

光弹性实验技术 及工程应用

佟景伟 李鸿琦 著



科学出版社

光弹性实验技术及工程应用

佟景伟 李鸿琦 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书分成七章,内容包括:光弹性模型材料配制、模具制作、浇铸和固化方法;光弹性模型的机加工方法、光弹性材料性能及其测定方法;机械载荷作用下光弹性模型冻结应力分析;气压载荷作用下光弹性模型冻结应力分析;自重和离心力载荷作用下光弹性模型冻结应力分析;撞击和交变载荷作用下光弹性应力分析;三维光弹性模型的形状和承载具有某些特殊性问题等内容。

本书可作为高等院校、科研院所从事力学、航空航天、材料科学、机械、土木和水利等专业的教师、科研人员和研究生的参考书和教材。

图书在版编目(CIP)数据

光弹性实验技术及工程应用/佟景伟,李鸿琦著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034828-9

I. ①光… II. ①佟… ②李… III. ①光弹性试验-研究 IV. ①TB302.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 126416 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:张小霞
责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 8

字数: 147 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着科技事业和国民经济的快速发展,为确保机械零件或结构构件的安全性、耗材低和节约能源,应该把实验应力分析方法和有限元计算结合起来,对工程结构进行优化设计,以及对工程结构施工程序的合理性进行评估.

光弹性应力分析方法是分析复杂的机械零件或结构构件应力的重要手段,它不仅可求物体的边界应力,还可求物体的内部应力,也是确定应力集中系数的有效手段,具有直观性,并能进行全场观测.

随着国民经济的发展,光弹性方法在大型水轮机、发电机、大型火力发电机汽包封头、大型水坝、万吨水压机以及航天、航空工业、机械和土木工程等领域发挥了重要的应用,为强度分析、优化结构设计和寻找破坏根源起了重要作用.

在进行有限元计算时,需要正确建模,其中,合理地模拟力和位移的边界条件是非常关键性的工作,否则,通过计算程序得到的力学分析结果会不正确.因此,应用光弹性实验可以帮助建立或检验计算力学中的建模的合理性.同时,光弹性实验在验证理论分析中也有重要的应用价值.

随着航空、航天工业、高速铁路、新结构大型桥梁、地下隧道和动力机械的发展,许多超标准和非常规的设计增多,对光弹性实验方法提出更多和更难的课题.客观上急需培养一批年轻同志参加这项工作.本书是根据作者多年的研究成果和经验总结写成的,并参考了国内外的有关资料,针对光弹性实验中常遇到的技术难题,提醒读者应注意的关键问题,以及如何去解决这些问题.希望年轻同志通过对本书的自学,可少走弯路,提高光

弹性实验技术水平与解决工程问题的能力, 迅速成长.

阮江涛博士参加了本书的校对工作.

言 前

著 者

2010 年于天津

目 录

前言

第 1 章	光弹性模型材料配制、模具制作、浇铸和固化方法	1
1.1	概述	1
1.2	制造环氧树脂光弹性材料的原料配比	1
1.2.1	环氧树脂	1
1.2.2	固化剂	2
1.2.3	增塑剂	2
1.2.4	原料配比	3
1.3	浇铸模具	4
1.3.1	制作光弹性平板材料用的玻璃模具	4
1.3.2	制作三维光弹性模型的模具	6
1.4	光弹性模型的浇铸与固化工艺	12
1.4.1	环氧树脂、固化剂和增塑剂的混合、搅拌和浇铸	12
1.4.2	混合液的固化方法	14
1.5	减少环氧树脂光弹性材料的“云雾”现象	16
第 2 章	光弹性模型的机加工方法、光弹性材料性能及其测定方法	18
2.1	概述	18
2.2	模型的机加工	18
2.2.1	环氧树脂光弹性模型机加工的特点	18
2.2.2	机加工的一般方法	19
2.2.3	三维光弹性模型的切片和磨片方法	20
2.2.4	平面模型的加工工艺	21
2.3	模型的粘接	21
2.4	光弹性材料性能及其测定方法	22
2.4.1	室温下模型材料性质及其测定方法	22
2.4.2	冻结温度下模型材料性质及其测定方法	25

