圖二流程中，其操作成本大約比圖一增加約70%，但能處理之廢棄物數量卻增加達550%。因此實際上廢棄物處理之單位成本約31.6元/ton。這與目前電弧爐煙塵及廢酸兩者個別處理的費用總和相比較，顯然是低得多了。

如果廢酸的來源不足以處理所有的電弧爐煙塵，那麼我們可將用或購買別種酸性物質以補充廢酸之不足。當然，單位成本也會略微提高到31.6至106元/ton之間，廢酸缺少愈多，其成本就愈增加。

在處理電弧爐煙塵時，除了使用廢酸而可降低實際成本外，另有一項技術上的好處——在廢酸中之大量鐵離子 (soluble iron) 將會以氫氧化物膠凝劑 (flocculant hydroxide) 型式沉澱，並固定其他金屬元素。同時因中和廢酸所產生之低密度、大體積之污泥可被濃縮，形成固體含量 (solid content) 在40~45%之最後廢棄物。這種廢棄物在穩定狀態下並不會滲水出來。

肆、實驗室及工廠試驗 (laboratory & pilot test)

表三是說明煙塵試驗之來源及種類。2種來自碳鋼製造廠，2種來自金鋼廠。

表四是說明上述煙塵經固化技術在實驗室及工廠試驗後的化驗分析結果。

我們必須注意的是這些結果並不適用於所有情況，不同的煙塵來源就會有不同的結果。另外，2家合金鋼廠都有廢酸可資利用，所以2家合金鋼廠就以廢酸來處理煙塵。

表三 TYPES OF DUST TESTED

Source	Type
A	Carbon Steel
B	Carbon Steel
C	Alloy Steel
D	Alloy Steel

表四 DUST ANALYSES

Source	Fe	Cu	% Zn	Cr	Cd	Pb
A	26.0	0.28	26.7	0.19	0.05	3.2
B	26.0	—	25.0	0.3	—	4.5
C	33.5	—	17.6	0.3	0.03	2.0
D	17.4	0.08	2.7	0.12	—	1.2

表五乃是未經處理之煙塵浸析實驗的結果。大部份的浸析實驗方法是採用美國環境保護 (EPA) 之毒性試驗方法 (Toxicity Test procedure)。從結果可看出 Zn, Pb, Cd 是最常出現之元素，而且通常含量還相當高。

表五 DUST LEACHING RESULTS

Source	Zn	Cu	mg/L Ni	Pb	Cd	Cr
A	195	0.2	—	65	4.8	0.02
B	2800	19.0	—	600	13.5	0.47
C	—	—	—	46.8	8.9	ND
D	181	1.09	1.46	115	581	—

