

電磁鋼片特用高性能無鉻防蝕塗膜

彭剛勇

Cr-Free Anti-corrosion Coating with High Performance for Electrical Steels

Kang-Yung Peng

Received 4 July 2015; received in revised form 25 July 2015; accepted 1 August 2015

摘要

電磁鋼片(ES)是具有特殊電磁特性的鐵矽合金，在發電機、壓縮機、馬達、變壓器中扮演能量轉換的平台角色。由於耐蝕性、絕緣性、加工性等方面之需求，現今的電磁鋼片大多具有表面塗膜。目前電磁鋼片的塗膜可分為含鉻與無鉻兩大系統。含鉻塗膜雖然並不符合環保之潮流，但目前仍為 ES 主要的塗膜系統。為取代含鉻系統，無鉻塗膜之性能必須更加精進。本文探討高性能 C6N8-2 無鉻塗膜、並與無鉻 C6N8-1 以及含鉻 C628 兩種標準塗膜進行比較。C6N8-2 不但明顯優於無鉻 C6N8-1，在耐蝕性、絕緣性、底材附著性方面，也與 C628 含鉻塗膜相當或更佳。因此，除可滿足一般應用外，高性能 C6N8-2 無鉻塗膜亦可用於講求高效能之產品，以促進無鉻環保技術於電機系統上之推廣。

關鍵詞：腐蝕；塗料；塗膜；無鉻；電磁鋼片。

ABSTRACT

Electrical steels (ES) are alloys of Fe-Si with special electromagnetic properties, due to which ES can serve as a platform for energy transformation in power generators, compressors, motors and transformers. To gain anti-corrosion capability, electrical insulation, and workability, most modern ES coils are surface coated. Nowadays there are two main coating systems for ES, the chromium (Cr)-based and the Cr-free. So far the Cr-based coatings have been the standard for ES and are still dominant now, even though they are not environment-friendly in the manufacturing stage. And the performance of the Cr-free ES coatings must be elevated before taking place of the present Cr-based system in the market. In this paper, an advanced Cr-free ES coating, C6N8-2, is investigated and compared with C6N8-1 (Cr-free) and C628 (Cr-based) for benchmarking. C6N8-2 not only overwhelms C6N8-1 but also has performance as good as or even better than C628 in corrosion resistance, interlayer resistance, adherence to substrates. Therefore, C6N8-2 coating is expected to promote the application of environment-friendly Cr-free technologies in general-purpose as well as high-performance ES end products.

Keywords: Corrosion; Paint; Coating; Chromium-free; Electrical steel; ES; Cr-free.

1. 前言

電磁鋼片(Electrical Steel, 簡稱 ES)是具有特殊電磁特性之鐵矽合金, 又稱矽鋼片、電氣鋼片(日)、或電工鋼片(中國大陸)。電磁鋼片是變壓器、馬達、發電機、壓縮機等設備的核心材料, 使能量可在電、磁、機械等形式間進行設計所需之轉換, 從而使設備發揮應有的功能。

此能量轉換的效率由許多因素所決定。以馬達為例, 係由兩大類能量損耗所組成: 「機械損失」(轉子摩擦損失 Friction loss、轉子風阻損失 Windage loss)、以及「電磁損失」(繞線銅損 Copper loss 與電磁鋼片鐵損 Iron loss)。其中第二類佔總能量損耗之比率可達 70%^[1], 是影響機電效率的最主要因素。

電磁鋼片本身之鐵損可說是決定設備機電效率最重要之本質因子。鐵損可分為: 磁滯損失(Hysteresis loss P_H)、渦流損失(Eddy current loss P_E)^[2]。其中, P_H 與電磁鋼片的電磁特性以及微結構(晶粒大小)有關; 而 P_E 則與 ES 底材的厚度平方(t^2)成正比、而與電磁鋼片的電阻率(σ)成反比。因此, 電磁鋼片都是以鋼捲薄片的方式產出與使用, 並且電磁鋼捲表面都塗覆了可以增加阻抗的絕緣層^[3,4]。

$$\text{Iron loss } (P_T) = \text{Eddy current loss } (P_E) + \text{Hysteresis loss } (P_H) \quad (1)$$

$$P_E \sim t^2/\sigma \quad (2)$$

此絕緣層除了提供層間阻抗以外, 另一項重要之功能是保護電磁鋼片底材, 使其免於水氣、氧氣、鹽分等腐蝕因子之侵蝕, 以增加其防銹性。因此, 目前各鋼廠 ES 鋼捲產品的表面處理, 大多是以具有耐蝕與絕緣效果之塗料於高速輥塗線塗覆、再於連續烘烤爐中完成塗料的乾燥固化。

表 1. 電磁鋼片塗膜基本特性之測試方式。

Table 1 Test methods for the evaluation of ES coatings.

