

第二次X射线应力测定技术交流会

资 料 汇 编

一机部机械研究院机电研究所

一九七七年六月

目 录

一、X射线应力测定的衍射几何、方法和常数·····	西安交通大学金属材料及强度研究室 (1)
二、入射线无负 η 倾角侧倾法 X 射线应力测定技术·····	冶金工业部金属研究所疲劳研究组 (44)
三、X 射线回摆法测定应力的计算方法·····	第三机械工业部第六二一研究所 王仁智 (67)
四、X 射线应力测定中的强度校正因子问题 ·····	武汉大学金属物理专业毕业实习小组 武汉材料保护研究所 (83)
五、磨削方法对残余应力测定值的影响 ·····	哈尔滨焊接研究所理化室 X 射线组 哈尔滨电机厂工艺科金属组 (93)
六、热处理工艺和热处理应力的关系·····	陕西机械学院金相热处理专业 (103)
七、焊接残余应力对焊接结构脆性破坏的影响·····	哈尔滨焊接研究所焊接结构断裂力学组 (117)
八、残余应力与材料的疲劳强度和应力腐蚀的关系·····	第三机械工业部第六二一研究所 (143)
九、残余应力对金属应力腐蚀开裂的影响·····	上海材料研究所 (154)
十、机床铸件人工时效与尺寸精度稳定性·····	北京机床研究所 (164)
十一、X 射线残余应力测定三十例·····	第二次 X 射线应力测定技术交流会筹备组 (170)
十二、第一次巡回试样测试结果汇总·····	第二次 X 射线应力测定交流会筹备组 (181)

X射线应力测定的衍射几何、方法和常数

西安交通大学金属材料及强度研究室

一、前言

X射线应力测定的准确度和使用的方法有关。国外在方法选用上大致可分成两派。日本的衍射几何是布置成平行光束法,入射角取四个或四个以上,定峰用半高法。英美的衍射几何布置成聚焦法,在两个入射角作二次照射,定峰用抛物线法。这就必须考虑:为什么在衍射几何和方法的选用上有这么大的差异?对准确度有些什么影响?我们在实际测定中应怎样选用?

聚焦法是衍射仪通用的几何布置,用聚焦法得到的衍射线强度高,分辨率好,但按常规的方法测得应力值准确度都较差,平行光束法提出者认为聚焦法的主要缺点在于试样允许设置误差小,于是减小光阑张角,使入射线,衍射线都接近平行光束,我们这里着重讨论的是聚焦法和平行光束法的差别;各有什么优缺点,在实际测定中应怎样选择衍射几何参数以及如何确定光阑张角大小。

入射角的选择主要是 $\sin^2\psi$ 法和二次照射法的比较。二次照射法常常选择 ψ_0 角为 0° 和 45° 二个角度入射,所以也称为 $0^\circ\sim 45^\circ$ 法。通常使用的 $\sin^2\psi$ 法是测定不同 ψ 角的四点,比 $0^\circ\sim 45^\circ$ 法二次入射的测定次数要多一倍。应力测定值是否准确本来就和测定次数有关,用增加测定次数的方法通过平均后得到比较准确的数值,并不能说明所用的方法准确度高。应用于生产实际,当需要测量的部位比较多时, $\sin^2\psi$ 法也嫌过于费时,常常选用 $0^\circ\sim 45^\circ$ 法。这就必需弄清这两种方法的误差各是多少?要是限定测定次数是四次时,入射角是取 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 好还是在 0° 和 45° 各测二次更为准确?

衍射线的定峰方法是应力测定中讨论最多的问题之一。早期选用的方法比较多,经过长期的使用比较,近年来主要用半高法和抛物线法。从测定时间上考虑,半高法必需扫描出整个衍射线,抛物线法只需在衍射线峰顶附近取三点。同样取得一个峰值数据,半高法要比抛物线法多3~4倍时间。那为什么日本要舍弃抛物线法,统一使用半高法并在标准中制订下来呢^[1]?是否半高法在任何情况下都比抛物线法准确度高?此外从理论上分析,衍射线的位置应该用它的重心位置来表示,资料^[2]中就认为用重心法定峰得到的应力值其误差只有其他方法的1/3。资料^[3]也从实验上表明重心法的分散度低于抛物线法。如果真是这样,即使重心法的计算比较麻烦,也还是可以在作精确测量时选用的。但为什么却很少见到其实际应用的例子呢?

除衍射几何、入射角和定峰方法外,应力常数值也是一个很重要的问题。即使X射线的实验数据完全相同,如果选用的应力常数值不一样,也会得出不同的应力值。这就必须考虑哪些因素会影响应力常数值?改变的幅度有多大?直接采用机械弹性常数值是否合理?会带来多大误差?等等。

二、衍射几何讨论

1. 平行光束法的衍射几何表示方法及存在问题

平行光束法是针对聚焦法的试样安装误差而提出来的。为什么采用平行光束法后试样安装的偏差对应力测定值影响比较小，一般是用图1来表示^[4]。图示试样在Y方向的变化 ΔY 限定在一定范围内时，对衍射线位置的影响很小。

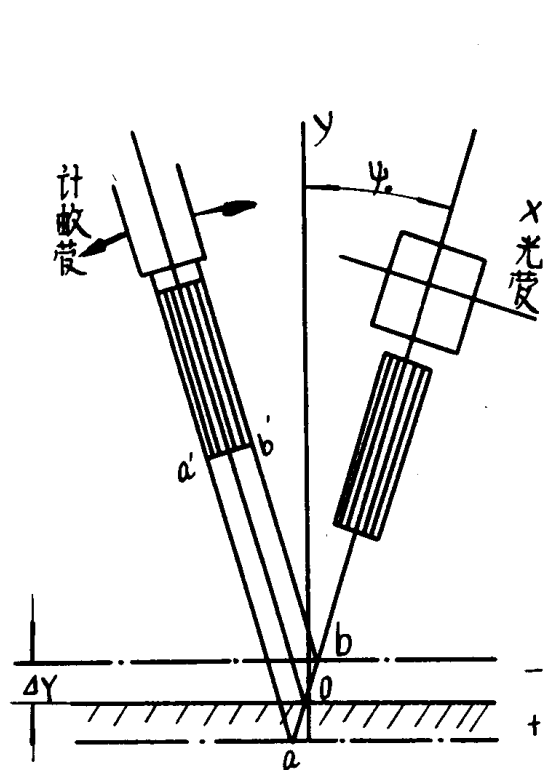


图1 平行光束法原理图^[4]

