

## 鎳基自熔合金水砂沖蝕特性之研究

林明志<sup>1</sup>、張立信<sup>1</sup>、葉志鴻<sup>2</sup>、林昆明<sup>2</sup>、林新智<sup>\*3</sup>

### A Study of Slurry Erosion Characteristics of Ni-based Self-fluxing Alloy

M. C. Lin<sup>1</sup>, L. S. Chang<sup>1</sup>, C. H. Yeh<sup>2</sup>, K. M. Lin<sup>2</sup>, H. C. Lin<sup>\*3</sup>

#### 摘 要

本研究應用高速火焰熔射製成鎳基自熔合金，隨後進行水砂沖蝕試驗，並選擇 SUS304 不銹鋼作為比較材，以探討鎳基自熔合金之抗水砂沖蝕特性。實驗結果顯示，鎳基自熔合金之抗水砂沖蝕性優於 SUS304 不銹鋼，尤其在低角度沖擊。兩種合金靶材之重量損失皆隨著沖擊時間與沖擊速率之增加而幾乎呈線性遞增。鎳基自熔合金為一高硬度之脆性材料，於高沖擊角度下，具有較大之沖蝕速率，而 SUS304 不銹鋼為延性材料，其沖蝕速率於 30 度沖擊角時呈現最大值。鎳基自熔合金經水砂沖蝕後之顯微組織，於低角度(15 及 30 度)沖擊後之表面形態與 SUS304 不銹鋼之延性靶材差異不大，即表面形成沖擊砂粒剝犁靶材之條紋狀流線痕跡；而經高角度(60 及 90 度)沖擊後，鎳基自熔合金則呈現其本質，主要以脆性剝落破壞形態為主。

關鍵詞：鎳基自熔合金；SUS304 不銹鋼；沖蝕特性；火焰熔射。

#### ABSTRACT

The test specimens of Ni-based self-fluxing alloy were prepared using the high-speed flame-spraying technique. Their slurry erosion characteristics using the water/sand impingement tests have been systematically studied. SUS304 stainless steel was selected as the comparison material. Experimental results showed that the Ni-based self-fluxing alloy generally exhibits a better slurry erosion resistance than the SUS304 stainless steel, especially at lower impingement angles. The cumulative weight losses for both alloys increase almost linearly with increasing erosion time and impingement speed. The Ni-based self-fluxing alloy erodes more severely at higher impingement angles due to its hard but brittle behavior. On the contrary, the SUS304 stainless steel processes a

---

1 中興大學材料工程學系

1 Department of Materials Engineering, National Chung Hsing University

2 逢甲大學材料科學與工程學系

2 Department of Materials Science and Engineering, Feng Chia University

3 台灣大學材料科學與工程學系暨研究所

3 Department of Materials Science and Engineering, National Taiwan University

\* 連絡作者：hclinntu@ntu.edu.tw

ductile behavior and the maximum of erosion rate occurs at impingement angle around 30°. Both alloys show similar surface morphologies composed of furrows after impingement at lower angles (15°, 30°). However, the Ni-based self-fluxing alloy has an impinged surface mainly from brittle exfoliation at high impingement angles of 60° and 90°.

Keywords : Ni-based self-fluxing alloy, SUS304 stainless steel, Erosion characteristic, Flame spraying.

## 1. 前言

發電廠之水力發電設備，係利用高速水流沖擊發電機之渦輪葉片，帶動發電機馬達之運轉，而將水流之位能與動能轉換成電能。由於渦輪葉片必須長期承受高速水流之沖擊，故需具有優異的抗沖蝕性。傳統水力發電機渦輪葉片材料以及針閥、噴嘴等，常使用低碳鋼、低錳鋼、不銹鋼、白鑄鐵或是高分子樹脂等作為原料，但是這些材料的抗沖蝕性皆不甚良好，因而在夾帶泥砂之高速水流沖擊下，容易使渦輪葉片及針閥、噴嘴等產生沖蝕損害經，甚至造成整個發電機之發電作業終止，造成巨大損失<sup>[1,2]</sup>。因此，尋找高抗沖蝕性材料即成為各電廠急需完成的重要課題。

