

軌道列車於隧道中運行之空氣動力學基礎

機械廠 尹春和

當列車時速達 300 公里，相當於飛機低速飛行的速度，而與飛機相比，高速列車還要面對：(1)地面氣流的擾動。(2)兩車交會時的車體振盪。(3)車體通過隧道時，氣流的劇烈變化。

位於中國青島的中車四方股份公司副總工程師丁參參，同時也是中國高速列車設計師，他認為在整個設計過程中，首要解決就是空氣動力學的問題，高速列車時速達到 300 公里的時候，列車的阻力，百分之九十以上，都是由空氣動力學的問題所產生。

列車在隧道中的空氣動力學效應比明線(非隧道)上強烈的多，當列車通過隧道時，它就像一個鬆動的活塞，列車進入隧道時，被列車擠壓的空氣被迫大部分沿平行於隧道軸流動，大部分空氣被列車擠壓出去，而一部份將通過列車與隧道壁之間環形空間返回，隧道壁面的強迫效應導致氣流的壓力、流速和阻力都比明線條件下大得多。

1. 隧道中的氣流特點：

在隧道中，除了列車本身速度外，列車還誘發各種氣流。這種氣流和隧道中的阻塞比 A/S (A -列車截面積， S -隧道截面積)以及隧道壁面的光潔度有很密切的關係。在平滑的長隧道中一旦列車進入階段完成，將會有穩定的氣流和壓力變化貫穿在整個隧道中；在短小的隧道中或有豎井等之連通井而且結構複雜的隧道中，貫穿隧道的氣流是非常不穩定的。

2. 列車阻力：

在隧道中的空氣阻力要比明線條件下的阻力高一倍以上，甚至可以大很多倍。在客運列車上，空氣阻力可佔總運行阻力的 90%以上。隧道中的空氣阻力，極大地取決於隧道的橫截面積、長度以及機車車輛的特點。

3. 列車風：

列車通過隧道時，在隧道中引起的縱向氣流速度與列車車速成正比。在隧道中列車風可以導致路旁的工作人員失去平衡以及將不牢固的設備吹落在設備中。有些鐵路規定列車速度高於 160km/h 時不允許員工進入隧道。即使列車速度稍低，也必須讓員工在隧道中的避車洞內等待列車通過。

4. 列車在隧道內的壓力波：

如圖 1 所示，當列車進入隧道之前，隧道內的空氣是處於靜止狀態的，當高速運行下之列車快速地駛入隧道時，因列車撞擊而帶動隧道中的空氣產生高壓振動波，該高壓振動波以遠大於列車行駛速度的聲速迅速往隧道的另一端傳遞，隧道內的空氣被壓力波壓迫後，會立即加速，當壓力波到達另一個隧道口時則會產生反射波，反射波往回傳遞，當其傳遞時，隧道空氣將再一次被加速。同樣的，列車車尾進入隧道，會產生一股負壓波，這股負壓波也同樣會作用於隧道內的空氣，也同樣會使隧道內之空氣流速加快。另外受到隧道構造的影響，也可能因波動產生穿透或反射而改變波動。因列車在隧道內行駛而產生各種波動，在隧道內逐漸加速隧道內的空氣流動，使隧道內的空氣隨着列車行進，稱之為隧道內的活塞效應(Piston Effect)。這種壓力變化會引起車廂內外壓力

差，隧道內之壓力波會造成旅客不舒適感，且可能破壞軌道之相關設施。

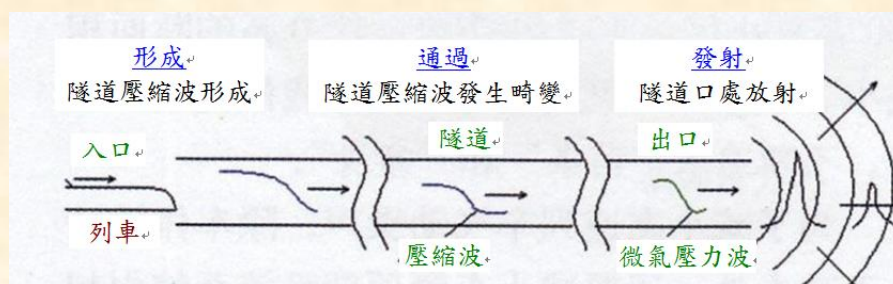


圖 1 隧道微氣壓波

5. 隧道微氣壓力波：

列車進入隧道時產生的高壓波在隧道內以聲速傳遞到隧道下游出口時，撞擊隧道口外之空氣，一部份壓力波以脈衝波的形式向外放射，壓力波隨著空間擴大而稀薄化為微壓波，同時發出爆破聲，這種波稱為隧道微氣壓力波 (Micro-Pressure Wave)，簡稱微壓波。隧道微壓波的大小和到達隧道下游出口的壓力波波面梯度成比例。在短隧道情況下，微氣壓力波大小和列車進入隧道口的速度三次方成正比，在長隧道中，微氣壓力波還與軌道結構類型有關。

微壓波會產生令人不愉悅的噪音，使隧道口附近住民受到干擾，稱之為微壓波噪音。再則，因隧道內壓力震盪對列車產生阻力，隨著波動使阻力忽大忽小，可能影響列車行進之平穩性，且增加列車能源之消耗。理想之隧道通風設計應全盤考量上述各項之影響，使列車在隧道行進可以提供旅客舒適的環境，並達到節能之目的。

