

緒 論

1. 非硫化矿物的浮选

浮选法對於選別大多數矿石的重要意義是極其明顯的。有色金屬矿石——銅、鉛、鋅等——幾乎要全部進行浮選。同時近廿年來，浮選法對非硫化矿物原料的工業選礦的意義也有了顯著的增進。許多著作都指出採用浮選法能夠提高有色與黑色冶金工業及其他工業部門的非硫化矿物原料的質量。

當發現這一新的選礦方法時，石墨是第一批浮選對象之一。此後才把注意力集中到硫化礦的浮選上。直到1924年才肯定了極性非硫化矿物也可能進行浮選。從前，對許多種非硫化矿物和煤的浮選法進行過研究和探討。不但研究了非硫化礦和煤的浮選，而且在不同程度上還掌握了它們。表1所列為某些可浮性已確定的非硫化矿物。

對非硫化矿物的浮選所進行的研究工作發展得如此之快，幾乎每年都不得不在可浮選的矿物表上增加新的矿物名稱。

在蘇聯今天的浮選廠回收下列矿物：石墨、煤、硫、滑石、孔雀石、白鉛礦、鵝酸鈣礦、磷灰石、螢石、重晶石、冰晶石、水鋁石、等等。

目前用浮選法來提高非硫化矿物原料的質量的前途是極其遠大的。一方面，這是由於系統的研究工作妥善地解決了各種非硫化矿物原料選礦的工藝問題；另一方面，由於對有色和稀有金屬以及優質非金屬矿物原料的需要的增長，為發展非硫化矿物原料的選礦事業（包括浮選在內）創造了有利的經濟前提。

表 1

可浮選的非硫化矿物

I	彩鋁鉛礦	菱鋅礦	水方硼石
地瀝青	石膏	螢石	水鋁石
石墨	錳鋁礦	磷鈣土	鈦鐵礦

硫	白云石	天青石	單斜方硼石
煤	方解石（灰石）	白鉛矿	高嶺石
滑石	冰晶石	白錫矿	錫石
I	菱錳矿	II	石英
石膏（藍銅矿）	孔雀石	紅柱石	藍晶石
鈉明矾石	白堊	溫石棉	剛玉
鉛矾	砷鉛矿	綠柱石	拉長石
磷灰石	磷氯鉛矿	褐錳矿	褐鐵矿
重晶石	鉍鎢鈣矿	錫华	磁鐵矿
碳酸鉍矿	菱錳矿	赤鐵矿	鉍华
錳錳鐵矿	菱鐵矿	水鋁矿	白云母
長石	絹云母	鉻鐵矿	鉀鹽鐵矾
楔錳矿	鋁輝石	鎢石	無水甲鐵矾
金紅石	榍石	霓石	杂鹵石
方沸矿	电气石	IV	鉀鹽
錳赭石	鈉硼解石	石鹽	

由於必須滿足对許多非硫化矿所提及的、往往是很高的技术要求，从而使非硫化矿浮选具有許多特点。这些特点在原則上並不改变浮选过程的工艺。它只是使浮选流程变得略为复杂。处理某些非硫化矿物时常要增加精选（Очистная флотация）次数，因而使整个选矿流程也复杂了（精矿干燥或是用其他方法来处理精矿，如电磁分选、靜电分选、化学处理等等）。

— 非硫化矿物浮选过程的物理实質和物理化学实質，和浮选金屬硫化矿物实質並無区别。浮选非硫化矿所採用的机器和方法，和浮选硫化矿所採用的亦無兩样。在非硫化矿物的浮选过程中，整个浮选过程工艺的总的規律已經明确。

改变藥剂配方的組成，只影响藥剂与矿物表面相互作用时的反应性質。

2. 矿物按可浮性的分类

矿物原料通常分为「金屬矿石」和「非金屬原料」。矿物屬於「金屬」矿石或「非金屬」原料又取決於它們在国民經济中利

用的性質。通常用冶煉法直接可以从中提取金屬的一切矿物，屬於金屬矿石，其他則屬於非金屬矿物。

根据这一定义，作为生产氧化铝原料的鋁土矿，或是生产鵝酸鈣原料的白鵝矿，虽然將氧化铝繼續处理可制成金屬鋁，而鵝酸鈣可制成鵝，但也应当認為是非金屬原料。

金屬矿石和非金屬原料間的界限，將随着利用矿物原料的工業方法的發展而逐漸消灭。例如，以前一直認為是「非金屬」矿物原料的典型代表的菱鎂矿和一水硬鋁石，最近也当做「金屬」矿石使用了。对一水硬鋁石直接进行电热还原，可以制得矽鋁合金，而用各种方法还原菱鎂矿又可得到金屬鎂。

