船用玻璃钢/ 复合材料夹层结构中的泡沫芯材

曹明法 胡 培

摘 要 回顾了船用玻璃钢/ 复合材料夹层结构泡沫芯材的历史, 介绍了夹层结构的工作原理及优点, 泡沫芯材的性能, 泡沫芯材的加工以及使用, 泡沫芯材与巴萨木和蜂窝之间的对比。

关键词 玻璃钢 复合材料 泡沫芯材

1 结构泡沫芯材的历史回顾

玻璃钢/ 复合材料(FRP/ CM)中常用的泡沫芯材有聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚氨酯(PUR)、丙烯腈- 苯乙烯(SAN)、聚醚酰亚胺(PEI)及聚甲基丙烯酰亚胺 (PMI) 等泡沫, 其中 PS 和 PUR 泡沫通常仅作为浮力材料, 而不是结构用途。目前 PVC 泡沫已几乎完全代替 PUR 泡沫而作为结构芯材, 只是在一些现场发泡的结构中除外。

严格意义上讲, 第 1 种用在承载构件夹层结构中的结构泡沫芯材是使用异氰酸酯改性的 PVC 泡沫, 或称交联 PVC。第 1 个采用 PVC 泡沫夹芯的夹层结构是保温隔热车厢。交联 PVC 的生产工艺是由德国人林德曼在 20 世纪 30 年代后期发明的。二次大战以后法国将该工艺列入战争赔偿中, 由克勒贝尔蕾洛雷特塑料公司(Kleber Renolit)开始生产 Klegecell 交联 PVC 泡沫, 主要是一些用在保温隔热车厢中的低密度产品。

20 世纪 50~ 60 年代, 克勒贝尔蕾洛雷特塑料公司给几家欧洲公司发放了 PVC 泡沫的生产许可证。另外 2 家美国公司, B. F 歌德雷奇(B. F Goodrich)和佳士迈威(Johns- Manville)也买到了许可证开始生产, 但是几年以后就停产。当所有的生产许可证都过期以后, 交联 PVC 的生产工艺过程转为公开。进入 20 世纪 70 年代以后, 多数原来的欧洲许可生产的厂家也已停产。目前 2 个主要的生产厂家是戴博(Diab)公司的 Divinycell 和 Klegecell 系列PVC 泡沫及爱瑞柯斯(Airex)公司的 Herex 系列 PVC 泡沫。

20 世纪 40 年代后期, 林德曼使用高压气体作为发泡剂, 制造出未经过改性的 PVC 泡沫, 也叫线性 PVC 泡沫。

英国于 1943 年首先制成聚苯乙烯泡沫塑料, 1944 年美国道化学有限公司用挤出法大批量生产聚苯乙烯泡沫塑料。

第二次世界大战期间, 德国拜尔的试验人员对二异氰酸酯及羟基化合物的反应进行研究, 制得了 PUR 硬质泡沫塑料、涂料和粘合剂。1952 年, 拜尔公司报道了软质聚氨酯泡沫塑料的研究成果。

1993 年, 加拿大的 ATC 公司开始生产 SAN 泡沫。其制造工艺和线性 PVC 相似。

PMI 泡沫是由德国罗姆(Rohm)公司于 1966 年首先采用丙烯腈、甲基丙烯腈、丙烯酰胺和甲基丙烯酸酯热塑性树脂在 180 ℃下发泡并交联制作聚甲基丙烯酰亚胺泡沫的技术, 接着日本的积水化学公司于 1967 年使用辐射交联方法制作聚甲基丙烯酰亚胺泡沫。

2 夹层结构的工作原理及优点

夹层结构一般是由上面板、上面板与芯材的粘结层、芯材、下面板与芯材的粘结层以及下面板所构成, 这 5 个要素组成了 1 个整体的夹层结构。夹层结构传递荷载的方式类似于工字梁, 见图 1。上下面板(翼板) 主要承受由弯矩引起的面内拉压应力和面内剪应力, 而芯材(腹板) 主要承受由横向力产生的剪应力, 见图 2。

