執行機構 Implementation Agent



資助機構 Funding Organisation

兀創新科技署 Innovation and Technology Commission





多孔金屬通用生產技術 POROUS METAL UNIVERSAL FABRICATION TECHNOLOGY



總結報告 SUMMARY REPORT

編輯 Editors

黎偉華先生 Mr Wai-wah LAI 楊浩坤博士 Dr Hao-kun YANG 盧匡行先生 Mr Hong-hang LO 李嘉欣小姐 Ms Jia-xin LI 陳 璇博士 Dr Xuan CHEN

Published by

香港生產力促進局 The Hong Kong Productivity Council HKPC Building, 78 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong

Copyright © 2023

香港生產力促進局 The Hong Kong Productivity Council

版權所有 翻印必究 All Rights reserved

未經出版商事先書面許可,本出版物的任何部分不得以複製,存儲在檢索系統中或以任何形式或通過任何方式傳播、傳輸。

No part of this publication may be reproduced in any form, whether in electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

致謝 Acknowledgement

感謝香港汽車零部件工業協會,香港金屬製造業協會,香港鑄造業總會,源興盛實業有限公司,初出日(香港)有限公司與歌華國際有限公司的支持。

Thanks for the support from Hong Kong Auto Parts Industry Association, The Hong Kong Metals Manufacturers Association, Hong Kong Foundry Association, as well as Hermon Industries Limited, Morning Sun (H.K.) Ltd., and GOA International Limited.

多孔金屬通用生產技術總結報告乃創新科技署撥款資助的創新科技基金項目中的其中一項成 果。在此總結報告上的資料,或項目成員表達的任何意見、結論建議及展現的成果,並不代 表香港特別行政區政府或創新科技署的觀點。

This technology summary is a publication under the ITF project which is funded by the Innovation and Technology Commission. Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this handbook (or by members of this project team) do not reflect the views of the Government of the Hong Kong Special Administrative Region or the assessment committees of the Innovation and Technology Fund.

感謝支持 Thanks for the support from

香港汽車零部件工業協會 Hong Kong Auto Parts Industry Association

香港金屬製造業協會 The Hong Kong Metals Manufacturers Association

香港鑄造業總會 Hong Kong Foundry Association

源興盛實業有限公司 Hermon Industries Limited

初出日 (香港)有限公司 Morning Sun (H.K.) Ltd.

歌華國際有限公司 GoA International Ltd.

序言 Introduction

由於能源資源短缺和全球環保需求,車輛的關鍵部件需要輕量化設計以節省燃料消耗。此 外,運動部件和發動機散發的熱量會提高車輛運行溫度,加速構件老化和腐蝕。目前,金 屬泡沫製造工藝和材料已開發並應用。但是發泡所需的發泡劑價格昂貴,且會在製備過程 中釋放大量的易爆炸氫氣。此外,發泡劑會引入其他元素污染金屬泡沫材料,使產品機械 性能惡化。

這本技術總結報告將會介紹我們開發的物理坩堝熔體提取工藝,以製備不同尺寸和材料的金 屬纖維,並燒結成型製造泡沫金屬的多孔結構。這是一種適用於大、中、小批量生產的新型 柔性工藝。與現有的化學發泡工藝相比,不僅具有經濟性,並且所有可熔金屬材料均可通過 這種方法製造,大多數商業化多孔金屬材料和構件的製備都可以考慮這個方法。

此外,該技術可以選用不同的金屬材料,例如不鏽鋼和銅等可融化的原材料製備不同的產 品。物理坩堝熔體提取工藝在針對汽車零配件需要強度,重量,熱導率和其他特殊要求時, 該工藝在材料選擇方面有巨大的自由度,可被應用在多孔構件和金屬泡沫產品上。根據我們 對多孔金屬通用生產技術的研發成果,將所有有關這技術的要點,清楚地剖析。

目 錄	1. 材料輕量化簡介	08
CONTENTS	1.1. 汽車輕量化	08
	1.2. 實現輕量化的基本條件	08
	1.2.1. 足夠的強度	08
	1.2.2. 足夠的剛度	09
	1.3. 實現輕量化的途徑	09
	2. 多孔金屬生產技術介紹	10
	2.1. 簡介	10
	2.2. 已有技術	11
	2.3. 通用生產技術	11
	2.4. 原材料採購	13
	3. 柔性金屬纖維多孔材料製備工藝與設備開發通用生產技術	14
	3.1. 纖維提取設備	14
	3.1.1. CME 其他配套設備介紹	22
	3.2. 纖維提取工藝	25
	3.2.1. 純銅	25
	3.2.2. 不鏽鋼 304	26
	3.3. 纖維成形模具	27
	3.4. 纖維成形操作	29
	3.5. 燒結設備	30
	3.5.1. 燒結爐設備參數	30
	3.5.2. 燒結爐操作	31
	3.5.3. 燒結試驗	31
	3.5.4. 燒結溫度設定	34
	3.5.5. 燒結樣品三維形態表徵	34
	3.6. 密度孔隙率測量與計算	34
	3.6.1. 截面孔隙率	34
	3.6.2. 比較密度孔隙率與截面孔隙率	35
	3.6.3. 孔隙率與下壓率之關係	35

日錄	4. 多孔金屬通用生產技術參數及結果	37
CONTENTS	4.1. 纖維半成品	37
CONTENTS	4.1.1. 簡介	37
	4.1.2. 純銅纖維	38
	4.1.2.1. 形貌	39
	4.1.2.2. 截面	40
	4.1.3. 不鏽鋼 304 纖維	41
	4.1.3.1. 形貌	42
	4.1.3.2. 截面	43
	4.2. 多孔金屬材料成品	43
	4.2.1. 純銅多孔金屬	43
	4.2.1.1. 形貌觀測	44
	4.2.1.2. 截面觀測	44
	4.2.1.3. 孔隙率	45
	4.2.1.4. 導熱	46
	4.2.1.5. 散熱	47
	4.2.2. 不鏽鋼 304 多孔金屬	50
	4.2.2.1. 形貌觀測	50
	4.2.2.2. 截面觀測	52
	4.2.2.3. 孔隙率	53
	4.2.2.4. 透光率	54
	4.2.2.5. 壓縮強度	55
	5. 案例分析	57
	5.1. 汽車外殼內側抗衝擊填料	57
	5.2. 電路板散熱元件	58
	5.3. 多孔散熱材料	58

1. 材料輕量化簡介

1.1 汽車輕量化

輕量化是工業界的趨勢之一,其中汽車工業的輕量化較為人所知。汽車輕量化的目的是以減 輕汽車車身或部件的重量,達到降低燃油耗量及環保節能的效果。一些研究數據顯示,汽車 整體車身重量降低 10% 可提高燃油效率 6%-8%,整體車身重量每減少 100 公斤則可降低 每百公里油耗 0.3-0.6 公升,而二氧化碳排放量亦可減少約每公里 5 克。基於對可持續發展 考量,業界已為汽車輕量化的積極實行達成共識。在汽車輕量化工作領域中,研發輕量化材 料及其相關工藝亦極具重要。

在現今新能源汽車急速發展的環境下,輕量化概念在提升汽車續航形成和減少充電次數上更 為重要。各地車廠及汽車零部件製造商亦需要優化現有產品以配合新產品的需求。

1.2 實現輕量化的基本條件

實現輕量化並非只求為達到減重目的而刪去部份關鍵組件或減省必要材料的使用。實現輕量 化是必須要在保證安全、物料強度及性能的大前提下,降低部件的整體重量。實現輕量化時 必須考量的基本條件如下:

1.2.1 足夠的強度

強度在此指的是在外力作用下,金屬材料抵抗塑性變形(永久變形)和斷裂的能力。 汽車產業方面,強度是指當零件受到沖擊載荷時,發生斷裂或超過容許限度的殘餘 變形後,仍能維持功能的能力,這參數常用於車身碰撞安全性、耐沖擊等性能的評 估;是衡量零件承載力的重要指標。屈服強度和抗拉強度是其中常用的金屬材料強 度指標。

