

摩 擦 與 磨 耗

Friction and Wear

原著者：B. Phgh

譯述者：楊 春 欽

科技圖書股份有限公司

摩 擦 與 磨 耗

Friction and Wear

原著者：B. Phgh

譯述者：楊 春 欽

科技圖書股份有限公司

編輯者言

就能源節約與機械的有效利用而言，凡習機械等科系學生或從事有關機械工業的從業人員，對潤滑與磨耗的知識，實為急切需要而不可忽視。本書作者 Pugh 教授曾著有“*Practical lubrication*”一書中文譯名為“潤滑學”由本公司印行中文譯本行世，頗獲好評。茲再將原作者所著的續篇“*Friction and wear*”，中文譯名為“摩擦與磨耗”印行。與潤滑學合成一門新興課程，稱為 Tribology，中文暫譯為“磨潤學”。該課程的主要內容以培養從事能源節約與機械效率提高為目標。此書在編寫時雖以專科學生為對象，內容力求精闢扼要，說明儘量簡單切實。但對從事與機械工業相關的如汽車、航空、輪機、石油等方面的從業人員亦可作為參考。蓋此類中文書籍迄少印行，此時此地有此兩書印行，足以彌補若干缺憾。

科技圖書公司編輯部謹識

目 錄

編輯者言

第一章 表 面

1.1 表面與交接面現象	1
1.2 表面的性質	11
1.3 摘 要	21
1.4 參考資料	24

第二章 表面的性質

2.1 表面光製記錄器	25
2.2 表面光製記錄器型式	29
2.3 顯微鏡學	36
2.4 光學干涉	40
2.5 近代顯微鏡	43
2.6 電子顯微鏡	46
2.7 表面硬度的估計	54
2.8 顯微鏡下硬度試驗	64
參 考 資 料	65

第三章 摩擦力學

3.1 摩擦係數	66
3.2 表面溫度	68
3.3 滾動摩擦	68
3.4 接觸壓力	70
3.5 線圈摩擦	70

2 摩擦與磨耗

3.6 軸類與銷的摩擦	73
3.7 套環與樞軸的摩擦	75
3.8 齒輪的摩擦	81
3.9 熱的產生	81
3.10 摩擦熔接	82
3.11 車輛推進	84
3.12 人造纖維	89
3.13 合成纖維	89
3.14 木 材	89
3.15 防磨材料	90
3.16 非金屬軸承材料	93
3.17 參考書目	95

第四章 磨潤組件

4.1 軸 承	97
4.2 變速摩擦驅動	102
4.3 煞車器	104
4.4 離 合 器	110
4.5 離合器與煞車器的計算	114
4.6 車 胎	134
4.7 操縱特性	135
4.8 參考書目	138

第五章 磨 耗

5.1 摩擦與磨耗	141
5.2 磨 料	144
5.3 附着磨耗	145
5.4 磨損磨耗	148
5.5 疲勞磨耗	149
5.6 消蝕磨耗	149

5.7	化學磨耗	150
5.8	磨耗的估計	151
5.9	實際磨耗	152
5.10	套筒軸承	153
5.11	晶粒大小與磨耗	154
5.12	滾珠與滾子軸承	155
5.13	活塞、活塞環與汽缸磨耗	159
5.14	凸輪與挺桿的磨耗	160
5.15	輪胎磨耗	162
5.16	齒輪磨耗	165
5.17	切削工具	167
5.18	修補磨耗損害的方法	169
5.19	參考資料	170