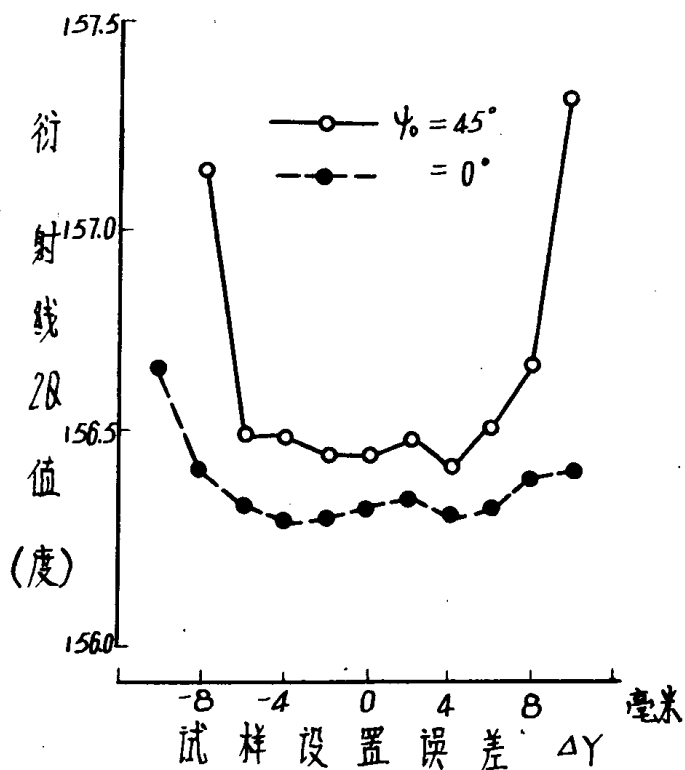


图2 试样设置误差对不同 ψ_0 角 2θ 值影响^[6]

稍加追究就会发现这种表示方法是有问题的。因为当试样位置由 $+\Delta Y$ 变到 $-\Delta Y$ 时，入射线的重心就会由 a 移到 b 点，相应衍射线的重心由 a' 移到 b' ，即移向高角度。因此不能说明试样位置变化不影响衍射线的 2θ 值。

实际上，应力测定并不注重测试条件发生变化时，衍射线 2θ 的绝对值为何。而是着眼于入射线和试样表面法线夹角 ψ_0 发生变化时，衍射线的 2θ 值是否保持恒定。很多因素都会影响衍射线 2θ 的绝对值。例如：扫描速度，时间常数等，但是这些参数在一定范围内的变化并不影响测定的应力值^[5]。同样，要是某一个无应力试样的位置在 $\pm\Delta Y$ 范围内变化，而不同 ψ_0 角的衍射线 2θ 值都相等的话，那就可以说这种方法允许 $\pm\Delta Y$ 范围的试样设置误差。从这个要求看，图1也不能表达出平行光束法的长处。

用来证实平行光束法允许试样设置可以有较大误差的是图2^[6]。一般都是根据这张图所提供的数据，把平行光束法的试样设置允许误差规定在 ± 4 毫米的。但是只要注意一下图2的计算和实验条件，就会发现把这个数据推广到一般，是有问题的。图2的数据是假定入射光系平行光，接收光阑张角为 0.35° ，试样衍射线的半高宽是 6° ，允许的误差限定在 ± 2 公斤/毫米²。在这样的条件下先通过计算，再用实验验证的。即使承认这个条件下图2的数据是可靠的，但是改变实验条件后， ± 4 毫米这个数值的适用性如何？例如：入射光

不是平行光（实际上也得不到严格的平行光），接收光阑张角在平行光束法所限定的范围内略有改变，这时试样设置误差是否仍可达到 ± 4 毫米？这个结果是对半高宽为 6° 的试样作出的，当衍射线宽度不同时， ± 4 毫米这个数值是否还适用？这些都是值得考虑的。此外，图1中当 $\angle Y$ 由正变为负时， 2θ 值应该由小变大。但图2中 $+\angle Y$ 数值增大时 2θ 值却是增大的。原因何在也值得分析。

除此以外，介绍平行光束法的书籍中，还强调了这种方法测定复杂形状试件的可能性^[4]。书中用图3表示自焦点 F 发出的X射线照射到半径为 R 的圆形试件上，照射长度为 $2a$ 。光束在试件表面上的落差 x 近似为：

$$x = \frac{a^2}{2R}$$

既然平行光束法允许试样设置有一定的误差范围，那么只要把 x 限制在一定数值内，就不会影响测得的应力值。这就是平行光束法可以测定复杂形状试件的理由。

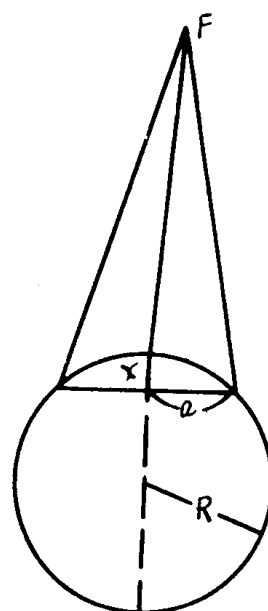


图3 光束照在圆试样上造成落差^[4]