鉻鉄矿、軟錳矿和其他錳矿物等等应当屬於这类同时用作冶金原料和化学原料的矿物。这样一来，以前一直作为鑑別金屬矿石和非金屬矿石的主要標誌——矿石的冶煉加工或化学加工，現在早已不能作为矿物原料主要標誌的基础了。非金屬矿石和金屬矿石間的界限，在發展技术的过程中，將會完全被消灭。由於使用輕金屬和重金屬合金附加剂的广泛發展，把矿物原料分成金屬矿石和非金屬矿物更显得是假定的。

根据矿物原料使用的性質，曾提出一些矿物原料分类法。这一分类方式是利用在矿物原料每一使用領域內，对矿物原料的某些一致要求做为根据。当然，對於許多种类的矿物原料，例如對於在熔煉金屬时作为矿石或耐火材料的矿物原料，可以規定某些共同的要求。这些要求是根据矿物原料的使用工艺而提出的。但是，矿物原料的这些分类方式，却很少与浮选过程的特点有关系。

矿物原料按可浮性的分类，应当与各組矿物的浮选行为（Флотационное поведение）有关。下面就根据矿物原料的可浮性而分成的类别，它是根据現有我們浮选各种矿物原料的經驗編制而成的。

A. 重金屬硫化矿和自然金屬 銅、鉛、鋅、汞、銻等矿物屬於这一組。如果在生成矿石的过程中或在开采时它們的表面沒有受到氧化的話，那末它們的特点是不易潤湿。對於这組矿物的

浮选，黄藥是最有效的捕收剂。

Б. 非極性非金屬矿物 在自然状态下，具有不易被水潤湿性質的非金屬矿物屬於这一組（石墨、硫、煤和滑石）。

这組矿物的浮选只需要使用極弱的捕收剂，有时只用起泡剂。

В. 有色金屬氧化矿物 銅鉛鋅的碳酸鹽和硫酸鹽，以及其他含氧酸的相应的成鹽矿物（白鉛矿、鉛矾、菱鋅矿、孔雀石、石青、彩鋁鉛矿，等等）屬於这一組。

这一組矿物經硫化后用黃藥可使之浮游，以及不进行硫化直接用脂肪酸及其皂类亦可使之浮游。

Г. 極性成鹽矿物 这类矿物的結晶格子中含有鹼土陽离子——鈣、鎂、鋇、鋇。这类矿物積極地和脂肪酸型的陰离子捕收剂相互作用。在这类矿物的結晶格子中，鍵的离子性質很强决定了即使不用特殊的活性剂，矿物的陽离子与捕收剂的陰离子也能積極作用。对这种矿物使用活性剂是不必要的，或是起次要的作用。

这組矿物用脂肪酸很容易使之浮游，具有鹼土陽离子的矿物有：白鷄矿、鋁鷄鈣矿、磷灰石、磷鈣土、螢石、方解石、白堊、重晶石、菱鎂矿、白云石等。

Д. 氧化物、砷酸鹽和鋁砷酸鹽 这組的大多数矿物当有陰离子捕收剂(脂肪酸)和陽离子捕收剂时具有相当显著的浮游性。但是其中很多矿物在使用陰离子捕收剂时，其可浮性还与該矿物表面上是否存在有效陽离子有关，並且對於同一种矿物因有效陽离子在矿物表面上的数量的不同，其可浮性有很大的变化。在矿物表面上沒有或減少这种有效离子的数量，結果会显著地降低这組很多矿物使用陰离子捕收剂的可浮性。这些矿物的浮选特点就是与其生成矿物的条件紧密相关。

屬於这組的矿物計有：石英、剛玉、水鋁石、水鋁矿、鎢石、金紅石、鋁华、赤鉄矿、磁鉄矿、錫石、鈦鉄矿、軟錳矿、藍晶石、紅柱石、長石、鋰輝石、各种云母、絹云母、高嶺石、电气石、石棉、鉻鉄矿、綠柱石等。

对这組矿物的浮选研究得尙不充分，当它們的浮选性質作了进一步研究时，按其浮选性質近似情况大体上还能把这类矿物分成若干組。例如，目前已分出一組鋁矿物类：剛玉、水鋁石、水鋁矿，它們的浮选性質具有某些特点。

