

# 超微細研磨技術在奈米科技上之應用

作者：Dr. Norbert Stehr  
現職：德國 DRAIS 分散研磨部門總經理

譯者：陳仁英  
現職：廣融貿易有限公司專案經理

傳統型之研磨機因受限於研磨室內之熱交換只靠研磨室表面之熱夾套層來做熱交換，因此當研磨室之大小從實驗型放大到量產型時，熱交換面積之放大比例因無法與研磨室體積之放大比例均一，導致無法將實驗型研磨機所得到之結果等比例地放大到量產型之機台。同時，對於對溫度較敏感或奈米級材料之應用，往往因熱交換面積無法隨研磨室之體積等比例放大，導致其量產型研磨機之產能無法等比例放大，甚至品質因研磨室內所承受之動力密度不夠而無法達到要求。本文所介紹之新一代雙缸型設計之研磨機則將研磨室之體積縮小，並增加熱交換面積且使其與研磨室之體積成固定比例，如此不管研磨室之體積大小為何，其熱交換面積與研磨室大小成固定比例，可使單位研磨室體積之動力密度不受研磨室大小之影響，達到實驗型研磨機之研發結果與量產型研磨機在同一品質下之產能等比例放大之目的，同時對於較難分散研磨或對溫度較敏感之應用及奈米級材料之分散研磨皆能運用無礙。

**關鍵詞：**傳統型研磨機(Conventional full space agitation mills)、放大(Scale-up)、奈米級材料(Nano-size material)、動力密度(Power density)、新一代雙缸型設計之研磨機(Double cylindrical annular gap mills)

## 引言

隨著 3C 產品之輕、薄、短小化及奈米尺度材料應用之白熱化，如何將超微細研磨技術應用於奈米材料之製作及分散研磨已成為當下之重要課題。傳統產業所需之染料、塗料及油墨之產品粒徑需求只到微米級，所需之分散研磨技術門檻較低，同時因為該產品之單價較低，所以研發較不受到重視。但目前國內上述大部分之傳統產業業者已逐漸將其產品從傳統之微米級尺寸產品應用領域轉型到高科技所需之奈米級尺寸產品所需之材料，如薄膜型液晶顯示器 (TFT LCD) 所需之彩色光阻 (color resist)、印表機所需之噴墨 (jet inks)、被動元件、光電產業及生化產業所需之奈米級材料等，因上述高科技所需之奈米級尺寸之材料單價較高，每公斤約為數千到數萬元，且不同產品或廠家所需之規格亦不同，所以研發便成為產業轉型之重要課題。

但由於傳統型設計之單缸型研磨機受限於熱交換只來自於研磨室表面之熱夾套層，故對於不同研磨室體積之研磨機之產能無法滿足線性放大之需求。相反地，本文所介紹之新一代雙缸型設計之研磨機則將研磨室之體積縮小，並增加熱交換面積且使其與研磨室之體積成固定比例，如此不管研磨室之體積大小為何，其熱交換面積與研磨室大小成固定比例，可使單位研磨室體積之動力密度不受研磨室大小之影響，達到實驗型研磨機之研發結果與量產型研磨機在同一品質下之產能等比例放大之目的，同時對於較難分散研磨或對溫度較敏感之應用及奈米級材料之分散研磨皆能運用無礙，本文將詳細地對上述之論點做一報告並以實例來說明之。

## 1. 輸入比能量(Mass specific energy input)與動力密度(power density)之定義

### 1.1 輸入之比能量：

一般而言，研磨機之研磨或分散效果為比能量之函數，即

$$\text{研磨之品質} = f(\text{比能量}) \quad [1]$$

當以連續式操作方式(throughfeed operation mode)而言，比能量之計算方式為單位重量之漿料於經過研磨室分散研磨時每小時所受到之有效消耗動力，即

$$E_{m,Pass} = \frac{P - P_0}{\dot{m}} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right) \quad [2]$$

- $P$  : [kW] 研磨機馬達之消耗動力  
 $P_0$  : [kW] 未加磨球時，研磨機馬達之消耗動力  
 $(P-P_0)$  : [kW] 研磨室內有效消耗動力  
 $\dot{m}$  : [t/h] 流量  
 $E_m$  : [kWh/t] 比能量，即每噸漿料每小時所消耗之有效動力

