

內 部 資 料
歡迎交流指導

實驗应力分析論文选

用光彈性測量表面应变

第一机械工业部机械科学研究院

1963年12月

用光彈性測量表面应变

〔英〕 J. R. 林格

第一部分

將光敏材料胶粘在金屬表面上直接測量金屬表面的应变，曾由許多著名學者如 Mesnager⁵ 和 Oppel⁶ 提出過這樣的建議，並在他們的著作中作了比較詳細的論述。

當所要求的厚度大於 1.0 毫米時，Oppel 曾經採用圓盤形狀的合成樹脂塗層；而當厚度從 0.10 毫米到 1.0 毫米時，則採用粘性漆的形式，並進行熱處理，以獲得所需要的硬度。

在參考文獻（6）中給出的例子是用 5.0 毫米厚的樹脂塗層胶粘在帶有缺口的鋼制矩形杆件上，分作四個階段進行加載試驗。

由於缺乏適當的光彈性材料和胶粘劑，使得這些試驗工作遭遇到很大的困難。而由於這些困難，自 1937 年以後，這種試驗技術沒有獲得進一步的發展，直到最近，才見到 Drucker¹⁸ 及其同事發表的一篇論文，他們是在 1952 年開始工作的。

Drucker 的主要興趣是在塑性變形。他探索了兩種方法：一種方法是將粘有雙折射材料的金屬零件總成予以加熱，以獲得低的彈性模數和從塑料中得到線性的反應，這和光彈性凍結法相同；另一種方法是選擇能夠在室溫下獲得大变形的雙折射材料。

1956 年九月，Zandman 和 Wood²⁷ 在一篇文章中詳細地敘述了這種方法的商業發展情況，可以供應兩種型式的光敏塑料，一種是液體的，用於表面塗刷；一種是薄片形狀的，厚度為 0.04 吋（1 毫米），0.08 吋（2 毫米），和 0.120 吋（3 毫米），據稱其公差保持在 ± 0.0008 吋（0.01 毫米）；以及用於分析的專門儀器。

Lale 曾經在單向和双向的拉伸載荷下，對帶有中央圓孔的鋁合金薄板進行過許多工作，並將其結果作為博士論文於一九五七年九月向英國倫敦大學提出。

Lale 發展了各種環氧樹脂的三段胶粘方法，並採用了斜射法。

在 Nottingham 大學，Fessler 和 Haines 曾在鋁合金平面上試驗過環氧樹脂胶粘層的方法，特別是關於原始雙折射的防止。他們曾經做過能夠支承大於 4% 应变的連接，並在一個耳柄試件上進行過試驗，用來說明這種方法的應用。

Dantu⁵¹ 曾經用应变計和光彈性塗層在石子、灰泥、和混凝土棱柱體的表面上測量過应变。

有趣的是氯化銀晶体^{23,24}、尼龙²⁵ 和聚乙烯²⁶（Polyethylene）的雙折射研究（這些材料的塑性性質與金屬的相類似）曾經激起人們很大的興趣去研究金屬塑性範圍內的应力分布問題。

近年來，這個方法已引起了許多科學工作人員的注意，他們的實驗研究工作將會在適當的時期予以發表。

“金屬塑料”法

“金屬塑料”這名詞是新起的，用來簡要地說明應用金屬和塑料的混合總成來直接進行光彈性应变測量的一種方法。

方法說明

在需要研究应力分布的金属板或构件上胶粘一块或塗上一层均匀厚度的光弹性塑料。

将混合的总成加上載荷，并用偏振光投射在光弹性塑料上来观察所产生的等色綫图形；从金属表面反射出来的光綫，用一反射式偏振光鏡按照一般的方式来进行分析；由于光綫通过塑料两次，該組合件的表观应变-光学灵敏度应加倍。

差不多在全部实验中都是用的名义厚度为0.125吋(約3毫米)的光弹性材料，这是由于需要，而不是由于选择，但最好是用較薄的塗层，只要其能适合于所要求的灵敏度或滿足所拟定的研究范围由所需要的条纹序数就可以。

明显地光弹性材料只应承受胶粘层或粘合介质传递的应变，而不是直接承受外力，否則将会产生虛假的等色綫图形。

可用等斜度型式的“金属塑料”标定試棒进行拉伸試驗来确定組合件的应变-光学常数，但在某些情况下，它和一般的光弹性工作相同，可从构件本身直接确定一个条纹常数或其他的常数。

在本研究工作中曾經进行两种胶粘的方法。为了方便起见，所用試件将按照制造的方法分做两个标题来討論。

胶粘的試件

这种試件是将光敏材料直接胶粘在金属表面上制成的。

直接鑄造的試件

这种試件是将光敏材料直接鑄造在金属表面上并在金属表面上聚合。

光学常数

“金属塑料”試件在远离自由边界或載荷边界的应力区内的光学常数看来是与光弹性材料单独在該相同的条件下所确定的常数相接近。但前者的常数将会受到下列几个重要因素的影响而需要修正：

(1) 当金属表面的一面胶粘有塑料塗层时，在載荷下将沿塑料塗层的厚度产生不均匀

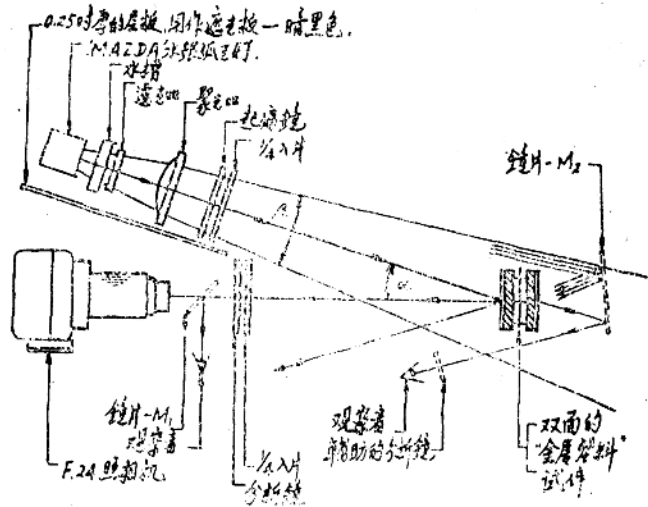


图1 第一种反射式偏振光仪器 [参考文献 (2) 和 (3)]