E. 鹼金屬和鹼土金屬的可溶性鹽 这种鹽类在其自身的飽和溶液中是可以浮游的，这种飽和溶液在动力平衡的条件下能够較充分地保証固相的存在。

实现这种鹽类的浮选或是借助於脂肪酸，或是用陽离子捕收剂。在这組中已能浮选的矿物計有：石鹽、鉀鹽、鉀鹽鎂矾、無水鉀鎂矾，等等。

3. 浮选过程的理論基础及其現狀

在很長時間內，浮选过程的發生和發展是憑經驗的方法进行的。由於浮选在工業上应用的範圍十分广扩，从而刺激了浮选理論研究工作的广泛發展。

在理論研究工作上，可以十分清楚地指出兩個基本方向。第一个方向所进行的大量工作，是以物理化学研究法和局部以相間表面的物理研究法为基础。在这些研究工作中，主要把注意力集中到浮选相互作用的分子物理方面。在这方面的研究工作中A.H. 弗魯姆金院士和列宾捷尔院士及其学派的研究工作佔居領導地位。他們曾創立了有科学根据的附着过程的理論和捕收作用的理論，以及研究固体表面的方法。第二个方向的研究者从事於藥剂（主要是捕收剂）与矿物表面相互作用的机理及其作用力實質的研究。

有的技术著作中將這兩個方向的研究工作和所發展的理論加以对比，实际上这种做法是沒有意义的。因为，二者所从事的研究虽然彼此有密切关系，但畢竟是浮选过程的兩個独立的研究方面。

由於矿物和捕收剂的分子、原子或离子本身的相互作用，因而在矿物表面上有捕收剂存在，但这还不能解釋矿粒固着在气泡

表面上的机理（Механизм）。關於这一点往往被人們所忘記。

現在已經明确，除了藥剂与矿物表面相互作用力的實質之外，由於藥剂作用的結果使相間表面性質改变，以及使表面作用力大小改变的物理現象，是矿粒附着在气泡上的直接原因（这是泡沫浮选过程的基本动作）。

研究藥剂与矿物表面相互作用的實質和在这方面工作中創樹的理論，對於了解浮选藥剂作用的机理以及对确定使用藥剂的正确根据全是必要的。沒有这部分理論，就不可能合理地選擇藥剂混合物。

研究相界面的分子物理性質，對於从質和量上評定浮选动作（Флотационный акт）的作用力，以及對於評定矿物及其混合物的浮游性能也全是必要的。

每一个研究方向都是構成完整的浮选过程理論中的必要組成部分，毫無疑問，它們是互相补充的。

从这两个研究方向中得出的原理，構成了一个完整而又十分系統的浮选过程中的，關於相互作用的分子現象理論。

現今的浮选过程的理論認為捕收剂对被浮选矿物作用的物理化学實質是使矿物表面難於被水潤湿。矿粒附着在气泡上的直接原因是因為它們相互間的吸引力的增加。

關於浮选藥剂与矿物表面的相互作用力的實質的概念，还是值得研究的。除了藥剂化学固着在矿物表面上之外，某些研究者还肯定了其相互作用的「吸附」性質（«адсорбционный» характер）。

由許多研究者所提出的浮选藥剂与矿物表面相互作用的理論，其中包括塔加尔特（А. Тагарт）化学理論和瓦尔克（Уорк）吸附理論在內，都不符合於今天關於化学鍵實質的概念。近年来，苏联学者以富有創造性的研究工作根据現代關於鍵的学說來創樹並繼續研究藥剂与矿物表面相互作用的理論。

浮选調節剂（Регуляторы）的作用（抑制剂和活化剂），就一般概念來說是減少和增加矿物表面上捕收剂的數量。根据我

們的研究，除此之外，調節劑對礦物表面性質的直接作用還對礦物的可浮性有很大影響。

我們不去敘述弗魯姆金院士、列賓捷爾院士、普拉克辛、叶爾奇瀾夫斯基、別洛格拉卓夫等人所發表的著作中關於現代浮選過程理論敘述得十分完善的詳情細節。但這理論對非硫化礦物的應用將在下面討論。

