

矽膠磁性複合彈性磨料之研發與內圓孔之拋光研究

陳源豐¹、黃永河^{2*}、卓漢明¹、林清田¹

¹南開科技大學 機械工程系

²南開科技大學 自動化工程系

*通訊: yhuang@nkut.edu.tw

摘要

對不鏽鋼之細長管、彎曲管、分歧管、入口狹窄鋼瓶等食品、醫療器材零件的內部拋光，若採用傳統的加工方式，由於研磨工具難以進入，往往無法達成拋光之目的。利用磁力研磨(Magnetic Abrasive Finishing)則能夠快速地將零件的內外表面拋光到鏡面的程度。

市售的磁性磨料經過實際的拋光驗證，已經能夠將不鏽鋼SUS304之表面拋光到 $R_{\max} 0.3\mu\text{m}$ 鏡面的程度。然而此種磨料為剛性磨粒，無法有效緩衝磨粒對表面的切削，因此若加工表面要求較高時，此一剛性磨粒將不易達成奈米級的鏡面拋光加工。

本研究以矽膠作為基材(黏結劑)，結合SiC及純鐵粉末，開發出具有彈性的高分子磁性複合彈性磨料，利用高分子磁性複合彈性磨料的微彈性使磨料產生變形進而增加磁力研磨時的接觸面積，且由微量切削來改善表面粗糙度，以達成奈米等級鏡面拋光加工的需求。在磨料的製程中，不需用到現行製造磁性磨料的長時間加熱過程，不僅可大幅降低磨料生產成品，更能符合節能減碳的時代潮流。

關鍵字：矽膠、磁力研磨、高分子磁性複合磨料

1. 前言

近年來隨著工業的快速發展，機械、電子等零件的製造逐漸朝向精密化、微細化，產品除了幾何精度達到超微細程度外，表面粗度更是被要求達到鏡面的效果，例如 CD-R、DVD 光碟模具、光學元件、塑膠模具的表面加工。已經有多種拋光技術被開發出來並且廣泛的應用到這些精密零件的表面拋光，如電化學加工(Electro Chemical Machining)、電解拋光(Electrical Polishing)、化學機械拋光(Chemical Mechanical Polishing)...等。每一種精密拋光技術都有其優點，但也有其限制性；然而利用磁力研磨法(Magnetic Abrasive Finishing)不僅設備成本低、加工效率高、操作容易、環境污染低、能源消耗少，並且能夠達到極為優異的拋光效果。

磁力研磨係利用永久磁鐵或電磁鐵所產生的磁場，將置於磁場中的磁性磨料形成撓性的磁刷(Flexible Magnetic Abrasive)[1-4]，利用磁刷上之磨料除去工件表面上的不規則的尖點(Peak)，達到超精密

研磨加工的效果。若將磁極架設於工件內、外側，即可施行零件內徑、外徑之拋光；將磁極架設於工件上方、側面，即可施行平面及凹凸曲面零件之拋光，可謂是多功能的精密加工方法，其加工示意圖如圖一所示。磁力研磨的加工量可以隨著磨料顆粒大小來調整，甚至極微細線徑($20\mu\text{m}$)之表面粗度亦可直接拋光至 $R_{\max} 0.2\mu\text{m}$ 。被拋光工件從磁性材料(鋼)到非磁性材料(不銹鋼、陶瓷)，加工量可以隨著加工間隙、磁極振動來調整，表面粗度可隨著加工時間(數秒至數分鐘)來達到所需的要求，甚至可加工至鏡面的程度。