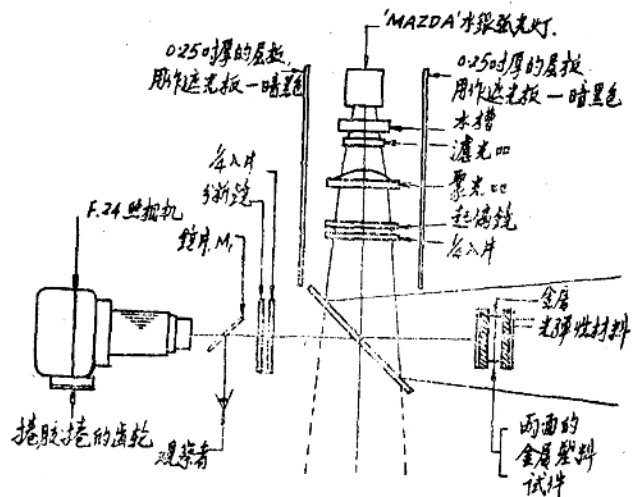


图2 第二种反射式偏振光仪器 [参考文献 (3)]。

的变形。

(2) 在塑料的边界上, 载荷是逐渐从金属传递给塑料的, 特别是耳柄试件的加载边界部分, 虽然所有的这些边界可以不必与金属构件的相符合。

(3) 在用胶粘剂胶粘的试件上, 胶粘剂的薄膜有产生剪切变形的影响, 但这种变形在胶粘剂薄膜中并不十分重要, 一般小于 0.002 吋 (0.05 毫米), 因此至今还不曾仔细地研究过。在直接铸造的试件中没有胶粘剂薄膜, 就不需要检查这种可能产生误差的根源。

(4) 在将本方法用于厚度与塑料板相差不多的低弹性模数的金属板上时, 全部外加载荷在胶粘的和直接铸造的两种试件的塑料材料上的分布比例是很重要的一个数值。

光弹性材料的选择

各类用途的光弹性材料的选择不仅取决于这些材料的物理和光学性质, 而且也取决于所胶粘的金属材料的性质。

虽然采用应变-光学灵敏度高的光弹性材料一般是有好处的, 但也应该适当考虑金属的性质, 例如弹性模数 E 、比例极限和应力-应变的特征曲线。

现有的光弹性材料当用于“金属塑料”试验研究时, 其相互间没有多大的区别。

适合这种用途的材料应具备下列的特点。

- (1) 应变-光学灵敏度好; 亦即应变-光学常数低。
- (2) 应力-应变比例极限和应变-光学比例极限高, 最好能达到断裂点。
- (3) 弹性模数低, 与第 (1) 项的要求一致。
- (4) 蠕变性能好。
- (5) 加工性能好。

还有, 铸造的树脂应能在室温下固化。

当两种材料具有相同的应变-光学常数时, 即应考虑第三项的要求。材料以弹性模数低的为较好。这是因为它对所胶粘的金属表面约束较小。

上面考虑的只是用于金属板料时的一些重要的要求。

光弹性材料

(1) 硬明胶片 (Hard Gelatine Sheets)

Scott² 曾经试验过硬明胶片的光学性质和物理性质, 但不容易获得厚度大于 0.007 吋 (0.18 毫米) 的明胶片, 用来作进一步的试验。

经过调查, 发现当时的制造厂不准备特殊生产 0.05 吋 (1.27 毫米) 到 0.100 吋 (2.54 毫米) 厚的硬明胶片。

根据厚度为 0.007 吋的试件所作的试验, 其弹性模数 E 约为 3.25×10^5 磅/平方吋, 而其应变-光学常数则好于 0.0001 吋/吋/N/吋。

(2) Catalin 800

现有的大多数 Catalin 800 材料由于存在有原始的双折射效应, 表面加工不好和不平等缺陷, 只是作了一些初步的试验, 用来确定这种材料是否合用。

(3) C. R. 39

在胶粘型试件上, 哥伦比亚树脂用得最多, 这主要是由于它透明, 没有原始双折射效应, 表面加工良好而且平直, 而不是由于它的光学性质和物理性质具有什么显著的优点。

(4) Marco 树脂

S. B. 26C

鑄造樹脂

S. B. 28C

表面塗層樹脂

聚酯樹脂，S. B. 26C 和 S. B. 28C，是直接鑄造試件的主要材料。

曾經進行試驗確定改變 S. B. 26C 中各種成分的比例的影響，得出表 I 中所示的混合物具有適合這種用途的光學-物理性質。

S. B. 28C 的比例系根據判斷選擇的，而不是按照分析的方法，這是由於材料沒有得到供應，直到試驗的最後階段才獲得這種材料，因此所給出的比例不一定是恰當的。

表 1 Marco 樹脂 S. B. 26C 和 S. B. 28C 的成分比例

項目號	成 分	重 量 百 分 數			項目號	成 分	重 量 百 分 數		
		S. B. 26C 第一種 混合比	S. B. 28C 第一種 混合比	S. B. 28C 第二種 混合比			S. B. 26C 第一種 混合比	S. B. 28C 第一種 混合比	S. B. 28C 第二種 混合比
1 (a)	M. R. S. B. 26C	100			3 (a)	催化劑粉末 H. G. H.	2		
1 (b)	M. R. S. B. 28C		100	100	3 (b)	糊狀催化劑 H		4	4
2	单体 C	40	40	5	4	加速劑 E	1	4	4

3 (a) 和 3 (b) 的成分相似，兩份糊狀催化劑 H 相當於一份催化劑粉末 H. G. H.

(5) 其他光彈性材料

A-2 級 Kriston 单体[催化劑：過氧化苯酰， $(C_6H_4CO)_2O_2$]以及 Xylonite 都做過簡單的試驗。

Kriston 具有脆性的缺點，並需要較高的固化溫度，而 Xylonite 的光學靈敏度差，沒有立即使用的可能。

但值得注意的是 Kriston³⁰ 直到斷裂時還具有明顯的線性應力-應變特徵和應力-光學特徵。

膠粘劑

要在塑料板和金屬表面之間產生一種滿意的膠合，能夠滿足本試驗的要求的，並不像開始時所想像的那樣簡單。

所遇到的某些困難將在第 III 部分的附錄 I 中加以討論。

對膠粘劑所要求的主要性能為：

- (1) 能使塑料與金屬粘接良好；
- (2) 抗剪强度高；
- (3) 抗剪模數高；
- (4) 能在室溫下或較低的爐溫下固化。

定性試驗是在簡單的“金屬塑料”試件上進行的，其形式如圖 4 所示（見附註）。為了鑑定各種膠粘劑的性質和表面處理的方法，是在“金屬塑料”試件總成最後破壞以前，用塑料板與金屬之間出現的相對滑移作為破壞的標準。

還注意到破壞時發生的陡震使得金屬與塑料塗層脫開的程度。

試驗過的幾種膠粘劑為：

- (1) 環氧樹脂 101 和硬化劑 951。
- (2) 'Catacol'。

(3) 'Durofix'.