在二十世紀中期的歐洲，土木公共基礎建設大致完善，而當時列車之速度

不斷提升，便引發列車隧道的空氣動力學問題。日本為了主辦 1964 年奧運而興建高速鐵路，進而發現列車在隧道內行進時，容易造成旅客耳鳴及在隧道洞口產生微壓波噪音等現象。這些問題的發生，使更多人投入列車隧道活塞效應的研究，並逐漸掌控其物理現象。在 1980 年代末期的歐洲對於活塞效應的數值分析也逐漸成熟，如今的數值模式已具備有非常高的精確度。

當今軌道列車(捷運、高速鐵路或一般鐵路)速度較快，所遭遇的空氣動力環保問題是噪音、壓力及隧道內溫度控制等新問題，而這些問題可以透過適當的工程方法改善，例如：臺灣的地下捷運系統常在地下車站兩端佈置有通風豎井，恰當的豎井佈置可以減緩車站內承受的空气壓力，亦可達到隧道內空氣更新的目的。在隧道出入口可採用隧道口漸變斷面(flare tunnel)，或設置開孔的假隧道(hood tunnel)，或者直接加大隧道斷面尺寸，或改變車頭形狀以減小車頭阻力係數等々方式，消滅列車進入隧道產生的壓力波及微壓波強度，在位於中國湖南長沙的中南大學副校長，同時也是中國工程院院士的田紅旗博士和她的同事，曾經花了 20 多年進行過一項特殊的研究，她們致力於破解的難題是，如何消除高速列車通過隧道時的瞬間衝擊壓力，這種氣壓波爆，對隧道周圍的設施與建築物都會有影響，同時會產生一個很大的爆破聲，如何才能消除高速列車通過隧道時的衝擊壓力呢?其方法為在隧道口設置緩衝結構，此結構使得壓力逐步地發生變化，也就是沒有那麼劇烈，通過實驗，研究人員發現隧道洞口斷面越大，越能削減高速運行狀態下所產生的氣壓波，但以工程經濟來說，它有土方量與工程造價等々一系列的問題，所以隧道斷面，它只能是一個合適的

值，以中國的京滬高鐵為例，它的隧道斷面是 100 平方米，這個斷面對改善列車通過隧道的瞬態衝擊壓力是比較合適的。再則，可以採用更高級的列車，使列車車廂的氣密性更佳，而不易受到外在壓力變化的影響，使旅客感覺更舒適。

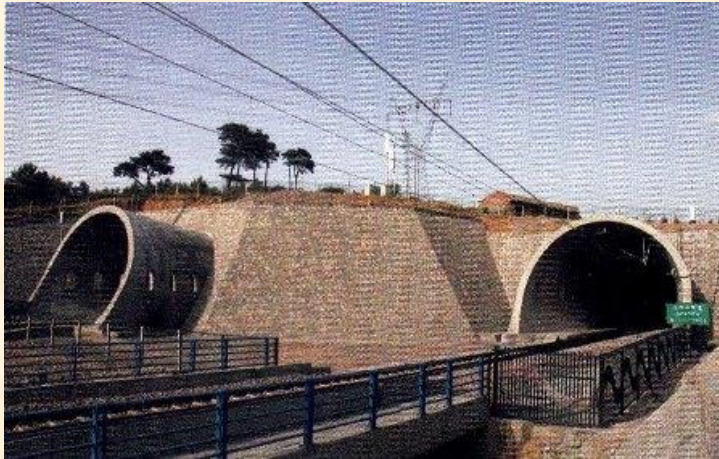


圖 2 設置緩衝段之隧道口

6. 隧道內會車壓力波：

列車高速進入隧道引起的入口壓力波以聲速在隧道內來回傳遞，形成複雜波系。兩列車相對運行會車時的氣動作用影響隨車速的二次方函數遞增。因此隨著列車運行速度的提高，會車時產生的氣動壓力波對列車側壁和側窗強度的影響、對車內乘客舒適度的影響以及對列車運動穩定性的影響急劇增加。

劇烈的壓力波動對隧道內固定設備、車體及其部件與旅客的舒適性將產生嚴重影響，如會使車體側向擺動，損壞頭車前窗、中部車輛玻璃與空調進排風閥口，使洞內設備疲勞破壞等。對於氣密性不佳的車輛，車外的壓力波傳入車輛內部使旅客出現耳鳴與嘔吐等問題。

7. 參考文獻：

連蘇寧，城市軌道交通車輛構造，機械工業出版社。

黃國倫，豎井對列車通過長隧道之壓力波影響分析，中興工程季刊，第 99 期，2008 年 4 月，PP. 9-17。

梅元貴、孫建成、許建林、周朝暉，高速列車隧道交會壓力波特性，交通運輸工程學報，第 5 期，2015 年 10 月，PP. 34-43。

李人憲、趙晶、劉杰、張衛華，高速列車會車壓力波對側窗的影響，機械工程學報，第 4 期，2010 年 2 月，PP. 87-93。

王柏懿，漫談高速列車的空氣動力學問題，力學園地。