

Comparative Crystal Chemistry

# 比较晶体化学

罗伯特·M·哈曾

拉里·W·芬格

中国地质大学出版社

高等学校教学参考书

# 比较晶体化学

温度、压力、成分和晶体结构变化

〔美〕罗伯特·M·哈普

拉里·W·芬格

沈今川 束今赋 译

中国地质大学出版社

1988

Comparative Crystal Chemistry

R. M. Hazen L. W. Finger

(1982)

比较晶体化学

沈今川 束今赋 译

责任编辑 赵福堂

中国地质大学出版社出版

(武汉市喻家山)

湖北省新华书店经销

湖南省地矿局402印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张 11.625 字数 284千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数1—700册

ISBN 7-5625-0240-4/O·11

定价：2.40元

## 译者的话

比较晶体化学是近几年发展起来的一门新的晶体化学分支，其主要研究对象是非常温常压条件（高温、低温及高压）下各种结晶材料的结构及性能变化，这对于研究主要生成于地下高温高压条件下的矿物的晶体化学特征及探讨各种人工合成材料在高温高压条件下的结构及性能的变化无疑均有重要的理论意义及实际意义。

由于近年来高温高压实验技术的飞跃发展，目前已经可以在实验室内获得高达数百万巴的高压及摄氏数千度的高温。与四圆单晶衍射仪联机压力达10万巴的高温高压单晶衍射实验装置已进入设计制造阶段。以同步辐射为光源、将高温高压实验技术与X射线衍射、傅里叶变换红外光谱及穆斯堡尔谱结合起来的实验装置已经或正在建立。这为我们在接近地下深处矿物生成时真实的物理化学条件下，对其性能进行深入研究提供了有效的手段，为我们展示了光辉的前景。

本书是由美国华盛顿卡内基研究所的两位著名学者Robert M. Hazen和Larry W. Finger撰写的。他们都是这一领域的开拓者，M. Hazen 1975年在哈佛大学获矿物学和结晶学博士学位。在进入卡内基研究所之前是英国剑桥大学 NATO（北大西洋公约组织）的研究人员，他的研究领域主要是高温高压结晶学及造岩矿物晶体化学，1982年曾因在高温高压研究工作方面的成就获美国矿物学会奖，他还是有关美国地质史方面的三本书的作者或编辑。W. Finger 是设计制造由计算机自动控制的X射线及电子衍射实验系统的专家，1967年在明尼苏达大学获物理学博士学位，此后即进入华盛顿地球物理实验室卡内基研究所，1975年和1979年他曾担任美国矿物学会秘书。

本书系统地介绍了在高温高压条件下进行X射线衍射实验所必需的理论基础知识及实验技术。特别是对各种装置的基本原理、结构、优缺点、调试方法、操作步骤等在别处难以获得的资料，都有准确而详尽的说明，本书还附有大量的插图及计算机程序，使人一目了然，易于付诸实践。本书对从事天然矿物及人工合成材料研究和开发的科技人员、大专院校师生均有重要参考价值。

全书共十章，插图87幅、表格13个，计算机源程序文本两个，并附有特种实验装置及材料来源方面的有关信息。

本书前言及1、6、7、8、9、10章由沈今川译，2、3、4、5章由束今赋译，书中涉及的专门术语较多，译者水平有限，译文不当之处在所难免，恳请读者见谅并赐正。

中国地质大学出版社的赵福堂同志，对译文进行了全面认真的校对和编辑工作，许玮、张小玉同志对图件进行了清绘和植字，耿小云同志对本书的编辑和主版始终给予了支持与帮助。林莉同志协助整理文稿，没有他们的出色工作，本书的出版是不可能的，译者对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

译者

1988年5月

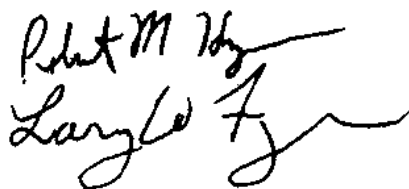
## PREFACE TO THE CHINESE EDITION

The study of crystal structures at high temperature and pressure continues to be a major thrust of materials research, and the techniques described in *Comparative Crystal Chemistry* are now employed at dozens of laboratories worldwide. But scientific technology does not stand still; many new procedures have been devised and applied since our book appeared in 1982.

