

接触聚焦超声波检测技术

西安热工研究所 李建民 编著

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 简 介

本书从超声波几何光学入手,较系统地介绍了接触聚焦超声波聚焦声场理论,接触聚焦探头的设计、加工与装配技术,接触聚焦探头性能参数的测试方法,接触聚焦探头在探伤中的应用,并对聚焦探头的设计与应用做了评价。内容深入浅出,理论与应用并重。有插图80余幅。本书可供国防、电力、冶金、机械、石油、化工、铁路、造船等工业部门的无损检测人员、科研人员、超声波探头生产厂家技术人员、大专院校师生阅读,对监测、培训部门的技术人员也具有实用参考价值。

前 言

超声波探伤，是无损检测的一门重要技术，在国防、电力、冶金、机械、石油、化工、铁路、造船等工业部门中被广泛地应用着。依据超声波检测的结果，不仅可以对产品质量做出评价，而且能对运行中的设备做出监督预报。随着科学技术的发展，人们从产品质量和设备安全方面考虑，对无损检测提出了更高的要求，由应用超声波进行探伤，向应用超声波精确测定缺陷真实尺寸过渡。

接触聚焦超声波检测技术是70年代末期发展起来的一种新的无损检测技术，其原理是：通过聚焦声透镜，使射入工件内的超声波在一定深度范围内，汇聚成一个聚焦声束，这个聚焦声束具有声束细、声能集中、分辨率高、信噪比高等一系列优点，因而可以精确地检测工件缺陷的真实尺寸。

尽管还有其它途径（如C扫描装置、全息摄影等）可以获取缺陷的真实尺寸，但这些途径理论与实践还不完备，设备庞大复杂，耗资多，不便于现场实际检测。接触聚焦超声波检测是人们急待完善的一种投资少、见效快、利用率高的无损检测方法。

虽然接触聚焦超声波检测技术的发展仍不算完备，但国内外根据聚焦理论制作的聚焦探头已被应用于实践，收到了很好的效果，显示了它良好的发展前景。为了使无损检测同行们能够更好地了解、掌握这一新技术，推动无损检测事业的发展，编写了这本《接触聚焦超声波检测技术》。

本书在编写、出版过程中，得到了西安热工研究所材料

DAG 81/03

室马士林主任（高级工程师）、科研业务处吴诚德副处长（高级工程师）的大力支持。本书初稿承蒙西安热工研究所陈秉中高级工程师和吴前驱高级工程师、武汉水利电力学院毛森祥副教授、陕西师范大学应用声学研究所董胜林副教授、青海省电力试验研究所陶永福工程师的审校。本书书稿最后由武汉水利电力学院胡天明副教授审阅。在此一并致谢。

借本书付梓之机，谨向给予我诸多帮助的西安热工研究所材料室李克明高级工程师以及其他同志表示深深的谢意。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请广大无损检测同行指教。

西安热工研究所 李建民

1991年8月28日

目 录

| | |
|----------------------|----|
| 前 言 | |
| 第一章 接触聚焦超声波检测技术的发展概况 | 1 |
| 第一节 透镜式聚焦斜探头 | 3 |
| 第二节 曲面晶片式聚焦探头 | 8 |
| 第三节 反射式聚焦探头与透镜式聚焦直探头 | 10 |
| 第二章 超声波几何光学的基本概念 | 12 |
| 第一节 超声波的反射与折射定律 | 12 |
| 第二节 平面波在曲界面上的反射和折射 | 15 |
| 第三节 球面波在曲界面上的反射和折射 | 18 |
| 第四节 平面波和球面波入射时的透射声压 | 20 |
| 第五节 斜探头辐射的横波声场 | 21 |
| 第三章 接触聚焦超声波声场 | 25 |
| 第一节 平面接触时的聚焦声场 | 26 |
| 第二节 曲面接触时的聚焦声场 | 34 |
| 第三节 超声聚焦声场的计算方法 | 39 |
| 第四章 透镜式聚焦探头的设计原理 | 52 |
| 第一节 声束聚焦的条件 | 52 |
| 第二节 聚焦声透镜 | 56 |
| 第三节 聚焦探头与工件的接触面 | 61 |
| 第四节 透镜式纵波直探头参数的计算公式 | 63 |
| 第五节 聚焦探头设计中的几个问题 | 64 |
| 第五章 透镜式平面接触聚焦探头的设计 | 66 |
| 第六章 球面晶片聚焦探头的设计 | 79 |
| 第一节 球面晶片声轴上的声压 | 80 |
| 第二节 工件中声场的计算 | 82 |
| 第三节 球面晶片聚焦探头的设计程序 | 86 |