磁性磨料是磁力研磨拋光極為重要的加工要素，在日本係由東洋研磨材株式會社與宇都宮大學進村教授聯合研發[5-22]，惟成份比例與製程屬於商業機密，無法取得關鍵的製作技術，且購買不易、價格昂貴(NT 15,000 元/kg)。目前在國內並無專門的生產單位與研發技術，致使磁力研磨無法在國內展現出其獨特的效果。本校研究團隊近年來積極投入磁力研磨加工技術與磁性磨料的開發研究，已經成功研發出燒結型磁性磨料的關鍵製作技術，並獲得發明專利，改良製法的磁性磨料經過實際的拋光驗證，已經能夠將不銹鋼 SUS304 之表面拋光到 $R_{\max}0.25\mu\text{m}$ 鏡面的程度，製作成本約為市售磁性磨料 1/3。然而因為一般剛性磨粒，無法有效緩衝磨粒對表面的切削，因此若加工表面要求較高時，此種剛性磨粒將不易達成奈米級的鏡面拋光加工。目前的磁性磨料以燒結製程為主，將研磨材與磁性材混合後進行真空高溫燒結再將其粉碎篩選，相關製程較為繁瑣，因此本研究乃採用附著方式將研磨材與磁性材披覆在具有彈性的矽膠(高分子)基材表面(參考圖二)，期望能開發出更優質且具有彈性的磁性複合彈性磨料，以滿足奈米級鏡面拋光加工的需求，並取代傳統燒結製程以降低製造成本。

本研究計劃之主要目的係開發實用性的高分子複合磨料磁力研磨加工技術，包括磁場之設計、高分子複合磁性磨料之研製及最佳加工參數的取得，利用高分子磁性複合磨料的微彈性使磨料產生變形進而增加磁力研磨時的接觸面積(參考圖三)，且由微量切削來改善表面粗糙度，以滿足奈米級鏡面拋光加工的需求。並使磁力研磨法能夠廣泛用於複雜精密零件之加工。

2. 實驗設備與方法

2.1 電磁控制拋光機構

磁力研磨拋光加工機如圖四所示。磁力來源是利用電磁線圈產生，由電磁線圈產生的磁通經過鐵心、N磁極、工件夾具、磁性磨料、S磁極、鐵心、磁軛形成一個封閉的磁場迴路。加工域的磁場強度即磁通密度大小，是由電磁線圈的起磁力 $N \times I$ (N 為電磁線圈卷數、 I 為激磁電流) 所決定，電磁線圈繞線圈數 $N=2140$ 匝。

磁極係由低碳鋼(<0.15%C)材料製造，電磁極的一端 N、S 極夾持於磁力拋光加工機主軸上，電磁極 N、S 極用來吸附磁性磨料，磁性磨粒受到電磁場的作用而被吸附在不銹鋼內圓面上，使磁性磨粒形成可撓性磁刷(Flexible Magnetic Brush)，能對工件的表面產生可調變的加工壓力，當磁刷研磨時即可進行工件表面的加工。

在磁極形狀設計方面，磁極的形狀係依據工件的直徑大小來設計，因此磁極的形狀設計為 V 型，並且利用 FLUX 磁路分析軟體，進行磁極形狀的模擬分析。在設計的條件方面，設定為在加工間隙 1.0mm 時，理想的磁通密度能達到 1.2Tesla 的磁場強度。磁極的尺寸設計為長 50mm*寬 25mm*高 25mm，並在磁極端面切割出 2 mm 寬 *2mm 深的溝槽，以減少磁極端面的磁路截面積，增強該區域的磁場強度，並利用磁性磨料容易往磁通密度強的區域集中的原理，使磨料聚集於溝槽的邊緣(Edge)，形成多束強力的研磨磁刷，加壓在工件表面上，以達到快速研磨的作用。

2.2 磁性磨料

磁性磨料之製作是採用霧化法，其製程示意圖如圖五所示。將鐵粉與添加適量硬化劑的矽膠依不同重量比例均勻混合使成為膠狀體後，置放於#100 的不銹鋼篩網上，接著將篩網套在內部置有碳化矽粉末的造粒容器上，以壓縮空氣吹送強迫膠體通過篩網並進入造粒室，碳化矽粉末即可黏附於膠體顆粒外圍，等膠體顆粒充分硬化後，取出以#80 的篩網過篩並以磁鐵篩選出可用的磁性磨粒。在市售的各種廠牌矽膠中，經由考量矽膠的引張強度、硬度與黏結力並經實地測試，以日本信越化工所生產的 KE1310ST 型矽膠可滿足加工要求，其一般性能如表一所示。磁性材料採用 125 mesh(粒徑約為 115 μm) 的純鐵粉末，碳化矽粉末的粒度為 3000 mesh(粒徑約為 5 μm)。製作完成的磁性磨料以 SEM 觀察如圖六所示，可看出磨料顆粒的外圍黏附大量的碳化矽粉末，如此在拋光過程中，可得到較高的加工效率。