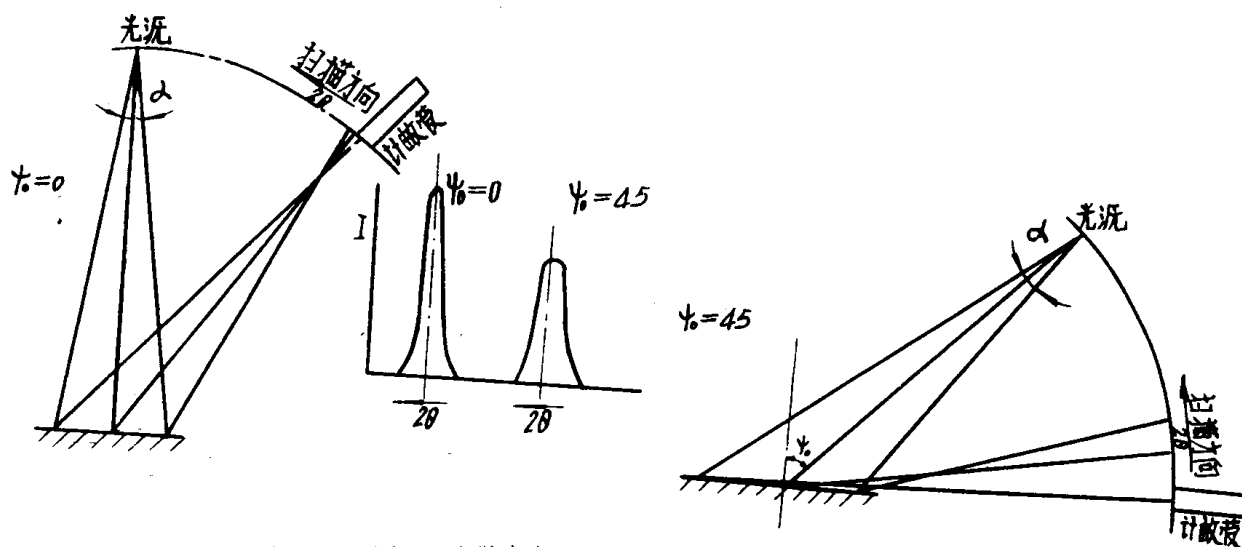


图4 发散光束照在平试样上形成的重心偏移

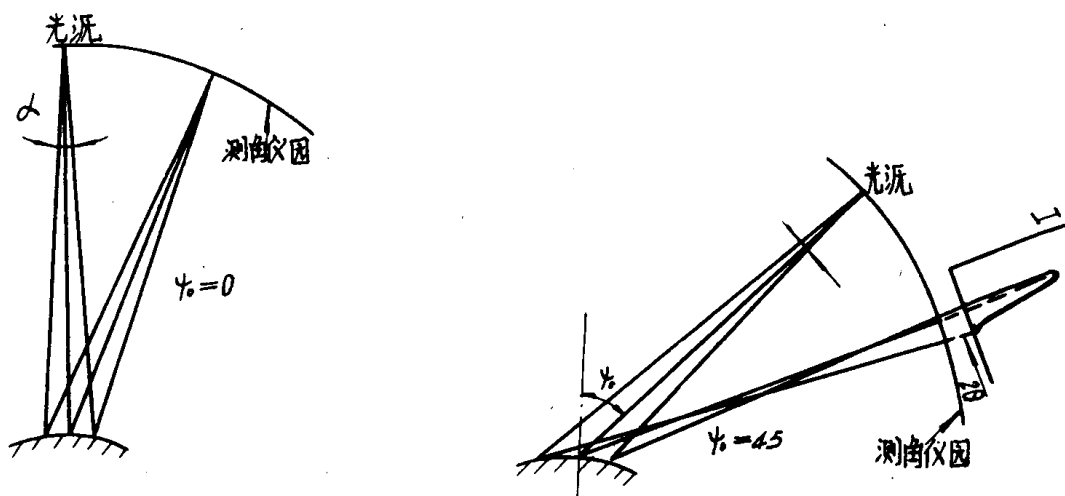


图5 发散光束照在凸试样表面造成的重心偏移

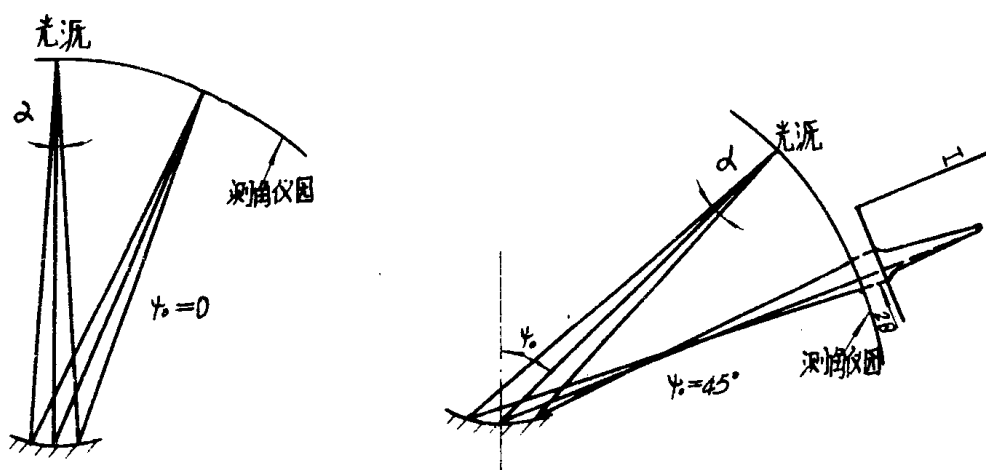


图 6 发散光束照在凹试样表面造成的重心偏移

我们认为这种提法也是有问题的。因为衍射线的位置不仅和试样表面位置有关，还和形状有关。相同的入射光束，照到凸、平、凹的试样表面上，产生出来的衍射线，其重心位置是不同的。

图4-6是发散光束照在不同曲率试样上的情况。可以清楚看出，即使入射光束在凸、凹试样上的落差是相等的，他们的衍射线的位置，不仅和平试样不同，而且偏离的方向也是不同的。凸试样衍射线重心偏向低角，凹试样则重心偏向高角。

所以从上面讨论来看，平行光束法的衍射几何不能说明其优越性。

2. 光阑张角，计数管位置对准确度影响

聚焦法的几何布置是衍射仪上的典型布置，能够看出光阑张角，试样形状，衍射线位置等的相互关系，因此我们用它来进行分析。

① 光阑张角的影响

图 7 是发散的入射光照在平试样表面上的情况。若试样表面与聚焦圆密合，照在 ao 面上的光束会聚在 s 点，这就是理想聚焦点。对于平试样来说，照在 a' ob' 面上的光束中，只有通过测角仪中心，即 O 点所产生的衍射线，才通过理想聚焦点。 a' ， b' 点产生的衍射线不再会聚于 s 点而是偏向低角。这样平试样整个被照射表面所发出的衍射线在测角仪圆上就有一个强度分布，这个分布的重心与理想聚焦点有一定偏差。可以明显看出，此偏差随入射光束的发散度而增大。限制发散度可以减小偏差，使衍射光束重心接近理想位置。

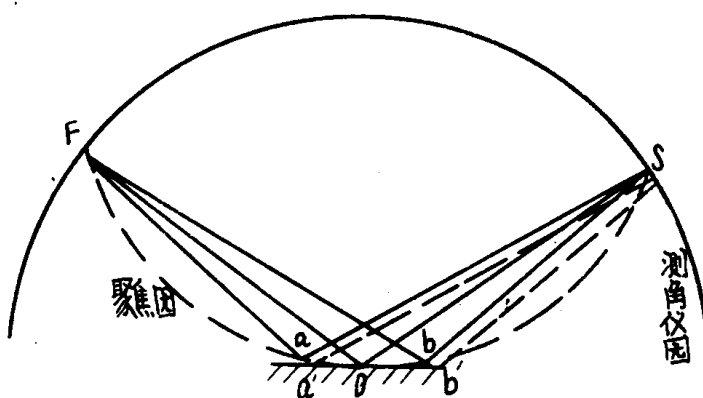


图 7 平试样的衍射线偏离情况

因此，不考虑强度时，无论聚焦法或平行光束法，只要减小光阑张角，肯定可以提高应力测定的准确度。

② 计数管位置的影响

聚焦法中 ψ_0 转动一个角度时, 计数管按常规是要前移的。

介绍平行光束法的资料认为: 由于使用了平行光阑, 入射与接收光束都是平行光, 不存在聚焦问题, 因而在 ψ_0 改变时, 计数管不必为了适应焦点位置的改变而前后移动^[7]。此外, 计数管的固定也有利于简化机构^[4]。从这些理由看, 似乎计数管前移与否, 并不影响衍射线的 2θ 值。但事实并非如此。

如果是严格的平行光束, 计数管沿着平行光方向移动, 当然不影响衍射线的 2θ 值。但是实际上光束还存在一定发散度。日本制订的X射线应力测定标准中把光阑张角 α 限制在 0.7° ^[1]。这和聚焦法常用的 α 为 1° 到 3° 比较起来, 0.7° 和 1.0° 之间很难说有本质的差别。因而完全忽略发散度, 看作严格的平行光是有问题。

为此就必须讨论: 接收具有一定发散度的衍射光束时, 计数管位置对其 2θ 值的影响。

在聚焦法中, 当试样表面与聚焦园密合, 即完全符合聚焦条件时, 衍射光束会聚于一点。在这一点接收衍射线, 其 2θ 值符合于理论值。不在这一点, 由于衍射线束的发散, 其重心位置就会偏离理论值, 带来误差。聚焦法中, 规定 ψ_0 角变化时, 计数管必须相应变动位置。其原意不仅是为了提高强度与分辨率, 也是为了获得衍射线 2θ 的正确值^[8]。现在的问题是: 把完全符合聚焦条件的理想情况照搬到实际中来是否合理? 也就是说当试样表面不符合聚焦条件, 衍射光束又有一定发散度, 这时衍射线的重心是否在理想聚焦点处最接近于理论值?