1.2.2 足夠的剛度

剛度是指金屬材料在受力時抵抗彈性變形的能力,在車身開發中是指材料在屈服前 的彈性特性。整車性能、車輛動力性能和疲勞耐久性能的基礎取決於良好的剛度, 常見的指標有車身整體剛度等。剛度與材料的彈性模量有關,彈性模量是材料組成 的性質;剛度則是結構的性質。材料種類基本上確定後,也就確定了彈性模量,例 如採用高強鋼並不會提升車身的剛性,因為鋼材的彈性模量相同。因此,金屬構件 的結構設計對於改變整體剛度更為重要。

1.3 實現輕量化的途徑

現時的輕量化方案主要圍繞幾個大方向發展:1.結構優化設計、2.提升輕量化製造工藝、 3.研發及優化材料應用。

- 結構優化設計是旨從產品的結構上透過精密的計算,針對整體結構、組件佈局、尺寸大 小等逐一優化,或透過嶄新設計來提高材料利用率,從而減輕產品整體重量。
- 2. 提升輕量化製造工藝即旨開發更先進的材料成型工藝及焊接工藝,如鐳射焊接、攪拌摩 擦焊、液壓成型、鐳射輔助成型等。更先進的技術有利於提高材料及產品穩定性和可靠 性,還可確保部件結構有更好的力學性能和延展性效果。
- 3.研發及優化材料應用旨在透過應用及研發不同的新材料,針對不同的部分對材料的剛度、強度等不同要求,在保證性能得以滿足的情況下選用合適的材料。現時較常用到的就是高強度鋼板、輕合金(鋁合金、碳纖維、鎂合金)、記憶金屬、微晶鋼、陶瓷、玻璃纖維和碳纖維等複合材料。

而與多孔金屬生產技術相關的輕量化方案正好能配合到提升輕量化製造工藝及研發及優化 材料應用的兩大方向,以滿足汽車車身輕量化的關鍵要求。

2. 多孔金屬生產技術介紹

2.1 簡介

要實現材料輕量化,其中一種最直接的方式是鏤空材料內部,從而使密度下降。擁有鏤空結構的輕量化金屬材料被稱為多孔金屬(porous metal),或稱為泡沫金屬(metal foam)。如同真實的泡沫,泡沫金屬的內部填充著許多空心的孔洞,而孔洞與相鄰孔洞之間則為原來的金屬材料,形成了泡沫外壁結構支撐著整體材料。所以此材料和同等體積的實心金屬相比,有著更低的密度。從下文起,此材料將稱曰「多孔金屬」以求達意方便。

多孔金屬除了有輕量化的優點外,亦有高比強度、表面面積大,吸振、吸音、吸收能量等優 點。因此,多孔金屬有廣泛的應用潛力和空間,應用範圍覆蓋不同工業領域,例如:

- 一、在結構應用方面,若所需機械強度較低,可直接取代傳統金屬材料;
- 二、配合著實心金屬材料,多孔金屬只作為部分結構,使整體結構減輕重量時亦能提供足 夠強度,同時隔離外界振動與噪音(詳見 5.1 部分);
- 三、因著有相當大的表面面積,和空氣之間有大量接觸面,多孔金屬可作為隔熱和散熱材料(詳見 5.2 和 5.3 部分),或用於電化學方面,如空氣過濾器的靜電過濾部分;

多孔金屬可大致分為兩類:閉孔型多孔金屬和通孔型多孔金屬。閉孔型多孔金屬內的孔洞不 相通,孔洞壁均由金屬全面包裹著,氣體分子於多孔金屬生產時即被困在孔洞中,不能自由 出入。反之,通孔型多孔金屬內的孔洞相通,金屬結構只存在於孔洞的邊角間隙處,分子可 自由穿過各孔洞。

在多孔金屬材料的生產設計過程中,孔隙率是決定材料性能的重要參數。一般在生產過程完 成後,材料的孔隙率已經被確定。孔隙率愈小,表示著金屬結構成分愈高,重量亦相應提 高。孔隙率愈大,表示著金屬結構成分愈低,重量亦相應降低。金屬結構多寡可影響材料強 弱、表面接觸面積、以至減震吸音等性能,由此可見孔隙率對於多孔金屬有著相當大的性能 影響。

2.2. 已有技術

現在市面上有生產多孔金屬的既定工藝。目前市面上發泡工藝乃在金屬熔煉時加入發泡劑, 發泡劑進入熔融態金屬後,在高熱環境下發生化學變化,釋放氫氣等類氣體並產生氣泡,從 而使熔融金屬發泡、膨脹,製作成多孔金屬成品。可是,此工藝有著若干痛點,包括:

- 一、發泡工藝或會對周圍設備及人員安全構成風險。發泡過程中氫氣會被釋出。當氫氣的體 積百分比達到4%時,可能會引致爆炸發生,尤其是金屬熔煉期間乃處於高溫狀態。
- 二、發泡過程會降低材料純度。發泡劑內含的金屬元素,例如鈦元素會溶解到多孔金屬中, 污染產品及損害材料性能。
- 三、發泡劑價格昂貴,不利於控制成本。
- 四、由於發泡劑選擇及化學反應方面的考量,只有少數金屬材料(例如鋁)可以有效地進行 化學發泡。
- 五、化學發泡工藝只能籍調整發泡劑份量或加熱時間等比較間接的方式來控制孔隙率。因 此,製作出來的多孔金屬成品孔隙率較難以控制。
- 六、化學發泡工藝難以生產出內部結構為100%通孔的多孔金屬。這對於例如通風、散熱、 或製作多孔金屬複合材料等情況時,增加了應用上的障礙。

以上幾點均為現有工藝生產多孔金屬時所面對的限制。

近年來,多孔金屬泡沫結構因其輕質和高表面積的優勢,在散熱領域及汽車結構件領域已有 應用。但是,目前的金屬泡沫製備工藝主要是採用發泡法,其發泡過程需要涉及到金屬氫化 物的分解,應用分解出的氫氣進行發泡填充。另外,現有有效的發泡金屬氫化物只有氫化 鈦、氫化鋯,其分解溫度與鋁合金的熔點接近,但是對於其他的金屬合金,例如銅合金等, 其分解溫度與上述金屬合金的熔點溫度則相距甚遠。

2.3. 通用生產技術

本研究中探討了一種生產多孔金屬的新型工藝,此工藝只使用物理方式把原材料加工成多孔 金屬,不包含化學形式的工藝。因此,跟現有化學發泡方式的現有生產工藝相比較,有更高 的便利性和彈性,其他的好處如下:

- 一、此技術不牽涉化學變化,亦不牽涉使用氫氣。此技術只會使用一種不會引起化學反應的 惰性氣體,氦氣,以防止原料於熔煉時氧化。因此並不會構成如環境洩漏、爆炸等安全 方面的風險。
- 二、此技術不需要使用發泡劑,在各步驟的製程中亦不需要加入其他材料或添加劑,因此材 料純度並不會降低,進而影響材料性能。
- 三、此技術不需要使用發泡劑,只需購買較為簡單的原物料。因此經濟方面的開銷降低,成本相對易於控制。
- 四、此技術比現有的生產技術有更多可行的材料選擇。幾乎所有的非難熔金屬(鋼、銅、鋁、 鋅)均可以此技術作多孔金屬生產。
- 五、此技術可透過壓塊時調節重量,壓製距離等直接方式自由調整孔隙率。此外,如有需要, 壓塊步驟亦可改為自動化程式,以讓成品保持穩定孔隙率及使生產流程標準化。
- 六、此技術生產的乃是 100% 通孔的多孔金屬成品,因此在對於通風、散熱、或製作複合 材料時有更佳的表現。

本研究中探討的多孔金屬生產工藝可大致分為兩大步驟,分別是纖維提取和燒結成型。

一、纖維提取

準備好顆粒狀原材料,把原材料裝進特製的坩堝中,並透過自行開發的坩堝熔煉纖維提取設備,在氦氣保護環境中加熱材料使其熔化,並把熔體噴至快速旋轉的輥系表面冷卻,從而製 作出金屬纖維。