但是，理論的論述以及現有的浮選相互作用的物理化學研究方法的論述，對解決浮選技術所提出的具體問題，到現在為止仍感不足。

在解決許多實際工藝問題時，就連研究者們基本上也都是依靠浮選實驗，而不依靠物理化學的研究。

浮選理論在應用方面的這種不能令人滿意的情况，既不能解釋為所提出的很多物理化學研究法過於複雜或艱巨；也不能認為對深入研究浮選過程的現象的必要性，特別是在分離複雜礦物集合體時的浮選過程現象的必要性缺乏了解。

應當注意到，現在所制定的浮選相互作用理論，在很多情況下已不足以作為發展浮選過程的新途徑的基礎。

現今理論的原則性缺點，主要是以平衡狀態來解釋浮選現象，而缺乏研究整個過程的動力學，以及片面地對浮選相互作用的分子机理發生興趣。在以高速進行的浮選過程中，是不可能達到平衡狀態的。用研究一種分子現象的方法不可能創樹完整的浮選過程的理論。因此，近十年來積累下的有關礦物和礦石浮選方面的大部分實驗資料，並不能充分地被一個通用的理論所解釋，或是這些資料與某些原理相抵觸。

現代的理論還不能以足夠的說服力來解釋下述為實踐所肯定了的事實：

1. 許多礦物表面復有同樣的捕收劑並且平衡的潤濕接觸角也相同，但其浮選情况却不同的原因。
2. 磨細到不同粒度的同一種礦物具有不同可浮性的原因。
3. 在某些情況下，對比面小的大顆粒進行浮選時較之對中

等顆粒的矿石进行浮选时（比面值也大）需要捕收剂消耗量大的原因。

4. 可浮性与顆粒形狀的关系（例如，鱗狀矿物有高的浮游活度）。

5. 当往磨細了的矿石中添加对石英、矽酸鹽类矿物和其他脈石矿物不起作用的黄藥捕收剂时，这些矿物却常有極高的可浮性的原因。这类矿物被泡沫〔机械携帶〕的說法並不能解釋所有的現象，尤其是这种〔机械浮选〕还具有一些選擇性。

6. 实际上，在由單一矿物的矿漿变为多矿物的矿漿时矿物可浮性的改变这个問題並未得到解釋。被許多研究者所确定的許多純潔矿物不加捕收剂而能浮游这一性質，企圖用沾污来解釋是不能令人信服的。浮选最大極限顆粒的計算尺寸和实际尺寸之間具有很大差值的原因尙不了解。

举出的实例極充分地証明了發展浮选理論以及包括在浮选理論中的一些用来解釋重新确定了的 facts 的新原理十分必要。

浮选过程的理論應該帮助解决下列問題：

1. 哪一些藥剂对实现矿石中的个别矿物的選擇性浮选是必要的，藥剂作用的机理是怎样的，怎样才能改善藥剂混合物的作用和易於控制它們。

2. 用什么方法保証各种矿粒，特別是在磨矿后所形成的各別矿物的細小顆粒的選擇性浮选。根据顆粒的質量（大小）和形狀来控制可浮性的途徑又是怎样的。

3. 矿漿运动的性質、气泡大小及其在矿漿中的分布狀況对浮选过程的影响是怎样的。怎样保証浮选槽中最合适的水动力学的狀況和空气分散的必要条件。

解决这些主要問題的順利程度决定着理論在發展浮选过程技术方面的实际作用。正像我們的研究工作所指出的那样；从动力学的角度来研究与主要的浮游动作——矿化气泡的形成——同时發生的基本現象，对解决这些問題是必要的。气泡矿化过程的动力学見解，可以确定對於这种典型的非平衡过程（如浮选）具有

决定性意义的新关系。

此外，目前完全有必要以第三个研究方向来补充前面所指出的那两个研究方向。第三个方向包括研究浮选过程的物理学。在浮选过程的实践中表明可浮性的是矿物的浮出率（Флотационный выход），它不仅是浮选基本动作的函数；而且还与浮选过程的许多物理因素有关：如给入矿浆中的空气量、空气在矿浆中分散程度和分布状况、决定气泡与矿粒在悬浮液中碰撞次数的矿物浓度、在碰撞时矿粒附着在气泡上的或然率、附着在气泡上的矿粒重量、在下部泡沫层的过程和在泡沫上第二次矿化的现象，等等。

虽然这些宏观物理学的因素决定着整个浮选过程的动力学和对有用矿物精选的实际价值，但是到目前为止对浮选过程的这些因素的研究却发展得非常慢。

因此，无论是关于药剂与矿物表面相互作用实质的概念、关于决定矿粒固着在气泡上及其动力学的力的大小和实质的概念，或是关于决定整个浮选过程动力学的物理因素的概念，都应当概括在一个完整的浮选理论中。