當以循環式操作( recirculation operating mode)時，比能量之計算為自啟動研磨機後到停機時之總累積消耗之有效動力除以漿料之批次量，即

$$E_{m, Recirculation} = \frac{\int_0^{t_{Grinding}} (P - P_0) dt}{m} \quad [3]$$

若已從實驗型機台得到某漿料達到某品質所需之比能量，則可以下列方式得到重覆之品質：

當以連續式方式操作時：

$$\dot{m}_{Prod,Pass} = \frac{P - P_0}{E_m} \quad [4]$$

當以循環式方式操作時：

$$\dot{m}_{Prod,Recirculation} = \frac{m}{t_{Grinding}} = \frac{\int_0^{t_{Grinding}} (P - P_0) dt}{E_m \cdot t_{Grinding}} \quad [5]$$

由上可知，每單位時間之產能與該研磨室所承受之有效消耗動力成正比，但此關係只適用於當研磨機在合理的參數操作下方可成立。限於篇幅，本文不再對此做更深一步探討。

## 1.2 研磨室所承受之動力密度(Power density in the grinding chamber)：

在分散及研磨的應用實例中，有很多應用的品質要求唯有在單位體積之研磨室在受到某一程度之動力強度時方可達到。

以定量來分析，若以  $P_V$  來表示單位體積研磨室所受到之動力消耗，即

$$P_V = \frac{P - P_0}{V_{MR}} \quad [6]$$

$$\begin{aligned} P_V &= [\text{kW/l}] \text{ 動力密度} \\ V_{MR} &= [\text{l}] \text{ 研磨室體積} \end{aligned}$$

則本文往後所述之高動力密度之定義如下：

$$P_V \geq 2 \text{ kW/l} \quad [7]$$

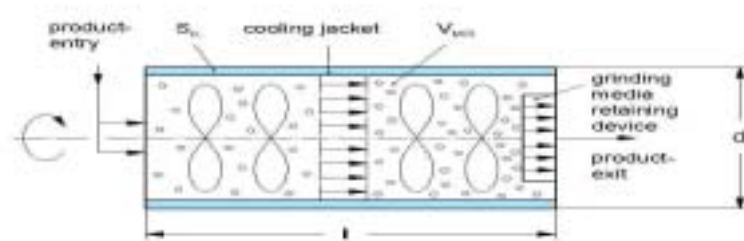
例如下列針對奈米尺度材料之要求或溫度很敏感或之應用，除非在高動力密度條件下來分散研磨，否則很困難達到所欲之品質要求。

- 於分散研磨過程中，漿料溫度不得超過 40 °C，且需將顏料研磨到 20-80 nm 奈米級之粒徑，以期達到最佳之透明度、色濃度或光澤之要求，如彩色光阻、噴墨,...
- 於分散研磨過程中，漿料溫度不得超過 35-40 °C，且需將水性之顏料分散研磨並達到最大之色濃度。
- 於分散研磨過程中，漿料溫度不得超過 50 °C，且需將印刷油墨之色膏分散研磨到色片等級之色澤及透明度要求之油墨。
- 於分散研磨過程中，漿料溫度不得超過 40 °C，且需將碳黑分散研磨成色膏以應用於工業用或汽車用之表面漆，並達到最高之品質要求。
- 於分散研磨過程中，漿料溫度不得超過 45 °C 之靠紫外線熟化型(UV-curing)之印刷油墨色膏。

## 2. 傳統型研磨機於不同研磨室尺寸放大時所遇到之困難

### 2.1 動力密度與研磨室大小之關係：

如圖一所示，傳統型研磨機之原理為幫浦(pump)將漿料從研磨室之一端打入研磨室內，研磨室內之攪拌單元持續地打動磨球，使磨球在研磨室內均勻地運動，漿料於研磨室內的移動過程中，依流量或黏滯性(viscosity)大小不同而與磨球產生不同大小之剪切力以產生分散研磨之效果，當然為了避免磨球流出研磨室，在研磨室的另一端設計有濾網以避免磨球跑出研磨室。