鎳基自熔合金(Ni-based self-fluxing alloy, Ni-based SFA)由於內部有大量碳化物與硼化物析出，高溫下仍可維持極佳的硬度值，因此適合用作高溫耐磨耗材料。另外，由於鎳基自熔合金中 Cr 含量高，高溫下在表面可生成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化膜，因此抗氧化與腐蝕性優良，因此可應用到同時要求耐磨、耐氧化與耐腐蝕之場合。台灣電力公司曾針對鎳基自熔合金之熔射塗層作系列研究<sup>[3,4]</sup>，並成功地應用於萬大電廠之針閥表面處理製程，使其壽命提高 3 ~ 5 倍。由於鎳基自熔合金具有高硬度與耐磨耗等特性，其與材料抗沖蝕性之需求同具正面意義。台大材料所吳錫侃教授曾針對鎳基自熔合金之抗窩穴沖蝕特性(cavitation erosion resistance)進行研究<sup>[5]</sup>，並發現鎳基自熔合金之抗窩穴沖蝕性相當優良。故本研究擬繼續針對鎳基自熔合金之抗水砂沖蝕特性(slurry erosion resistance)進行詳細之探討，並選擇常用為抗沖蝕材料之 SUS304 不銹鋼作為比較材，期以明瞭鎳基自熔合金之抗水砂沖蝕性，做為爾後實際應用之參考。

## 2. 實驗方法

### 2.1 試片製作

本實驗所使用之合金靶材係應用高速火焰熔射技術(high-speed flame-spraying)，將鎳基自熔合金 [Ni-17Cr-3B-4Si-4Fe-1C(wt.%)] 噴塗於碳鋼基材上，所得到的熔射塗層往往有高達 20% 的孔隙度，但在經約 1000 °C 之高溫燒結後，塗層變得較為緻密，使塗層強度大幅提升<sup>[4]</sup>。又由於高溫處理時，塗層與底材間之界面出現某種程度的元素擴散，使塗層與底材之間產生冶金式鍵結，因此大幅減少剝落分離等問題。我們將熔射塗佈後之鋼材利用砂輪切割機分割成 20 mm × 20 mm × 10 mm 的沖蝕實驗試片。另選取工業界常用為抗沖蝕材料之 SUS304 不銹鋼製備沖蝕試片以作為比較。SUS304 為一種沃斯田鐵系不銹鋼，其 Cr 含量約 18 ~ 20%，Ni 含量約 8 ~ 10.5%，C 含量低於 0.08%，由於 C 含量低，故抗蝕性優良且不會產生粒界腐蝕現象。

### 2.2 水砂沖蝕試驗

影響水砂沖蝕率的參數頗多，如砂粒性質，沖擊時間、沖擊角度與沖擊速度等。當沖擊砂粒之硬度值超過受沖擊靶材或砂粒粒徑超過一臨界值(延性材料 120 ~ 130 μm，脆性材料 20 ~ 30 μm)時，砂粒硬度與粒徑變化對沖蝕率影響不大<sup>[6]</sup>。具不規則形態之砂粒會對材料造成較嚴重之沖蝕損害<sup>[7]</sup>，在實驗中更能分辨材料之抗水砂沖蝕性。因此，本實驗所使用之砂粒為 250 ~ 350 μm 粒徑之高硬度不規則形態石英砂，砂粒性質可視為控制變數，因而本實驗選擇沖擊時間、沖擊角度與沖擊速度為主要沖蝕參數，探討其對鎳基自熔合金與 SUS304 不銹鋼沖蝕率之影響。沖蝕率(erosion rate)一般定義為靶材於

接受沖蝕期間，單位沖蝕砂粒重量之靶材總重量損失，如下所示：

$$\text{沖蝕率}(\text{mg/g}) = \frac{\text{靶材之總重量損失}(\text{mg})}{\text{沖蝕砂粒總重量}(\text{g})}$$

抗沖蝕性之量測係採用水砂沖蝕試驗。沖蝕試驗機之幫浦出水量為 40 L/min，最高工作壓力為 1400 psi，噴嘴(nozzle)口徑 4 mm，其沖擊介質之輸送管路與流程如圖 1 所示。表 1 則顯示設定之試驗參數。實驗中吸入砂粒於沖擊水流之機制係使用 Bernoulli 原理，沖擊系統內部皆為封閉，當高速水流由小噴嘴擊射至大管中時，導砂管中的空氣被吸入大噴嘴中，隨即砂粒被吸入沖擊水流內。水砂沖擊速度的測定係使用 double disk 方法<sup>[8]</sup>，如圖 2 所示。假設水砂沖擊速度(V) 固定，當圓盤以轉速  $\omega$  轉動，水砂僅能通過缺口處，經過一段固定距離 L 後撞擊到後方的圓盤，產生之撞擊痕跡與缺口正對

表 1. 水砂沖蝕實驗參數。

Table 1 Parameters of water/sand impingement erosion.