第六章 摩擦、磨耗試驗與試驗技術

6.1	表面溫度	175
6.2	軸承試驗	178
6.3	量測磨耗的放射性追蹤劑法	190
6.4	參考資料	194

附 錄

第一章 表 面

摩擦與磨耗是由於兩個接觸固體表面的相對運動所引起。固體與固體間的接觸屬於“乾”的狀態，但這種接觸較為少見。至於潤滑油的使用，則會產生液體與固體相接觸的情況。

在此，我們並不直接涉及液體與液體間的接觸情形，雖然有關這方面的基本研究，已經先後完成。

至於要探討究竟兩個固體表面相接觸會產生何種影響，必需先知道有關“表面”(surfaces)的現象，以及它們本身的若干性質。

1.1 表面與交接面現象

雖然“表面”(surface)這個名詞很容易想像，但却很難下定義。一般而言，我們將表面想像成兩種介質(media)或兩種相(phases)間的接觸面。舉例說：在容器內，水的表面是空氣與水的交接面；水的表面常被認為是水平的，但仔細觀察，却可發現水與容器的接觸部分是向上彎曲的。假如液體會弄濕容器，那麼在器壁附近的液面是向上凹；反之，液體不會弄濕容器，則器壁附近的液面會向下凹。水銀屬於後者。

假如將一小塊樟腦放在水面，它會沿着水面跑，造成快速而又雜亂的運動。玩具船，就是根據這個原理製成的。可是，若再滴入一小滴油，油就會沿着水面擴散而使樟腦粒子靜止不動。由此可見，在兩介質的交接面間存在某種特殊表面張力。我們曾將液面假設為一層拉緊的薄膜，它總是傾向收縮，使表面積變為最小。塗有油脂的針，可



圖 1.1 水面上塗有油脂的針

2 摩擦與磨耗

在水面漂浮而不下沉，即可證明液體具有表面張力，或表面能量。

若水結成冰，也就是說，從液體變成固體，表面力量仍然存在，但却不適合將其視為薄膜的一種。所以，表面張力的觀念不能用在固體上。但，固體仍然具有表面能量，却以應變能（strain energy）的形式存在着；當固體表面覆蓋着一層液體時，應變能會減少。

有關表面張力、表面能量以及面與面間的反應是一個相當複雜的現象。我們大概的介紹一些主要原理足供研讀本書所需，但也希望藉此助長學生的興趣，進而鼓勵其參閱若干有關表面物理與化學性質的專門著作。

1.1.1 表面張力與表面能量

液體表面張力的產生，可由其分子間相互的作用力來解釋。

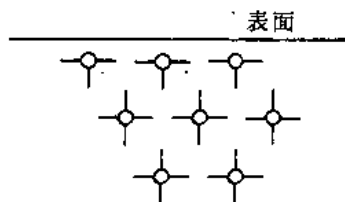


圖 1.2 分子間的吸引力

圖 1.2 所示，在液體內部的分子，各方向所受的力是相等的。但表面分子却受到不平衡的吸引力，而使表面受到一個向內的拉力。

因液體分子是以固定的運動形式，有規則地從液體內部向表面移動。所以液體並不如圖 1.2 所示，處於靜止狀態，而是屬於動態（dynamic state）平衡。通常，表面張力是指表面單位長度的直線所受到的垂直力。

若將表面層聯想成受到張力的薄膜時，它就像伸張的彈簧，存有能量。因彈簧受到伸張時，必受到外界對其所作的功，所加的功就儲存在彈簧中。當彈簧放鬆，所儲存的能量便釋放出來，這是分子力作用在表面所引起表面能量的另一觀念。表面能量的觀念，可同時應用在固體與液體，其值的大小，依構成表面的材料組成而變化。

表面張力，通常以 N/m 來表示，表面自由能以 J/m^2 來表示。對任一液體的表面能是相等的。

很多金屬在熔點時的表面能量，已被求出。由於其他資料的缺乏，一般在無潤滑情況下，將金屬的表面能量以熔點時的值代替。當溫度下降時，金屬的表面能增加，同時，當其在空氣中冷卻時，表面會附上一層金屬氧化膜，而使表面能降低。前者的增加量約與後者的減少量相等。潤滑劑作用在表面上，表面能會大幅度降低。