| | | |
|------|--------------------|-----|
| 第七章 | 反射式聚焦探头的设计 | 89 |
| 第一节 | 工件中声场的计算 | 91 |
| 第二节 | 晶片最佳位置的确定 | 95 |
| 第三节 | 反射式聚焦探头设计的几个其它问题 | 97 |
| 第八章 | 聚焦探头的加工与装配技术 | 100 |
| 第一节 | 声透镜与透声楔块的加工 | 100 |
| 第二节 | 晶片、声透镜及透声楔块的粘接 | 102 |
| 第三节 | 吸声问题 | 104 |
| 第四节 | 背衬材料的选配及浇铸 | 105 |
| 第九章 | 聚焦探头性能参数的测试 | 108 |
| 第一节 | 聚焦探头性能参数的测试方法 | 108 |
| 第二节 | 聚焦探头性能参数的测试技术 | 123 |
| 第十章 | 聚焦探头在探伤中的应用 | 131 |
| 第一节 | 铸钢件探伤的特点 | 131 |
| 第二节 | 检测粗糙面工件的耦合技术 | 134 |
| 第三节 | 用顶端峰值回波法测定裂纹高度 | 137 |
| 第四节 | 用多重分贝法测定缺陷尺寸 | 141 |
| 第五节 | 用声影法测定下表面裂纹高度 | 142 |
| 第六节 | 聚焦探头检测电渣焊“八字”裂纹 | 145 |
| 第七节 | 发电机护环的检测 | 148 |
| 第十一章 | 对聚焦探头设计与应用的评价 | 151 |
| 第一节 | 接触式聚焦斜探头设计的特殊性 | 151 |
| 第二节 | 聚焦探头在应用中的特殊性 | 153 |
| 第三节 | 聚焦探头灵敏度的调节 | 156 |
| 第四节 | 聚焦声束检测规则反射体回波声压的计算 | 159 |
| 第五节 | 聚焦探头与常规探头测量缺陷的对比 | 163 |
| | 参考文献 | 171 |

第一章 接触聚焦超声波检测技术的发展概况

无损检测与评价技术，是在不破坏被检材料或设备使用性能的前提下，应用某些物理方法来确定材料或设备的物理性能，检测和评价其不均匀性，从而判定其可使用性和安全性。

无损检测技术广泛应用于各工业系统的结构强度、硬度、残余应力等物理性能的测量。无损检测的目的是：对非连续加工的零部件生产或连续加工的原材料生产提供实时的检测，确定零部件或材料的质量是否符合规定的标准；监测在役设备的可靠性，提供设备维修过程中的诊断手段。

尽管无损检测技术在各工业领域中对保证产品质量及设备安全运行发挥了极大的作用，但各种无损检测技术都有其局限性，检测精度均受到检测方法和检测仪器的限制。现代无损检测与评价技术，不仅要求检测出缺陷，而且要求确定缺陷的类型、精确的尺寸、形状和取向，以便应用断裂力学的模拟方法对工件作出合格与否的判定。

使用常规的超声波探头对工件进行检测时，对小于声束尺寸的点状缺陷，通常采用缺陷信号的幅度（当量法）来评估；对大于声束尺寸的缺陷，则采用声束左右扫查（6dB法、12dB法等）探查出缺陷存在的范围，即指示长度或面积。由于缺陷性质、形状、方位等都会影响缺陷的反射幅度，因此采用上述方法确定的缺陷尺寸，往往与缺陷的真实尺寸有较大的误差。