2.4.3 几种典型光弹性材料的光学和力学性质的测试	27
----------------------------------	----

第 3 章 机械载荷作用下光弹性模型冻结应力分析

3.1 概述	38
--------------	----

3.2 连杆光弹性模型冻结应力分析	38
-------------------------	----

3.2.1 连杆光弹性模型的制造	38
------------------------	----

3.2.2 连杆光弹性模型的实验	40
------------------------	----

3.2.3 实验结果	43
------------------	----

3.2.4 分析	48
----------------	----

3.3 矿井井塔倒锥台基础光弹性模型冻结应力分析	50
--------------------------------	----

3.3.1 倒锥台基础的光弹性模型的制造	50
----------------------------	----

3.3.2 倒锥台基础第 1 模型实验	51
---------------------------	----

3.3.3 倒锥台基础第 2 模型实验	56
---------------------------	----

第 4 章 气压载荷作用下光弹性模型冻结应力分析

4.1 概述	59
--------------	----

4.2 活塞光弹性模型模拟燃烧室压力的冻结应力分析	59
---------------------------------	----

4.2.1 活塞光弹性模型的制造	59
------------------------	----

4.2.2 活塞光弹性模型实验	62
-----------------------	----

4.2.3 实验结果	65
------------------	----

4.3 地铁地下车站拱壳柱结构光弹性模型模拟土压力载荷的 冻结应力分析	70
--	----

4.3.1 拱壳柱结构光弹性模型的制造	70
---------------------------	----

4.3.2 三拱两柱光弹性模型的试验	72
--------------------------	----

4.3.3 实验结果	74
------------------	----

第 5 章 自重和离心力载荷作用下光弹性模型冻结应力分析

5.1 概述	77
--------------	----

5.2 井塔倒锥台基础模型在自重载荷作用下光弹性三维应力 分析	77
--	----

5.2.1 施加自重载荷到井塔倒锥台基础光弹性模型上的离心机加 载设备	77
--	----

5.2.2 倒锥台基础模型冻结应力的操作过程	79
------------------------------	----

5.2.3 模拟自重的模型冻结应力试验情况下, 模型材料冻结条纹值	
-----------------------------------	--

的确定	80
5.2.4 离心力模拟自重模型的相似律计算	82
5.2.5 矿井井塔倒锥台基础光弹性模型在自重载荷下三维应力分析	83
5.3 带裂纹旋转圆盘模型在离心力载荷作用下光弹性模型 冻结应力方法	94
5.3.1 旋转圆盘模型及其上面裂纹的制造	94
5.3.2 离心力载荷作用下, 旋转圆盘模型应力冻结方法	95
5.3.3 带径向和切向裂纹圆盘模型在离心力载荷作用下冻结应力 实验	97
第 6 章 撞击和交变载荷作用下光弹性应力分析	98
6.1 概述	98
6.2 撞击载荷下光弹性应力分析	98
6.2.1 实验装置	98
6.2.2 在撞击载荷下齿轮齿根动应力分析	101
6.3 交变载荷下光弹性应力分析	103
6.3.1 实验装置	103
6.3.2 实验方法	105
第 7 章 三维光弹性模型的形状和承载具有某些特殊性问题	106
7.1 网状系杆拱连续梁桥结构光弹性模型的成型和载荷的 施加	106
7.1.1 网状系杆拱连续梁桥光弹性模型成型工艺	106
7.1.2 桥面载荷的施加方法	107
7.2 钢管混凝土拱连续梁特大桥拱脚结构光弹性模型的成型 和载荷施加	107
7.2.1 拱脚光弹性模型成型工艺	107
7.2.2 拱脚载荷的施加方法	108
7.3 刚构连续梁桥墩梁固节点光弹性模型的成型和载荷施加	110
7.3.1 墩梁固节点光弹性模型成型工艺	110
7.3.2 墩梁固节点光弹性模型载荷的施加	111
7.4 斜拉桥梁锚固区光弹性模型的成型和载荷的施加	112
7.4.1 斜拉桥梁锚固区光弹性模型成型工艺	112

