

論文

環保矽酸鈣板製造、使用之粉塵及重金屬暴露調查

莊坤遠¹ 李聯雄² 楊萃苑² 張家豪¹ 張益國¹

¹ 中臺科技大學環境與安全衛生工程系

² 勞動部勞動及職業安全衛生研究所

摘要

國內矽酸鈣板建材的用量逐年增加，加上近年政府相關單位鼓勵製造廠商生產資源回收再利用建材，一般事業廢棄物中的飛灰、爐渣等可作為製造環保矽酸鈣板替代材料，惟製造作業勞工可能吸入含有回收再利用原料的粉塵。雖然廢棄物必須通過環保署毒性特性溶出程序 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) 測試合格方能認定為再生材料利用，惟作業勞工呼吸吸入的粉塵、重金屬仍可能被人體吸收，不應僅依毒性特性溶出程序方法評估。本研究就使用回收再利用原料之板材製造作業、切割作業（使用電動工具）進行個人與區域作業環境測定，以了解勞工可能之粉塵及重金屬暴露的狀況。由環保矽酸鈣板廠作業現場所測得粉塵濃度，主要以裁切作業區最高，達0.269 mg/m³，全部測點之平均總粉塵濃度為0.138 mg/m³，平均可呼吸性粉塵濃度為0.096 mg/m³。在環保矽酸鈣板廠使用再生材料中，再生材料A鎳含量375 mg/kg、砷含量87.2 mg/kg；再生材料B銅含量145 mg/kg、鎳含量80.0 mg/kg，砷含量75.0 mg/kg；再生材料C鎳含量70.0 mg/kg。雖然後續於作業現場勞工重金屬暴露採樣濃度均未檢出，惟未來廠方若增加或改變再生原料使用種類及劑量時，仍應密切注意。

關鍵字：環保矽酸鈣板、粉塵、重金屬

民國 104 年 1 月 23 日投稿，民國 104 年 3 月 21 日修改，民國 104 年 7 月 8 日接受。

通訊作者：張益國，中臺科技大學環境與安全衛生工程系，40601 台中市北屯區廬子路 666 號，

電子郵件信箱：ykchang@ctust.edu.tw。

緒言

在環境資源與降低成本的雙重考量下，使用回收材料或是替代材料便成為政府環境與經濟部門推動的方向。我國推動資源回收再利用計畫相當積極，以環境保護與資源利用觀點來看相當正確，但就保護勞工健康的觀點來說，有必要針對推動上述計畫而使勞工可能面臨的有害物質暴露狀況加以評估。

依照CNS14890 A2287再生纖維水泥板國家標準[1]，經相關主管機關公告我國境內產生之一般事業廢棄物並經核准再利用之物質，製造矽酸鈣板混和材料可為爐石粉、飛灰、蛇紋石粉、矽石粉等，飛灰等廢棄物亦已使用於製造建材。綠建材之限制性物質評定，係對於有害物質含量之限制。將可能危及環境及人體之物質（指標污染物），依材料之種類擬定相關評定基準，針對非金屬材料任一部份之重金屬成份，依據行政院環境保護署「事業廢棄物毒性特性溶出程序（Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP）」[2]檢出值不超過重金屬成份TCLP檢出值標準表所列之濃度規定時，將可能成為回收材料再度使用。雖然在經濟與環保考量上鼓勵廠商回收使用再生材料，但是使用回收材料製造產品在製造過程與勞工使用過程，是否增加勞工作業時的危害？必須審慎加以考慮採取必要的規範。「再生綠建材」著重於環保永續觀點的考量，因此推動廢棄物減量(Reduce)、再利用(Reuse)及再循環(Recycle)。基於勞工安全衛生的觀點則著重在勞工作業時，是否有過多的有害物質接觸勞工或是進入勞工體內而引起勞工健康上的風險，因國內採用上述事業廢棄物毒性特性溶出程序，作為材料是否回收使用的依據，溶出測試主要著重於廢棄物是否因為掩埋處理而自然溶

出汙染環境的土壤地下水，並無法確認是否增加使用再生材料製造現場作業勞工的重金屬暴露，目前我國尚無相關研究加以測定評估，因此勞工可能因為製造過程中吸入含有成份較為雜亂回收原料的粉塵，而面臨健康上的不確定危害因素，本研究將進行資料蒐集與實地或模擬採樣，探討勞工的暴露程度，提供適當資訊以供參考。