沖擊速度(m/s)	82.9、90.8、99.5、105、117.3
沖擊角度 $\alpha$ (deg)	15、30、45、60、75、90
沖擊距離 L(mm)	15
沖擊介質	純水混雜石英砂
砂流量(g/min)	2±0.5
石英砂粒徑( $\mu\text{m}$ )	250~350 $\mu\text{m}$
沖擊時間(min)	120

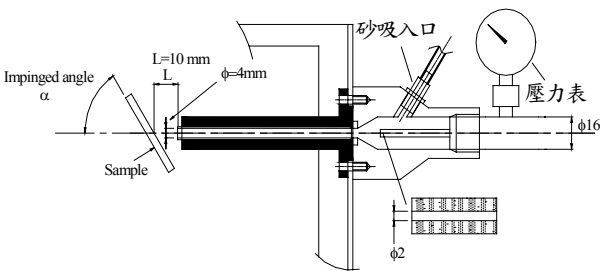


圖 1 沖擊介質之輸送管路與流程示意圖。

Figure 1 Configuration of the impingement erosion testing equipment.

後方圓盤的位置夾一  $\theta$  角。其中圓盤轉速  $\omega$  以 TESTON 製造之 DT5350 光學轉速計測定。並依  $V = L\omega/\theta$  之關係式，可精確算出水砂沖擊速度(V)。

### 2.3 沖擊試片分析

將水砂沖蝕試驗後之合金進行重量損失、表面硬度、SEM 等量測分析與觀察。重量損失量測採用 A&D Company 之 GR-202 型精密微量電子天平，精度 0.1 mg。硬度量測實驗係採用日本製 Akashi MVK-H11 型硬度試驗機(Micro-Vickers)，測試之荷重為 300 g，測試時間為 15 秒。每一試片之硬度值至少量測五點以上，而後求其平均值。SEM 使用之機型為 Topcon ABT-55 型掃描式電子顯微鏡，操作電壓為 10 kV。

## 3. 結果與討論

### 3.1 沖蝕形態與顯微組織

圖 3(a)、(b)分別顯示 SUS304 不銹鋼與鎳基自熔合金沖蝕前之金相組織。圖 3(a)顯示 SUS304 典型的沃斯田鐵組織形態。鎳基自熔合金為一種熱熔射合金，其熔射塗層常有高達 20%的孔隙度，但經高溫燒結後，雖然尚殘存微量孔隙，但塗層已變得相當緻密，如圖 3(b)所示。

SUS304 不銹鋼與鎳基自熔合金經水砂沖蝕 120 分鐘後，應用 SEM 觀察其表面形態，結果分別如圖 4(a)~(d)及(e)~(h)所示。圖 4(a)~(d)顯示 SUS304

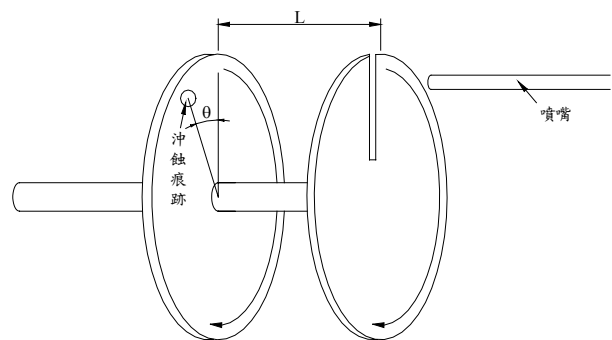


圖 2 Double disk 方法測量沖擊速度示意圖。

Figure 2 Illustration of the double disk method used to measure the impinged speed.

