



(21) 申請案號：103113104

(22) 申請日：中華民國 103 (2014) 年 04 月 09 日

(51) Int. Cl. : **B82B1/00 (2006.01)**

(30) 優先權：2014/03/26 中國大陸 201410115685.4

(71) 申請人：鴻海精密工業股份有限公司 (中華民國) HON HAI PRECISION INDUSTRY CO., LTD. (TW)

新北市土城區自由街 2 號

(72) 發明人：馬赫 MA, HE (CN)；魏洋 WEI, YANG (CN)；姜開利 JIANG, KAI-LI (CN)；范守善 FAN, SHOU-SHAN (CN)

申請實體審查：有 申請專利範圍項數：12 項 圖式數：14 共 34 頁

(54) 名稱

奈米管膜

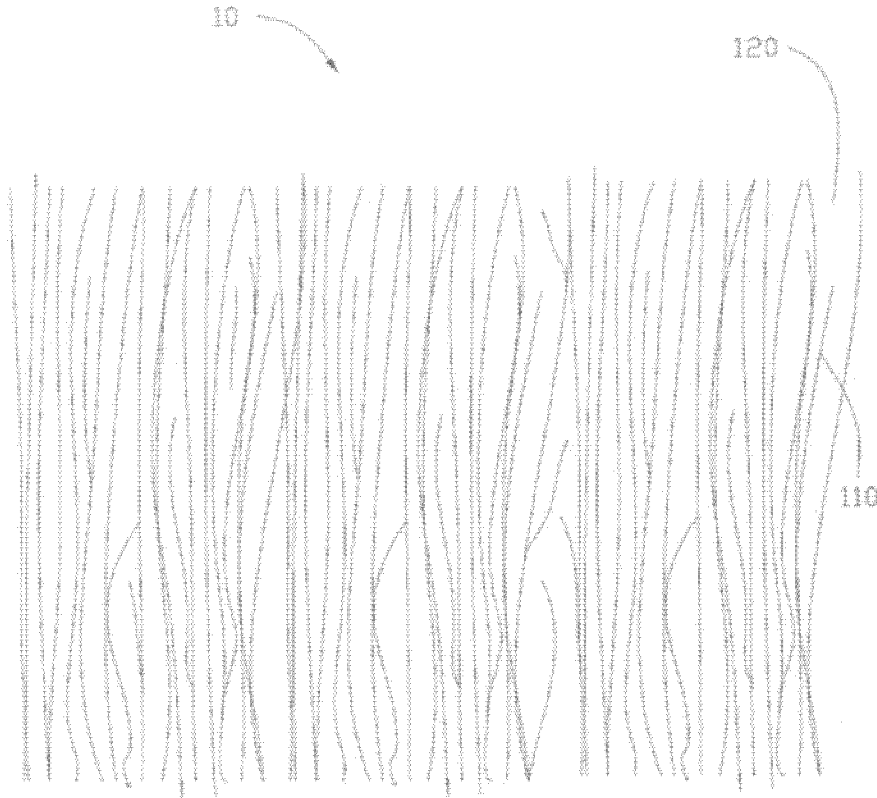
A FILM OF NANOTUBE

(57) 摘要

本發明涉及一種奈米管膜，包括複數個奈米管。所述複數個奈米管有序排列且相互連接形成一自支撐結構，部分相鄰的兩個奈米管的連接處通過離子鍵結合。

The invention relates to a film of nanotube. The film of nanotube includes a plurality of nanotubes orderly arranged and connected to each other to form a self-assemble structure. Parts adjacent nanotubes are connected in the connect portion via ionic bonds.

