加船舶的自重、减少船舶的载重，同时将大大增加船体的阻力，造成船舶的航速降低和燃油消耗的增加。有资料表明，船底污损严重时，其海洋生物堆积层可达十多厘米厚，每平方米重量达二十余公斤，这对于近万平方米船底的船舶来说将增重二百余吨。英国国际油漆公司曾经根据 1500 多艘船舶进坞情况，统计出如下数据：

船底污损 5%，燃料将增耗 10%；船底污损 10%，燃料将增耗 20%，船底污损大于 50%，燃料将增耗 40%以上。

在船底常见的附着生物有藤壶、牡蛎、贻贝、树枝虫、海鞘、绿藻、碣藻、浒苔、花筒螅等数十种。其中藤壶、牡蛎、贻贝等在船底附着之后，生长迅速。在生长过程中将产生一种张力，能剪开和破坏漆膜。同时这些生物还会分泌出有机酸，这些将大大加速船底钢板的腐蚀。

海洋生物如果附着于军舰底部，将影响军舰的航速，附着在声纳罩上，则干扰声纳的侦察性能，这些都将大大削弱军舰的战斗力。

可见海洋生物的污损对舰船具有巨大的危害性。防止海洋生物污损的方法有涂装防污漆防污、电解海水防污、超声波防污等方法，近年来研究的还有生物酶防污、低表面自由能防污等方法，但到目前为止，无论从经济上还是从效果上，防污漆防污仍被认为是唯一可广泛应用的方法。

一、防污漆的特性与组成

船底防污漆是一种防止海生物污损的特种涂料，具有一般涂料截然不同的特性与组成。

（一）防污漆的主要特性

（1）在一定时间内能防止海洋附着生物附着的效能；

（2）漆膜中含有一定量的能杀伤附着海生物的毒料，这些毒料能连续不断地逐步向海水渗出；

（3）与防锈漆相反，漆膜具有一定的透水性，以保持毒料的连续渗出；

（4）与防锈漆之间有良好的附着力，防污漆本身层与层之间亦应有良好

的附着力，要求层间稍能互溶；

（5）漆膜有良好的耐海水冲击性，在长期浸水条件下不起泡、不脱落；

（6）经航行一定时间后，希望有不同程度的抛光性。

关于船底防污漆的技术指标，GB 6822—86 作出了如下规定：

项目	指标
防污性能	短期效防污漆系统：海港挂板期效大于 12 个月 中期效防污漆系统；海港挂板期效大于 18 个月 长期效防污漆系统：海港挂板期效大于 30 个月
细度，μm	80
粘度，m^2/s	符合专用技术要求
相对密度	符合产品技术要求
干燥时间，h　表干　<	8
干燥时间，h　实干　<	21

（二）防污漆的组成

防污漆的组成与一般涂料有所不同，由毒料、渗出助剂、基料、颜料、助剂和溶剂等组成。其中防污效果与毒料的种类、含量、可溶性成分的用量以及基料的类型等都有很大的关系。

1. 毒料

防污毒料必须能在海水中微溶，对海洋附着生物有杀伤力。常用的防污毒料有氧化亚铜、有机锡、有机锡高聚物（毒料与基料同一体）以及氧化汞、DDT、有机铅、铜粉等，其中前三类应用最为广泛。

（1）氧化亚铜是防污漆中最为重要、应用最多的毒料，能有效杀伤海洋附着生物而对人体低毒。微溶的氧化亚铜所释放的 Cu^+ 离子进入海生物幼虫或孢子体内，具有凝固蛋白质的作用，从而杀伤海生物起到防污作用。

（2）有机锡毒料在本世纪 70～80 年代间用量日益增多，其中以三丁基氟化锡（TBTF）和三苯基氟化锡（TPTF）效果最好。有机锡化合物对防止海藻的污损有高效，对藤壶也有效，司称为宽谱防污毒料。有机锡对海洋

附着生物的杀伤力约为氧化亚铜的 10 倍，氧化亚铜对附着生物致死的临界渗出率为 10 ~ 20μg/（cm^2·d），而有机锡的临界渗出率只需 1 ~ 2μg/（cm^2·d）。有机锡防污漆比起氧化亚铜防污漆来说有一大突出优点，即在被污染的海水里不会发黑失效，而氧化亚铜为主的防污漆在被污染的海水里会受到 H_2S（动植物腐败后的产物或工业污水污染结果）的作用而发黑失效，这是由于生成了不溶性的黑色硫化亚铜的结果：

$$Cu_2O + H_2S \longrightarrow Cu_2S\downarrow + H_2O$$

（3）有机锡高聚物是使毒料和基料合二为一的新材料，由甲基丙烯酸、三丁基氧化锡（TBTO）及丙烯酸甲酯反应制得，它既是毒料又是成膜物质（基料），依靠水解释放出有机锡分子，并形成水溶性物质，其特点是毒料释放速度均匀，毒料的利用率高。

（4）氧化汞对海洋附着生物有很强的杀伤力，Hg^{2+} 离子与 Cu^{+} 离子一样，进入海生物幼虫或孢子体内具有凝固蛋白质的作用。但 HgO 对人体的毒性也很大，并造成环境污染因此不宜使用，多作为辅助毒料用于防污漆。实践证明，采用复合毒料比单一毒料效果好，如在以氧化亚铜为毒料的防污漆中加入部分氧化汞，则可降低毒料的临界渗出率。通常防污漆中氧化亚铜与氧化汞的配比为 6∶1，这一配比的增毒效果最好。

（5）DDT 对杀死藤壶有特效，但对其他海洋附着生物的杀害作用却很小，因此亦用作辅助毒料，以提高防污漆的防污效果。但它的加入会增加漆膜封闭性，影响 Cu^{+} 离子的渗出率，其用量一般占配方的 2% ~ 4%。由于 DDT 对人体影响较大，故在防污漆制造中逐步被淘汰。

（6）有机铅毒料具有渗毒料平稳，持久及长效的特点，采用三丁基乙酸铅制造防污漆有效期可达五年之久。但有机铅对人体的毒性较大，又会污染海水，故实际应用不多。

（7）防污漆中有时还使用金属铜粉、环烷酸铜、油酸铜、无水硫酸铜等作为辅助毒料，以补充和调节 CuzO 或有机锡的不足。

2. 基料

防污漆的基料分为可溶性基料与不溶性基料两个部分。

（1）可溶性基料：采用可溶性基料的目的是为便于毒料的渗出。可溶性基料传统上主要采用松香。松香在微碱性的海水中溶解速度较快，涂于玻璃

片上的松香薄膜，在流动海水中的溶解速度为 100μg/（cm^2·d）以上。松香具有脆性，需与不溶性基料配合使用，既可改进漆膜的塑性，又可改变松香在海水中的溶解度，以控制毒料渗出的速度。

有机锡高聚物既是毒料又是可溶性基料，以有机锡高聚物制成的自抛光防污漆将在后文作专题介绍。

近年来世界各国重视开发不含有机锡的自抛光涂料采用的基料为可水解的具有一定亲水性的丙烯酸酯聚合物。

（2）不溶性基料：不溶性基料有沥青、氯化橡胶、氯醋三元共聚树脂、丙烯酸树脂等。

3. 颜料

防污漆中颜料的作用是改善漆膜的机械性能和调节毒料的渗出率。最常用和最重要的颜料是氧化锌。氧化锌在海水中微溶，本身稍具毒性。氧化锌与氧化亚铜共用可提高漆膜机械性能，亦能提高铜离子的渗出率。其他常用颜料有铁红、滑石粉等。铁红可提高漆膜机械性能，但对铜离子的渗出率有一定的抑制作用，故用量不宜太多。滑石粉对于改善沉淀性有一定作用，它的加入使防污漆贮存一段时间后罐内的沉淀较为松软而易于搅匀。

4. 溶剂

防污漆内所用的溶剂主要取决于所用的不溶性基料的品种：常用的是 200 号煤焦溶剂，200 号煤焦溶剂主要成分是三甲苯、四甲苯等，对沥青、松香、氯化橡胶等均有良好的溶解性。其他常用的溶剂有二甲苯、环己酮等。

5. 助剂

防污漆内的助剂主要有起增厚作用的触变剂、起稳定作用的稳定剂及防沉剂等。

二、防污机理

防污漆的作用机理是含有氧化亚铜、氧化汞、有机锡等毒料的防污漆漆膜与海水接触后，毒料以 Cu^+、Hg^{2+} 离子或有机锡分子形式逐步向海水溶解，在漆膜表面形成一层厚度为十几微米的有毒溶液的薄层，薄层内的有毒

离子或分子能排斥或杀死企图停留到漆膜上来的海洋附着生物的幼虫和孢子，以达到防止污损的作用。“薄层”内的毒料由于水流的作用会不断流失，尤其是船在航行的时候流失更快，需要从漆膜内不断渗出新的毒料，以补充流失的毒料并保持薄层内的毒料浓度。

防污漆中毒料向海水溶解的速度以渗出率表示，定量单位以 $\mu g/(cm^2 \cdot d)$ 表示。

防止海洋附着生物污损所要求的最低限度的渗出率为临界渗出率。各种毒料的临界渗出·率各不相同，Cu^+ 为 $10\mu g/(cm^2 \cdot d)$，Hg^{2+} 为 $2\mu g/(cm^2 \cdot d)$，而有机锡则为 $1 \sim 2\mu g/(cm^2 \cdot d)$。复合毒料中各种毒料的临界渗出率，均可因其他毒料的存在而低于各自单一渗出时的临界渗出率。防污漆的渗出率应当控制调节，如渗出率低于临界渗出率，则不足以防止海生物的附着。而渗出率高于临界渗出率太多，又会造成毒料的浪费和缩短防污漆的寿命。因此，性能好的防污漆，应该在长时间内有一平稳的、稍高于临界渗出率的渗毒速度。

控制和调节防污漆的渗出率是一个复杂的问题。一般来说提高防污漆中毒料的用量或提高可溶性基料的用量，减少不溶性基料的用量，可以提高防污漆的渗出率。反之则可降低渗出率。对于自抛光防污漆来说，控制有机锡高聚物的组成或聚合度亦可控制防污漆的抛光速度，即控制毒料的渗出率。另外，在自抛光防污漆中往往还增加其他毒料（常见的为增加氧化亚铜）以增加毒性，降低有机锡高聚物的抛光率要求。

三、防污漆的类型

根据防污漆的结构及毒料渗出方式，大致可分成溶解型、接触型、扩散型、水解型（自抛光型）四类。

（一）溶解型防污漆

溶解型防污漆以松香为可溶性基料，多以氧化亚铜、氧化汞、DDT 等为毒料，为控制其毒料的渗出率和改善漆膜的机械性能，还需有一部分不溶

性基料，如沥青、氯化橡胶、油性基料等。

由于基料是以可溶性的松香为主，防污漆在海水中其毒料和基料将同时逐渐溶解在漆膜表面形成防污的薄层，而漆膜则不断露出新鲜面，使原来在内部的毒料也会慢慢成为表层毒料而向海水释放。从这一观点上看，溶解型防污漆应该有一个平稳的毒料渗出率，但事实并非如此。由于溶解型防污漆中还含有不溶性基料，当漆膜外层的可溶性基料溶解后，这些不溶性基料仍然存在，这将影响内层可溶性基料的溶解速度。另外，可溶性防污漆的毒料往往主要采用氧化亚铜，Cu^{+} 离子在海水中会被海水中的氧气氧化成 Cu^{2+}，并进一步生成碱式碳酸铜等不溶性铜盐沉积于防污漆表面，使渗出率降低。因此，溶解型防污漆往往是一开始有很高的渗出率，随着时间推延渗出率不断降低，当降到临界渗出率以下时，防污漆就失效。一般溶解型防污漆的防污能力在一年左右。溶解型防污漆的配方（例）见表 1－7－14。

（二）接触型防污漆

接触型防污漆的基料为不溶性树脂，毒料亦以氧化亚铜为主，有时增加些辅助毒料如氧化汞、DDT 等。

由于这类防污漆的基料为不溶性树脂，为使毒料能够不断渗出，必须使毒料颗粒紧密排列，以达到面层毒料溶于海水后形成的空隙使内层的毒料能从空隙中排向海水，为此，毒料的含量很高。

为使毒料紧密排列，毒料的体积至少占 52.4%（四方堆积）最多为 74%（六方堆积）。

接触型防污漆在理论上不必加上可溶性基料，但这样需要大量的毒料，使防污漆成本很高，又因初期渗出率太高而后期内层毒料难以排出，造成很大浪费。因此，实际上接触型防污漆中都含有一定的可溶性基料（松香），既可调节毒料渗出率，又可降低毒料用量，降低防污漆的成本。

显而易见，由于内层的毒料将从前层涂膜的空隙中。挤出去，接触型防污漆的渗出率是前期大、后期小，呈日益下降的趋势。但接触型防污漆的毒料含量大大高于溶解型，因此其防污能力亦要高一些，一般可达两年或更多一些时间。接触型防污漆的配方（例）见表 1－7－14。

（三）扩散型防污漆

扩散型防污漆多以有机锡或有机铅为毒料，以乙烯树脂或氯化橡胶树脂为基料，并有一部分可溶性基料。涂层有一定的透水性，当涂层浸人海水中，海水将渗透到涂层内部，促使毒料与基料溶胀，形成固溶体，从内部向表面扩散，进而使毒料与基料的固溶体溶于海水，释放毒料。扩散型防污漆的渗毒机理与溶解型防污漆有些相似，故有的资料中亦将其归为溶解型防污漆。但通常将以无机毒料（Cu_0、HgO）为主的归为溶解型，而以有机毒料为主的归为扩散型。扩散型防污漆的配方（例）见表 1－7－14。

表 1－7－14　防污漆的典型配方（例）（%）

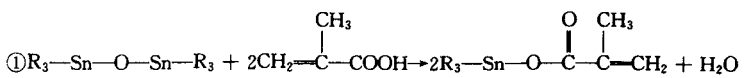
原材料名称	溶解型 沥青松香 防污漆	接触型 乙烯树脂 防污漆	扩散型 乙烯树脂 防污漆	水解型 自抛光 防污漆
氧化亚铜	30	55		35
氧化汞	5			
DDT	3			
氧化锌	18			
氧化铁红	5.4			
三丁基氟化锡			10	
40℃煤焦沥青	4.9			
松香	17.7	5.5	3.95	
三元氯醋共聚体		5.5	11.84	
甲基丙烯酸三丁基锡共聚体 SO%溶液				44
磷酸三甲酚酯		2.1		
二氧化钛			21.52	5
滑石橱			3.63	
膨润土			0.54	1

原材料名称	溶解型 沥青松香 防污漆	接触型 乙烯树脂 防污漆	扩散型 乙烯树脂 防污漆	水解型 自抛光 防污漆
甲醇			0.16	
氢醌				0.01
甲基异丁基酮		18.9	28.36	
二甲苯		13	20	
200 号煤焦溶剂	16			
棍合溶剂				14.99

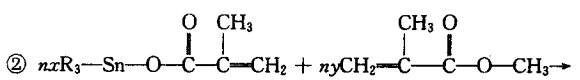
（四）水解型（自抛光型）防污漆

水解型防污漆通常称为自抛光防污漆，其以有机锡高聚物为毒料和基料，通过有机锡高聚物在海水中水解，释放出有机锡毒料，同时基料亦成为可溶性的物质溶解于海水之中。漆膜在水流不断作用下，水解反应不断进行，不断暴露出新鲜面，因此其毒料渗出率非常平稳。由于漆膜凸起的部位受水流作用力较大，水解速度较快，而凹进的部位则水解速度较慢，因而漆膜将日趋光滑，故将这种防污漆称为自抛光防污漆。自抛光防污漆的配方（例）见表 1－7－14。

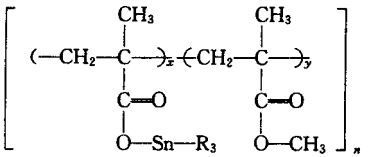
有机锡高聚物通常由甲基丙烯酸、三丁基氧化锡（TBTO）与丙烯酸甲酯反应而成。其反应式如下：



式中 R 为 C_4H_9（以下同）

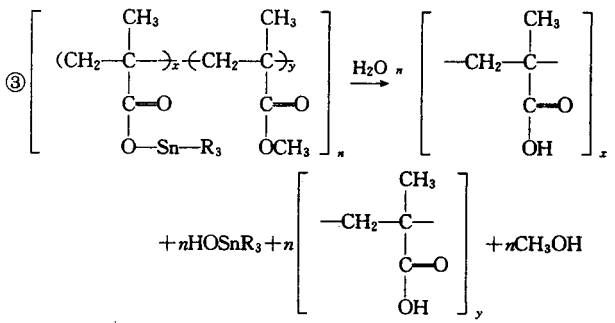


甲基丙烯酸三丁基锡　　甲基丙烯酸甲酯



有机锡高聚物

有机锡高聚物在海水中水解反应为：



自抛光防污漆有以下几个优点。

（1）渗出率平稳，防污寿命长，防污效果和漆膜厚度成正比，有效防污寿命最长可达五年。

（2）在航行中，漆膜在水流作用下自身有抛光作用，可减少船体的粗糙度和航行阻力，能大量节约燃料，与其他防污漆相比，可节省燃料 10% 左右。

（3）具有耐干湿交替性能，除作为船底防污漆外，还可作为水线防污漆。

（4）维修方便，船舶进坞作涂层维修时，在原有自抛光防污漆的基础上，可以直接涂装新的自抛光防污漆，不必像其他防污漆需要先涂封闭漆才能继续涂防污漆。

以有机锡高聚物为主体的自抛光防污漆由于其众多优点而被广泛应用，目前世界上采用自抛光防污漆的深海船只的比例已超过 60%。然而，大量应用的自抛光防污漆所释放的有机锡化合物的毒性对海洋中非目标海生物，包括生态学上和商业上的重要生物如荔枝螺、牡蛎、蚶、贻贝等带来了意想不到的伤害，影响到它们的发育、繁殖和生存。80 年代初法国首先宣布禁止使用有机锡含量大于 3%（按质量）的防污漆来涂装所有的小艇和总长小