圖一. 傳統型研磨機之示意圖

傳統之研磨機中只能靠研磨室外層之熱夾套層作熱交換，通常此型之研磨機於研磨室體積較小時。如實驗型研磨機之研磨室 1 L，要達到對溫度敏感且較難分散研磨之漿料要求， $P_v = 2 \text{ kW/l}$ 或許沒有問題，但一旦欲將實驗型研磨機之研磨機參數放大到量產機型時則產生問題，理由如下：

其研磨室熱夾套層之熱交換面積為

$$S_K = \pi \cdot d \cdot l \quad [8]$$

研磨室體積（忽略攪拌單元體積）為

$$V_{MR} = \pi \frac{d^2}{4} \cdot l \quad [9]$$

所以每單位研磨室體積之熱交換面積為

$$\frac{S_K}{V_{MR}} = \frac{4}{d} \quad [10]$$

因此當研磨室之直徑越大時，其單位研磨室體積之熱交換面積越小。由此可知此型之研磨機，當研磨室體積越大或研磨室長度越短時，其熱交換效果越差。假設  $l/d$  為常數時，從式〔8〕得  $S_k \sim d^2$  及從式〔9〕可得  $V_{MR} \sim d^3$  故可推得

$$S_k \sim V_{MR}^{2/3} \quad [11]$$

假設實驗機型之熱交換面積為  $S_{k, \text{pilot}}$ ，研磨室體積為  $V_{MR, \text{pilot}}$ ，若利用該實驗型研磨機之規格，於放大到量產機台後之研磨室之熱交換面積為  $S_{k, \text{prod}}$ ，其研磨室大小為  $V_{MR, \text{prod}}$ ，則從公式〔11〕可延伸出下列公式：

$$S_{K,Prod} = S_{K,Pilot} \cdot \left( \frac{V_{MR,Prod}}{V_{MR,Pilot}} \right)^{2/3} \quad [12]$$

由上可知，當研磨室體積放大 10 倍時，從式〔12〕可得知熱交換面積只能放大  $10^{2/3} = 4.6$  倍，為了避免漿料溫度上升，動力密度必然只能增加 4.6 倍而非 10 倍。原因如下：

假設動力密度與研磨室熱交換面積成正比，即

$$P - P_0 \sim S_K \sim V_{MR}^{2/3} \quad [13]$$

$$(P - P_0)_{Prod} = (P - P_0)_{Pilot} \cdot \left( \frac{V_{MR,Prod}}{V_{MR,Pilot}} \right)^{2/3} \quad [14]$$

將公式〔10〕帶入公式〔13〕可得下列公式

$$\frac{P - P_0}{V_{MR}} \sim \frac{S_K}{V_{MR}} = \frac{4}{d} \quad [15]$$

由上可得知，傳統型研磨機於放大時，其熱交換面積並無法與動力密度等比例放大，而是與研磨室直徑成反比。所以當傳統型研磨機欲將實驗型研磨機之參數放大到量產型研磨機時，受限於熱交換面積無法等比例隨研磨室體積之增加而等比例增加，為了避免漿料溫不過高，勢必降低動力密度。如此將導致產能降低，或研磨效果降低，甚至對此上述奈米尺寸材料之分散研磨或對溫度較敏感之應用則無法勝任。所以傳統研磨機若欲從事大量生產，唯一方法為選購多部小型研磨機，如此雖可達到量的要求，但在設備數量及人員之營運成本上將大大提高，已無競爭力。

## 2.2 研磨室體積放大(Scale Up) 之估算方法：

從實驗型研磨機可以得到欲達到某一品質要求所需之比能量  $E_m$  值，若欲放大到量產之產能  $m_{prod}$  (t/h)時，從公式〔2〕可計算出所需之有效動力消耗 為

$$(P - P_0)_{Prod} = \dot{m}_{Prod} \cdot E_m \quad [16]$$

從公式〔14〕及〔16〕可以計算出在同一品質下欲放大到量產之產能  $m_{prod}$  時，所需之研磨室大小如下式所示

$$V_{MR,Prod} = V_{MR,Pilot} \cdot \left( \frac{\dot{m}_{Prod} \cdot E_m}{(P - P_0)_{Pilot}} \right)^{3/2} \quad [17]$$