若表面 a 與表面 b 間最密接觸面積為 1 cm^2 ， Y_{ab} 表示交接面的表面能， Y_a 、 Y_b 分別表示兩表面在接觸前的表面能，則使兩個接觸面分開所需的能量為

$$W_{ab} = Y_a + Y_b - Y_{ab}$$

W_{ab} 為附着能，或為分開 1 cm^2 的交接面所需的能量。 W_{ab} 愈大，愈難使此表面在另一面上滑動。

表面能的觀念，已成為探討有關摩擦與磨耗問題的一個方法。但許多有用的資料仍感到不足作為定量研究的基礎。

1.1.2 吸附作用

由於兩相間的界面吸引力，使兩相間生成不同組成的層面。此新層面被吸附着，這種吸引過程，就是吸附作用（adsorption）。吸附層（adsorbed layer）有它自己的特性。液體與氣體，或液體與液體界面間的吸附程度，可由所產生表面張力的變化來估計。但固體表面就無法估計其吸附作用的程度，雖然吸附作用會降低表面能。被吸附的物質稱“吸附物”（adsorbate）職掌吸附作用的為“吸收劑”（adsorbent）。吸附作用可分為兩類：完全為物理吸附作用，或完全為化學吸附作用。後者具有更大的作用力。兩者的差別，在後面更易看出。

在邊界潤滑（boundary lubrication）的情況下，吸附層佔有非常重要的地位。軸承在作用時，其摩擦力的大小依潤滑油所產生的膜而定。這種膜與金屬面接觸時，吸附在軸承的表面上。

金屬表面的吸附作用，會減弱金屬的強度。這種作用稱為 Reh-binder 效應（Rehbinder effect）。邊界摩擦力，視表面層對相對運動的阻力而定。若考慮潤滑油的衰退效應（weakening effect），表面層會變得更平滑。

1.1.3 表面吸引力

表面力量，只在極小距離時才有作用。如圖 1.3 所示，當兩個固體表面逐漸接近，最後，表面的突起部分相接觸，而其他部分仍是分離的。表面的突起愈小，也就是說接觸面的表面愈細，則面與面的接觸會較緊密。清潔而高度磨光的金屬表面具有相當高的表面能。因高的表面能，使面與面間的結合非常強。這種表面作相對運動時，所產生的摩擦力與磨耗就非常大。實際上，高的表面能，會有很快速的表面吸附作用；吸附層會大量減少摩擦力。精密測量用的滑動計量規的表面，需有很好的加工面。當它們絞在一起時，（也就是說用某一角度輕磨並扭成一線），會相互附着。因此，要使它們分開，需要相當大的力量。

雖然如此，面與面間仍被吸附膜（adsorbed films）所分開。如能除去這些吸附膜，則兩個高度磨光面可能僅藉壓力，就可熔接（weld）一起。金屬的冷熔接（cold welding）即是利用這個原理。使用這種方法，可使金屬間有強鍵（sound bond）的存在。此乃其他

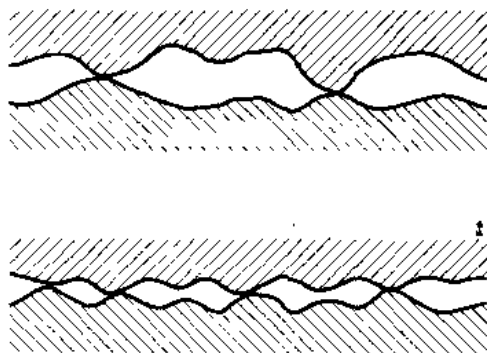


圖 1.3 表面粗度與接觸的緊密度

熔接法所無法做到的。至於實行細節，本書以後將再敘述。

1.1.4 表面引力的構制

極性分子 (polar molecules) :