第(1)种胶粘剂曾用来粘接 Catalin 800 和 C. R. 39, 而第(2)种和第(3)种则分别用于 Catalin 800 和 Xylonite.

最后选择环氧树脂101, 它是一般应用中最满意的一种胶粘剂。

在直接铸造法中所用的Marco®树脂形成一个整体的自胶合介质, 并获得相当满意的结果。

对胶接的试件曾经进行定性试验, 以评定各种表面处理的胶接效率, 所用的试件如图4所示。如果铸造的塑料层和金属之间在最后破坏以前发生脱离的现象, 即不采用该种型的表面处理。

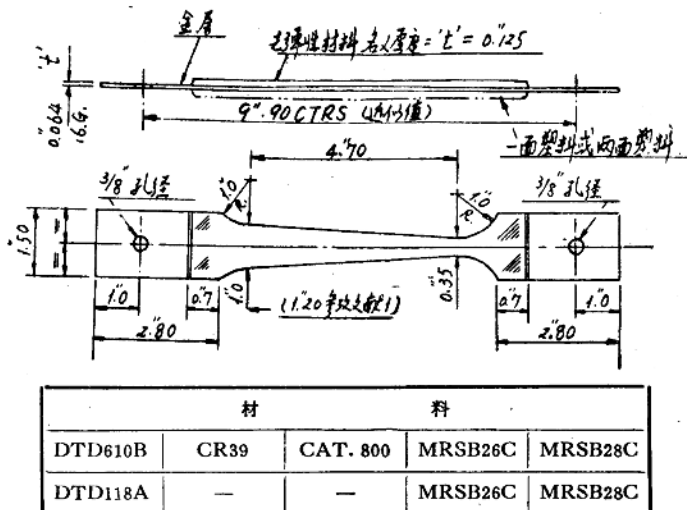
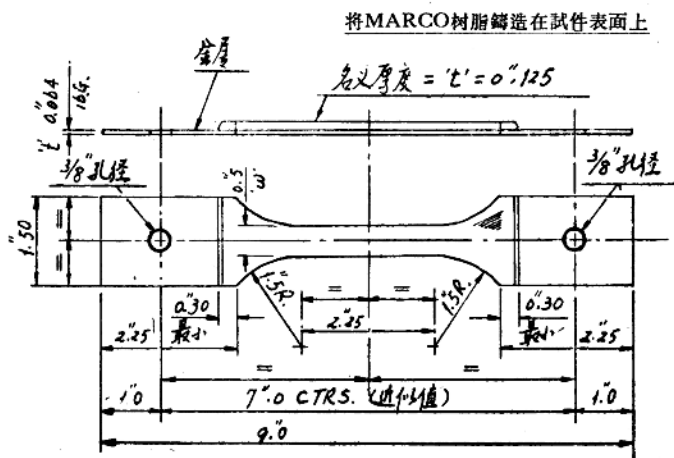


图3 粘接的和直接铸造的“金属塑料”试件, 杆身带斜度, 拉伸[参考文献(2)和(3)]。



附注: 将 $4.75 \times 0.50 \times 0.125$ 的平行塑料片粘接在杆身上, 用来鉴定胶粘剂和金属的表面处理。

材 料	
DTD118A	MRSB26C
DTD118A	MRSB28C

图4 直接铸造的“金属塑料”试件, 平行的杆身, 拉伸[参考文献(3)]。

表面处理

在金属和塑料的接触表面上进行细致的处理，是获得良好粘接的重要前提，但同样重要的是金属表面应能满意地反射入射的光线。

由于前面的要求，而又不可能在金属表面上获得一个如同一般双行程偏振光仪器有时所采用的涂银镜面相类似的光学平面，因此，要做到镜面反射是不可能的。而且构件或结构物在载荷下总是会产生歪曲的，很可能会将这种方法的一个值得可疑的优点也会抵消掉。

因此，把注意力集中在喷砂表面的适合性上，就胶粘剂的粘接和光线的反射来说，这是一个折中的办法。

用细颗粒的砂子在 50 磅/平方吋左右的空气压力下喷射在金属和塑料的表面上，可以获得满意的粘接效果，而且在这两种材料上也可获得很漂亮的、无光泽的表面，因而能够从金属