于 25m 的海船。在 1985 年以后，美、英、日、德、瑞士等国相继禁止或限止有机锡的使用，1987 年 12 个欧洲共同体国家也一致同意在 25m 以下船体上禁止使用有机锡防污漆。根据目前发展的趋势来看，有机锡防污漆会有全面禁用的可能。

正因为如此，世界各国都重视发展不含有机锡的新型的自抛光防污漆，称为无锡自抛光防污漆（tinfree self polishing antifouling paint）。

无锡自抛光防污漆亦属水解型防污漆，其以可水解的具有一定亲水性的丙烯酸酯聚合物（称之为自消融树脂）为基料，以氧化亚铜为主要毒料。这种防污漆同样具有自抛光作用，其防污寿命可达三年甚至更长，目前越来越受到欢迎，估计不久将日益取代以往的含锡的自抛光防污漆。

第六节　水线以上面层涂料

用于船舶水线以上部位的面层涂料有水线漆、船壳漆、甲板漆、货舱漆、舱室内部用面漆等。由于使用部位的环境不同，要求的功能不同，故采用的基料、颜料也各有其不同的特点。

一、水线漆

水线区腐蚀条件恶劣，处于干湿交替的状态，故水线漆应有良好的耐水、耐冲击、耐干湿交替性能，并需要较好的装饰作用。

关于水线漆的技术指标，GB 9260—88 作出了如下规定：

项目	指标
附着力，MPa　≥	2.94
耐盐水性（80℃±2℃），2h	漆膜不起泡、不生锈、不脱落
耐油性（浸于 SY1152—79）柴油机润滑油中），48h	漆膜不起泡、不脱落、无软化、无斑点
耐划水性，2 周期	漆膜不起泡，不脱落

项目	指标
耐盐雾性（200h），级	1
耐候性（经广州地区天然曝晒 12 个月后测定）	
漆膜颜色变化，级　≤	4
粉化，级　≤	3
裂纹，级　≤	2

注：耐划水性、耐盐雾性、耐候性均为保证项目。

常用的水线漆有以下品种、类型。

（1）酚醛型水线漆。由纯酚醛树脂和桐油在高温下热炼制成漆料。涂膜具有较好的耐水性和硬度，涂刷性能好，成本较低，应用比较广泛，缺点是使用寿命较短。

（2）氯化橡胶水线漆。以氯化橡胶为基料、氯化石蜡为增塑剂。其干燥性快、与底漆（氯化橡胶防锈漆）之间附着力好、漆膜坚韧耐磨、耐水性和耐干湿交替性能好，在新造船中应用很多。其缺点是耐油性较差，容易受到水面上漂浮的油腻物质污损。

（3）环氧水线漆。以环氧树脂为基料，聚酰胺树脂为固化剂。漆膜坚韧、耐磨、寿命较长，属于高性能水线涂料，常与环氧类防锈漆配套使用。缺点是装饰性能较差，施工较为麻烦。

各种类型的水线漆有紫红色、绿色、白色、黑色、灰色等种类，应用最多的为紫红色和绿色。

值得注意的是，近年来有许多船东希望在水线区域涂装防污漆，通常是水线区域与船底区域采用相同的涂料配套系统，在这种情况下采用的防污漆往往以自抛光防污漆为多数。

常用的水线漆配方（例）见表 1－7－15。

表 1－7－15　水线漆的典型配方（%）

原材料名称	酚醛水线漆（紫红）	氯化橡胶水线漆（紫红）	氯化橡胶防污水线漆	环氧酯防污水线漆
氧化铁红	20	20	15	15
硫酸钡	8			
氧化锌		3	14	15
氧化亚铜			25	25
氧化汞		3	3	3
三丁基氟化锡（TBTF）			3	
DDT				3
松香			10	11
铜皂			2	
酚漆料	64	12		
		50	10	
10%氯化橡胶液				
氯化石蜡		8		
亚油季戊四醇醇酸树脂			10	
不氧酯				19
崔干剂	2			
200 号溶剂汽油	6			
200 号煤焦溶剂		4	8	9

二、船壳漆

船壳漆是指使用于船体外板重载水线以上区域和上层建筑外围壁以及甲板舾装件等部位的面层涂料，要求有良好的耐候性、一定的耐水和耐冲击性、良好的装饰性。

关于船壳漆的技术要求，GB 6745—86 作出了如下规定。

项目	指标
漆膜颜色及外观	符合标准
细度，μm　　≤	40
附着力，MPa　　≥	2.94
固体含量，%　　≥	符合产品技术要求
柔韧性，mm	1
耐候性（经广州地区 12 个月自然曝晒后测定）	漆膜颜色变色不超过 4 级，粉化不超过 3 级，裂纹不超过 2 级

注：耐候性作保证项目。

常用的船壳漆有以下品种、类型。

（10 醇酸船壳漆。通常以长油度醇酸树脂为基料，白色颜料采用抗紫外线老化性能好的金红石型钛白粉。醇酸船壳漆漆膜光泽好、耐候性强、附着力优良，获得广泛应用。其缺点是硬度较差和耐水性欠佳。

（2）氯化橡胶船壳漆。以氯化橡胶为基料，氯化石蜡为增塑剂，常以醇酸树脂或丙烯酸树脂改性，以获得更高的装饰性能。其干燥快、与底漆附着力强、漆膜坚韧、耐水性优于醇酸船壳漆。已广泛应用于新造船和修船，但涂刷性较醇酸船壳漆差，刷涂、辊涂时装饰性受到影响。

（3）丙烯酸树脂船壳漆。通常采用热塑性丙烯酸树脂为基料，常以醇酸树脂或氯化橡胶进行改性。

丙烯酸树脂船壳漆有优异的保色、保光性能，其漆膜光亮丰满。由于其树脂色泽水白，因此制成白色涂料白度很好，而且不易泛黄，装饰性能很好。

丙烯酸树脂船壳漆应用不如氯化橡胶船壳漆那么广泛，价格较贵是其中原因之一，由于氯化橡胶生产日益受到限制，丙烯酸树脂船壳漆有望逐步取氯化橡胶船壳漆而代之。

（4）环氧船壳漆。以环氧树脂为基料，聚酰胺树脂为固化剂、性能与环氧水线漆相似，两者常相互通用。

环氧类涂料户外容易粉化，故采用环氧船壳漆时，往往最外面一层采用聚氨酯涂料盖面，以提高其外观装饰性能。

船壳漆颜色品种有很多，有白色、黑色、灰色以及各种按需要特定的各种颜色。

常用的船壳漆配方（例）见表 1－7－6。

表 1－7－6　船壳漆的典型配方（%）

原材料名称	酚醛醇酸船壳漆	醇酸白船壳漆	醇酸改性氯化橡胶船壳漆	氯化橡胶船壳漆
金红石型钛白粉	19	29	16	18
着色颜料	0.8		3	0.2
氧化锌				1.6
纯酚醛漆料	48			
醇酸树脂	24	61	50	
30%氯化橡胶液			25	21.7（纯氯化橡胶）
氯化石蜡				11.8
催干剂	1	2.1	0.9	
增稠剂				0.7
200 号溶剂汽油	7.2	7.9		
200 号煤焦溶剂			5.1	46

三、甲板漆

甲板漆是用于船舶甲板部位的面层涂料，需具有良好的附着力、耐水性、耐候性和耐磨性。

关于甲板漆的技术要求，GB 9261—88 作出了如下规定：

项目	指标	
	通用型	防滑型
漆膜颜色及外观	符合产品技术要求	符合产品技术要求
附着力，MPa　≥	2.94	2.94
耐磨性，（750g500 转）失重，g ≤	0.100	0.100

项目	指标	
	通用型	防滑型
耐盐水性，48h	漆膜不起泡、不脱落，允许轻微变色和失光	漆膜不起泡、不脱落，允许轻微变色和失光
耐柴油性，48h	漆膜不起泡、不脱落，不变色、不失光	漆膜不起泡、不脱落，不变色、不失光
耐1%仲烷基磺酸钠溶液，48h	漆膜不起泡、不脱落，允许轻微失光	漆膜不起泡、不脱落，允许轻微失光
耐盐雾性（200h），级	1	1
耐候性（经广州地区天然曝晒12个月后测定）		
漆膜颜色变化，级　≤	4	4
粉化，级　≤	3	3
裂纹，级　≤	2	2
防滑性	—	符合产品技术要求

注：耐盐雾性、耐候性为保证项目。

常用的甲板漆有以下品种、类型。

（1）酚醛甲板漆。由纯酚醛树脂与亚油、桐油熬炼制成漆料，或采用松香改性酚醛树脂为漆料，配以耐磨性好的颜料制备而成。其漆膜硬度较高，附着力、耐水性均较好，但干性较慢，耐磨性欠佳，使用寿命较短。

（2）氯化橡胶甲板漆。以氯化橡胶为基料，干燥快、漆膜坚韧、耐磨性好，耐水性、耐候性、耐碱性均优于酚醛甲板漆，但耐油性较差，不适用于油船的露天甲板。由于氯化橡胶受热分解会释放出氯化氢气体，因此不适合用作室内甲板漆。

（3）环氧甲板漆。以环氧树脂为基料。聚酰胺树脂为固化剂，配以耐磨性好的颜料制成。其漆膜坚韧耐磨、耐水、耐油、耐化学药品性良好，属高性能甲板涂料，特别适用于油船的露天甲板。但具有一般环氧涂料的缺点，施工较为麻烦。

各种甲板漆还可加入某些防滑材料如金刚砂、橡胶细粒、塑料细粒等制成甲板防滑漆，使漆膜表面粗糙，防止人员在风浪大、甲板潮湿的情况下行走时滑跌。甲板防滑漆通常用于露天甲板。

用作直升飞机平台（甲板）的甲板防滑漆的防滑要求比较高，一般要求摩擦系数不低于 0.8，需要做试验认证。

常用的甲板漆配方（例）见表 1－7－17。

表 1－7－17　甲板漆的典型配方（%）

原材料名称	酚醛甲板漆（紫红）	酚醛甲板漆（草绿）	氯化橡胶甲板漆	环氧甲板漆
氧化铁红	20		18	19
氧化锌	1.3		2.2	
硫酸钡	6.5	9	18	19
着色颜料		2		0.7
滑石粉				
中铬黄		14		
酚醛漆料	62			
纯酚醛改性醇酸漆料		66		
纯氯化橡胶			14.2	
氯化石蜡			14.2	
环氧树脂				22
增稠剂			2.0	0.8
催干剂	1.0	0.8		
200 号溶剂汽油	9.2	8.2		
混合溶剂			31.4	21.5
聚酰胺树脂（分装）				11（含混合溶剂）

注：若制防滑甲板漆，可在施工时加入耐磨材料（如石英砂、金刚砂、橡胶颗粒或塑料颗粒）。

四、货舱漆

货舱漆用于船舶货舱内部。要求附着力良好，有较高的硬度和耐磨性。

有酚醛、氯化橡胶、环氧、漂白环氧沥青等类型。根据货舱装载货物的具体情况，有时会对货舱漆提出一定的特殊要求。

关于货舱漆的技术要求，GB 9262—88 作出了如下规定：

项 目	指标
漆膜颜色	符合产品技术要求
附着力，级　≤	2
柔韧性，mm　≤	3
冲击强度，N·m　≥	3.92
干燥时间，h　≤	
表干	8
实干	18
耐磨性①（5009500 转）	（环氧类漆为 24）
失重，g　≤	0.100
耐盐雾性②，级	
Ⅰ型（400h）	2
Ⅱ型（200h）	2

①耐磨性及耐盐雾性两项为保证项目。

②耐盐雾性项目中Ⅰ型为环氧、氯化橡胶类漆；Ⅱ型为醇酸、酚醛类漆。

对于货舱兼作压载舱时，货舱漆应有优良的耐水性和抗腐蚀性。近年来往往以使用漂白环氧沥青涂料作为货舱兼压载舱的保护涂料。

对于装载谷物的货舱，货舱漆应具有对谷物无毒性、无污染，并取得有关当局的认可证书。在国际上，装载谷物货舱的货舱漆，通常需要达到 FDA 规定。

五、舱室内部用面漆

舱室内部用面漆指用于机舱、房舱内表面的面层涂料，要求附着力好、装饰性好，且不易燃烧，一旦燃烧发生，应不至于产生过量的烟，这是国际海上人命公约（SOLAS）的规定，也是许多船级社的规定，故使用的涂料

需要获得船检部门的许可。

舱室内部用面漆通常采用油基树脂漆和醇酸树脂漆。当今，绝大多数船都采用醇酸树脂漆，因其各方面性能均优于油基树脂漆。

第七节　液舱涂料

船舶的液舱有水舱和油舱两大类。水舱分为淡水舱、饮水舱、压载水舱、冷却水舱、舱底水舱等，油舱则分为燃油舱、滑油舱、污油水舱、原油运输船的货油舱、成品油船的货油舱等。由于各种液舱装载的液体不同，腐蚀条件各不相同，因此采用的涂料亦各不相同。各种涂料对各种液舱的适应性情况见表 1－7－18。

一、压载水舱涂料

压载水舱涂料用于船舶的各种压载水舱、艏尖舱、艉尖舱、舱底水舱等。这些水舱的腐蚀环境恶劣，要求涂料有优良的耐水、耐盐雾、耐干湿交替和抗腐蚀性能。又因为这些部位施工条件恶劣，故要求涂料一次成膜有较高的膜厚，以减少涂装的次数。

关于压载舱涂料的技术要求，GB 6823—86 作出了如下规定：

表 1－7－18　各种涂料对液舱的适应性

涂料种类 / 液料种类	沥青涂料	石油树脂涂料	漆酚树脂涂料	环氧沥青涂料	纯环氧涂料	酚醛环氧涂料	漂白环氧沥青涂料	聚氨酯树脂涂料	无机锌涂料
饮、淡水舱	×	×	○	×	◎	—	×	×	×
压载水舱	○	×	—	◎	—	—	◎	—	×
舱底水舱、冷却水舱	○	×	—	◎	○	—	◎	—	×
污油水舱	×	×	—	○	○	—	◎	—	×
燃油舱	×	◎	—	—	—	—	—	—	—

液料种类 \ 涂料种类	沥青涂料	石油树脂涂料	漆酚树脂涂料	环氧沥青涂料	纯环氧涂 料	酚醛环氧涂料	漂白环氧沥青涂料	聚氨酯树脂涂料	无机锌涂料
滑油舱	×	○	—	×	◎	◎	—	—	—
原油舱	×	×	—	○	—	—	—	—	×
PC 船货油舱	×	×	○	×	◎	◎	×	◎	◎

注：◎—优良，○—合适，——不推荐，× ——不合适。

项目	指标
附着力，MPa ≥	3
耐冲击性	3J 落锤冲击后，无裂纹、剥落
耐盐雾性	600h 后，按 GB1740 进行评定，1 级
耐盐水性	25℃ ± 1℃盐水，连续浸泡 21d，漆膜无起泡、龟裂、剥落、锈斑等
耐热盐水性	80℃ ± 2℃热盐水，浸泡 2h，漆膜无起泡、剥落、龟裂、起皱等

压载水舱涂料，以往常用沥青系涂料，现在则多用性能优良的环氧沥青系涂料，也有用干燥性较快的乙烯沥青，氯化橡胶沥青涂料。

环氧沥青涂料在冬季难以固化，常改用性能相当的聚氨酯改性的环氧沥青涂料，能在 – 5 ~ 15℃条件下施工，且能很快干燥。

由于环氧沥青涂料中的煤焦沥青含有较强的致癌物质，故近年来世界各国船东都要求新造船的压载水舱内不再用传统的环氧沥青涂料而改用不含煤焦沥青的漂白环氧沥青涂料，

压载水舱内采用颜色浅淡的漂白环氧沥青涂料，不仅使涂料生产制作人员、涂料施工人员免受煤焦沥青的危害，而且由于舱内颜色明亮浅淡，容易发现涂装中产生的漆膜弊病，对保证施工质量有利，并且对施工人员和质量检查人员在舱内进出时行走安全也大有好处。

压载水舱涂料配方（例）见表 1 – 7 – 19。

二、饮水舱漆

饮水舱漆用于船舶的饮水舱、淡水舱和各种淡水柜。饮水舱漆应具有良好的附着力、良好的耐水性和防锈性能外，其漆膜应对水质无污染作用，对人体健康无影响，选用品种需获得有关卫生当局的认可、发证。

关于饮用水舱涂料的技术要求，GB 5369—85 作出了如下规定。

表 1－7－19　医载水舱涂料典型配方（%）

原材料名称	环氧沥青压载水舱漆	漂白环氧沥青压载水舱漆	原材料名称	环氧沥青压载水舱漆	漂白环氧沥青压载水舱漆
甲组分：					
钛白粉		11	二甲苯	$\frac{20}{100}$	$\frac{14}{100}$
氧化铁红	20		乙组分：		
超细滑石粉	10		滑石粉	25	
硫酸钡	14		氨基聚酰胺	14	10.5
云母粉		26	煤焦沥青	30	
环氧树脂	30	20	促进剂		0.4
古马隆树脂		20	触变剂	1.5	
触变剂	2	2			
醇醚溶剂	4		二甲苯	$\frac{29.5}{100}$	$\frac{9.1}{20}$
甲基异丁基酮		3			
丁醇		4		甲∶乙＝1∶1	甲∶乙＝5∶1

附着力　涂层与底材及涂层之间的附着力不得低于 3MPa。

柔韧性　涂层在曲率半径为 2.5mm 的芯棒上弯曲后不得出现网纹、裂纹及剥落等现象。

耐盐雾性 涂层经过连续 600 小时盐雾试验后，外观破坏程度应符合 GB 1740—79《漆膜耐湿热测定法》第三章一级要求。

耐水性　涂层经过 25℃ ± 1℃蒸馏水浸泡 30 天后，不得出现起泡、生锈及剥落等现象。

卫生要求　涂料必须经卫生鉴定，并取得卫生部认可的卫生部门颁发的许可证书。

饮水舱漆通常有漆酚水舱漆、酮亚胺固化的环氧漆和聚酰胺加成物固化的环氧漆（俗称纯环氧漆——pure epoxy paint）。

漆酚饮水舱漆漆膜坚韧、富有光泽、附着力强、防潮耐水、耐油、耐温、耐磨及耐化学介质。缺点是对人体有一定的过敏性，有些人不能适应。其漆膜一次成膜厚度较薄，只能达到 50μm 左右，故需多次涂装才能达到一定的膜厚。