原子，可帶正電或負電。對稱型的分子，如直鍊型的碳氫化合物，電荷是平衡的；但，非對稱型的分子，如飽和脂肪酸，分子的一端可能帶正電，另一端帶負電。如此形成一個“偶極子”(dipole)。兩極的距離，乘其所帶電荷，即為偶極子本身所具的力矩。具有高偶極子力矩的分子，稱為高極性分子 (highly polar molecule)。直鍊型碳氫化合物不帶電荷，故為非極性分子。脂肪酸則屬於極性分子，該酸分子的 $-COOH$ 團，常稱為極性頭 (polar head)。

極化現象，可由原子結構理論與原子價的電子理論得到完美的解釋。處理這問題需涉及相當廣泛的學說。在此只作必要的簡單說明。

簡言之，原子係由電子與原子核所組成。原子核內含有質子與中子。質子為單位質量，並帶有單位正電。中子的質量幾與質子相等，但不帶電。電子沿着同心球殼 (shell) 的軌道，繞着原子核旋轉。每一層殼，具有一定的電子容量。也就是說，第一層帶有 2 個電子，第二層 8 個，第三層 18 個，第四層為 32 個。電子的質量為質子的 $1/1840$ ，幾可略去不計，但帶一單位負電荷。故說，原子的質量等於原子核的質量、電子數與質子數相等以平衡原子核所帶的正電荷。

氫，是最輕的元素，含有一個電子與一個質子，原子量為 1 (見圖 1.5)。碳原子在它的原子核內含 6 個質子，6 個中子；第一層軌道有 2 個電子，第二層軌道有 4 個電子。(見圖 1.4b) 對碳原子而言，最外層軌道必需有 8 個電子才会有完全的化學穩定性。當原子失掉 1 個電子，就帶正電；反之，得到 1 個電子則帶負電。原子失去 1 個電子的難易程度是依其正電性 (electropositive) 來測定。當兩個原子結合成一個分子時，其中一個原子從另一原子得到一個或更多的電子以填滿最外層軌道的 8 個電子容量，而達到結合目的。得到電子的原子，就變為陰電性 (electronegative)，失去電子的原子則為陽電性 (electropositive)。這種由電荷改變所引起的原子鍵結，稱

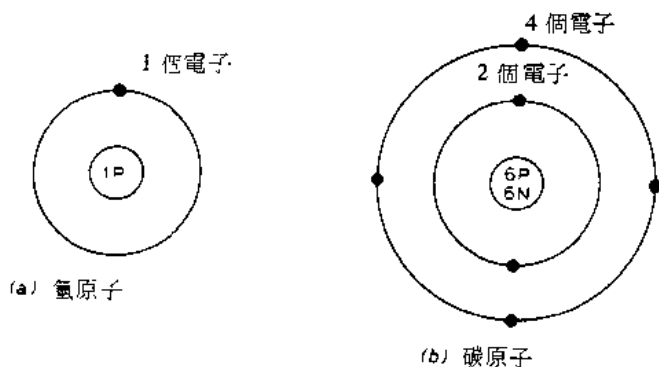


圖 1.4 原子構造

為離子鍵 (electro-valent bond)。

原子也可能藉外層軌域電子的共用而結合。例如：4 個氫原子與 1 個碳原子鍵結成為甲烷，甲烷的結構如圖 1.5 所示。

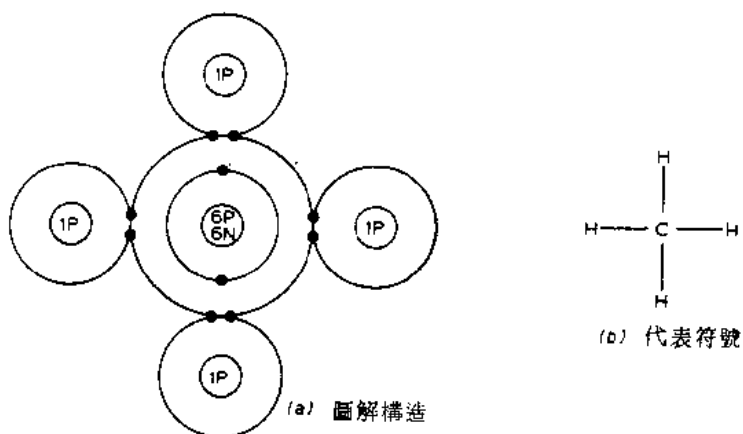
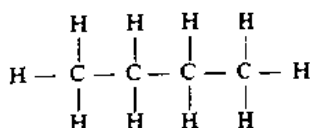
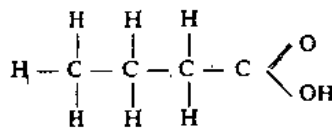