3. 加工參數設計

實驗參數設計之目的，是要確認實驗結果受到加工參數對於表面品質的影響程度，故必須經由實驗以瞭解各因子之特性，才能運用到實際的加工上，以確保表面品質的改善。為方便日後可迅速找出對表面

粗糙度改善之顯著影響因子、計算出各個參數對實驗觀察值的影響並求得最佳化條件，本研究採用田口式 L_{18} 型直交陣列表規加工實驗，實驗中選用各具有二個水準、三個水準的五個因子 (factor) 如表二所示。

4. 實驗結果與分析

4.1 表面粗糙度分析

表面粗糙度(Surface Roughness)是加工表面輪廓的狀況，以 R_{\max} (μm) 表示，粗糙度的目標值是愈小愈好。以 L_{18} 型直交表規加工工程序，在實驗過程中量測五個點的表面粗糙度並求出其平均值，如表三所示。

4.2 拋光結果

由圖七顯示，加工前之工件表面極為粗糙，其粗糙度值為 $R_{\max} 2.57\mu\text{m}$ ，經過 10 分鐘拋光加工之後，工件表面已呈現鏡面的效果，如圖八所示。由拋光效果顯示，磁力研磨確實能夠得到良好的精度與表面品質，達到加工的效果。

5. 結論

在本研究計劃中，有關不銹鋼管件的磁力研磨加工特性與加工參數間的關係，經由一系列的實驗及分析探討，可獲得以下幾點結論：

1. 磁極的特殊切槽設計，可發揮磁場不均勻分佈的效果，提高研磨效率及改善表面品質。
2. 為獲得最佳的表面粗度，則須選定較低的轉速、減低振動頻率、增大磁通密度、增加膠體成份中鐵粉的重量比例。
3. 加工前的表面粗糙度為 $R_{\max} 2.57\mu\text{m}$ ，精加工之後表面可降到 $R_{\max} 0.216\mu\text{m}$ ($R_a 0.018\mu\text{m}$) 的鏡面。
4. 本研究成果非常適合於 SUS304 不銹鋼材料之鏡面拋光加工。
5. 本磁性研磨粉末之製作不需要使用加熱製程，可有效節約能源並降低生產成本，然其生產速率較為緩慢，實有必要針對製程循環時間持續進行改良。

6. 誌謝

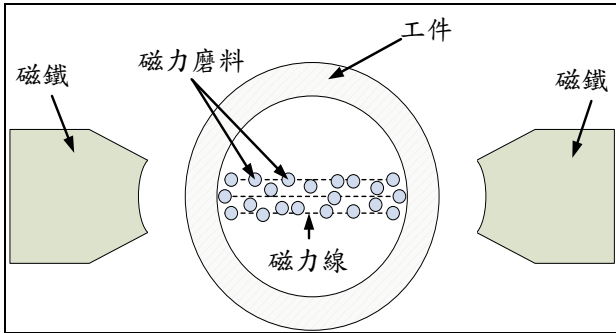
本論文為國科會編號 NSC-101-2221-E-252-002 之計畫，由於國科會的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