材料與方法

1. 環保矽酸鈣板製作流程

矽酸鈣板為一種矽酸鈣水合物與纖維的複合材料，目前為主要的室內裝潢用耐燃板材，近年使用量逐年增加，在中華民國國家標準CNS13777[3]的分類規範屬於纖維強化水泥板的一種，環保矽酸鈣板則添加回收再利用之廢棄物。依環保署規定產品回收料之來源，可包括依廢棄物清理法規定所公告或許可為可再利用之廢棄物，以及依資源回收再利用法公告為資源者（飛灰、廢觸媒、廢陶土、廢沸石、廢矽砂、紙漿等）。

再生材料的使用方面主要為產生卜作嵐反應，其是指卜作嵐材料會和水泥的水化產物進行第二次的水化反應，所以又稱做水泥之二次反應。常見的卜作嵐材料有爐石、飛灰、稻殼灰、矽灰和石英粉。卜作嵐反應需藉由水泥水化所生成氫氧化鈣來進行，所以水泥各化學組成之水化作用必須先進行，產生Ca(OH)₂結晶物，再進行卜作嵐反應。卜作嵐材料視一種含矽或含矽及鋁之材料本身具很小膠結性，但是在常溫且有水情況會與氫氧化鈣產生反應，但這種反應是緩慢的。

卜作嵐反應的主要反應方程式如下：





飛灰中若含大量石灰CaO時（C級飛灰），將因CaO本身之水化作用產生更多水化生成物Ca(OH)₂，此可加速卜作嵐反應，提高早期強度，所以C級飛灰含多量CaO，不僅加速卜作嵐反應也加速水泥水化作用[4]。因此在技術上矽酸鈣板添加上述再生材料是有其功能性的，我們針對矽酸鈣板的製造過程敘述如下，製造如圖1所示：

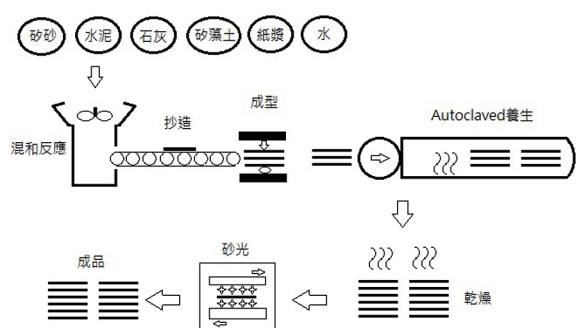


圖1 資源回收再利用矽酸鈣板製程圖

- (1) 原料分類儲放：製造矽酸鈣板的主要原料為矽砂、水泥、熟石灰，次要原料為矽藻土、天然矽酸鈣與紙漿纖維等，並可添加部分回收材料如飛灰等。
- (2) 原料混和：將原料以不同比例加水混和。
- (3) 抄造：以抄造機將混和後的原料滾壓製成一定厚度。
- (4) 成型：裁除邊料後堆疊擠壓去除多餘的水分後成型，以烘乾、風乾或是自然乾燥方式調節含水量並提供原料初凝反應時間。
- (5) 高溫高壓養生：送入高壓養生爐以160℃至180℃不等的蒸氣進行養生。
- (6) 乾燥裁切：經過養生的矽酸鈣板加以脫模分離後，送入乾燥機中以熱風乾燥，再依要求之尺寸加以裁切。
- (7) 砂光：因室內裝潢要求板材表面平整，裁

切成一定尺寸之矽酸鈣板必須使用砂磨機來研磨板面。

- (8) 印字與包裝：成品再經過篩選與印字後存放或包裝成為產品。

2. 分析作業現場勞工重金屬危害暴露之特徵及濃度

聯絡使用再生材料之纖維強化水泥板製造工廠，徵求接受現場空氣或作業勞工採樣之同意，進行現場訪視與作業環境測定。作業環境採樣測定採用行政院勞動部CLA3011砷等元素採樣分析方法[5]，於製造廠內有粉塵危害之製程區進行採樣，各製程區採集可呼吸性粉塵或總粉塵樣本2-4個，進行主要重金屬分析，樣本前處理使用微波消化器進行消化，效果與速度可較傳統硝酸混和過氯酸消化為佳，並可避免傳統消化過程中使用硝酸等加熱時，散發酸性氣體對操作人員健康之危害。分析重金屬種類包含鉛(Pb)、鎳(Ni)、鉻(Cr)、銅(Cu)、鋅(Zn)、砷(As)、鎘(Cd)、汞(Hg)等8種。