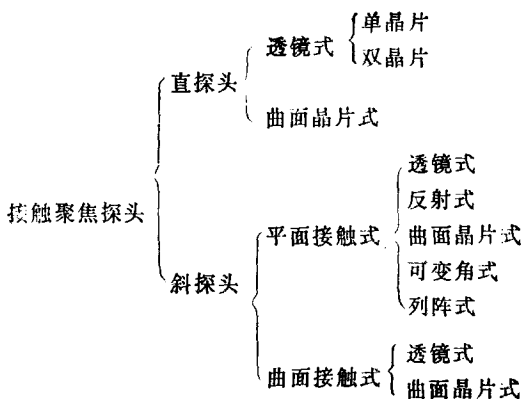
鉴于上述检测方法的局限性，国内外均在寻求确定缺陷真实尺寸的有效途径，力图断裂力学提供更可靠的数据，进而定量地计算出缺陷对材料、结构件强度的影响。改善常规探伤当量法确定缺陷尺寸所带来的误差及该方法的局限性，其中一种较为有效的方法是采用新型聚焦探头。与常规探头相比，聚焦探头具有声束细、声能集中，分辨率及信噪比高等优点。采用聚焦探头顶部峰值回波法可以较真实地测得裂纹高度（深度）；采用聚焦声束探查大型缺陷边缘（多重分贝法）也比常规探头精确。

探头是超声波无损检测的主要器件。聚焦探头，主要分液浸聚焦和接触聚焦两大类。应用液浸聚焦技术对工件进行无损检测，我国始于60年代初期。目前，该技术已发展得较为完善。接触聚焦技术则是在70年代末期才在国内外发展起来的。采用聚焦理论研制的接触聚焦直、斜探头用于实际检测，收到了较为满意的效果，尤其是检测裂纹类缺陷的精度和检测声能衰减大的材料，显示了它优良的特性。

接触聚焦超声波检测技术的发展，有两个特点：一是研究人员将几何光学理论引入超声波聚焦探头的设计，制造出各种各样的实用聚焦探头；二是随着被检测材料范围的扩大（如铸钢件、非金属材料）和检测要求的提高，探伤方法的发展常常要求有与其相适应的探头，多表现为专用（特殊）探头的开发。

接触聚焦超声波检测技术是目前仍在探讨、发展的无损检测技术。接触聚焦探头是人们期待早日完善的探头之一。

下面列出了近几年研制的接触聚焦探头的基本种类。从中可以看出，接触聚焦探头发展速度是快的，拓展的检测领域是宽广的。



概括地讲，接触聚焦探头的研制有以下几个难点：

(1) 应用光学聚焦理论，按预定的探头指标确定凸凹透镜的双曲面参数；

(2) 依据设计需要，合理选择适用的凸凹透镜的材质（要求声能衰减小，声速满足聚焦原理要求）；

(3) 加工与装配工艺，如曲面晶片的加工制作、凸凹透镜的加工、晶片与凹透镜的粘接、吸收胶的配比、浇铸方式、探头外壳材质的选取、几何尺寸等。

这些难点，对于设计制作一个性能优良的聚焦探头都是必须予以考虑的。

下面就以国内外研制的接触聚焦探头为例，对聚焦探头的结构、工作方式、声束形状，作一简单介绍。

第一节 透镜式聚焦斜探头

采用常规探头很难对铸钢件和奥氏体钢材料进行有效的探伤，而采用聚焦探头，由于其声束的聚敛，使检测时粗大

晶粒的材质造成的散射要比常规探头小得多，从而提高了对铸钢件、奥氏体钢等粗晶粒材料的可检性。

为解决火电厂高温高压部件的探伤，由电力部门研制并投入使用的P型K值系列聚焦探头，可用于不同厚度工件的探伤。图1-1为该系列聚焦探头的基本结构。

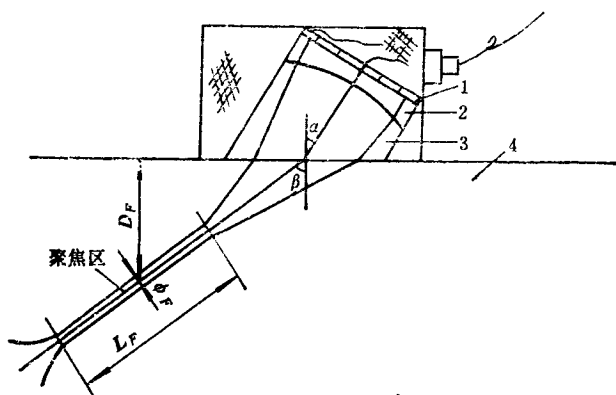


图 1-1 P型K值系列聚焦探头的基本结构

1—晶片；2—声透镜；3—透声楔块；4—工件；

D_F —焦点深度； L_F —焦距长度； ϕ_F —焦距直径

该系列聚焦探头的特点是采用了两种不同声速的塑料，分别制作了声透镜与透声楔块，并采用合理的设计方法获得了混合曲面透镜（即采用了超声波从 x 、 y 两个方向向焦点汇聚的双曲率透镜结构）。由于声透镜与透声楔块的材料选配得当，透镜曲率计算准确，获得了较为理想的聚焦效果。此类双曲率透镜结构，不仅能较好地校正声场的畸变，而且可增强焦区声压，从而达到灵敏度高、分辨率高的目的。其工作方式为：由晶片发射的超声波进入声透镜，经声透镜曲面折射进入透声楔块，再经工件表面折射进入工件，