7. 參考文獻

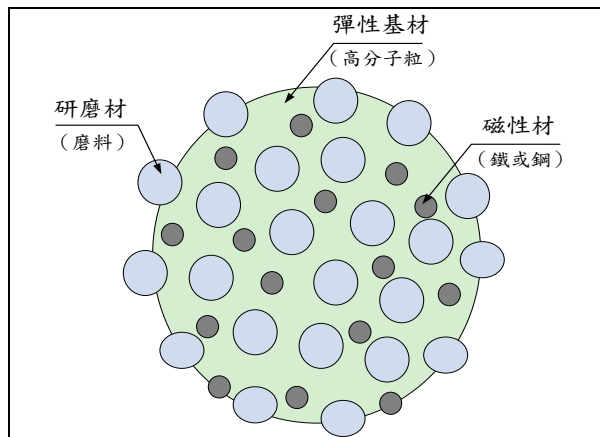
1. S. L. Chiu and T. H. Lin, "Breakup of Compound Liquid Jets under Periodic Excitation at Small Core-to-Shell Mass Ratios," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 31, No. 1, pp. 21-28, 2008.

2. Shinmura, T., "Development of a Unit System Magnetic Abrasive Finishing Apparatus using Permanent Magnets", Bull. Japan Soc. Of Prec. Engg., Vol. 23, No. 4, pp. 313-315, 1989.
3. Shinmura, T., Takazawa, K., and Hatano, E. , "Study on Magnetic - Abrasive Finishing (1st Report) - On Process Principle and a Few Finishing Characteristics" J. of JSPE (in Japanese), Vol. 52, No. 5, pp. 851-857, 1986.
4. Shinmura, T., Takazawa, K., and Hatano, E. , "Study on Magnetic Abrasive Finishing - Effects of Various Types of Magnetic Abrasive on Finishing Characteristics-", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 21, No. 2, pp. 139-141, June 1987.
5. Shinmura, T., Takazawa, K., and Hatano, E. and Aizawa, T. , "Study on Magnetic - Abrasive Process - Process Principle and Finishing Possibility -" Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 19, No. 1, pp. 54-55, 1985.
6. Yamaguchi, H. and Shinmura, T., "Study on a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining (2nd Report, Effects of Magnetic Field Distribution on Magnetic Force Acting on Magnetic Abrasives)", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, Vol. 60, No. 578, pp. 3539-3545, Oct. 1994.
7. Tsuchiya, K., Shimizu, Y., Sakaki, K. , and Sato, M. , "Polishing Mechanism of Magnetic Abrasion" Journal of the Japan Institute of Metals, Vol. 57, No. 11, pp. 1333-1338, 1993.
8. Shinmura, T., Takazawa, K., and Hatano, E. , and Aizawa, T. , "Study on Magnetic-Abrasive Finishing (2nd Report) - Finishing Characteristics-", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 52, No. 10, pp. 1761-1767, 1986.
9. 進村武男, "磁氣研磨法研究 - 研磨仕上表面の性狀 -", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 53, No. 11, pp. 1791-1793, 1987.
10. Shinmura, T., Takazawa, K. , and Hatano, E., and Aizawa, T., "Study on Magnetic - Abrasive Process - Finishing Characteristics -" Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 18, No. 4, pp. 347-348, 1984.
11. Geeng-Wei Chang, Biing-Hwa Yan, Rong-Tzong Hsu "Study on Cylindrical Magnetic- Abrasive Finishing Using Unbonded Magnetic Abrasives", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, pp. 1080-1086, 2002.
12. Shinmura, T., and Aizawa, T., "Study on Magnetic Abrasive Finishing Process--Development of Plane Finishing Apparatus using a Stationary Type Electromagnet", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 23, No. 3, pp. 236-239, 1989.
