

Б. Я. 皮涅斯

細聚焦 X 射綫管
及其在
結構分析中的应用

科学出版社

Б. Я. ПИНЕС
ОСТРОФУКУСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ
ТРУБКИ И ПРИКЛАДНОЙ
РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

ГИТТЛ, Москва, 1955

內 容 簡 介

X射綫結構分析已經广泛地应用于各門学科。近代科学的日益发展，要求提高实验的灵敏度和精确度。在X射綫結構分析方面，提高原始X射綫源的强度，是达此目的的方法之一。本书所叙述的在X射綫管里造成細焦点，是提高X射綫光源强度的一种办法。这种方法不但可以提高比功率，同时还可以在X射綫照相上得到更細的干涉綫，从而提高研究的精确度，所以这种方法是很有效的。

本书主要包括两部分，第一部分介绍了細聚焦X射綫管，第二部分介绍这种管子结构分析中的应用。

本书可供从事物质结构研究工作的物理学工作者和工程师阅读，也可供X射綫分析专业的高年级大学生和研究生阅读。

細聚焦 X 射綫管及其在
結構分析中的应用

Б. Я. 皮涅斯 著

何 肇 譯

*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 6 月第一版

书号：2741 字数：182,000

1963 年 6 月第一次印刷

开本：850×1168 1/32

(京) 0001—2,500

印张：7 插頁：4

定价：1.30 元

序 言

X射綫結構分析,特別是实用結構分析(即所謂結構X射綫学(структурная рентгенография)),在苏联早已有了广泛的应用和很大的发展。

1936年在德涅伯罗彼得罗夫斯克城召开的全苏X射綫會議,說明了在当时X射綫結構研究已經在我們的各个科学部門及技术部門中有了广泛的、多种的应用。以后在1948,1950及1952年在列宁格勒召开的第二、三及第四次全苏X射綫會議所出版的資料,更进一步証明了苏联的X射綫結構分析工作后来又有了显著的成长和发展。

但随着X射綫結構研究方法的普遍应用,这些方法的某些局限性逐漸表現出来,它們的缺点也暴露得更突出了。例如,由于近来在探索結構的“精微細节”方面的要求提高了,要想作出完整的結構描述就发生很多困难;在第四次全苏X射綫會議上就曾对这些困难进行了討論(对B. И. 阿尔哈洛夫教授总结报告的討論^[61])。

为了使X射綫結構研究的結果能够更完整地反映物質結構和性質的特点,必須提高实验的灵敏度和精确度,并对X射綫被物質散射实验作进一步的理論上的解释。但是,即使在X射綫学目前所处的状态下,如果能把原始X射綫源的強度提高,也可以使結構分析方法、特別是实用結構分析的方法得到一定的改善。有許多本来需要曝光极久,因而非常費事的X射綫照相方法,在光源強度提高后都会变得更加适用了。

本书所叙述的是提高X射綫源強度的一种办法,即在X射綫管里造成細焦点,这是一种很有效的办法。它不仅可以提高比功

率¹⁾，而且同時還能在X射綫衍射照相上獲得更細的干涉綫，從而提高研究的精確程度，可謂一舉兩得。

本書是為了執行1952年1月在哈爾科夫召開的強單色X射綫源會議的決議而寫的。書中也包括作者及其同事們（В. Д. 別斯維爾希，А. И. 布卜立克，В. С. 科干，И. В. 莫扎洛夫，А. Ф. 西連科）的工作結果，以及在哈爾科夫的其他實驗室中在上述工作基礎上進行研究的結果。Н. И. 山得列爾和М. Я. 福克斯為本書提供了若干幅插圖，作者謹對他們表示感謝。

本書可供從物質結構研究工作的物理學者和工程師閱讀，也可供X射綫分析專業的高年級專科學生及研究生閱讀。我們假定本書讀者至少已知道А. И. 基達依哥羅茨基、А. К. 特拉別茲尼可夫及Я. С. 烏曼斯基所著“X射綫學”教本（М., Машгиз, 1952）中所講的X射綫學方法。此外，在討論結構分析問題時，還認為讀者知道X射綫被物質散射的基本理論。

1) 指焦點單位面積所負荷的功率，見后。——譯者注

目 录

序言..... v

引論. X射綫結構分析作为一种測定物質构造的手段.