酮亚胺固化的环氧漆，有良好的耐水性、耐油性、耐化学性，施工气味小、毒性低，适宜于狭小空间施工。缺点是固化反应速度较慢，15℃以下难以固化，在 15℃时需干燥三周才能投入使用。

纯环氧饮水舱漆在国内外应用最多。它具有优异的耐水性、耐油性和防锈性，能在 5℃（最好在 10℃）以上施工，低于 5℃则施工后难以干燥。

为了提高一次成膜的厚度，提高施工安全性和减少溶剂气体对人体的影响，纯环氧饮水舱漆还发展成无溶剂型。

饮水舱漆施工后，应待漆膜完全固化后才能向舱内灌水，为避免涂料中某些游离的有害物质渗入饮水，影响人体健康，饮水舱在涂料施工并完全固化后，应先用淡水浸泡 2～3 次，每次 2～3 天，然后取水样分析，在水质合格后方可正式投入使用。

三、油舱漆

油舱漆用于船舶的各种油舱，如燃油舱、滑油舱、污油舱、污油水舱（油船的 slop tank）、原油船的货油舱以及成品油船的货油舱等。

燃油舱一般不需要涂料保护。为了防止舱壁在建造过程中的锈蚀、减少封舱加油前的清洁工作量，常在分段阶段涂装一道石油树脂漆（亦称干性防锈油）。石油树脂漆是由石油树脂溶于烃类溶剂中获得，涂于钢材表面能干燥成膜，当燃油舱装油以后，漆膜将逐步溶入燃油，舱壁将直接接触燃油而

不致腐蚀。石油树脂漆由于不含有防锈颜料，故防锈性能欠佳，保护期限较短。燃油舱也可涂装一道车间底漆加以保护，

滑油舱可像燃油舱一样采用石油树脂漆进行临时保护，而更好的办法是采用纯环氧涂料保护，尤其是主机滑油循环舱，其贮藏的油质要求较高，通常应采用纯环氧涂料保护。

原油船的货油舱一般采用环氧沥青涂料保护，涂装部位是舱底和舱顶，竖直舱壁通常不涂装。如果舱内设有惰性气体保护系统的话，则舱顶部可不必涂装。原油船的污油水舱（sloptank）的整个舱内表面应采用环氧沥青涂料保护。

对于装载除航空汽油、航空煤油等特种油晶以外的石油烃类油舱的内表面用漆的技术指标，GB 6746—86 作出了如下规定。

项目	指标
附着力，MPa　≥	0.294
柔韧性，mm　≤	3
耐冲击性，N·m	符合产品技术要求
耐盐雾性（600h），级	1
耐盐水性：3%盐水浸泡	
25℃ ± 1℃　21d	漆膜不起泡、不脱落
80℃ ± 2℃　2h	
耐油性：常温 21d	
耐汽油	
耐煤油	漆膜不起泡、不脱落
耐柴油	

成品油船的货油舱应全面涂装保护。对使用的涂料要求很高，既要保护油舱的内表面不受装载的货物和交替压载的海水的腐蚀，又要不会污染装载的货物，即对货物有很强的抵抗能力，还要有一定的耐热性以适应热水洗舱。

成品油船货油舱涂料大体有以下四种：①纯环氧涂料；②酚醛环氧涂料；⑧聚氨酯涂料；④无机硅酸锌涂料。

这些类型的涂料都有很强的耐腐蚀性和抗化学物质侵蚀的能力。但这些类型的涂料的分子结构类型和特点各不相同，对各种化学物质的抵抗能力也各有差别，各自有各自的特点，也有各自的弱点，因此，成品油船货油舱涂料的选择要根据该船舱主要装载的货物来决定。

成品油船货油舱涂料对主要化学介质的抵抗能力如表 1－7－20 所示。

表 1－7－20　成品油船货油舱涂料的耐载荷性①

涂料 / 载荷	纯环氧系	酚醛环氧系	聚氨酯系	无机硅酸锌系
丙酮（酮类）	—②	—	△	+
航空汽油	+	+	+	+
乙醇（醇类）	–	△	△	+
脂肪类石油溶剂	+	+	+	+
烷烃	+	+	+	+
烯烃	+	+	△	+
烷基苯	+	+	△	+
动物油脂	△	△	+	△
芳香族石油溶剂	+	+	+	+
谷物	+	+	+	+
酯类	△	△	△	△
乙醚	—	—	+	+
花生油	△	+	△	+
牛乳	△	△	△	—
石脑油	+	+	+	+
石油	△	+	+	△
海水	+	+	+	△
砂糖液	+	+	△	—

①本表摘自于 INTERNATION 虬 PAINT 提供的“Cargo Resistsnce Guide”和日本中国涂料公司提供的“载荷耐性一览表（ ）”。

②表中：+ ——适合，△——有条件适合，———不适合。

第八节　船舶涂料的发展方向

船舶的除锈涂装作业贯穿于整个造船工程的始终，而在造船的诸工种中，除锈涂装作业的工作条件最为恶劣，作业危险性也最大。据有关部门统计，一般船舶的涂装作业所耗费的工时数约占船舶建造总工时的 12%～15%，特种船（如成品油船）甚至超过 20%。如何从改进涂料本身的性能着手，进而降低除锈涂装作业的工作时间和工作强度，降低涂料对人体的危害和对环境的污染，提高作业的安全性等成为当前船舶涂料研究发展的重要课题。

下面为据国际上一些著名的船舶涂料厂商最近发布的信息和介绍的资料表明的当今船舶涂料的发展方向。

（1）提高车间底漆的耐热性，旨在大幅度降低焊接、切割和火工校正时车间底漆的烧损范围，进而降低二次除锈的工作量。目前已有许多厂商开发出最新一代的耐高温无机锌车间底漆，比以往无机锌车间底漆只能耐 400℃高温的耐热性大大提高一步，能够达到耐 800℃甚至 1000℃的高温。这种车间底漆已在劳动力紧张、劳动力价格昂贵的某些造船国家中获得广泛使用。

（2）发展低表面处理要求的防锈底漆，使防锈底膝对钢材基底表面处理的要求从通常的 ISO Sa2—2.5 级和 St3 级降低为 ISO St2 级甚至以下的程度，从而大大降低二次除锈的工作量。

（3）目前国外已经推出的低表面处理要求的底漆有环氧型、环氧酯型、环氧沥青型等多种品种，其应用范围正逐步扩大。

发展配套性广的防锈底漆（俗称万能型防锈底漆），旨在使船舶涂层配套系统简略化，即不论船舶的何种部位，不论其中间漆和面漆采用何种类型的涂料，都可采用同一种防锈底漆。不仅如此，有的涂料厂商推出的万能型底漆在旧船维修时能覆涂在绝大多数的旧涂层上面，这可大大减少修船涂装表面处理的工作量。

（4）发展厚膜型、超厚膜型涂料，旨在减少涂装次数。这对于结构复

杂、工作条件恶劣的液舱具有特别重要的意义。不少涂料厂商已开发了一次涂装可达 500μm 以上千膜厚度的液舱涂料，甚至已开发了一次涂装可达 2000μm 以上的船舶和海洋、工程重防腐蚀应用的环氧系涂料。

（5）开发速干性涂料，旨在缩短涂料固化、干燥时间，进而缩短造船周期。尤其是在冬季，环氧系、吓氧沥青系这两类船舶上大量应用的涂料，往往在气温低于 5℃时就难以干燥和固化，甚至经过 2～3 天后涂层表面难以达到人在其表面能够行走的程度，这对造船厂来说是一种很大威胁，造船周期不得不为此延长。速干型的环氧涂料和环氧沥青涂料可使涂料干燥时间缩短到 24 小时甚至更短的时间（在冬季条件下）以内。国外已有在 5℃条件下能在 8 小时左右达到初步固化（能在上面行走）的速干型环氧沥青涂料。

（6）发展不含有机锡的自抛光防污涂料，旨在防止有机锡化合物对港湾和海洋的污染。目前不少厂商开发的无锡自抛光防污漆已具有 3 年的防污能力，个别厂商已经开发了具有 5 年防污能力的无锡自抛光防污漆，正在向实用化方面迈进。

（7）发展无溶剂或水性防锈涂料，旨在减少有机溶剂对大气的污染，杜绝爆炸、火灾的危险性。这对于工作环境复杂的机舱、结构复杂且通风困难的液舱具有特别重要的意义。

（8）发展低毒、无毒涂料，如采用古马隆树脂代替煤焦沥青的漂白环氧沥青涂料，可免除煤焦沥青对人体的危害；采用新型低毒、无毒颜料取代铅、铬系重金属颜料，这对人体健康和环境保护均有很大意义。

另外，为了进一步提高涂料的防蚀性能、美化性能和施工时的方便性，世界各国涂料厂商正逐步推出一些高性能的涂料，如：

（1）超厚膜型环氧玻璃鳞片重防腐蚀涂料；

（2）高耐候性、高光泽的氟素涂料、有机硅醇酸涂料、有机硅丙烯酸树脂涂料；

（3）湿润面涂装涂料；

（4）水中涂装涂料；

（5）防结冰涂料等。

总之，当今船舶涂料发展的方向乃是高效、省力、合理、低毒、安全。随着造船事业发展，将不断研制出新型的船舶涂料。

第八章　特种船舶涂料与集装箱涂料

第一节　特种船舶涂料

一、防结冰涂料

冬季在北方海域航行的舰船的甲板和船头两侧挂上不同厚度的冰层，一方面由于滑动影响船员行走和安全，另一方面增加负荷和不平衡性并带来安全问题。通常公路上的冰雪采取抛撒食盐化冰，此方法不适合舰船，因为涌上甲板的大量海水很快将电解质的浓度稀释而使食盐失去效果。

到今天为止，防结冰仍然是一个尚未解决的难题。对于舰船而言目前可采用冰雪难粘附的涂层，即低表面能涂料加以解决。这样在垂直面上冰层可由于自重而脱落，在平面上粘附不牢的冰层很容易消除掉。

最早使用的防冰涂料是以蜡为基础的配方（质量份），例如：

中枯度的硝化棉	9.9 份
蓖麻油改性醇酸树脂	100
蜂艏或固体石蜡	12 份
混合溶剂（乙酸丁酯、异丁醇、甲戊酮、1:1 的甲苯）	

现在可选用室温固化硅橡胶 RTV 和室温固化的双组分氟碳树脂。后者的表面能更低，机械强度更高。例如：

含羟基氟碳树脂（50～70 mgKOH/g）　50～60 份

缩二脲固化剂	8 ~ 10 份
钛白粉	10 ~ 15 份
溶剂	20 ~ 30

二、太阳热反射涂料

（一）概述

太阳热反射涂料就是对太阳的热辐射具有高反射率的涂层。

自 20 世纪 70 年代以来，建筑业、石油工业、运输业、兵器工业等迅速发展，要求使用反射太阳能的新型涂料，以降低暴露在太阳辐射热下的装置表面涂层的温度，从而阻止热能传导，达到改善工作环境，提高安全性等目的。目前，国外在太阳热反射涂料的理论研究方面较完善，已广泛应用于很多领域。例如建筑业的屋顶和玻璃幕墙、石油工业的海上钻井平台、油罐、石油管道，运输业的汽车、火车、飞机表面、造船工业的船壳、甲板，以及兵器及航天工业的坦克、军舰、火箭、宇宙飞船等采用太阳热反射涂料。国内研制太阳热反射涂料的报道较少，随着人们生活水平的提高、社会经济的发展，研制及生产太阳热反射涂料是可行的、必要的。

（二）热反射涂料的基本原理

1. 涂层应具备的光谱特性。

①热辐射及黑体辐射。众所周知，室温下或温度更低的物体，在不断地辐射不可见的红外光和波长更长的电磁波。这种辐射是由于分子、原子的热运动引起的，辐射能量与温度密切相关称为热辐射。热辐射不仅与温度有关，与物体的材料及表面性质也有关系。

黑体是热辐射研究的理想体。所谓黑体，即在任何温度下都能全部吸收照射到它表面上的辐射。黑体的辐射度与波长、温度的关系遵循普朗克公式：

$$M_\lambda = \frac{\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \Delta\lambda$$

式中：M_λ——黑体辐射度，W/m^2；

h——普朗克常数，$6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$；

k——玻尔兹曼常数，$1.38 \times 10^{-23} J \cdot s$；

λ——波长，nm；

c——光速，m/s；

T——绝对温度，K。

在全波长范围内积分，得斯蒂芬—玻尔兹曼方程：

$$M = \sigma T^4$$

式中：M——总辐射度；

σ——斯蒂芬—玻尔兹曼常数，$6.57 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$。

②即黑体的总辐射度仅与温度的四次方成正比。

太阳与一般物体的热辐射光谱范围如下：

柴外区　0.2～0.4μm，占总能量的5%；

可见光区　0.4～0.72μm，占总能量的45%；

近红外区　0.72～2.5μm，占总能量的50%。

即太阳的能量主要集中于可见和近红外区。若把一般物体视为300K黑体，那么一般物体的辐射在热红外区2.5～15μm。

③一般物体的热辐射 一般物体的辐射度表达式为 $M = \sigma\varepsilon T^4$。

ε为辐射率，一般物体的表面辐射度除与温度有关外，还与表面辐射率有关。不同物体，吸收能力也不同，在一定温度下，物体的辐射率与吸收率相同。

吸收率　物体表面吸收的辐射能量与入射到该物体表面的辐射能量之比记作α。

反射率　物体表面反射的辐射能量与入射到该物体表面的辐射能量之比记作ρ。

透射率　穿透过物质的辐射能量与入射到该物体表面的辐射能量之比记作τ。

根据能量分配为 $\alpha + \rho + \tau = 1$

对于多数固体和液体，一般有 $\alpha + \rho = 1$

综上所述，为降低内部温度而使用的太阳热反射涂层，应满足对可见光和近红外光的高反射和对远红外线的高反射。

（2）热反射涂层的主要指标热反射率取决于颜填料与树脂的折射率的比值。在树脂的折射率（1.45～1.50）一定的情况下，其热反射率主要取决于颜填料的折射率、粒径、纯度以及涂层厚度、PVC 值。颜填料的折射率范围一般为 1.50～2.80。

（3）研制热反射涂料的主要内容之一是寻找炭黑的低吸率替代物，因为炭黑对太阳热的吸收率高达 97%，反射率仅为 3%。

（三）影响热反射率的基本因数

1. 树脂对涂层反射率的影响

（1）用于太阳热反射涂层的树脂，对可见光和近红外光吸收越小越好，一般涂料常用的树脂都可用于太阳热反射涂层。要求树脂的透明度高，透光率在 80%以上，太阳能的吸收率低，有些基团吸热，故在设计合成树脂时，尽量使树脂中少含有 C—O—C、C═O、—OH 等基团。

（2）可用于太阳热反射涂层的树脂有：丙烯酸树脂、有机硅改性聚酯树脂、醇酸树脂、有机硅改性醇酸树脂、含氟树脂、环氧树脂、环氧酯、氯化橡胶、聚乙烯聚丙烯树脂、聚氨酯树脂等。

（3）几种树脂的太阳吸收率 α：

树脂	颜料	α
有机硅－丙烯酸	TiO_2	0.19
有机硅－醇酸	TiO_2	0.22
丙烯酸树脂	TiO_2	0.24
环氧树脂	TiO_2	0.25
聚氨酯树脂	TiO_2	0.26

2. 颜料对涂层热反射率的影响

颜料对可见光和近红外光的吸收同样越小越好，同时，为减少太阳光透

过，颜料对太阳光应有尽可能大的散射。

（1）颜料折射率的影响。颜料对可见光和近红外辐射的散射能力取决于颜料和树脂折射率的差异，散射率 m 定义为颜料与树脂折射率的比值即 $m = n_p / n_R$。n_p 为颜料的折射率（常用颜料的折射率为 1.4～2.8），n_R 为树脂的折射率（常用有机树脂的折射率为 1.45～1.50，变化很小）。要达到高反射率，必须选用折射率高的颜料。以下是几种颜填料的折射率。

颜填料	折射率	颜填料	折射率
二氧化钛	2.80	氧化铝	1.70
氧化铁红	2.80	硫酸钡	1.64
氧化铁黄	2.30	硅酸镁	1.58
氧化锌	2.20	二氧化硅	1.54

（2）颜料粒径对散射率的影响。颜料一旦选定后，颜料的粒径对涂层的热反射性起关键的作用。颜料的最佳粒径 d 与散射波长 λ 的关系如下：

$$\lambda = d/k$$

$$k = \frac{0.9\ (m + 2 + 2)}{n_R \pi\ (m^2 - 1)}$$

式中：m——散射率；

n_R——树脂的折射率；

k——由 m 和 n_R 决定的常量。

（3）用于太阳热反射的颜料的选择和配色。

①颜料。

颜色	牌号	粒径/μm	太阳反射率/%
白色	R930	≤50	>80
红色	PR3	≤50	≥45
橘红	P05	≤50	≥55
黄色	PY83	≤50	≥60
绿色	PG7	≤50	≥20
蓝色	PB15－3	≤50	≥20
紫色	PV19	≤50	≥35

黑色	炭黑	≤50	≈3

②配色系统。

红 + 黄——→橙色、金色

红 + 蓝——→紫色、咖啡

黄 + 蓝——→绿

红 + 黄 + 蓝——→黑色

紫 + 蓝——→黑色

3. 颜料体积浓度（PVC）的影响　PVC 表示颜料在干燥漆膜中的体积分数

$$\text{PVC（\%）} = \frac{\text{颜料何种}}{\text{颜料体种} + \text{树脂体积}} \times 100\%$$

一般涂料涂层的 PVC 分布为：底漆 PVC35% ~ 45%，中间层 PVC 25% ~ 40%，面漆 PVC 15% ~ 30%。在太阳热反射涂料的配方设计中，采用涂料 PVC 值在 10% ~ 50%之间变化，反射率与 PVC 值之间能做出一条近似的正弦曲线。