7.4.2 梁锚固区光弹性模型载荷的施加 114

7.5 悬索桥主鞍光弹性模型的成型和载荷的施加 114

7.5.1 悬索桥主鞍光弹性模型成型工艺 114

7.5.2 悬索桥主鞍光弹性模型载荷的施加 115

参考文献 116

第 1 章 光弹性模型材料配制、模具制作、浇铸和固化方法

1.1 概 述

光弹性效应早在 1816 年就被发现, 但光弹性法被广泛地应用于解决工程实际问题还是 20 世纪 30 年代的事, 其主要原因是缺少合适的模型材料. 以前曾使用酚醛树脂 (如 Catalin-800)、丙苯树脂 (如 Bakelite BT.61-893)、丙烯树脂 (如 CR-39) 和聚酯树脂 (如 Marco) 等作为平面模型材料^[1~6].

1951 年以后, 出现了以环氧树脂为基的各种新型光弹性材料, 这种材料可以制成平板和浇铸成立体模型, 并能冻结应力. 在室温及冻结温度下, 它具有较高的光学灵敏度和比例极限, 蠕变和时间边缘效应也较小, 且易于加工, 同时也可以黏结.

后来又出现了聚碳酸酯的新型光弹性材料. 它的光学灵敏度很高, 透明度很好, 时间边缘效应也很小. 它是室温平面应力模型光弹性实验的优良材料^[7].

光弹性模型材料的性能和质量将直接影响实验的进行和测试精度. 因此, 掌握光弹性模型材料的制造工艺及其性能的测定是非常重要的.

1.2 制造环氧树脂光弹性材料的原料配比

1.2.1 环氧树脂

凡含有环氧基团的高分子聚合物统称环氧树脂. 根据浓缩程度不同, 环氧树脂的颜色和黏度都有所区别. 分子量不同, 其用途也不同. 光弹性材料常用的环氧树脂牌号 #618、#6101、#634. 三种环氧树脂的质量指标见表

1.1 所示. 其中以 #618 颜色最浅, 流动性最好. #634 颜色最深, 流动性最差. 选用 #6101 者居多.

表 1.1 三种环氧树脂的质量指标

产品编号	出 厂 规 格					
	软化点/°C	环氧值 /(当量/100g)	有机氯值 /(当量/100g)	无机氯值 /(当量/100g)	挥发分 (10°C,3h)	黏度/CP
#618	液态	0.48~0.54	≤ 0.02	≤ 0.001	≤ 2	≤ 2500
#6101	12~20	0.41~0.47	≤ 0.02	≤ 0.001	≤ 1	稍高
#634	21~27	0.38~0.45	≤ 0.02	≤ 0.001	≤ 1	更高

注: 1CP=10⁻³Pa·s.

1.2.2 固化剂

固化剂的作用是使环氧树脂由线型高聚物固化成为立体网状结构. 光弹性环氧树脂材料的固化剂分为室温固化剂与高温固化剂两种. 常用的室温固化剂是胺类固化剂, 如乙二胺、二乙烯三胺和三乙烯四胺等, 其中乙二胺产生的固化反应热量大, 会产生较大的固化初应力, 所以一般不常用. 高温固化剂常使用有机酸酐固化剂, 如顺丁烯二酸酐, 它是一种白色结晶体, 具有刺激性, 能升华, 易吸潮. 其含量、熔点及杂质见表 1.2.