它的可能性,应用范围和前途 1

第 一 部 分

特細聚焦的X射綫管

- § 1. 結構分析用的X射綫管的特征簡述15
- § 2. 使用細聚焦的价值及获得細聚焦的一般条件19
- § 3. 在电子式X射綫管中利用“聚焦”电极获得特別細的、
大小可調节的焦点的方法28
- § 4. 苏联式的点状細聚焦拆卸式X射綫管的构造33
- § 5. 具有特別細的綫状聚焦的X射綫管43
- § 6. X射綫管中聚焦电子束的其他方法(磁透鏡,利用
“柵偏压”).....44
- § 7. 細聚焦管及旋轉阳极管的比功率59
- § 8. 各种管子的焦斑大小和比功率的对比66
- § 9. 脉冲式的細聚焦X射綫管68
- § 10. 运用細聚焦管时的几点注意71

第 二 部 分

細聚焦X射綫管在实用X射綫結構分析中的应用

- § 1. 結構分析在研究金属、合金及无机物質时最重要的
应用74
- § 2. 圓柱状的及平面的多晶体試样干涉綫条的聚焦(考
慮到強度分布問題).....84

§ 3. 利用細聚焦管拍摄 X 射綫衍射相时对于相机构造的要求.....	93
§ 4. 根据多晶体照相精确測定晶胞大小.....	98
§ 5. 用 X 射綫方法同时測定非立方系多晶物体的某些点陣恆量 and 主热膨胀系数.....	106
§ 6. 第一类内应力的測定.....	111
§ 7. 多晶体中的点陣畸变及晶粒細碎現象在 X 射綫衍射照相上所引起的綫条模糊效应.....	116
§ 8. 多晶体衍射照相干涉綫条形状的諧波分析.....	125
§ 9. 細聚焦管及 X 射綫“微光束”.....	135
§ 10. 利用綫状聚焦造成会聚光束以摄取单晶体衍射相的“精微方法”.....	140
§ 11. 結構研究工作中照相所用 X 射綫的单色化, 晶体单色器.....	147
§ 12. 細聚焦管在投影 X 射綫显微术及吸收 X 射綫显微术中的应用.....	155

附 录

对多晶体 X 射綫干涉綫条形状进行諧波分析用的“条子”表

I. 表的說明及用法	160
II. $A \cos 2\pi lx'$ 数值表	164
III. $A \sin 2\pi lx'$ 数值表	188
参考文献	212
人名对照	216

引 論

X 射綫結構分析作为一种測定物質構造的手段。它的可能性,应用范围和前途

1. 在自然科学的許多領域(物理学、化学、矿物学以及生物学)里,最重要的任务之一就是确定物体的“結構”,并且闡明它与物体被观察到的全部性質間的联系規律。

實質上,結構(广义地理解作构造,即指物質如何由其基本成分組成)决定性質这一观念,是貫穿在全部近代自然科学之中的,这个普遍的观念乃是因果律的直接結果,因而是許多科学的基本思想。

当然,結構的概念和具体的結構特征(結構要素)对于不同种类的物体是不同的;并且在每一个領域里它們都曾經历了許多的发展阶段,而且仍在繼續精确化和細致化。

至少对于无机界的客体(下文中将只考虑此类客体)來說,可以指出結構学說发展的一个重要特点:即在每个新的发展阶段上,以前所知道的結構特征不是被取代了,而只是得到了补充和扩展,而总的特征則由一系列具有不同“近似程度”的特征逐漸累积形成,結果变得愈来愈詳尽細致。如果实验定出的某些結構要素,能使我們根据已有的理論概念来理解物体全部具体性質的产生条件和产生机制,則这些結構要素当然是最重要的。但也有某些結構特征,它們和物体性質之間的相互联系虽然没有得到解释(或解释得不充分),有时却也具有很大的实用意义;这时相应的結構要素可能充作用其他方法所不能或很难直接决定的某一类性質的指标。

在宏观近似下,任何一个均匀的物体都可以描述为“連續的”

介質，它的性質可用某些恆量（例如電導係數、介電恆量、彈性恆量、強度恆量等等）來決定。而這些恆量的數值則由物體的成分和“內部構造”決定。在對現象進行唯象的描述時，不必涉及這些恆量的來源，可以把恆量當作預先給定的。

即使在宏觀的近似下，如果物體是非均勻的，也就是說，是由不同的均勻部分（具有不同的性質恆量的部分）組成的話，物體也可以具有某種結構的特徵，即所謂“宏觀結構”的特徵。