Yamanaka and coworkers in Japan performed single-crystal x-ray studies to temperatures above 2500°C using laser heating techniques. High-pressure x-ray studies at the Geophysical Laboratory have been performed on single crystals to pressures above 20 GPa using solidified gas as the hydrostatic pressure medium. And the intense, high-energy x-ray sources provided by synchrotron facilities now allow combined high-temperature, high-pressure experiments at conditions not possible a few years ago. The field of comparative crystal chemistry is young, and we encourage our Chinese colleagues to seek new and improved methods for studying crystals at nonambient conditions.

Finally we wish to express our gratitude to Profs. Shen Jinchuan and Shu Jinfu for their efforts in bringing *Comparative Crystal Chemistry* to a wider audience.

R.M. Hazen  
L.W. Finger  
June, 1988



## 中文版序言

高温、高压晶体结构研究仍然是物质研究的一个主要前沿阵地，在《比较晶体化学》中所描述的高温高压研究技术现正在世界各地数十个实验室中广泛应用。但是科学技术并不会静止；自1982年本书出版以后，又有许多新的技术方法得到了开发和应用。

日本的Yamanaka等人用激光加热技术，使单晶X射线研究的温度高过2500℃。美国华盛顿地球物理实验室用固态气体作静水压力介质，使单晶高压X射线研究的压力超过20GPa。而目前利用同步加速装置所提供的强度大，能量高的X光源，已能做到几年前还不能达到的高温 and 高压结合起来进行实验的条件。比较晶体化学是一个年青的学科，我们希望中国的同行能在极端条件下的晶体结构研究有新的发现和新的改进。

最后，我们对沈今川和束今赋将《比较晶体化学》这本书译成中文，献给广大的中国读者表示衷心的感谢！

R. M. Hazen

L. W. Finger

1988年6月

## 前 言

过去十二年中，固态科学家在高温高压条件下获得单晶衍射数据的能力已有了惊人的进展。与此有关的技术上的重大改进，要求研究者应用他们有关材料性质方面的广泛知识，发展比常温常压下使用的衍射方法更为先进的实验技巧。R.M.Hazen和L.W.Finger一直是这一领域的开拓者，他们克服了不少曾使许多研究者望而却步的障碍。本书将是一部深受欢迎的著作，因为它详细地介绍了许多在极端的温度和压力条件下，成功地进行衍射实验所必需的技术。进行这项工作绝非易事。本书对那些毫无经验或虽有经验但想要进一步提高技能的人均有巨大价值。

我希望今后十二年会取得更多的进展，并相信本书对加速探索和发现的步伐将大有裨益。

Chales T.prewitt

## 引 言

异常条件下的结晶状态研究是物理学的一个部分。材料科学家、固体物理学家、固体化学家以及研究固态地球的科学家,都面临着在极端的温度和压力条件下结晶物质的种种问题。在过去十几年里发展起来的新的高温高压晶体学技术,正是这些引人入胜的实验研究取得进展的直接体现。测定原子排列随温度和压力而改变的能力,已经扩大了结晶学家测定原子周期性排列的传统能力。