表 1.2 顺丁烯二酸酐的质量指标

纯度	含量	熔点/°C	杂质含量/%			
			水不溶物	灼烧残渣	氧化物	合计
分析纯	99.5%以上	52~53	0.005	0.005	0.05	0.06
化学二级	99.5%	52~53	0.005	0.005	0.05	0.06
化学三级	98.5%以上	51~53	0.01	0.01	0.2	0.22

制造光弹性薄片材料 (厚度小于 2mm) 或曲面光弹性贴片材料使用室温固化剂. 制造光弹性板材和三维光弹性模型, 如果使用室温固化剂, 则由于固化反应热量大, 温度场不均匀, 散热也慢, 会产生较大的初应力, 故选用高温固化剂.

1.2.3 增塑剂

单纯添加固化剂固化了的环氧树脂材料, 性质较脆, 给机加工带来困难. 为了提高其塑性, 通常再添加一定量的增塑剂, 如邻苯二甲酸二丁酯是

良好的增塑剂. 它是一种无色、透明液体, 不溶于水, 化学纯的含量在 99.5%, 挥发分在 0.3%以下. 添加增塑剂还可以起到稀释环氧树脂的作用.

1.2.4 原料配比

1. 室温固化的原料配比

表 1.3 给出原料配比和用其制成的光弹性材料的性质.

表 1.3 原料配方及制成的光弹性材料的性质

种类	环氧树脂	固化剂	增塑剂	固化温度 与时间	$f_{\sigma}/(\text{MPa}\cdot\text{cm/条})$	$E/(\text{MPa})$	μ	最大线性 应变/%	质量系数 $K/(\text{条/cm})$
1	#618 100g	二乙烯三 胺 8g	邻苯二甲酸 二丁酯 5g	20~40°C 24h	1.85	4630	0.390	0.8	2.50
2	#618 100g	三乙烯四 胺 11g	邻苯二甲酸 二丁酯 5g	20~40°C 24h	1.86	4600	0.380	0.7	2.47

2. 高温固化的原料配比

根据高分子反应原理, 100g 环氧树脂中顺丁烯二酸酐的适用量按下式计算:

顺丁烯二酸酐用量 = 环氧树脂的环氧值 $\times$ 顺丁烯二酸酐的分子量 $\times k$

式中, 环氧值为表示 100g 环氧树脂中所含有的环氧基的物质的量, 其值见表 1.1. 顺丁烯二酸酐的分子量*约为 98. k 是根据经验选定的常数, 一般取 $k=0.75\sim0.85$. 例如, 对于 100g 的 #618、#6101、#634 环氧树脂, 按上式计算出的顺丁烯二酸酐的适用量为 35.2~45g, 30.2~39.1g, 27.9~37.5g.

在 100g 环氧树脂中增塑剂邻苯二甲酸二丁酯的常用量为 5~10g.

鉴于下述原因, 有时可考虑不使用增塑剂邻苯二甲酸二丁酯.

(1) 邻苯二甲酸二丁酯虽能与环氧基反应, 但主要起外塑化作用, 即填充了环氧树脂的立体网格间隙, 增加了大分子的柔顺程度, 改进了材料的脆性. 因它不参与环氧树脂的固化反应, 根据化学热力学理论, 它将从材料

* 本书中的“分子量”为“相对分子质量”.

中缓慢地发挥出来,从而引起材料性质的不均匀,并增加了材料的时间边缘效应。

(2) 邻苯二甲酸二丁酯的比重比较小,与环氧树脂混合时会漂浮在混合液的表面上,搅拌不均时,将在固化的环氧树脂中产生亮带状“云雾”。

在不加增塑剂的情况下,可以通过改变固化温度的方法来提高材料的塑性。

环氧树脂混合液的固化时间是相当长的,为了缩短固化时间,在上述用量中可以加入 0.1g 的催化剂——二甲基苯胺,这一用量可以使混合液的胶凝时间缩短两天左右。混合液加入二甲基苯胺后色泽变成暗红色,但固化后将会变淡。