為了描述宏觀結構，需要說明組成非均勻物體的各均勻部分的大小、形狀和相互排列位置（這時還須預先給出每一部分的相應的性質恆量）。既然所談到的是宏觀的不均勻性，自然是假定各部分的尺度是宏觀的，也就是說，它們的數量級和物體的尺度相同。很明顯，對於一個具有確定的宏觀結構的物體，如果給定了它的結構特徵（其中應該包括各部分的性質恆量），則至少在原則上永遠可以單值地確定這個不均勻物體的性質和它在外界作用下的行為。為了具體地定量地確定其性質，當然還需要知道由非均勻物體中各個部分的恆量組成整個非均勻物體的恆量的規律（“平均”規律）。

實際上，只有在最簡單的情形（例如恆量是可相加的情形）下才可以利用結構數據來決定非均勻物體的恆量的數值。但是在很多情況下，根據結構知識作出的定性的結論也往往具有多方面的重要的實用價值。

一個物體（或它的一個部分）即使是有完全均勻的宏觀性質，但在逐步過渡到較小的尺度，即“微觀的”尺度時，仍會顯示出不均勻的構造；也就是說，它可能是由許多各不相同的微觀的——尺度可用光學顯微鏡測定的（ 10^{-2} — 0.5×10^{-1} 厘米）——區域組成的。這種構造特徵的描述就是通常用顯微鏡方法發現並確定的所謂微觀結構。具體說，一切多晶物體（即使是相當於熱力學上單相系統）都具有微觀結構，這種微觀結構的特徵可以用不同取向的晶粒的形狀和大小來表示。這裡我們假定了晶粒的取向是混亂的；否則，要描寫物體的結構狀態還需要說明晶粒取向的規律性，即所謂

織构(可參看[2]);这时单靠顯微鏡已不够了,还要利用X射綫分析方法来进行研究。

應該注意,在有織构存在时,多晶物体是“統計地”(即由于全部微观区域中性質“平均”的結果)各向异性的。

如果物体是由两个(或更多个)相的晶体組成的,則在描写其微观結構时,不仅要給出各相的性質恆量,还应說明所有各个相的晶体的形状、大小和相互排列状况。如果有織构时,則其描写还要复杂些;这时还需要指出每一相的晶体的取向規律,以及各个相的晶体相互取向間的規律。

在“微观描写”的近似下,物体的个别部分(单晶区域)虽然是各向异性的,但仍可看作是連續的和均匀的。即使多晶体各个晶粒的綫度比可見光的波长小(即其綫度在 5×10^{-5} — 5×10^{-7} 厘米范围内),用光学顯微鏡已无法鉴别各个晶粒,在描写結構特征时原則上仍可利用这种(微观)近似。在实验上可以用例如电子顯微鏡来研究其“亚微观結構”。

当物体中存在一定的微观結構时,对各个取向不同的晶粒求性質恆量的“平均”的方法,与存在“宏观結構”的物体中的平均方法可以有所不同。由于各部分的綫度小,表面效应可能开始起一些作用(因为物体的总的“内部”面积是相当大的)。此外,不同取向的許多晶粒的性質¹⁾将具有随取向角而連續变化的“一套”恆量,这是在宏观結構中所沒有的。

到現在为止,实际上还没有一种可以根据微观結構求得物体性質的平均恆量数值的定量的計算方法。

但是根据微观結構定性地估計物体各种性質的方法却应用得很广泛,象金相学、岩石学之类的研究中都用到这种定性的估計方法。

上述“微观結構”的和“宏观結構”的描述,实质上只是唯象地描述了不均匀物体的特征(相应于不同尺度和不同来源的不均匀

1) 指在該晶体中具有各向异性的那些性質。

性)。

当綫度变到相当于原子或分子的大小($\sim 10^{-8}$ 厘米)时,得到原则上与此不同的另一种結構特征。这时測定結構就是要确定物質原子的相互排列位置;在晶体中,这种排列在任意远的距离上都是規則的——即具有严格的周期性(亦即具有“长程”序),而在非晶态的或液态的物体中,只有距离任一原子很近的地方才保持着“規則性”(“短程”序)。

完全地描写晶体的“原子結構”,只需說明所謂晶胞的构造^[2-8]就够了,因为整个晶体就是由相同的晶胞向各方向重复排列构成的(晶胞的形状是平行六面体)。描写晶胞时,首先,要說明它的形状和大小,亦即說明三个不共面的軸(晶胞就是以这些軸作为稜边建造起来的)的长度和它們之間的夹角。其次,要給出一个晶胞里面所有原子(在某些情形下可以是离子和分子)的坐标。这样,既說明了各个原子的相互位置,也决定了原子間的距离。