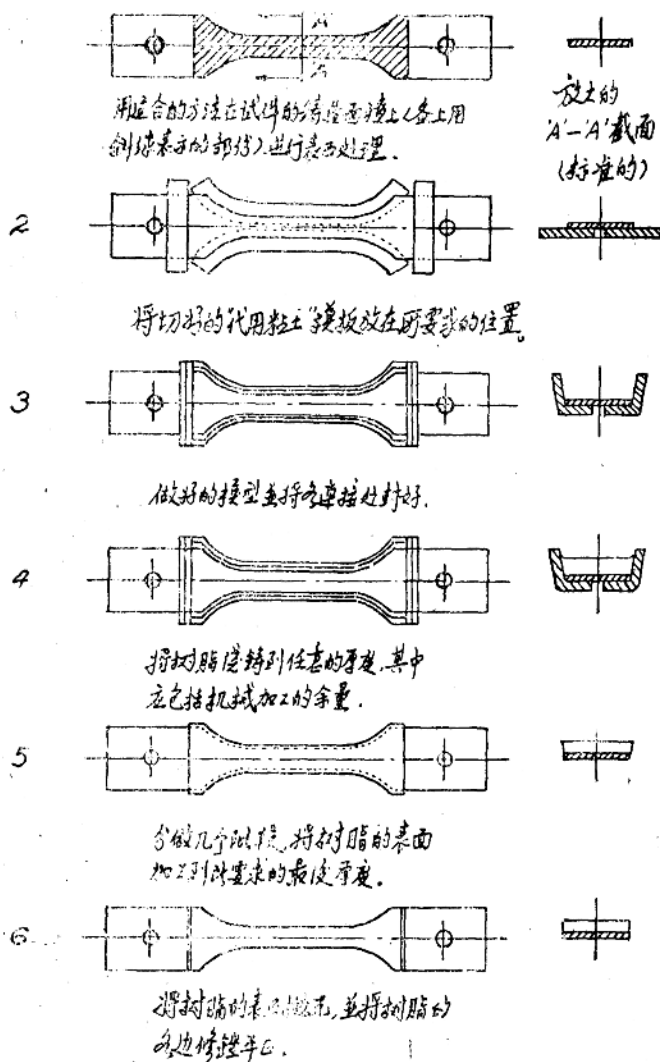


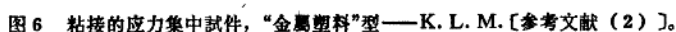
图5 制造直接浇铸的试件的几个阶段[参考文献(3)]。

輕型材料所做的試件，由于噴砂而引起的壓應力，容易產生翹曲，应在最后裝配之前，校正這一缺陷。

单独用砂布处理的表面是光亮的，紋路也相当均匀，但不能說它的拋光程度很高。拋光的表面具有有效的光綫反射特性，与直接鑄造的試件联合使用时更为滿意。

这样制造的金属塑料试件包括一个经过喷砂处理的表面和两层单独的树脂镀层，相互粘接在一起，组成一个单一均质的镀层。

在这些試驗以後，曾經試探過用鋁粉加入在粘貼試件的粘接薄膜中（作為填充劑），以改善反射的特性，但沒有獲得成功。



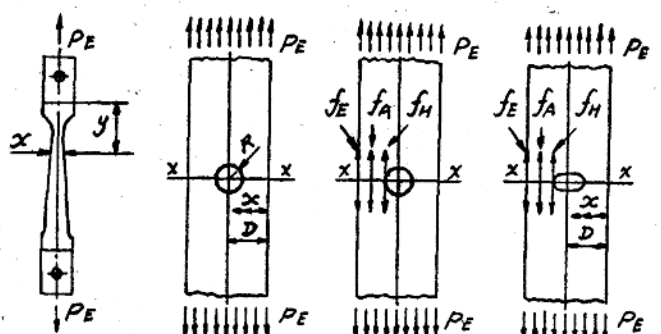
透射式和反射式偏振光仪器

这种透射式光弹性仪设计的光学系统具有4吋直径的清晰视场。

反射式偏振光儀器採用了不同的光源，需要較大的功率，其詳細規格如下：

光源 水銀灯，帶有變壓器

7



杆身带斜度的試件,

型号: E. F. H. J. G.

型号: K和L

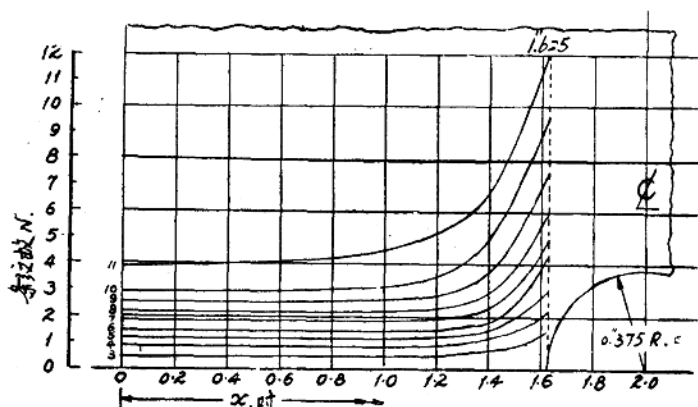
圓孔 0.75和 1.25 直徑

型号: M

开槽的孔 1.50 x 0.75

型号J只用于分析

图7 带斜度的拉伸試件和应力集中試件——K, L, M的符号〔参考文献(2)〕。



試件型号: K

图8 应力集中試件, 型号K〔参考文献(2)〕。

透射式和反射式偏振光仪器都排成暗場和圓偏振光。

反射式偏振光仪器

第1种型式和第2种型式。

两种型式的反射式偏振光仪器的示意图見图1和图2。

大多数試件的尺寸都大于偏振片和其他光学元件的直徑, 因此, 两种情形都不可避免地出現发散的光束, 这是不能令人完全满意的, 但也不得不这样。

为了有助于保持准确度, 应将視差角 α 保持在最小的限度, 以适合于各种偏振光仪器原件的尺寸以及所需要拍摄影像的大小所加的限制。

試驗时, 将M.1鏡放在分析鏡与摄影机镜头之間, 用来檢查各次摄影曝光之間載荷循环时的光彈性图形的发展。另将一个M.2鏡(图1)与一小块圓的偏振片联合起来用作分析鏡, 可在离开光源較远的地方檢查“金屬塑料”試件的应力光图, 亦即将試件构成双行程偏光彈性仪总成的一半, 或将光彈性材料胶粘在一个金屬板的兩边。

Nörrenberg Doubler, 即第二种型式的偏振光仪器, 按照它的設計是可以消除第1种型式的仪器中視差角 α 所引起的誤差的。

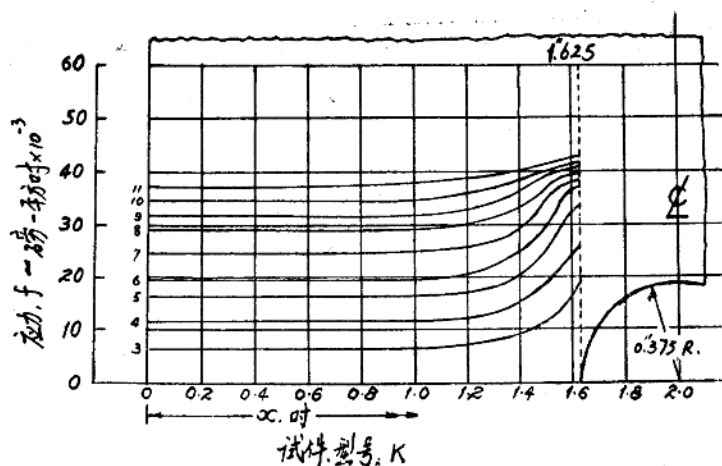


图9 应力集中試件，型号：K [参考文献（2）]。

工作台和架子

利用現成的工作台和架子，稍加修改，用来安装两种反射式偏振光仪器的光学系統，并可移动或迴轉工作台的上部，以便将偏振光仪器与試驗机对准。

将摄影机、光源和偏振光仪器的一半元件分装在两个单独的管子軌道总成上；并可按照每种型式的偏振光仪器的要求，用螺釘将軌道固定在預定的位置。

摄影机

两种型式的偏振光仪器都是采用标准型号的 ex-R. A. F. F24 航空測量摄影机来拍摄 本研究工作中所拍摄的全部照片。

該摄影机原装有f2.9的鏡頭（沒有黃色濾光鏡），焦距 8.0 吋，聚焦点可以无限远。

因此，在摄影机机身的内部进行了一些加工，以便安装輕合金的伸縮管，然后再将透鏡和透鏡間的光圈总成装上，即可进行滑动的調节，使得离开透鏡 3~8 呎（約 1~2.5 米）远的物体能够对焦。