12. Ceramics by Magnetic Abrasive Machining- On the Improving Effect of Finishing Efficiency Obtained by Mixing Diamond Magnetic Abrasives with Ferromagnetic Particles -", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 59, No. 8, pp. 1251-1256, 1993.
13. Shinmura, T., Hatano, E., and Takazawa, K. "Development of Plane Magnetic- Abrasive Finishing Apparatus and its Finishing Performance", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 52, No. 6, pp. 1080-1086, 1986.
14. Shinmura, T., "Study on Plane Magnetic - Abrasive Finishing (3rd Report) - On the Finishing Characteristics of Non - ferromagnetic Substances -", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 55, No. 7, pp. 1271-1276, 1989.
15. Shinmura, T., and Aizawa, T. , "Development of Plane Magnetic Abrasive Finish Apparatus and its Finishing Performance (2nd Report) - Finishing Apparatus using a Stationary Type Electromagnet -" J. of JSPE (in Japanese), Vol. 54, No. 5, pp. 928-933, 1988.
16. Shinmura, T., Takazawa, K. , and Hatano, E., "Study on Magnetic - Abrasive Process - Application to Plane Finishing -", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 19, No. 4, pp. 289-291, 1985.
17. Shinmura, T., Takazawa, K. , and Hatano, E. , "Study on Magnetic-Abrasive Finishing (3rd Report) - Finishing Characteristics Non-ferromagnetic Substances -", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 53, No. 9, pp. 1440-1446, 1987.
18. Shinmura, T., and Aizawa, T. "Study on Internal finishing of a Non - ferromagnetic Tubing by Magnetic Abrasive Machining Process", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 23, No. 1, pp. 37-41, 1989.
19. Shinmura, T., Yamaguchi, H. and Shinbo, Y., "a New Internal Finishing Process of a Non-ferromagnetic Tubing by Applying a Rotating Magnetic Field", Int. J. Japan Soc. Prec. Engg., Vol. 26, No. 4, pp. 302-304, 1992.
20. Shinmura, T., Yamaguchi, H. and Aizawa, T., "A New Internal Finishing Process of a Non-ferromagnetic Tubing by Applying a Magnetic Field - The Development of a Unit Type Finishing Apparatus using Permanent Magnets -", J. Japan Soc. Prec. Engg., Vol. 59, No. 1, pp. 161-166, 1993.
21. Shinmura, T., Development of Magnetic Abrasive Finishing Apparatus using Vibratory Magnetic Poles and Its Finishing Performance", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 54, No. 11, pp. 2170-2175, 1988.
22. Shinmura, T., Takazawa, K. , and Hatano, E., "Study on Magnetic - Abrasive Finishing - Rounding Condition and Its Confirmation by Experiment -", J. of JSPE (in Japanese), Vol. 52, No. 9, pp. 1598-1603, 1986.
23. 黃文科, 郭佳儂, "磁氣研磨拋光之研究", 碩士論文, 國立雲林科技大學, 雲林, 台灣, 2001.