## 3. 新一代研磨機之設計 – 研磨室體積小、高效率、磨球在研磨室可依特定軌跡而循環 (Small-volume high-performance mills with a defined internal grinding media circulation)

### 3.1 研磨機產能依研磨室體積線性放大之條件：

若欲使研磨機在高動力密度下，可以任意放大且維持漿料之溫度不變下而得到一樣的品質，唯一方法為需讓研磨機之熱交換面積與動力密度成固定比例。如此任何尺寸之研磨機之研磨效率將不受研磨機研磨室體積大小而影響，同時熱交換效果亦將不受研磨室大小之變化而變化，即需滿足下列之條件

$$\frac{S_K}{V_{MR}} = \text{常數} \neq f(\text{研磨室大小}) \quad [18]$$

$$\frac{P - P_0}{V_{MR}} = \text{常數} \neq f(\text{研磨室大小}) \quad [19]$$

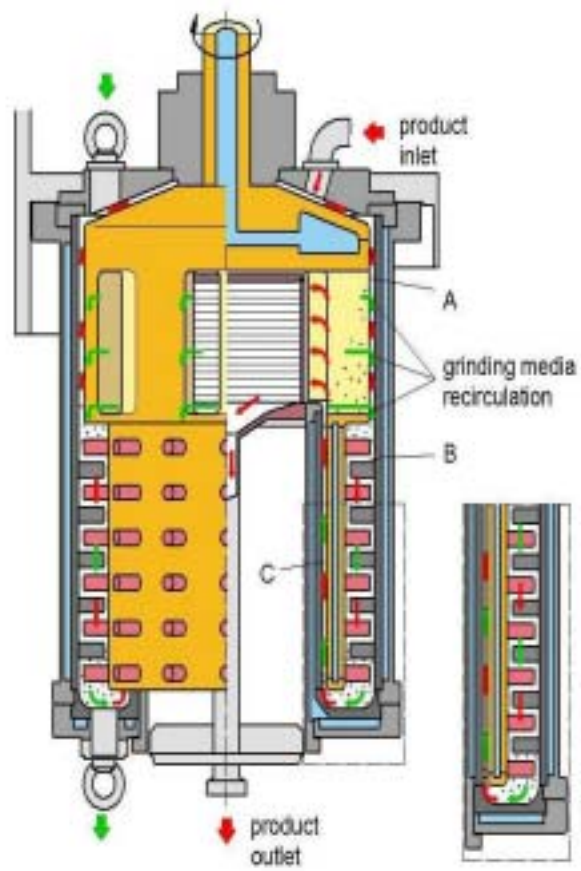
由式〔4〕可知，當應用於低比能量需求之分散研磨時，高動力密度將導致較大的流量(或產能)，即流量(或產能)可以隨動力密度等比例提高，當然研磨機之設計需避免磨球運動因流量之變大而造成磨球分佈不均以導致局部溫度過熱或壓力上升之情形發生，由公式〔19〕可得知：

$$(P - P_0)_{Prod} = (P - P_0)_{Pilot} \cdot \frac{V_{MR,Prod}}{V_{MR,Pilot}} \quad [20]$$

由上列方程式可知，若欲從實驗型研磨機所得到之研磨參數放大到量產機台時，放大後之量產機台對其放大後之產能所需之研磨室大小需設計如下：

$$V_{MR,Prod} = V_{MR,Pilot} \cdot \frac{\dot{m}_{Prod} \cdot E_m}{(P - P_0)_{Pilot}} \quad [21]$$

### 3.2 新一代研磨機之構造 – 動力密度之大小可以不受研磨室之大小而改變 (Structure and function of a multiple-zone Perl mill with a non size-dependent power density)



圖二 “Drais Advantis®”新一代雙缸型高效率研磨機之原理及構造



圖三 Drais Advantis 新一代量產型雙缸型研磨機之外觀



圖四 新一代研磨機之轉子(rotor)設計



圖五 新一代實驗型雙缸型研磨機之外觀

如圖二所示“Advantis<sup>®</sup>”型研磨機之設計即可滿足上述動力密度之大小不受研磨室大小而改變。Advantis之構造乃將一個中空之轉子套在由二個靜置之內外缸所形成之研磨室間，內外缸及轉子皆有熱夾套層設計以供熱交換使用，漿料由研磨室上方進入研磨室後，將經過三個階段的分散研磨而後利用離心力原理由濾網流出研磨室。第一階段為經由轉子之轉動而生強力渦流區以進行預分散效果，然後經由轉子外層上之插梢與外缸上插梢撞擊磨球所產生之強力之撞擊及剪切力區來分散研磨漿料，最後漿料與磨球一起流經轉動之轉子之內層與靜置之內缸所形成之間隙區產生之剪切力做最後一階段之分散研磨。