- 10 . . . 奈米管膜
- 110 . . . 奈米管
- 120 . . . 條狀縫隙



【發明說明書】

【中文發明名稱】 奈米管膜

【英文發明名稱】 A FILM OF NANOTUBE

【技術領域】

【0001】 本發明屬於奈米技術領域，涉及一種奈米管膜，尤其涉及一種由奈米管組成的奈米管膜。

【先前技術】

【0002】 奈米材料在基礎研究和實際應用，如催化、傳感等方面有著很大價值。所以，製備具有宏觀結構的奈米材料成為研究的熱點。

【0003】 目前，奈米材料的製備方法包括自發生長法(spontaneous growth)、範本合成法(template-based synthesis)、平板印刷法(lithography)等。然而，上述方法製備的奈米材料通常成粉末狀而無法形成一自支撐結構，即該奈米材料需一支撐結構的支撐來保持一特定形狀，如線狀或膜狀。因此，限制了奈米材料的應用範圍。

【0004】 先前技術提供一種奈米碳管膜結構的製備方法，請參見范守善等人於2007年2月12日申請的，於2010年07月11日公告的第I327177號台灣公告專利申請“奈米碳管膜結構及其製備方法”，申請人：鴻海精密工業股份有限公司。該方法通過生長超順排的奈米碳管陣列，並從該超順排的奈米碳管陣列中拉伸獲得一奈米碳管膜。該奈米碳管膜，其由複數個奈米碳管沿著奈米碳管的長度的方向首尾相連組成一個具有自支撐特性的膜。然而，該奈米碳管膜中的奈米碳管之間通過凡得瓦力相互連接，定向排列形成一個自

支撐結構。由於每一個奈米碳管係封閉結構，上述奈米碳管膜中在奈米碳管排列方向上，奈米碳管通過凡得瓦力首尾相連，使得該奈米碳管膜中存在大量的奈米碳管之間的連接點，這些連接點僅存在凡得瓦力，從而削弱了奈米碳管膜的性能，限制了其應用範圍。

【發明內容】

【0005】 有鑒於此，提供一種由有序排列的奈米管組成的力學性能強的奈米管膜實為必要。

【0006】 一種奈米管膜，包括複數個奈米管，所述複數個奈米管有序排列且相互連接形成一自支撐結構，部分相鄰的兩個奈米管的連接處通過離子鍵結合。

【0007】 所述奈米管膜為一宏觀的層狀結構，具有兩個相對的表面，所述複數個奈米管具有基本相同的延伸方向，並且該複數個奈米管平行於奈米管膜的上述兩個表面。

【0008】 所述複數個奈米管分別沿著一第一方向和一第二方向延伸，沿著所述第一方向延伸的奈米管和沿著所述第二方向延伸的奈米管相互交叉設置。

【0009】 所述複數個奈米管排列成多層結構，其中每層中的奈米管的延伸方向相同，相鄰兩層的奈米管的延伸方向交叉，至少部分相鄰兩層的奈米管通過離子鍵結合。

【0010】 所述奈米管膜具有相同延伸方向的相鄰的奈米管之間具有間隙，使得所述奈米管膜具有複數個長條形微隙。

【0011】 所述複數個奈米管中至少部分奈米管從奈米管膜的一端延伸至另

一端。

【0012】 所述複數個奈米管中至少部分奈米管的長度與該奈米管膜的長度相同。

【0013】 所述複數個奈米管基本平行排列。

【0014】 在所述複數個奈米管的連接處，至少部分相互連接的奈米管內部連通，並通過離子鍵結合成一體結構。

【0015】 所述複數個奈米管的管壁厚度為10奈米至100奈米。

【0016】 所述複數個個奈米管為金屬氧化物奈米管。

【0017】 一種奈米管膜，包括複數個奈米管，所述複數個奈米管有序排列且相互連接形成一自支撐結構，所述複數個奈米管通過在一自支撐的有序排列的奈米碳管膜表面通過原子排列形成連續的奈米材料層後，再去除該自支撐的奈米碳管膜製成，所述奈米管膜中複數個奈米管的排列方式與所述奈米碳管膜中複數個奈米碳管的排列方式相同。

【0018】 相較於先前技術，由於本發明提供的奈米管膜中複數個奈米管有序排列且相互連接形成一自支撐結構，部分相鄰的兩個奈米管的連接處通過離子鍵結合，能夠充分發揮奈米管的力學、電學、熱學等各方面性能，從而擴展了奈米管膜的應用。