在工件某一特定深度范围内形成一个聚焦区，见图1-1。

P型K值系列聚焦探头（四只）累计焦区长度（不含重叠部分）为2~108mm，最大焦区直径 $\phi 5$ mm，最小焦区直径 $\phi 2.2$ mm，最小可分辨出3mm厚薄板中两个间距为3mm的 $\phi 1$ mm纵孔。检测10mm厚薄板中深度5mm的 $\phi 1$ 半通孔仍有39dB的灵敏度余量。最大杂波占宽（空载）36mm，最小杂波占宽20mm，对深度80mm的 $\phi 1$ 横通孔， K_1 聚焦探头最高灵敏度大于或等于46dB，最低灵敏度35dB。表1-1为P型K值系列聚焦探头的几项基本参数。

表 1-1 P型K值系列聚焦探头的基本参数（mm）

| 探头K值 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 |
|------|------------|-------|-------|------|
| 焦点深度 | 80 \pm 5 | 55 | 25 | 5 |
| 焦柱长度 | 45~108 | 25~65 | 15~40 | 2~20 |
| 焦柱直径 | 5 | 5 | 5 | 3 |

从表1-1可知，该系列聚焦探头具有探测区域广泛、适用性强等特点，不仅可用于电站锅炉、压力容器、管道焊缝、钢板等的探伤，还可用于各类铸钢件的检测。显而易见，因其与工件直接接触，其检测工艺也将优于液浸聚焦探伤。

与工件曲面接触的曲面接触式聚焦探头是近年来的最新研制成果。图1-2给出了两种曲面接触式聚焦斜探头的简单结构及原理图，图(a)接触面为凸柱面，用于沿管道外壁周向探测的曲面接触式聚焦探头；图(b)接触面为凹柱面，用于沿管道内壁周向探测的曲面接触式聚焦探头。

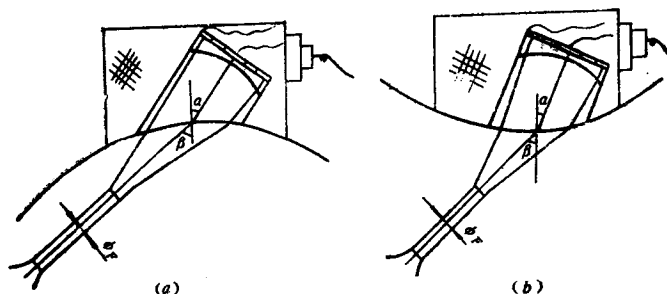


图 1-2 曲面接触式聚焦探头

(a)凸面接触; (b)凹面接触

这两种聚焦探头都是采用两种不同声速的塑料分别制作透声楔块和声透镜,采用平面矩型晶片(锆钛酸铅,简称PZT),晶片前均装有一个塑料声透镜(平凹声透镜),声速为2710m/s。平凹声透镜的曲面是由两条相互垂直的曲率半径分别为 R_x 、 R_y 的曲线回转形成的混合曲面。工作时,超声波经折射进入工件,形成一个聚焦区域。用聚焦探头探伤,均是在这个区域内进行的。表1-2为这两种聚焦探头设计参数与实测参数的比较。

表 1-2 曲面接触式聚焦探头设计参数
与实测参数的比较

| 探头 型号 | 频率 (MHz) | | 频带 (MHz) | | 折射角 $\beta(^{\circ})$ | | 焦点深度 $D_F(\text{mm})$ | | 焦距深度范围 (mm) | | 焦距直径 $\phi_F(\text{mm})$ | |
|----------|-------------|------|-------------|------------|--------------------------|-----|--------------------------|-----|----------------|-------|-----------------------------|-----|
| | 设计值 | 实测值 | 设计值 | 实测值 | 设计值 | 实测值 | 设计值 | 实测值 | 设计值 | 实测值 | 设计值 | 实测值 |
| F-5 | 2.5 | 2.43 | ≤ 0.3 | ≤ 0.3 | 40 | 40 | 54 | 53 | 6~61 | 10~65 | 7 | 6.5 |
| F-9 | 2.5 | 2.43 | ≤ 0.3 | ≤ 0.3 | 48 | 49 | 50 | 52 | 8~99 | 10~90 | 6 | 6.5 |