為瞭解原料之化學組成成分，本研究採用兩種方式進行基本化學組成分析，將原料研磨，適當過 0.074mm 篩網(200 mesh)之樣本利用 X 光螢光分析儀(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)分析，X光照射樣本時所發射出的次生 X 光稱為 X 光螢光，為樣品所含元素的特性X光光譜線，利用偵測此 X 光螢光之波長與強度，即可測知物質所含元素的種類與含量。另一方式為重金屬總量濃度分析，精秤0.05 g 樣本，置入微波消化所使用之鐵氟龍容器中，加入 2ml HNO₃、2 ml H₃PO₄、2 ml HBF₄，蓋上鐵氟龍蓋及減壓閥後，放入旋轉承座中加以旋緊，將旋轉承座放入微波消化器(Milestone)中進行微波消化，消化完成後待至冷卻，將消化液定量至100 ml，以原子吸收光

譜儀(AA)偵測其中重金屬等元素濃度，再由消化液體積換算含各元素之總量。

3. 比較傳統建材與環保矽酸鈣板切割作業時產生粉塵中的金屬濃度差異

為控制實驗條件，本研究於長、寬、高分別為500cm、465cm、345cm的實驗室中模擬切割作業，切割粉塵採樣期間關閉實驗室門窗，以密閉方式進行粉塵採集，實驗室的氣積在扣除橫樑尺寸後為80立方公尺。選擇市售9種矽酸鈣板進行切割測試，矽酸鈣板的厚度均為0.6cm，長、寬分別為 180 ± 3 cm與 90 ± 1.5 cm。開啟採樣幫浦後以10秒等速度切割矽酸鈣板90公分，間隔50秒後再切割90公分之方式進行，5次重複合計切割 450 ± 7.5 cm後持續採集粉塵至總採集時間15分鐘，粉塵採集高度為150cm模擬立姿作業。可呼吸性粉塵與總粉塵採集方法分別依循行政院勞動部CLA4001可呼吸性粉塵採樣分析建議方法[6]與總粉塵採樣分析建議方法CLA4002[7]，可呼吸性粉塵使用Nylon cyclone配合37mm濾紙匣採集，採氣流率為1.7L/min。粉塵樣本及重金屬樣本採集分批次進行，工廠粉塵濃度以直讀式粉塵計進行評估，重金屬粉塵樣本採集則以傳統採樣幫浦搭配旋風分離器套件及濾紙秤重等方式進行。

結果與討論

1. 環保矽酸鈣板原料組成

本研究為定量環保矽酸鈣板廠使用再生材料內所含之元素種類，利用化學總量消化處理進行全量消化，消化完畢後搭配原子吸收光譜儀AA分析測得消化液目標金屬元素濃度，結果如表1所示。研究結果顯示，環保矽酸鈣板廠使用原料中，鎳於各再生原料A含量均偏高

(375 mg/kg)，超出土壤管制標準 200 mg/kg；再生原料A、B的砷含量分別為87.2、75.0 mg/kg，略高於土壤管制標準 60 mg/kg。

2. 製造作業現場粉塵濃度測定

經溝通協調獲環保矽酸鈣板廠同意，進行作業現場粉塵採樣並做後續元素成分分析。作業現場總粉塵濃度、可呼吸性粉塵濃度偵測結果如表2所示，以裁切作業區平均總粉塵濃度較高，最高達 0.269 mg/m^3 ，其次為乾燥區最高值為 0.248 mg/m^3 ，砂光作業區最高值為 0.201 mg/m^3 ，抄造區勞工作業位置的平均總粉塵濃度 0.153 mg/m^3 也有偏高現象，全廠測點之平均總粉塵濃度為 0.138 mg/m^3 ，平均可呼吸性粉塵濃度為 0.096 mg/m^3 。室外投料口（無作業）、廠房入口、廠區外周界路旁等參考背景值則介於 $0.041 \sim 0.094 \text{ mg/m}^3$ 。