【圖式簡單說明】

【0019】 圖1為本發明第一實施例的奈米管膜的示意圖。

【0020】 圖2為本發明第一實施例的奈米管膜中的奈米管膜中的奈米管的結構示意圖。

- 【0021】 圖3為本發明第二實施例的奈米管膜的示意圖。
- 【0022】 圖4為本發明第一實施例或第二實施例的奈米管膜的製備方法流程圖。
- 【0023】 圖5為本發明第一實施例的奈米管膜的製備方法中用到的奈米碳管膜結構的掃描電鏡照片。
- 【0024】 圖6為本發明第二實施例的奈米管膜的製備方法中用到的奈米碳管膜結構的掃描電鏡照片。
- 【0025】 圖7為本發明的奈米結構的製備方法中，對奈米碳管膜結構進行氧電漿處理前，直接在其表面用原子層沈積法形成奈米材料層的掃描電鏡照片。
- 【0026】 圖8為本發明的奈米結構的製備方法中，對奈米碳管膜結構進行氧電漿處理後，在該奈米碳管膜結構表面用原子層沈積法形成奈米材料層的掃描電鏡照片。
- 【0027】 圖9為本發明的奈米結構的製備方法中，對奈米碳管膜結構進行積碳處理後的透射電鏡照片。
- 【0028】 圖10為本發明的奈米結構的製備方法中，對奈米碳管膜結構進行表面積碳處理前，直接在其表面用原子層沈積法形成奈米材料層的掃描電鏡照片。
- 【0029】 圖11為本發明的奈米結構的製備方法中，對奈米碳管膜結構進行表面積碳處理後，直接在其表面用原子層沈積法形成奈米材料層的掃描電鏡照片。
- 【0030】 圖12為本發明第一實施例的奈米管膜的掃描電鏡照片。

【0031】 圖13為本發明第二實施例的奈米管膜的掃描電鏡照片。

【0032】 圖14為本發明第二實施例的奈米管膜拉力隨位移的變化。

【實施方式】

【0033】 下面結合附圖和實施例對本發明作進一步的闡述，參照附圖。應理解，這些實施例僅用於說明本發明而不用於限制本發明的範圍。此外應理解，在閱讀了本發明講授的內容後，本領域技術人員可以對本發明作各種改動或修改，這些等價形式同樣落於本申請所附請求項第項書所限定的範圍。

【0034】 請參閱圖1，本發明第一實施例提供一種奈米管膜10，其包括複數個有序排列的奈米管110。所述奈米管膜10為一宏觀的層狀結構，具有兩個相對的表面，優選地，所述複數個奈米管110平行於所述奈米管膜100表面且彼此基本平行排列。所述複數個奈米管110具有基本相同的延伸方向。有序排列”指的係所述複數個奈米管110的長度方向的排列係有規律的，係定向的，但係並不局限為一個方向或者兩個方向。本實施例中，所述複數個奈米管110具有基本相同的延伸方向，朝著一個相同的方向排列。

【0035】 所述奈米管膜10中的複數個奈米管110基本沿同一方向排列係指，所述複數個奈米管110具有相同的排列取向。也就係說所述奈米管膜10中的大部分奈米管110的長度方向係基本上向著一個相同的方向延伸的，並且該複數個奈米管110還可以部分接觸，但係並不影響其具有共同的延伸方向。該複數個奈米管110基本向著相同的方向延伸係指，由於奈米管110在微觀上（比如在透射電鏡下麵）並不完全係筆直的，奈米管110還存在著彎曲的部分，但係該複數個奈米管110都係向著一個方向延伸的。從宏觀上

看（如在光學顯微鏡下），所述奈米管膜10中的複數個奈米碳管110有序排列，相互平行地向著一個方向延伸排列。

【0036】相鄰的兩個奈米管110之間可以相互接觸，也可以相互間隔。換句話說，所述奈米管膜10中既存在相互間隔的奈米管110，又存在相互接觸的奈米管110。該奈米管膜10中存在複數個的條狀縫隙120，該複數個條狀縫隙120的延伸方向於所述奈米管110的延伸方向相同。所述奈米管膜10中還存在著少量相互交叉的奈米管110。相互交叉的奈米管110可以通過離子鍵形成一個一體成型結構，從而具有較好的力學性能。所述奈米管膜10中的複數個條狀縫隙120，為所述奈米管膜10中的相鄰的奈米管110相互間隔設置形成，或者相鄰的奈米管110部分接觸，部分間隔設置形成。相鄰的奈米管110之間可以通過凡得瓦力相結合。所述奈米管110相互接觸，通過凡得瓦力和離子鍵相互結合成一體結構。並且所述奈米管110相互接觸的部分，可以相互連通或者相互封閉，並且可以通過離子鍵結合。從而使得該奈米管膜10具有較好的力學性能。所述條狀縫隙120的寬度可以大於等於0.5奈米且小於等於5微米。所述奈米管110的長度可與所述奈米管膜10的長度相等，故至少有一個奈米管110從所述奈米管膜100的一端延伸至另一端。本實施例中，所述奈米管110的長度大於1厘米。