塗膜特性	測試條件或方法
耐蝕性	35 °C 5% NaCl _(aq) 、1 ~ 2 mL/h、5h
絕緣性	JIS C2550
附著性	5% CuSO ₄ 10 s
退火性	N ₂ 、750 °C、2 h
硬度	1 kg
電化學參數	-0.25V ~ +0.60 V (vs E _{Corr})、1 mV/s

傳統的電磁鋼片塗料係以鉻酸為主要成分, 塗膜防銹性能優越。但因原料含六價鉻, 具有高毒性, 近年已被 RoHS、REACH 等法令所管制^[5,6]。因此, 電磁鋼片塗料也開始朝環保、無鉻化之方向發展。有鑑於此, 中鋼於 2007 年領先業界推出第一代 C6N8-1 無鉻塗膜。然市場對電磁鋼片高性能塗膜的要求日殷, 中鋼亦持續無鉻塗膜性能之精進, 於 2013 年再開發完成「絕緣性」、「耐蝕性」、「附著性」等特性均更佳的 C6N8-2 第二代無鉻塗膜。

本文將無鉻 C6N8-1 以及含鉻 C628 兩種標準塗膜作為參考, 並由塗膜微結構、電化學特性等分析結果, 解析 C6N8-2 具備高效性能之原因。

2. 實驗方法

本文中各塗膜試片之底材均為 50CS1300 規格之電磁鋼片。塗膜鋼片之測試方法列於表 1, 分別詳述於後。

2.1 膜面耐蝕性(鹽霧測試)

將塗膜鋼片適當裁切後, 四邊均以膠帶封邊, 再置於鹽霧試驗機(Salt Spray Tester, 溫度 35 °C, 噴霧量 1 ~ 2 mL/hr, 溶液 NaCl 濃度 5 %)中測試 5 小時。

2.2 塗膜絕緣性(層間電流測試)

以符合 JIS-C-2550 標準之層間電流計對 10 cm × 30 cm 之試片進行測試, 層間阻抗可由以所測得之電流平均值(I)透過下式計算之。

$$R_s = 10 \left[\frac{1}{I} - 1 \right] \quad (3)$$

2.3 塗膜附著性(彎曲衝擊測試)

將有塗膜鋼片進行衝擊(12.5 mm Ø、500 g 之衝擊棒自 50 cm 高處落下)與彎曲(直徑 6.4、2 mm), 再將鋼片浸入 5 % CuSO₄ 水溶液 10 秒鐘, 取出檢視紅銹出現之程度。

2.4 塗膜耐退火性(高溫氮氣處理)

將塗膜鋼片適當裁切後, 對疊後放入通氮氣之

退火爐，進行 750 °C、2 小時之應力消除退火處理 (Stress-Relieving Annealing, SRA)，冷卻後以 Scotch 600 膠帶黏貼後再撕下，以判定退火塗膜的附著性。

2.5 塗膜硬度(鉛筆硬度測試)

係將不同硬度(JIS 硬度規格 3H ~ 9H)的鉛筆，以 45 度角度，1 Kg 的力量擦過塗膜。再將鋼片浸入 5 % CuSO₄ 水溶液 5 秒鐘，取出檢視是否出現紅色線蝕。合格之塗膜必須要在 9H 鉛筆的摩擦之下也不會產生紅色線蝕。

2.6 電化學參數分析(極化曲線之測試)

使用 ACM Field Machine 電化學分析儀，採標準的三電極方式進行動電位掃描：工作電極為待測試片(塗膜鋼片或裸片)、反電極為白金片、參考電極為 Ag/AgCl-3M KCl，電極液為 3.5 % NaCl 水溶液。待測試片暴露於電解液的面積為 1.0 cm²，除裸片是直接掃描測試外，塗膜鋼片均會先於開路狀況下靜置 15 分鐘以後，才開始進行極化掃描。每次掃描前均會先測試其腐蝕電位(corrosion potential E_{Corr})後，再由相對於腐蝕電位的-0.25 V 開始掃描至+0.60 V，掃描速度為 1 mV/s。再以所得之極化曲線，由其還原段內插至腐蝕電位，以獲得其腐蝕電流密度(corrosion current density I_{Corr})。

2.7 切邊防銹性

首先將試片衝製成 3 cm × 6 cm 之大小，堆疊為厚度 2.5 cm 之疊片後，常溫下暴露於大氣進行測試，並於各時間(第 1、3、5、26 週)檢視各疊片樣本切斷面之銹蝕程度。各測試下之樣本切斷面均分「無油」、與「上油(北杉化學 S-162N 衝片油)」兩種條件。

2.8 塗膜橫截面分析

將塗膜鋼片裁切為 1 cm² 後，先於表層蒸鍍白金保護層，再以雙束聚焦鎵離子束(DB-FIB: dual-beam focused gallium ion beams, FEI Nova-200 NanoLab Compatible, 成大微奈米中心)在表面刻出凹槽，最後以 65,000 倍 SEM 對凹槽切面進行觀測。

