

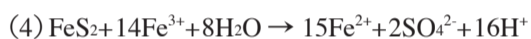
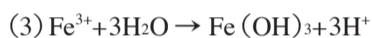
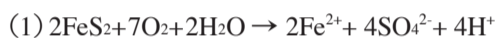
金瓜石黃金瀑布：看穿美景幕後的嘆息

文·圖—陳君榮、黃克峻

自然現象還是人為汙染？ 一個啟動即無法停止的連鎖反應

陰陽海與黃金瀑布是金瓜石相當知名的景觀，上游的水源－黃金瀑布更是遊客們佇足拍照的景點，然而在20年前它帶來的視覺震撼遠小於現今的模樣(圖1、2)。有人說它是被汙染了，也有人說它是一種天然現象，但在礦山已經結束30年後的今日，究竟為何黃金瀑布還會有大量黃褐色沉澱產生且日益擴大呢？其主因在於黃金瀑布的水源即為世界各地金屬礦山常見的「酸性礦山排水」(acid mine drainage, 簡稱AMD), 是一種採礦產生的環境現象, 且成為環境問題。

酸性礦山排水成因是礦山及廢礦堆中的金屬礦物暴露於大氣或排水中產生氧化時所引發的一連串化學反應。礦山中最為常見的黃鐵礦(硫化鐵, 圖3)受氧化時會產生二價鐵與硫酸根與氫離子(反應式1)釋放進入排水中, 即是造成酸性礦山排水呈酸性的主因。反應式:



透過上述氧化作用所率先釋放的二價鐵, 隨著泉水曝氣、曝露至地表, 含氧量增加, 或透過微生物鐵氧化菌的作用, 快速氧化成三價鐵(反應式2), 並於水中過飽和產生晶體極小的黃色「含鐵礦物」



圖1 金瓜石黃金瀑布為典型的酸性礦山排水, 水體pH值終年維持在3附近, 富含硫酸根、鐵、銅、鋅及毒性強之砷, 其中鐵離子及硫酸根離子在河床表面形成大量黃褐色沉澱。(拍攝日期: 105年10月6日)



圖2 黃金瀑布發展初期, 當時植被受酸性礦山排水影響範圍較小。(拍攝日期: 96年12月26日)

及氫離子(反應式3), 如此黃色沉澱物的形成也是AMD重要的特徵。而水體中增加的三價鐵亦能再次參與礦石中硫化鐵礦物的分解, 產生更多二價鐵及氫離子(反應式4), 形成一個自我驅動的連鎖反應。因此只要礦山、廢礦中硫化鐵礦物尚未消耗殆盡, 上述反應就會造成AMD源源不斷且持續變酸。這也是黃金瀑布AMD之酸鹼值可全年維持於3左右的原因。另外, 陡峻的地形使得黃金瀑布AMD飛濺而迅速溶氧, 其二價鐵氧化速率可能是已知AMD研究中最為快速的。

黃金瀑布源頭上方即為當年開礦時期堆放之廢礦堆(圖1), 其中除含有黃鐵礦等硫化鐵礦物外, 亦含有其他如閃鋅礦、方鉛礦及硫砷銅礦(圖3)等金屬礦, 這些礦物具有與黃鐵礦相似的氧化機制, 使得銅、鋅、鉛、砷等有害物質釋放至AMD中。黃金瀑布的含砷濃度高達300ppb以上, 遠超過飲用標準10ppb上限, 因此周圍立有標語警告遊客切勿好奇飲用。

有害還是無害? Yellow Boy

酸性礦山排水中, 黃色沉澱物中所含的礦物晶體粒徑非常小且結晶度差, 由於鑑定不易, 過去對於其組成不甚清楚, 因此國外學者常以綽號黃色小子(Yellow Boy)來稱呼。國內過去則多以非晶質的氧化鐵或氫氧化鐵來統稱。然而隨著礦物分析技術的進步, 沉澱物中含鐵的礦物逐一被鑑定出來, 且其種類隨酸鹼值之不同而有差異, 例如當水體酸鹼值小於2時, 常形成黃鉀鐵礬; 當酸鹼值介於2.8至5之間, 主要為四方硫酸鐵礦(schwertmannite); 當酸鹼值為6以上時, 則形成水鐵礦。黃金瀑布之酸鹼值在3附近, 因此四方硫酸鐵礦是其最主要的沉澱相。此礦物在快速過飽和情況下形成纖維狀奈米晶束, 並以放射狀排列