圖 1.5 甲烷分子

其化學性質有如正直鏈型石臘族 (normal straight chain paraffins) 樣的化學穩定。對脂肪酸來說，例如：

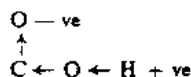
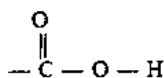


丁 烷



丁 酸

脂肪酸的特性，在於此種碳氫化合物兩端所結合的基的不同所致。一端為 $-\text{COOH}$ ，另一端為 $-\text{CH}_3$ 。



$>\text{C}=\text{O}$ 團的氧原子會吸引電子，使碳原子成為正電性。正電性的碳原子又吸引 $-\text{O}-\text{H}$ 團的電子，使 $-\text{OH}$ 團的氫原子成正電性。

偶極力矩 (dipole moment)，等於轉移電荷乘上電荷的移動距離。力矩為一向量，有

大小與方向。前述的偶極是永久性的 (permanent) 與感應偶極 (induced dipole) 不同。含有永久性偶極的分子，稱為極性分子 (polar molecule)。

兩個接近的原子或分子的相互作用 (即使是永久偶極不存在時)，也可能產生瞬間偶極。永久性或暫時性的偶極，可同時產生，交互感應出更大的力矩。原子核與分子相互作用後的狀態極為複雜，因其牽涉到原子與分子的振動頻率。從波動力學的理論，可算出原子或分子間作用力的能量。此種效應稱為分散效應 (dispersion effect) 此效應又稱為分散力 (dispersion force)。

此外，在固體內，分子間的吸引力或鍵結力很複雜，而且需視固體本身的結構而定。通常，主要的作用力稱為 Van der Waals 力。其中包括永久偶極、感應偶極、以及分散作用所生成的力。在此，無需計算這些力，但要知道它們如何產生，並對表面性質有些初淺認識，則是非常重要的。

例如，從上面的敘述可以知道，液體的碳氫化合物僅有分散力量存在。通常，它們的表面張力與表面能很低。

脂肪酸的分子具有極性頭 (polar-head)，分子的極性部分對其他極性分子或水有親和力 (affinity)。短鏈型的脂肪酸會溶在水或

油中。碳氫化合物部分可決定在油中的溶解度，而極性頭或 $-COOH$ 團，則可決定在水中的溶解度。當這種物質置在油—水或空氣—水的界面上，分子的極性頭會在水中，而碳氫化合物的部分則會在油或空氣中，分子因而被定向成為單分子層 (monomolecular layer)。表面吸附作用，就是表面活性的一例。脂肪酸是屬於表面活性的物質，稱為表面劑 (surfactant) 的一種。

為求方便起見，我們介紹有關表面劑命名法。希臘語 (philos)，意指友愛或親愛；反之，(phobos) 的含意，是害怕；(phobia) 表示恐懼或嫌惡。因此，(lyophilic)，物質對液體有親和力；(lyophobic) 則對液體有排斥性。同理，(hydrophilic) 物質對水有親和力，而 (lipophilic) 物質對油有親和力。表面劑分子的集合，稱為膠質粒子 (micelle)。

1.1.5 表面劑的分類

表面劑 (surfactants) 可溶於水或油中，潤滑油的添加劑必需是可溶於油的。譬如乳化劑 (emulsifier)、清潔劑、防蝕劑與起泡沫或不起泡沫的添加劑 (foaming or antifoaming)。

