

馬達銅轉子與銅鋁複合轉子製程

唐乃光

金屬工業研究發展中心 金屬製程研發處 熔鑄組

前言：絕大部分鼠籠式馬達的轉子為純鋁壓鑄而成，因為鋁壓鑄適合大量生產且製程成本低。而銅的導電度比鋁高出 50% 以上，故使用銅轉子可得到更高的效率。但純銅的熔點比純鋁高很多，因此壓鑄銅轉子的困難度高很多，而模具壽命也很短，提高了成本。因此在「全電化都會運輸系統基礎技術」計畫中開發了銅鋁複合轉子，導電率可接近壓鑄銅轉子，並可降低生產成本。

傳統鼠籠式馬達的轉子製造方式，通常是先用矽鋼片疊成圓筒狀的鐵芯，再將鐵芯放入壓鑄模具，然後以純鋁壓鑄充填端環與導槽。由於純銅的導電率比純鋁高出 50% 以上，若以純銅壓鑄馬達轉子，就可以得到更好的馬達效率。根據國際銅協的資料，約可提高 1.2~1.6% 的效率。然而因為純銅的熔點是 1083°C，比純鋁的熔點 660°C 高很多，所以整個壓鑄過程較傳統的鋁壓鑄困難很多。首先熔解爐必須使用感應爐，以便快速熔解純銅(一般使用 C1100 等級的純銅)，而非一般鋁壓鑄常用的電阻爐或以天然氣加熱的熔解爐；必要時熔解爐需以氬氣保護，以免銅氧化造成導電率下降。而給湯也不能像一般的鋁壓鑄，以機械手臂將鋁液舀至壓鑄機的料管內，因為這樣會使銅液溫度下降，甚至凝固。目前一般的作法，是以器械將熔銅的坩堝整個從感應加熱裝置中取出，移至壓鑄機旁，然後將銅液倒入料管中。由於銅液的溫度非常高(約 1260°C 以上)，所以料管若以平常壓鑄使用的 SKD61 材質製造，很容易損壞。同樣的，模具若使用 SKD61 材質，壽命通常不長。為了增加料管與模具壽命，國際銅

協嘗試使用鎳基超合金，例如：Inconel 617 和 HAYNES 230 之類的材料。但這類材料不僅價格昂貴，而且加工十分困難。這些因素都會增加壓鑄銅轉子的成本。

為了提升馬達轉子的導電率，又要在成本上有競爭力，在「全電化都會運輸系統基礎技術」計畫內，進行了銅鋁複合馬達轉子的開發研究。銅鋁複合馬達轉子的作法，是以銅條穿入馬達轉子鐵芯的導槽，然後將鋁液澆鑄成轉子的端環，純鋁將銅導條結合在一起，形成短路。這樣的複合轉子雖然導電率比不上純銅鑄成的馬達轉子，但還是可高於鑄鋁轉子 40% 以上。而由於熔解的金屬是純鋁，所以熔解的溫度較純銅低，對模具的損傷較小，熔解設備與過程也較簡單，所以成本會比鑄銅轉子低很多。

製造銅鋁複合轉子時，首先須製造符合導槽形狀的異形銅條，以便將銅條穿入馬達鐵芯的導槽。製造異形銅條可使用擠型或軋軋製程。將銅條穿入馬達鐵芯後，就可將整組鐵芯放入模具中來鑄出端環。設計模具時與設計一般的鑄造模具一樣，注意不要捲氣及不要有熱點，以免產生孔



圖 1 銅鋁複合轉子

洞。本計畫因為是研究開發性質，考量模具成本，所以是用重力鑄造模來鑄成端環。若量產時使用壓鑄製程，設計壓鑄模具時除考慮上述的因素，還要考慮如何擺放鐵芯，因為鋁液是無法像傳統的轉子壓鑄一樣，由一側的端環進料經由導槽流至另一側的端環。

將鐵芯放入模具後需要加溫，以便鋁和銅之間可以結合，讓導電更佳。但加溫的過程銅會氧化，阻礙銅與鋁結合，所以必要時在銅條表面需塗佈一層物質，以便防止銅氧化，並有助於銅與鋁結合。然後以適當的條件將鋁液鑄入模具中，待鋁液冷卻，取出轉子鑄件去除澆流道後，就可進行轉子的後續加工(取出假軸、插入馬達軸、轉子精加工...等)。

圖 1 為試製的銅鋁複合轉子照片，(a)是插入銅條後的轉子鐵芯，(b)是鑄造完成銅鋁複合轉子，澆流道已經去除，鋁端環並稍微加工，以去除毛邊。轉子尺寸大小約為 $\phi 194 \times 280$ (單位：mm)。

壓鑄銅轉子的導電度可達 96% IACS 以上 (C1100 等級純銅的導電度約為 100~101.5%

IACS，純度 99.8%鋁的導電度約為 62 % IACS，一般壓鑄純鋁轉子的導電度約在 58% IACS 左右)，銅鋁複合轉子的導電度估計可達 90% IACS 以上。雖然銅鋁複合轉子的導電度略低於壓鑄銅轉子，但壓鑄銅轉子的模具壽命約在數百模次，而鋁壓鑄的模具壽命約在數萬模次，模具壽命可增加數十倍，因此模具成本可大為降低。由此估計一個銅鋁複合轉子比起壓鑄銅轉子，在模具成本可減少約數百元至上千元左右。所以在導電度與成本兩方面折衷考量下，銅鋁複合轉子是一個可以考慮的方向。

■