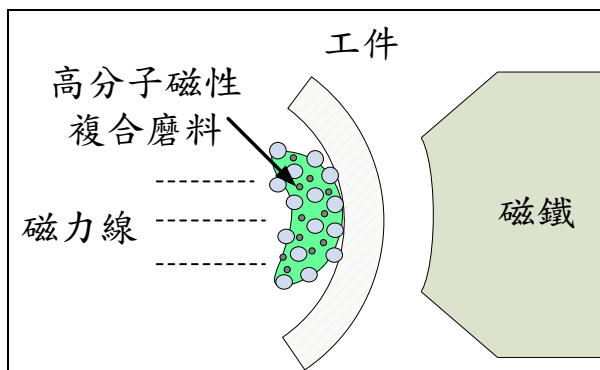
8. 圖表



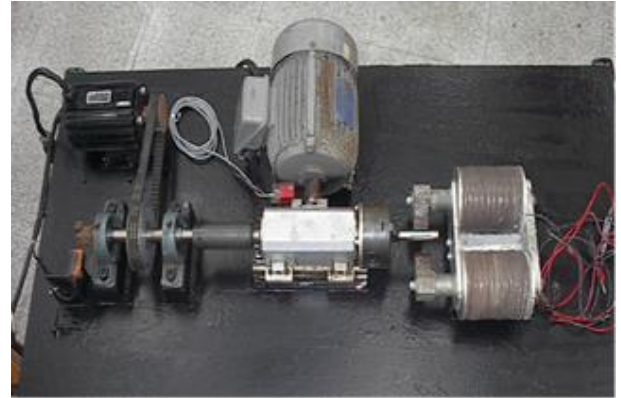
圖一：磁力研磨加工示意圖。



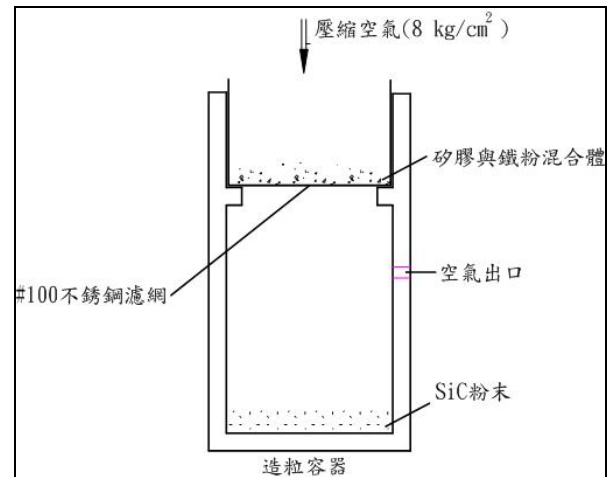
圖二：矽膠磁性複合磨料示意圖。



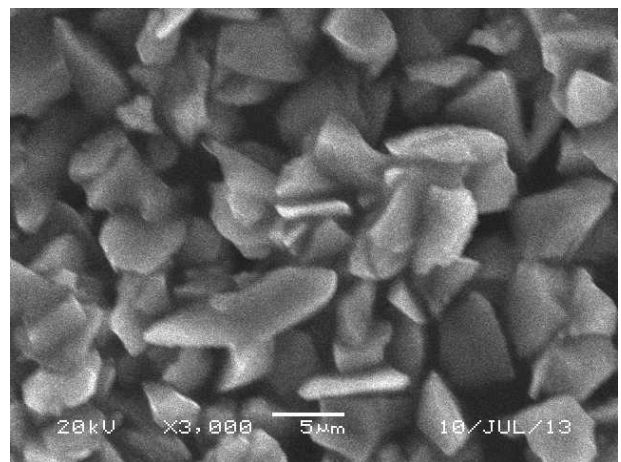
圖三：矽膠彈性磁性複合磨料磁力拋光加工示意圖。



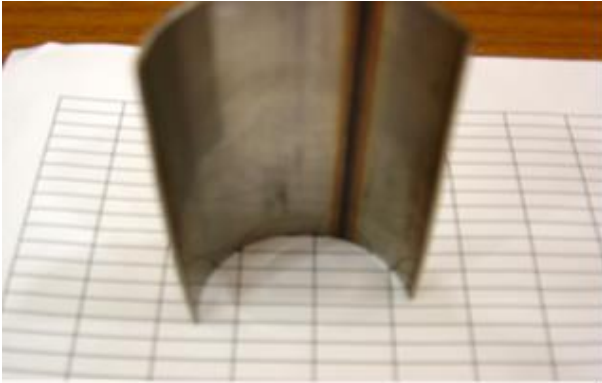
圖四：內圓磁力研磨加工機構。



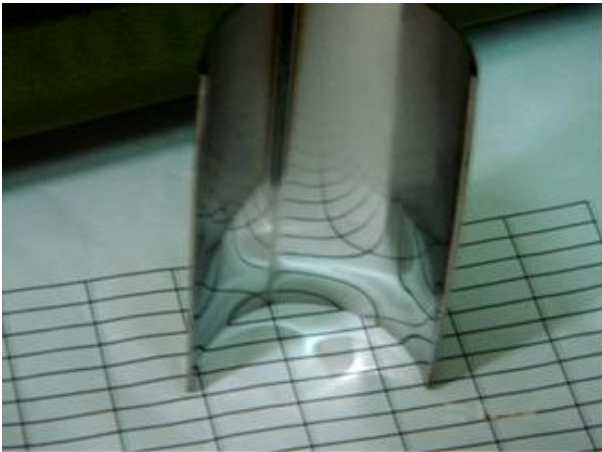
圖五：以霧化法製作矽膠磁性複合彈性磨料示意圖。



圖六：磁性磨料的SEM (X 3000)。



圖七：拋光前表面粗糙($R_{max} 2.57\mu m$)。



圖八：拋光後表面成為鏡面($R_{max} 0.216\mu m$)。

表一：信越化工之KE1310ST型矽膠一般性能表。

黏度(Poise)	800
與硬化劑混和比(重量比)	100:10
標準硬化時間	25°C×24 小時
硬度(Shore A)	40
抗拉強度(kgf/cm ²)	60
撕裂強度(kgf/cm)	25
伸展率(%)	350
線收縮率(%)	0.1 以下
比重	1.08

表二：加工參數表

觀測值	加工參數	水準值		
		1	2	3
表面粗糙度(μm)	A 加工液	拋光液 (a)	切削油 (b)	—
	B 主軸轉速(rpm)	500	1000	1500
	C 振動頻率(次/sec)	2.5	5.0	10.0
	D 磁通密度(mT)	250	275	300
	E 膠體成份(純鐵粉末/矽膠；重量比)	1.0	2.0	3.0

(a) 豪昱 HD-233A 水性拋光液與 98-97% 水之重量比混合。

(b) 中國石油 (Chinese Petroleum Corporation) 國光牌切削油 31C，黏度等級相當於 SAE20W。

表三：L18直交陣列表表面粗糙度

NO	控制參數					表面粗糙度
	加工液	主軸轉速	振動頻率	磁通密度	膠體成份	Rmax
1	切削油	500	2.5	250	1.0	0.364
2	切削油	500	5	275	2.0	0.386
3	切削油	500	10	300	3.0	0.246
4	切削油	1000	2.5	250	2.9	0.322
5	切削油	1000	5	275	3.0	0.310
6	切削油	1000	10	300	1.0	0.362
7	切削油	1500	2.5	275	1.0	0.354
8	切削油	1500	5	300	2.0	0.298
9	切削油	1500	10	250	3.0	0.465
10	拋光液	500	2.5	300	3.0	0.216
11	拋光液	500	5	250	1.0	0.436
12	拋光液	500	10	275	2.0	0.414
13	拋光液	1000	2.5	275	3.0	0.272
14	拋光液	1000	5	300	1.0	0.372
15	拋光液	1000	10	250	2.0	0.46
16	拋光液	1500	2.5	300	2.0	0.262
17	拋光液	1500	5	250	3.0	0.385
18	拋光液	1500	10	275	1.0	0.496

Development on Silicon Rubber Elastic Composite Magnetic Abrasive and Research on Internal Polishing