磨球與漿料一起運動到內缸之上緣後，受到離心力作用之影響磨球將往外甩而由轉子上設計之間隙(gap)跑回強力渦流區，即預分散區，然後隨著漿料再進行第二階段之研磨，如此在研磨室內循環，而漿料則受到離心力之影響往內甩，經由濾網而流出。因磨球一直在研磨室內循環，所以可以避免因磨球擠壓所產生之壓力，此設計可以適用於大流量之應用。一般對同一研磨室體積大小而言，Advantis之流量可為傳統型之10倍以上，且壓力不致上升。



此設計於研磨室放大時，僅需將研磨室之直徑與長度做等比例之放大即可。故從實驗型到量產型之各種機種皆可以任意放大，熱交換面積與研磨室大小之比例將固定，不受研磨室之大小而改變。由於本機型之熱交換面積非常大（內缸、外缸、轉子皆有熱交換之夾套層設計），所以無論研磨室之大小為何，皆可以維持單位體積研磨室之動力密度為  $P/V = 4 \text{ kW/l}$ ，同時可確保從實驗到量產之各機型之應用皆可以將產能等比例放大，品質亦可以均一。

### 3.3 如何提高研磨之產能及品質之方法：

本文以透明性顏料色膏應用為例，以循環式操作方式，採用量產型之研磨機台來比較在不同之轉子轉速下而產生之不同動力密度時對產品品質及產能所產生之影響做一探討。

從圖 3.a 之製作乃以動力密度為  $2.1 \text{ kW/l}$  時，定義所需色膏之透明之品質要求為  $X_{\text{standard}}$ ，其所需之研磨時間定義為  $t_{\text{standard}}$ ，然後再利用提高轉子之轉速以提高不同之動力密度，於動力密度分別為  $3.0$  及  $3.3 \text{ kW/l}$  時，分別做出透明度與研磨時間之關係圖，當然為了維持色膏品質不受漿料溫度改變之影響，於不同之轉子運速時，需調整冷卻水之大小以維持相同之漿料溫度。由圖 3.a 可以得知：

- 當動力密度為  $2.1 \text{ kW/l}$  時，即使延長研磨時間，對品質之影響亦非常有限，如圖所示當延長時間到 100% 時，透明度只增加到 104%。
- 當動力密度提高到  $3 \text{ kW/l}$  時，僅需動力密度為  $2.1 \text{ kW/l}$  時之 61% 之時間即可達到品質要求  $X_{\text{standard}}$ ，若延長研磨時間，則仍可以繼續提高透明度，如圖所示，最後可提高 27% 之透明度。
- 當動力密度在提高到  $3.3 \text{ kW/l}$  時，僅需相對於動力密度為  $2.1 \text{ kW/l}$  時之 50% 之時間即可達到品質要求  $X_{\text{standard}}$ ，若延長研磨時間，則透明度可以提高 37%。