至于非晶态物体的結構,則可以用所謂原子間距离的分布函数来描述^[7],这种分布函数表明两种原子 A 与 B (或同一种原子 A 与 A) 的中心相隔某一距离 r_{AB} 的几率。知道了这个函数,也就說明了該种短程序的特征。

根据关于凝聚态物体的原子結構以及原子間互作用(結合)力的知識,在原則上应能从理論上求出該种物体全部性质的恆量。不过这个問題的解决目前还处于开始阶段。現在用計算方法只能求出最簡單的离子性晶体及金屬晶体的某些恆量^[15,16,17]。此外,关于各种物質原子結構參量的比較数据也在很大的程度上丰富了有关決定某些性质的結構特点的知識,因而在許多情形下有可能根据結構数据而对性质作出定性的估計^[14,18]。

根据描述結構时所用的不同尺度,就得出不同近似程度的結構特征;上述的結構特征体系虽然包括了宏观、微观以及“原子”的結構,但对于晶体來說,还絕不能認为是把一切情况概括无遺了。实验表明,只有很罕見的情况下才能認为晶体物質是由晶胞理想地、規則地、几何上精确地重复排列构成的(理想晶体)。在絕

大多数情形下，“实际晶体”和各种多晶体中的晶粒都是由所謂“嵌鑲”块或碎块（фрагменты）組成的，各块相互之間張有不大的角度（几十秒至几分之一度不等，个别情况下可达几度）。实际晶体的“嵌鑲結構”或“块結構”可以在很大范围内变化；定量地說，可以用以下两个数值变化很大的参量来表征它的結構：a) 嵌鑲块的綫度（指平均大小；当然也可以講“块”的大小及其分布），及 b) 各块間取向差的角度。

晶体具有嵌鑲結構，說明它偏离了相当于热力学平衡的状态；但即使在高温下这种偏离也可以长期地存在，并对物体的性質起重大的影响。

除嵌鑲結構外，在晶体中还有因为原子的“規則的”排列被破坏而引起偏离平衡状态的其他情形。如果晶体在非平衡条件下結晶或者受到范性形变而使規則的結構遭受破坏，这种破坏可以部分地描述为出現了点陣的“畸变”或“微形变”，同时在晶体內形成某种极度細碎的“相干性散射区域”；但通常并不能确定这种区域与晶体原来的嵌鑲块之間的单义关系。

上述这些效应还没有完全包括晶体結構偏离規則的、平衡的（指热力学的平衡）“点陣”結構的一切情况。

用实验方法观察晶体中实际存在的（并且对性質有重大影响的）所有各种偏离平衡状态的现象，至今仍然是一个没有完全解决的很有意义的問題。

2. 結構研究之所以有巨大的实用价值，主要是因为从經驗中已經知道物体的性質和結構之間有着根本的联系。結構对于性質影响的程度，常常比成分的影响还大。首先可以在金属及合金中找到大量的例子。例如热处理可以改变金属及合金的結構，从而使其性質发生預期的变化。因此金属和合金結構的研究工作久已广泛地流行，并已获得多方面的应用。还可以举出許多他种物体，特别是晶体，它們在成分不变的情形下具有很不相同的結構状态。例如自然界中分布很广的二氧化硅就有八种形态：石英玻璃， α 及 β 石英， α 、 β 及 γ 磷石英及 α 及 β 方石英。每一种形态都有自己

的“原子結構”，而且物理性質(熱學、光學、機械等性質)都不相同；例如只有 α 石英具有壓電性質。雖然在一定的溫度(及壓力)下，上述諸形態中只應有一種形態相對於熱力學的平衡狀態，但實際上卻可以發現各種非平衡狀態(特別是在低溫下)，即石英、磷石英、方石英及石英玻璃長期共存。我們知道，結構成分(即磷石英、方石英、石英及玻璃質的含量)也和“微觀結構”一樣，對於硅酸耐火材料(硅磚)的性質有極大的影響。