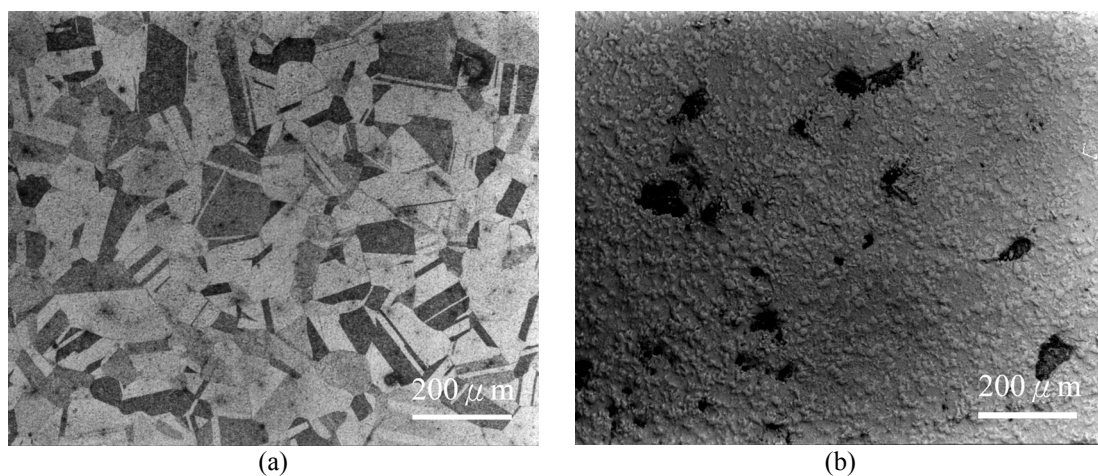


圖 3 (a) SUS304 不銹鋼，(b) 鎳基自熔合金沖蝕前之金相組織。

Figure 3 Optical microstructures of (a) SUS304 stainless steel and (b) Ni-based SFA.

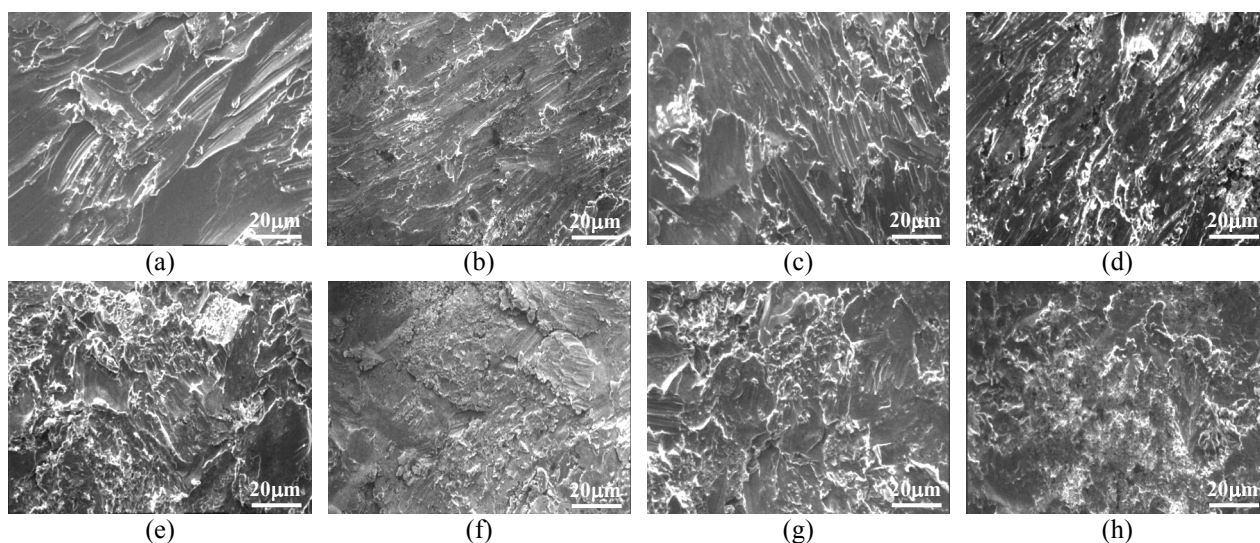


圖 4 SUS304 不銹鋼在(a) 15 度，(b) 30 度，(c) 60 度，(d) 90 度與鎳基自熔合金在(e) 15 度，(f) 30 度，(g) 60 度，(h) 90 度下沖蝕 2 小時後之典型顯微組織。

Figure 4 Typical scanning electron micrographs of impinged surfaces for (a-d) SUS304 stainless steel and (e-h) Ni-based SFA, subjected to impingement erosion of 2 hours at various angles: (a), (e) 15°; (b), (f) 30°; (c), (g) 60°; (d), (h) 90°.