（四）热反射率的检测设备及方法

太阳热反射效果的测定主要包括以下几种方法。

（1）精密仪器法。准确测定涂层（正面）对不同波长的近红外光的反射率。通过谱图及数据处理得到平均反射率。

（2）实验室简易法。通过测定涂层下基材背面的温度，在同一系统中，不同涂层对碘钨灯光的反射后得到的温度比较，从而得到不同的热反射率。

（3）模拟环境箱体法。通过测定在多个相同铁箱体表面涂刷不同涂层后内部环境温度，鉴定在相同颜色下，热反射涂层和非热反射涂层的效果。

1. 太阳光中近红外反射率的测定

（1）仪器。采用扫描分光光度计，型号为：岛津 UV3101PC。

其主要使用指标为：

①波长范围：190 ~ 3 200 nm；

②光度测量系统：使用双光线，正比例测量系统；

③光源：50W 卤灯；

④单色仪：光栅式双单色仪；

⑤探测器：光电倍增管 R－928 用于紫外/可见区，pbs 光电管用于近红外区；

⑥试样隔室内部尺寸；150mm×260mm×110mm（W×D×H），光线间距 100mm；

⑦环境温度：15～35℃；

⑧环境湿度：45%～80%（当温度≥30℃时应＜70%）。

（2）制板。在一块 40mm×40mm×2mm 的钢板上面喷涂上两道环氧富锌底漆，干膜厚度为 120μm±10μm，然后再喷涂上两道需检查的热反射面漆，漆膜干膜厚度为 120μm±10μm，底、面漆的喷涂间隔时间为每隔 24 小时喷涂一道，喷最后一道面漆干 7 天后进行测试。

（3）操作。将制好的样板放在扫描分光光度计的试样隔室，测出其红外反射率在太阳光波长范围内的反射光谱图及测出其在近红外波段范围内（0.7B～2.5μm）选定 35 个不同的波长所对应的红外反射率的数据表。

（4）平均红外反射率的计算。将 35 个红外反射率的数值相加之和除以 35 得平均红外反射率。

2. 涂层热反射率检测系统的建立

（1）热反射率所对应实测温度的确定。根据美国军标 MIL－E－46136A、46117A、46142（ME）以及 USP5540998 假定黑板为理想黑体，即吸收率约为 100%（炭黑的实际吸收率达 97%）可以查得热反射率所对应实测温度为：

$T_{室温}$为当时室温，一般固定为 28.8℃±0.5℃，$T_{黑板}$为标准黑板温度，一般为 87.8℃±1℃。

例如：热反射率≥50%，$T_{实测}$≤68.3℃；热反射率≥60%，$T_{实测}$≤65.6℃；热反射率≥75%，$T_{实测}$≤61.1℃。

（2）测热反射率的样板制备。对太阳的吸收率：2024 型铝合金板 ρ=0.16，铁板 ρ=0.29，样板尺寸 150mm×75mm×1mm。所以实测 T_X 值发现铁板比铝板高，因此铁板反射率就低。一般采用铝板。

喷黑漆板两块漆膜厚度为 35～40μm，反射样板一块漆膜厚 35～40μm。

（3）测热反射率仪器。热反射率仪器示意图见图 1－8－1。

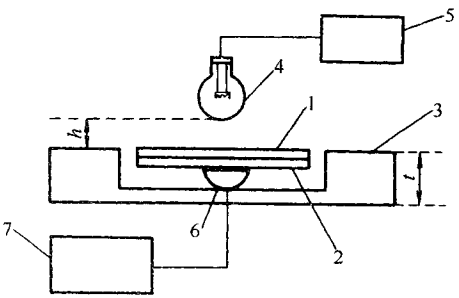


图 1－8－1　热反射率仪器示意图

1—热反射涂料；2—两块样板；3—聚苯乙烯泡沫塑料；4—500W 碘钨灯 2 个；5—稳压电源；6—温度传感器；7—温度记录仪 h 为 370mm；t 为 60mm

（4）测热反射率的步骤。

①调节室温为 28.8℃。

②将两块喷涂黑磁漆样板平行放在泡沫聚苯乙烯上，涂漆的一面朝上，其中心放在灯泡下，而且两板边缘彼此相距 50mm 处。

③调节稳压电源及 h，使两块样板在 30 分钟内达到平衡温度 87.8℃。

④达到平衡温度后，立即撤走一块黑样板，换上一块待测热反射漆板。

⑤经 15 分钟后，记录下平衡时反射漆样板的温度。

⑥温度曲线见图 1－8－2。图 1－8－2 为典型的温度时间曲线。

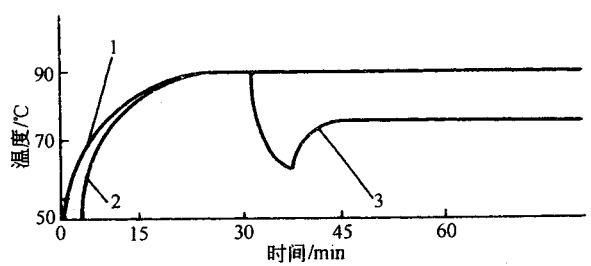


图 1－8－2　典型的温度时间曲线

1—黑板 1；2—黑板 2；3—被测样板

⑦经由“热反射率所对应实测温度的确定”知，按照以上步骤，若实测涂刷两道热反射面漆的样板的温度在 64～65℃之向，低于反射率 60%时的 65.6℃；远低于反射率 50%时的 68.3℃。

3. 模拟环境箱体法

本试验方法主要是拟环境来检测热反射涂料的效果，采用 0.8mm 厚的钢板，制成长×宽×高为 450mm×450mm×450mm 的箱体。在箱体的一面中心开孔固定温度计。

对同一颜色的热反射涂料和非热反射涂料的效果鉴别，采用两个箱体，其表面涂刷两道底漆后，分别涂刷热反射涂料、非热反射涂料两道。箱体内部采用相同介质（水、空气、油类、溶剂），在气候相同情况下（环境温度、阳光强弱），所测温度有较大差异。一般对空气介质，温度可降低 3～8℃。

（五）热反射涂料的品种及配方实例

热反射涂料的品种很多，分类主要以所选用的基料及不同市场需求所对应的不同颜色体系为准。

按市场细分 建筑业的屋顶和玻璃幕墙用热反射涂料，石油工业的海上钻井平台、油罐、石油管道用太阳热反射涂料，运输业的汽车、火车、飞机表面用太阳热反射涂料，造船工业的船壳、甲板用太阳热反射涂料，兵器及航天工业的坦克、火箭、宇宙飞船、航天器用太阳热反射涂料。

按市场需求所对应的主要颜色细分 透明热反射涂料，白色热反射涂料，海灰热反射涂料，深灰热反射涂料，草绿热反射涂料，黑色热反射涂料。

典型配方　反射太阳热的军绿色醇酸磁漆。

1. 配方

原料名称	用量/质量份	原料名称	用量/质量份
中铬黄	92	50%苯乙烯改性醇酸树脂	129
永固紫	2.7	二甲苯	324
酞青蓝	1.7	6%钴干料	0.6
钛白粉	3.6	抗氧刑	0.6
硅酸镁	122.2	稳定剂	0.6

2. 技术指标

固含量/%	≥62	干燥时间　表干/h	2
遮盖力	0.98	实干/h	8
粘度/s	15～25	附着力（画圈法）/级	1
细度/μm	≤30	冲击强度/（N·cm）	490
红外反射率/%	≥60	柔韧性/mm	1

三、船用阻燃涂料

非膨胀型防火涂料的防火效果较膨胀型防火涂料的要差一些，通常又把它称作阻燃涂料。

（一）分类

根据阻燃涂料的组成，可以将它分为无机型和有机型。无机型阻燃涂料是以无机粘接剂作为基料（成膜物），如水玻璃、石灰等；有机型阻燃涂料是以天然或人工合成的树脂作为基料，如大漆、松香以及绝大多数合成高分子材料。无机型阻燃涂料的性能通常不能满足使用要求，因此，需要加入一些有机树脂（如聚乙烯醇）进行改性；而绝大多数有机阻燃涂料中，需要加入许多无机盐类阻燃剂，所以，无机型阻燃涂料和有机型阻燃涂料之间没有严格的界限。

由于阻燃涂料中含有大量的无机物质，它的阻燃机理是依靠这些无机物质对火焰的不燃性来实现的，通常这种涂料的厚度较大，对物体的保护效果是‘有限的。但是，由于其自身的不燃特性，使得它具有抵御瞬时高温的突出效果。

（二）组成

阻燃涂料是由基料、分散介质、阻燃剂、颜填料、助剂组成。

1. 基料

基料又称作成膜物质，对阻燃涂料的性能起着决定性作用。由于阻燃涂料中含有大量的阻燃剂，加上涂层比较厚，极易造成涂层开裂、阻燃性能下降。通常单一的无机粘接剂（例如：水玻璃、石灰、磷酸盐等）难以胜任，需要加入水溶性高分子（例如：淀粉、聚乙烯醇、羟基纤维素等）进行改性，从而提高涂层的机械性能。有机粘接剂的种类很多，例如：酚醛树脂、卤代烯烃树脂、氨基树脂、有机硅树脂和卤化橡胶等。但这些有机高分子成膜物质需要有机溶剂溶解，在生产和施工过程中，会产生大量有机挥发物质（VOC），污染环境。随着人们环保意识的增强，聚合物乳胶（例如：聚乙酸乙烯乳胶、丙烯酸乳胶、丁苯乳胶、偏氯乙烯乳胶等）日益受到人们的重视。

2. 阻燃剂

阻燃剂是阻燃涂料中担负抵御火焰燃烧作用的关键成分，其阻燃机理是阻燃剂遇火分解产生不燃性气体或本身不燃且导热系数很低。这类物质有：石棉、珍珠岩、蛭石、NH_4Cl、$(NH_4)_2SO_4$、Sb_2O_3、$Al(OH)_3$ 等。

3. 颜填料

阻燃涂料除了具有阻燃功能外，还需要有装饰性、耐介质性和良好的物理机械性能。例如：钛白粉、酞青蓝、铁红、中铬黄等，都是常用的着色颜料。锑白粉（Sb_2O_3）具有一定的着色能力，可以部分取代钛白粉，既起到白色颜料的作用，又可以发挥其阻燃作用。

4. 助剂

助剂在阻燃涂料中作为辅助成分，用量很少，但作用很大。岂能够明显改善涂料的施工性、稳定性、柔韧性等。例如：触变剂如有机膨润土，可以明显提高涂料的抗沉淀性和触变性；热稳定剂如环氧豆油，能有效抑制氯化聚合物在研磨过程中分解出氯化氢，防止基料被破坏；增塑剂如有机磷酸酯，能大大改善涂料的柔韧性。其他的还有：表面活性剂、防老剂、流平剂等，可以根据不同的需要，酌情加入。

（三）阻燃机理

阻燃涂料的阻燃机理主要有以下两点。

（1）阻燃涂料本身具有难燃性或不燃性，使被保护的可燃性物体不直接与空气接触，从而延迟物体着火或减缓燃烧的速度；

（2）阻燃涂料遇火发生热分解，分解产生不燃的气体，这些气体冲淡了被保护物体受热分解产生的可燃性气体，使之不易燃烧或减缓燃烧的速度。

阻燃涂料利用其自身的难燃性或不燃性达到阻止火焰的蔓延和传播。这类涂层的厚度较大，遇火时，无机阻燃涂料在高温条件下形成釉状物质；有机阻燃涂料中的少量有机物质会分解，产生烟尘，绝大部分无机阻燃剂也会在高温条件下形成釉状物质。这种釉状物质在一定时间内起着一定的隔热作用。由于这种釉状物质的结构致密，能够有效地隔绝空气，使被保护的物体因缺氧而不能着火燃烧或降低燃烧速度。

阻燃涂料中含有的卤素阻燃剂、水合无机盐阻燃剂，在高温条件下分解产生大量的卤化氢和水蒸气，从而冲淡氧气和可燃性气体的浓度，达到抑制燃烧和降低燃烧速度的目的。

（四）配方设计原则

无机阻燃涂料基本上是以无机粘接剂、阻燃剂、填料与水按照一定比例调和而成，多数用于木材的临时性简易防护。例如下面的配方（质量份）：

水玻璃	50	石棉粉	80 份
黄泥	20 份	滑石粉	30 份
蛭石	20		

这类阻燃涂料在厚度较大（5～10mm）的情况下，对短时间的遇火高温具有良好的阻火效果，但它的涂刷工艺很差，基本上不具备涂料的使用要求，加之脆性大，涂层很快就会开裂、脱落；同时，耐水性也很差，极易被雨水冲蚀。为此，在上述配方（质量份）中加入适量水溶性高分子溶液，能有效提高涂层的理化性能。例如：

聚乙烯醇水溶液	30 份	硅藻土	20 份
水玻璃	20 份	膨胀珍珠岩	10 份
石棉粉	60 份	着色颜料	15 份

有机阻燃涂料中的树脂基料大多以含卤素的聚合物居多，例如：聚氯乙

烯、过氯乙烯、氯化橡胶等；酚醛树脂的阻燃性能较好，也是常用的树脂基料之一。阻燃剂通常选用有机和无机复合体系，通过卤、氮、磷、硼、锑元素的协同效应，达到阻燃目的。例如下面的两个配方（质量份）。

配方 1

过氯乙烯乳液	50 份	滑石粉	20 份
锑白	30 份	石棉粉	15 份

配方 2

酚醛树脂	50 份	滑石粉	20 份
十溴联苯醚	30 份	着色颜料	10 份
磷酸三氯乙酯	15 份		

阻燃涂料的性能检测和分级方法与防火涂料相似，这里不再赘述。

四、船用防火涂料

防火涂料由基料及阻燃添加剂两部分组成，它除了应具有普通涂料的装饰作用并对基材提供保护外，还需要具有阻燃耐火的特殊功能。

防火涂料从防火机理来讲一般可分为膨胀型和非膨胀型两类。所谓非膨胀型防火涂料（又称厚型防火涂料）是指涂层使用厚度在 8 ~ 50mm 的涂料，这类防火涂料是靠其自身的高难燃或不燃性来达到阻燃防火的目的，其缺点是必须涂得很厚，大量的涂料涂在基材表面，既增加了体积又增加了载荷。而膨胀型防火涂料是涂膜受火时膨胀发泡形成致密的蜂窝状炭化隔热层，使火焰热量受到隔离而减少对底材的传导，与非膨胀型防火涂料相比，粒度更细、涂层更薄、施工方便、装饰性更好是其突出特点。

船用防火涂料的标准可参考国家钢结构防火涂料标准和船级社及船检的 A60 标准，后者要求更高。船内部使用的防火涂料对其安全性和涂层在施工后及着火后释放的有毒有害气体的含量有很高的要求。我国军用标准对不同舰艇内使用涂料释放有机挥发物的含量有严格规定，取样测定的时间规定如下：

常规水面舰艇	30d	核潜艇	90d
常规潜艇	60d		

我国是海洋大国，拥有的船舶数量众多。由于船舶舱室具有密封性且多有易燃材料，通风不良、活动不便，一旦发生火灾，其后果将是灾难性的。特别是军用舰艇，发生火灾的几率更高，因此在其舱室内涂刷防火涂料是必要的，它能大大延缓火焰的传播，船舶结构中有很多舱室，这些舱室具有狭小、密封、交通不便等特点，因此仅能使用膨胀型防火涂料。

下面把膨胀型防火涂料作一详述。

膨胀型防火涂料一般有基体树脂、催化剂、发泡剂、成炭剂、阻燃剂、补强剂、颜填料和溶剂等组成。

（一）基体树脂

基体树脂对膨胀型防火涂料的性能有重大的影响，它与其他组分配伍，既保证了涂层在正常条件下具有各种使用性能，又能在火焰灼烧或高温作用下帮助形成具有难燃性和优异的膨胀发泡效果的炭化层，且为了达到一定的阻燃耐火时间，使发泡层在高温下也不脱落。

常见用于防火涂料的树脂有：丙烯酸树脂、氯化橡胶、高氯化聚乙烯树脂、醇酸树脂、环氧树脂、氨基树脂或要几种树脂的拼混等。选择树脂的原则是涂料形成的膨胀层密实，涂料加工容易，涂料施工方便。考虑到含氯树脂易产生氯化氢等二次毒性气体，不宜用于非敞开体系，因此，对于船用防火涂料而言，应选用不含氯树脂。

（二）催化剂的选择和筛选

催化剂是一种能在一定温度下分解出强酸性物质的材料，这些强酸性物质在一定温度下能脱去涂层内成炭剂的水分，使之形成不易燃烧的具有高保温效果的炭化层。

目前，国内外所采用的催化剂主要有磷酸氢二铵、磷酸二氢铵、聚磷酸铵、三聚氰胺磷酸盐等，选择的原则是耐水性、加工性及发泡性的好坏。对船用防火涂料而言，涂层必须要有良好的耐水性，因此磷酸氢二铵、磷酸二氢铵不在考虑范围内，三聚氰胺磷酸盐是目前最好的催化剂（具有催化和发

泡的双重作用），生产工艺较复杂，目前还难以满足需要。目前使用最广泛的催化剂是聚磷酸铵。聚磷酸铵生产厂家众多，产品质量参差不齐，应选择具有较高聚合度易分散的产品。

（三）成炭剂的选择

成炭剂是涂层在高温下形成不易燃三维空间结构的泡沫炭化－层的物质基础，其分解温度必须和催化剂发生作用的时间相匹配，对以聚磷酸铵为催化剂的涂料而言，其成炭剂必须是高碳多羟基化合物，目前可供采用的成炭剂主要有季戊四醇和多季戊四醇。

（四）发泡剂的选择

发泡剂的作用是在高温下分解出不燃性气体，使涂层在熔化，的情况下膨胀从而形成海绵状结构，目前可供采用的发泡剂多是三聚氰胺及其衍生物，选择的原则是必须和催化剂分解、基料树脂熔化的温度相匹配，还必须具有良好的耐水性。