在摄影机的搖架和底座中装有快速开启的裝置，可在試驗的任何時間內直接观察光彈性图形，而不致打乱摄影机本身預先对焦的位置。

摄影机的快門

将摄影机中一般供应的聚焦平面取去，代之以透鏡帽和秒表，即可滿足曝光的时间，在 f8.0 吋， 曝光的时间一般不短于 10 秒。

胶卷

胶卷型号

全色胶卷

胶卷速度

相当于 Ilford H. P. 3 (Ilford 32°)

尺寸

5⁵/₈ × 5³/₈ 吋

干板匣的型式

标准型

曝光号数

50

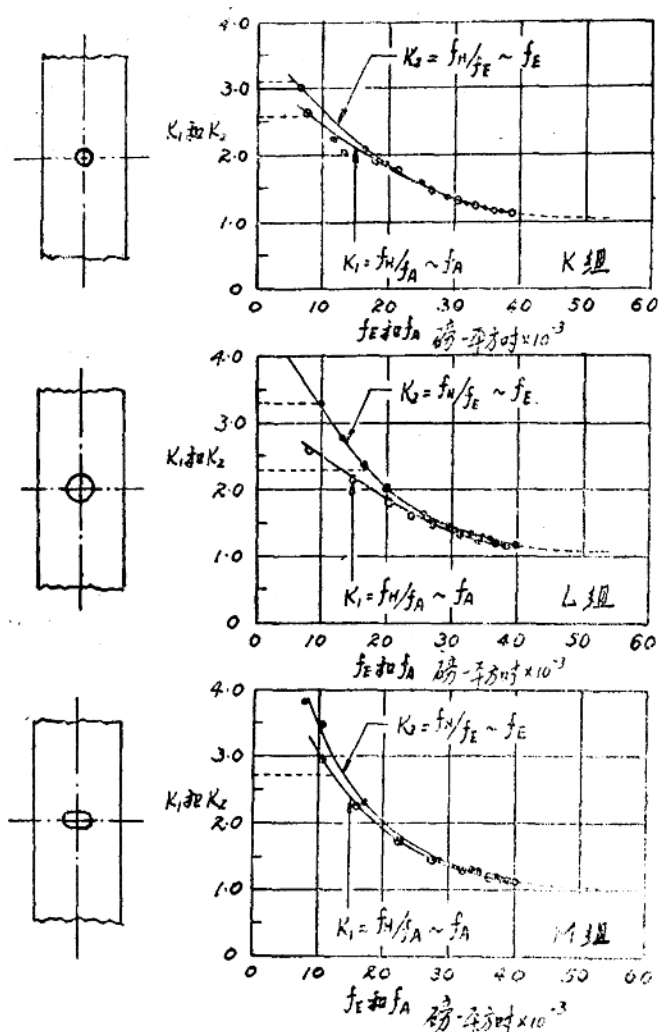


图10 胶粘的应力集中试件“金属塑料”型号——K, L, M [参考文献 (2)]。

试件

光弹性材料校核用的试件

参考文献 (3) 中所介绍的工作是在 1950 年后期开始进行一般材料 (用于“塑料金属”试验) 的拉伸试验, 得出弹性模数 E 、比例极限和达到断裂点的一般光学和应力-应变曲线。

有关这些试验的详细结果不要在此介绍, 因为很多手册和报告中都可找到这方面的材料。

“金属塑料”试验用的试件

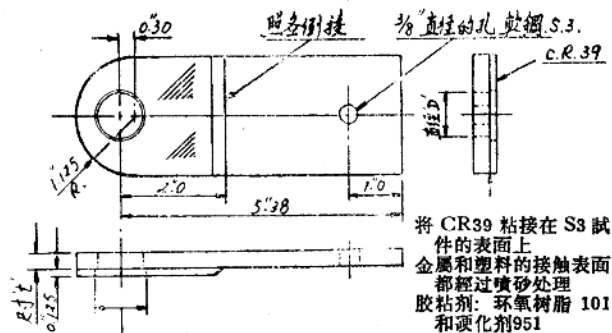
一共做了 24 根带有斜度的试棒 (其中 14 根是胶粘的, 10 根是直接铸造的), 和 18 根直的试棒 (都是直接铸造的), 其尺寸见图 3 和图 4, 内中包括有几种不同的组合形式 (系由金属、光弹性材料和表面处理的组合)。

早期的工作是在带有斜度的胶粘试棒上进行的, 这样的选择是想沿试棒身干的部分获得

线性的应力梯度，而且当需要时，可以提供一個相当简单的应力光图，用来作校核，并有助于反射式偏振光仪器工作的进一步发展。

在带有斜度的试棒上进行试验以后，已能得出较为满意的粘接方法，并能最后确定所选择的光弹性材料，然后再进一步做一批试棒来说明这种方法的实际应用，这是在带有圆孔或椭圆孔的板中在均布拉伸载荷下(见图6)试验其对称截面上的应力分布和应力集中的情况。

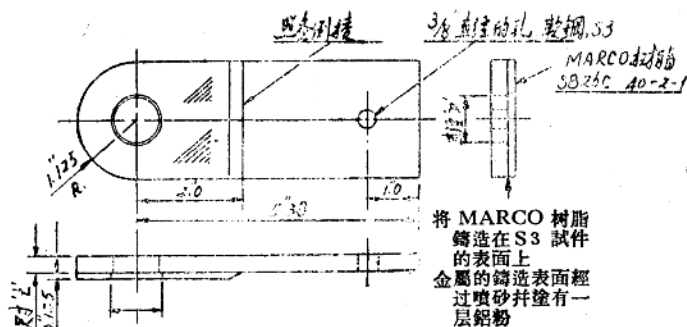
后来的研究是属于定性的实验，想把这种方法实际用于加有载荷的孔，特别是销轴与孔眼的间隙对对称轴线上应力分布的影响。