作为孔隙材料, 芯材可以起到减轻结构重量, 增加结构刚度, 提高结构强度等作用。为了使夹层结构的各要素能协同承载, 面板与芯材之间的粘接层必须能传递荷载, 因此至少应具备和芯材一样的强度。通常, 如果加载以后, 夹层结构的芯材发生破

作者介绍: 曹明法现工作于上海 708 研究所 1 室, 高级工程师; 胡培现工作于德固赛太平洋有限公司上海代表处。

收稿日期: 2004- 01- 14

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

坏,其破坏位置一般位于粘接层下面的芯材部分,因为粘接层芯材表面的孔隙中由于填充了胶粘剂/树脂,提高了粘接层泡沫的强度。选择正确的胶粘剂对夹层结构的强度也有非常重要的意义,通常在选择胶粘剂的时候除了强度以外,还需要考虑使用温度、烟雾条件及其与芯材和面板材料的兼容性。如果选择与面板材料共固化,则胶粘剂或胶膜的固化条件需要与面板的共固化条件相一致。

表 1 中的结构构造是常见的 FRP 船舶中的铺层设计。可以看出,在弯曲刚度相近的情况下,夹层结构的重量比非夹层结构减轻很多。

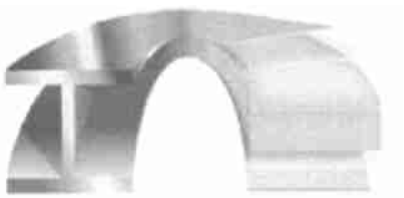

图 1 工字梁和夹层结构的对比

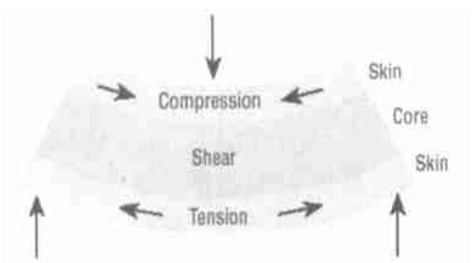

图 2 夹层结构对称简支梁的弯曲

表 **1** 夹层结构及非夹层结构的重量对比

结构构造	质量/(kg/m²)
夹层结构: 一层 815g/m² 的无捻粗纱布 一层 450g/m² 的短切纤维毡 12.7mm 厚度 60kg/m³PVC 泡沫芯材 一层 450g/m² 的短切纤维毡 一层 815g/m² 的无捻粗纱布	7.47
非夹层结构: 七层 815g/m² 的无捻粗纱布 六层 450g/m² 的短切纤维毡	20.90

泡沫夹层结构的优点还有:良好的隔热和隔音性能、抗冲击损伤性能及施工简便性等。在夹层结构中,由于芯材是孔隙材料,整个夹层结构的导热系数和 R 值均比非夹层结构低。由于层合板的层数减少,降低了铺层制作成型的工作量,同时因为夹层结构的刚度较高,减少了加筋的数量,这有利于冲击荷载的扩散。此外,孔隙芯材还能降低船舶航行中的噪声。

3 泡沫芯材的性能和应用

对于芯材,除了剪切模量和强度以外,还需考虑材料的其他性能特点。压缩强度与承受局部荷载的性能相关,这种局部荷载包括工具的坠落、拖船和吊船时由拖柱、带缆桩和吊环等产生的局部荷载。图 3 和图 4 表示了不同泡沫芯材的剪切模量和剪切强度,图 5 为几种常见泡沫芯材的压缩强度。由于泡沫材料是孔隙塑料,还需要根据设计夹层构件的温度要求,参考泡沫的热变形温度来选择适当的泡沫芯材。常见泡沫的热变形温度参见图 6。