3. 結果與討論

3.1 塗膜橫截面

圖 1 是 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片以 DB-FIB 切出凹槽後，其橫截面的電子顯微鏡掃描圖^[7]。各圖中最上方者為進行 DB-FIB 離子束切口前所蒸鍍的白金保護膜，最下方者為 ES 底材。圖中具有程度不一孔隙度的中間層即為塗膜本身之橫截面。三種塗膜的厚度均在 0.7 ~ 0.9 μm 間。塗膜中的空洞，則是因塗料濕膜於爐區高溫烘烤時，水分快速逸失所造成。

C628 塗膜之橫截面，可看到許多圓形、均勻

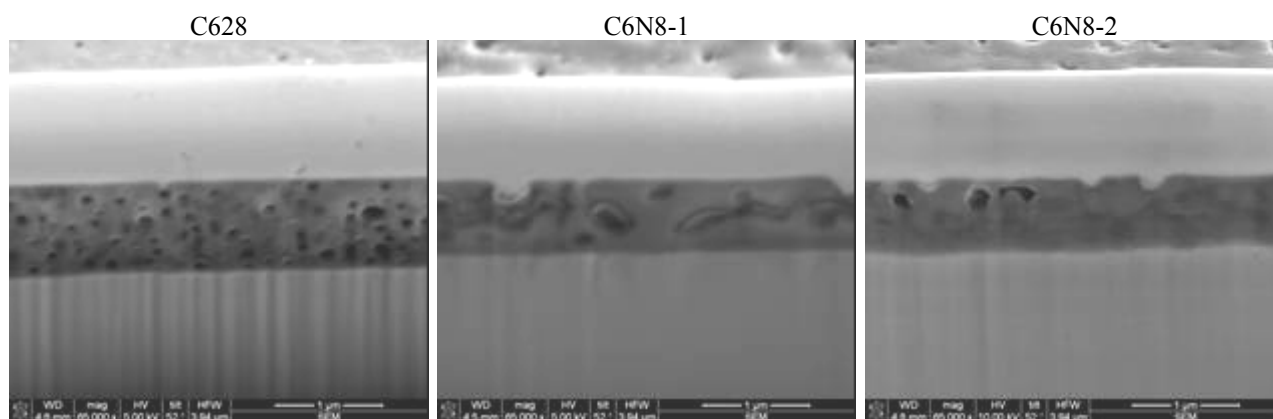


圖 1 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片橫截面的電子顯微鏡掃描圖 (65,000 ×)。

Figure 1 Cross-sectional SEM images of ES with the coating: C628, C6N8-1, and C6N8-2 (65,000 ×).

散佈的小孔洞。由於這些孔洞尺寸很小，無法在塗膜內形成連續的通道。C6N8-1 塗膜則可觀察到形狀不規則、尺寸較大的孔洞。其橫截面圖亦顯示，這些孔洞會形成尺度與塗膜厚度相當的連續空腔。

至於 C6N8-2，雖然其橫截面也可觀察到孔洞，但數量很少無法形成連續通道。故與其他兩者相較，C6N8-2 具有最為密實的塗膜結構。

3.2 膜面耐蝕性

由圖 1 各塗膜的橫截面 SEM 圖顯示，C6N8-2 塗膜具有最小的孔隙度。因其結構最為密實，故隔絕腐蝕因子之能力可以預期應是三種塗膜中最佳者。

圖 2 是各塗膜鋼片經過鹽霧測試(SST)後之外觀^[7]。C6N8-1 無鉻塗膜試片的銹蝕相當明顯，C628 含鉻塗膜試片則呈現輕微銹蝕。相較之下，C6N8-2 雖然是無鉻塗膜，但是在相同的鹽霧測試後仍沒有出現任何銹蝕，其鹽霧耐蝕性是三者中最好的。此

結果與圖一所示塗膜橫截面孔隙度趨勢相符。

3.3 電化學參數分析

圖 3 是電磁鋼片裸材以及各塗膜鋼片的極化曲線圖。由此圖結果可以獲得底材本身以及各塗膜的腐蝕電位(corrosion potential E_{Corr})、以及腐蝕電流密度(corrosion current density I_{Corr})，列於表 2。

裸材的腐蝕電流密度為 $17.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，略小於文獻中純鐵在 3.5 % NaCl 水溶液中測試之結果($25.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)^[8]。各塗膜試片的腐蝕電流密度則分別為：C628 $\sim 1.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、C6N8-1 $\sim 2.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、C6N8-2 $\sim 0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。若將裸材的防蝕效率定義為 0，則可以透過各塗膜試片相對於裸材的腐蝕電流密度的降低量，計算出各塗膜的防蝕百分比效率(η): C628 $\sim 94\%$ 、C6N8-1 $\sim 85\%$ 、C6N8-2 $\sim 96\%$ ，亦列於表 2。

極化曲線所得到的腐蝕電位 E_{Corr} 、以及腐蝕電流密度 I_{Corr} ，分別可代表熱力學、與動力學觀點的防蝕性：腐蝕電位 E_{Corr} 越高(在圖 3 越上方)，熱力