图 8 为平试样在某一个 ψ_0 角, 衍射线的会聚情况。

由图可以看出: 焦点 s 处, 自试样左侧 A 和右侧 B 发出的衍射线 A' , B' , 其 2θ 值都比 s 点之理论值低, 这就使整个衍射线束的重心偏向低角。相反, 在测角仪园上 O'' 点处, A 、 B 两点发出的衍射线 A'' , B'' 却分布在理论值的两边, 因此, 在 O'' 点处测得的衍射线虽然比 s 点处宽, 强度也比较低, 但是其重心却比 s 点处更接近理论值。

有人曾计算过入射光束发散度、不同曲率试样表面对 O'' 点及 s 点衍射线中心位置的

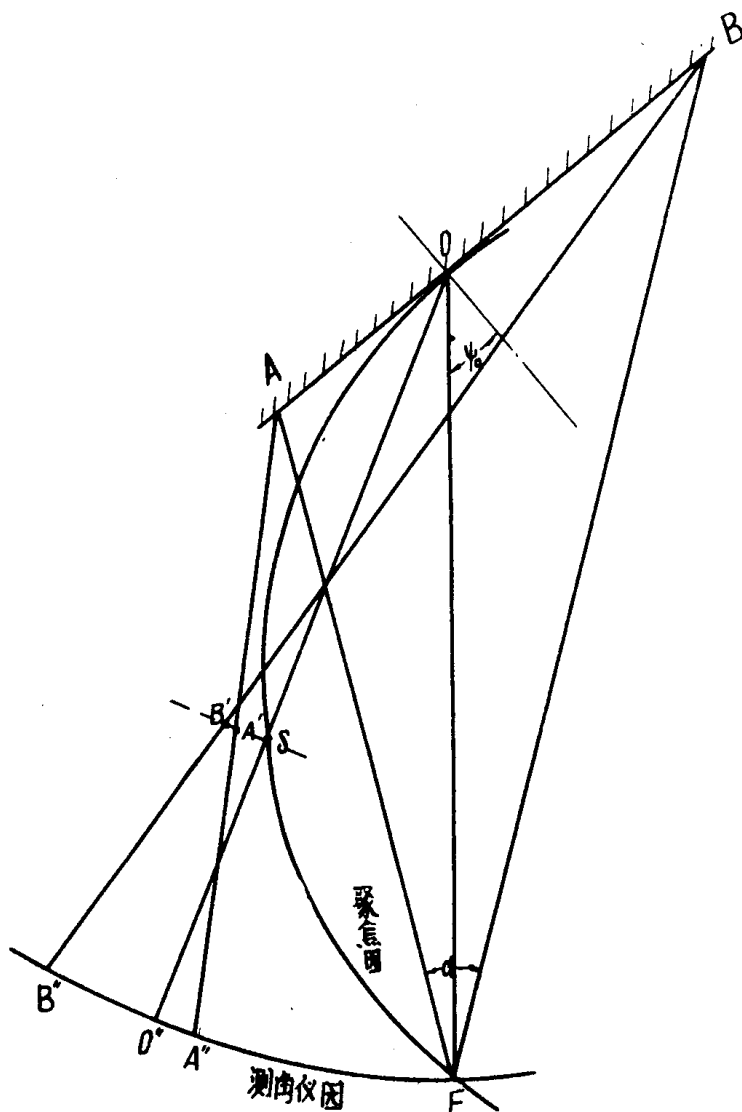


图 8 ψ_0 角时平试样衍射线在不同位置的发散情况

影响^[2]。今选若干计算数据列于表1。表中衍射线 2θ 的理论值为 156.000° ， ψ 为入射线与反射面夹角 $\psi = \psi_0 + \eta$ ， $\eta = 90^\circ - \theta$ ， θ 是反射面的布拉格角， ψ_0 是入射线与试样表面法线夹角。

表 1

试样表面 形 状	入射光阑 张 角 α°	ψ°	O'' 点处 2θ 值		s 点处 2θ 值	
			衍射线中心 (度)	与理论值差 (度)	衍射线中心 (度)	与理论值差 (度)
$\phi 50$ 园试样	1	30	156.000	.000	155.997	.003
		60	155.989	.011	155.964	.036
	3	30	155.996	.004	155.976	.024
		60	155.888	.112	155.606	.394
平 试 样	1	30	156.000	.000	155.999	.001
		60	155.998	.002	155.993	.007
	3	30	155.999	.001	155.994	.006
		60	155.982	.018	155.940	.060
半径25毫米 的凹试样	1	30	156.000	.000	156.001	-.001
		60	156.007	-.007	156.022	-.022
	3	30	156.002	-.002	156.012	-.012
		60	156.069	-.069	156.228	-.228

表 1 定量地说明了：采用聚焦法时， O'' 点处衍射线的中心比 s 点处更接近理论值。二者误差比值达 3 倍以上。

此外也可以看出：当入射光束发散度增加，试样表面曲率减小或者 ψ 角增大时，误差是增加的。

从上面讨论可以知道：平行光束法原来只是着眼于从限制光束发散度来提高准确度，并未涉及计数管位置对准确度的影响。而计数管固定的措施实际上对提高准确度有着重大作用。

根据上述分析可以认为：平行光束法和聚焦法没有本质区别。因为在聚焦法中如果把计数管位置固定在测角仪园处，虽然对强度和分辨率有些损失，却可以提高准确度。计数管固定在测角仪园处的聚焦法和平行光束法比起来，他们的区别只在于是用单缝光阑还是多缝光阑了。可以容易看出：若两种光阑的张角相等，两者的差别仅仅是强度的不同，并不影响强度分布的重心位置。所以从应力测定所要求的衍射几何来看，这两种方法是完全可以统一起来的。

将计数管固定后,问题就在于光阑张角的大小。平行光束法把光阑张角限得很小,当强度足够大时是可以提高准确度的,然而在谱线漫散强度成为主要矛盾时,片面强调减小光阑张角就不一定恰当了。聚焦法常用的入射光阑张角为 1.0° 到 3.0° ,参考表1数据,当 $\alpha=1.0^{\circ}$, $\psi=60^{\circ}$,测定 $\phi 50$ 试样的 2θ 值时其最大误差只有 0.011° ,相当于应力测定值误差为 0.5 公斤/毫米²左右。而平行光束法实际达到的最小误差为 1 公斤/毫米²。虽然理论计算值与实验值之间不能直接对比,但是从日本标准中限定光阑张角为 0.7° 看,增大光阑张角是有潜力的。至于光阑张角可以增至多大,对试样设置误差有什么影响则须通过下述实验来弄清楚。

3. 实验条件及方法

仪 器: 国产XYL-73型X射线应力测定仪。盖革管记录。

实验参数: 如表2

表2

靶	Cr	扫描速度	2 度/分
滤 波	V	记录纸速	20毫米/分
电 压	30 千伏	时间常数	16 秒
电 流	8 毫安	计数率量程	400, 800, 1600 次/秒
照射面积	4×8毫米	光 阑 张 角	0.29~2.86度

