



瀝青填築開拓了地下運料的效率之路

CVRD Inco 在加拿大的一個地下礦場使用冷凝瀝青鋪路技術，很快地為卡車車隊建成了平坦、耐用的車行道，而這項技術通常多用於建設高速公路。這種修建地下路的創新方法可將生產中斷降至最低，不但能解決了水窪問題，且修成了更平坦的路面，提高了卡車的生產力。

位於安大略省的薩德伯裡盆地西北部邊區的 Coleman McCreedy East 礦場的卡車運料坡道是將鎳運出礦場的主要通道。坡道從深度 1,000 公尺到 1,700 公尺水平面（3,370 英尺到 5,700 英尺水平面）延伸大約 6 公里（3.7 英里）的距離，卡車運料系統是提升井的有效延伸。1,000 公尺（3,370 英尺）水平面以下深度的所有生產運料都是由卡車完成。1000 公尺（3,370 英尺）水平面則由傳送帶將礦物傳送到升降機，再運至地面。

從 1997 年以來，採礦工人一直使用瀝青乳液鋪設坡道路面，以使路面平坦、堅硬且不塵土飛揚。這種建設方法雖然建成了品質合格的道路，但其平坦度和耐用度並無法達到期望值。於是，工程人員對現有的坡道設計和建設方法進行過完善的調查。最終，技術人員確定使用瀝青乳液的全深式填築方法（FDR）可以滿足地下鋪設道路要求。

道路建設的衍變

礦場的設計要求必須用卡車運料。目前，卡車透過公稱角度為 14% 的坡道從兩個礦體到起重機的距離範圍大約在 2.5 公里（1.5 英里）和接近 6 公里之間（3.7 英里）。日生產能力平均為 3,200 到 3,600 公噸（3,500 到 4,000 短噸）。

道路原始設計是在底基層和基層使用壓碎的廢石。這些層分別為 25 公分（10 英寸）和 20 公分（8 英寸）厚，分別使用 -7.5 公分（-3 英寸）和 -3.2 公分（-1.25 英寸）的材料。46 公分（18 英寸）厚的路床可依需要降低坡度，以提供平坦的行駛路面。

路面塵土飛揚很快變成了一個嚴重的問題。道路維護人員進行過各種抑塵產品實驗，包括用鈣和鎂氯化物以及木質素。所有的產品都能有一定程度的抑塵作用，但是也容易造成路滑，形成安全隱患。

該礦場在 1996 年研究使用瀝青解決塵土問題。瀝青雖然在常溫下為半固體，且在這種狀態下不容易與碎石混合，但是透過加熱、加入石油溶解劑或在水中乳化即可輕易液化。邏輯上，在地下環境熱凝瀝青行不通，同樣地下環境也排除了使用大量石油溶解劑的方法。

於是選擇產生瀝青乳液來液化瀝青來鋪設地下路。此程序涉及將瀝青磨成大小為 1 至 10 微米的微粒，並將他們撒在水中。還要添加少量的化學乳化劑，使瀝青浮滴保持穩定的懸浮狀態。最終的瀝青乳液包含大約 60% 到 65% 的瀝青，和 35% 到 40% 的水。

瀝青微粒在乳液與路表的碎石混合之前，在連續水相下一直為懸浮狀態。混合後，水和瀝青分離。使用壓實設備將瀝青與碎石顆粒結合，而水則溢出地表。一旦水完全蒸發後，就可以說是固化了。最終建成了堅硬穩定不生塵土的地表。

最初採用的方法是在坡道上用瀝青乳液，使基層碎石與瀝青滲透並混凝，使其總深度達到 38 毫米（1.5 英寸）。但是，薄瀝青層很容易在卡車壓過崩出的石頭和礦物並將其壓進表層而形成坑洞。然後，這些小洞很容易造成更大的洞。除了坑洞問題，坡道也不如需要的那樣平坦。鋪設過程對坡度的要求接近完美，這非常難實現。

路床設計

專案組的領導人 Andy Charsley 表示：「礦場經理認識到，要達到礦場生產目標，必須有平坦的道路。所以，我們調查了不同的路床設計，包括開發建設新坡道路段的方法和改善現有坡道的方法。」