同樣地， TiO_2 也有三種結晶形態：金紅石、銳鈦礦及板鈦礦； MnO_2 的形態有軟錳礦、鉀硬錳礦、拉錳礦等。此外當然還有大量類似的例子。

上面已經說過，即使是單相晶體的結構狀態(原則上結構狀態也就決定了物體的全部性質)，也並不能完全由結晶形態來決定。各種偏離晶體規則結構的現象，其中特別是由於晶體的生長條件與平衡條件相差很遠或晶體受外力作用等原因而產生的點陣畸變，對物體的性質也有重要的作用。最簡單的例子是冷加工或“加工硬化”的金屬，它雖然還保持原來的結晶形態，但由於發生了“點陣畸變”，性質(特別是機械的和電學的性質)發生了很大的變化。還可以舉出技術上有各種應用的氧化鎂作為上述情形的另一個例子。

如果把天然菱錳礦 MgCO_3 在高溫($\sim 1500^\circ\text{C}$)下焙燒，則得到所謂“死燒鎂砂”，它沒有粘結性。但在中間溫度($500-800^\circ\text{C}$)焙燒則得“苛性鎂砂”，它與 MgCl_2 混合時可以凝結(索勒水泥)。苛性鎂砂的成分和結晶形態都和“死燒”鎂砂一樣。二者都由碳酸鹽 MgCO_3 熱分解時產生的方錳石 (MgO) 晶體組成。二者性質的差別是因為苛性鎂砂的晶粒非常細碎；也有可能是由於它的點陣有畸變的關係。此外，苛性鎂砂的特點還表現它在燒結及固態反應等過程中的“活性”較高。

3. 在歷史上，細晶粒物體的結構研究工作起初是利用光學顯微鏡進行的；早在 1840 年，П. П. 安諾索夫即已首次將這種方法應用於金屬。由於 Д. К. 契爾諾夫發現鋼的結構變化，合金結構

的測定工作的原則上和實踐上的重要意義就十分明顯了。在合金的顯微研究的發展過程中，A. 李沙得利耶，G. 塔曼，A. A. 貝可夫，H. T. 古德佐夫，A. Л. 巴鮑申，H. T. 契熱夫斯基等都作了許多工作。

測定合金的顯微結構在今天具有十分顯著的實際價值。以退火狀態的鐵碳合金為例，根據微觀結構的資料不僅能說出合金的成分(含碳量)，而且還可以大約估計其機械性質；如果合金是淬火的，或者更普遍些說是處於非平衡狀態，則根據顯微鏡的研究也能以完全確定的方式闡明它所經歷的熱處理的性質。

經驗表明，合金的顯微結構(可用光學顯微鏡測定)在很多情況下都是其性質的有效判據。不過“顯微結構”顯然並不能把晶體構造上的全部特征包羅無遺。顯微鏡的研究可以確定晶粒的形狀及大小(假定其大小超過可見光的波長)、各種“結構成分”的含量比、各成分晶粒的相互排列情況等等。至於有關組成物體的這些結構成分的本身，也就是組成物體的不同成分和不同結構的晶粒本身狀態的知識，則通過顯微鏡的研究所能獲悉者甚少。例如，可根據光學性質(透明晶體的)或根據化學的或所謂“真空的”鑲蝕¹⁾所顯示出來的“晶粒”形狀來“辨認”各個相的晶粒。此外通過“顯微硬度”的測量也可以提供關於各個相的機械性質的補充資料。

但是象確定各個晶粒的相互取向這種問題，就無法從顯微觀察得到解答。在實際工作中對於另一些問題，如個別晶粒中固溶體的濃度、濃度的不均勻分布²⁾、由於范性變形等原因引起的使性質發生重大變化的內應力及點陣畸變等情況，也時常感到無從知悉之苦。

當組成物體的晶粒很小時，顯微鏡研究的方法也就顯得不充分(甚至不適用)了。在金屬合金及其他物體(如陶瓷材料)中都會

-
- 1) 真空鑲蝕的方法是將樣品在真空中加熱；由於晶粒邊界附近的部分發生了選擇揮發，使晶粒的輪廓得以顯現。
 - 2) 濃度的不均勻分布問題可用所謂顯微X射綫照相的方法來察知(見157頁)。