【0037】由於所述奈米管110之間存在相互接觸、相互交叉的情形，因此，這種所述奈米管膜10中複數個奈米管110相互連接的狀態使得該奈米管膜10從宏觀上看係一個完整的層狀結構，並且為一自支撐的膜。所謂“自支撐結構”即該奈米管膜10不需要大面積的載體支撐，而只要相對兩邊提供支撐力即能整體上懸空而保持自身

膜狀狀態，即將該奈米管膜10置於（或固定於）間隔一定距離設置的兩個支撐體上時，位於兩個支撐體之間的奈米管膜10能夠懸空保持自身膜狀狀態。

【0038】請參閱圖2，所述奈米管110包括至少一個管狀殼體112，以及該管狀殼體112環繞定義的柱狀空間114。所述管狀殼體112的厚度為10奈米至100奈米，所述柱狀空間114的直徑為10奈米至100奈米。所述管狀殼體112的材料包括金屬、非金屬、合金、金屬化合物奈米及聚合物中的一種或幾種。優選地，所述管狀殼體112的材料包括金屬氧化物、金屬氮化物、金屬碳化物、矽氧化物、矽氮化物以及矽碳化物中的一種或複數種。本實施例中，所述管狀殼體112的材料為氧化鋁，所述奈米管110為氧化鋁奈米管。本實施例中，所述氧化鋁奈米管的管狀殼體112的厚度為30奈米，所述柱狀空間114的直徑為20奈米。可以理解，該奈米管110還可以包括複數個管狀殼體112，該複數個管狀殼體112相互通過離子鍵相互結合形成一個整體結構的奈米管110，並且每一個管狀殼體112都環繞定義一個柱狀空間114。

【0039】請參見圖3，本發明第二實施例提供一種奈米管膜20，該奈米管膜20包括複數個有序排列的奈米管110。“有序排列”指的係所述複數個奈米管110的長度方向的排列係有規律的，係定向的，但係並不局限為一個方向或者兩個方向。比如可以有部分奈米管110的長度方向沿著一個第一方向延伸，還可以有部分奈米管110的長度方向沿著一個第二方向延伸，還可以有部分奈米管110的排列方向沿著一個第三方向延伸。

【0040】與第一實施例中奈米管膜20，相比本實施例中，奈米管膜20中的

複數個奈米管110分別沿著一個第一方向和一第二方向延伸，沿著第一方向延伸的奈米管110和沿著第二方向延伸的奈米管110相互交叉設置，並排列成兩層結構，每一層中的奈米管110具有相同的延伸方向和排列方向。並且第一層和第二層的奈米管110的排列方向成一個角度，角度為90度。上下兩層奈米管110交叉設置，從而於所述奈米管膜20中形成複數個均勻分佈的微孔206，該微孔206的孔徑為1奈米~5微米。

【0041】 可以理解，該奈米管膜20中的複數個奈米管110還可排列成多層結構，每層中的奈米管110的延伸方向基本相同，相鄰兩層的奈米管110的延伸方向交叉。所述相鄰兩層中的奈米管110的排列方向形成一夾角 α ， α 大於等於零度且小於等於90度。當 α 大於零度時，複數個奈米管110交叉設置，從而於所述奈米管膜20中形成複數個均勻分佈的微孔206。部分相互接觸且交叉設置的兩個奈米管110之間通過離子鍵緊密連接，使該奈米管膜20形成一自支撐的膜結構，並使得該奈米管膜20的結構更加牢固，機械強度更大，使用時不易破裂。

【0042】 請參閱圖4，本發明第一實施例提供的奈米管膜10，或第二實施例提供的奈米管膜20的製備方法可通過在一自支撐的奈米碳管膜表面通過原子排列形成連續的奈米材料層後，再去除該自支撐的奈米碳管膜製成，具體地包括以下步驟：