不銹鋼為延性材料，沖蝕後之表面形態可歸納為二種明顯的表面紋理，以低角度(15 及 30 度)沖擊後，表面形成沖擊砂粒剝犁靶材之條紋狀流線痕跡，在條紋內部有明顯被砂粒刮削的凹窪形態，而且凹窪邊緣因塑性變形而擠延隆起。而以高角度(60 度)沖擊時，表面塑性變形嚴重，形成較小面積重疊式之

不規則凹坑，隨沖擊角度的遞增(90 度)，呈現薄片重疊覆蓋之勢。而圖 4(e) ~ (h)則顯示鎳基自熔合金之沖蝕結果。由於鎳基自熔合金為硬脆性材料，受沖擊時幾乎無塑性變形產生，原則上沖擊表面形成切削或脆裂剝落之形態。在低角度沖擊下，其表面形態與 SUS304 不銹鋼類似，即因切削機制而產生

與沖擊方向一致的流線痕跡，但無凹窪形態。當沖擊角度遞增時，鎳基自熔合金之表面形態雖然亦發現部分重疊覆蓋薄片，但其沖蝕形態還是以脆裂剝落為主。

### 3.2 沖蝕參數對沖蝕率的影響

#### 3.2.1 沖擊時間

鎳基自熔合金與 SUS304 不銹鋼在沖擊角度  $\alpha$

= 30、90 度與五種沖擊速度下，其重量損失與沖擊時間的關係分別顯示於圖 5(a) ~ (b)及圖 5(c) ~ (d) 中，沖擊角度  $\alpha=15、45、60、75$  度時之重量損失變化趨勢與  $\alpha=30、90$  度相類似，故省略之。由圖 5 可知，兩種合金靶材受沖擊後之重量損失皆隨著沖擊時間的增加而成線性增加，顯見合金靶材之沖蝕率於受沖擊期間呈穩定狀態，不會因為合金靶材於沖蝕期間之表面形態改變而有所變化。