（五）补强剂的选择

研究表明，膨胀层厚度与耐火极限并不完全成正比关系。原因与膨胀层的强度有关，若膨胀层疏松强度低，则随着其厚度的增加，其自身稳定性就越来越差，膨胀层就很容易从基材上脱落，使基材暴露于火焰中，起不到防火保护作用。因此必须提高膨胀层强度，选择膨胀层补强剂是最简单的办法。目前的补强剂为玻璃纤维等。

（六）阻燃剂的选择

加阻燃剂的目的是为了提高在涂层中膨胀材料发挥防火作用。矿涂层的阻燃能力，同时该材料还应具有一定的抑烟效果。

（七）颜填料的选择

颜填料在涂料中的填加一方面是为了降低成本，另一方面是。为了提高涂层本身的强度。颜填料不得与各种防火材料在防火时的作用相抵触，以免降低或破坏防火效果。

（八）稀料及溶剂的选择

稀料及溶剂的选择要满足以下要求：一是要有适宜的挥发速度以使涂料有一个适宜的干燥速度，二是要有较低的气味、毒性以方便工人施工、加工。

以下是举例介绍船用防火涂料配方。

原料名称	用量/%	原料名称	用量/%
树脂	10 ~ 30	阻燃剂	适量
聚磷酸铵	20 ~ 30	补强剂	适量
季戊四醇	5 ~ 10	溶剂	适量
三聚氰胺	5 ~ 15	总量	100
钛白	5 ~ 10		

五、船用阻尼涂料

（一）船舶用阻尼涂料的特点

随着科学技术的发展和人们环保意识的提高，降低舰船等交通工具的振动和噪声越来越迫切。如何控制舰船的振动和噪声是一个复杂的系统工程，也是衡量一个国家造船水平的重要标志。

舰船上存在着多种振源，其产生的振动和噪声会造成严重的危害，如引起铆钉松动，结构破坏；影响船员的舒适性，易造成船员疲劳；影响仪器、

仪表的正常工作，降低使用精度等等。对军船而言，振动和噪声还会降低声纳、雷达的作用距离，大大削弱其战斗力。

传统的减振降噪方法是结构加强，其主要缺点是振动能量没有消耗掉，从而导致结构噪声向其他部位传播。船舶用阻尼涂料作为一种能有效降低船舶振动和噪声，提高其安静性和舒适性的特种功能材料。它不同于传统的被动吸声材料，而是一种主动降噪材料。它利用高分子材料的粘弹性将振动能转化为热能耗散掉，从而有效地降低结构振动和噪声。阻尼技术具有在不改变舰船原有设计和设备的情况下进行减振降噪的特点，对宽频带随机振动和噪声特别有效，尤其适合于以平板、框架结构为主的造船业。

阻尼涂料是从声（振）源上对振动和噪声进行有效的控制。因此，它主要用于振动和噪声产生的部位，如舰船的主（辅）机舱、舵机舱和螺旋桨上方对应部位。此外，将阻尼涂料与吸声材料一起使用，具有良好的减振、吸声和隔声作用，特别适合于住舱、集控室、会议室、主配电室和驾驶室等部位。

由于造船厂濒临江、河、湖、海地区，空气中相对湿度较大，且造船行业均采取户外露天作业，舱室内空间狭小，立体交叉工种很多，这对船舶阻尼材料提出了以下十分苛刻的要求：它不仅要在一定的温度和频率范围内发挥优良的阻尼性能，而且要求材料满足舰艇苛刻的使用环境，如耐海水、耐盐雾、耐油、耐老化、阻燃、无毒等特性。因此，舰船用阻尼材料属于高技术、新材料领域。对它的基本要求如下：

（1）材料的使用温度 $-20\sim60$℃，满足无限航区的要求；

（2）既要求材料自身的损耗因子峰值 $(\tan\delta)_{max}$ 应在该温度范围内，其平均损耗因子（$\tan\delta$）要高于 0.5，但更要求其复合损耗因子（η）要高于 0.1；

（3）具备一定的力学性能（如附着力、强度、韧性等）；

（4）阻燃、无毒、耐介质、耐老化；

（5）厚度薄、质量轻；

（6）施工方便，可带底漆施工，满足不同部位的施工要求。

（二）分类

20 世纪 50 年代初，德国专家 H.Oberst 最先提出自由阻尼结构的理论，并在飞机上得到应用。自由阻尼结构处理工艺简单，但实船减振降噪效果较差。50 年代末，美国专家 E.M.Kerwin 和 E，E.Ungar 等人将 H.Oberst 的复刚度法推广至约束阻尼结构，该结构最早应用于核潜艇壳体和主机机座上。约束阻尼结构是在粘弹层（又称阻尼层）上再覆盖一层刚性材料（又称约束层）。当底材产生弯曲振动时，阻尼层受到上下表面各自产生的压缩和拉伸的不同变形，使阻尼层受到剪切应力和应变，从而耗散更多的能量（见图 1－8－3）。图 1－8－3 为自由阻尼、约束阻尼的工作原理。因此，约束阻尼结构具有更好的减振降噪效果。目前，美国、俄罗斯、英国、法国、日本等发达国家在舰船上广泛使用各类阻尼材料。

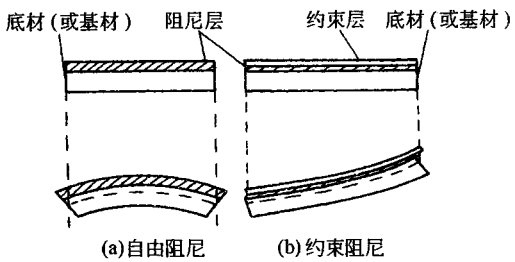


图 1－8－3　自由阻尼、约束阻尼的工作原理

我国从 20 世纪 60 年代起开始研究自由阻尼材料，70 年代初自由阻尼材料得以在各行各业大量应用。这期间，我国的船用阻尼材料得到了迅猛的发展，品种从早期的单一型橡胶片材，发展到门类齐全、性能各异的阻尼材料。在结构形式上也从单一的自由阻尼结构向阻尼性能更好的约束阻尼结构发展。同时，相关单位还开发成功了阻尼合金等新材料。这些材料都为舰船的减振降噪提供了广阔的选材余地。

目前舰船用阻尼材料主要分为片状型材，阻尼钢板和涂料这三种类型。早期的片状材料以沥青系列制品为主，价格低廉，来源广泛，但阻尼性能较差。随后出现的橡胶型片材，又称阻尼胶板，一般由丁氰橡胶、丁基橡胶、

聚氨酯橡胶或聚硫橡胶制成。因其阻尼性能较沥青材料有较大的提高，在舰船上得到广泛应用。但它也存在一些难以克服的缺点，如不希望在涂有底漆的底材上施工；而且对底材的处理要求相当严格，除锈通常要求达到 Sa2.5 级，施工时需要特殊的胶粘剂进行粘贴，常因粘贴不牢造成脱落、开裂现象，导致减振降噪效果大幅度下降。另外，对于复杂结构（如碰钉、马脚、焊缝和设备基座等）和曲率较大的施工部位，橡胶型片材的应用受到很大的限制。阻尼钢板是近几年开发出的新型阻尼材料。该材料是将一层粘弹材料复合在两层相同厚度的钢板之间，形成所谓“夹心阻尼结构”，具有阻尼效果好，外表美观的优点。缺点是材料比重较大，裁剪困难，尤其是焊接工艺复杂，焊接过程中粘弹材料易燃烧损坏，影响其阻尼性能，同时由于其成本较高，应用受到限制。

为解决这些难题，阻尼涂料应运而生。阻尼涂料作为一种新型的阻尼材料，因其具有制造工艺简单，施工方便，性能优异等特点，发展极为迅速。初期的阻尼涂料多为溶剂型，主要以沥青为主要成膜物质，加入其他树脂、助剂、填料及有机溶剂混合而成。溶剂型阻尼涂料不仅阻尼性能差，而且易燃易：爆，使用不安全，污染环境，应用受到很大限制。20 世纪 80 年代末，国内一些单位相继推出了水性阻尼涂料。该涂料虽然解决了环境污染问题，但涂料干燥速度慢，厚涂困难、开裂，需多道施工，不适合在造船业使用。1989 年海洋化工研究院研制的第一代无溶剂阻燃型“ZHY－171 阻尼涂料”，首次投入实船应用，标志着约束阻尼结构的阻尼涂料开始登陆造船业。此后，约束阻尼涂料在舰船的减振降噪中大量应用，取得了显著的减振降噪效果，代表性产品有海洋化工研究院研制的第二代无溶剂阻燃型“T54/T60 舰船用阻尼涂料”等。

（三）影响阻尼涂料性能的因素

下面主要以“T54/T60 舰船用阻尼涂料”为例进行论述。该涂料采用约束阻尼结构，靠近钢板底材的一层软材料称作阻尼层，它是由双组分聚氨酯材料组成；在阻尼层之上的一层硬质刚性材料称作约束层，它是由双组分环氧树脂材料组成。图为“T54/T60 舰船用阻尼涂料”结构。

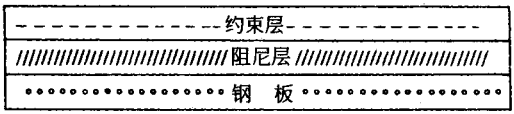


图 1－8－4　“T54/T60 舰船用阻尼涂料”结构

1. 阻尼层

(1) 交联密度的影响。交联密度对聚氨酯的动态力学性能有很大的影响，改变交联密度的方法有很多，我们通过调节体系的 α（即 NCO/OH 的比值）值，在硬段含量几乎不变的情况下，改变了聚氨酯的交联密度，、同时引起分子量的改变。从不同 α 值样品的动态粘弹谱（DMS）图中发现：当 $\alpha=0.6$ 时，从组成上可推知其结构为带支链的线性分子。在聚氨酯材料中，由于硬段的内聚能比软段大得多，易于聚集，因此软、硬段间存在着不相容性。$\alpha=0.6$ 时，由于分子量低，且许多硬段分布在端基上，使硬段很难聚集形成有序结构，大量硬段弥散于软段连续相中，致使 DMS 图上的损耗峰 T_g 较高。此外，由于无交联化学键的束缚，分子间容易产生相对滑动，而聚氨酯分子中的 NH 基与－O－和－CO－基存在着强烈的氢键作用，因此相互滑动伴随着很大的力学损耗，故 DMS 图上表现出很高的损耗峰。随着 α 增至 0.7，只有少量的交联，而分子量迅速增大，增大的分子量有利于硬段聚集，从而增大了软硬段的微相分离，T_g 减小。当 α 增至 0.8 时，交联密度增大起了主导作用，硬段被化学键束缚强迫分散于软段相中，使 T_g 再次升高，但此时，交联的化学键束缚了分子链的相对滑动，许多构象无法实现，损耗峰较。$\alpha=0.6$ 有明显下降。综上所述可知，$\alpha=0.6$ 时的材料表现出了很好的阻尼性能。

(2) 软段分子量的影响。当 $\alpha=0.6$ 时，从部分当量为 100 的低分子聚醚替代当量为 900 的高分子聚醚样品的 DMS 图中。可以发现：随着低分子聚醚相对含量的增加，样品的硬段含量增加，从上述的分析，$\alpha=0.6$ 时，软硬段的相容性很好，所以硬段含量增加，必导致软段中硬段含量的增加，故损耗峰 T_g 移向高温。与此同时，由于软段分子量降低，样品分子链节数减少，可形成的构象数减少，分子内摩擦损耗也相应减少，故 DMS 图中的

tan δ值有所下降。

（3）硬段种类的影响。当 $\alpha = 0.8$ 时；从硬段分别为 TDI 和 MDI 时样品的 DMS 图中发现：由于 MDI 结构对称，两个苯核由一个亚甲基连接，既有利于旋转。又有很强的刚性，所以以 MDI 合成的聚氨酯材料通常较 TDI 合成的材料刚性大，玻璃化温度高。由于 MDI 的内聚能较 TDI 强，硬段聚集的趋势较 TDI 强烈，故 MDI 的样品相分离程度较 TDI 样品大，tan δ 峰比较窄，这对于要求宽温域的阻尼材料而言是不利的。

（4）硬段相对含量的影响。减少扩链剂的用量，相应增加聚醚的用量可以改变软、硬段的相对含量，根据高分子共聚理论：

$$1/T_b = (W_1/t/g1) + (W_2/T_{g2})$$

高聚物玻璃化温度与共聚组分的质量分数成正比，该公式适合多嵌段聚氨酯材料。纯聚醚软段的 T_{gs} 较纯硬段 T_{gh} 低得多，因此随着软段相对含量的提高，样品的 T_g 移向低温。另外，硬段含量的提高，使分子间的氢键作用增强，链间相互滑动时的内摩擦损耗增大，tan δ 相应提高，使材料在 -20 ~ +0℃范围内发挥更好的阻尼作用。此外，硬段含量的提高，还有助于提高材料的附着力和耐海水性。实验结果表明：硬段含量从 18.0% 增至 32.4%，材料的附着力由 1.2 MPa 提高到 1.8MPa，耐海水浸泡 7 天的吸水率由 2.75% 下降到 1.06%。

2. 约束层

（1）杨氏模量对 η 影响。在约束阻尼结构中，除了阻尼层本身的损耗因子（tan δ）对结构的复合损耗因子（η）有很大影响外，约束层材料的杨氏模量对 η 也有较大影响。实验结果表明：适当提高约束层材料的杨氏模量有利于增加 η 值。但是，环氧树脂作为一种非金属材料，其模量是有限的。因此，兼顾施工性并防止涂层应力开裂等因素，可在约束层中加入玻璃纤维或钢丝网进行增强。其中，尤以钢丝网的增强效果最明显，从而，形成一种类似“钢筋混凝土”的结构，既有利于施工和防止涂层开裂，同时还可大幅度提高涂层的阻尼性能。

（2）边界因素对 η 的影响。标准的约束阻尼结构要求底材和约束层之间被阻尼层完全隔离开。但作为涂料在施工中，如果不注意会在阻尼层四周边缘部位产生约束层与底材粘连在一起的现象，即“短路”。“短路”会使涂层

阻尼性能大幅度下降。实验结果发现：“短路”面积超过5%，则阻尼性能将下降35%以上；此外，“短路”还会造成约束层应力集中，产生开裂等不良现象。因此，在阻尼涂料的施工过程中，应尽量避免“短路”现象的产生。

（四）配方设计原理

1. 阻尼屋

阻尼层材料设计的重点应该集中在如何使其在 $-20 \sim +60$℃的温度范围内，损耗因子的平均值高于0.1。通常在提高损耗因子的同时，造成阻尼温域变窄。如何克服这一对矛盾，需要进行大量的理论计算和性能测试。

在聚氨酯阻尼层涂料中，甲组分由当量为1000～2000的，聚醚、$C_{3\sim6}$碳原子的二元醇和多亚甲基多苯基二异氰酸酯、二苯甲烷二异氰酸酯、甲苯二异氰酸酯反应生成；乙组分由 $C_{4\sim6}$ 碳原子的二元醇和鳞片状填料组成；鳞片状填料是甲、乙组分总和的40%～60%。

2. 约束屋

约束层材料设计的重点应该集中在如何使其在 $-20 \sim +60$℃的温度范围内，杨氏模量在 10^9 Pa以上，而且不能出现低温脆性开裂。通常在加入增强剂的同时，需要引入增韧剂。

环氧树脂约束层涂料的组分和参考配方（质量份）如下。

相对分子质量为400～500的环氧树脂	100份
胺值为250～350的聚酰胺树脂	100～150份
聚硫橡胶	30～50份
阻燃剂	100～140份
隔热剂	160～200份
金属网	60～100份

六、技术指标及检测方法

船用阻尼涂料的综合技术要求很高，其主要性能指标和测试方法如表1

－8－1 示。

表 1－8－1　船用阻尼涂料的主要性能指标和测试方法

项目		性能指标	测试方法
复合损耗因子（－10～＋50℃）　≥ 0.1		CB 16406—96	
阻尼层损耗因子（－20～＋60℃）　≥ 0.5		GJB981—90	
毒性		无毒	GJB 11—84
阻燃性（氧指数）　≥		30	GB 2406—80
附着力/MPa　≥		1.8	GB 9286—88
冲击强度/（N·m）		4.9	GB 1732—79
耐海水（6 个月）		无锈蚀、不起泡、不脱落	GB 1703—79
耐盐雾/h　≥		1 000	GB 1771—79
耐 0# 柴油（8 个月）		无锈蚀、不起泡、不脱落	GB 1734—79
密度/（g/cm^3）	阻尼层≤	1.20	GB6750—85
	约束层≤	1.80	
干燥时间/h	阻尼层≤	12	GD 1728—79
	约束层≤	6	

七、隔声及阻燃腻子

（一）隔声、阻燃腻予的作用与应用范围

舰船的动力舱室内空间狭小、管路密布，舱室间的开孔率很高，从而导致高噪声舱室（如主机舱、辅机舱、舵机舱、机电室等）向要求较为安静的舱室（如通讯指挥室、仪表控制室、居住舱室等）的透声、漏声现象十分突出，导致舰船的操纵、控制人员疲劳、烦躁，甚至出现听力下降、注意力不

集中等现象，严重影响舰船的作战效能和乘员的生活、休息。因此研制、开发舰船用隔声、阻燃密封材料，对于有效地减轻舰船内高噪声区对低噪声区的影响，提高舰船舱室的安静性、舒适性，增强其综合作战能力、提高劳动效率，具有十分重要的意义。

（二）分类

随着社会的发展和人民生活水平的提高，要求对噪声污染进行治理的呼声越来越高。隔声技术是一种有效的噪声控制措施。该技术已经广泛应用于建筑、汽车、火车以及其他环境保护领域，取得了显著的经济和社会效益。隔声结构中孔洞的存在，导致透声量增大，成为舰船建造的薄弱环节。在目前已经开发出的隔声密封材料中，绝大部分是高分子材料，它能够以固体复合材料和液体密封材料的形式使用。液体类密封材料多为触变性良好的腻子状，作为舰船用隔声密封材料，它具有施工方便、不受施工部位形状的限制等优点，应用较为广泛。