【0043】 S1，提供一具有自支撐特性的奈米碳管膜結構，該奈米碳管膜結構包括至少一奈米碳管膜，該至少一奈米碳管膜包括複數個通過凡得瓦力首尾相連定向排列的奈米碳管，以及沿著該奈米碳管排列方向延伸的縫隙；

- 【0044】 S2，對上述奈米碳管膜結構懸空設置並進行的表面處理，在奈米碳管膜結構中的奈米碳管的表面引入缺陷；
- 【0045】 S3，以所述奈米碳管膜結構為範本，採用原子層沈積法，在所述奈米碳管膜結構中的複數個奈米碳管的表面生長一層奈米材料層；以及
- 【0046】 S4，將生長有奈米材料層的奈米碳管膜結構進行退火處理，去除奈米碳管膜結構。
- 【0047】 步驟S1中，所述奈米碳管膜結構可以由一個奈米碳管膜組成，也可以由複數個奈米碳管膜平行無間隔在一個平面內鋪設，或平行重疊鋪設，或者相互重疊交叉鋪設構成。所述奈米碳管膜由複數個基本沿同一方向擇優取向排列且通過凡得瓦力首尾相連的奈米碳管，該奈米碳管基本沿同一方向定向排列並平行於該奈米碳管膜表面。上述“首尾相連”指的係奈米碳管的軸向或者奈米碳管的長度方向係首尾相連定向排列的。
- 【0048】 在製備第一實施例的奈米管膜時，所述奈米碳管膜結構為一個奈米碳管膜。請參見圖5，在沿著奈米碳管排列的方向上具有很多條帶狀的間隙，由於上述間隙的存在，該奈米碳管膜具有較好的透光性。這係由於，所述奈米碳管膜中的奈米碳管首尾相連形成了複數個奈米碳管束，該複數個奈米碳管束具有相同的延伸方向，相鄰的奈米碳管束之間存在著條帶狀的間隙。所述奈米碳管膜中還存在了部分奈米碳管，搭接在奈米碳管束之間。上述間隙可以為相鄰並列的奈米碳管之間間隙，還可以為有一定寬度的奈米碳管束之間間隙。由於奈米碳管膜中的奈米碳管係首尾相連定向排列的，因此所述間隙為條帶狀，並且該條帶狀的間隙係基

本平行於奈米碳管束的。所述奈米碳管膜可以通過拉取一奈米碳管陣列直接獲得。所述奈米碳管膜結構300及其製備方法請參見范守善等人於2007年2月12日申請的，於2010年07月11日公告的第I327177號台灣公告專利申請“奈米碳管膜結構及其製備方法”，申請人：鴻海精密工業股份有限公司。

【0049】 爲了獲得第二實施例的奈米管膜20，請參見圖6，所述奈米碳管膜結構爲至少兩個奈米碳管膜重疊交叉鋪設構成。所述奈米碳管膜結構爲複數個奈米碳管膜交叉重疊設置形成，相鄰的奈米碳管膜的奈米碳管軸向的排列方向相互垂直。相鄰的奈米碳管膜交叉後形成了複數個微孔，從而該奈米碳管膜結構具有較好的透光性。

【0050】 該奈米碳管膜結構爲一自支撐結構。該奈米碳管膜結構的厚度大於100奈米。所述奈米碳管膜結構可進一步設置於一支撐體上。該支撐體可以爲一基板或框架。本實施例中，所述奈米碳管膜結構鋪設在一金屬框上，該奈米碳管膜結構的週邊固定在該金屬框上，使所述奈米碳管膜結構懸空設置。

【0051】 可以理解，爲了獲得更大微孔的奈米管膜10或20，步驟S1中可進一步使用有機溶劑處理所述奈米碳管膜結構，從而形成具有更大尺寸的微孔的奈米碳管膜結構，然後以該有機溶劑處理後的奈米碳管膜結構做範本可以獲得更大微孔的奈米管膜10或20。