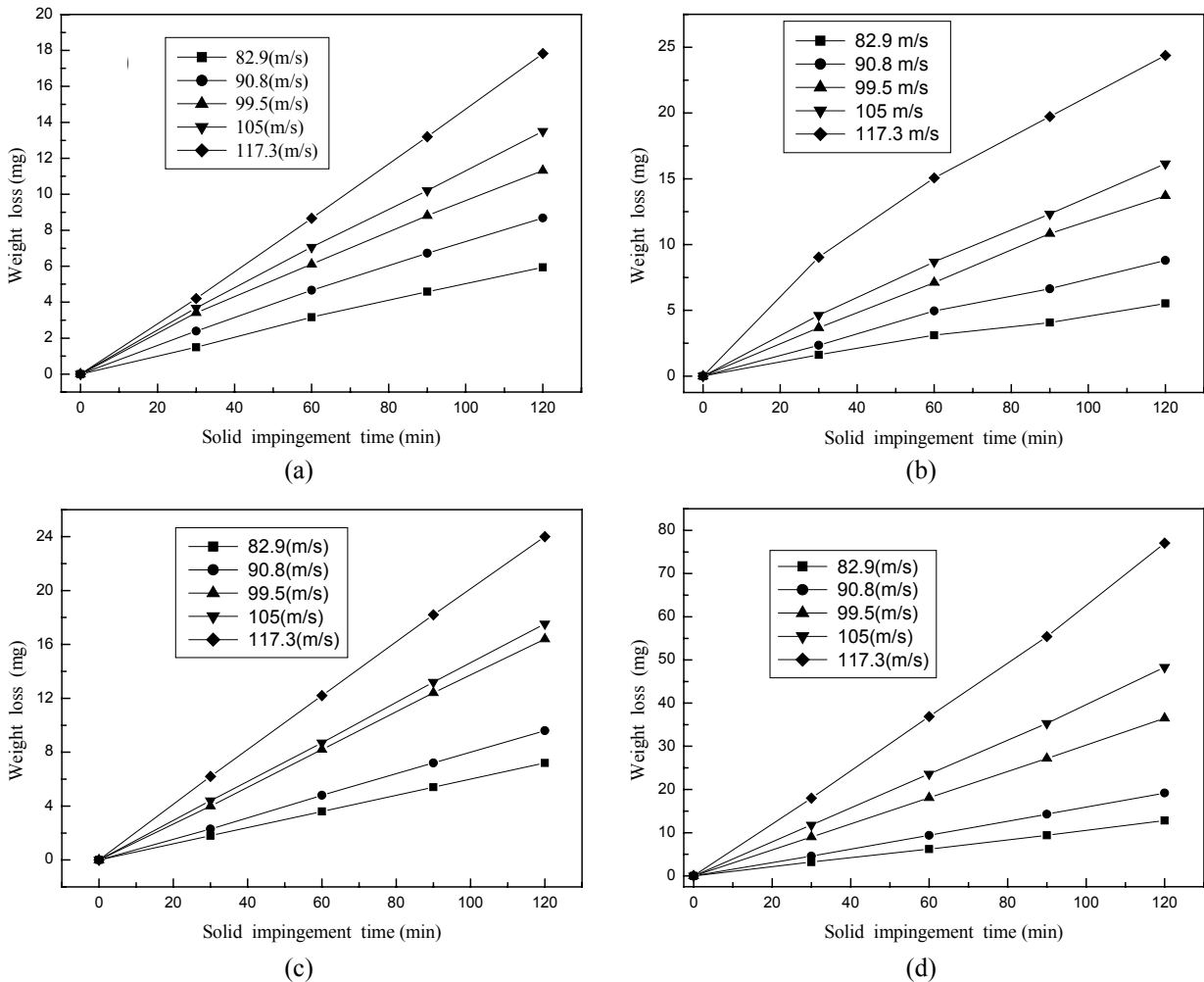


圖 5 (a) Ni-based SFA,  $\alpha=30$  度, (b) Ni-based SFA,  $\alpha=90$  度, (c) SUS304,  $\alpha=30$  度, (d) SUS304,  $\alpha=90$  度, 經不同時間沖擊後之重量損失。

Figure 5 Cumulative weight losses versus erosion time for Ni-based SFA and SUS304 stainless steel. (a) Ni-based SFA,  $\alpha=30^\circ$ , (b) Ni-based SFA,  $\alpha=90^\circ$ , (c) SUS304,  $\alpha=30^\circ$  and (d) SUS304,  $\alpha=90^\circ$ .

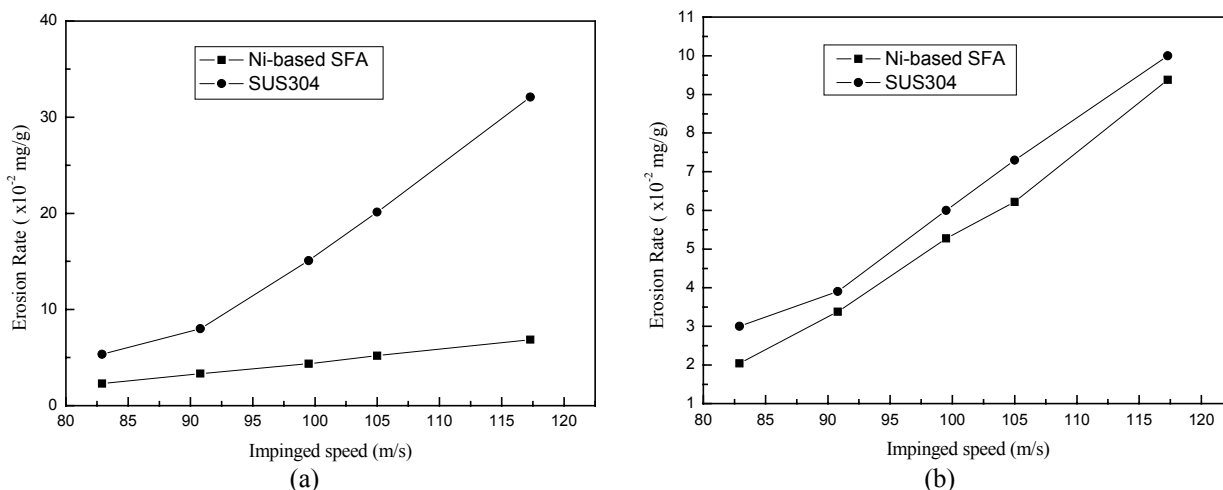


圖 6 兩種合金靶材在沖擊角度(a) 30 度，(b) 90 度下，沖擊速度對沖蝕速率的影響。  
 Figure 6 Erosion rates versus impinging speed for Ni-based SFA and SUS304 stainless steel at impinging angles of (a) 30°, (b) 90°.