实际上，运用许多新的原理，并且对浮选过程的主要阶段之间的关系具有新的见解的浮选理论，将是完全新的理论。在这一方面来进一步发展浮选理论对顺利解决实际问题是绝对必要的。

为了进一步发展浮选技术对于下列现象有进行理论研究的必要：矿粒的大小（质量）和形状对形成气泡-矿物的集合体的动力学的影响以及对集合体在浮选悬浮液的涡流中稳固地存在所必需的引力的影响；药剂混合物和悬浮的矿粒对浮选介质中的气泡大小、安定性以及分布的影响；气泡矿化的动力学和与此有关的整个浮选过程的动力学（它往往决定过程的工艺效率）。

同时还应当注意到，浮选理论基础的研究程度——甚至最发达的有关药剂与矿物相互作用的理论部分——对于各组矿物都是极不相同的。如果在前十年间对金属硫化矿物所进行的详细的浮选研究和物理化学研究，可以确定浮选过程的分子机理的基本原理

的話，那麼對於非硫化礦物來說，實際上並沒有進行過這種綜合性的研究。

系統地研究非硫化礦物表面的物理化學性質跟可浮性之間的關係，和從量的觀點來研究藥劑對礦物的作用一樣，到現在為止遠遠沒有完成。由於非硫化礦的工業浮選的大力發展，近年來很多研究工作者都指出了這一點。他們反復強調指出創立令人滿意的非硫化礦物浮選理論基礎而進行系統研究的必要性[104,88]。

本書介紹對各組非硫化礦物的浮選現象和可浮性所進行的綜合性研究的結果，以及在這一個基礎上所制定的非硫化礦物的浮選理論。在這些研究中採用了陰離子捕收劑中最典型的代表——油酸作為捕收劑。

所進行的研究工作，甚至對研究過的各組非硫化礦物都不是詳盡無遺的。很多問題還需要進一步研究。對非極性礦物（煤等）的浮選，以及用陽離子捕收劑進行的非硫化礦物浮選均未研究。在研究浮選過程的物理学方面只是走了第一步。然而，就是這些對非硫化礦浮選系統的但不充分的研究，也使作者得以作出一些作為非硫化礦浮選理論基礎的重要結論，並解釋了許多到現在為止的浮選過程理論中沒有解釋的浮選現象。

弗魯姆金院士和列賓捷爾院士關於下述方面的創樹是理論建設的科學基礎：關於附着力及其機理的著作，在堅固的極性非極性分子層的作用下改變礦物表面性質的著作，和被我們所發展了的大量礦粒附着過程的動力學見解，以及考慮到礦物表面的非均勻性來研究在礦物表面上的附着過程。

發展了的原理不僅對用陰離子捕收劑所進行的非硫化礦物浮選起作用。應當認為，基本原理適用於一切礦物的浮選，並且應當把它用來創立一個共同的浮選過程理論。

第一章

浮选时矿粒附着於气泡上的物理基础

1. 簡述關於矿粒在浮选时附着於
气泡上的机理的学說

泡沫浮选过程的基础就是使矿粒有选择性地附着於气泡之上。浮选时,附着現象的物理基础是許多研究工作的对象,由於这些研究工作創造出許多彼此相互代替的、理論来闡明矿粒固着於气泡表面上的机理及其固着力。研究工作者們研究了浮选时所产生的許多現象(按某些著者的意見为决定浮选的現象)例如:矿物表面潤湿性及确定潤湿性接触角,矿粒和气泡的靜电电荷,矿粒沿气泡表面滑动的速度,矿物——溶液界面上的动电电位和矿物悬浮液的稳定性,浮选溶液的表面張力,溶液的滲透压力,矿粒表面的气膜等等。

矿物表面的潤湿性和矿物的可浮性

浮选动作的理論当中最有根据而且最發展的理論,就是把浸在液体內的矿物表面和气泡間的引力跟互相間起作用的兩相界面上的表面能連系起来的这种理論。因为缺乏直接測量表面能的方法(三相中任意二相),为了从量上来評定表面能可以測量在三相表面相交处所形成的潤湿接触角的大小。矿粒附着在气泡上的結果,产生气泡在已被潤湿的矿粒表面上局部地排挤液体的現象。