3. 作業現場勞工重金屬危害暴露之特徵及濃度

為調查分析作業現場勞工重金屬危害暴露之特徵及濃度，獲廠方同意，進行作業採樣並做後續元素成分。

採樣區選取

樣本1：抄造區（勞工作業處）

樣本2：砂光篩選區

樣本3：超厚薄整理區（噴字）

樣本4：成品倉庫區

樣本5：2F乾燥爐區（中央）

樣本6：分層進爐機台2區

樣本7：1F裁板區機具旁

樣本8：裁板區後方機具旁

樣本9：乾燥區下方一樓高壓養生爐入口

樣本10：廠房入口

分析結果茲整理如下表3。研究結果顯示，雖然環保矽酸鈣板廠使用再生材料中，再生材料A鎳含量375 mg/kg、砷含量87.2 mg/kg；再生材料B銅含量145 mg/kg、鎳含量80.0 mg/kg，砷含量75.0 mg/kg；再生材料C鎳含量70.0 mg/kg。於作業現場粉塵採樣樣品分析濃度均低於偵測極限，其原因可能為再生原料使用比例低，顯示勞工重金屬危害暴露程度尚屬妥適。惟若增加或改變再生原料使用種類及劑量時，應密切注意。

4. 環保矽酸鈣板切割作業時產生粉塵中之重金屬濃度分析

本研究所採集之9種矽酸鈣板切割時所發散之粉塵，樣本1~8為環保矽酸鈣板，樣本9為傳統矽酸鈣板（未使用再生材料）。經過重金屬分析所得結果均在偵測範圍以下，如表4所示。研究結果顯示，環保矽酸鈣板切割作業現場勞工重金屬暴露均未檢出。

表1 矽酸鈣板廠使用之再生材料重金屬元素成分組成

檢測項目單位(mg/kg)	土壤管制標準(mg/kg)	樣品編號		
		再生材料A	再生材料B	再生材料C
鎘 (Cd)	20	ND	ND	ND
鉻 (Cr)	250	ND	ND	ND
銅 (Cu)	400	ND	145	ND
鎳 (Ni)	200	375	80.0	70.0
鉛 (Pb)	2,000	ND	ND	ND
鋅 (Zn)	2,000	ND	ND	ND
砷 (As)	60	87.2	75.0	ND
汞 (Hg)	20	ND	ND	ND

ND 值表示低於偵測極限；As, Hg委託南台灣環境科技公司檢驗
註：依矽酸鈣板廠要求，添加之再生材料以A、B、C表示

表2 環保矽酸鈣板廠作業現場粉塵濃度分布

位置	粉塵濃度(mg/m ³)		
	平均總粉塵	平均可呼吸性粉塵	
背景	廠區外周界路旁	0.94	0.73
	廠房入口	0.048	0.045
	室外投料口（無作業）	0.041	0.039
抄造	抄造區（勞工作業處）	0.153	0.104
	抄造區（機台後方）	0.102	0.077
養生	分層進爐機台1區	0.198	0.125
	分層進爐機台2區	0.216	0.149
乾燥	乾燥區下方一樓高壓養生爐入口	0.248	0.146
	2F乾燥爐區	0.078	0.066
	2F乾燥爐區（中央）	0.227	0.141
砂光	砂光篩選區	0.201	0.124
	砂光篩選（中央）	0.142	0.093
	砂光篩選轉角處	0.104	0.078
成品裁切區	超厚薄整理區（噴字）	0.136	0.093
	超厚薄整理區	0.101	0.080
	裁板區邊界	0.113	0.088
	1F裁板區機具旁	0.189	0.118
	裁板區後方機具旁（窗戶有風吹入）	0.269	0.149
其他	成品倉庫區	0.085	0.071
	室外回收料處理區（無污汙泥、石灰）	0.086	0.083
	乳化廠房（室外）	0.081	0.078
	鍋爐房	0.127	0.101