曲面接触式聚焦探头的研制成功，进一步拓展了聚焦探头的应用领域，使得一些异型工件（如具有一定曲率的工件）得以应用无损检测方法实施质量控制与在役监测。

西德曾研制出一种大直径透镜式聚焦斜探头，该探头的基本结构如图1-3所示。

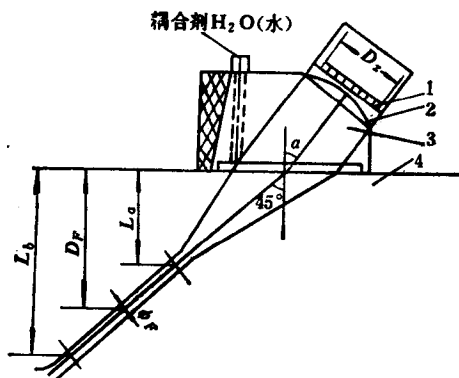


图 1-3 WQP45-75聚焦探头原理图

1—晶片；2—透镜；3—透声楔块；4—工件；
 L_0 —焦距上限； L_b —焦距下限； D_f —焦点深度；
 ϕ_f —焦距直径

图1-3为具有 45° 折射角和频率为2MHz（相应波长为1.6mm）的聚焦探头，晶片直径和声透镜直径 D_0 为75mm，焦点深度 D_f 为160mm，聚焦声束直径（即焦距直径）为 $\phi 5.7$ mm，可探测的深度范围（焦距长度，焦距上限 L_0 至焦距下限 L_b 的范围）为125~217mm，入射平面（X平面）的透镜曲率半径 R_x 为240mm，垂直入射平面（Y平面）的透镜曲率半径 R_y 为190mm。

这种探头焦距长，焦点深，适用于厚大工件的检测。它的主要特点是采用了大直径圆型晶片，在晶片前安装了一个

铝制声透镜,声透镜同样采用了混合曲面(俗称“轮胎型”),用有机玻璃制作的透声楔块底部留有耦合水槽,便于与工件保持良好的接触状态。从设计角度讲,它与图1-1所示的平面接触式聚焦探头并无太大的区别。

第二节 曲面晶片式聚焦探头

国内外都曾研制了曲面晶片式聚焦探头。比较而言,则以日本研制的此类探头较为典型。这种曲面晶片式聚焦探头的基本结构见图1-4。

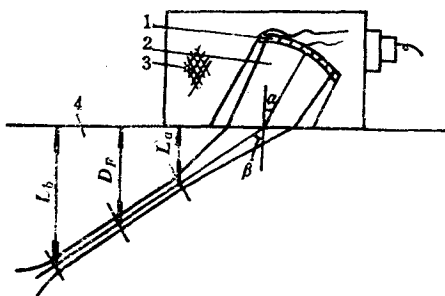


图 1-4 曲面晶片式聚焦探头

1—曲面晶片; 2—透声楔块; 3—吸收胶; 4—工件; L_a —
焦柱上限; L_b —焦柱下限; D_F —焦点深度

它由具有一定曲率的曲面晶片和曲率与晶片相同的透声楔块等组成。工作时, 曲面声源发射的超声纵波直接进入透声楔块, 经透声楔块与工件接触的界面折射, 以一定角度入射至工件内部, 并在某一特定深度范围内形成聚焦区域。这类探头不象透镜式聚焦探头那样多一个声透镜与透声楔块组合的界面, 因而声波可直接进入透声楔块, 经工件表面折射进入工件。但这类探头在X平面方向与Y平面方向声束聚焦有所

不同（透镜式聚焦探头亦如此），Y平面方向的焦距比X平面方向的焦距短一些，其原因是X平面方向与Y平面方向的折射情况不同所致。从理论上讲，此类探头因少一组合界面，可望获得较好的聚焦性能，其设计也比透镜式聚焦探头方便。但制作这类探头的困难点在于曲面声源的制作工艺较为复杂，开发的品种规格不全，设计受到厂家现有曲面声源曲率的限制。此外，这类探头焦点浅，焦柱较短，对探伤不利。