出現这种情况。耐火粘土的性質就与鍛烧过程中多鉛紅柱石的形成情况有很大的关系。但由于这种多鉛紅柱石晶粒的大小一般不超过 10^{-5} 厘米,所以不能用(光学)显微鏡測定其含量。近来由于电子显微鏡的应用,已使显微方法的应用范围大为扩展;利用电子显微鏡可以观察有机界的极小的物体(如病毒)以及极小的无机物体(如粘土矿物的晶体及薄层结构的共析合金等)。虽然在个别的情形下,对巨大物体进行电子显微鏡观察所需的特殊技术(制备所谓的“复型”,見[19])尚未研究完善(例如对多孔性物体进行研究即有困难,而几乎所有陶瓷材料都是多孔性的),但总地說来,电子显微鏡无疑已为結構研究提供了很大的新的可能性。

但是,即使是电子显微鏡的研究也不能包罗一切的结构特征。原則上它和光学显微鏡具有同样的局限性,即仅能确定組成物体的粒子的形状及大小,而不可能对于粒子本身结构的特征作完整的描述。后一任务在今天是依据 X 射綫、快速电子及其他粒子(如中子)受物质散射的实驗資料求得解决的。在晶体中,当散射射綫的方向滿足所謂烏尔夫-布喇格公式时,出現散射綫的“干涉极大值”。根据这些极大值的位置可以求出晶胞的大小和形状,根据干涉极大值的强度又可以确定原子在晶胞中的排列情况。这样一来,研究波长够短(波长約与原子間距离同数量級)的輻射受晶体物质散射的現象,就可以測定晶体的原子結構。根据某种射綫受晶体散射的实驗資料測定晶体原子結構的方法就称为結構分析;这一术语現在已得到公認。

我国有許多卓越的学者都对結構分析的发展作了巨大的貢獻: E. C. 費道洛夫創立了关于决定晶体中原子(离子、分子)排列規律的空間对称羣(230个費道洛夫羣)的学說; Г. B. 烏尔夫确定了(与布喇格及劳厄同时) X 射綫受晶体散射时的衍射基本条件;近来 H. B. 別洛夫院士、Г. B. 庫尔久莫夫院士以及其他許多研究工作者都有很大貢獻。

結構分析的方法(即根据短波长輻射受物质散射的資料以測定原子及分子位置的方法)应用于探求液体及非晶体的“結構”方

面也很成功；借助于結構分析的方法，已确定这类物体中原子及分子的排列有所謂“短程序”的特征。对于X射綫及快速电子受气体散射的研究工作，又可提供关于原子內电子密度的分布情况及分子內原子分布情况的知識。因此，結構分析是測定物質原子構造的有效方法；近年来，由于应用結構分析方法，已經知道了很多关于凝聚相形成的重要規律。結構分析的应用范围日益扩大，今天已經把很多种有机物質也包罗进去了^[7]。

从本質上講，利用結構分析所得到的关于原子結構的知識只是一种資料，应当以这种資料为根据而創作出关于結構及性質間相应关系以及关于原子結構形成規律的完整图景。今天虽然还未能解决这个普遍性的任务，但在許多晶体物理及晶体化学的著名的研究工作中，已根据現有的实验資料成功地概括出很多重要的关系了^[13,14,18]。

4. 除了具有重要理論价值的关于原子結構的知識外，用結構分析方法还可以确定物体的某些可以直接用来解决实用問題的結構特征。特別是在晶体方面，根据散射花样的研究所得的各种結構特征更是多种多样，饒有兴趣。例如，很容易測定沒有天然晶面的单晶体的取向；可以找出“統計地各向异性”的多晶体中晶粒取向的分布情况——这就是所謂織构測定的內容。

晶胞大小的准确（精密）測定具有多种的应用。具体說，根据晶胞大小不难找出固溶体的局部浓度。如果在外力（或內力）作用下晶体点陣中“晶面間”距离发生了改变时，測量其改变值与角度的关系，即可确定物体中存在的受胁状态的图景。多晶体晶粒的細碎程度在相当大范围内很容易用結構分析方法測定，而且不仅能求出晶粒的平均大小，还能求出晶粒大小的分布函数。对于点陣处于不平衡状态而且不完全規則的某些晶体，进行結構特征的描述也是很有意义的。至于所謂点陣畸变，則可能在晶体从熔体或溶液中在不平衡条件下生长时产生，也可能在范性形变时产生；它还可能是成分不均匀的合金的結構发生变化的結果等等。多晶体的不平衡状态在技术上应用很广。要决定金属和合金不平