试样: 20钢正火试样和T10钢淬火试样,表面经电解抛光;电解铁粉。

加载夹具: 螺杆加载纯弯夹具^[5]。

定峰方法: 半高法和峰顶法。定峰方法讨论见四。

X射线应力常数: 将多次重复测得的加载应力值用最小二乘法处理后得到X射线应力常数如表3

表3

材 料	热 处 理 状 态	X 射线应力常数(公斤/毫米 ² 度)	
		$\sin^2\psi$ 法 K_1	$0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 法 K_2
20钢	正 火	34.22	51.97
T10钢	淬 火	32.44	49.27

4. 实验结果

①光阑张角与狭缝试样衍射线强度及应力值准确度的关系

试样: 20钢正火试样,半高宽约 2.2° 。

测定方法: $\sin^2\psi$ 法测定 0° , 0° , 15° , 30° , 45° , 45° 六点和 0° , 15° , 30° , 45° 四点。

定峰方法: 峰顶法。

入射光阑张角 α_1 取 0.43° , 0.72° , 1.00° , 1.36° , 2.86° 五种。

接收光阑张角 α_2 取 0.29° , 0.43° , 0.72° , 0.86° , 1.00° , 1.36° , 2.86° 七种。

不同 α_1 与 α_2 的配合共有35种情况。

(1) 固定 α_1 改变 α_2 或固定 α_2 改变 α_1 对20钢原始应力值及衍射线峰值度 I_p 的影响

由于光阑张角中选用 2.86° 与不用 2.86° 在应力值上有明显差别,故将其分别归类。如表4

表 4

光 阑 张 角	配合 种数	测定 次数	应力平均值 $\bar{\sigma}$ 公斤/毫米 ²	误 差 值 公斤/毫米 ²	
				标准误差	最大误差
$\alpha_1=0.43^\circ-1.36^\circ$ $\alpha_2=0.29^\circ-1.36^\circ$ 任意配合	24	52	-15.3	1.28	+3.2 -3.7
α_1 或 α_2 中有 2.86° 者	11	16	-11.3	1.70	+4.3 -2.9

不同 α_1 , α_2 配合的峰值强度 I_p 见图9。

曲线表明: 光阑张角比较小时, 增大入射光阑或接收光阑的张角可以显著提高强度, 而光阑张角由 1.36° 增到 2.86° 提高强度的效果不如小张角时明显。

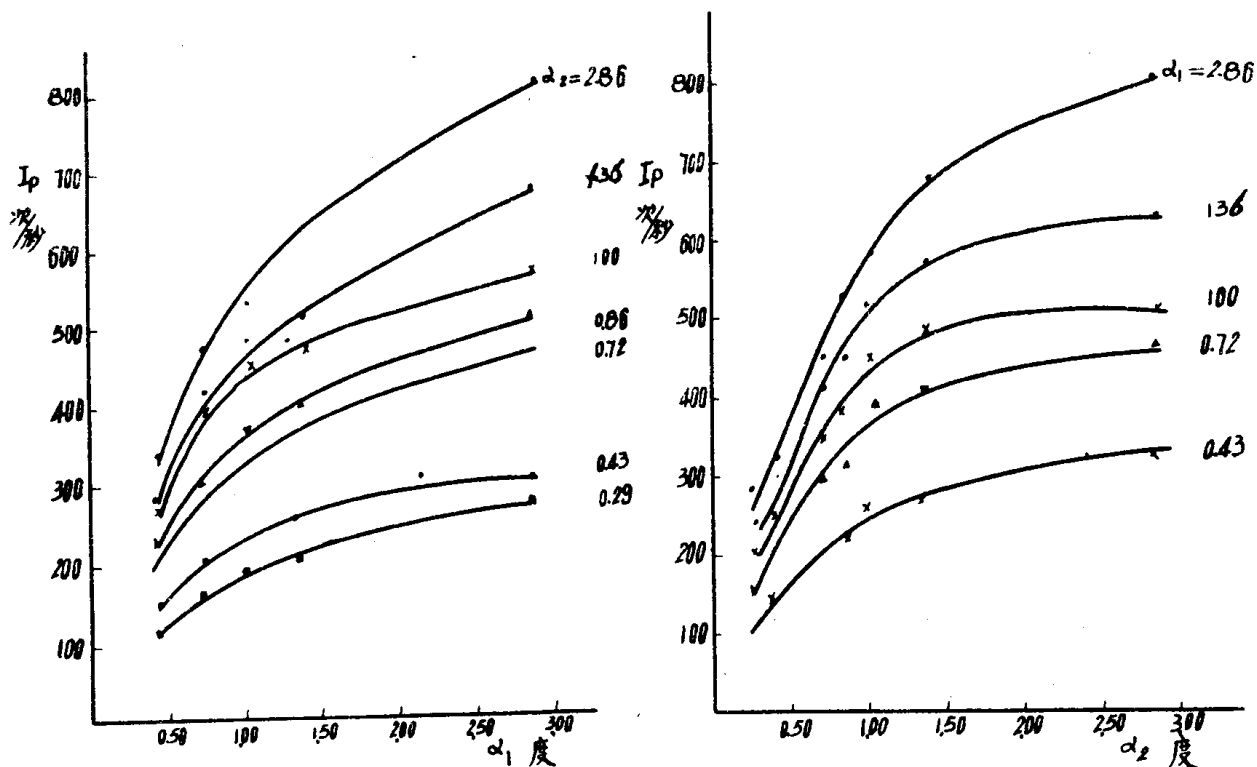


图 9 不同入射光阑 α_1 和接收光阑 α_2 配合的峰值强度 I_p

(2) 不同 α_1 , α_2 配合测定20钢加载应力的准确度

在原始为 -15.3 公斤/毫米²残余压应力的20钢试样上加0, 5, 10, 15, 20公斤/毫米²的张应力。五次测量值与静态应变仪指示值间的算术平均误差以 $\Delta\sigma$ 表示。见表5。

测定方法: $\sin^2\psi$ 六点法。

定峰方法: 峰顶法。

由于各 α 角配合测得的应力值相近, 将65次测定的数值统一计算出标准误差也列于表中。

表 5

序 号	光阑张角 α°		扫描速度 与 时 间 常数乘积 (度/分 $\times$ 秒)	入射光束 长度 (毫米)	误 差 值 (公斤/毫米 ²)		
	α_1	α_2			算术平均误差 $\overline{\Delta\sigma}$	标准误差 δ	最大误差
1	0.43	0.43	32	10	1.66	1.08	+2.9 -2.1
2	1.36	0.43	32	10	0.96		
3	0.43	0.72	32	10	0.96		
4	0.72	0.72	32	10	0.58		
5	0.72	0.72	16	5	0.92		
6	1.36	0.72	32	10	0.52		
7	0.43	1.00	32	10	0.60		
8	0.43	1.00	32	10	0.88		
9	1.00	1.00	32	10	0.52		
10	1.36	1.00	32	10	0.92		
11	0.43	1.36	32	10	1.02		
12	0.43	1.36	32	10	0.80		
13	1.36	1.36	32	10	0.66		

②光阑张角与宽峰试样应力值准确度的关系

试样: 淬火低温回火T10钢, 半高宽约 7° 。

测定方法: $\sin^2\psi$ 六点法。

定峰方法: 半高宽法。

(1) 不同 α_1 , α_2 配合测定T10钢加载应力的准确度。

9种不同 α_1 , α_2 配合测定的-10, 0, 10, 20公斤/毫米²四个应力值与静态应变仪指示值之间的算术平均误差及全部36次测量的标准误差列于表6。