将 CR39 材料的孔加大 0.010 吋到 0.015 吋，以防止销轴与塑料的直接接触

試件型号	尺寸 't', 吋	直径 'D', 吋	材 料
R4A	0.316	0.89290	软钢 S3 和 CR39
R4B	0.316	0.89200	
S4B	0.314	0.87532	
S4A	0.315	0.87520	

图11 粘接的耳柄试件的尺寸，试件号：R4A，R4B，S4A，S4B
〔参考文献(3)〕。



将 MRSB26C 材料的孔加大 0.010 吋到 0.015 吋，以防止销轴与塑料的直接接触

試件型号	尺寸 't', 吋	直径 'D', 吋	材 料
R1A	0.316	0.88640	软钢 S3 MRSB26C 40-2-1
S1A	0.316	0.87539	

图12 直接铸造的耳柄试件 R1A，S1A〔参考文献(3)〕。

作者与 Henwood⁴ 共同試驗了一組四个軟鋼的、胶粘有光彈性材料的耳柄試件。根据校核試驗，Henwood 认为选作耳柄試件的这批材料中在所观察的限度內并不存在优先的晶粒取向。原来选定的耳柄尺寸（图 11）是想使它发生剪切破坏。

对于直接鑄造的“金屬塑料”試件，开始时是在图 4 所示的平行試件上試驗的，以后再在前面所述的带斜度的試件上进行。

本实验研究的結尾是在直接澆鑄的耳柄試件（图12）上进行等色綫图形的定性試驗。

当比較拍摄的記錄时，必須对負片洗印过程中的变化、各組相片之間的变化加以适当的考虑，而且在全部試驗研究过程中，光彈性塗层的厚度不是保持严格不变的，如果不考虑这些，将会对某些“金屬-塑料”組合試件所出現的表观应变-光学灵敏度容易引起誤解。

第二 部分

試驗步驟和試驗結果

杆身带斜度和杆身平行的試件

給杆身带斜度和杆身平行的試件加载，每次增加 200 磅，直到 1300 磅左右，一般的說，这是这两种类型的試件的最大載荷。

載荷較高时，如果需要，可将每次的增量降低到 50 磅或 25 磅，以消除等色綫由于塑性变形而引起的快速增加，特别是在斜度試件較窄的頸部处。

Scott 曾將光彈性材料板胶粘在 DTD610B 斜度試件的两边，进行了試驗，但所得的結論是：將塑料胶粘在試件的一边或两边，对于光彈性的試驗結果沒有多大的差別。

图 15 到图 18 是全部試驗中少数几个試件在各个載荷阶段的照片，并詳細載明所用的金屬材料和光彈性材料以及它們各自的厚度（用 t 表示的）。

除图17(b)以外，所有的照片都是第 1 种型式的偏振光仪器（第一 部分中的图 1）拍摄的。

图15(a) 和 (b) 是用 C. R. 39 和 DTD610 B 板料所作的試件（采用两种不同的表面处理）在 0 載荷和 1200 磅載荷下所得的典型結果。

在零載荷时拍摄的照片中出現有初始的双折射，这反映了这种胶粘方法的一个固有的特点，即由装配时所加的压力而引起的应力的性质和范围是預先无法知道的。注意这些应力一般只出現在塑料端部邻近粘接的不大区域内。

因此，在胶粘剂沒有肯定固化以前，决不能判断某一試件总成的成功或失敗。

在图 15(c) 中，Catalin800 塗层在零載荷下也显出有初始的双折射，但在这种情形下很可能是由于基体材料中的应力，而不是由于装配所引起的。

在 1200 磅載荷下所拍摄的照片可与 (a) 和 (b) 試驗中同一載荷下的照片相比較。

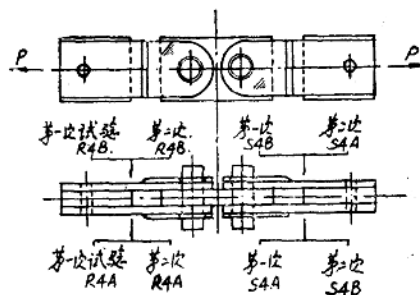


图13 耳柄試件总成装配图。1A和1B試驗用的“金屬塑料”試件（參閱附注）[参考文献（3）]

附注：(a) 1A号試驗又分成两次单独的試驗。試驗 1 和試驗 2。第二次試驗时，將 S4A 和 S4B 两个耳柄試件相互交換位置。(b) 在这类試驗的每一試件上，將光彈性材料的 0.875 吋的孔徑加大 0.010 到 0.015 吋，以防止銷軸和塑料的直接接触。两个联接銷軸的直徑为 0.87460 吋。

試件 (c) 还包括有一个在 1500 磅载荷下拍摄的照片, 这是因为在杆身带有斜度的試件上、朝向頸部的方向出現有“成对”的条纹 (“pairing” of the fringes); 在胶粘的耳柄試件上进行試驗时, 也曾观察到这一现象, 并在适当的章节中作了說明。

表 II 是参考文献 (1) 的工作中测定条纹应变常数 F 表示的应变-光学灵敏度所采用的典型方法。

J2, J3 是指不同的载荷水平下所拍摄的照片的号数, 系利用原来的符号。

在确定 F 时, 已扣除全部外加载荷在塑料中的分配比例。

在彈性范围内:

$$\begin{aligned} \text{如 } E &= \text{彈性模数} \\ &= 2.55 \times 10^5 \text{磅/平方吋 (C. R. 39)} \\ &= 10.30 \times 10^6 \text{磅/平方吋 (DTD. 610B)} \\ t &= \text{材料的厚度} \\ &= 0.130 \text{吋 (C. R. 39)} \\ &= 0.065 \text{吋 (DTD. 610B)} \end{aligned}$$

塑料所承担的载荷比例

$$= \frac{(E)_{\text{CR39}}}{(E)_{\text{DTD610B}}} \times \frac{(t)_{\text{CR39}}}{(t)_{\text{DTD610B}}} = \frac{0.255}{10.300} \times \frac{0.130}{0.065} \approx 0.050, \text{ 即 } 5\%.$$