衡状态的結構特征,只有依靠結構分析的方法。

还应当提到一个有趣的現象,即固溶体的“有序化”,其存在和程度多少可以用結構分析方法单独地測定。

利用結構分析方法測定不均匀物体的物相成分也应用得很广。它可以确切地“辨認”物质,几乎不受晶粒細碎程度的限制;而且如果某一相是固溶体,还可以指出其成分,弄清楚它的状态(平衡与否,是否有規則的取向等等),这在很多情形下是很重要的。例如,在淬火鋼中,不仅可以确定馬氏体的含量,而且可以測定其四方点陣的“軸率” $\frac{c}{a}$,并測定馬氏体相中晶粒的細碎程度。

上面列举的例子不可能將結構分析的各种应用包罗无遺;其原因也是因为 X 射綫結構分析方法的进一步应用,特别是对不平衡状态的研究方面的应用,是不断地发展着的。

当然,我們不能把測定“原子結構”的結構分析工作和探求补充的(实用的)結構特征的結構分析工作截然地加以划分。不过对于在某些方面表现出均匀性和不平衡性的物体,它們的一些結構特征是与某些性质的变化直接地联系着的,因而我們有足够的根据可以把測定这些結構特征的实用結構分析划成一个单独的領域。在下文中我們要討論的主要是实用結構分析方面的問題。

为了印証上述意見,可以指出 B. И. 阿尔哈洛夫^[6]在估計实用結構分析的各种可能方法时,曾为方便計把它們归为下列基本类型: 1) 定量的和定性的物相分析及固溶体的浓度的測定; 2) 纖維学 (текстурография) 或多晶体的晶粒取向分析,着眼于晶粒取向的一致性及其晶体学的特征; 3) 晶粒度測定 (дисперсография) 或多晶系統中晶粒大小及形状的測定; 4) 胁強測定 (тензография) 或內应力分析及点陣弹性畸变的分析,可以根据沒有显著应力梯度区域的尺度大小而細分为三种基本类型; 5) 晶体不平衡状态 (陈化的初始相和中间相,反应性的扩散,固态中的化学反应)所特有的精細結構特征的分析; 6) 晶体嵌鑲结构的分析; 7) X 射綫显微术 (микрорентгенография) 或金相显微結構的 X 射綫吸收分析

(рентгеноабсорбционный анализ) (显微透视并将照片放大)¹⁾。

这里所列举的实用X射线结构分析的各种类型，可说是基本上够完全了。至于说怎样把它们加以分类，自然还可以有别的办法。譬如说，第1)类无论从结果上或从研究方法上看都可以自然地分为两类：物相分析通常都是根据强度测量的数据进行的，而固溶体的浓度分析则依靠精密地测定点阵常数。第3)及6)类在内容上相互呼应而在实质上可以统一起来，等等。

由此可见，利用实用结构分析可以得到关于复杂多元晶体系统的细致结构特征的多方面的知识。

5. 如上所述，结构分析的数据是从研究X射线或快速电子受物质散射的现象得到的。根据电子衍射的特性，只有当物质层的厚度不超过 5×10^{-6} 厘米数量级时才能观察到衍射现象。因此电子衍射只适用于研究物体极薄的表面层或极薄的膜。这并不妨碍利用电子衍射来测定物质的“原子结构”以及用它来找出薄层物质的其他结构特征。但除此以外，还有很大数量的实用结构分析问题是涉及体积结构效应的，要测定它们，又必须借助于X射线方法。利用后者可以观察0.1毫米或更厚的层中的衍射效应。我们知道，电子衍射方法和X射线衍射方法相比，其光强要强得多²⁾。电子衍射虽然有这个重要优点，但在实用结构分析中主要的研究方法还是X射线方法，因为只有用它才能记录体积的结构效应。

下文仅涉及X射线的结构研究方法。

6. 目前，X射线衍射方法的各种可能性在原则上并没有完全被利用，尤其是在研究不均匀非平衡系统方面更是如此。例如说，如果把所谓的实射的“弱”效应加以记录，即不仅记录干涉极大线条的位置和强度，而且也研究漫散射的强度，则还可以从X射线方法中得到更多的关于物质结构的知识。显然，要想可靠地记录漫

- 1) 用X射线显微术的方法可以察知普通显微镜研究方法所不能看见的不均匀性的分布。因此X射线显微术和光学显微术不互相排斥，而互相补充。
- 2) 电子衍射花样可以在荧光屏上用目视方法观察；这是X射线衍射至今还作不到的。电子衍射图可以用几分之一秒或几秒的露光时间记录在照片上，而要得到X射线衍射照相则需要数分、数小时乃至数十小时的露光时间。