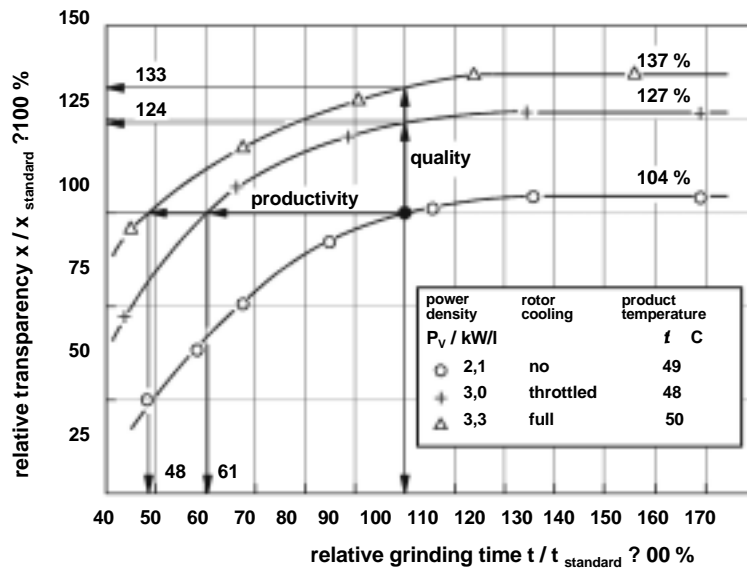


圖 3.a 於不同動力密度下,色膏透明度與研磨時間之關係圖

若將圖 3.a X 軸之研磨時間改為相對於當動力密度為 2.1 kW/l 達到透明度要求時所需之相對比能量值時，即當比能量為 540 kWh/t 時，定義為  $X/X_{\text{standard}}=100\%$ ，則可以得知下列結果：

- 當動力密度為 2.1 kW/l 時，即使增加比能量之值，亦無法有效地增加透明度。
- 當動力密度為 3.0 kW/l 時，當比能量增加時，透明度亦隨之增加，但到 127% 時即無法再增加。
- 當動力密度在提高到 3.3 kW/l 時，隨著比能量增加透明度可以增加到 137%。

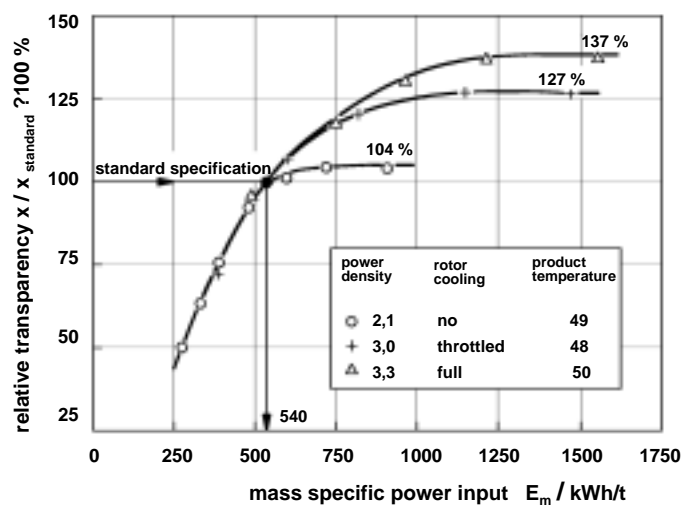


圖 3.b 不同之動力密度在不同之比能量下所產生之透明度關係圖

由上述可得下列之結論：

1. 當提高動力密度時，達到同一透明度要求下所需之比能大大地減少，即產能可以大大地提升。
2. 當採用較高動力密度時，品質可以往上提升。但若採用傳統型之研磨機時，因為能量密度無法提高，所以即使增長研磨時間、增加比能量或降低流量（當採用連續式操作時）亦無法提高品質，例如當動力密度為 2.1 Kw/l 時，即使增加比能量之輸入，透明度亦無法高於 104 %。

#### 4. 傳統型與新一代雙缸型研磨機設計之比較範例

以分散研磨一個對溫度敏感或奈米尺寸之漿料而言，假設漿料之最大允許溫度為 45°C；對傳統型研磨機及新一代研磨機於實驗機種得知達到品質需求時，所需之比能量皆為  $E_m = 200 \text{ kWh/t}$ ；若欲將產能放大到 500 kg/h 時，此時傳統型機台及新一代研磨機為達到該放大後產能需求所需之研磨機相關規格比較表如表一所示，並說明如下：

- 於實驗型研磨機時，新一代研磨機之研磨室大小只需傳統型之 1/4 左右。
- 對於同一動力需求 100 kW 而言，傳統型研磨機之研磨室體積為 497 l，而新一代研磨機之研磨室體積只需 25 l。相差約 20 倍。
- 因為熱交換之問題，放大後之動力密度，傳統型研磨機僅為新一代研磨機之 20 分之 1，此時由傳統型研磨機所放大後之量產型機台可能因此而無法達到其實驗型研磨機所得到之品質要求。
- 事實上，上述之結果不僅反應傳統型之機台於放大後之動力密度降為新一代研磨機之 20 分之 1，其研磨室體積亦增大為新一代研磨機之 20 倍左右，對於研磨機清洗將因漿料殘餘量之大大增加而困難度增加，如何處理因其所產生之大量廢溶劑將是傳統型研磨機面對之令一大難題。