因此, $P_{\text{NET}} = P - (P \times 0.05)$ 磅。

表中給出的 F 值在所记录的载荷范围内非常一致。

将两种 Marco 树脂直接鑄造在噴砂处理的鎂合金板 DTD. 118A 上, 在 0 磅、600 磅和 950 磅的三个载荷下所拍摄的照片如图 16(a) 和 (b) 所示。

明显地由于聚合时收缩所引起的初始双折射再一次在零载荷試驗时显著地标示在两个試件的杆身上, 而不是在塗层的两个外端, 但在試件 (5) 的上部也出現有初始双折射。

Marco 树脂的灵敏度看来似乎高一些 (将 DTD. 118A 組合件与試件 (1), (2) 和 (3) 相比), 这主要是由于 DTD. 118A 材料的彈性模数低, 从图 14 可看出, 約为 7.0×10^6 磅/平方吋。实际上, 板状的 Marco 树脂的应变-光学灵敏度要比 Catalin 800 和 C. R. 39 都差。

图 17(a) 和 (b) 是同一个試件分别使用第 1 种和第 2 种偏振光仪器, 但采用同一光源所得的结果的比较。其收缩应力虽属于同一数量级, 但好像不及图 16(a) 中第四号試件的范围广大。

第 7 号試件出現的均匀黑色, 一部分是由于用它作第 6 号試件时在加载过程中所产生的残余应力。为了限制上述应力的严重性, 对所加的载荷作了限制, 因此沒有摄取第 6 号試件在 800 磅载荷下的照片。

图 18(a) 到 (d) 是以前用直接鑄造法所得的各种类型的試驗結果。

由于受到复制的限制, 表示各种类型的試件連同特殊型式的金屬表面处理方法的以及在平行試件的全部杆身长度内表示减速的均匀性的照片, 只能复制有限的一部分。

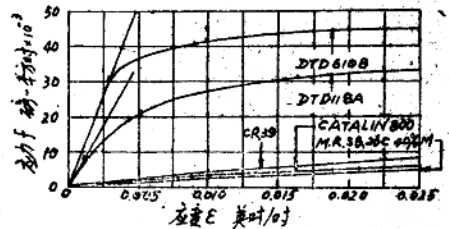


图 14 金属和光弹性材料的典型光弹性性质
应力-应变 (σ) 曲线 [参考文献 (3)]。

在所有的情形下，塑料塗層都是與金屬板粘接在一起，直到試件破壞。

粘接的应力集中試件, K, L, M 。

Scott¹ 試驗的应力集中試件的尺寸及其不連續部分的型式，已在第一部分的圖 6 中詳細列出。

為了簡化，並為了減少分析時的勞動量，其條紋应变常數 F 是直接從 $(p-q)$ 曲線計算的，亦即將第一部分圖 7 中作用在 $X-X$ 試驗截面上的切应力略去不計。

由於沒有扣除塑料所承擔的全部載荷的百分數，因此用直接積分法得出的平均條紋值來計算 F 的大小，會偏于過高。

在三種試件所採用的分析方法中，只着重介紹了 K 式的一種，但它可作為全部試驗中所採用的步驟的典型代表。

分析

三種試件在加載範圍內所拍攝的全部 39 張等色綫圖形的照片，只在圖 19 和 20 中給出了一部分，即兩種載荷等級的。

在第一部分的圖 8 中畫出的條紋序數曲線是與金屬中的应变成比例的，系從全部載荷範圍內的類似照片中得出。

其次是確定平均的條紋应变常數 F 。其作法是求出金屬彈性範圍內全部曲線的 average 條紋值，並在扣除光彈性材料中分担的全部外加載荷的比例後，把所求得的平均條紋值與表 IV 中所示的外載荷聯繫起來。

求出扣除數大約為 5 % 的方法，已在帶斜度的拉伸試件中作了示范的演算。

取 $F = 0.00127$ 吋/吋/ N ，利用圖 14 中給出的 DTD. 610B 材料的应力-应变曲線，可將表 III 中的條紋序數或號數與表 V 中金屬板的应力值聯繫起來。

因此，聯合使用表 III 和表 V，可以得出每一載荷等級的应力分布曲線；試件 K 的這些曲線已在第一部分的圖 9 中畫出，並清楚地顯示出孔邊的塑性效应是隨載荷的增加而增加的。

表 II 平均的條紋应变常數 F 的計算

圖 號	外載荷, P (磅)	條紋數, N	y (吋)	x (吋)	橫截面積 (平方吋)	淨載荷 (磅)	應 力 (磅/平方吋)	彈性模數, E (磅/平方吋)	应变, ϵ (吋/吋)	條紋应变 常數, F (吋/吋/ N)
J 2	200	0.50	2.48	0.49	0.0320	190	5930	10.30×10^6	0.000575	0.00115
		0.50	4.96	0.96	0.0625		6090		0.000590	0.001180
J 3	400	1.0	2.83	0.56	0.0365	380	10400	103.0×10^6	0.001010	0.001010
		1.0	4.26	0.083	0.0540		10540		0.001023	0.001023
J 4	600	1.50	2.83	0.56	0.0365	570	15600	10.30×10^6	0.001511	0.001010
		2.0	1.77	0.39	0.0260		21900		0.002120	0.001060
		1.0	5.77	1.12	0.0730		10400		0.001010	0.001010
J 5	800	1.5	4.15	0.70	0.0462	760	16400	10.30×10^6	0.001590	0.001060
		2.0	2.94	0.575	0.0375		20300		0.001970	0.000990
		1.5	5.88	1.16	0.0755		16600		0.001610	0.001070
J 6	1300	2.0	4.68	0.91	0.0598	1,235	21000	10.30×10^6	0.002040	0.001020
		2.50	3.86	0.75	0.0494		25400		0.002160	0.000980