尽管高温高压结晶学有重要的应用价值,但到目前为止,还没有一本内容广泛的数据和技术汇编材料。存在着这一缺陷是不足为奇的,因为作者们的背景都很不相同。许多著作是由研究氧化物及硅酸盐在其形成条件下的结构问题的地球科学家们撰写的。固态化学家及物理学家的主要兴趣是在电子结构及键性随温度和压力而产生的变化上。其他材料科学家则对多型相变的本质感兴趣。高温高压条件下的结构资料常常比较零散,而有关实验仪器和技术的信息,在出版物中就更少了。也许是为了减少篇幅,许多文章中关于高温高压设备的描述十分简单或资料过于陈旧。某些广泛使用的仪器和操作过程从未详细介绍过。例如,迄今尚未发表过有关如何安装单晶样品及高压胞的详细说明。本书试图将有关获得和分析高温高压结晶学数据的各类文献资料加以综合报导。

本书是作为比较晶体化学的一篇导论和评述,即作为晶体结构随温度、压力和成分而改变的研究成果来编写的。全书分为两篇,基本上可以彼此独立。第一篇——实验步骤,是为了满足多方面对一本有关高温高压单晶X射线装置操作技术的由浅入深的指南的需求而编写的。我们一直想通过足够详细地介绍现代实验方法,使读者能一步步地重复进行这些实验。本部分还包括实验仪器的图解、说明以及目前华盛顿地球物理实验室和其他一些地方正在使用的装置的性能、规格、晶体的安装、定向、标定和计算过程等在其他地方很难见到的内容的详细论述。第一篇的附录中列出了正文中提到的专用设备供货公司及单位的名称、地址和所能提供的材料清单,还附有应变张量及多面体体积计算的源程序。因此,第一部分是打算作为高温高压结晶学手册来使用的。

本书的第二篇是有关高温高压结晶学许多研究成果的总结。虽然只对已知结构中的很少一部分在非常温常压条件下进行了研究,但我们已能够通过高温和高压实验来研究无机化合物的稳定性及其化学键问题。这些结构研究的重点是经验趋势分析,而不是理论上的推断,并且提出了一个预测结构随温度、压力和成分而变化的简便方法。在某些结晶固体的研究中,已将对结构变化的预测引伸到相平衡的预测,并且还探讨了比较结晶学的应用问题。

我们应尽量将1981年7月以前的有关文献加以汇编。例如,第二篇就包括了1981年底以前已知的有关高温、高压、单晶、X射线结构分析等方面的各项成果。如果我们能得到由于疏忽而漏掉的已发表的研究成果以及新的非常温常压结晶学技术及包含结构数据的新论文,我们将十分高兴。

在编写本专著过程中,我们是以读者已具有结晶学、晶体化学和单晶X射线衍射方面的基本知识为前提的。本书是面向所有固态学科的,尽量避免使用过于专门的术语(如矿物名



字)。本书始终采用标准的SI单位, 距离单位用Å(埃), 压力单位用kbar(千巴), 实际上所有有关高温高压结晶学方面的文章都在使用这两个单位。

\* \* \*

1978年夏, Roger Strens应John Wiley & Sons联合有限公司要求, 着手编辑一系列有关矿物物理方面的专著。本书一直居于选题的首位, 1980年1月, Strens博士不幸去世, 使这一计划搁置下来。我们非常感谢Roger Strens深思熟虑的指导和热情的支持, 我们将本书献给Roger, 以纪念他在矿物物理方面的杰出贡献。

本专著是在两位作者均任华盛顿地球物理实验室卡内基研究所研究人员时完成的。该研究所一直是高温高压矿物体系性质方面许多前沿研究课题的主持者。我们要特别感谢实验室及其主任Hatten S. Yodanis Jr. 所给予的宝贵支持和提供的无比优越的研究条件, 没有这些, 本书的编写以及书中所描述的许多研究工作都将无法进行。

在编写本书的过程中, 许多人通过交谈、通信及惠允使用数据和插图帮助过我们。作者要特别感谢Linda Pinckney和Russell Ralph, 他们认真审阅了本书的初稿。Charles W. Burnham和Yoshi Ohashi详尽而认真地分析了倒数第二稿。他们的建议我们已在定稿中作了考虑。作者还要特别感谢Charles T. Prewitt, 他不仅提出许多宝贵建议, 而且在编写本书过程中一直给予鼓励。