在实践中,也常采用改变固化剂和增塑剂用量的办法,获得不同弹性模量 E 的材料。对于室温下使用的光弹性材料,固化剂的含量对室温材料弹性模量 E 影响甚微,增塑剂含量的增加,对应的室温材料弹性模量 E 会减小,当增塑剂含量超过 30 份时,则材料脱模困难。冻结使用的光弹性材料,当固化剂含量增加,对应冻结材料弹性模量 E 随之也增加,当固化剂含量超过 40 份时,对应冻结材料弹性模量 E 反而降低。当增塑剂含量增加,对应的冻结材料弹性模量 E 会减小,当增塑剂含量超过 20 份时,材料冻结应力性能大大降低。如果固化剂用量不够,则材料固化不完全,材料性能不稳定。材料的时间边缘效应随固化剂用量的增加而增大。

1.3 浇铸模具

1.3.1 制作光弹性平板材料用的玻璃模具

常用玻璃板模具,如图 1.1 所示。制造尺寸为 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times (6 \sim 8)\text{mm}$ 的光弹性平板材料,常用 $5 \sim 7\text{mm}$ 厚的玻璃,要求玻璃表面光整,在光照下表面无水纹。模具两侧边和底边所用的玻璃隔条的厚度等于平板材料所需的厚度。为防止环氧树脂混合液渗漏,用套有铅丝的橡皮管衬在玻璃隔条内侧,橡皮管的直径比隔条的厚度稍大,铅丝起定位作用。两块玻璃板用带有连接螺钉的压板夹紧(压板与玻璃间衬以纸垫或薄橡皮),橡皮管要

选择颜色浅的。

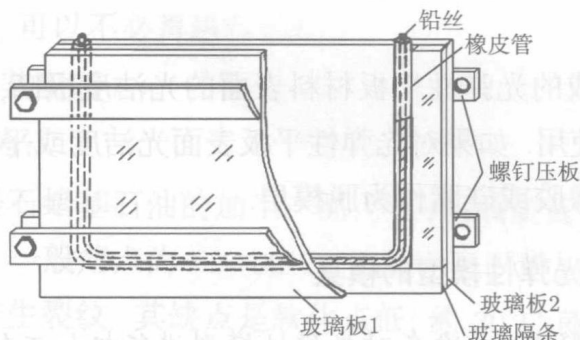


图 1.1 制板材模具

制造模具的步骤如下：

(1) 玻璃平板与隔条的油污先后要用汽油、肥皂水清洗，最后用乙醇或丙酮擦净。

(2) 在玻璃表面和橡皮管表面浸涂脱模剂，其作用是将玻璃表面、橡皮管表面与环氧树脂混合料隔开，防止它们之间的黏结。常用的脱模剂为甲苯：聚苯乙烯 = 100 : (5~8) (重量比) 的混合液。浸涂脱模剂的方法是将洁净的脱模剂盛在比玻璃平板尺寸稍大的扁形容器中，再将玻璃平板整个浸没其中，然后慢慢地提起，立放在室温下使其自然干燥。第一遍风干 10~15h 后，再涂第二遍。橡皮管涂一遍即可。

(3) 待玻璃平板上的第二遍脱模剂风干后，将模具进行装配。这时，应注意调节各压板螺丝，以保证浇铸出的平板厚度均匀。

使用这种脱模剂制出的平板材料表面光洁平整。但脱模剂的稠度要适当，涂膜不能太薄也不能太厚。干燥要适当。切忌在高温下烘烤，否则脱模剂开裂，将发生材料与玻璃的黏结。另外脱模剂的表面要防止粘上尘土。

还有一种在玻璃表面制造硬膜脱模层的方法介绍如下：

(1) 脱模剂配方。将一甲基三氯硅烷 10g 和二甲基二氯硅烷 20g 加入到 #200 溶剂汽油中，三者之和做成 250~500mL 混合液。

(2) 在玻璃表面涂敷上述混合液形成硬膜脱模层。方法是：① 用绸子将混合液涂在玻璃的一侧表面，在烘箱中升至 150~180°C 恒温 1h，然后降温至 90°C 时，使用绸子将涂混合液的玻璃表面用力擦均匀，至亮如镜面为

止. ② 按 ① 再涂第二次混合液进行同样操作. ③ 按 ① 再涂第三次混合液进行同样操作.