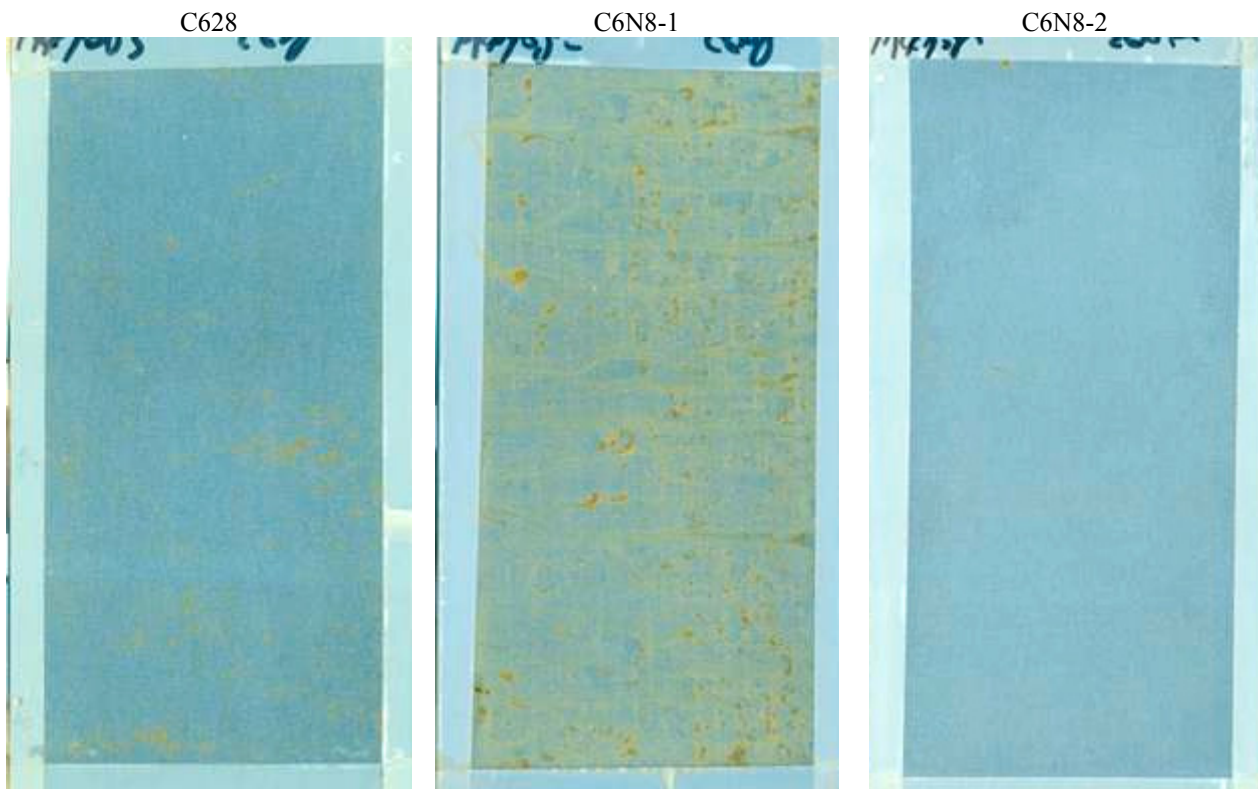


圖 2 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片經 5 小時鹽霧測試後外觀之掃描圖。

Figure 2 Salt spray test (5 hrs) results for ES with the coating: C628, C6N8-1, and C6N8-2. (scanned images)

學上則越不容易發生腐蝕。腐蝕電流密度 I_{Corr} 越低(在圖 3 越左方)，於動力學上則表示腐蝕速率越慢。

由表 2 的各數據，顯示「熱力學」上防蝕性最好的塗膜還是含鉻型的 C628(E_{Corr} 約 -565 mV，相對於 Ag/AgCl-3M KCl 參考電極)，而兩種無鉻塗膜 C6N8-1 與 C6N8-2 在熱力學上的防蝕性相當(E_{Corr} 相當，約 -595 mV)，雖遜於含鉻塗膜，但相較於裸材 (E_{Corr} 約 -710 mV) 均仍可提供熱力學上抑制腐蝕之效果。但是若從「動力學」的角度來看，C628 含鉻塗膜雖明顯優於第一代含鉻塗膜 C6N8-1，但三者中耐蝕性最好的卻是 C6N8-2 第二代無鉻塗膜(腐蝕電流密度為三者最小、防蝕效率為三者最高)。

圖 3 與表 2 的分析顯示，各塗膜試片於電化學實驗中腐蝕速率之順序為：C6N8-2 第二代無鉻塗膜

< C628 含鉻塗膜 << C6N8-1 第一代無鉻塗膜。此結論與由圖 1 塗膜橫截面 SEM 圖之推論、以及圖 2 塗膜鋼片鹽霧測試之結果均相符。

3.4 絕緣性

電磁鋼片的絕緣性是決定其鐵損之重要因子，鐵損表現又是控制機電設備能量轉換效率的關鍵特性。以風扇馬達、小型變壓器等一般民生應用而言，對電磁鋼片的絕緣性要求並不高，層間阻抗 $10 \Omega\text{cm}^2/\text{sheet}$ 即已足夠。但因應節能之需求，對於講求高效率、低溫升的應用，如 IE2/3/4 馬達、大型機電設備等，塗膜之絕緣性會影響終端產品效能，是必須納入設計考量之關鍵特性。