關於潤湿性的第一种觀念認為潤湿性是矿物的一种自然性質,並且由它来确定矿物的可浮性〔249〕^①;可是这种觀念很快就被在極性——非極性物質吸附作用下,矿物表面的潤湿性有可能降低的觀念所代替。这种觀念是由古尔維奇〔44, 45〕和郎

① 〔249〕系指參閱本書末頁參考文獻內的第249种書(刊),下同。——(譯者)。

格茂〔232, 233〕發展起來的，他們並且指出：吸附、潤濕、附着和浮選等現象有密切關係。在以後的研究中，就根據這種既新又完善的觀念〔221, 223, 248〕來解釋礦物的可浮性跟礦物表面潤濕性的關係。

列賓捷爾院士及其同事早在1928年開始研究浮選過程的物理化學現象，由於這些研究把浮選理論提高到真正的科學水平，並且確定了礦物的可浮性跟所測出的滯後（最大）接觸角大小的關係。這接觸角是以水滴滴在干的礦物表面上作成的〔118, 124, 126, 127〕。在列賓捷爾學派的著作中確定了最大潤濕接觸角跟捕收劑的濃度以及跟捕收劑浮游活度的關係。

當時列賓捷爾提出以下式中的 F 作為礦物可浮性的單位：

$$F = \sigma_{12} (1 - \cos \theta),$$

式中 σ_{12} ——液氣界面上的表面能；

θ ——潤濕接觸角。

塔加爾特、泰洛爾（Тэйлор）、殷司（инс）〔246〕以及另外許多研究工作者們全研究過幾種捕收劑對礦物的浮選作用跟礦物表面被藥劑處理後所產生的接觸角二者間之關係，但他們的 research 只是確定出降低礦物表面的潤濕性跟提高礦物可浮性之間的性質上的關係。

瓦爾克和他的同事〔158, 150〕在他們的研究工作中，只用測量空氣泡在水介質內的接觸角的方法，來確定在礦物表面上是否有捕收劑的存在。由於瓦爾克的這種測量法不夠靈敏，所以他沒能確定出接觸角的大小跟捕收劑濃度之間的關係（所用的捕收劑濃度在相當小的情況下）。當時，瓦爾克如同塔加爾特一樣承認了為接觸角所決定的潤濕性和可浮性之間有內在關係。於是瓦爾克根據氣泡“附着——不附着”於礦物表面這一特徵來確定礦物的可浮性〔158, 250〕。只是在1939年，瓦爾克才用符合於礦物的部分可浮性這一不完全接觸現象的觀念〔251〕，概括地評定礦物可浮性。

關於礦物可浮性跟接觸角大小之間關係的問題，研究工作者

們，曾在浮选的毛細理論的整个發展阶段加以重視。

从前關於浮选矿物时必须有大於 90° 的接触角为特征的疏水表面的觀念，給出了有系統且方便的說明。这說明很快的就用到薄膜浮选方面，接着又用到現代的泡沫浮选过程。

同时許多研究工作者都指出：就是接触角小於 90° 也能浮选。列宾捷尔 [127] 和在他以后的高登 [225] 都着重的指出了这一点，並且認為只要接触角不等於零，泡沫浮选矿物是完全可能的。其后，許多研究工作者也获得了如此結論。但是，为浮选矿物所必需的接触角的大小这一觀念，在浮选毛細理論的發展的这一阶段中只具有質的性質，而还没有在数量上加以应用。

附着机理这一觀念的新發展阶段是由科学院士弗魯姆金和他的同事的著作 [163, 166] 所奠定起来的。弗魯姆金从理論与实践兩方面研究了在电解質溶液中空气泡附着在汞表面或其他固体金屬表面上所形成的接触角的大小。他並且指出：——固着在表面上的較大气泡的平衡，完全由其表面張力、靜水压力和气泡內的气体压力所决定 [167]。弗魯姆金和卡巴諾夫 (Кабанов) 在1932年对發展浮选附着过程理論导出了頗有价值的气泡平衡方程式（此气泡附着在水平面上）：

$$\pi a \sigma \sin \theta = V g \rho + \frac{\pi a^2}{4} \left(\frac{2\sigma}{R} - H g \rho \right),$$

式中 a ——气泡底的半徑，厘米；

σ ——表面張力，达因/厘米；

θ ——接触角；

V ——气泡体积，立方厘米；

ρ ——液体介質的密度，克/立方厘米；

R ——气泡頂端的曲率半徑；

H ——气泡高度，厘米。

伏尔可娃發展了弗魯姆金的理論，她並且指出当潤湿接触角很小时矿粒也能固着在气泡——溶液的界面上。以后她 [29, 30] 在研究矿粒固着在运动着的气泡的条件时，以瓦尔克的錯誤