所有建議都受到可用資金的限制，選擇的方法必須能將生產運料中斷情形降至最低。

透過對道路層設計和路面備選解決方案的仔細調查，發現可以減少碎石基層厚度並改變材料大小。

Charsley 表示：「檢查小組得出結論，透過使用最新的道路建設技術和瀝青鋪路設計方法，在現有的鋪路和新的工程中可以改善瀝青穩定層。」

針對軟土路基路面，原始的路床設計一般要求地層內的碎石材料為 46 公分（18 英寸）厚。但是，如果遇到地下硬岩礦場，路基就變成承重時不會明顯偏斜的基岩。因此，礦場使用碎石做為地基的目的就是為壓出平坦路面以及必要時用於處理排水。該層的厚度必須至少可以填平爆破岩表面的起伏，並在與瀝青乳液混凝時形成鋪路所需的厚度。

岩石的起伏大約在需要平整度上下 15 公分（6 英寸）左右。計劃鋪路厚度為 10 公分（4 英寸）。基於實用目的的考量，設計組選擇了 30 公分（12 英寸）厚的微粒層，與先前的設計相比地基層厚度大約減少了 33%。

Charsley 表示：「我們贊同均質單層碎石效果比較好的觀點，。因為只需一次就可以完成壓路，從而避免了兩層鋪路系統，進一步減少了施工時間。」

設計組還發現碎石的大小必須在能緊湊排列的範圍內，這樣材料才能壓實，且在與瀝青混合時非常穩固。選擇的壓料為安大略省的一個道路標準顆粒 A。

用礦場地面的廢礦石碾壓成地基材料。因為廢石非常堅硬且耐磨損，因此成為路床碎石的理想之選。另外，這些岩石是百分之百的碎石，並且有棱有角，此可提升最終產品的高穩固性。穩固性被定義為在負荷下抵禦側邊變形的能力。

設計組還考慮到了坡道外形。不管道路有多少轉彎，不能有外傾明顯高於內傾的轉彎，這一點非常重要，因為這樣可以減少輪胎側向力、減少卡車底架受力並減少溢出量。當卡車以 16 公里/小時（10 英里/小時）的速度行使時，最小彎路半徑稍高於 30 米（100 英尺），7% 的傾斜轉彎對輪胎產生的淨側向力為 0。設計組選擇了折衷辦法，要求在傾斜度為百分之四的測斜坡上外側稍高轉彎的最小半徑為 30 公尺。

瀝青穩定和再生

在礦場使用瀝青乳液已經演變成一個噴灑和耙機的過程。液壓耙機將瀝青和碎石混凝，凝固厚度為 38 毫米（1.5 英寸）。設計調查發現，瀝青鋪路厚度小於 75 毫米（3 英寸）將更容易產生坑槽。為了讓鋪路更實用更具耐力，設計小組選擇了 100 毫米（4 英寸）的厚度。新的鋪路深度也可以承受穿透 50 毫米（2 英寸）地表的意外穿孔。較厚的地層可避免穿孔完全穿過結構體，並可使用冷補混凝方式進行修理。

設計小組對道路進行過全面的調查，採集資料計算國際平整度指數 (IRI)，來評估地表的平坦程度。Charsley 表示：「我們發現，雖然斜坡很符合井下標準，但是與適用的路表平整度標準比較，其行駛狀況並不理想。斜坡的 IRI 範圍在 4 到 14 之間，平均值為 8。」

鋪設 100 毫米厚度 (4 英寸厚度) 路，要求耐用且非常平坦，為達到這一目標，設計組負責找到一種或多種方法以平整現有道路，並修築新路。

Charsley 表示：「我們發現了全深式填築這一鋪路方法。與其他道路改善備選方法相比，瀝青再生和填築可重新使用現有的瀝青和微粒材料，並顯著地降低成本。」原位重建也可以盡可能降低對運料的中斷。」

此過程涉及粉碎現有全部深度的鋪路的一部分下面的材料。這些材料將透過穩定添加劑進行攪拌和混合以形成均一的材料。在新的顆粒材料上使用該技術的過程被稱為地基穩定。唯一的不同之處在於進行混凝所添加的瀝青乳液的數量。瀝青再生一般要求瀝青乳液佔重量的 1% 到 4%，新工程則為 6%。