【0052】 該有機溶劑爲常溫下易揮發的有機溶劑，可選用乙醇、甲醇、丙酮、二氯乙烷和氯仿中一種或者幾種的混合，本實施例中的有機溶劑採用乙醇。該有機溶劑應與該奈米碳管具有較好的潤濕性。使用有機溶劑處理上述奈米碳管膜結構的步驟具體爲：通過試管

將有機溶劑滴落在形成在所述框架上的奈米碳管膜結構表面從而浸潤整個奈米碳管膜結構，或者，也可將上述奈米碳管膜結構浸入盛有有機溶劑的容器中浸潤。另外，所述奈米碳管膜結構還可以通過有機溶劑霧處理，具體地，可以用噴霧裝置將有機溶劑處理成霧狀，噴在所述奈米碳管膜結構表面，該方法可以處理單層的奈米碳管膜構成的奈米碳管膜結構。所述的奈米碳管膜結構經有機溶劑浸潤處理後，奈米碳管膜結構中的奈米碳管膜中的並排且相鄰的奈米碳管會聚攏，從而在該奈米碳管膜中收縮形成複數個間隔分佈的奈米碳管帶，該奈米碳管帶由複數個通過凡得瓦力首尾相連定向排列的奈米碳管組成。有機溶劑處理後的奈米碳管膜中，基本沿相同方向排列的奈米碳管帶之間具有一間隙。當相鄰兩層奈米碳管膜中的奈米碳管的排列方向之間具有一交叉角度 α ，且 $0 < \alpha \leq 90^\circ$ ，從而有機溶劑處理後相鄰兩層奈米碳管膜中的奈米碳管帶相互交叉在所述奈米碳管膜結構中形成複數個尺寸較大的微孔。有機溶劑處理後，奈米碳管膜的黏性降低。該奈米碳管膜結構的微孔的尺寸為2微米~100微米，優選為2微米~10微米。本實施例中，該交叉角度 $\alpha = 90^\circ$ ，故該奈米碳管膜結構中的奈米碳管帶基本相互垂直交叉，形成大量的矩形微孔。通過上述有機溶劑處理後的奈米碳管膜結構做範本製備獲得奈米管膜或中，微孔的尺寸更大，透光性更好。

【0053】 步驟S2中，對奈米碳管膜結構的表面引入缺陷包括對奈米碳管膜結構的表面進行氧化，或者在奈米碳管膜結構表面進行積碳處理。優選地，上述引入缺陷的處理方法在奈米碳管膜結構處於懸空狀態下進行。具體地，由於所述奈米碳管膜結構為自支撐結構，可將該奈米碳管膜結構的四周邊通過框架固定，從而使所述奈米

碳管膜結構整體處於懸空狀態。

【0054】 對所述奈米碳管膜結構的表面進行氧化，從而使得奈米碳管膜結構中的奈米碳管的表面結構被破壞，形成大量懸掛鍵。當採用原子層沈積的方法形成奈米材料層時，奈米材料的原子可以先和奈米碳管表面的懸掛鍵進行結合，從而可以一層一層的堆積在奈米碳管的表面，從而在奈米碳管膜結構的表面形成緻密的奈米材料層，強度較高，並且該奈米材料層的厚度可控性更高，可以形成10奈米厚的奈米材料層，從而獲得的奈米管膜10或20的奈米管110管狀殼體112的厚度較小。本實施例中，可以採用氧電漿處理所述奈米碳管膜結構，從而在所述奈米碳管膜結構的表面引入缺陷，氧電漿處理中氧氣的流量為50sccm，氣壓為10Pa，處理時間為10s，功率為25W。請參照對比圖7和圖8，圖7中沒有經過氧電漿處理的奈米碳管膜結構的表面通過原子層沈積的方法獲得氧化鋁層為不連續的顆粒，而圖8中經過氧電漿處理的奈米碳管膜結構中奈米碳管的表面通過原子層沈積的方法獲得氧化鋁層為連續的層狀結構。

【0055】 對所述奈米碳管膜結構進行積碳處理後，使得奈米碳管膜結構中的奈米碳管的表面包覆一層碳顆粒。在奈米碳管膜結構的表面積碳處理的方法可以包括物理氣相沈積法、化學氣相沈積法、噴塗法等中的一種或複數種。本實施例中，採用了物理氣相沈積法中的磁控濺射積碳工藝，在奈米碳管膜結構的表面進行積碳處理，形成一個積碳層。磁控濺射積碳的參數為，電流150mA，氣壓0.1pa，Ar的流量為10sccm，時間為1.5min至7.5min。