观点（即認為在浮选条件下，矿粒和气泡間的脫离力由气泡的上昇力所决定）进行了全部的計算。这样，就改变了她最初認為的關於矿粒固着在气泡上所必須的接触角大小的結論〔29，第1214頁表1〕。

波格丹諾夫（Богданов）〔17〕指出，計算矿粒由气泡上脫离时的脫离力，对离心力有考虑的必要。

我們的研究工作〔194，197〕得到了一个結論，即当接触角小於 10° 时，浮选尺寸的矿粒就可以固着於气泡的表面上。至於有关理論詳細發展情况容留后述。

在浮选条件下，矿粒从气泡上的脫离力随時間而不同。但是，對於气泡在矿漿中决大部分時間，这种力决定於矿粒重量、矿粒的靜水压力向量以及在研究矿粒繞行在气泡上时的平衡条件所不可少的慣性离心力三者的合力。

与瓦尔克和伏尔可娃（Волкова）的看法相反，認為大的接触角对矿粒固着在气泡上是沒有必要的。根据接触角的大小、接触面积和气泡曲率半徑来計算气泡和矿物表面之間的引力，已由弗魯姆金求出的方程式为它奠定了理論基础〔167〕。这个平衡方程式对气泡固着在矿粒表面上的条件的实用性已被苏赫沃里斯卡娅（Сухова́льская）的實驗研究所証实〔17〕。

矿物經過中間膜的附着

另外一些学說認為矿粒附着於气泡上的現象是在过程进行过程中不必形成三相界面的过程。

叶尔奇科夫斯基（Ерчиковский）〔58〕提出一种学說，認為矿粒在气泡上固着的过程中起泡剂具有重要作用，並認為附着就是兩層起泡剂分子互相作用的結果。一層起泡剂在气泡上；另一層在以捕收剂处理后的矿物表面上（二次吸附）。

在泰尔木德（Талмуд）和布莱斯列尔（Бреслер）〔144〕的著作中也提出一种学說，認為在矿粒与气泡的“硬化”吸附層之間存在着一种吸引力。

波格丹諾夫和菲拉諾夫斯基 (Филановский) 發展了泰尔木德的研究，用实验的方法研究了各种矿粒沿气泡滑动的速度。在他们的著作 [18] 中得出一个結論，即当矿粒固着之际形成了三相界面。

当矿粒附着在气泡上时必须要有起泡剂薄膜，这就是泰尔木德和叶尔奇科夫斯基学說在原則上共同的特点。可是当批判地研究所發表的实验資料时，关于这一点並沒有得到充分的証实。我們的經驗 [190, 194, 197, 199] 指出，就是在矿漿里沒有起泡剂而很多非硫化矿粒和一些硫化矿粒也有附着在气泡上的可能。

因此，为使矿物附着在气泡上，無論气泡硬化壁形狀的起泡剂薄膜（根据泰尔木德）抑或二次吸附層形狀的起泡剂薄膜（根据叶尔奇科夫斯基）全都不是必要的。

不採用叶尔奇科夫斯基或者泰尔木德的学說來說明矿物浮选附着时所發生的現象的另一个理由，是在实际浮选过程中研究气泡上起泡剂吸着層的密度时得到的。正如下面的計算指出的那样：在浮选机中气泡上的吸附層的饱和程度很低。

一立方米的空气分散为直徑 D 厘米的球形气泡的絕對表面积等於：

$$S' = \pi D^2 \times \frac{6 \times 10^6}{\pi D^3} = 6 \times 10^6 \times \frac{1}{D} \text{ 平方厘米。} \quad (1)$$