表六和表七是提供當煙塵經過固化技術處理後一些相關實驗的結果。正如所見，所有的重金屬含量都降低，而且遠低於有毒廢棄物之標準。

表六 LEACHING RESULTS FROM DUST SOLIDIFIED ALONE

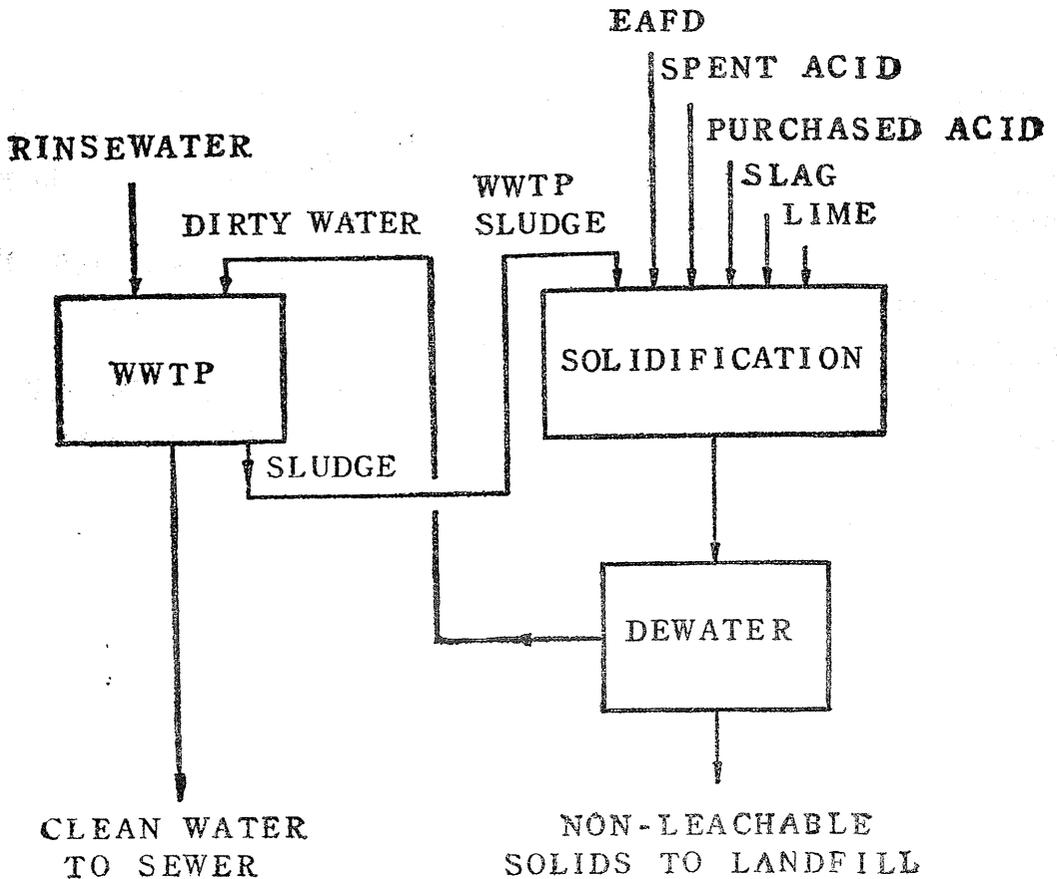
Source	Zn	Cu	mg/L Ni	Pb	Cd	Cr
A	0.49	0.06	—	<0.1	0.02	0.11
B	0.64	0.07	—	0.1	0.02	0.1
C	Nd data					
D	No data					

表七 LEACHING RESULTS FROM DUST
SOLIDIFIED WITH ACID

Source	Zn	Cu	mg/L Ni	Pb	Cd	Cr
A	No data					
B	No data					
C	—	—	—	0.42	0.26	ND
D	0.3	0.08	2.62	0.21	0.21	—

伍、工業上之應用

加拿大 Atlas 的煉鋼廠是首先將此種技術作商業化應用之工廠（上述資料即為該廠之成效）。這種技術不僅對有電弧爐煙塵及廢酸工廠的污染防治具有極大的吸引力，同時對處理漂洗水之廢水處理廠亦有同樣之功效。因此，結合這三種有毒廢棄物之特性，又可發展出另一套處理流程，如圖三。



圖三 Overall flow scheme for treatment of EAFD, spent acid and WWTP sludge

在圖三的處理流程，首先將 3 種有毒廢棄物混合，經過固化程序後，採過濾脫水以減少因廢水處理廠污泥所增加之龐大體積（這項脫水步驟在這種流程確屬必要）。

又如前文所述，電弧爐煙塵與廢酸混合處理形成的混凝及共沉澱現象（coagulation & co-precipitation），也使得污泥脫水更為簡易方便。

表八即為上述類型處理廠最後廢棄物之化學浸析實驗結果。其他重金屬存在並未列入表中，須等待爾後更詳細的研究。但根據經驗分析，只有表列 3 種金屬含量會較高，其他的則可忽略。

表八 LEACHING RESULTS FROM COMMERCIAL SCALE SOLIDIFICATION

Pb	mg/L Cd	Cr(VI)
0.3	0.05	0.02

陸、未來之應用

經過了一連串的努力，試驗及克服，固化技術終於可成功地應用於工廠操作上。在加拿大已有了成功的例子。並且為了保證這些最後廢棄物不會對環境造成二次污染，每週皆會從該掩埋場取樣化驗其組成情形。所幸的是，這些化驗值都遠低於加拿大 Ontario 市及 USERA 之限制標準，不會造成更多的困擾。

在美國，一項技術的發明認可是一項長期，雜複及正式化的過程。這種過程的完成往往至少耗費 1 年以上的時間及大量的金錢來做分析調查報告（含實驗室及工廠試驗），而且這種技術的許可是單一方面的，並不能適用其他案例。

如果我們企圖採用另種方法來解決類似問題，也勢必須要經過同樣複雜而長期的過程。因此，一份符合實際的計劃表及預算就必須充分考慮該項計劃所需耗費之時間及投資。