这种方法制成的光弹性平板材料表面的光洁度极高, 同时, 这种玻璃脱膜层还可重复使用. 如果对光弹性平板表面光洁度或平整度要求不高时, 可以涂敷甲基硅橡胶或硅脂作为脱膜层.

1.3.2 制作三维光弹性模型的模具

1. 制作形状简单, 并准备对光弹性模型进行机加工的三维模型^[8]

可用白铁皮 (厚度为 0.3~0.5mm) 锡焊制成, 如图 1.2(a) 所示. 应在模具内外边界各留 5mm 左右的机加工余量. 若模型有内腔, 模具的内芯必须用弹性较大的材料制成. 这样, 可减少环氧树脂固化时由于收缩产生较大的初应力, 以及防止模型内腔的开裂. 图 1.2(b) 改用弹性内芯后, 模型内腔不再出现裂纹, 而且由于内芯具有弹性, 初应力大为减小. 制造弹性内芯的方法, 可以在白铁皮内芯的表面上敷以一层薄海绵橡皮或室温硫化硅橡胶, 也可以是使用草板纸代替白铁皮作为内芯, 然后, 在内芯外表面再蒙上聚氯乙烯塑料薄膜防漏, 这种方法工艺简单, 价格便宜, 效果也很好. 白铁皮模具的脱模剂通常使用甲苯 : 聚苯乙烯 = 100 : (8~10) 溶液或涂一层硅脂.

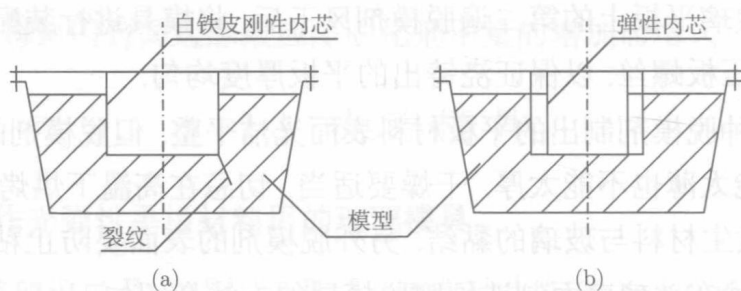


图 1.2 刚性内芯与弹性内芯

2. 制作形状复杂三维模型

1) 蜡料模具

对于零件形状比较复杂、带有内腔, 甚至无法用机加工方法制造的模型, 由于用白铁皮做的模具刚度偏大、易产生铸造应力的情况, 近年来广泛

使用蜡模模具. 用这种模具浇铸成的模型, 初应力较小, 其尺寸精度一般可在 1.5%~2.0%, 可以不必再进行机加工.

A. 蜡料及其配制

常用材料为:

石蜡, 它是石蜡基石油的加工产品, 为白色或淡黄色结晶体, 其熔点随含碳量而变化, 一般熔点为 52~62°C. 使用它可以增加蜡料的韧性和强度, 收缩小, 不易产生裂纹. 其缺点是软化点低, 约 30°C 就软化变形.

地蜡, 它是饱和族高分子碳氢化合物, 为浅黄色或白色结晶体, 强度及塑性低, 收缩率大, 但熔点高. 用它的主要目的是提高模料的软化点温度.

硬脂酸, 它是固体脂肪酸混合物, 为白色针状结晶体, 用它可提高模料的流动性, 有利于复杂形状模型的压注和成型.

这些蜡模材料的性能参见表 1.4.