隔声密封材料因其使用环境的需要，绝大多数属于阻燃型，根据其分散介质的不同可分为溶剂型、水性和无溶剂型三种。

（1）溶剂型隔声密封材料是应用最为广泛的一种，传统的制作方法是将树脂或橡胶溶解于有机溶剂中，再添加各种无机填料及助剂混合而成。生产工艺比较简单，缺点是对环境造成污染。

（2）水性隔声材料具有无毒、安全、不污染环境等优点，随着国际社会对挥发性有机物（VOC）的限制，水性高分子材料作为隔声密封材料的基料，日益受到人们的重视。但是，由于隔声材料的厚度比较大，干燥速度慢、厚涂困难成为制约其发展和应用的关键。

（3）无溶剂型隔声材料是目前发展的趋势。它是采用室温低粘度、双组分树脂，再添加各种无机颜、填料及助剂混合而成。下面以“G－39 舰船用隔声密封材料”为例，作较为全面的叙述。

（三）影响隔声密封材料性能的因素

“G－39 舰船用隔声密封材料”是以双组分环氧树脂为基料，配以阻燃

剂、增塑剂、重质填料、着色颜料和触变剂等材料混合均匀而成。对其性能的影响因素有以下几个方面。

1. 阻燃剂种类的选择

环氧树脂的阻燃有两种方法：即化学阻燃和物理阻燃。化学阻燃是利用含有氯、溴、氮、磷的化合物与环氧树脂进行化学反应，将阻燃元素结合在环氧分子结构上，从而使环氧树脂具有阻燃性。这种阻燃方法的生产成本高，有机物含量大，燃烧时会分解释放出有毒气体，不能用于舰船舱内的阻燃。

物理阻燃是利用添加型阻燃剂在燃烧时产生的大量的卤化氢和水蒸气，从而冲淡氧气和可燃性气体的浓度，达到抑制燃烧和降低燃烧速度的目的。常用的。阻燃剂有：氢氧化铝、三氧化二锑、红磷、硼酸盐及磷酸酯等。考虑到舰船舱内严格的毒性要求，经过反复实验，发现氢氧化铝、三氧化二锑、硼酸锌是比较合适的阻燃体系。如果是白色材料；选 . 用三氧化二锑可以达到事半功倍的效果。

2. 阻燃剂细度及用量的选择

阻燃剂必须达到一定的细度才能发挥出较好的阻燃效果。以氢氧化铝为例，实验结果表明：其细度越细，达到的氧指数越高。从另外方面理解：要达到同样氧指数，阻燃剂的细度越细，其用量越少。以下数据可以说明此理。

细度/μm	2	4	6	8	10	12
氧指数 OI	31	30	29.5	29	28.6	28

3. 增塑剂的选择

环氧树脂的脆性大，需要加入适当的增塑剂对配方体系进行韧性化处理。常用的增塑剂例如邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯、聚硫橡胶等，加入到配方体系中会慢慢地向周围环境迁移，造成舰船舱内空气质量下降。目前，最为有效的方法是在配方中，加人具有内增塑作用的环氧固化剂，例如：低分子量聚酰胺树脂、端氨基聚醚。

4. 重质填料的选择

材料的面密度对材料的隔声量具有很大的影响，根据隔芦，技术的质量

定律：在一定的频率范围内，隔声量随构件面密度的增大而递增。因此，需要在保证材料使用性能的前提下，尽量加大材料的面密度。一些重质填料例如：重晶石粉、云母氧化铁、沉淀硫酸钡等，是隔声材料所经常选用的填料。

（四）配方设计原理

在舰船用隔声密封材料的配方设计中，需要考虑以下几方面因素。

（1）无溶剂树脂体系的选择，最好选用室温固化、双组分树脂体系。

（2）配方体系（尤其是树脂和固化剂）的无毒害化处理。

（3）阻燃剂的合理选择。

（4）重质填料的选用。

（5）树脂与填料、助剂的有机搭配、粘稠度控制等。

（五）技术指标及检测方法

表 1－8－2 为隔声密封材料的技术指标及测试方法。

表 1－8－3　隔声密封材料的技术指标及测试方法

名称	技术指标	测试方法
毒性	无毒	GJB 11—84
氧指数（OI）	≥33	GB 2406—80
隔声量/dB	≥30	GBJ—75—84
耐海水	合格	GB/T 1763—89
耐盐雾/h	≥5000	GB/T 1771—91
耐柴油	合格	GB/T 1734—93

名称	技术指标	测试方法
耐冲击/（N·cm）	490	GB/T1732－93
密度/（g/cm^3）	≥1.6	GB 533－81
剪切强度/MPa	>0.5	GB/T 7124－86

八、舰船用隐身涂料

战争的目的在于“消灭敌人，保存自己”。随着侦察技术的飞速发展，从水下声纳系统、地面、高空侦察机乃至太空侦察卫星构筑的全方位立体侦察体系的建立使得军事设施及武器装备隐身变得日益困难。同时精确打击武备系统的发展，从发现目标到完成打击任务只需很短的时间在几百公里远距离内即可完成。近年来美国正在开发和布置的全球导弹防御系统 NMD，使远程战略导弹进入大气层后也可能被识别和攻击。因此，隐身技术在现代战争中具有非常重要的作用。

隐身技术或叫做目标特征信号控制技术，达到降低或控制武备系统的特征信号使其难以被发现、识别及攻击的目的。隐身技术是一项跨学科（涉及武备设计、材料科学、光电子、电学和声学等）、实用性极强的系统工程。从技术手段上涉及以下多个领域。

（1）外形设计。尽可能减少各种辐射的反射截面。

（2）吸声结构材料及结构设计。使入射波在最短距离内完成衰减和吸收。例如，碳纤维复合结构材料，吸声纳波的消声瓦等。

（3）吸声涂料及涂层设计和涂装技术。

（4）伪装网、红外烟幕、铝箔弹等外延性技术。

武器的特征信号控制主要包括雷达波目标特征信号，声纳波特征信号，红外特征信号（近红外、中远红外），可见光特征信号及其他电磁波特征信号控制。不同的武器系统对这些特征信号控制的要求和重点不尽相同。因此需要采用不同的隐身技术加以解决。飞机目标小，机动性强，背景单一，其

隐身的重点是雷达波和发动机及其排气系统的红外辐射抑制技术及消除噪音的技术。主战坦克，装甲运兵车等兵器所处环境背景复杂，机动性较差，需要可见光——红外隐身、雷达波隐身及其复合一体化技术。水面舰船体积大，外形结构复杂，自身的机动性最差，其雷达波及红外隐身的难度很大。潜艇在作战期间主要潜入水下，关键是对付声纳探测，所以主要是声纳波隐身。

隐身技术与侦察技术是一对矛盾。随着各种侦察和电子通讯系统（信息传递）飞速发展，近 20 多年来隐身技术也不断完善。例如，在 20 世纪 70 年代以前人们主要关注的是可见光和近红外线（0.7～0.9μm），伪装技术主要解决主动发射的红外侦察和夜视仪，而今天热成像技术日趋完善，而对付的主要是中远红外辐射（3～5μm 和 8～14μm 波长两个窗口）。在 80 年代出版的两本有关“特种涂料”中对伪装涂料，尤其是雷达波和可见光及近红外隐身的原理做了详细的叙述，本书不打算重复了。

（一）隐身涂料的技术要求

近 20 年来，先进国家的稳身技术进入工程开发阶段。美国从 20 世纪 50 年代起步，70 年代研制隐形飞机，80 年代起 F－117 战斗机，B－2 隐形轰炸机以及新一代 F－22 等均采用了不同的隐身技术，其中包括隐身涂料。俄罗斯、英国、美国及日本先后开发出“安静型”隐身潜艇并已服役。以色列和法国在水面导弹巡洋舰的雷达波隐身上取得重大突破。而 MIAI，主战坦克，MIB 装甲运兵车等都采用了各种隐身技术，很大程度上降低了雷达波和红外特征信号。国外现代的隐身涂料作为隐身技术的重要组成部分，已经达到如下技术要求。

对不同频率的电磁信号的吸收及辐射率。

（1）30～100 GHz 毫米波的吸收－10～－15dB，而目前向低频段转移到 2～18GHz。

①中红外 3～5μm 波长窗口的辐射率为 0.5～0.9.8～14μm 红外窗口的辐射率为 0.6～0.95。作为红外隐身涂料还必须兼顾可见光迷彩的效果。

②3～30kHz 声纳频率内，吸声系数大于 0.7，损耗因子大于或等于

0.5。其中不同的兵器对频谱的范围要求不同。

（2）降低涂层厚。由于吸波材料性能的限制及所采用的技术决定了目前雷达波吸收涂层的厚度大于 2mm，声纳波涂层厚度大于或等于 3cm，而红外控制辐射涂料的厚度 1～2mm。今后，飞机用的吸收雷达波涂层厚度 < 1mm，毫米波涂层厚度小于或等于 1 mm。

（3）减小涂层比重和涂装量。隐身涂料的涂层属于特种涂层材料，厚度至少 1 mm 以上，最厚的吸声纳波涂层厚达 3cm，单位面积的涂料量十分惊人。而目前普遍采用的吸雷达波材料——铁氧体或晶须材料的密度都大于 $6kg/m^3$，因此涂层的面密度高达 $3kg/m^2$ 以上。因此，开发新型低密度高性能的吸波材料，尽可能降低面密度是隐身涂料的重要技术指标。

（4）实现可见光、近红外、热红外、8μm、3μm 等五波段一体化隐身涂料——多功能隐身涂层

以前对隐身涂料的研制往往是针对不伺波段的隐身要求进行的。但实战面临的多种侦察手段的复合使用。因此，实现隐身涂料的多功能化势在必行。这就涉及到不同涂层材料设计及涂层匹配等技术。目前可见光，近红外的迷彩伪装技术已实用化，进一步将实现可见光，近红外和热红外的一体化，再与吸雷达波涂层进一步匹配。

（5）可行的涂装技术及施工工艺。高固体分及超厚涂装的难度极大。俗话讲“三分涂料，七分施工”非常适用于特种涂层的涂装。这涉及到复杂表面（曲面、垂直面等）的涂装均一性，厚涂层的防应力开裂，附着力等技术难题，都必须注意解决。

（6）满足使用环境对涂料的基本技术要求。

①耐大气老化。

②耐盐雾及海水浸泡（军舰、水陆两栖战车）。

③耐湿热。雷达波隐身涂层对湿气相当敏感。

④耐冷热交替。通常要求 -40～+50℃。

⑤耐柴油，耐酸碱等腐蚀性介质等等。

不同的兵器对常规技术指标均有不同的要求。

（7）还应强调一点是隐身涂料的性能与温度的依赖性很强，尤其是热红外隐身涂料，阻尼涂料等，它们在高温区的性能急剧下降，因此对于不同的

温域使用的隐身涂料的技术指标也有差别，在此不详述了。

（二）雷达隐身涂料的技术原理

雷达隐身涂料的作用首先在于将电磁波转变成其他形式的能量，当它们与雷达波相互作用时，可能发生电导损耗，高频介质损耗，磁滞损耗或转变为热能等方式导致电磁能量发生衰减。这是由吸波剂和粘合剂的性能所决定的。其次可能发生反射的电磁波与进人材料内部的反射波相互叠加后产生干涉而相互抵消，这就与涂层厚度设计有关。因此决定雷达隐身涂料性能的主要因素有如下几条。

1. 吸波材料

现在通用的主要是铁氧体，磁性金属基超细粉复合吸收剂，它们的电磁参数可以满足一定波长范围内的雷达吸收要求，但其密度大，当涂层厚度为 2 mm 时，其面密度为 $5kg/m^2$ 左右。正在发展的高性能吸波材料集中在多晶体铁纤维吸收材料——磁性纤维材料上。它们具有优良的电磁参数及形状各向异性，通过纤维的层状取向排列而发挥其特殊的吸波机制，可实现宽频带内的高吸收率。与此类似的还有磁性碳纤维，氧化锌晶须材料等。它们的面密度小，可达到 $1.5 \sim 2.0kg/m^2$ 的技术要求。

人们寄以厚望的吸波材料是纳米隐身材料，即特征尺寸 0.1 ~ 100nm（$1nm = 10^{-9}m$）的材料，具有优异的吸波性能，宽频带，兼容性好，密度小并可实现薄层涂装的特点，是一种理想的隐身材料。据报道，一种纳米 CoNi 复合材料在 0.1 ~ 18GHz 范围内均大于 6。美国研制一种“超黑粉”纳米吸收剂对雷达波的吸收率达 99%。

2. 涂料成膜物

在雷达波吸收涂料中，其颜基比都比较高，其颜料体积浓度大于 45%。因此人们以前主要注重于成膜物的粘结性及对涂层物理机械性能的影响。事实上，不同结构的成膜物树脂的电磁性能差别很大，从绝缘体到导电聚合物。因此选择适当的吸收剂—树脂组合，控制颜基比可得到不同频带具有高吸收率的涂层。这也是拓宽吸收频带的可行的技术途径。作为成膜物树脂以氯丁橡胶，聚氨酯，环氧聚氨酯或环氧树脂体系为主。

3. 涂层设计及涂层厚度控制

有关书中对微波的干涉与吸收中涂层厚度控制的基本原理做了详细的介绍。事实上通过反射波和透射波的干涉实现其吸收远比理论分析复杂得多。尤其对宽频带的技术要求而言，雷达波的波长由毫米波至分米波的大范围变化的情况下，涂层厚度对波的干涉的控制作用难以体现。随着对薄型和超薄型涂层的要求越来越高，人们的注意力转向寻求高性能的吸收剂及分层结构设计方面上来了。采用对不同频带的雷达波吸收率和反射率不同的涂层构成复合涂层已成为实用的技术选择。

4. 涂层的施工工艺至关重要

尤其是采用复合涂层设计时，在施工中保证层间附着力，涂层厚度均一性，与防锈底漆、面漆或可见光红外迷彩面漆的配套性等系列问题都应妥善解决。

涂层设计中还涉及武器表面的电磁波反射性能的电磁设计。即是说，武器表面不同部位对雷达波的反射率不一样，甚至在静止状态和运动状态也有差别。例如军舰在航行时，处于上下、前后及左右摇摆的复杂运动状态，其表面对雷达波的反射与其静止状态不同，因此在涂装时不必要所有的部位均采用单一的涂层厚度，以及不是所有部位都需要涂装。这涉及非常专业化和复杂的理论分析，在此就不详细介绍了。

（三）热红外隐身涂料

肉眼以及近红外探测仪都是接受光照（日光或探测仪）发射的光被目标吸收后反射回来的光成像后辨识目标的颜色和形状。可见光和近红外隐身至20世纪70到80年代已经发展成相当成熟的迷彩伪装涂料并装备部队。

近年来重点发展的是热红外隐身涂料，它能改变目标热辐射特性或抑制目标的红外特征信号，使兵器和军事设施的红外辐射与背景一致，从而使其难以辨识，也使得红外制导导弹“致盲”失去攻击目标。在中远红外频带集中在3～5μm和8～14μm两个红外“窗口”。

根据Planck黑体辐射方程，M_λ特定发射能（W/m^2）计算公式如下：

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{(e^{hc}/k\lambda T - 1)}\Delta\lambda$$

式中：h——Planck 常数；

c——光速；

k——Boltzman 常数；

T——绝对温度；

λ——波长。

该方程在全波长范围积分后得到 Stefan – Boltzman 方程：

$$W = \alpha T^4$$

式中：α——Stefan – Boltzman 常数。

对于非理想体系总辐射能 W 与辐射率 ε 成正比，其公式如下：

$$W = \alpha\varepsilon T^4$$

式中：ε——辐射率，物体与标准黑体在相同温度下的辐射能之比，其大小为 0 ~ 1（黑体为 1）。

从以上理论分析可以了解到以下几点。

（1）物体的热辐射与温度有关，在不同温度下辐射其强度和频率将改变。

随着温度的增高，辐射率增大并由远红外向近红外区转移。这一点类似于在日光照射下表面吸收一大量的太阳热后温度升高的情况，见图 1 – 8 – 5 为热辐射与波长的关系。

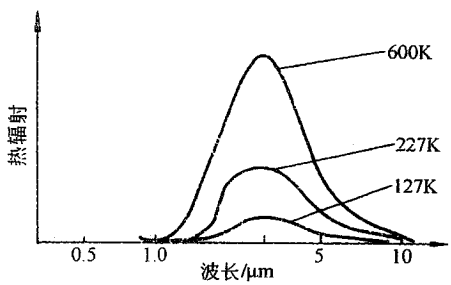


图 1 – 8 – 5　热辐射与波长的关系

（2）物体对太阳热的吸收对于红外辐射的影响。太阳本身是一个很大的辐射体，海平面上太阳光的能量组成粗略可分为三部分：紫外光（200 ~ 400

nm）占5%；可见光（400～760nm）占40%；近红外（720～2500 nm或0.72～2.5 μm）占55%。即是说太阳光的一半以上是近红外（NIR），它们被物体吸收后再以中远红外（3—15Pm）的热辐射散发出来。

（3）不同物质的热辐射ε差别很大。例如铝或镍片的ε在0.05～0.15之间，但是它们又是太阳光的优良反射体。有机材料，如树脂的ε都较高（0.85～0.95）。通常辐射率都是随波长而改变的，理想的灰体几乎不存在。这样对于配方设计提供了广阔的选择余地。

热红外隐身涂料实际上解决在涂层的热反射和热辐射特征之间达到一个平衡点。颜填料的选择取决于它们的热吸收率α_5（在NIR）和热辐射率（TlR）ε。例如下述几种目标即是如此。

（1）高太阳热吸收率达到模糊成像和激光制导的目的。

（2）低太阳热吸收率达到装置降温的目的。例如美国海军海灰船壳漆的太阳热反射率＞70%，坦克用土黄色迷彩反射率大于50%。理想状态可降温8～10℃。

（3）低的辐射率以减少热红外探测和热制导的可能性即隐身的目的。

其中应注意的是深色——要制备黑色和黑灰色的高反射和低辐射的涂料，如果使用炭黑颜料是很困难的。因为炭黑对太阳热吸收率很高。只能采用对NIR透明的有机颜料。

兵器的热辐射除了从环境吸热之外，还有一个重要来源是自身动力和内部人员活动产生的热，必须加以隔离。例如发动机排气管及排出的燃气是特殊需要处理的部位。对于飞机发动机外部一般涂装高性能的绝热涂料，再加上热红外隐身涂料。舰船的排烟管也需进行绝热处理。