表3 環保矽酸鈣板廠作業現場粉塵採樣後之重金屬元素成分組成

檢測項目單位(mg/kg)	樣本1	樣本2	樣本3	樣本4	樣本5
鎘 (Cd)	ND	ND	ND	ND	ND
鉻 (Cr)	ND	ND	ND	ND	ND
銅 (Cu)	ND	ND	ND	ND	ND
鎳 (Ni)	ND	ND	ND	ND	ND
鉛 (Pb)	ND	ND	ND	ND	ND
鋅 (Zn)	ND	ND	ND	ND	ND
砷 (As)	ND	ND	ND	ND	ND
汞 (Hg)	ND	ND	ND	ND	ND
	樣本6	樣本7	樣本8	樣本9	樣本10
鎘 (Cd)	ND	ND	ND	ND	ND
鉻 (Cr)	ND	ND	ND	ND	ND
銅 (Cu)	ND	ND	ND	ND	ND
鎳 (Ni)	ND	ND	ND	ND	ND
鉛 (Pb)	ND	ND	ND	ND	ND
鋅 (Zn)	ND	ND	ND	ND	ND
砷 (As)	ND	ND	ND	ND	ND
汞 (Hg)	ND	ND	ND	ND	ND

ND 值表示低於偵測極限：As 0.04 mg/kg，其餘重金屬0.02 mg/kg

表4 環保矽酸鈣板與傳統矽酸鈣板切割過程所散發粉塵濃度與重金屬分析

產牌	樣本編號	粉塵重(mg)	粉塵濃度(mg/m ³)	粒徑種類	重金屬分析包含As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn
產品一	1011-1	5.17	208.78	總粉塵	ND
	1011-2	1.76	66.63	可呼吸性粉塵	ND
	1011-3	1.65	71.07	可呼吸性粉塵	ND
	1011-4	5.19	209.59	總粉塵	ND
	1011-7	6.04	243.91	總粉塵	ND
產品二	1011-9	1.61	65.02	可呼吸性粉塵	ND
	1011-10	6.36	256.84	總粉塵	ND
	1011-12	1.65	66.63	可呼吸性粉塵	ND
產品三	1011-13	4.15	167.59	總粉塵	ND
	1011-14	1.76	71.07	可呼吸性粉塵	ND
	1011-17	4.10	165.57	總粉塵	ND
產品四	1011-18	1.65	66.63	可呼吸性粉塵	ND
	1019-7	3.04	173.07	總粉塵	ND
	1019-8	1.61	63.14	可呼吸性粉塵	ND
	1019-9	1.40	56.26	可呼吸性粉塵	ND
產品五	1019-11	3.02	171.93	總粉塵	ND
	1019-14	0.88	35.36	可呼吸性粉塵	ND
	1019-15	0.96	38.58	可呼吸性粉塵	ND
	1019-16	2.18	124.11	總粉塵	ND
產品六	1019-17	2.18	124.11	總粉塵	ND
	1019-19	3.71	211.21	總粉塵	ND
	1019-21	1.26	50.63	可呼吸性粉塵	ND
	1019-23	3.57	203.24	總粉塵	ND
產品七	1019-24	1.68	67.51	可呼吸性粉塵	ND
	1019-25	3.48	198.12	總粉塵	ND
	1019-26	0.91	36.57	可呼吸性粉塵	ND
	1019-29	3.45	196.41	總粉塵	ND
產品八	1019-30	0.87	34.96	可呼吸性粉塵	ND
	1019-31	3.66	208.36	總粉塵	ND
	1019-32	0.89	35.77	可呼吸性粉塵	ND
	1019-35	3.62	206.09	總粉塵	ND
產品九 (傳統矽酸鈣板)	1019-36	1.36	54.65	可呼吸性粉塵	ND
	1102-1	2.72	152.80	總粉塵	ND
	1102-2	1.43	55.98	可呼吸性粉塵	ND
	1102-5	3.62	199.58	總粉塵	ND
1102-6	1.29	51.30	可呼吸性粉塵	ND	