表 1.4 蜡模材料的物理性能

名 称	物 理 性 能							灰分/%
	表面状态	流动性/cm	抗热强度/(kg/cm)	延伸率/%	收缩率/%	比重 (25°C 时)	熔点/°C	
石蜡	白色	160~170	2.25~3	2~2.5	0.5~0.7	0.87~0.89	50~60	<0.11
地蜡	浅黄色	105~115	1.5~2	1.6~2	0.6~0.75	0.90~0.96	68~75	<0.035
硬脂酸	白色针状	130~140	1.75~2	2.8~3	0.6~0.69	0.86~0.89	58~60	<0.02

所配制的蜡料软化温度应尽可能得高, 收缩率应尽量小. 一般常用蜡料的质量配比为地蜡 : 硬脂酸 : 石蜡 =60 : 30 : 10, 这种蜡料的软化温度约 40°C, 收缩率为 0.22%~0.34%.

制蜡模前蜡料的准备: 将称好的原料放在搪瓷容器内, 在 120~140°C 的恒温箱中加热使其熔化 (如果使用电炉直接加热, 则要使容器与电炉丝隔开一定距离, 以防止蜡料温度过高从而使之变质). 混合液经搅拌均匀后, 降温至 50~60°C, 蜡料呈糊状, 即可压注.

B. 压制蜡模的工具 [9]

a. 阳模

一般用硬质木材做阳模, 以连杆阳模为例, 如图 1.3 所示, 沿连杆厚度中面分为两部分, 并用两个定位销将它们连接在一起, 阳模表面涂抹腻子

和漆片, 经过抛光以增加表面光洁度。

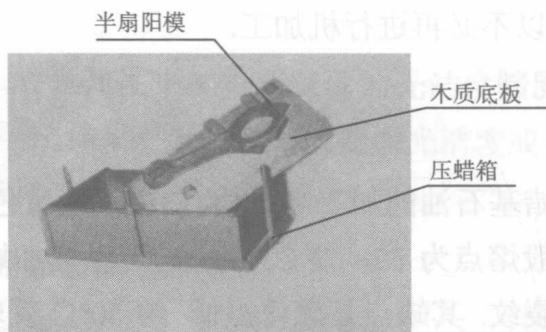


图 1.3 压制连杆蜡模的压蜡箱、连杆阳模

b. 压制蜡模工具

如图 1.3 所示, 将一半连杆阳模和木质底板一起放入金属板做成的压蜡箱底部, 如图 1.4 所示, 封闭的压模箱的上部有两个排气孔, 它与压蜡活塞室相通, 活塞室中充满了蜡料。

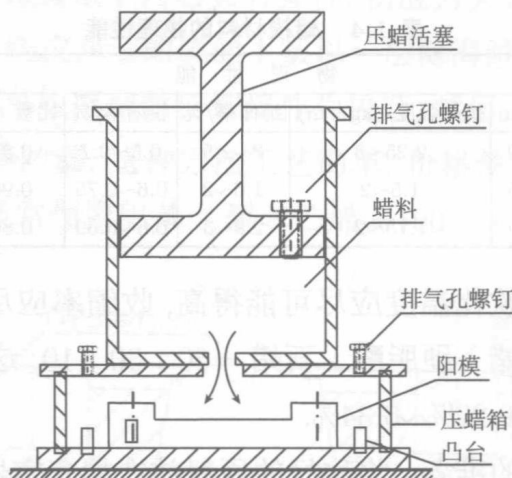


图 1.4 压蜡装置

c. 压制蜡模的工艺

如图 1.4 所示, 压注蜡料的步骤如下:

- (1) 将压蜡箱、压蜡活塞在 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 下预热。
- (2) 在半扇阳模及压模箱表面涂一薄层均匀的脱膜剂 (脱膜剂可用硅油), 然后将整个压模箱装好, 用螺栓将其连接成一体。
- (3) 把准备好的糊状蜡料盛入活塞室中, 与压模箱一起装在压力机上。