下面列举一个浅灰色太阳热反射伪装涂料，其配方如下：

原料名称	用量质量份	原料名称	用量/质量份
TiO_2（20μm）	9.2	滑石粉	10.3
（10μm）	84		

（四）声纳波隐身涂料

1. 声纳波隐身涂料的作用与应用范围

水中兵器（潜艇，水雷、鱼雷等）是利用视觉在水中受到限制来完成其作战使命的。随着科学技术的飞速发展，目前反潜作战使用的探测和分辨设备，在性能上比以往有了很大提高，各种反潜作战平台、反潜作战武器和反潜手段相继出现，形成了水面、水下、空中多位一体的综合反潜体系，使水中兵器赖以隐身的茫茫大海变得越来越“透明”，水中兵器的隐蔽性受到了严重的威胁。在现代高科技战争条件下，暴露即意味着毁灭。因此，为提高水中兵器的隐蔽性和生存能力，隐身技术受到各国海军的高度重视。

早在二次世界大战期间，德国就曾试验在潜艇外壳上粘贴一种名为“Mberich”的共振腔式吸声橡胶（4mm）以提高隐身能力，后因吸声性能受下潜深度和声波频段的限制而一度停滞。战后前苏联首先获得了这一技术，并从20世纪50年代开始进行消声瓦的研究，于60年代中期开始在潜艇上使用，隐身效果相当明显。

国内外在橡胶型消声瓦的研制和应用中都普遍遇到以下几个问题。

（1）施工工艺及工装设备都比较复杂，粘贴质量不易保证。特别是在艇体曲率变化较大的特殊部位（如艏艉部、舵板、围壳等），问题尤为严重。

（2）常因水流冲刷、振动、艇体变形等外界影响因素出现脱落、开胶等问题；消声瓦一旦脱落会造成表面凹凸不平，使其发出的噪声增加，不仅降低本艇的探测能力，而且也增加了被敌方声呐探测到的可能性。

（3）消声瓦太厚，据估算，一艘核潜艇需要上百吨吸声材料，这将对核潜艇的稳定性和操纵性产生不利的影响。

据悉，国外已研制出双组分聚氨酯喷涂型吸声涂料，在某型核潜艇上试验，取得了很好的效果，由于该材料属高度军事机密，细节不详。

总之，当今潜艇吸声材料的研制趋势是向着厚度更薄、吸声性能更好、施工工艺更简便的涂料型方向发展。

2. 声纳波隐身涂料的分类

由于声纳波隐身涂料的厚度需要达到厘米级，因此，传统的溶剂型涂料、水性涂料已经不能满足其施工和应用的要求。通常选用无溶剂、室温固化、双组分聚氨酯作为声纳波隐身涂料的树脂基料。

无溶剂、室温固化、双组分聚氨酯声纳波隐身涂料，按照其施工方法可分为两类，手工刮涂型和机械喷涂型。

手工刮涂型声纳波隐身涂料由甲、乙两组分组成。通常，甲组分由填料、羟基树脂和扩链剂组成，乙组分为聚氨酯预聚体。施工前，将甲、乙组分按照比例搅拌均匀；然后，使用刮刀将涂料逐一刮涂到水中兵器表面。该材料的优点是：体系反应速度慢，可以引入足够的声学结构，吸声性能较好；缺点是：手工刮涂效率低，表面光顺程度较差。

机械喷涂型声纳波隐身涂料也是由甲、乙两组分组成，但甲、乙组分的比例必须服从喷涂设备的参数要求（通常为 1∶1）；此外，为了提高固化速度，需要加入高活性氨基聚醚。该涂料的甲组分由填料、氨基聚醚和扩链剂组成，乙组分为低粘度聚氨酯预聚体。施工时，甲、乙组分被设备吸入、升温、加压后，喷涂在水中兵器表面。该材料的优点是：体系反应速度快，在垂直面、仰面施工时，不会产生流挂现象，涂层外观光顺、均匀；缺点是：不能引入足够的声学结构，吸声性能较手工刮涂型的低，目前正在着手解决。

3，影响声纳波隐身涂料性能的因素

（1）空腔对吸声性能的影响。声波进入含有空腔结构的非均质材料中，由于同时产生了拉压和剪切两种形变，所以比均质材料有更高的声学衰减能力。在涂层中引入空腔通常有以下两种方法：

①化学发泡法：利用聚氨酯与水反应产生气体使涂层内部形成空腔的方法；

②物理添加法：通过添加具有空腔结构的填料的方法来引入空腔。

经过实验发现，采用化学发泡法的发泡程度不易控制。这是因为声纳波隐身涂料的涂装和固化均在水中兵器表面敞开的自由空间中进行，而不是像聚氨酯反应注射成型（RIM）那样在封闭的模具中固化。所以，发泡程度受周围环境的温度、湿度的影响很大，不适合于声纳波隐身涂料对空腔结构的控制。而在物理添加法中，可以从空心碳球、空心环氧微珠、空心聚苯乙烯微珠、空心赛纶微珠、空心酚醛微珠、空心玻璃微珠、电厂粉煤灰空心微珠、空心聚酯微珠等空腔填料中，选择衰减大、声速低的柔性空心填料，来达到吸声的目的。

（2）密度对吸声性能的影响

空心填料的大量引入，势必会造成材料的整体密度下降，出现阻抗失

配。为此，必须设法在材料中加入重质填料。常用的重质填料有重晶石粉、重质碳酸钙、铁红、云母氧化铁、沉淀硫酸钡等。但是重质的含量不能过高，否则，会对水中兵器的稳定性带来负面影响，因此，还要在基料的阻尼性能上做文章。

（3）阻尼对吸声性能的影响。实际上，吸声材料是一种特性阻抗与海水相匹配的阻尼材料。声纳波隐身涂料吸声性能的好坏在很大程度上取决于基料阻尼性能的优劣。

根据水中兵器的工作环境，通常要求吸声材料在 $-30 \sim +70$℃的温域、500 ~ 30 kHz 的频域范围内，具有良好的阻尼、吸声效果。这对材料的分子结构、链段规整性、侧基柔顺性、微相分离性等微观特性，提出了较高的要求。通常，选用含有较多侧基和氢键的聚氨酯或聚脲作为声纳波隐身涂料的树脂基料是比较理想的。此外，选用片状铝粉、石墨粉、云母等片状填料，也能有助于材料阻尼性能的提高。

（4）厚度对吸声性能的影响。一般而言，涂层厚度增加，吸声效果提高。但是，过高的厚度会对水中兵器的总体性能造成负面影响，通常是在满足总体设计要求的前提下，涂层越薄越好。

4. 配方设计原理

在水中兵器声纳波隐身涂料的配方设计中，需要考虑以下九方面因素：①无溶剂树脂体系的选择，最好选用室温快速固化、便于机械化操作的双组分树脂体系；②配方体系（尤其是树脂和填料）的高阻尼处理；③空腔填料的合理选择；④重质填料的选用；⑤树脂与填料、助剂的有机搭配、粘稠度控制等。

第二节　集装箱涂料

随着世界制造加工业的稳步发展，近年来成品货物海运量的增加远远高于原材料货运的增长，使集装箱海运业得以迅速发展。如 1994 年全球集装箱海运量约为 1.25 亿 t，至 1997 年时已超过 1.5 亿 t，年均增幅 7.5%，这

带动了集装箱制造业的发展。见表 1－8－3，为历年世界集装箱产量。

表 1－8－3　历年世界集装箱产量/kt

年度	1994	1995	1996	1997	1998
产量	1140	1375	1270	1395	1460

20 世纪 70 年代产箱中心在日本，80 年代韩国取代日本成为新的生产中心，到 90 年代这个中心已移回中国及东南亚地区。1993 年，中国内地集装箱产量达到 25 万 t，首次位居世界第一，从此取代韩国成为世界最大集装箱制造国。我国近几年集装箱生产量见表 1－8－4。

表 1－8－4　我国近几年集装箱生产量

年度	1995	1996	1997	1998	1999	2000
产量/万只	33.8	43.9	57.1	74.2	110.4	125.0

①为预测产量。

集装箱涂料是造箱的重要原材料之一，与钢材、木地板并称为造箱三大材，集装箱涂料的涂装是造箱工艺的重要一环，与电焊工艺一起被视为集装箱制造的两大关键。2000 年国内集装箱涂料的需求量为 10 万 t。集装箱涂料一直倍受集装箱制造厂的重视，已成为我国海洋涂料的重要的涂料品种。

一、集装箱涂料概述

集装箱是往返于内陆和海上的国际运输工具，因此集装箱涂料不仅要经得起地球上任何一种苛刻的气候条件，还要适应海上和陆上任何一种运输方式的要求。集装箱涂料必须具备下列特性。

（1）有良好的施工性能，车间底漆干燥速率能适合钢板预处理线的施工作业的要求，其他各种类型的涂料具有厚涂性，即一次喷涂干膜能达到 75μm 以上，漆膜修补方便。

（2）漆膜具有良好的耐候性、耐水性、耐温变性。大部分箱业主规定了

集装箱漆膜所承受的温度范围为 -40～70℃。

（3）漆膜的机械性能良好，耐摩擦、耐震动，在 3～5 年内，可保持原来的色泽，超过欧洲 Re3 级的锈蚀面积不大于 10%。

（4）集装箱内侧饰料也应具备耐磨、耐水、耐腐蚀、耐油的特殊性。目前大部分业主均要求内侧涂料取得美国食品药物管理局（FDA）的认可证书，以用于食品运输。

为确保集装箱涂料的质量，国际集装箱标准化委员会对集装箱涂料的鉴定和检测有统一的规定，即通过美国 Konstandt 实验室的 8 个项目 13 种试验，总评分超过 120 分（见表 1-8-5），并取得该实验室的证书后，各集装箱公司才能采用这种配套涂料。

二、主要集装箱涂料品种的性能特点

（一）车间底漆

车间底漆又称保养漆或预处理底漆。是钢板或型板经抛丸除锈后，在流水线上自动涂装的一种底漆。它的作用是对经过抛丸处理的钢材表面进行保护，防止钢材在集装箱制造工艺间隔中产生锈蚀，所以它不同于一般的涂料，与船舶行业使用的车间底漆相比，具有以下几个特点。

表 1-8-5　美国 Konstandt 实验室对集装箱漆测试项目及评分

项目	要求	满分
耐磨性（磨损指数）	15	10
耐腐蚀性（5% NaCl 盐水水喷雾 600 h）		
平均腐蚀/级	10	10
平均起泡/级	10	10
加速曝晒试验（600 h）		
颜色变化/单位	2.0	10
光泽变化/%	0.0	10

项目	要求	满分
柔韧性（12.7cm 轴棒 180°弯曲）		
原来	无裂纹	10
加速曝晒后	无裂纹	10
对底材的附着力（划格法 DIN 53151）		
原来	不脱落	10
加速曝晒后	不脱落	10
耐盐水（浸于 5% NaCl 中 168h，2512）	无变化	10
冲击强度/（N·m）		
原来	6.78	10
加速曝晒后	6.78	10
硬度（铅笔耐划性）	4H	10

品种单一性。ISO 国际标准箱的业主规定车间底漆均为环氧富锌底漆，而不像船舶的车间底漆品种那么多。铁路 10t 箱可使用环氧铁红及丙烯酸车间底漆。近年来，国外许多涂料公司的环氧富锌底漆的粉含量仅为 65%，目的是改善焊接性能并降低“飞溅”，减少“烟雾”。

具有快干性。集装箱厂的钢板预处理多无预热装置，钢板薄，热容量小，车间底漆更具有快干性，常温下（23℃）能在 3～5 分钟内干燥，以适合自动化流水线的连续生产。

（3）车间底漆还必须具有足够的柔韧性，以经受钢材冷加工时的弯曲和冲击。

（4）带车间底漆的钢材焊接时，焊缝的表面和内在质量应不受影响，焊缝的机械强度不受影响。同样，切割时，切割速度不受影响，切割边缘平滑光洁。

（5）漆膜薄。一般只规定 10～15μm。因为集装箱制造均在室内进行，工序防锈能力要求为半个月至一个月。

（6）与环氧、氯化橡胶、乙烯、沥青四种涂料的配套性能良好。

（二）防锈漆

在集装箱涂装工艺中，防锈漆也称作底漆或中间漆。很多集装箱业主为提高箱体的耐腐蚀能力，指定用环氧富锌作为中间漆，与车间底漆是同一种漆，并规定了环氧富锌的总干膜厚为 40μm，其中车间底漆 DFT 为 15μm，箱体组装后，再喷一道 25μmDFT 的环氧富锌底漆。有的集装箱业主考虑到降低成本，同意使用双组分的环氧磷酸锌防锈漆并兼作内面漆。单组分的乙烯磷酸锌底漆和氯化橡胶磷酸锌底漆，亦有少量应用。

（三）内面漆

同环氧防锈漆一样，国际标准集装箱 95% 以上采用聚酰胺固化双组分内面漆，该品种具有优异的耐油性、耐化学介质性，满足了集装箱运输油脂和某些化学物品的需要。集装箱环氧内面漆一般需取得美国食品药物管理局 FDA 的认可。

与外面漆相比，环氧内面漆的施工条件较为恶劣，箱内漆雾飞扬，极易造成漆膜粗糙。应根据季节变化，庚用挥发速度不同的稀释剂，施工环境温度高，使用低挥发性稀释剂，反之亦然，这是内面漆涂装获得优异质量的一个关键。

（四）外面漆

集装箱外面漆多采用厚涂氯化橡胶面漆，或用丙烯酸和乙烯树脂改性，具有以下几个特点。

（1）快干，可低温施工，钢板表面温度高于露点 3℃以上，可在 -10℃低温下施工。

（2）与环氧富锌底漆，环氧中间层配套性好，层间附着力良好。

（3）具有优异的修补性，新旧漆膜可层间互溶，附着牢固，便于维修。

（4）具有优异的耐候、防腐及耐磨性能。

（五）沥青箱底漆

沥青箱底漆分为石油沥青型和煤焦沥青型两大类，多采用石油沥青型或石蜡改性石油沥青型。作为箱底漆需满足以下几个要求。

（1）在常规的喷涂条件下，沥青漆料雾化良好，喷漆流畅，不发生堵塞喷嘴现象。

（2）一次喷漆的干膜厚度必达到 200μm 以上。

（3）漆料粘度受温度影响较小。

（4）容易搅拌，经充分搅拌，可降低粘度。

（5）干漆膜表面呈鱼鳞状，具有弹性，喷漆时漆料不下滴。

三、集装箱涂料的配套

经过多年的实践，目前内外通常采用的集装箱涂料配套体系有以下三类。表 1－8－6 为集装箱涂料的配套体系。

表 1－8－6　集装霜涂料的配套体系

部位 \ 序号		1	2	3
车间底漆		环氧富锌漆		
外侧	底漆	环氧富锌漆	环氧富锌漆	乙烯（或氯化橡胶）漆
	中间漆	环氧漆		
	面漆	氯化橡胶漆	氯化橡胶漆	乙烯（或氯化橡胶）漆
内侧	底漆	环氧富锌漆		乙烯（或氯化橡胶）漆
	面漆	环氧漆	环氧漆	
箱底	底漆（钢结构）	环氧富锌漆	环氧富锌漆	乙烯（或氧化橡胶）漆
	面漆（包括地板）	沥青漆	沥青漆	涂塑地板或沥青漆

其中 1、2 两个配套体系中，箱主一般要求环氧富锌的干膜达到 40μm，

所以它们以优异防锈性能而深受欢迎。以前在配套体系 1 中，环氧中间层和环氧内面漆为两种漆。近年来，很多集装箱涂料商提供的环氧磷酸锌漆既可作中间漆，又是内面漆，使用方便又易于控制漆耗。

而欧洲各家集装箱公司则广泛采用了施工方便、漆膜质量优异美观的配套体系 3。

箱内面漆即为外底漆，箱外底面漆可“湿碰湿”喷涂。如采用注塑地板，可不必喷涂沥青漆，但箱底钢结构的总膜厚需达到 120μm 以上。

四、集装箱涂料的涂装

（一）集装箱制造的涂装工艺流程

集装箱涂料均采用高压无气喷涂，在涂装作业线上进行自动或人工喷漆。

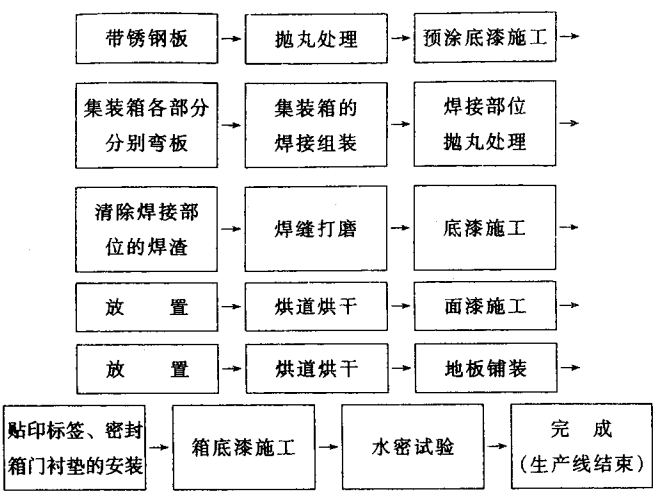
集装箱涂装工艺流程依据有无车间底漆分为以下两大类。

1. 采用车间底漆的工艺流程

其流程如下图所示。

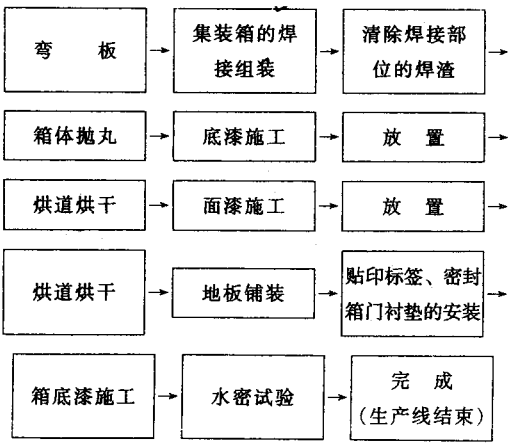
2. 没有车间底漆的工艺流程

其流程如下图所示。



2. 没有车间底漆的工艺流程

其流程如下图所示。



（二）集装箱涂装的质量控制

1. 钢材表面处理

集装处是贯穿整个地球的运输工具，从寒带到热带，从海洋到陆地，集装箱一直处于腐蚀介质之中，其涂层是防止腐蚀的主要手段之一。影响集装箱漆膜寿命的因素很多，表 1－8－7 为集装箱漆膜寿命影响因素。