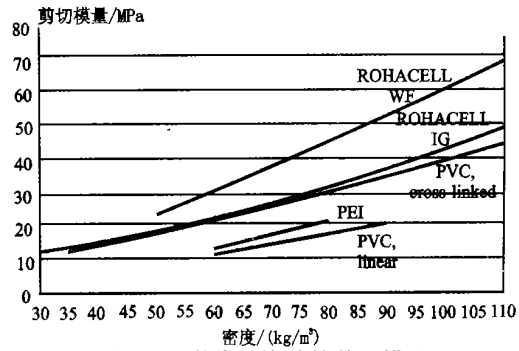

图 3 几种常见泡沫的剪切模量

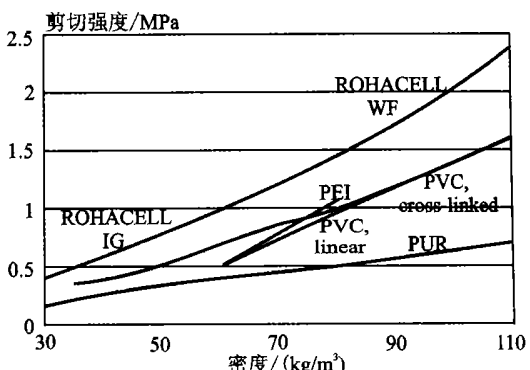

图 4 几种常见泡沫的剪切强度

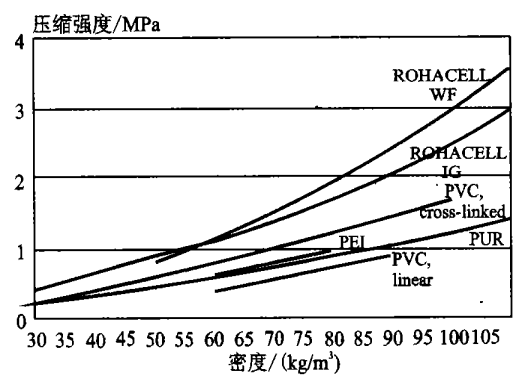

图 5 几种常见泡沫的压缩强度

交联 PVC 泡沫。这种泡沫是由热塑性的 PVC 和交联热固性聚氨酯组成,通常简称交联 PVC 泡沫,其主要产品型号为 Divinycell、Klegecell 以及 Herex C。交联 PVC 的强度和刚度比线性 PVC 的高,但是韧性要差。交联 PVC 泡沫的热稳定温度为 120℃。所以在和环氧预浸料共同使用时,需要注意 PVC 的热蠕变性能。使用温度范围为 - 240℃~ +

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

80℃,并且能够耐多种化学物质腐蚀。尽管 PVC 泡沫是可燃材料,但阻燃型的 PVC 泡沫可用于有严格防火要求的结构中,例如列车车厢等。但是需要注意的是 PVC 在燃烧以后,会产生 HCl。PVC 泡沫耐苯,所以能够和聚酯树脂共同使用。PVC 泡沫主要用在一些不需要压力罐的工艺中。选择固化工艺方法时,应虑及 PVC 泡沫在温度升高时会释放气体,在采用 RTM 工艺时需要注意。交联 PVC 泡沫通常用于船底、舷部、甲板、舱壁及上层建筑中。主要厂商有 Airex 和 Diab 公司,有多种不同的型号和密度可供选择。

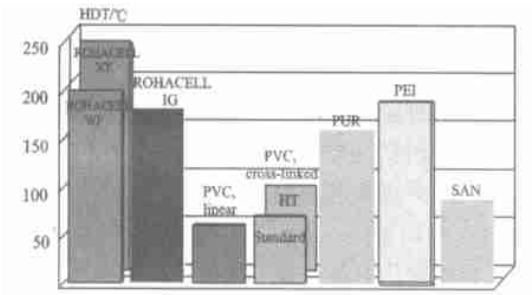

图 6 几种常见泡沫的热变形温度

线性 PVC 泡沫。这类泡沫具有高的韧性、良好的抗冲击性能、能量吸收性能和耐疲劳性能。线性 PVC 泡沫的强度和刚度相对交联 PVC 来讲要低。在施工过程中需要注意的是,树脂中的苯会渗透到泡沫里面,使树脂固化不完全,同时引起泡沫降解。这种泡沫通常用于船体受冲击荷载比较大的部位,例如船底和舭舷部。目前主要产品是 Airex 公司的 Airex R 63 系列。