坩堝熔煉提取法(Crucible Extract Melt, CME)是一種從熔化後的金屬生產出均勻纖維的 方法。本研究所採用的乃改良成適合小批量生產的 CME 提取法,並自行設計了一部 CME 提 取設備。此設備亦同時需連接冷卻設備,氫氣源及空氣壓縮機。CME 提取法旨在把金屬材 料熔化並噴注在高速轉動的輥系上,經過快速冷卻的同時被快速甩出,成為細晶金屬纖維。 經由改變熔煉提取過程的參數,可得到不同尺寸,厚度和形狀的成品。不同的纖維也會影響 最終多孔金屬成品的密度、孔隙率、透光度及強度。

為使此技術更能匹配實際廠房之所需,特製的 CME 設備亦有額外可選用的功能:和閒置的 磨床連結,以磨床為動力源驅動設備中的輥系組件旋轉,以提取纖維。

二、燒結成型

準備好金屬纖維,根據自訂的孔隙率,量出特定份量的金屬纖維,將其裝入模具,並在鋁合 金模具中以特定距離壓緊纖維,從而製作出纖維塊。隨後,把纖維塊放入剛玉或者石墨模具 中,並將模具和樣品一併放入真空燒結爐中,在氬氣保護環境中燒結成為多孔金屬。

2.4. 原材料採購

在表 2.1 列出了是次技術開發過程中所採用的顆粒狀金屬原材料。

表 2.1

原材料		形狀	直徑(mm)	長度(mm)
今回廿約	純銅	圓柱體	3	5
」 立 廣 竹 朴	不鏽鋼304	球體	5	/

除本次研究所採用的純銅和不鏽鋼 304 外,其他金屬材料,例如鋁、鋅及其合金,亦能以 此通用生產技術製作出多孔金屬,只需要金屬材料熔點不高於設備即可。多元的金屬材料選 擇能提供更大自由度予以研發及生產,有助研究出符合不同特定測試參數需求的成品。

3. 柔性金屬纖維多孔材料製備工藝與設備開發通用生 產技術

3.1. 纖維提取設備

本文所提及之纖維生產工藝是在特製的纖維提取設備上進行。其中,設備示意如圖 3.1 所示



圖 3.1 基於磨床的改裝示意圖

本技術方案提供了一種基於由磨床改造的柔性金屬纖維製備設備,其包括甩絲機及磨床;其 中,甩絲機具有爐殼、密封爐門、抽真空口、保護氣進氣口、操控台、銅輾裝置、進電裝置、 氣缸升降裝置及加熱坩堝;爐殼的一側壁開設有敞口,敞口的一邊側鉸接密封爐門;抽真空 口及保護氣進氣口分別開設於爐殼上的不同位置處,且在密封爐門密封關閉敞口的狀態下, 通過抽真空口將爐殼內空氣抽空並由保護氣進氣口注入保護氣而使爐殼內形成保護氣氛圍; 操控台設置於爐殼的下方;銅輯裝置裝設於爐殼內的下部,且銅輯裝置的銅輥是豎直向設 置,銅輥裝置的輾軸的驅動端是穿出爐殼的側壁;進電裝置裝設於爐殼的側壁上,且進電裝 置通過電纜與操控台的加熱電源輸出端電性連接;氣缸升降裝置裝設於爐殼的頂側壁的外側 並與操控台電性連接,氣缸升降裝置的升降端穿設於頂側壁且與位於爐殼內上部的加熱坩堝 連接;加熱坩堝位於銅輥圓周面的正上方且與進電裝置電性連接;磨床設置於甩絲機旁側; 磨床的雷機輸出端以及輾軸的驅動端均裝設固定有 SPZ 帶輪,並通過於磨床的 SPZ 帶輪及 · 軺軸的 SPZ 帶輪上套設環狀 SPZ 三角帶,以使磨床的電機輸出端對輥軸的驅動端進行傳動。 據此,在磨床閒置時,僅需對磨床的電機輸出端以及甩絲機的銅輥裝置的驅動端裝設固定 SPZ 帶輪,並通過於磨床的 SPZ 帶輪及甩絲機的 SPZ 帶輪上共同套設環狀 SPZ 三角帶,就 能使磨床的電機輸出端對銅輥裝置的驅動端進行旋轉力的傳動,以此不僅可節省為甩絲機配 設專用的電機而帶來的成本的增加,更能夠通過上述小範圍的改造而提高設備間的相容性與 互補性,從而提升設備的利用率。

作為本技術方案的另一種實施,該銅輥裝置是由銅輥、輥軸及磁流體密封構成;其中,磁流 體密封是裝設於爐殼上的與敞口相對的側壁的下部,輥軸是水準向穿設於磁流體密封且輥軸 的兩端均露出於磁流體密封並分別形成位於爐殼外側的驅動端以及位於爐殼內側的安裝端, 安裝端穿設固定銅輥。以此,利用磁流體密封不僅可以確保爐殼內良好的密封性,而且還可 確保輥軸具有良好的周向旋轉的傳動性。

作為本技術方案的另一種實施,該磨床的 SPZ 帶輪以及輥軸的 SPZ 帶輪均配設有脹緊套。 以此,可確保 SPZ 帶輪旋轉運轉時的穩定性。

作為本技術方案的另一種實施,該加熱坩堝是由豎直向設置的石英玻璃管及繞設于石英玻璃 管上的電磁感應加熱線圈構成,電磁感應加熱線圈是與進電裝置電性連接。以此,可以確保 高效的加熱及導熱效率,以使填裝于石英玻璃管內的金屬材料更快、更均勻的受熱熔化。

作為本技術方案的另一種實施,該柔性金屬纖維製備設備還包括位於爐殼內且與操控台電性 連接的微調裝置;氣缸升降裝置的升降端是通過微調裝置而與石英玻璃管連接。以此,可對 石英玻璃管的出液位置進行小範圍的精確調整。 作為本技術方案的另一種實施,該微調裝置是由L形連接板、L形導向板、兩個分別與操控 台電性連接的步進電機及移動基座構成;其中,L形連接板豎直向設置,以使其一側板體水 準向固定裝設於升降端下部,其另一側板體豎直向下,且該另一側板體的內側面水準向設置 有第一導槽及第一齒條部;L形導向板水準向設置,其一側導向板體的內側面水準向設置 有第一導槽及第一齒條部;L形導向板水準向設置,其一側導向板體的內側面水準向設置 有第二導槽及第二齒條部;移動基座相鄰的兩側面分別設置有水準向的第二導軌和另一個步進 電機,且石英玻璃管是裝設於移動基座的下側面;通過第一導軌與第一導槽相嵌設,該其中 一個步進電機輸出端的齒輪與第一齒條部相嚙合,第二導軌與第二導槽相嵌設,該另一個步 進電機輸出端的齒輪與第一齒條部相嚙合,以同時或分別驅動該兩個步進電機以使移動基座 沿該另一側導向板體的內側面水準向移動,及/或使L形導向板沿該另一側板體的內側面水 準向移動。

作為本技術方案的另一種實施,該石英玻璃管的上端部是通過連接件而螺設於移動基座的下 側面,石英玻璃管的下端部形成向下漸縮的滴液口。據此,便於將金屬材料裝填進石英玻璃 管內,且漸縮狀的滴液口可確保熔化後的金屬溶液均勻不斷且纖細的滴落至銅輥外周面上, 以確保柔性金屬纖維製備的品質。