【0056】 請參見圖9，通過磁控濺射積碳工藝，在奈米碳管膜結構的奈米

碳管露出的表面形成了一個非晶碳層。上述非晶碳層的存在，使得奈米碳管膜結構中奈米碳管的表面形成了缺陷，從而使得在採用原子層沈積的方法形成奈米材料層時，可以將奈米材料一層層堆疊形成該奈米材料層，從而使得奈米材料層的強度高，緻密性好，還可以使得該奈米材料層在較小的厚度條件下形成連續的結構，從而獲得的奈米管膜10或20的奈米管110管狀殼體112的厚度較小。通過上述方法，在奈米碳管膜結構的表面形成的奈米材料層的厚度可以在10奈米~30奈米範圍內。如果不對奈米碳管膜結構進行積碳處理的話，當採用原子層沈積的方法形成奈米材料層時，只有當奈米材料層的厚度大於30奈米時候，才可以獲得連續的層狀結構；當奈米材料層的厚度小於30奈米的時候，奈米材料層將會變成不連續的點狀顆粒附著在奈米碳管膜結構30的表面，從而無法形成管狀結構。另外，獲得的奈米材料層係有大顆粒的材料組成的，而不係由原子一層一層形成，從而使得獲得的奈米材料層的緻密性差，存在力學性能差的缺點。

【0057】 請參見圖10和圖11，可以清楚的看出，圖10中沒有經過積碳處理的奈米碳管膜結構中奈米碳管的表面通過原子層沈積的方法獲得氧化鋁層為不連續的顆粒，而圖11中經過積碳處理的奈米碳管膜結構中奈米碳管的表面通過原子層沈積的方法獲得氧化鋁層為連續的完整膜結構。

【0058】 步驟S3中，可以根據奈米管110的材料來選擇生長源。以金屬的氧化物為例，生長源為有機前體化合物和水，載氣為氮氣。但本發明並不局限於該範圍，本領域技術人員可以根據奈米管110的材料來選擇生長源。具體地，步驟S3包括以下步驟：

- 【0059】 S31，將固定在金屬框上且懸空設置的奈米碳管膜結構放入原子層沈積系統的真空腔室中；
- 【0060】 S32，通超載氣向原子層沈積系統的真空腔室中複數次交替通入金屬有機前體化合物和水，在所述奈米碳管膜結構中奈米碳管的表面來生長氧化鋁奈米材料層。
- 【0061】 本實施例中，步驟S32中，生長源為三甲基鋁和水，載氣為氮氣，載氣的流量係5sccm，所述原子層沈積系統的本底真空為0.23Torr。在該步驟中，三甲基鋁和水交替通入真空腔室，交替通入一次三甲基鋁和水的過程成爲一次循環。通入三甲基鋁後，真空腔室的真空升爲0.26Torr，需要抽真空至本底真空0.23Torr後再通入水；通入水後，真空腔室的真空升爲0.26Torr，需要抽真空至本底真空0.23Torr後再通入三甲基鋁。對於三甲基鋁和水，將真空腔室的真空由0.26Torr抽回本底真空0.23Torr的時間分別係25s和50s，因此，一次循環的時間爲75s。在上述條件下，氧化鋁的沈積速度0.14nm/cycle。因此，可以通過控制循環的次數，來控制氧化鋁奈米材料層的厚度。
- 【0062】 步驟S32中，通過原子層沈積的方法，形成氧化鋁奈米材料層包裹所述奈米碳管膜結構中的奈米碳管。通過選擇不同結構的奈米碳管膜結構作爲範本，可以獲得不同結構的奈米管膜10或奈米管膜20。
- 【0063】 步驟S4中，沈積有氧化鋁奈米材料層的奈米碳管膜結構，放置在電爐中，通過退火去除所述奈米碳管膜結構，從而獲得奈米管膜10或奈米管膜20。退火溫度在500攝氏度至1000攝氏度範圍內，在有氧的環境下進行。本實施例中，通過在石英管中，進行550