塑料: CR39, $t = 0.130$ 吋, 彈性模數 $E = 2.55 \times 10^5$ 磅/平方吋

平均 = 0.001050

金屬: DTD610B, $t = 0.065$ 吋, 彈性模數 $E = 10.30 \times 10^6$ 磅/平方吋

表 III 条纹分析——粘結的应力集中試件, K 型

照片号	所加載荷 (磅)									
K2	1000	$\times$ 吋 条纹数, N	1.40 0.50							
K3	2000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~0.96 0.50	1.54 1.0	1.62 1.50					
K4	3000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~1.0 0.90	1.30 1.0	1.50 1.50	1.60 2.0				
K5	4000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~1.0 1.20	1.40 1.50	1.50 2.0	1.56 2.50	1.62 3.0			
K6	5000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~1.0 1.50	1.44 2.0	1.50 2.50	1.54 3.0	1.60 4.0			
K7	6000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~1.0 1.90	1.25 2.0	1.42 2.50	1.48 3.0	1.53 3.50			
K8	7000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~1.0 2.25	1.42 3.0	1.48 3.50	1.50 4.0	1.54 4.50	1.56 5.0	1.62 6.0	
K9	8000	$\times$ 吋 条纹数, N	0~0.80 2.60	1.28 3.0	1.38 3.50	1.42 4.0	1.50 5.0	1.55 6.0	1.60 7.0	
K10	9000	$\times$ 吋 条纹数, N	0 3.20	1.18 3.50	1.30 4.0	1.36 1.50*	1.40 5.0	1.46 6.0	1.51 7.0	1.62 9.0
K11	10000	$\times$ 吋 条纹数, N	0.20 4.0	1.0 4.50	1.12 5.0	1.34 6.0	1.43 7.0	1.46 8.0	1.50 9.0	1.62 12.0

* 原文可能有錯——譯者注。

从这些曲线可以計算出孔边的应力 f_H 与板边的应力 f_E 之比以及平均的应力 f_A , 见表 VI, 平均拉应力 f_A 是用积分 X—X 截面上的应力分布曲线得出。因此要比用淨加載荷計算的平均应力略小一点。

在第一部分的图 10 中, 已将三种試件的 f_H/f_E 和 f_H/f_A 的曲线画出, 并将 Howland¹⁴ 和 Hevwood³⁶ 所給出的彈性状态的相应几何因数用虚线在图上表示出来。

低載荷下, 金屬的应力-应变曲线完全处于彈性范围内, 应力集中曲线可望趋于平直, 給出一个相当于彈性应力集中系数的常数值, 即 $f < 25000/2.50 < 10000$ 磅/平方吋 (近似地) 时的 K_1 值。

但是这一趋向是不明显的, 并与已建立的结果有矛盾, 因此 Scott 认为这是由于試驗中的固有状态所引起, 一部分可能是因为板的长寬比小, 以及在板的加載的两端, 載荷分布不均匀。

大約在金屬的比例极限处, 亦即 25000 磅/平方吋, 各种情形下的应力集中系数 K_1 和 K_2 都接近于 1.60, 而高于 25000 磅/平方吋时, 曲线的形状都相似, 并在极限应力下渐近于 1。从图 14 可看出, $f_{ULT.} = 45000$ 磅/平方吋。

三种試件所測定的条纹应变常数分别为:

K 型 $F = 0.00127$ 吋/吋/N。

L 型 $F = 0.00123$ 吋/吋/N。

M 型 $F = 0.00150$ 吋/吋/N。

F 有小的变化是由于彈性常数和光学常数的不同以及由于制造試件所用的 C. R. 39 板材

的厚度有不同所引起的。

Stowell⁹ 原来提出彈性和塑性应力集中系数的广义方程式已由作者初步用于第一部分图 10 中所給出的結果。

$$K_{\text{plastic}} = 1 + (K_{\text{elastic}} - 1)(E_s/E_\infty)$$

式中 K_{plastic} = 塑性范围的应力集中系数

K_{elastic} = 弹性范围的应力集中系数

E_s = 材料在最大应力处的割綫系数

E_∞ = 材料在远离不連續区的割綫系数

用尝试与誤差法解广义方程式显然与先前的研究相符合，但在 $f_E = f_A = 10,000$ 磅/平方吋到 $f_E = f_A = 45000$ 磅/平方吋的范围内得出的結果要比第一部分图 10 中所示的曲綫大 5~10%。

粘接的耳柄試件，R4A，S4A 和 R4B，S4B

不拟在定量的基础上来分析所获得的結果，这是由于缺乏某些修正系数值的試驗数据和資料，这方面的知識对于精确分析是很重要的，特别是在孔的附近的复杂应力系統区域内。

粘接的耳柄試件的尺寸已在第一部分的图 11 中給出，并在图 13 中表示出已背对背地装配好的成对耳柄試件总成，准备用来进行試驗。

图 21 和 22 是两次单独試驗过程中所拍摄的等色綫图形照片。

第一次試驗时（是将 R4A 和 S4A 試件面对照相机），在 S4A 的耳柄上观察到有初始的、非对称的双折射图形，据推测是由于制造时正面加压所引起的，与 R4A 試件在零载荷时具有明显的无应力状态相比较，即可明显地看出来。

由于与 S4A 試件相对应的 S4B 試件的塑料外表面上由于偶然的原故划有很深的刻痕，便想消除 S4A 耳柄試件上的这一缺陷。

分級加载，每次增加 2000 磅，直到最大载荷 12000 磅（每个耳柄上的载荷为 6000 磅），而这缺陷仍繼續存在，便决定将 S4A 試件与 S4B 試件对調，幸好 R4A 耳柄試件是固定配合（銷軸与孔的間隙大），因此 S4A 和 S4B（銷軸与孔的間隙小）对調没有多大的影响。

S4B 在互换以前应按照第一部分图 11 所示的尺寸檢查。

第二次試驗时，再加上载荷，每次的增量仍为 2000 磅，直到淨截面的表观屈服点，这可由系数序数的突然增加和不成比例的增加来确定，因此在屈服点以上，将增量减为 1000 磅。

在全部达到 18000 磅的载荷范围内，軸銷与孔的間隙对每种耳柄試件的应力分布具有不同变化的影响，已在图 22 的等色綫图形中显示出来。

表 IV

照 片 号 数	曲綫下面 的 面 积 (平方吋)	曲 綫 的 基 长 (吋)	平 均 条 紋 值 N	净加载荷 (磅)	DTD610B				应变条紋 常 数 吋/吋/N
					橫截面积 (平方吋)	应 力 (磅/平方吋)	弹性模数 (磅/平方吋)	应变, ϵ (吋/吋)	
K4	1.63	1.625	1.0	2.850	0.211	13500	10.30×10^6	0.00130	0.00130
K5	2.24	1.625	1.38	3.800	0.211	18000	10.30×10^6	0.00175	0.00127
K6	2.79	1.625	1.72	4.750	0.211	22500	10.30×10^6	0.00218	0.00127