作為本技術方案的另一種實施,該爐殼上裝設有用於監測爐殼內真空壓力的真空壓力錶。以 此,可輔助控制爐殼內抽真空的進程,確保柔性金屬纖維生產中不受金屬氧化的影響。

作為本技術方案的另一種實施,該爐殼內的底側壁的上側設置有廢料託盤。以此,便於對柔 性金屬纖維廢料的收集與清理。

作為本技術方案的另一種實施,該密封爐門上具有觀察窗。以此,便於操作人員對柔性金屬 纖維製備進程的監測。

該基於由磨床改造的柔性金屬纖維製備設備包括甩絲機及磨床。結合圖 3.2 所示,該甩絲機 具有爐殼、密封爐門、抽真空口、保護氣進氣口、操控台、銅輥裝置、進電裝置、氣缸升降 裝置及加熱坩堝。其中,爐殼的一側壁開設有敞口,敞口的一邊側鉸接密封爐門。抽真空口 及保護氣進氣口分別開設於爐殼上的不同位置處,如圖所示,該抽真空口是開設於爐殼的側 壁上,該保護氣進氣口是開設於爐殼的頂側壁上,該抽真空口及保護氣進氣口用於接設抽真 空裝置及保護氣輸氣裝置。在密封爐門密封關閉敞口的狀態下,通過抽真空口可將爐殼內 空氣抽空並由保護氣進氣口注入保護氣如氦氣等,而使爐殼內形成保護氣氛圍,以防止柔性 金屬纖維在製備過程中受到氧化。操控台是設置於爐殼的下方,其通常具備操作面板、處理 器、寄存器、加熱電源、連接埠及相關的運行程式。銅輥裝置是裝設於爐殼內的下部,且銅 輯裝置的銅輥是豎直向設置,銅輥裝置的輥軸的驅動端是穿出爐殼的側壁。進電裝置是裝設 於爐殼的側壁上且通過電纜與操控台的加熱電源輸出端電性連接。氣缸升降裝置是裝設於爐 殼的頂側壁的外側並與操控台電性連接,該氣缸升降裝置的主要部件可由氣壓式,也可應用 油壓式伸縮缸體構成,該氣缸升降裝置的升降端是穿設於頂側壁而與位於爐殼內上部的加熱 坩堝連接,而在升降端穿設頂側壁處通常需要裝設密封部件,以確保爐殼內的保護氣氛圍不 洩露。加熱坩堝是位於銅輥圓周面的正上方且與進電裝置電性連接。如圖 3.1 及 3.2 所示, 該磨床是設置於甩絲機旁側,磨床的電機輸出端以及輥軸的驅動端均裝設固定有 SPZ 帶輪, 並通過於磨床的 SPZ 帶輪及輥軸的 SPZ 帶輪上套設環狀 SPZ 三角帶,以使磨床的電機輸出 端對輥軸的驅動端進行旋轉力的傳動。

具體而言,如圖 3.2 所示,該銅輥裝置是由銅輥、輥軸及磁流體密封構成。其中,磁流體密 封是裝設於爐殼上的與敞口相對的側壁的下部,該磁流體密封通常是配設有軸承裝置,輥軸 是水準向穿設於磁流體密封且輥軸的兩端均露出於磁流體密封並分別形成位於爐殼外側的驅 動端以及位於爐殼內側的安裝端,該驅動端用於裝設固定 SPZ 帶輪,該安裝端用於穿設固 定銅輥,利用磁流體密封不僅可以確保爐殼內良好的密封性,而且還可確保輥軸具有良好的 周向旋轉的傳動性。另外,該磨床的 SPZ 帶輪以及輥軸的 SPZ 帶輪可均配設有脹緊套,以 此可確保 SPZ 帶輪旋轉運轉時的穩定性。



圖 3.2 銅輥結構示意圖

本實施例中,該加熱坩堝是由豎直向設置的石英玻璃管及繞設干石英玻璃管上的電磁感應加 熱線圈構成,雷磁感應加熱線圈是與谁雷裝置雷性連接,以此可以確保高效的加熱及導熱效 率,以使填裝於石英玻璃管內的金屬材料更快、更均勻的受熱熔化。而為了能對石英玻璃管 的出液位置進行小範圍的精確調整,該柔性金屬纖維製備設備還包括位於爐殼內且與操控台 雷性連接的微調裝置,氣缸升降裝置的升降端是诵過該微調裝置而與石英玻璃管連接的。 如圖 3.3 所示,該微調裝置可由L形連接板、L形導向板、兩個分別與操控台電性連接的步 進電機及移動基座構成;L形連接板是豎直向設置,以使其一側板體水準向固定裝設於升降 端下部,其另一側板體豎直向下,且該另一側板體的內側面水準向設置有第一導槽及第一齒 條部;L 形導向板水準向設置,其一側導向板體的外側面與內側面分別設置有水準向的第一 導軌和其中的一個步進電機,其另一側導向板體的內側面水準向設置有第二導槽及第二齒條 部;移動基座相鄰的兩側面分別設置有水準向的第二導軌和另一個步進電機,且石英玻璃管 是裝設於移動基座的下側面;通過第一導軌與第一導槽相嵌設,該其中一個步進電機輸出端 的齒輪與第一齒條部相嚙合,第二導軌與第二導槽相嵌設,該另一個步進電機輸出端的齒輪 與第二齒條部相嚙合,以同時或分別驅動該兩個步進電機以使移動基座沿該另一側導向板體 的內側面水準向移動,及 / 或使 L 形導向板沿該另一側板體的內側面水準向移動。另外,該 微調裝置的結構也可由步進電機、絲杆及滑動塊等部件的組合結構構成,本香港短期對此不 進行限定。此外,該石英玻璃管的上端部可通過連接件,例如具有外螺紋且固定裝設于石英 玻璃管上端部的環形連介面,而螺設於移動基座的下側面,該移動基座的下側面也相應的開 設有具有內螺紋的安裝口,而石英玻璃管的下端部形成向下漸縮的滴液口,以此便於將金屬 材料裝填進石英玻璃管內,目漸縮狀的滴液口可確保熔化後的金屬溶液均勻不斷日纖細的滴 落至銅輥外周面上,以確保柔性金屬纖維製備的品質。



圖 3.3 基於磨床的關鍵配件示意圖

如圖 3.3 所示,本實施例中,該爐殼上還裝設有用於監測爐殼內真空壓力的真空壓力錶,以 此可輔助控制爐殼內抽真空的進程,確保柔性金屬纖維生產中不受金屬氧化的影響。該爐殼 內的底側壁的上側還可設置有廢料託盤,以此便於對柔性金屬纖維廢料的收集與清理。而該 密封爐門上還可具有觀察窗,以此便於操作人員對柔性金屬纖維製備進程的監測。

綜上所述,本柔性金屬纖維製備設備是在磨床閒置時,僅對磨床的電機輸出端以及甩絲機的 銅輥裝置的驅動端裝設固定 SPZ 帶輪,並通過於磨床的 SPZ 帶輪及甩絲機的 SPZ 帶輪上共 同套設環狀 SPZ 三角帶,就能使磨床的電機輸出端對銅輥裝置的驅動端進行旋轉力的傳動, 以此不僅可節省為甩絲機配設專用的電機而帶來的成本的增加,更能夠通過上述小範圍的改 造而提高設備間的相容性與互補性,從而提升設備的利用率。

在實驗過程中,操作人員把金屬顆粒狀樣本被置入特製圓柱形玻璃坩堝中,玻璃坩堝底部帶 一直徑 0.5mm 的圓孔。把樣本連坩堝置入設備並固定在真空腔體裡,於銅輥上方和發熱線 正中位置,坩堝上端連接氬氣管,在噴出時才使用。啟動連接發熱線圈和銅輥的水冷設備, 操作過程如圖 3.4 所示。



圖 3.4 金屬顆粒放置後的狀態示意圖

多孔金屬通用生產技術 POROUS METAL UNIVERSAL FABRICATION TECHNOLOGY

為真空腔體抽真空後填充氫氣,並為緩衝罐注入氫氣,使緩衝罐之氣壓大於真空腔體。啟動 銅輥使之沿水準軸旋轉,並啟動發熱線圈,以感應發熱方式熔化坩堝內樣品。待樣品完全熔 化後,打開緩衝罐連接坩堝上端的氣路並快速關閉,以在坩堝內產生從上往下壓力,推出熔 化態樣品到銅輥上,快速冷卻並甩出成絲,其甩絲過程如圖 3.5 所示。



圖 3.5 金屬甩絲過程示意圖

因此,通過製備柔性金屬纖維,再將柔性金屬纖維進行燒結而製備多孔金屬泡沫的工藝,可 逐步代替利用金屬氫化物分解的金屬泡沫製備工藝,以此不僅可避免使用金屬氫化物而提高 生產安全性,而且可提供鋁、銅、不鏽鋼等多種金屬材料選擇使用,而豐富多孔金屬泡沫結 構的類型並使多孔金屬泡沫結構具備不同的特性。