註：可呼吸性粉塵cut off值為4μm；為了採集足量粉塵以供重金屬分析用，大部分總粉塵樣本粉塵採集重量超過2mg濾紙承載值。

結論與建議

1. 環保矽酸鈣板廠作業現場所測得總粉塵濃度，主要以裁切作業區（最高達 0.269 mg/m^3 ）、乾燥區（最高達 0.248 mg/m^3 ）、砂光作業區（最高達 0.201 mg/m^3 ）、抄造區（最高達 0.153 mg/m^3 ）粉塵濃度偏高。全部測點之平均總粉塵濃度為 0.138 mg/m^3 ，平均可呼吸性粉塵濃度為 0.096 mg/m^3 。
2. 在環境資源與降低成本的雙重考量下，使用回收材料或是替代材料成為政府部門推動的方向。環保矽酸鈣板廠使用再生材料中，再生材料A鎳含量 375 mg/kg 、砷含量 87.2 mg/kg ；再生材料B銅含量 145 mg/kg 、鎳含量 80.0 mg/kg ，砷含量 75.0 mg/kg ；再生材料C鎳含量 70.0 mg/kg 。雖然後續於作業現場勞工重金屬暴露採樣濃度均未檢出，惟未來廠方若增加或改變再生原料使用種類及劑量時，仍應密切注意。
3. 試驗9種板材（8種環保矽酸鈣板及1種傳統矽酸鈣板）切割時所發散之粉塵，經重金屬分析，樣品分析濃度均低於偵測極限，顯示環保矽酸鈣板切割作業現場勞工重金屬危害暴露程度尚可，惟應注意粉塵暴露防範。

誌謝

本研究感謝勞動部勞動及職業安全衛生研究所（原勞工委員會勞工安全衛生研究所）（IOSH102-A306）經費支持，敬表謝忱。

參考文獻

- [1] 行政院經濟部標準檢驗局。中華民國國家標準CNS14890:再生纖維水泥板；2011。
- [2] 行政院環境保護署環境檢驗所。事業廢棄物毒性特性溶出程序NIEA R201.14C；2009。
- [3] 行政院經濟部標準檢驗局。中華民國國家標準CNS 13777：纖維強化水泥板；2011。
- [4] 陳鴻元：國立台灣科技大學營建工程系，混凝土品質控制期末報告；2011。
- [5] 勞動部勞動及職業安全衛生研究所。砷等元素ICP 採樣分析建議方法CLA3011；2008。
- [6] 勞動部勞動及職業安全衛生研究所。可呼吸性粉塵採樣分析建議方法CLA4001；2008。
- [7] 勞動部勞動及職業安全衛生研究所。總粉塵採樣分析建議方法CLA4002；2008。

Commentary

A Survey on Workers' Exposure to Dusts and Heavy Metals during Manufacturing and Cutting Green Mark Certificated Calcium Silicate Boards

Kuen-Yuan Chuang¹ Lien-Hsiung Lee² Tsu-Yuan Yang²
Chia-Hau Chang¹ Yi-Kuo Chang¹

¹ Department of Safety Health and Environmental Engineering, Central Taiwan University of Science and Technology

² Institute of Labor, Occupational Safety and Health, Ministry of Labor

Abstract

The need of the calcium silicate board (reinforced with selected fibers and fillers, mainly made from cement, quartz sand and reinforced fiber) have been increased year by year. With government encourage manufacturers to use recycle materials for producing building materials in recent years, the recycle industrial by-product such as fly ash and slag can be used as alternative materials to the boards manufacturing. Labors in manufacturing workplaces and decorating the construction site for boards cutting operation may inhalant dust which containing recycled raw materials. Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) is conducted by Taiwan Environmental Protection Administration (TEPA) to exam these heavy metal-containing recycle materials from waste. It is necessary for wastes to pass TCLP tests before reusing. However, worker's exposure from heavy metals is considered as dust inhalation not TCLP tests. The survey on workers' exposure to dusts and heavy metals during boards manufacturing and cutting work (using electric circular saw) is conducted by onsite dust sampling.

Results from dusts exposure sampling showed that the average total dust concentration in the factory is 0.138 mg/m^3 , the average respirable dust concentration is 0.096 mg/m^3 . The maximum total dust concentration is observed in cutting area as 0.269 mg/m^3 . Furthermore, results from heavy metal analyses revealed that the recycled material A containing Ni 375 mg/kg, As 87.2 mg/kg; the

Accepted 8 July, 2015

Correspondence to: Yi-Kuo Chang, Department of Safety Health and Environmental Engineering, Central Taiwan University of Science and Technology, No. 666, Buzih Road, Beitun District, Taichung City 40601, Taiwan (R.O.C), Email address: ykchang@ctust.edu.tw

recycled material B containing Cu 145 mg/kg, Ni 80.0 mg/kg, As 75.0 mg/kg; the recycled material B containing Ni 70.0 mg/kg. Nevertheless, the results on workers' exposure to heavy metals during boards manufacturing and cutting work showed all the heavy metal concentration is below detection limit. It is worth notice to pay attention on recycled materials usage increase and change.

Keywords: Green mark certificated calcium silicate boards, Dust, Heavy metal