R. M. Hazen

L. W. Finger

# 目 录

译者的话	(V)
中文版序言	(VI)
前言	(IX)
引言	(X)
第一章 导论	(1)

## 第一篇 实验步骤

第二章 高温结晶学	(3)
一、单晶加热器	(3)
1. 早期研制情况	(3)
2. 加热器类型	(4)
3. 辐射式晶体加热器的结构	(5)
二、晶体安装	(7)
三、温度标定	(8)
四、前景展望	(10)
第三章 高压结晶学	(12)
一、金刚石压力室的进展	(12)
1. 粉晶衍射	(12)
2. 单晶衍射	(13)
二、金刚石室的设计	(15)
1. 单晶压力室的类型	(15)
2. 金刚石室的结构	(20)
三、金刚石室的操作	(23)
1. 样品的选择和安装	(23)
2. 压力标定	(26)
3. 金刚石室的X射线照相法	(27)
4. 衍射仪法	(30)
5. 数据还原及修正方法	(35)
四、前景展望	(36)
第四章 高温高压结晶学	(40)
一、加热金刚石室	(40)
1. 早期的研究情况	(40)
2. 在金刚石室中加热单晶体	(41)

二、高温金刚石室的设计	(41)
1. 金刚石支座	(41)
2. 密封垫	(42)
3. 小型加热器	(42)
4. 绝缘措施	(43)
三、高温金刚石室的操作	(45)
1. 装配和晶体安装	(45)
2. 标定	(46)
3. X射线照相法和X射线衍射仪法	(50)
四、前景展望	(51)
<b>第五章 晶体结构参数</b>	<b>(54)</b>
一、晶体结构的描述和对比	(54)
二、误差的传递	(54)
三、单位晶胞的变化	(55)
1. 体积变化	(55)
2. 单位晶胞和应变椭球体	(55)
四、原子位置的变化	(57)
1. 键长	(57)
2. 多面体体积	(59)
3. 多面体畸变	(59)
五、热参数	(60)
1. 谐波振动	(60)
2. 刚体运动	(60)
3. 非谐波振动	(61)
六、第一篇结论	(61)
附录 I 供应厂商	(63)
附录 II 根据两套单位晶胞参数计算应变张量的程序	(64)
附录 III 根据一套原子坐标和一个单位晶胞计算多面体体积和多面体变形参数的程序	(78)

## 第二篇 结构随温度、压力和成分的变化

<b>第六章 结构随温度的变化</b>	<b>(89)</b>
一、第二篇导论	(89)
二、温度对离子键的影响	(89)
1. 离子键的位能	(89)
2. 温度对晶体能的影响	(92)
3. 热膨胀系数的精度	(93)
三、结构参数随温度的变化	(94)

### I

1. 前人研究工作的评述·····	(94)
2. 键长与温度的经验关系·····	(97)
3. 多面体热膨胀与总体热膨胀间的关系·····	(107)
四、热参数随温度的变化·····	(110)
五、结论·····	(112)
<b>第七章 结构随压力的变化·····</b>	<b>(117)</b>
一、压力对离子键的影响·····	(117)
1. 压缩率的确定·····	(117)
2. 计算的离子键压缩率·····	(117)
二、压缩率、键距、容积模量等随压力的变化·····	(118)
1. 前人研究工作的回顾·····	(118)
2. 键距与压力的经验关系·····	(118)
3. 多面体容积模量与晶体容积模量间的关系·····	(127)
三、压力改变产生的其他结构变化·····	(128)
1. 多面体畸变·····	(128)
2. 温度因子随压力的变化·····	(129)
四、结论·····	(129)
<b>第八章 结构随成分的变化·····</b>	<b>(131)</b>
一、导论·····	(133)
二、成分对结构参数的影响·····	(133)
1. 离子半径·····	(133)
2. 成分对摩尔体积的影响·····	(136)
3. 成分对键距及多面体体积的影响·····	(139)
三、结论·····	(141)
<b>第九章 结构随温度、压力和成分连续变化·····</b>	<b>(143)</b>
一、导论·····	(143)
二、温度、压力和成分的结构类比·····	(143)
1. 类比·····	(143)
2. 恒定结构的 $T-P-X$ 面·····	(144)
3. 温度和压力的“逆反关系”·····	(145)
4. “双重”X射线内标·····	(149)
三、 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 的 $T$ 、 $P$ 、 $X$ 变化·····	(149)
1. $(\partial\alpha/\partial T)_{P, X}$ ·····	(150)
2. $(\partial\alpha/\partial P)_{T, X} = -(\partial\beta/\partial T)_{P, X}$ ·····	(150)
3. $(\partial\alpha/\partial X)_{T, P} = (\partial\gamma/\partial T)_{P, X}$ ·····	(151)
4. $(\partial\beta/\partial P)_{T, X}$ ·····	(151)
5. $(\partial\beta/\partial X)_{T, P} = -(\partial\gamma/\partial P)_{T, X}$ ·····	(152)