各塗膜電磁鋼片於 JIS-C-2550 標準下進行絕緣

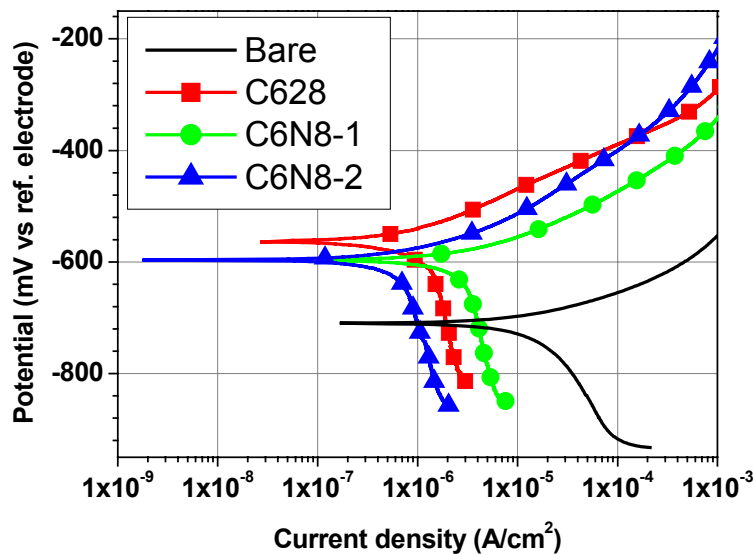


圖 3 電磁鋼片裸材、以及 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片之極化曲線。

Figure 3 Polarization curves of the bare substrate and the coated ES: C628, C6N8-1, and C6N8-2.

表 2. 裸材、以及 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片之電化學參數(取自圖 3 之極化曲線)。

Table 2 Electrochemical characteristics of the bare substrate and ES with the coating: C628, C6N8-1, and C6N8-2 (extracted from the polarization curves in Fig. 3)

項目	塗膜鋼片			裸材
	C628	C6N8-1	C6N8-2	
腐蝕電位 E_{Corr} (mV)	ca -565	ca -595	ca -595	ca -710
腐蝕電流密度 I_{Corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	1.1	2.7	0.7	17.5
防蝕效率 η (%)*	~ 94	~ 85	~ 96	定義為 0

* 塗膜試片防蝕效率 $\eta = [1 - \text{塗膜試片 } I_{Corr} / \text{裸材 } I_{Corr}] \times 100\%$

性測試所得到的典型測值列於表 3。第一代無鉻塗膜 C6N8-1 的層間阻抗一般可達 $10 \Omega\text{cm}^2/\text{sheet}$ 以上，與含鉻塗膜 C628 相當。

但對第二代無鉻塗膜 C6N8-2 而言，因為其塗膜相當緻密，亦具有更低的極性，其層間阻抗在 $20 \Omega\text{cm}^2/\text{sheet}$ 以上(厚度 $0.9 \mu\text{m}$ 的塗膜，可達 $50 \sim 150 \Omega\text{cm}^2/\text{sheet}$)，絕緣性明顯優於 C628 與 C6N8-1 兩種參考塗膜。因此，C6N8-2 第二代無鉻塗膜不但可用於一般產品，其絕緣性亦足可滿足講究節能高效的高端機電應用，其泛用性較 C628 與 C6N8-1 兩者更佳。

3.5 附著性

電磁鋼片是以鋼捲的方式生產與供應，在成為機電產品的關鍵核心組件之前，電磁鋼捲必須經過分條、衝片、組裝等各種工序。這些加工製程許多都牽涉到鋼片的裁剪或變形，會對底材與其上的塗膜施加應力，並進而造成微觀上的應變。因此，塗膜對底材的附著能力，對塗膜是否能夠抵禦這些加工製程相當重要。

表 3. C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜試片典型之絕緣性。

Table 3 Typical insulation capability of ES with the coating: C628, C6N8-1, and C6N8-2.