还有一种可以改变入射角度的曲面晶片式聚焦探头，称为可变角式聚焦探头（如图1-5所示），它是由曲面晶片式聚焦探头演化发展而来的。

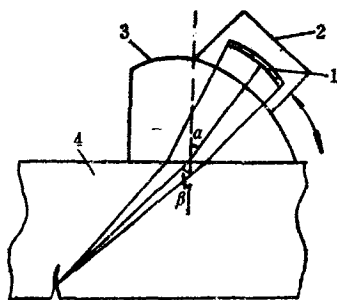


图 1-5 可变角式聚焦探头原理

1—曲面晶片；2—外转子；3—透声楔块；4—工件

它的入射角可在一定范围内变化，从而改变探头的折射角，以获得不同深度的焦点，满足人们检测不同深度缺陷的要求。目前，这种可变角式聚焦探头在我国已研究得较为成熟，许多生产厂家已有产品投放市场，给超声探伤人员带来了方便。

第三节 反射式聚焦探头与透镜式 聚焦直探头

图1-6为一种典型的反射式聚焦探头，其工作原理为：晶片发射的超声纵波倾斜入射到球面上，经球面全反射使声束在楔块内开始汇聚，再经工件表面折射以横波形式进入工件。折射后的横波声束在工件某一深度范围内聚焦。由于声束倾斜入射到凹面镜上，折射声束将产生“像差”，为获得好的聚焦效果，凹面镜应设计成非对称曲面，但其制造比较困难，故仍应按球面设计。反射式聚焦探头的缺点是楔块内声程较长，声衰减较大。

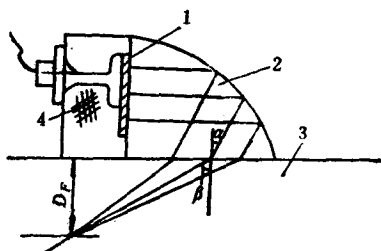


图 1-6 反射式聚焦探头原理图

1—晶片；2—反射楔块；3—工件；4—吸收胶； D_f —焦点
深度

液浸式聚焦直探头的发展已趋于完善，但在使用中有着较明显的局限性与针对性。一般说来，它适用于以聚焦C扫描方式的自动探伤，而不便在现场复杂工况下使用。为此，人们开发出直接接触的聚焦直探头，图1-7为聚焦直探头的两种形式。

图1-7(a)为单晶片聚焦直探头；图1-7(b)为双晶片聚焦直探头。这两种聚焦直探头设计上均采用了透镜式结构，声

波以纵波形式入射至工件内并产生聚焦区，可用于检测平行于探测面的大面积缺陷。如采用多重分贝法检测面积型缺陷的尺寸，其数据的可靠性远远超过常规探头测得的结果。

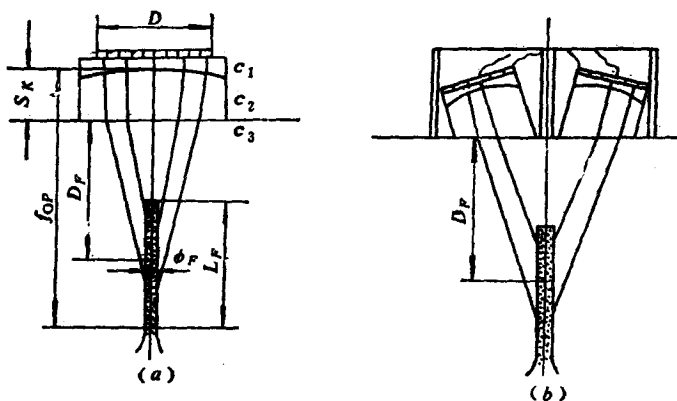


图 1-7 透镜式聚焦直探头

(a)单晶片聚焦直探头；(b)双晶片聚焦直探头

以上简要地介绍了几种聚焦探头的研制概况。作为聚焦探头，其种类、形式并不止这些，诸如透镜式聚焦斜探头、列阵可调焦距式直探头、列阵式动态聚束斜探头等，这里不再一一介绍。至于这些聚焦探头在设计应用中有哪些优点和局限性，将在第十一章作专门介绍。