3.1.1.CME 其他配套設備介紹

由我局開發的真空甩帶機,可以實現金屬融化後快速甩絲成型以製備不同直徑和長度的金屬纖維絲,但是針對不同的金屬顆粒,因為其熔點不同,需要採用不同的坩 堝進行盛放。

石英坩堝

石英坩堝外觀呈透明裝,非常方便觀察在融化過程中金屬的熔融進度,以有利於操 作人員進行直接觀察。但是石英坩堝僅適用於鋁、鋅、銅及其合金的熔融處理。熔 點更高的不鏽鋼等金屬材料則應避免使用石英坩堝。



圖 3.6 石英坩堝

氮化硼坩堝

氮化硼坩堝雖然整體呈現不透明的乳白色,但是該材料的軟化溫度點遠高於石英坩 堝。因此,氮化硼坩堝適用於熔融不鏽鋼等高熔點金屬,並可以避免因高溫導致的 坩堝變形損壞等現象發生。



圖 3.7 氮化硼坩堝

磨床

為節省 CME 整體設備的經費投入,我們採用將現有磨床進行改裝,即拆除磨床輸 出軸上的砂輪和緊固件,更換為簡單的 SPZ 帶輪及其緊固配件。經過改裝後,就可 以將磨床的輸出軸動力傳遞到甩帶機中,以節省甩帶機整體製造成本。該改造結構 的示意如圖 3.8 所示。



圖 3.8a 及 3.8b 磨床改裝結構示意圖

3.2. 纖維提取工藝

實驗開始前,先將試樣用砂紙去除表面氧化皮後用無水乙醇進行超聲清洗,吹幹備用。用 酒精清潔腔體內部及儀器內部後,將乾燥的鋁合金塊體放入石英試管中,試管下端設有孔 徑為 1mm 的小孔。將試管固定於真空甩帶機腔體內所設裝置中,使試管底部與銅質 飛輪 保持 2mm 的距離。銅飛輪的直徑為 230mm,飛輪外緣線速度為 40m/s,預先已設定好馬 達頻率為 107Hz(對應銅輪轉速為 40m/s)。將甩帶機腔體抽真空後,把鋁合金塊體加熱 至熔融狀態(720±10°C),然後充入 Ar 氣施加氣壓,利用腔體及小罐氣壓差(氣壓差為 0.02MPa)來甩出熔融金屬液。

關於如何具體獲得不同尺寸的純銅和不鏽鋼纖維,包括寬度和厚度的可控性,我們進行了大 量實驗,結果表明控制銅輥轉速是最有效控制金屬纖維尺寸的有效方法。具體實驗結果和參 數設備如下所示。

3.2.1. 純銅

關於金屬纖維的提取參數,我們拿純銅作為案例,採取改變銅輥的轉速,可以獲得如 下纖維尺寸。通過數據對比可知,隨著轉速增加,金屬纖維的寬度和厚度逐漸降低。

轉速 (rpm)	純銅	寬度 (mm)	厚度 (mm)
	截面	1487.9	441.0
1000	外觀	1027.3	
1000		3034.4	
	平均值	1849.9	441.0
	截面	1043.7	209.9
2000		1101.9	190.9
2000	外觀	895.8	65.7
	平均值	1013.8	200.4
	截面	1170.8	49.5
3000	外觀	793.8	45.8
	平均值	982.3	47.7

表 3.1 純銅纖維尺寸與銅輥轉速關係

3.2.2. 不鏽鋼 304

對於不鏽鋼纖維的製備過程中,我們也同樣採取改變銅輥轉速的直接和有效的操作方法,獲得了類似的規律,即隨著轉速的增加,銅纖維的寬度和厚度逐漸降低。

轉速 (rpm)	不鏽鋼 304	第一批		第二	二批
		寬度 (mm)	厚度 (mm)	寬度 (mm)	厚度 (mm)
	截面	2402.2	49.9	715.5	82.9
		2640.0	26.5	872.4	25.2
1000	外觀	2660.0	29.2	845.0	27.5
1000		2820.0			
		2780.0			
	平均值	2660.4	35.2	811.0	45.2
	おあ	1246.6	24.3	996.7	32.9
	能阻	1213.0	25.5		
	外觀	1540.0	8.7	1662.3	14.9
2000		1520.0	15.6	1508.1	19.9
		1480.0			
		1360.0			
	平均值	1393.3	24.9	1389.0	32.9
	截面	1471.1	27.5	1535.8	29.7
		1150.0	5.8	1761.1	7.5
	/ / 1	1190.0	6.9	2040.5	9.6
3000	外觀	1280.0			
		1260.0			
	平均值	1270.2	27.5	1779.1	29.7

表 3.2 不鏽鋼 304 纖維尺寸與銅輥轉速關係

3.3. 纖維成形模具

為實現金屬纖維成功燒結的前提下,具有可控的穩定形狀,則必須要有模具進行定型。關於 模具的選擇,我們採用了鋁合金、石墨和剛玉三種材質的模具,分別針對纖維定型和燒結使 用。

鋁合金模具:材料機械下壓過程,靠鋁合金模具內腔來控制壓制後的金屬纖維形狀。



圖 3.9 鋁合金模具

石墨 / 剛玉模具:金屬纖維在壓制成型後,需要對金屬纖維進行燒結以提升纖維多孔金屬的 完整性和強度。但是鋁合金的熔點一般在 600~800°C範圍內,而不鏽鋼和純銅的燒結溫度 均在 800°C以上。因此,對於金屬纖維的燒結過程,需要採用石墨或者剛玉模具。





圖 3.10(a) 石墨和 (b) 剛玉模具

3.4. 纖維成形操作

以下數字為製作 40mm 長 x 6mm 闊 x 45mm 高的模具時用。 壓製時的參數均以此為準。倘日後要再行調整參數,以此重新推導即可。

- 1. 在每個 40mm 長 6mm 寬的模具裡,纖維淨體積為 0.8cm³。
- 2. 重量視乎纖維材料密度,從體積換算所得。
- 3. 下壓率為在 45mm 高的模具裡下壓時,行進距離的比率。
- 4. 樣品厚度和下壓率的關係為: 45*(1-下壓率)=厚度。

由此,在每個 40mm 長 6mm 寛 45mm 高的模具裡,纖維淨重如下:

表 3.3 金屬材料

材料	密度 (g/mm³)	重量 (g)
純銅	8.96	7.2
304 不鏽鋼	8.0	6.4

3.5. 燒結設備

燒結爐中央處為一根橫放著的石英管,透明的石英管可方便操作人員在裝入樣品後觀測樣品 狀態。石英管左右末端均連接氣密封蓋,左側的封蓋帶一個真空閥,連接真空計和氫氣供 應,右側的封蓋連接兩個真空閥,分別連接著真空泵和大氣。

金屬纖維的燒結需要在有惰性氣體保護的環境下高溫燒結,以融化纖維的接觸面,讓纖維能夠成為連續的多孔纖維結構。因此本項目採用了真空管式燒結爐。該設備可以在氫氣環境下 最高加熱到 1200°C,滿足現有不鏽鋼和純銅纖維的燒結溫度需求。



圖 3.11 真空管式燒結爐

3.5.1. 燒結爐設備參數

關於管式爐的參數如下: 最高工作溫度:1100℃(<0.5小時)連續工作溫度:1000℃ • 建議加熱速率:≦10℃/min

- 加熱區長度:300mm 加熱元件:摻鉬鐵鉻鋁合金
- 電壓: AC 220V 50Hz 功率: 3KW
- 爐蓋關閉尺寸:440mm(長)×440mm(寬)×460mm(高)
- 帶法蘭支撐(每個260mm),總長:960mm(長)×440mm(寬)×460mm(高)

- 爐蓋打開尺寸:440mm(長)×440mm(寬)×700mm(高)
- 帶法蘭支撐(每個260mm),總長:960mm(長)×650mm(寬)×700mm(高)
- 溫度控制器單位:260mm(長)×350mm(寬)×410mm(高)
- 淨重:48kg
- 配有一對不鏽鋼密封法蘭,採用矽膠密封圈密封
- 石英管口徑可選: 130mm 或 100mm
- 配有 2 個氧化鋁管堵,使用設備時應放在爐管兩端,保證恒溫區和法蘭密封性
- 右端法蘭為 KF25 介面,用於連接真空泵
- 真空度:10 2torr(採用機械泵)
- 安裝有一機械壓力錶,測量範圍為-0.1~0.15MP
- 採用 PID 方式調節溫度,可設置 30 段升降溫程式
- 帶有超溫和斷偶保護