Yuan-Feng Chen¹, Yung-Ho Huang^{2*}, Han-Ming
Chow¹, Ching-tien Lin¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Nan Kai
Universtiy of Technology

² Department of Automation Engineering, Nan Kai
Universtiy of Technology

*Corresponding: yhhuang@nkut.edu.tw

Abstract

Some of the stainless steel tubes such as bending tube, manifold and steel bottle for medical care and food usages have various narrow holes which are so slender that a conventional grinding tool is too big to insert into the tube to polish inner surface of the tubes. With the use of Magnetic Abrasive Finishing (MAF) to polish surfaces of the parts, roughness on the surfaces can reach a level like a mirror.

We have devoted to the study of MAF for many years; the magnetic abrasive particle we have developed can yield a value of Ra 0.008 μ m(Rmax0.1 μ m), which is similar to the surface of a mirror. However, there is no way to absorb charging of abrasive particle during polishing for conventional stiff abrasive materials. Therefore, it is difficult to obtain the nano-level mirror surface.

The study is based on silicon rubber and mix Sic and pure iron powder to develop elastic magnetic abrasive particles. During the process, the time demanded is shorter as well as the price is lower. Further, it's more eco-friendly. The success of the magnetic abrasive particle experiments will bring magnetic abrasive finishing technique to the new state of finishing technology.

Keywords: Silicon Rubber, Magnetic Abrasive Finishing (MAF), Polymer Elastic Magnetic Abrasive Particle