表一：傳統型研磨機與新一代研磨機於產能放大時之研磨機規格設計比較表

| (Parameter)                         | Definition                        | Unit   | 傳統型研磨機 | 新一代雙缸型研磨機 lar |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--|--------|---------------|
| <b>Pilot plant mill</b>             |                                   |  |        |               |
| Grinding chamber                    | $V_{MR}$                          | [l]  | 5      | 1,1           |
| Cooling surface                     | $S_K$                             | [m <sup>2</sup> ]                            | 0,16   | 0,13          |
| Max. net power for $t \leq t_{max}$ | $(P - P_0)$                       | [kW]   | 5      | 4,4           |
| Power density                       | $\frac{P - P_0}{V_{MR}}$          | $\left[ \frac{\text{kW}}{\text{l}} \right]$  | 1      | 4             |
| Specific energy                     | $\frac{P - P_0}{\dot{m}_{pilot}}$ | $\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]$ | 200    | 200           |
| Production output                   | $\dot{m}_{pilot}$                 | $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$  | 25     | 22,5          |
| <b>Industrial scale production</b>  |                                   |  |        |               |

|                    |   |  |  |   |
|--------------------|---|--|--|---|
| Specific energy    | $\frac{P - P_0}{\dot{m}_{\text{prod}}}$ | $\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]$ | 200  | 200   |
| Throughput         | $\dot{m}_{\text{prod}}$                 | $\left[ \frac{\text{t}}{\text{h}} \right]$   | 0,5  | 0,5   |
| Net power (eq. 16) | $(P - P_0)$                             | [kW]   | 100  | 100   |
| Grinding chamber   | $V_{\text{MR,theor}}$                   | [l]  | from eq. 17:<br>$5 \text{ l} \left( \frac{0,5 \cdot 200}{5} \right)^{3/2} = 447 \text{ l}$ | from eq. 21:<br>$1,1 \text{ l} \left( \frac{0,5 \cdot 200}{4,4} \right) = 25 \text{ l}$ |
| Size selected      | $V_{\text{MR,actual}}$                  | [l]  | 500  | 26  |
| Power density      | $\frac{P - P_0}{V_{\text{MR}}}$         | $\left[ \frac{\text{kW}}{\text{l}} \right]$  | 0,2  | 3,85  |

## 5. 結語：

隨著政府大力地倡導及推廣奈米科技之技術及應用，在材料上如何進到奈米尺度材料之要求將是影響到奈米科技是否能夠成熟茁壯之重要因素之一。由上述可知”工欲善其事，必先利其器”，如何找到一個好的分散研磨設備以克服傳統型研磨機於研發至量產奈米尺度材料時所可能遇到之技術瓶頸，將是一大重要課題。本文所介紹之新一代雙缸型研磨機不僅可以解決傳統型研磨機於放大時所遇到之問題，更可以大大地在量的方面提高分散研磨效率，同時在質的方面亦可以達到奈米尺度材料之要求。該機型已在台灣及世界各國廣泛地被使用中。

## 6. 本文所述新一代研磨機之專利字號：

- [1] Stehr, N. EP 0439826 B1 (1993), patentee: Draiswerke GmbH  
Schmitt, P.
- [2] Stehr, N. US Pat 5 062 577 (1991), patentee: Draiswerke GmbH  
Schmitt, Ph
- [3] Stehr, N. US Pat 5 897 068 (1999), patentee: Draiswerke GmbH
- [4] 諾伯特.史戴爾, PRC Pat 88 102 957.2 (1988)  
菲利浦.其米特
- [5] 德斯沃克股份有限公司 PRC Pat 98 123 476.3 (1988)
- [6] 諾伯特.史戴爾, ROC Pat 77 102 825 (1988)  
菲利浦.其米特
- [7] 德斯沃克股份有限公司 ROC Pat 87 117 747 (1998)