3.5.2. 燒結爐操作

燒結過程需按照如下過程進行,以防止在燒結過程中發生氬氣洩露、樣品過燒、腔 體內氣壓過大等問題的發生。

- 1. 關閉進氣和出氣口,打開真空泵,進行抽真空;
- 2. 抽真空後,關閉真空泵氣閥和真空泵;
- 3. 打開進氣口,通氦氣,直到微微正壓;
- 4. 關閉進氣口,打開真空泵口和真空泵,並抽真空;
- 5. 迴圈一次2-4的步驟;
- 6. 打開進氣口,通氬氣,然後腔體內呈正壓;
- 7. 降低進氣口的氣流量;
- 微微打開出氣口,使得進氣口的氫氣,能夠從出氣口排除,同時保持牆體內部微微 正壓;
- 9. 開始退火工作,直到整個退火完成;
- 10. 樣品隨爐冷卻到室溫,然後關閉退火爐,取出樣品,並將設備還原到初始狀態。

3.5.3. 燒結試驗

壓製成形後的纖維塊樣品將會被放置在剛玉坩堝中,其上被另一塊剛玉坩堝或蓋板 壓著,以防止燒結期間應力釋放而變形,設置情形如下圖。



圖 3.12 纖維塊樣品與剛玉坩堝



圖 3.13 放入燒結爐前的坩堝組合

此後坩堝連樣品會放置在真空燒結爐內,真空燒結爐內亦會放入鋼珠以在燒結時吸收 多餘氧氣,設置情形如下圖。燒結爐腔體隨後會被密封並抽真空,隨即注入氬氣,並 重覆此循環四次以提高爐內氬氣純淨度。



圖 3.14 燒結前的爐內設置

此經過反覆試驗後,針對特定金屬材料的最佳燒結溫度和時間將會被記錄下來。下文 中如無特別註明,升溫及降溫時間均設置為 120 分鐘。

另外,燒結有色金屬時,亦可以選擇採用石墨坩堝來代替氧化鋁(即剛玉)坩堝。石 墨坩堝的好處是造價便宜,亦適合加工並製作出特種形狀,以燒結出特製的樣品。使 用石墨坩堝燒結後,樣品表面或會有石墨痕跡,屆時可用酒精清潔表面。 3.5.4. 燒結溫度設定

熔化,堵塞空隙。

3.5.5. 燒結樣品三維形態表徵

多孔金屬樣品燒結完成後,本實驗共分別以兩個方法得出孔隙率。一為重量測量法, 以得出密度孔隙率,二為以顯微圖像測量法,以得出截面孔隙率。測量孔隙率的方法 如下。

3.6. 密度孔隙率測量與計算

孔隙率為多孔材料中,孔隙部分的物理量佔比。因此,孔隙率的公式如下: 孔隙率 = 孔隙體積 / 多孔材料體積

並且可以引申如下:

孔隙率=1-纖維淨體積/多孔材料體積

孔隙率=1-多孔材料密度/纖維密度

即 孔隙率 = 1-(多孔材料重量)/(纖維密度)(多孔材料體積)

本文將會把以上數值稱為密度孔隙率。柔性金屬纖維的密度和構成該纖維的金屬材料的密度 相等,因此在在製作出柔性金屬纖維多孔材料後,以電子天平測量出樣品的重量,以數碼卡 尺測量出樣品的寬度,並以光學顯微鏡測量出長度乘高度方向的面積,以得出樣品體積,即 可用上述公式計算出密度孔隙率。

3.6.1. 截面孔隙率

除了以上方法,孔隙率亦可以經透過截面觀測的方式測量出孔隙率。計算過程如下:

孔隙率=1-纖維淨體積/多孔材料體積

即 孔隙率 = 1 - 纖維部分截面面積 / 多孔材料截面面積

本文將會把以上數值稱為截面孔隙率。以上面積及孔隙率數值可由附帶圖像分析功能的光學顯微鏡得出。

本實驗中,在製作出柔性金屬纖維多孔材料,並測量出樣品的密度孔隙率後,樣品會被拿去 鑲嵌並沿垂直於高度方向的平面進行切割,以 400 目、1200 目、2000 目砂紙打磨後,經 光學顯微鏡觀測樣品截面而得出截面孔隙率。

3.6.2. 比較密度孔隙率與截面孔隙率

理論上,密度孔隙率與截面孔隙率均能反映出多孔材料的孔隙率,而兩者數值上應 為一樣。但實際操作上並非如此。

- 一、截面孔隙率的密度孔隙率中,約簡並省略了沿著高度方向的變項,但由於樣品 沿著高度方向進行壓製,纖維和孔洞都被擠壓後,傾嚮往沿著長度的方向排列。
 因此多孔材料具有各向異性,而尤其當下壓量增加時,樣品的各向異性會更加 明顯。
- 二、觀測的截面通常均取樣自樣品的中央部分。
- 三、每種類的多孔材料均只取一樣品進行截面觀測,因此取得的截面孔隙率不足以 反映通常情況。
- 因此,在此情況下密度孔隙率應較能反映實際情況。

3.6.3. 孔隙率與下壓率之關係

壓製樣品時的壓下率如下列公式所示: 壓下率 = 1 - 壓製後高度 / 壓製前高度 假設燒結後的多孔材料體積不變,可得出:

壓下率 = 1 - 多孔材料體積 / 模具體積

多孔材料體積=(模具體積)(1-壓下率)

合併公式以上兩個公式,可得到下式: 孔隙率=1-(多孔材料重量)/(纖維密度)(模具體積)(1-壓下率)

因此,(1 - 孔隙率)和(1 - 壓下率)呈反比關係。本次實驗採用的模具內長 40mm, 寛 6mm,高 45mm。另外每件樣品均由體積約 0.8cm³ 的金屬纖維製作而成。



由此可得出以下圖表,且本圖表不會被金屬材料選擇所影響:

圖 3.15 下壓率及孔隙率關係參考圖

值得注意的是,當下壓率過小(如小於 50%)或過大(如大於 90%),孔隙率值的變 化均不明顯。因此若要柔性金屬纖維多孔材料有著明顯孔隙率的分別,便需製作出 有較大下壓率的樣品。

4. 多孔金屬通用生產技術參數及結果

下文將詳細說明柔性纖維半成品及多孔金屬材料成品的技術參數和結果。

4.1. 纖維半成品

4.1.1. 簡介

以本項目開發的金屬纖維製備方法製作出的金屬纖維,呈規則方整長條狀薄帶,並保 留了金屬的原來色澤。薄帶的一面為平滑啞色,另一面較為粗糙且帶有光澤。平滑啞 色的一面應為實驗中首先接觸到銅輥並且冷卻的部分,所以外觀較為平整。

由於金屬熔體和銅輥接觸時間相當短,前期流出的金屬熔體並不會流進銅輥的凹槽 上。有部分金屬絲或會在冷卻前已觸碰彼此,因此有纖維成品會稍為連結在一起, 但用雙手已可以使其重新分離成單獨纖維條狀。金屬纖維多為長10-30cm,亦有纖 維長達280cm。隨後可以通過裁剪得到長度相同的短纖維,方便後續進行壓制和 燒結工作。

304 不鏽鋼纖維的厚度和轉速的變化不大,但寬度會隨著轉速提升而變化。此外, 純銅纖維的寬度和厚度均隨著轉速提升而減少。因此通過改變通滾轉速是行之有效 的調控手段。

提取出來的純銅纖維保留了純銅本身的色澤,質地柔軟有彈性,外觀為稍不規則的 長條薄帶形狀。當使用不同的轉速提取純銅纖維時,其外觀和質地沒有大分別。

提取出來的 304 不鏽鋼纖維保留了 304 不鏽鋼本身的色澤,外觀為均一連貫的長條薄帶形狀,大部分邊緣為鋒利鋸齒狀,質地帶脆性。當使用不同的轉速提取 304 不鏽鋼纖維時,其外觀和質地會有較明顯分別。在較低轉速時,得到的成品比較粗 大和硬挺;在較高轉速時,得到的成品比較細小和柔軟。 4.1.2. 純銅纖維