6. $(\partial\gamma/\partial X)_{T, P}$ .....	(152)
7. 小结.....	(152)
四、结构变化模拟—键距最小二乘法.....	(153)

## 第十章 结构变化及相平衡预测.....(155)

一、相转变的拓扑学分类.....	(155)
二、相稳定性的几何限制.....	(156)
1. 半径比值界限.....	(156)
2. 可逆转变——多面体的倾斜.....	(156)
3. 重建转变——层状硅酸盐.....	(160)
4. 马氏体转变——链状硅酸盐.....	(166)
三、多面体稳定域.....	(167)
1. 键距的临界限制.....	(167)
2. 多面体稳定界限.....	(168)
四、结论.....	(169)

# 第一章 导 论

Von Laue 1912年发现了X射线被晶体衍射的现象,这一发现引起了固态科学的革命。他的观测表明,晶体具有一种在X射线波长数量级上周期性重复的结构。从那时起,使用X射线衍射线的位置和强度来推断晶体结构的方法很快就发展起来了。四十年来,所有的X射线晶体学家都是应用这些技术来解析新的晶体结构的。这些首批研究者的研究重点是测定未知原子的拓扑特征。通过他们的努力,到了本世纪50年代中期,多数普通的无机结构类型都已被解析出来了。

随着越来越多的结构被分析出来,许多结晶学家就逐渐地改变了他们的研究目标。原子的拓扑特征研究被更详细的化学键和电子分布研究所代替。进行这类键性研究的一个共同方法就是确定类质同象化合物间微小的结构差异。在许多类质同象物质和它们的固溶体中,某种拓扑特征引起的原子参数上的微小变化与置换原子的电子结构的差异有关。这种比较结晶学研究法直接导出了晶体化学中的一些重要概念,如离子半径的周期性,半径比值对配位数的影响,以及某些原子拓扑特征的几何界限等 (Pauling, 1960)。

比较结晶学中另一个明显的,但在技术上更为困难的问题,是测量作为热膨胀和压缩证据的微小的原子位移及晶格变化。一般说来,象成分的变化一样,由温度和压力的变化所引起的结构的变化并非是晶胞大小的简单改变。实际上,由于不同类型的键会产生不均匀的膨胀和压缩,结构要素的大小及比值也要随之改变。为了阐明这些变化,需要在不同的温度和压力下做精确的三维结构修正工作,这是一种非常费时间的工作。但是仍有必要弄清状态与结构的确切关系,以便获取有关固态科学中理论和应用问题的重要数据。

键距随温度、压力和成分而产生的变化是与键的位势函数的形态密切相关的,而后者又将位能与原子间距联系在一起。不同组分在常温条件下的结构修正可获得平衡距离(即在压力为零的条件下位能最小的距离),而在高温高压下的结构修正则可提供有关不对称性及位势阱深度的信息。这样,某种结构类型的温度、压力、成分变化的比较研究可为理论成键模型提供依据。