圖3 黃金瀑布河床上所採集礦石可見晶形良好的黃鐵礦與黑色的硫砷銅礦, 這些硫化礦物的風化是造成酸性礦山排水的主因。

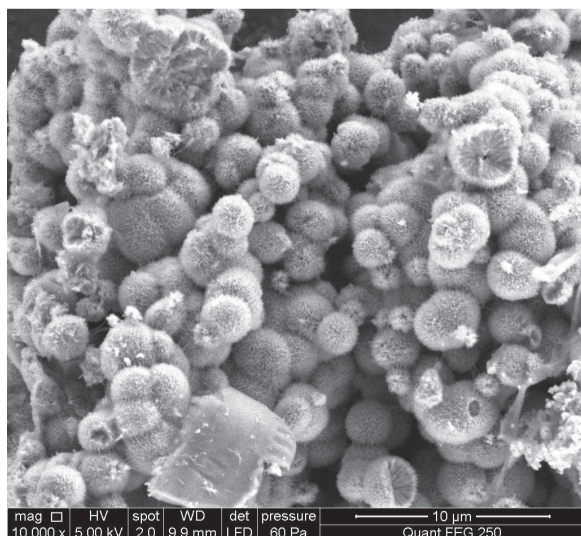


圖4 河床表面黃色沉澱物主要礦物相為四方硫酸鐵礦(schwertmannite), 在電子顯微鏡下觀察可見其尺寸約數微米, 並具有特殊刺蝟狀之外形。

聚集成數微米大如刺蝟狀形貌的圓球體(圖4)。其外形具有相當大的比表面積, 對砷和金屬具高度吸收或吸附能力。因此四方硫酸鐵礦的大量沉澱有助於緩和或降低酸性礦山排水對環境水質的影響。

奇特的微生物生態系: 生物膜

在黃金瀑布頂層可觀察到黃色沉澱物多附著於黏液般絲狀或長條狀生物膜表面, 在廢礦堆底部AMD滲出孔周圍亦可見大量藻類以長條狀或光滑球狀聚集生長。目前對於AMD環境中這種絲狀結構絮凝體(streamer)(圖5)或生物膜的研究仍尚未完全, 只知其中可能包含多種的微生物如細菌、古菌、真菌、原生動物和藻類。這些微生物各自有獨特的習性(好氧或厭氧)、代謝功能及營養源(光能或化學能), 使得不同微生物能在生物膜內互相依賴、互助共生, 並且對於AMD環境中鐵與硫的氧化還原反應, 及碳與氮的固定和循環上扮演著關鍵角色。此外, 這些微生物也發展出多種生存機制來適應AMD的高金屬濃度, 例如有些嗜酸細菌可透過沉澱、氧化及還原等反應將金屬轉化為毒性較小的型態, 或者將金屬傳輸到細胞質或細胞外的方式來降低傷害。某些真菌則具有將重金屬吸收進入其細胞或吸附在其細胞外多醣體上的能力, 以降低其周遭環境重金屬的濃度, 並有利於絮凝體中其他微生物的生長。藉由對於AMD環境中微生物特性的瞭解, 可使微生物採礦及AMD微生物整治技術具有相當程度的發展潛力。

難以回復的永久性傷害

由於酸性礦山排水是礦業活動中的主要污染來源, 大部分先進國家對於礦場所排放之廢水皆有設定特定之水質標準來進行管制。因此近年來也逐漸發展出專門機構來協助礦業公司處理酸性礦山排水污染問題, 例如INAP (International Network for Acid Prevention)組織。然而還有許多被廢棄已久或未妥善管理之礦場, 造成酸性礦山排水之災害頻傳。2015年巴西米納斯吉拉斯州(Minas Gerais)兩座儲存鐵礦廢水的水壩潰堤, 共約6200萬立方米的廢水及大量的有毒廢礦沖毀了下游約600人的村莊, 並造成19人死亡, 使得礦場需支付62億美元的罰金來進行賠償與後續整治工作。黃金瀑布酸性礦山排水因位置與地形關係, 僅影響濂洞溪下游數百公尺的流域後即流入海被中和稀釋, 對附近水源、生態及居民的影響範圍較國外案例相對侷限, 尚未有嚴重污染事件及災害發生, 實屬幸運。然而當遊客們到金瓜石欣賞酸性礦山排水所造就的黃金瀑布奇景的同時, 應進一步體悟到酸性礦山排水污染環境所帶來的有形及無形的傷害, 可能遠大於礦業發展所獲得的利益。



圖5 黃金瀑布河床沉澱物下所發育的藍綠色生物膜, 其中可能含有鐵氧化菌, 在四方硫酸鐵礦形成機制中扮演重要關鍵。