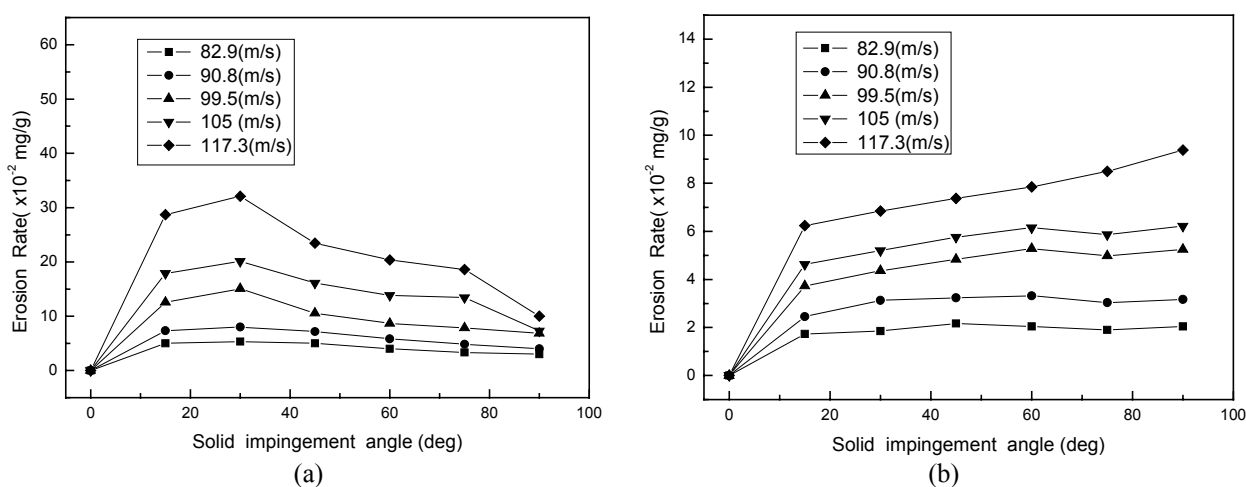


圖 7 (a) SUS304 不銹鋼，(b) 鎳基自熔合金在不同沖擊速度下，沖擊角度對沖蝕速率的影響。  
 Figure 7 Erosion rates versus impingement angle for (a) SUS304 stainless steel and (b) Ni-based SFA at various impingement speeds.

### 3.2.2 沖擊速度

沖擊速度對靶材沖蝕率之影響如圖 6 所示，圖中顯示鎳基自熔合金與 SUS304 不銹鋼於 30 度及 90 度沖擊角度下，其沖蝕率皆隨沖擊速度之增加而遞增。此外，詳細比較圖 6(a)、(b)之曲線變化可以發現，鎳基自熔合金於低沖擊角度時(例如  $\alpha=30$  度)，其抗沖蝕性較 SUS304 不銹鋼好很多，尤其是在較

高的沖擊速度下。但隨著沖擊角度的增加(例如  $\alpha=90$  度)，其與 SUS304 不銹鋼抗沖蝕性之差異則會縮小。

### 3.2.3 沖擊角度

圖 7 顯示在不同沖擊速度下，靶材沖蝕率與沖擊角度的關係。圖 7(a)中顯示 SUS304 不銹鋼之沖擊角度從高角度之正向壓應力逐漸轉變為低角度之

斜向剪切應力時，其沖蝕率逐漸遞增，直到 30 度之臨界值時，沖蝕率才又遞減，而且在較高沖擊速度下，沖蝕率以 30 度為分野的趨勢漸趨明顯。而鎳基自熔合金為一高硬度之脆性材料，承受沖擊時，甚少塑性變形產生，合金靶材僅以切削或剝落方式移除，故於高沖擊角度下，具有較大之沖蝕率，當靶材轉為低角度沖擊時，雖然沖蝕率略為降低，但變化不大。