结构随温度、压力和成分而变化的经验描述,对预测各种材料在尚未研究的条件下或尚未在实验室获得的条件下可能具有的特征研究具有十分重要的意义。有关离子半径的经验知识已指导我们合成出了许多经济上极有价值的天然化合物的类似物。结构随温度、压力及成分而变化的经验模型,可用于预测材料在高温高压条件下(例如在地幔状态下)所具有的诸如摩尔体积或晶体场能等许多性质。不仅如此,若已经知道一种相的转变是受结构参数控制的,就有可能从在特殊的温度、压力和成分下所预测的结构推导出相平衡。

尽管比较结晶学研究在理论上及实践上如此重要,但有关的实验技术上的问题只是在最近才得以解决。为了进行比较,需要许多套精确的数据,这在自动单晶衍射仪系统诞生之前是完全无法实现的。这些实验系统将结晶学软件库与高速电子计算机结合起来,从而能高速地、自动化地完成过去需要几个月才能完成的工作。另一个重要的技术进展,是发展了

一种小型的、稳定的电阻加热器和金刚石砧压力室，它能使单晶颗粒保持一定的取向，在稳定的高温高压条件下保持数日，以便进行X射线实验。本书后面几章将要探讨如何将这些困难的技术应用到解决基本的固态问题。

### 参考文献

Pauling, L. (1960): The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals, Cornell University Press, Ithaca, NY.

# 第一篇 实验步骤

## 第二章 高温结晶学

### 一、单晶加热器

#### 1. 早期研制情况

高温下的晶体结构测定是固体研究的重要基础。因此，早在20世纪20年代，即在粉晶X射线衍射发展成为一种有用的鉴定技术之后不久，高温装置就被应用到了X光照相方面。也许最早成功的高温结构测定是在华盛顿地球物理实验室完成的，Wyckoff(1925)在那里研究了430℃时SiO<sub>2</sub>的方石英结构形式。Wyckoff等人最早进行的是多晶材料的高温X射线研究。虽然，在以后的几十年中设计了许多粉晶加热器，但直到Goldschmidt(1964)编出综合的《高温X射线衍射技术文献目录》时，还没有简单而有效的单晶加热器。最初一种实用X射线衍射单晶加热器是Foit和Peacor(1967)为配用魏森堡(Weissenberg)测角计而设计的。该加热器既不容易与自动系统配套，也不容易与其他类型的衍射测角计配套，因而没有被广泛应用。其后不久，又出现了一些其他类型的加热器，直到本世纪70年代中期，有一些实验室完成了若干高温晶体结构的测定(Prewitt, 1976)。表2-1列出了用于X射线衍射的各种单晶加热器。

表2-1 X射线衍射研究用的单晶加热器

作者	类型	最高温度(℃)	稳定度*	测角计结构
Foit and Peacor(1967)	辐射式	1000	2	魏森堡
Smyth(1969)	开焰式	1500	100	旋进
Prewitt, Papike and Ross(1970)	气流式	700	15	旋进
Viswamitra and Jayalakshmi(1970)	辐射式	1000	10	Hilger和Watts线式衍射仪
Lynch and Morosin(1971)	辐射式	1000	<<1	各种测角计
Smyth(1972)	气流式	900	10	旋进/四圆
Glazer(1972)	辐射式	900	<1	魏森堡
Brown, Sueno and Prewitt(1973)	辐射式	1100	15	四圆
Finger, Hadjiacos and Ohashi(1973)	辐射式	900	10	四圆/旋进
Recher(1975)	辐射式	900	<1	劳埃
Ishizawa, Miyata, Minato and Iwai(1978)	气流式	1000	5	四圆
Tuinstra and Fraase Storm(1978)	气流式	700	5	各种测角计
Lissalde, Abrahams and Bernstein(1978)	气流式	400	<1	各种测角计