項目	C628	C6N8-1	C6N8-2
層間電流 (A)	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.3
層間阻抗 R_s ($\Omega\text{cm}^2/\text{sheet}$)	≥ 10	≥ 10	≥ 20

各塗膜電磁鋼片於彎曲(彎曲直徑 $6 \sim 2 \text{ mm}$)、或衝擊測試後，浸於硫酸銅溶液再取出的外觀，彙整於圖 4。硫酸銅溶液中的銅離子可作為氧化加速劑，當塗膜因鋼片加工變形而影響對底材附著性時，銅離子會滲入與底材的鐵產生反應：氧化底材的鐵為離子，本身並形成紅褐色、還原態的銅沈積。因此，若塗膜附著性越好，則經此測試處理後的紅色沈積會越少。

對於含鉻 C628 塗膜試片而言，經 6 mm 直徑的彎曲，即呈現全面紅褐色沈積。相較之下，第一代無鉻塗膜 C6N8-1 的試片於相同狀況下，其銅沈

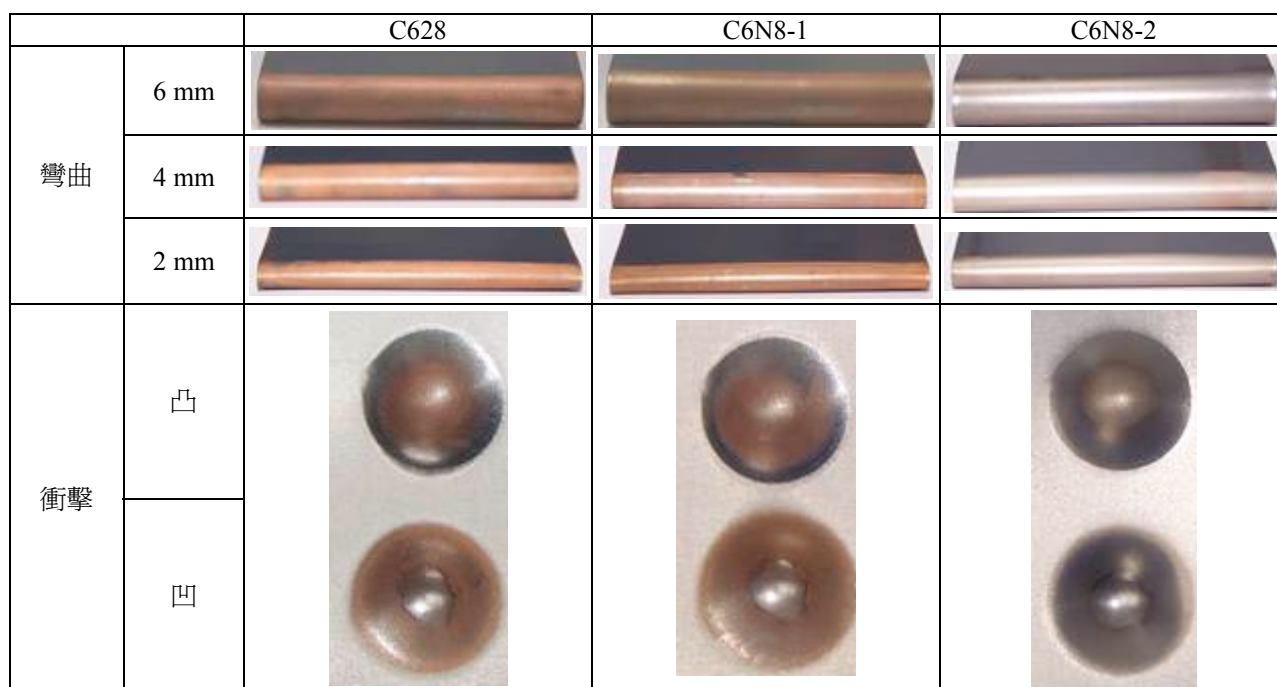


圖 4 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片之彎曲與衝擊附著性。

Figure 4 Bending and impact test results on the adhesion of coating to substrate for ES with the coating: C628, C6N8-1 and C6N8-2.

積顏色較淺，顯示 C6N8-1 塗膜對底材的附著性應較 C628 佳。當彎曲直徑降為 4 mm 時，C6N8-1 試片彎曲處的紅褐色沈積物更為顯著。於最小彎曲測試直徑 2 mm 時，C6N8-1 試片彎曲處也呈現了全面性的紅褐色沈積物。

反觀第二代無鉻塗膜 C6N8-2，在彎曲直徑 6 mm 時，浸泡硫酸銅溶液後仍不會於彎曲處出現任何銅侵蝕之現象，表示在此變形條件下塗膜仍堅牢的附著於底材，無論是界面上或是塗膜本身都不會因此產生足以破壞塗膜附著之缺陷。此外，即使是以最小的 2 mm 直徑進行彎曲，C6N8-2 塗膜鋼片也僅顯示很輕微的紅褐色沈積，其完好程度甚至也遠優於以 6 mm 彎曲之 C628 與 C6N8-1 樣本。

圖 4 下方為各塗膜試片經衝擊測試後之外觀，顯示 C628 含鉻塗膜與 C6N8-1 第一代無鉻塗膜鋼片經過衝擊後，其塗膜對底材的附著狀況均明顯受到了影響。但是，C6N8-2 第二代無鉻塗膜鋼片於同樣狀況下，仍可保有相當的塗膜附著度。