PS 泡沫。曾广泛用在船舶、冲浪板制造行业。虽然其具有质量轻(40kg/ m^3),成本低,易于机械加工等主要优点,但因力学性能差,很少在高性能船舶结构构件中使用。另外,这种泡沫不能和聚酯树脂同时使用,因为树脂中含有的苯会降解泡沫。

PUR 泡沫。与其他泡沫相比,其力学性能一般,树脂/芯材界面易产生老化,从而导致面板剥离。作为结构材料使用时,常用作层合板的纵、横桁材或加强筋之芯材。有时 PUR 泡沫也能用于受载荷较小的夹层板中,起到隔热或隔音的作用。该类泡沫的使用温度是 150℃左右,吸声性能良好,其成形非常简单,但是机械加工过程中易碎或掉渣。PUR 泡沫价格相对便宜,发泡工艺也比较简单,采用液体发泡,国内国外有众多的生产厂商。

SAN 泡沫。它属于热塑性材料,如加拿大 ATC 公司生产的 Corecell 泡沫,主要是针对船舶市场而开发的。发泡制作工艺与线性 PVC 的工艺基本相同。性能也和线性 PVC 基本相同,热稳定性能比线性 PVC 好,相当于普通交联 PVC。大多数情况下,在船舶结构中可以用 SAN 泡沫代替线性 PVC 泡沫。

PEI 泡沫。由聚醚酰亚胺/聚醚砜发泡而成,具有很高的使用温度和良好的防火性能,不过其价位相对较高。但是这种泡沫可以在兼有结构要求和防火要求的部位使用,其使用温度为 - 194℃~ + 180℃。由于能满足严格的防火阻燃要求,适合在飞机和列车内使用。目前市场上有 Airex 公司的 Airex R82 之 PEI 泡沫。

PMI 泡沫。在相同密度的条件下,PMI 是强度和刚度最高的泡沫材料。其高温下耐蠕变性能使得该泡沫能够适用高温固化的树脂和预浸料。PMI 泡沫经适当的高温处理以后,能满足 190℃的固化工艺对泡沫尺寸稳定性的要求,适用于环氧或 BMI 树脂共固化的夹层结构构件中。PMI 泡沫采用固体发泡工艺制作,为孔隙基本一致、均匀的 100% 闭孔泡沫。目前市场上有德国德固赛(Degussa)公司生产的 ROHACELL 和日本积水化学公司生产的 FORMAC 之 PMI 泡沫。

4 泡沫芯材的加工

机械加工泡沫芯材。大多数泡沫芯材可以使用木工工具加工或成形,包括带锯,车削,穿孔,打磨和仿形。在切割过程中,因为材料的导热系数低,高密度泡沫的给进速度应略低一些,否则材料会发热,甚至烧焦。在加工泡沫以前,最好先和制造厂家联络,因为每种泡沫的性能都有不同的特点。加工泡沫材料时,使用的锯条要求相邻的锯齿拌开,这样在锯切过程中,通过锯齿带出切割过程中产生的锯屑,然后用真空装置吸除。

特殊分格板。对于不同的用途,泡沫芯材的厂家可以提供各种不同的分格板,满足各种夹层结构外形的需要。最常见的泡沫分格板如图 7 所示。其一面用玻璃纤维网格粘接,泡沫切成 2.54cm × 2.54 cm 的正方形小块,这样泡沫板就可以自由变形. 另外一种是 2 面切割,或 3 个方向切割。泡沫还是切割成 2.54cm × 2.54cm 的正方形小块,但是切割的深度是整个厚度的 2/3,参见图 8。这样泡沫板芯材有了一定的自由变形能力,但切割的主要目的是为了使树脂流动,且手糊过程中排出气体。此外一般厂家还可以提供表面有沟槽的泡沫芯材,参见图 9。表面沟槽的深度一般为 3mm ,在面板相对较厚情