表 1－8－7　集装箱漆膜寿命影响因素

影响因素	表面处理质量	膜厚（道数）	涂料种类	其他因素
影响程度/%	49.5	19.1	4.9	26.5

由表 1－8－7 可以看出：涂装前钢材表面处理质量是影响漆膜保护性能的最主要因素。

集装箱涂装前表面处理包括：冷轧钢板的除油、磷化；热轧钢板的抛丸除氧化皮、除锈。由于冷轧钢板的价格高，且涂装前处理工艺复杂，目前集装箱制造 95% 采用热轧钢板。经表面处理后，质量主要包括以下两个方面的内容。

（1）钢材表面的清洁度。钢材表面的清洁度必须达到 SIS05590－1967（瑞典工业标准）Sa2.5 级。该等级的文字定义为：非常彻底的喷射或抛射除锈。即钢材表面无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物，任何残留的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑，95％钢材表面受到钢丸冲击，漏出金属本色，检查的方法是采用目测方式，通过与典型样板照片进行比较评定。抛丸表面灰尘沾污程度可用压敏胶带贴粘有灰尘的抛丸后钢材表面，撕下后，贴在白纸上，将此与标准图谱比较，来确定钢材表面灰尘沾污程度的等级（相仿于 ISO8502－3 标准）。

（2）表面粗糙度。抛丸后集装箱钢材表面粗糙度一般在 10～50μm，可用 ISO 表面粗糙度基准样块进行对照检查，也可采用传统的方法测量，即用带有探针和千分表的 ELCOMETER 粗糙度测量仪，不过选点要有代表性，点数要多，以保证测量值的准确性。

需要特别强调的是：抛丸后的粗糙度不是越大越好。虽然随着钢板表面的粗糙化，漆膜的附着力得到提高，但降低了漆膜的有效保护厚度。如涂料的喷涂量是一定的话，粗糙表面上的漆膜有效厚度就要低得多。波峰处，漆膜厚度往往不足，早期锈蚀由此开始，波谷内易截留气泡。要达到规定厚度，势必增加涂料耗量。因此，必须严格控制钢材表面粗糙度。

2. 漆膜质量。漆膜质量通常包括漆膜表面质量和膜厚质量两种。

（1）漆膜表面质量。漆膜表面质量，在一定程度上反映了漆膜的内在质量；另一方面对集装箱外表装饰尤为重要。

对集装箱来说，左右侧板、前端板、门板、顶板（包括内侧）应达到以下要求。

①应无流挂、漏喷、针孔、发白、橘皮起皱、起泡等缺陷。

②表面颜色应与规定颜色一致（以色卡号对照表示）。

③表面光洁，无明显刷痕，无干喷雾的颗粒。

对面箱底部，若用涂塑地板，不喷沥青漆，那么箱底横梁及下衍材等部位应达到以下要求。

①无漏喷、发白、针孔、起泡、起皱等缺陷。

②表面无明显的流挂刷痕。

③表面的颜色与规定一致。

箱底如喷沥青漆，沥青清漆表面应达到以下要求。

①无明显的流挂和刷痕。

②无滴喷、裂缝、剥落等现象。

③表面呈“鱼鳞”起伏状。

（2）膜厚质量。膜厚不仅直接影响涂层的防护效果，同时也是监控涂料消耗量的有效手段。

目前，国际集装箱标准化委员会对涂料的膜厚无统一规定，但各箱主的规定膜厚却十分接近，外侧为 110～130μm，内侧为 65～90μm，箱底沥青漆，底部钢结构 210μm 左右，木地板沥青漆为 150μm 以上。

一般情况下，达到标准膜厚测点的百分数应大于 80%。

3. 涂装中常见的异常现象及解决方法。

表 1－8－8 为涂装中常见的异常现象及解决方法。

表 1－8－8　涂装中常见的异常现象及解决方法

异常现象	可能原因	解决办法
流挂	喷涂操作错误	可能由于施工人员不熟悉无气喷涂，使湿膜厚度远远超过了规定要求
	喷枪距被涂工件太近	通常喷枪应与被涂表面保持 30cm（1ft）的距离
	喷枪行枪角度不对	行枪时喷枪应与被涂表面垂直
	喷枪控制器没有开到最大，过度重叠	喷涂时湿膜间应稍微重叠，行枪结束时应及时关闭喷枪
	过量堆积	除上述可能，检查喷嘴选择是否正确，喷嘴是否损坏
	过量稀释	每种涂料都有规定的粘度、固含量和漆膜厚度，不能在涂料稀释后，仍按规定的漆膜厚度施工。因此，除非确实需要，不能稀释涂料

异常现象	可能原因	解决办法
条痕（鼠尾）	喷嘴选择错误	选用较小的喷嘴
	喷嘴损坏	换用新的喷嘴
	喷涂行程重叠错误	应准确地沿着前面的湿膜进行喷涂
	涂料温度太低	增加压力或加热涂料
	粘度过高	增加压力或稀释涂料
漆膜太厚	喷涂操作错误	见“流挂”现象，选用较小喷嘴、使喷枪与被喷涂表面呈直角
干喷	雾化过度	降低压力
	喷嘴太小	换用较大喷嘴
	操作错误	缩短喷枪与被涂表面的距离，在边缘处瞄准到位后开枪，使喷枪与被涂工件呈直角
漆雾过多	雾化过度	降低压力
	喷枪距被涂表面太远	喷漆时使喷枪与被涂表面的距离保持在 30 cm（1ft）左右
	稀释剂用量太多	只能加入规定量的稀释剂
针孔	漆膜太厚	减少湿膜厚度
	雾化不足	增加压力
橘皮	稀释不够	加入规定量的稀释剂
	涂料温度太低	加热涂料
	不能形成湿膜	检查稀释剂是否正确
起泡	被涂表面有铁锈或油脂	喷涂前彻底脱脂
	被涂表面有水	被涂表面温度需在露点以上
	溶剂在表干涂层下聚集	使用低挥发性溶剂

五、集装箱涂料的发展方向

国际集装箱租箱者协会为保护涂料生产和涂装作业的环境，召开了专门的会议，会上提出了有关水溶性集装箱涂料的开发、生产和应用的建议。目

前，国外多家涂料公司已能提供配套的水溶性集装箱涂料（面漆多为水溶性丙烯酸涂料）。海洋化工研究院八五国家公关项目“水性集装箱涂料”已通过鉴定，并批量试用。

美国 GENSTAR 箱主已指定部分集装箱采用水溶性集装箱配套涂料。我国大连货柜制造有限公司、上海太平货柜制造有限公司均已作了小批量的试用。但水溶性涂料对工艺条件要求较高，如延长烘干时间，须使用不锈钢高压无气喷涂泵等，使其在短期内大量应用受到限制。

第二篇

船舶涂装新技术新工艺

第一章　船舶涂装概述

通常，人们将涂料的涂覆称为涂装。为使涂料良好地附着于被涂的表面，则对被涂表面需要进行认真的表面处理。目前，造船界将船舶的涂料涂覆和涂覆前的表面处理的整个工艺方法与过程以及与此相关的技术上、管理上的全部活动统称为船舶涂装工程。

第一节　船舶涂装的特点

由成千上万吨钢铁和数以千计甚至万计的设备、仪表、构件、设施组成的船舶，它的建造是一个非常复杂的过程。造船不可能像在陆地上建造楼房那样，从地基开始一层层地往上堆砌。这是因为船舶建造需要在陆地上，而建成后需要置于水中，这就决定了造船工艺的特殊性，也带来了船舶涂装与一般钢铁构造物涂装的不同点。另外，船舶的庞大与复杂，也给船舶涂装带来了许多特点。不了解船舶涂装的特点，就不能根据它的特点设计、制造出高质量的船和高质量的涂层，因而就不能很好地保护船舶。

一、船舶涂装贯穿于整个造船过程

造船是一个非常复杂的过程。要经历分段制造与预舾装、船台或坞内合拢、下水、码头舾装与系泊试验、试航等过程。而船舶的涂装则要与整个造船工艺过程相适应。在每一造船工艺阶段中确定其相应的涂装工作内容。从

钢材落料加工前开始，一直到交船，整个造船过程均贯穿着涂装。下图是舶涂装的工艺程序。

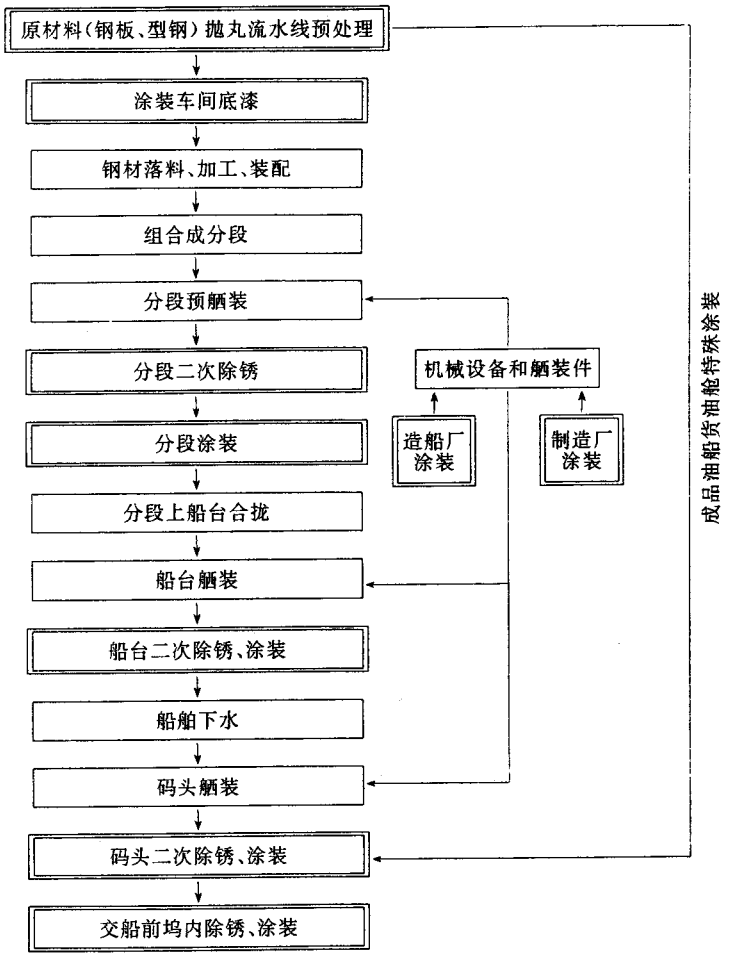


图　船舶涂装工艺程序

从船舶涂装工艺程序图来看，造船的第一项工序都是涂装，且造船的全过程中自始至终贯穿着涂装，所以，造船必须自始至终十分重视涂装工作。

二、涂料的多种性

船舶是一个庞大的活动于海洋之中的构作物，船体的各部位处于各种不

同的腐蚀环境之中（有常浸没于海水之中的船底区，有海水干湿交替、含氧充足的水线区、干舷区，有处于海洋大气之中的甲板、上层建筑外部，还有处于特定腐蚀条件下的各种液舱等），这对于不同部位的涂层提出了不同的要求，由此决定了一艘船的涂料不能单纯地使用一、二种底漆和一、二种面漆，而往往需要几十种涂料加以合理配套。

船舶涂料的多种性决定了施工条件、施工方式、施工工艺和工具设备的不同，需要制定一系列的工艺条件、工艺方法，在不同的工艺阶段进行施工，才能保证其配套的合理、施工的科学和质量的良好。

三、涂装管理的复杂性

由于造船的过程比较长，造船过程中自始至终都贯穿着涂装，加上船舶涂料品种繁多，因此怎样合理地安排涂装作业，做到既使工作量在整个造船过程中分布得较为均匀合理，又不影响造船的其他工种的工作进程；既要保证涂层的厚度和质量，又不造成材料过多的耗费：既要抓紧时机施工、缩短整个造船周期，又要符合涂料的工艺要求以确保涂层质量。需要对涂料的合理应用、仓库贮存、涂层保护、涂装工器具的使用、保养、涂装作业计划安排、劳动力的使用与平衡、涂层质量的检查与验收以及涂装作业的安全与卫生等进行系统的科学管理。

四、涂装安全的重要性

种类繁多的船舶涂料，几乎都含有易燃有毒的有机溶剂，而船舶的涂装作业，往往要在狭小的通风不良甚至几乎是密闭的舱室内进行，且船舶建造过程中处处有明火作业（电焊、气割、火工等），这些作业经常不可避免地与涂装作业在同一时候、相近区域交叉进行，故船舶涂装作业时的燃、爆危险性很大，人员中毒的威胁也很大。所以船舶涂装较之于其他工业产品、钢结构物的涂装，更要有严格的防尘、防毒、防火、防爆的安全措施，做到防患于未然，确保人身和船舶产品的安全。

第二节　船舶涂装工程

船舶涂装的特点和它在造船中的地位，决定了船舶涂装不是单纯的工艺过程，而是一项集设计、工艺、技术、管理于一体的系统工程，该工程包括了以下具体内容。

一、工程设计

船舶涂装工程的设计是解决船舶要达到怎样的防腐、防污和美化装饰的目的，以及通过怎样的工艺过程和技术措施来达到这一目的的。具体则通过以下的设计工作、步步深化来实现：①报价设计；②合同设计；③详细设计；④生产设计。

船舶涂装工程设计的成功与否，直接关系到船舶的质量、造船的成本和造船的周期。因此，务必给予充分的重视。

二、工程施工

船舶涂装工程的施工具体包括以下内容：

（1）钢材表面预处理与涂装车间底漆；

（2）涂装前表面处理（二次除锈与表面清理）；

（3）船舶涂装作业，包括分段涂装、船台涂装、码头涂装、坞内涂装和舾装件涂装等。

三、工程管理

涂装工程管理内容十分丰富，其中包括：

（1）涂装作业环境管理；

（2）涂层质量管理；

（3）涂层膜厚管理；

（4）工程计划管理；

（5）涂装材料管理；

（6）涂装工时管理；

（7）涂装安全管理等等。

科学的涂装工程管理是船舶涂装工程实现优质、高效、低耗、安全的保证。在这方面，我国许多船厂与国外先进水平相比还有较大的差距，需要我们认真花大力气去紧紧赶上。

第三节　船舶涂装工程的现代化

船舶涂装，以往被称为“敲铲油漆”，一向不被人重视。在船厂，敲铲油漆工作没有严格的工艺程序，没有一定的标准，工具设备落后，故质量长期处于相当低的水平。往往，一艘新船刚出厂在海上航行了一二个航次，涂层就剥落，船体开始生锈。甚至船尚未离厂，在码头舾装阶段船体就发生锈蚀，只得再次敲铲油漆。

从 80 年代初开始，我国的造船工业出现了历史性的转折，大连、上海、广州、天津等地区一些大中型船厂纷纷承建出口船舶。随着造船工业的对外开放，国外先进的造船技术和造船管理方式不断得到引进、消化、吸收，中国的造船工业开始了腾飞。在船舶涂装领域，落后的“敲铲油漆；受到了重大冲击，这种原始、落后的生产方式再也维持不下去了。船舶涂装的新技术、新工艺和新的设计、生产和管理模式不断地改造与取代大变革：

（1）钢铁原材料预处理和涂装车间底漆的新工艺获得普遍应用；

（2）以室内喷丸除锈和动力工具除锈代替了原始落后的手工敲铲除锈；

（3）涂装工作的气候条件即环境温度、湿度、露点等获得重视，被列为重要管理项目；

（4）国外先进的除锈标准、涂装工作标准和质量标准不断为我所用，国

内相应的标准纷纷建立；

（5）国外各种新型的高性能涂料不断受到应用，国内相应的涂料品种相继诞生，船舶涂料行业亦发生重大转机，技术引进和合资生产获得重大进展，

（6）各种先进的涂装工具和检测工具日益获得广泛应用；

（7）先进的设计技术、生产技术、管理方式不断获得应用，并结合我国的实际情况逐步得到发展提高。

所有这些重大变革，都是为了确保船舶的涂装质量、延长船舶的使用寿命、提高船舶的使用价值。同时也为大幅度缩短船舶的建造周期在船舶涂装领域里奠定了结实的基础。

这些变革和发展，将我国的船舶涂装技术和涂装质量与国外先进技术、优良的质量之间的差距大大缩短，我国新造船舶的涂装质量受到了国内外船东的首肯与好评。

但是，我国的船舶涂装和我国的造船行业一样，还存在着严重的效率低、效益差的问题。其原因是多方面的，主要原因是设计与生产管理体制及模式与现代化造船模式不相适应”需要进一步的变革。而船舶涂装工程的现代化，则还需要在以下方面切切实实下功夫：

（1）大型的涂装设施，如钢材预处理流水线、室内涂装工场，应提高其工作效率和使用率，缩短设备投资的回收周期：

（2）建立系统、完整、科学的涂装设计、施工、质量管理、物

（3）严格涂装作业的计划，在造船工程计划中应确立涂装作业周期应有的地位；

（4）广泛应用电子计算机来辅助经营、设计（尤其是涂装生产设计）、工程计划、材料管理和工时管理；

（5）改进涂装设计、生产体制，以适应现代化造船生产模式，大幅度提高生产效率和材料利用率；

（6）全面推进造船生产设计和涂装生产设计，真正实现“壳；—舾、涂”一体化生产方式，以求大幅度提高工时效率和降低物耗；

（7）进一步加强涂装安全管理和涂装工人的个体劳动保护，杜绝涂装作业的事故，防止职业病产生。