圖 4.1 以 CME 方式製作出的純銅纖維

以 CME 方式製作出的純銅纖維保留了純銅本身的色澤,質地柔軟,有彈性。單根純 銅纖維長度可達 50 釐米。裝入較少原料時,產出的纖維外觀有更高一致性。經過實 驗後,純銅纖維的最佳甩絲參數如下表 4.1 和 4.2 所示:

表 4.1 純銅纖維的最佳甩絲參數

輥系每分鐘轉速 (rpm)	1000 或 2000
坩堝底部與輥系頂端垂直間距 (mm)	6
緩衝罐壓力 (MPa) (相較於大氣壓)	-0.05 或 0.04

表 4.2 純銅纖維的尺寸

轉速(rpm)	寛度(μm)	厚度(µm)
1000	1487.9	441
2000	1043.7	209.9
3000	1170.8	49.5

4.1.2.1. 形貌

每分鐘 1000、2000、3000 轉的純銅纖維形貌如下圖,轉速較慢的成品較粗糙 不規則,而轉速較快的成品則較平滑均勻。





圖 4.2 顯微鏡下的純銅纖維形貌

4.1.2.2. 截面

每分鐘 1000、2000、3000 轉的純銅纖維截面如下圖,轉速較慢的成品截面較 圓潤,中央部分呈突起狀,而轉速較快的成品截面則較為扁平。





圖 4.3 顯微鏡下的純銅纖維截面形貌

4.1.2. 不鏽鋼 304 纖維



圖 4.4 以 CME 方式製作出的 304 不鏽鋼纖維

以 CME 方式製作出的不鏽鋼纖維保留了保留不鏽鋼本身的色澤,質地堅硬帶彈性。 單根不鏽鋼纖維長度可達 280 釐米。產出的纖維外觀有相當高一致性,外觀為直條 狀,邊緣鋒利不連續。但拉伸纖維時因邊緣的裂紋生長而容易斷裂。針對不鏽鋼熔 點高的特性,後續實驗使用了高熔點的氮化硼坩堝盛載原料,取代原來的石英坩堝。 經過實驗後,不鏽鋼纖維的最佳甩絲參數如下表:

表	4.3	不鏽鋼	304	纖維的最	佳甩絲參數
---	-----	-----	-----	------	-------

輥系每分鐘轉速 (rpm)	1000 / 2000 / 3000 均可
坩堝底部與輥系頂端垂直間距 (mm)	6
緩衝罐壓力 (MPa) (相較於大氣壓)	-0.05 或 0.04

表	4.4	不鏽鋼纖維的尺寸
---	-----	----------

轉速(rpm)	寛度(μm)	厚度(µm)
1000	845	82.9
2000	1662.3	32.9
3000	1767.1	29.7

4.1.3.1. 形貌

每分鐘 1000、2000、3000 轉的不鏽鋼纖維形貌如下圖,纖維表面相對平整但 碎片化,邊緣位置尤甚。因此、合理控制甩帶工藝對優化金屬纖維外觀有重要 影響作用。





圖 4.5 顯微鏡下的不鏽鋼 304 纖維形貌

4.1.3.2. 截面

每分鐘 1000、2000、3000 轉的不鏽鋼纖維截面如下圖,截面形狀較扁平, 部分成品截面呈 V 字是由於輥系表面形狀所致。





圖 4.6 顯微鏡下的不鏽鋼 304 纖維截面形貌

4.2. 多孔金屬材料成品

以 CME 方式製作得到的金屬纖維會被收集並剪短,然後把所需重量的金屬纖維進行壓塊。 把金屬纖維壓成所需下壓率的塊體後,放入燒結爐中,以特定的參數燒結成型,以製作出柔 性金屬纖維多孔材料。

4.2.1. 純銅多孔金屬

燒結實驗採用了每分鐘 2000 和 3000 轉的純銅纖維,製作成多種不同孔隙率的塊體。

實驗過程先採用壓下率作為指標以準備樣品,燒結後再找出柔性純銅金屬纖維多孔材 料樣品的孔隙率。

Cu 密度為 8.96 g/cm³,纖維放入小模具時重量保持在 7.2g 左右。燒結後纖維有 連結,沒有氧化。純銅易變形的特性被保留下來。燒結時用盛滿鐵珠的坩堝下壓。 大部分純銅樣品燒結後均會膨脹,因此建議採用重物置於樣品之上,以抑制膨脹發 生。

4.2.1.1. 形貌觀測

下圖為在平方釐米紙上,柔性純銅金屬纖維多孔材料的形貌觀察結果。



圖 4.7 柔性純銅纖維多孔材料形貌, (a) 2000 rpm, 下壓率 (i) 10% (ii) 30% (iii) 50% (iv) 80%, 和 (b) 3000 rpm, 下壓率 (i) 22% (ii) 50% (iii) 66% (iv) 88%。

4.2.1.2. 截面觀測

下圖為在顯微鏡下的柔性純銅纖維多孔材料截面觀察結果。當纖維之間距離足 夠近以至纖維接觸到彼此時,纖維表面的原子擴散並使纖維互相交叉連結。在 樣品燒結前的成形步驟時,下壓程度愈大,燒結後的樣品纖維之間的間隔愈 小,孔隙率會變得更小。



圖 4.8 顯微鏡下的柔性純銅纖維多孔材料截面,壓下率 (a) 30% (b) 50% (c) 80%。

4.2.1.3. 孔隙率

本實驗共以兩個方法得出孔隙率。一為重量測量法,以得出密度孔隙率,二為 以顯微圖像測量法,以得出截面孔隙率。其中截面孔隙率與下壓量之間的關係 如圖 4.9 所示。





4.2.1.4. 透光

純銅纖維表面面積較小,截面形狀較圓,一般而言下壓量較小,而孔隙率較高 (大約在下壓量 50% 以下)的純銅多孔材料會透光。





圖 4.10 燈光下的純銅柔性纖維多孔材料,壓下率 (a) 30% (b) 50% (c) 80%

4.2.1.5. 導熱

以雷射閃光法對壓下率分別為 30、50、80% 的柔性純銅纖維多孔材料進行熱 傳導分析,樣品如下:

測試出的導熱性能結果如下:

樣品	孔隙率	熱擴散系數 (mm²/s)	密度	比熱擴散 (熱擴散係數/密度)
實心純銅	/	111	8.96	12.38
純銅多孔金屬#1	0.81	16.91	1.71	9.88
純銅多孔金屬#2	0.77	31.772	2.10	15.11
純銅多孔金屬#3	0.62	33.82	3.42	9.89

表 4.5 純銅多孔金屬導熱性能

由於熱擴散系數愈高,則熱能從熱端傳送到冷端的速度更快,導熱性能更高, 所以純銅多孔金屬有比實心純銅遠低的熱擴散系數,只有實心純銅的0.2到0.3 倍。但是考慮到纖維多孔銅的密度遠低於純銅,因此在相同品質下,或者是考 慮比熱擴散係數,纖維多孔銅具有更加的導熱性能,且耗材使用更少。

4.2.1.6. 散熱

以下為針對純銅多孔金屬而設計的散熱測試:

在室溫中把多孔金屬樣品放置於恆溫加熱平臺上,加熱樣品並保持恆溫。待系 統達至熱平衡後,從垂直於樣品的方向拍攝紅外線熱像照片,並記錄樣品和加 熱平臺表面溫度,每約5分鐘作一次記錄,一共收集5次數據。紅外線熱像照 片詳見附錄1。

發射率	0.40
室溫	20°C
加熱平臺溫度	120°C
測溫距離	0.5米
測溫範圍	-20至150°C
顯示模式	熱成像模式
偽彩模式	鐵紅

表 4.6 為散熱實驗的設置參數

控制組採用了和 30% 下壓率樣品相等尺寸的純銅塊。由於控制組和多孔金屬 樣品的加工方式不一樣,發射率無從稽考,故採用了恆溫加熱平臺表面材料, 即氧化後的鋁合金作為基準。因此紅外線熱像的發射率設定為 0.40。