圖 4 的結果顯示各塗膜對電磁鋼片底材的附著性：C6N8-2 第二代無鉻塗膜明顯優於含鉻的 C628 塗膜，也比第一代無鉻塗膜 C6N8-1 更佳。

3.6 退火性

圖 5 是各塗膜試片於氮氣下 750 °C 退火 2 小時後之外觀^[7]。氮氣下的退火其效果相當類似木材的乾餾，其結果會將塗膜中的有機成分轉化為焦炭。故各塗膜於退火後之外觀均由透明轉變為灰黑色。

以膠帶黏貼退火樣本後撕下，各退火試片均沒有塗層剝離的狀況(圖 5 下方膠帶的不勻外觀是因照相時的反光所造成，而非退火塗膜從試片上被撕離)。顯示 C6N8-2 第二代無鉻塗膜、C628 含鉻塗膜、第一代無鉻塗膜 C6N8-1 三者均可以耐受氮氣退火之加工製程。

3.7 切邊防銹性

為提供絕緣與防蝕之效果，現今電磁鋼捲之上下表面大多有塗層。然而為了將電磁鋼捲加工為特定形狀，必須進行鋼片的裁切(如分條與衝片)，電磁鋼片也因此會產生新的剪切面。由於這些剪切面通常不會再另外施加防銹處理，因此，切邊通常比塗膜面易發生銹蝕，也是電磁鋼片使用實務上常遇到的問題。

切邊的防銹力除受底材本身的耐蝕性所影響，也會與鋼片上的塗膜有關。為比較 C6N8-2 第二代無鉻塗膜、第一代無鉻塗膜 C6N8-1 以及 C628 含鉻塗膜在切邊上防銹性的差異，我們以合金成分相同的底材製作塗膜鋼捲，並將各塗膜鋼捲衝片後堆疊，於同一時間、同一環境中常溫進行大氣暴露，以觀察各時間下各塗膜試片切邊銹蝕之程度。圖 6 是暴露 1、3、5、26 週後，各樣本的切邊外觀。將各樣本於各時間的銹蝕程度量化為銹蝕面積百分比，其結果彙整於圖 7(左、右方則分別為無油、與上油切邊的實驗結果)。



圖 5 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片之退火附著性(以 Scotch 600 膠帶黏貼後撕下，下方為撕下的膠帶)。
Figure 5 Tape (Scotch 600) test results for the annealed ES with the coating: C628, C6N8-1 and C6N8-2. (upper: the sample with tape torn off; bottom: the tape)






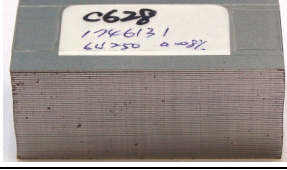

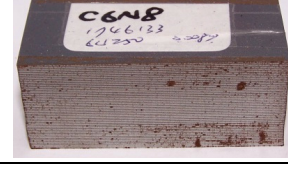
	週數	C628	C6N8-1	C6N8-2
無油	W1			
	W3			
	W5			
	W26			
有油	W1			
	W3			
	W5			
	W26			

圖 6 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼捲衝製疊片於常溫大氣暴露第 1、3、5、26 週後之切面外觀。

Figure 6 Appearance of the cutting edges of stampings in week 1, 3, 5 and 26 during the "room-temperature indoor atmosphere exposure" for ES with the coating: C628, C6N8-1 and C6N8-2.

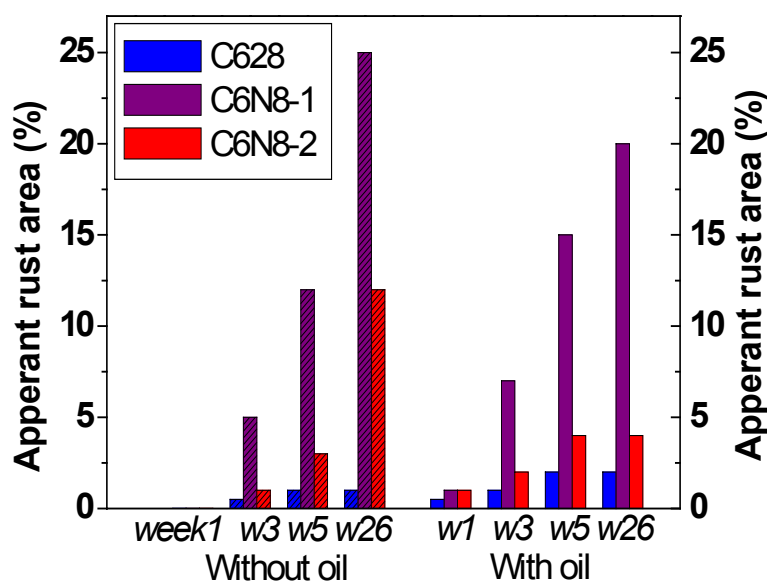


圖 7 C628、C6N8-1 與 C6N8-2 塗膜鋼片衝製疊片之切面防銹性：常溫大氣暴露於第 1、3、5、26 週之結果。
Figure 7 Apparent rust area percentage on the cutting edges of stampings in week 1, 3, 5 and 26 during the "room-temperature indoor atmosphere exposure" for ES with the coating: C628, C6N8-1 and C6N8-2.