一般來說，物質溶於水會分解成離子，即帶電荷的原子或原子團。若在此溶液內插入有電位差的兩個電極帶負電的離子即陰離子，會往陽極移動；而帶正電的離子即陽離子，則會往陰極移動。

水溶性的表面劑，通常在溶液中都會電離，帶有陰電荷的長鏈分子屬於陰離子性的表面劑。在某些情況下，表面劑所帶的電荷可為正電荷亦可為負電荷，端賴溶液的酸鹼度而定。在溶液中不起電離的表面劑，稱為非離子性表面劑 (non-ionic surfactant)。

1.1.6 膠體

固體浸入液體中，與液體的接觸面上，會產生表面現象。如將大的物質分割成很小粒子，則面積與體積比將會很大。例如：一正方體面積與體積比為 6，若將邊長減半，大正方體將被分為 8 個小正方體，面積與體積比會變為 12。分成的立方體愈細，則面積與體積比愈大。

膠體是一種非常小的粒子，大小約 10^{-7}mm ，但仍能有一定的分離面。膠體研究與表面化學有密切關係。膠體的分散性使研究潤滑者感到興趣。膠體粒子稱為分散相（disperse phase），它們所懸浮的液體，稱為分散介質（dispersion medium）。

論及分子與膠體粒子，需有大小的觀念。表示大小的單位計有下列數種：

一般使用的單位		國際組織認可的單位為	
Å	$1 \text{ Å} = 10^{-7}\text{mm}$	μm	$1 \text{ μm} = 10^{-6}\text{m}$
μ	$1 \text{ μ} = 10^{-3}\text{mm}$	nm	$1 \text{ nm} = 10^{-9}\text{m}$
mμ	$1 \text{ mμ} = 10^{-6}\text{mm}$	pm	$1 \text{ pm} = 10^{-12}\text{m}$

膠質粒子可藉破碎大塊材料或利用小分子的聚集而成。破碎大塊材料，通常是用研磨法為之。但，較小的粒子，會重新結合而致研磨法受到限制，所形成的粒子大小在 2 nm 至 200 nm 之間，原子的直徑大約為 0.1 nm。普通濾紙只能濾過直徑在 1 nm 以上的粒子。因此，膠體粒子很容易通過這種濾紙。為求分開直徑不同的膠體粒子必需使用纖維素薄膜（cellulose membrane）。

在潤滑油中，二硫化鉬（molybdenum disulphide）與石墨的膠體分散，通常在運轉並處於邊界潤滑情況下使用。但所包含的粒子並非如膠體粒子般的大小。對普通工作面所適用的粒子大小約在 3 至 16 μm 之間。故粒子研磨至可能的最細程度，並無好處。

約略地說，當溶液中所含溶質粒子小於 1 μm，即可稱為真溶液（true solution）。粒子大小在 0.1 μm 至 1 μm 間為膠體溶液（colloidal solution）。大於 0.1 μm 則屬於懸浮液或乳液。各溶液種類並無嚴格分界線，只將粒子的大小作一大略分別。膠狀溶液有時稱為溶膠（sol），是為與真溶液區別。溶膠又依分散相（dispersed phase），分為固體或液體。