樣品靜置在恆溫加熱平臺上,紅外線熱像儀則固定在三腳支架上,如圖 4.11。 待恆溫加熱平臺加熱至 120°C 並達到熱平衡後,每5分鐘拍一次紅外線照片以 測量溫度,結果如圖 4.12 所示。



圖 4.11 散熱實驗設置



圖 4.12 紅外線熱像照片示例,分別為純銅 (a) 板材,尺寸同 (b),(b) 下壓率 30% 多孔金屬, (c) 下壓率 50% 多孔金屬,(d) 下壓率 80% 多孔金屬。

收集好紅外線熱像照片後,再計算出溫度平均值。實驗期間恆溫加熱平臺的溫度一直處於穩定值(48-51°C之間),故以下省略不計。值得留意的是,由於發射率經過調整的關係,本實驗測量得到的溫度並非絕對值。下表為測量後得出的樣品平均溫度。

	基體溫度	樣品溫度
純銅板材	85.1°C	54.94°C
下壓率30%	94.68°C	72.41°C
下壓率50%	93.64°C	73.84°C
下壓率80%	95.28°C	71.87°C

表 4.7 測量後得出的樣品平均溫度

從上表可得出多孔金屬樣品溫度比實心純銅塊溫度高出約20°C。這顯示了多 孔金屬在一固定時間段內可把更多熱能傳遞到環境,因此實驗期間拍攝到多孔 金屬有更高的表面溫度。另外不同下壓率的樣品之間的溫度差異並不明顯。由 此可見,相對於實心材料而言,多孔金屬材料的散熱性能更優良。

4.2.2. 不鏽鋼 304 多孔金屬

燒結實驗採用了每分鐘 1000,2000 和 3000 轉的不鏽鋼纖維,製作成多種不同孔隙 率的塊體。實驗過程先採用壓下率作為指標以準備樣品,燒結後再找出柔性純銅金 屬纖維多孔材料樣品的孔隙率。

304 不鏽鋼的密度為 7.9 g/cm³,纖維放入小模具時重量保持在 6.2g 左右。燒結後纖 維有連結,沒有氧化。燒結時用盛滿鐵珠的坩堝下壓。大部分不鏽鋼樣品燒結後均 會膨脹,因此建議採用重物置於樣品之上,以抑制膨脹發生。

4.2.2.1. 形貌觀測

下圖為在直尺作為對照物的照片,展示了柔性 304 不鏽鋼金屬纖維多孔材料的 形貌觀察結果。



圖 4.13 柔性 304 不鏽鋼纖維多孔材料形貌, (a) 1000 rpm, 下壓率 (i) 50% (ii) 80%, (b) 2000 rpm, 下壓率 (i) 50% (ii) 80%, 和 (c) 3000 rpm, 下壓率 (i) 50% (ii) 80%。

4.2.2.2. 截面觀測

下圖為在顯微鏡下的柔性不鏽鋼纖維多孔材料截面觀察結果。當樣品在燒結前 的成形步驟時,下壓程度愈大,燒結後的樣品纖維之間的間隔愈小,孔隙率會 變得更小。當纖維之間距離足夠近以至纖維接觸到彼此時,纖維表面的原子擴 散並使纖維互相交叉連結。



圖 4.14 柔性 304 不鏽鋼纖維多孔材料截面圖,(a) 1000 rpm,下壓率 (i) 50% (ii) 80%,(b) 2000 rpm,下壓率 (i) 50% (ii) 80%,和 (c) 3000 rpm,下壓率 (i) 50% (ii) 80%。

4.2.2.3. 孔隙率

本實驗共以兩個方法得出孔隙率。一為重量測量法,以得出密度孔隙率,二為 以顯微圖像測量法,以得出截面孔隙率。其中截面孔隙率與下壓量之間的關係 如圖 4.15 所示。



圖 4.15 下壓量與截面孔隙率關係圖

4.2.2.4. 透光率

不鏽鋼纖維表面面積較大,截面形狀較方,導致不鏽鋼多孔纖維材料的透光性較差。







圖 4.16 燈光下的不鏽鋼柔性纖維多孔材料,壓下率 (a) 30% (b) 50% (c) 80%。

4.2.2.5. 壓縮強度

為驗證不鏽鋼纖維多孔材料在抵抗衝擊和保護性,我們將燒結收後的不鏽鋼纖 維放入鋁製圓盒,如圖 4.17 所示。



圖 4.17 待測試不鏽鋼多孔纖維材料示意圖

將下壓量為 10%, 30% 和 50% 的不鏽鋼纖維多孔材料準備齊全後,進行下壓 測試,記錄位移下壓載荷,結果如圖 4.18 所示。結果表面添加了不鏽鋼纖維 的圓盒具有更佳的耐壓耐衝擊性能。





圖 4.18 不同下壓量 (a) 0%, (b) 10%, (c) 30% 和 (d) 50% 下壓量的不鏽鋼纖維多孔材料的 抗壓性能。

5. 案例分析

5.1. 汽車外殼內側抗衝擊填料

柔性金屬纖維多孔材料具有輕量化的特點,而且亦具有一定抗壓性能。當遇上衝擊時,柔性 金屬纖維多孔材料亦可籍由形變而吸收能量,故適合作為輕量化抗衝擊填料使用。 以下是其中一種例子:



圖 5.1 柔性金屬纖維多孔材料作為汽車外殼內側的填充物

5.2. 電路板散熱元件

純銅柔性纖維多孔材料和傳統實心材料相比,與空氣有著更大的接觸面積,而且和傳統多孔 泡沫材料相比,更是有 100% 通孔的特性,因此有良好的散熱效果。

故柔性金屬纖維多孔材料亦可放在電路板上,作為散熱元件使用。



圖 5.2 在電路板上散熱用的純銅柔性纖維多孔材料

5.3. 多孔散熱材料

柔性金屬纖維多孔材料亦可作為本局的另一研究項目 - 相變熱管理材料的框架之用。該研究 項目所採用的相變熱管理材料用於包裹車用鋰電池並用作吸熱和散熱,以此達致熱平衡,並 籍此提升電池的使用壽命。其中,相變熱管理材料的金屬框架可由泡沫鋁材料改為使用柔性 金屬纖維多孔材料製作而成。



圖 5.3 柔性銅鋅合金纖維相變熱管理材料框架,預備燒結



圖 5.4 柔性銅鋅合金纖維相變熱管理材料框架,燒結前



圖 5.5 柔性銅鋅合金纖維相變熱管理材料框架,燒結後

銅鋅合金纖維於壓製成形後有較高回彈率,因此於燒結前的樣品為較低壓下率,較高 孔隙率的情況,故在本次燒結實驗後,體積下塌乃正常現象。



圖 5.6 銅鋅合金柔性纖維相變熱管理材料框架,燒結後

基於柔性金屬纖維多孔材料可製作成各種形狀的特性,製作出的樣品可直接取代相變 熱管理材料中原來的泡沫鋁框架。採用柔性金屬纖維多孔材料後,相變熱管理複合材 料可有以下優勢:

- 一、以傳統方式製作的泡沫鋁不為完全通孔,可供填入相變材料的空間較少,故整體 的熱容較低。柔性金屬纖維多孔材料則為100%通孔,可供填入相變材料的空間 較多,故整體的熱容較高。
- 二、泡沫鋁內含不少封閉的孔洞,封閉的孔洞內的氣體阻礙傳熱,柔性金屬纖維多孔 材料則沒有封閉的孔洞,故沒有內含氣體阻礙傳熱的問題。
- 三、銅的傳熱速度比鋁快,故吸熱和散熱到相變材料的效率較高。



圖 5.7 供鋰電池散熱用的相變熱管理材料中,金屬框架的比較。(上)銅鋅合金柔性纖維多 孔材料(下)泡沫鋁材料



在本刊物 / 活動內(或由項目小組成員) 表達的任何意見、研究成果、結論或建議,並不代表香港特別行政區政府、創新科技署或創新及科技基金一般支援計劃評審委員會的觀點。

Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this material/event (or by members of the project team) do not reflect the views of the Government of the Hong Kong Special Administrative Region, the Innovation and Technology Commission or the Vetting Committee of the General Support Programme of the Innovation and Technology Fund.