鋪設

隨著冷計劃設備應用範圍的擴大，原位瀝青再生越來越受歡迎。可替代的碳化鎢碾磨工具使機器的生產能力更強。此專案中使用了 Caterpillar RM-250C 堆取料機。

堆取料機在一個 100 毫米 (4 英寸) 深的單通道裡進行研磨和混合。同時混合瀝青乳液，產生瀝青和碎石的均勻混合物。按每平方公尺 9 公升的比例 (每 1.2 平方碼 2 加侖) 添加瀝青乳液，按重量則為 3.8%。如果是新工程，則流程相同，但是瀝青乳液添加的比例為每平方公尺 14 到 15 公升 (每 1.2 平方碼 3.7 到 4 加侖)，添加比例按重量計算為 6%。

一旦混凝完成，有一個鼓型震動壓路機完成最初的碾壓。壓路機的操作重量為 6,550 公斤 (14,440 磅)。最初碾壓後，改裝的地下 Caterpillar 120G 自動平路機會刮平材料壓出指定的剖面。鑒於鋪設的路面預期要使用 5 到 10 年，再生路面的平坦度非常重要。

壓路後，將完成對再生層的最後碾壓。Caterpillar CB-335D 的鋼鼓和軟胎壓路滾筒相結合可以讓完成的路表非常平坦，並起到碾壓鋪路層最上層的效果。壓路機的操作重量為 3,620 公斤 (7,980 磅)。

最後清掃再生地層並封路以避免鬆動。CSS-1H 瀝青乳液的噴灑應用適用於按每平方公尺 0.45 到 0.70 公升的比例 (每 1.2 平方碼 1 到 1½ 品脫)，並按 1:5 加水稀釋。再生操作後一至三天清掃並當成霧封層。

建築工作隊通常每天能完成 200 到 305 公尺 (650 到 1000 英尺) 長，6 公尺 (20 英尺) 寬道路的斜坡重建。工作隊在一天 10 小時內最多一次可完成 535 公尺 (1,750 英尺)。

優點

Charsley 表示：「瀝青再生重新使用現有的全部路床碎石和瀝青，是一個非常經濟的解決方案。路床的總深度減少了三分之一，此可進一步降低成本。另外一個優點是，壓平後可以馬上在穩固的路面上行駛，原位建設將對工程的中斷減至最低。」

外側偏高的彎道、瀝青平坦度的改善，更耐用的道路還可降低卡車和道路的維護。礦場已將道路維護人員從五人減到四人。

Charsley 說：「現在 McCreedy East Mine 的運料斜坡在最大化卡車的工作能力和可用性的同時，具備了滿足未來生產目標需要的能力。」

瀝青混凝設計

當設計組發現瀝青再生是斜坡重建的最佳替代方法時，就需要一個瀝青工程混凝設計。瀝青設計實驗室使用從斜坡中採集的樣本，並將該材料的部分與五種不同的瀝青乳液量混合以決定出最佳混合方法。

- 從按重量的 2.5 % 到 4.5%，每次增加 0.5% 添入 CSS-1H 乳液。五種混合劑的穩固程度都非常高。
- 最後建議採用按 3.8% 加入 CSS-1H。這一指標顯示將乳液與固化劑混合時，陽離子活動緩慢。瀝青中的陽離子電極可以吸引碎石，碎石自然具有陰離子。
- 產生的堅硬層中將含有 3.5% 到 4% 的殘餘瀝青物質。
- 新的工地也將採用相似的混凝設計。6% 的乳液比率中包含 3.6% 的殘餘瀝青物質。

遵守工程混凝設計是確保再生層耐用性的關鍵。品質控制的主要方面是監控瀝青添加的比例、混合的均質性以及穩定和壓實的強度。

本文大部分內容來自為加拿大 Sudbury 召開的 2005 年加拿大採礦協會 (CIM) 會議準備的論文。論文作者為 M. A. Sc., P. Eng. 的 Andrew D. Charsley; CVRD Inco Limited 的 Garson Mine; 安大略省的 Copper Cliff; P. Eng 的 John J. Emery 博士; 多倫多 Geotechnical Engineering Limited 總裁 John Emery; CVRD Inco Limited 安大略省運營中心運營領班 Gerry J. Prevost。