切邊無油時(圖 7 左)，各塗膜樣本疊片之切邊在第一週均未出現銹蝕的狀況。到第三週時，C6N8-1 無油切邊試片已可看到明顯之銹斑，C628 與 C6N8-2 則僅有非常少的銹斑。第一代無鉻塗膜 C6N8-1 的切邊生銹隨時間進展的相當快速，至第 26 週時，已經有約 25%的面積被銹蝕所覆蓋。相較之下，含鉻的 C628 塗膜試片無油切邊的銹蝕狀況，在第 26 週時仍然相當輕微，是三種塗膜中最好的。第二代無鉻塗膜 C6N8-2 的無油切邊銹蝕程度，則介於兩者間。

切邊有衝片油時(圖 7 右)，在第一週內各塗膜樣本疊片之切邊均已出現些微銹蝕的狀況。這個初期銹蝕的現象與無油時的狀況相當不同，顯然此測試所使用的衝片油會引發銹蝕。在切邊有油的狀況下，C6N8-1 塗膜樣本的切邊銹蝕隨時間進展的速度仍相當快。相較之下，第二代無鉻塗膜 C6N8-2 的切邊銹生長速度，在有油的狀況下則明顯受到抑制，使得其切邊銹蝕程度遠低於 C6N8-1，並與含鉻 C628 塗膜相近。

圖 6 與圖 7 顯示了加工油品對電磁鋼片切邊銹蝕狀況之影響。此測試所使用的油品，經分析含有 Cl(含量~ 500 ppm)、S(含量~ 200 ppm)等元素，可能

是其添加劑、或是雜質。上油切邊在大氣暴露下比無油切邊更早發生銹蝕，可能與油品中含以上雜原子之成分(可能為離子、或是化合物)有關。然而，將大氣暴露時間拉長後(如第 26 週)，上油切邊的銹蝕程度反而低於無油切邊樣本。此結果顯示測試所用的油品對切邊上長時間之銹蝕發展仍有一定的抑制能力。此長期抑制之特性應與油品本身的疏水性有關：油品雖然因雜原子成分引發銹蝕，但由於油仍可阻擋環境中氧氣、水氣、鹽分等滲入，故某種程度上發揮了阻隔腐蝕因子的效果，進而抑制了長時間下切邊銹蝕的發展。

此外，由圖 6 與圖 7 的結果亦顯示：第二代無鉻塗膜 C6N8-2 的切邊防銹蝕力優於第一代無鉻塗膜 C6N8-1，在特定狀況下其切邊防銹力更可接近含鉻塗膜 C628。

4. 結論

因為含鉻系統具有優良的塗膜特性，是電磁鋼片防蝕絕緣塗膜長久以來的主流。但因需使用含六價鉻的毒性原料，故在環境保護的大趨勢下，塗膜的無鉻化實為必須。有鑑於此，針對電磁鋼片特用

塗膜，本文發展了性能不遜於傳統含鉻型 C628 的「第二代無鉻塗膜 C6N8-2」，以取代前一代的 C6N8-1 無鉻技術。

C6N8-2 具有緻密的塗層結構，對底材的附著性更佳，其耐蝕性不但遠勝第一代無鉻塗膜、甚至可略優於以防銹性見稱的含鉻塗膜。此外，C6N8-2 亦具有三者中最佳的絕緣性與底材附著性。因此，C6N8-2 除適合一般用途外，也能滿足高效節能之需求，應用範圍可較前代無鉻塗膜產品更廣。

由於 C6N8-2 具有優良的塗膜性能，將有助於電磁鋼片塗膜無鉻技術的普及，與產品價值之差異化，使環境保護與市場推展能並行不悖。

誌謝

感謝中鋼公司於電磁鋼片塗膜無鉻技術相關研究計畫(PJ-98617、PJ-99606、PJ-00635、PJ-02607)之經費與設備支持。

參考文獻

1. T. E. Yang, "Specification, Quality Control and Application of Electrical Steel", in Technical Seminar of Electrical Steel 2015, New Delhi & Pune, India, June 23, 25, 2015.
2. F. G. Hanejko, G. W. Ellis, and T. J. Hale,

"Application of High Performance Material Processing-Electromagnetic Products", in PM2TEC'98 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Las Vegas, USA, May 31 – June 4, 1998.

3. M. Lindenmo, A. Coombs, and D. Snell, J. Magn. Mater., 2000, 215-216 (2000) 79.
4. ASTM A976:03 Standard Classification of Insulating Coatings by Composition, Relative Insulating Ability and Application.
5. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS).
6. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE).
7. K. Y. Peng, K. C. Hsieh, R. M. Chen, and Y. P. Sui, China Steel Technical Report, 25 (2012) 42.
8. E. McCafferty, Corros. Sci., 47 (2005) 3202.

收到日期：2015 年 7 月 4 日

修訂日期：2015 年 7 月 25 日

接受日期：2015 年 8 月 1 日