(2) 不同 α_1 , α_2 配合测定T10钢定载应力的准确度。

为了校对标准误差, T10淬火试样在加载20公斤/毫米²下, 以上述9种 α_1 , α_2 配合共进行19次重复测量, 并对 α_1 或 α_2 中有 2.86° 者进行9种配合的测量。平均值、标准误差及最大误差见表7。

表 6

光阑张角	α_1	1.36	0.72	1.36	1.00	1.36	0.43	0.72	1.00	1.36
α°	α_2	0.43	0.72	1.00	1.00	1.00	1.36	1.36	1.36	1.36
误差值	算术平均误差 $\overline{\Delta\sigma}$	0.8	2.8	1.4	2.1	1.5	0.8	1.8	1.8	2.1
公斤/毫米 ²	标准误差 δ	2.17								
	最大误差	+3.8, -5.0								

表 7

光 阑 张 角 α°		测定次数	应力值(公斤/毫米 ²)		误差值(公斤/毫米 ²)	
α_1	α_2		平 均 值	总平均值	标准误差 δ	最大误差
1.36	0.43	1	37.0	36.4	1.81	+3.9 -3.0
0.72	0.72	2	34.9			
1.36	0.72	1	35.0			
1.00	1.00	1	37.3			
1.36	1.00	1	35.7			
0.43	1.36	2	36.9			
0.72	1.36	3	35.6			
1.00	1.36	1	35.7			
1.36	1.36	7	36.9			
α_1 或 α_2 中有2.86°者		9		39.3		

由表可见,当 α_1 或 α_2 中有2.86°者,测得的张应力值偏高,这和表4测得压应力的数值偏低,两者是一致的。

③不同光阑张角时,光源与试样距离对应力值的影响

(1) 用无应力铁粉试样研究光源与试样距离 ΔY 变化对 2θ 值影响的规律

选取5种光阑张角的配合,测定 ΔY 在+4.0毫米到-7.0毫米变化时,铁粉试样 $\psi_0=0^\circ$ 及 $\psi_0=45^\circ$ 的 2θ 值。见图10。