\* 稳定度值取自文献资料或与该装置用户的私人通信。注意：某些作者是根据精密度(Precision)(标定中的相对误差)推断其稳定度的，而另一些作者用的是准确度(accuracy)(绝对标定误差)。在高温标定中准确度总是低于精密度。



## 2. 加热器类型

在结晶学研究中应用的有三类单晶加热器：开焰式、气流式和辐射式。现将各个类型描述如下：

### (1) 开焰式加热器

Smyth (1969) 在进行单晶辉石型的链状硅酸盐 ( $Mg_{0.5}Fe_{0.5}SiO_3$ ) 的实验中，采用了一种氢氧点火器的开焰式加热器。该装置突出的优点是可以产生1500℃以上的高温。然而，由于以下原因，开焰式加热器有很大局限性：气流和空气对流的微小波动都会使晶体上的温度发生改变，仅能稳定到100℃上下。正因为如此，开焰式加热器的使用相当有限，以后将不再进一步讨论了。不过，应该认识到，开焰式燃烧加热器比下面描述的气流式或辐射式加热器具有获得更高温度的潜力。

### (2) 气流式加热器

Prewitt, Papike和Ross (1970) 及Smyth (1972) 研制成的加热器，是利用一种热气体，通常是氮气(N<sub>2</sub>)，来加热单晶体的。这些加热器的基本部件通常是一个贵金属线的线绕电阻加热元件和一个引导高纯氮气通过晶体的中央通道 (图2-1)。此外，Smyth (1972) 加热器大概是最小巧、最通用的气流式加热器，具有一个平行于氮气通道和电源线的冷却套和连接水管。

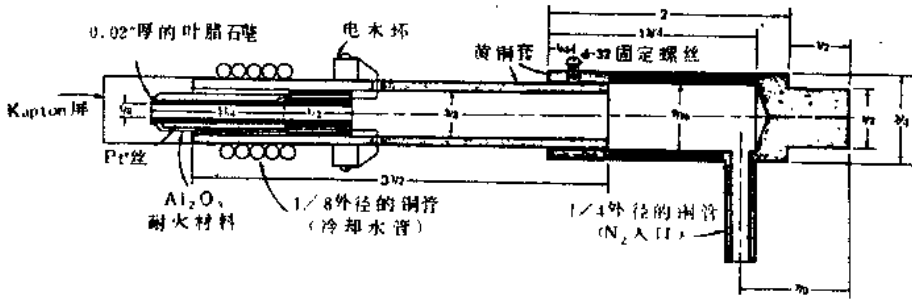


图2-1 Smyth (1972) 气流式加热器纵剖面图

主叶腊石管的冷却端放一小卷Pt箔，以使氮气通过加热器时发生涌流并减小穿过管口的温度变化梯度。叶腊石管的薄壁上每一英寸绕44圈，以分隔直径0.015英寸的Pt线圈。在离管口3mm处需要20V, 6A的交流电，以使晶体保持在900℃。(经美国矿物学会批准，据 Smyth, 1972年原图复制)

现已证明，气流式加热器是一种成功的装置，它能连续几天地产生并保持稳定的900℃高温，因此，已用来作过十几个高温结构研究。它的明显缺点是不能达到900℃以上的温度。此外，气管和水管不很小巧，而且当流体速率不恒定时，可能会使温度发生波动。正因为这些原因，气流式加热器已大部分被辐射式加热器所代替。

### (3) 辐射式加热器

当前最通用的单晶加热器都是以Brown, Sueno和Prewitt(1973, 图2-2)在纽约州立大学石溪分校研制的装置为基础的。在最初的装置中，有一个马蹄形的微型线绕电阻加热元件被放在晶体周围。用较低的功率获得了1100℃以上的温度，而且不需要气管和水管。另外，通向晶体的小尺寸广角状入口有助于该装置适用于各种结构的衍射测角计。经过改进的