表 2 顯示兩種合金靶材經水砂沖蝕前後之硬度值(HV)變化，由表 2 顯示，SUS304 不銹鋼因屬延性材料，一經水砂沖蝕後，立即產生加工硬化現象，而鎳基自熔合金本身為高硬度之脆性材料，在沖蝕期間之硬度值幾乎沒有變化。從表 2 中可觀察出沖擊角度對於 SUS304 不銹鋼硬度值之影響相當顯著，硬度值隨沖擊角度之遞增而增加。由此可知，高沖擊角度使 SUS304 不銹鋼靶材承受較大之正向壓應力，進而產生較大之塑性變形與加工硬化現象。

綜合上述結果與討論得知，於低沖擊角度與高沖擊速度下，鎳基自熔合金之沖蝕率遠低於 SUS304 不銹鋼，但隨著沖擊角度之增加，兩種合金靶材沖蝕率之差異則逐漸減小。此結果意指於低角度沖擊時，鎳基自熔合金因具有高硬度來抵抗水砂切削而可呈現優異的抗沖蝕性，但於高角度沖擊時則因為沖蝕機制轉為脆裂剝落型態，沖蝕率提高。但反觀 SUS304 不銹鋼，因其為延性材料且硬度較低，無法抵抗低角度沖擊之水砂切削而呈現較差之抗沖蝕性，但於高角度沖擊時，則因為加工硬化明顯，且本身仍具有優異韌性，可以有效抑制脆裂剝落等材料耗損現象，故其沖蝕率大幅降低，然而仍不如鎳基自熔合金般抗沖蝕。

#### 4. 結論

1. 兩種合金靶材之重量損失皆隨著沖擊時間之增加

而呈線性遞增，顯示沖蝕率呈現穩定狀態，不因靶材於沖蝕期間表面形態改變而有所變化。

2. 鎳基自熔合金為一高硬度之脆性材料，承受沖擊時，甚少塑性變形產生，靶材僅以切削或剝落方式移除，故於高沖擊角度下，具有較大之沖蝕率。而 SUS304 不銹鋼為延性材料，其沖蝕率於 30 度沖擊角時呈現最大值。
3. 兩種合金靶材之沖蝕率皆隨沖擊速度之增加而遞增。此外，鎳基自熔合金之抗沖蝕性優於 SUS304 不銹鋼，尤其是在低沖擊角與高沖擊速度之狀態下。
4. 鎳基自熔合金經水砂沖蝕後之顯微組織，於低角度沖擊後之表面形態與 SUS304 不銹鋼之延性靶材差異不大，即表面形成沖擊砂粒剝落靶材之條紋狀流線痕跡；而經高角度沖擊後，鎳基自熔合金則主要呈現以脆性剝落破壞形態為主。

#### 誌謝

感謝台電公司謝運華博士提供鎳基自熔合金試片，並感謝逢甲大學材料系何主亮教授與勤益技術學院機械系張子欽老師於水砂沖蝕試驗之協助。

#### 參考文獻

1. 張順太、吳錫侃，「台灣電力公司萬大發電廠第三號機動輪水斗及針閥、噴嘴使用材料之研究」，台大材料所研究報告，民國 75 年。
2. 王佳瓚，「立霧發電廠水輪機磨耗環材質改善」，台灣電力公司八十七年度研究發展專題報告，1998。
3. 王佳瓚，「超硬耐磨塗層研究與開發應用」，台灣電力公司八十一年度研究發展專題報告，1992。

表 2. 合金靶材經水砂沖蝕前後之硬度值(HV)

Table 2 Surface hardness (HV) after impingement erosion for Ni-based SFA and SUS304 stainless steel.

合金靶材	沖擊前	沖擊角度					
		15°	30°	45°	60°	75°	90°
Ni-based SFA	756	769	772	779	773	780	779
SUS304	264.3	323.5	348.0	422.9	428.5	470.0	481.0



4. Y. H. Shieh, J. T. Wang, H. C. Shih, and S. T. Wang, *Surface and Coatings Technology*, 58 (1993) 73.
5. S. K. Wu, H. C. Lin, and C. H. Yeh, *Wear*, 244 (2000) 85.
6. R. Richardson, *Wear*, 10 (1967) 291.
7. S. S. Aptechar, in: *Wear of Materials*, ASME, New York, 1985, pp. 677 ~ 686.
8. A. W. Ruff and L. K. Ives, *Wear*, 35 (1975) 195.

收到日期：2006年2月1日  
修訂日期：2006年4月21日  
接受日期：2006年4月24日