(2) 光源与试样距离变化时光阑张角对宽峰试样应力值的影响

选取四种 α 角配合,测定加载20公斤/毫米²的T10淬火试样。

测定方法: $\sin^2\psi$ 六点法。

定峰方法: 半高宽法。

ΔY 变化范围: +3.0毫米到-5.0毫米。

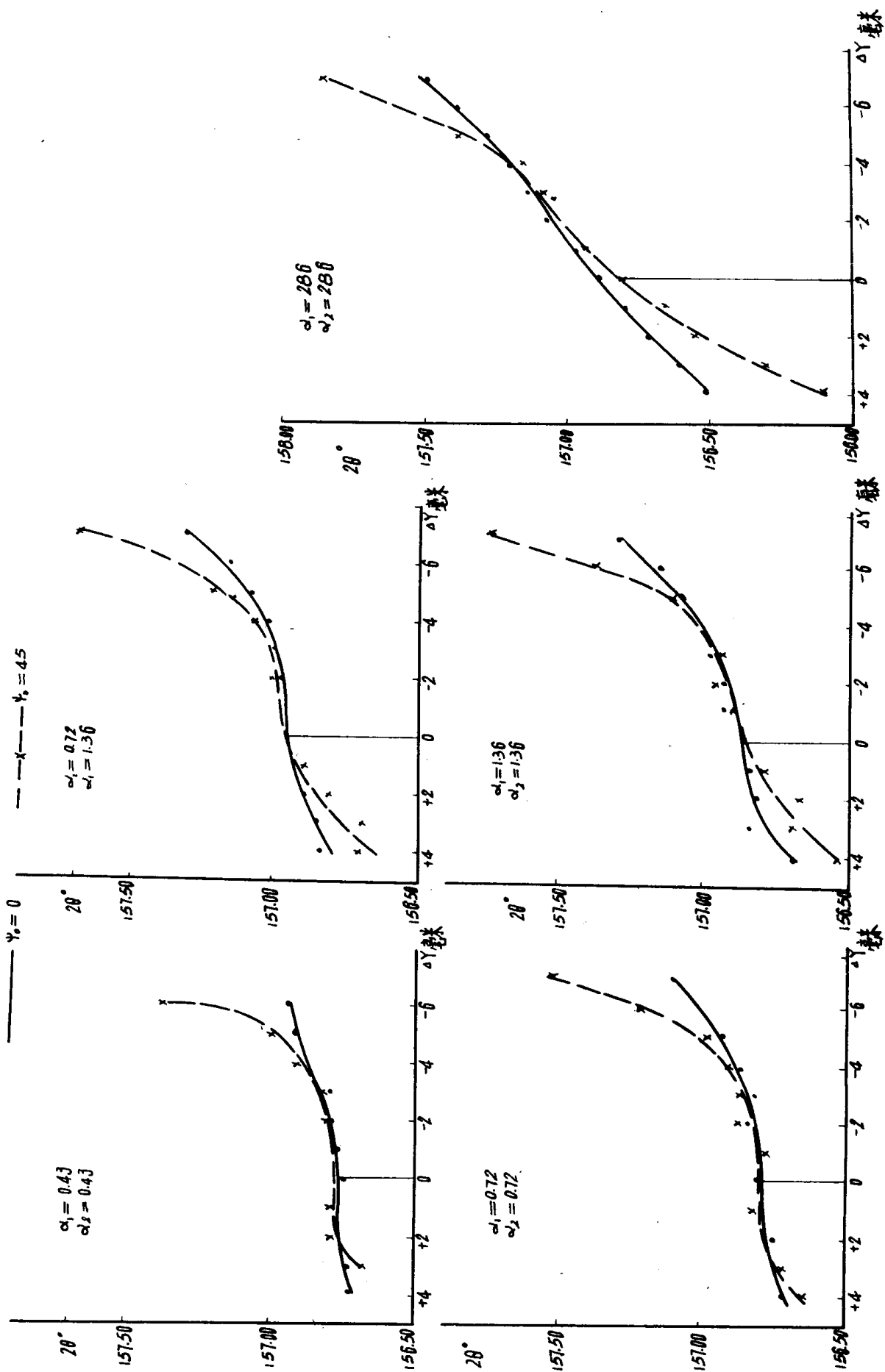


图 10 不同光阑张角配合下铁粉试样 $\psi_0 = 0^\circ$ 及 $\psi_0 = 45^\circ$ 的 2θ 值与 ΔY 关系

各 α 角配合测定的 2θ 值与 ΔY 关系见图 11。

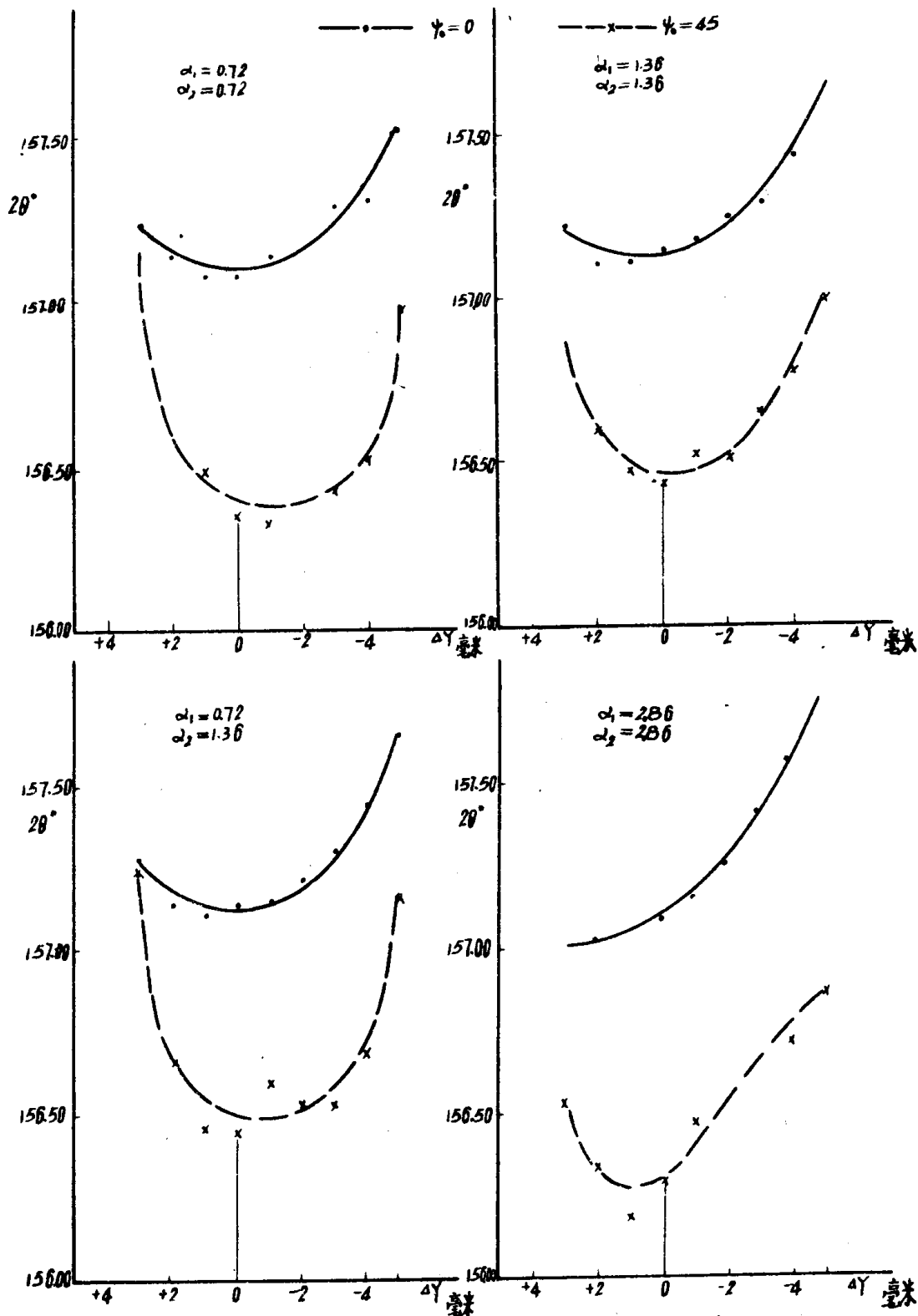


图 11 不同光阑张角配合下 T 10 淬火试样 $\psi_0 = 0^\circ$ 及 $\psi_0 = 45^\circ$ 的 2θ 值与 ΔY 关系

$\psi_0 = 0^\circ$ 及 $\psi_0 = 45^\circ$ 衍射线背底斜率 $dh/d2\theta$ 与 ΔY 关系见图 12。

由铁粉及 T 10 淬火试样 ΔY 变化的试验可以看出：

A, 铁粉试样 当光源与试样距离由 $+\Delta Y$ 变为 $-\Delta Y$, 即移近时, 2θ 值升高。 $\psi_0 = 45^\circ$

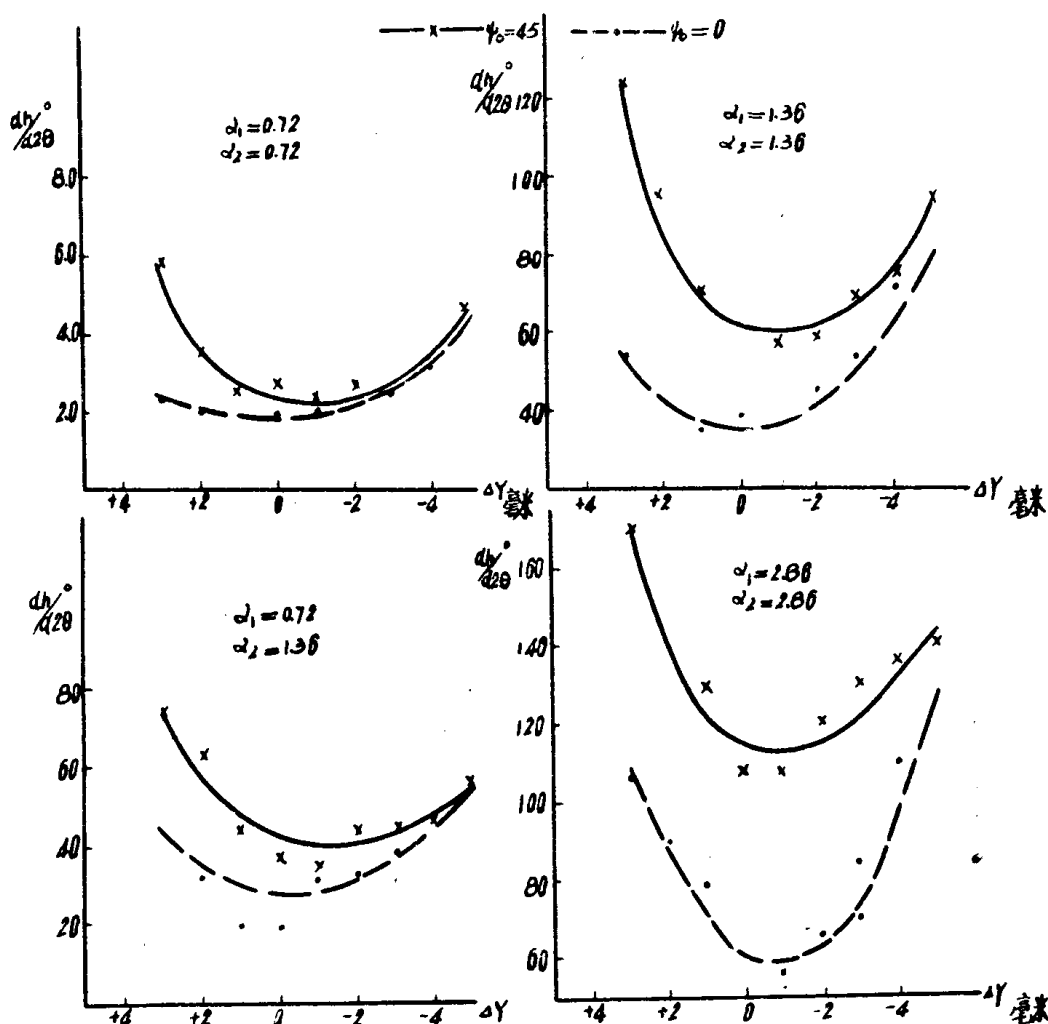


图 12 T10淬火试样 $\psi_0=0^\circ$ 和 $\psi_0=45^\circ$ 衍射线背底斜率 $dh/d2\theta$ 与试样安装误差 ΔY 关系