於是浮选一吨矿石消耗气泡的总表面积为：

$$S'_1 = 6 \times 10^6 \times \frac{mq}{Dp} \text{ 平方厘米，} \quad (2)$$

式中 m ——浮选机开动的槽子的数目；

q ——在每一浮选槽內空气平均消耗量，立方米/分；

D ——气泡平均直徑，厘米；

p ——給矿量，吨/分；

對於周期給矿量为 Σp 的实验室用單槽浮选机，每吨矿石所消耗的空气表面积等於：

$$S = 6 \times 10^6 \times \frac{qt}{D \Sigma p}, \quad (3)$$

式中 t ——在浮选槽中的浮选时间，分。

對於容量为 18 升的實驗室用的浮选机，确定出其空气的消耗量为 18.4 升/分。如果浮选矿石的平均时间为 10 分鐘，給矿为 4.5 仟克，气泡的平均直径为 0.5 毫米，則空气分散后的（換成在这种實驗室用的浮选机內，浮选一吨矿石所需要的）总表面积等於：

$$S_1 = \frac{6 \times 10^6 \times 18.4 \times 10^{-3} \times 10}{0.5 \times 10^{-1} \times 4.5 \times 10^{-3}} = 4.9 \times 10^8 \text{ 平方厘米。}$$

單一分子層厚的有机起泡剂，它所佔据的面积为：

$$S'' = \frac{w \cdot c \cdot A}{M}, \quad (4)$$

式中 w ——一个起泡剂分子所佔的面积；

A —— 1 克分子的分子数；

M ——起泡剂的分子量；

c ——起泡剂的消耗量，克/吨（矿石）。

假設一吨矿石 ① 的起泡剂的消耗量为 50 克，起泡剂的平均分子量 M 等於 160，分子断面积定为 $20 \text{ \AA}^2$ ，則起泡剂（單一分子厚）的总表面积为：

$$S_1'' = \frac{w \cdot c \cdot A}{M} = \frac{20 \times 10^{-16} \times 50 \times 6.06 \times 10^{23}}{160} = 3.8 \times 10^8 \text{ 平方厘米，} \quad (4a)$$

即等於浮选矿石所消耗气泡的总表面积的 8% 弱。

在这样低的饱和度下，吸附層的强度很弱。因此泰尔木德關於气泡上未飽和吸附層的相对机械强度的結論，只在起泡剂的濃度大於浮选所用的濃度范围时才能适用。

即使採用叶尔奇科夫斯基關於在水——空气界面上吸附起泡剂分子的水化物的学說 [58] 但吸附層的饱和度仍然不足以使吸附層具有較高的强度。

① 浮选非硫化矿石和硫化矿石一般的起泡剂消耗量。

不用任何其它浮选剂，只用黃藥，即能浮选方鉛矿，而且溶液空气界面所吸附的黃藥並不多。这就証明了，浮选矿物时，存在起泡剂的中間膜那是不必要的。在叶尔奇科夫斯基和古格里（Гугель）的著作〔59〕，叶曼努依洛娃（Эммануилова）和波德涅克（Поднек）的著作〔212〕以及拉維奇（Равич）和波尔捷尔（Портер）〔239, 240〕等人的著作中都証明了这一点。

上列各种实验数据和各种观点全都指明了，矿物附着在气泡上非有起泡剂薄膜不可的学說並沒有得到証实。当然，我們在原則上並不否認，在空气分散时在气泡表面上所生成的不平衡的吸附層，對於气泡跟矿物間的中間液体膜的破坏过程能有相当影响。可是，对这个問題的实验数据还不够充分，因而有待於进一步进行研究。

同时，由於在弗魯姆金〔164, 165, 167〕和傑良金〔50〕的著作中發展並奠定了新的毛細理論，對於矿粒通过中間層来附着和三相附着的观念的另一原則性区别目前亦不复存在。这些著作人的研究工作指出，当气泡附着在金屬或矿物表面上时，中間液体層先被破坏，然后这种余下来的一个分子厚或多分子厚的薄膜就殘留在固相表面上。正如卡巴諾夫和伊万尼亲科（Иванищенко）的著作〔64〕所指出，溶剂化物層的厚度随同接触角的增大而减少。在液体膜气泡界面上能进行表面活性物質的分子的吸附作用，其中包括起泡剂分子。

目前，弗魯姆金所發表的学說与塔加尔特〔264〕、瓦尔克〔157〕以及其他研究工作者的观念相反，他認為在浮选附着时，在气泡下面很少有可能还有完全干的矿物表面存在。列宾捷尔〔124〕、維塞洛夫斯基和別尔措夫（Перцев）〔23〕也都得到了如此結論。弗魯姆金及其同事的著作，首先确定在气泡附着於固体表面上的过程中浸入溶液中的表面的状态的观念，从而确定剩余薄膜的厚度和潤湿接触角的大小都在不断变化，而接触角只有在剩余水化物層变得很厚时才能消失。当浮选精矿中含有被潤湿的矿粒时，这种新的观念和浮选过程实践很相符。