1.1.7 潤濕

少量液體，在空氣中會呈現近似球狀的液滴。因對一定的體積，圓球有最小的表面積，且表膜也會收縮成圓球，佔有最小表面積。將

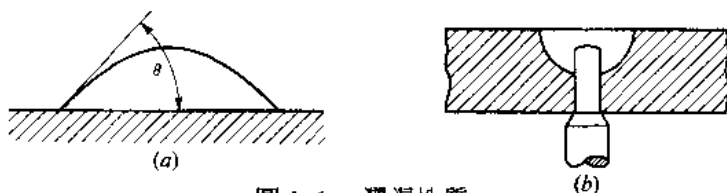


圖 1.6 潤濕性質

液滴置於固體表面會變成如圖 1.6 所示的形狀，此 θ 稱為接觸角 (angle of contact)。

當固體表面分子與液體分子間的吸引力大於液體的內聚力 (internal force of attraction) 時，接觸角會趨近於零，因而液體散佈在固體表面。但當液體中分子間的吸引力大於固體表面與液面的吸引力時，液滴與表面會形成 θ 角。 θ 角為一特性量。因此，接觸角 θ 為潤濕度 (degree of wetting) 的量度。當 $\theta = 0$ 時，固體表面被完全潤濕； $\theta = 180^\circ$ 時則無潤濕情形產生，此時液滴變成球狀，因表面與液體間總會有吸引力存在。我們只能說，當 θ 角減少，潤濕度增加；當 θ 角增加，液體的“球性” (balling-up) 就會增加。

固體表面本身的性質，固面上的附着層，固面的活性物質以及固面的粗糙度等，均會影響固面與液體間的接觸角。固面的本質視其處理方法與過程而定，例如，冷卻速率與鑄造後的切削，添加表面劑，對液體散佈在固體表面具有相當大的幫助。

實際上，潤濕性質的重要性，可見於鐘錶油與儀器油、滲潤油 (penetrating oil)。對鐘、錶與儀器的潤滑而言，潤滑油能否在樞油孔 (pivot oil sink) 保持長時間不會變質，是非常重要的 (見圖 1.6b)。通常，潤滑油必需具良好的抗擴散 (anti-spreading) 性質 [油的抗擴散性或無潤濕性 (non-wetting)，可藉添加劑改良之]。相反，滲潤油的潤濕性與滲透性要好些。

1.1.8 清潔性

清潔性，亦是一種表面現象。清潔劑的最重要是一種好的潤濕劑。雖然最好的潤濕劑並不一定是最好的清潔劑。

清潔劑藉着與表面吸引，能顯出它的作用。最易附着在固體表面上，使表面上的不潔物與表面隔離，以減少兩者間的附着作用。潤濕作用，使清潔劑與表面以及不潔物有良好的接觸，而能除去表面上的不潔物。在油質沉積的情形下，可藉增加沉積物的接觸角，及其本身的“圓球化（balling-up）”來幫助這種過程的完成。最後，可利用母液（parent liquid）的洗滌作用除去不潔物。普通內燃機的潤滑油，需加入稱謂清潔劑添加物，以除去低品質的油與燃燒生成物所形成的沉積物，以保持引擎工作面的清潔。清潔劑的作用，不僅要防止不潔物的再堆積，同時必需破壞並移去已生成的沉積物，使其能懸浮在油中。最後藉着引擎過濾器濾除不再沉積在小口徑的油路中。也就是說，除去的不潔物，必需藉添加劑在不潔物的表面作用來破壞，使其雜亂分散。實際應用上，是清潔—分散添加劑（detergent-dispersant additive）同時使用。

清潔劑添加物易形成膠質粒子（micelle），但此種傾向並不是清潔過程的一部分。實際上，膠體粒子如貯倉一般；當需要時，可由表面劑作進一步的供應。

1.1.9 油滑性

早期研究油的添加物為要改良礦油的油滑性（oiliness）。脂肪油（fatty oil）曾被證實具有優越的油滑性。因此，最有效的油滑性添加物是脂肪酸（fatty acids）。雖然此種性質仍相當模糊，且無法估計或量測其油滑性。但毫無疑問，必然是由於其潤濕能力與表面作用。

Hardy 氏曾說過，在薄層中的脂肪油，其分子排列形式是分子鏈與表面垂直，且其極性頭（polar head）與表面相接觸。（見本公司出版的潤滑學 1.4 節 P6）

1.2 表面的性質

對表面現象有一概略認識後，接着要探討表面的性質，尤其是工程應用上所碰到的接觸面。欲作此項研究，必需檢視這種表面的製造方法。雖然，非金屬軸承材料的發展已有相當進步（參考本書後節）