者变化较陡，其 2θ 值在 $+\Delta Y$ 处比 $\psi_0=0^\circ$ 者小，在 $-\Delta Y$ 值增大时则比 $\psi_0=0^\circ$ 者大。

宽峰试样 $\psi_0=0^\circ$ 及 $\psi_0=45^\circ$ 衍射线的 2θ 值随 ΔY 变化规律与铁粉不同， $+\Delta Y$ 值增加时， 2θ 值不是减小而是增加。这是由于图12所示 $+\Delta Y$ 增大时背底斜率急剧增加，使峰值移向高角所致。 $-\Delta Y$ 处背底斜率增大则使 2θ 值更加提高。

B，除 $\alpha_1=\alpha_2=2.86^\circ$ 外，铁粉及T10淬火试样 $\psi_0=0^\circ$ 和 $\psi_0=45^\circ$ 之 2θ 值与 ΔY 关系都存在一段近似平坦部分。铁粉试样 $\psi_0=0^\circ$ 及 $\psi_0=45^\circ$ 之 2θ 值近乎相等，或者说其差值在实验误差范围之内，此时铁粉的残余应力测定值接近于零。T10加载试样在这个范围内测得的应力值与应变仪指示值相近。随着 α 角增大，此平坦部分的 ΔY 范围减小。 $\alpha_1=\alpha_2=2.86^\circ$ 的 2θ 与 ΔY 曲线不存在平坦部分，只是在某一段 ΔY 范围内铁粉 $\psi_0=0^\circ$ 与 $\psi_0=45^\circ$ 的 2θ 值近乎相等，T10试样则求得的应力值与应变仪指示值相近。可以把铁粉的 $\Delta 2\theta=0$ ，T10试样的应力值等于应变仪指示值的 ΔY 范围称为 ΔY 允许变动范围。

C，铁粉与T10试样的 ΔY 允许变动范围不同，并且对于 $\Delta Y=0$ 点都是不对称的。

铁粉之 ΔY 允许变动范围见表8。

宽峰试样T10之 ΔY 允许变动范围、在此范围内的平均应力值及与应变仪指示之实际应力值差列于表9。

表 8

光 阑 张 角 α°		ΔY 允许变动范围 (毫米)
α_1	α_2	
0.43	0.43	+3.0 — -5.0
0.72	0.72	+3.0 — -5.0
0.72	1.36	+2.0 — -5.0
1.36	1.36	+1.0 — -5.0
2.86	2.86	+1.0 — -4.0

表 9

光阑张角 α°		ΔY 允许变动范围 (毫米)	ΔY 允许范围内 之应力平均值 $\bar{\sigma}_x$ (公斤/毫米 ²)	实际应力值 σ_T (公斤/毫米 ²)	$\bar{\sigma}_x - \sigma_T$ (公斤/毫米 ²)
α_1	α_2				
0.72	0.72	+2.0 — -5.0	34.0	36.6	-2.6
0.72	1.36	+1.0 — -5.0	35.8	36.6	-0.8
1.36	1.36	+0.2 — -4.0	35.0	36.6	-1.6
2.86	2.86	-1.0 — -3.0	35.5	36.6	-1.1

5. 结果讨论

①光阑张角在 0.43° 到 1.36° 之间变化是否影响应力测定的准确度, 必须从测定值的误差进行分析。表4, 5, 6, 7都列出了标准误差的实验值。

为了判断标准误差实验值的大小, 暂且借用日本 x 线应力测定标准所提供的计算公式, 将实验值与计算值对比。标准误差计算式为

$$\delta = a \cdot \frac{H_w}{\sqrt{I_p}} \sqrt{\left(1 + \frac{2}{I_p/I_B}\right) \cdot v + b}$$

式中 H_w : 半高宽(度)

I_p : 峰值强度(次/秒)

I_B : 背底强度(次/秒)

v : 扫描速度(度/分)

a, b 为常数: $a=2.7, b=0.66$ 。

对于某一种试样, H_w 是一定的。测试参数不变, v 也是固定的。但是由于实验中使用各种 α 角的配合, 每一种配合有一个峰值强度 I_p 值。因此必须先对表4, 5, 6, 7的各种 α 角配合的 I_p 求其平均值, 才可得到标准误差的计算值。表10列出狭峰及宽峰试样标准误差的实验值及计算值。

表 10

试样半高宽 H_{α} (度)	加载或定应力试验	测定次数	标准误差 δ (公斤/毫米 ²)	
			实 验 值	计 算 值
2.2	加 载	65	1.08	1.22
	定 应 力	52	1.28	1.23
7.0	加 载	36	2.17	4.3
	定 应 力	19	1.81	4.0

由表可以看出：狭峰试样标准误差的二种实验值和计算值大致相等。宽峰试样标准误差的二种实验值很接近，但小于计算值。

标准误差的实验值和计算值相等或小于计算值这个事实可以说明：光阑张角在 0.43° 到 1.36° 之间各种配合下测定平试样的应力值，其波动幅度落在仪器误差与测量误差范围之内。因此，采用平行光束法时，可将光阑张角增大到 1.36° 。

②光阑张角过分增大，将使应力值出现明显偏离。铁粉，20钢，T10钢的测定结果均表明：光阑张角采用 2.86° 时，测得的压应力值偏低，而张应力值偏高。这个趋势与计算结果是一致的 [2]。

③由图 9 可以看出光阑张角比较小时，峰值强度 I_p 随 α 的增大上升比较快。为了取得量的概念，在表 11 中引入比值 $\frac{I_p^*}{\alpha}$ ，用来观察相对峰值强度 I_p^* 与 α 的相对增长情况。

表 11

入射光阑与接收光阑张角 α (度)	0.43	0.72	1.00	1.36	2.86
I_p^*	1	2.06	3.17	4.55	5.7
$\frac{I_p^*}{\alpha}$	2.32	2.86	3.17	2.61	1.99

$\frac{I_p^*}{\alpha}$ 的数值表明： α 在 0.43° 到 1.36° 之间，可以在 α 增长量较小的情况下，获得较高强度。而 $\alpha = 2.86^{\circ}$ 虽然 I_p^* 值高，但是其强度的少量增加是靠大幅度增大 α 得来的。考虑到 α 过分增大时带来的缺点，所以是应当避免选用的。

④从试样与光源距离偏离 $\angle Y$ 对应力值影响的实验结果，可以进一步证明平行光束法所依据的图 1, 2 是有问题的。

(1) 偏离值由 $+\angle Y$ 向 $-\angle Y$ 变化时， 2θ 值由低角移向高角。只是在某一 $\angle Y$ 范围内， 2θ 值的变化缓慢。如果从试验角度认为在此范围， 2θ 值的变动落在实验误差之内是可以的，可是从理论上认为采用平行光阑后 2θ 值在某段 $\angle Y$ 范围内不变则是不符合衍射几何原理的。

(2) $\angle Y$ 允许变动范围与光阑张角及衍射线宽度有关。即使按日本标准，光阑张角取