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

况下,用作真空注射过程中的树脂流动通道。

5 泡沫芯材的使用

材料的准备。泡沫材料必须在干燥的环境下保存,否则会影响其与面板的粘接。同时,对于PMI泡沫应予以特别的注意,因为PMI泡沫在吸水后,热蠕变性能会下降。泡沫上的灰尘应使用真空吸尘器吸除,或用压缩空气吹除,但要记住,千万不能用水或其他的液体冲洗。冲洗的结果只能使灰尘进入泡沫表面的开孔中。某些强烈的溶剂(例如丙酮)还有可能降解表面的泡沫材料,降低芯材与面板的粘接强度。清洁干净的泡沫表面与面板粘接后,一般其粘接强度不会出什么问题。

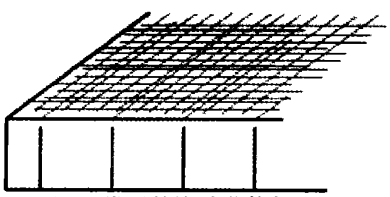

图7 常见的泡沫分格板之一

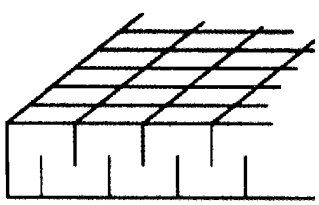

图8 泡沫分格板之二

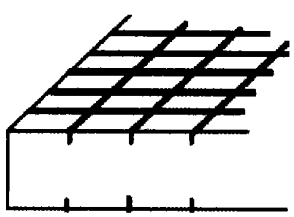

图9 有沟槽的泡沫芯材

FRP泡沫夹层板的制作。泡沫几乎适用于所有的FRP成型制作工艺。复合材料夹层结构的主要成型工艺有手糊/喷射成型,真空袋/注射成型及预浸料/热压罐成型等。

在手糊/喷射工艺中,芯材与面板之间的粘接非常重要。一般常见的船舶泡沫夹层板依次由胶衣层,短切毡层,外面板FRP铺层,泡沫芯材和内面板FRP铺层。必须注意的是在内外面板与泡沫之间,需要加上一层特别的粘接基层,将泡沫与面板材料粘接。材料是CBA(Core Bond Adhesive,例如Divilette, Corebond, Baltekbond等)或富树脂的CSM(短切毡)。CSM的最小厚度为225g/m^2,树脂与纤维的重量比为3∶1左右。CSM浸润树脂以后,在泡沫表面涂覆与层合板相同的树脂,以填充泡沫表面的开孔,然后埋入CSM中。泡沫芯材埋入CSM或CBA的过程可以使用真空袋辅助均匀加压。

在使用真空袋的工艺中,如果泡沫芯材是有切口的分格板,在加压以后,泡沫均匀地压入粘接基层中,树脂或CBA就填入泡沫切口。大多数真空袋工艺的过程是:在底部面板铺层的基础上,先加泡沫粘接基层,再铺设泡沫夹层,然后使用真空袋将泡沫压入粘接基层中。当采用真空辅助成型工艺时,则需要在泡沫上面覆盖一层剥离层,剥离层外面是透气毡,透气毡的外面才是真空袋膜。剥离层常常采用一层薄的尼龙膜,而透气毡的作用是使真空压力能均匀施压在泡沫的表面。

另外一种能确保泡沫芯材的切口被全部填充的方法是使用树脂注射工艺。其工艺过程为:先将未浸胶的玻璃纤维和芯材铺设在模具中,再使用真空袋密封。待抽真空以后,注入树脂,浸润纤维和芯材。通常将树脂分散传递到构件各个部位的方法是利用泡沫芯材表面的沟槽或切口,来引导树脂的流动。采用这种工艺方法制作的夹层结构具有纤维含量高、铺层时间不受限制、不需要手糊树脂并进行压实等优点。

另外一种高端的工艺过程是预浸料/热压罐或真空袋成型。由于PVC泡沫通常的固化温度不超过80℃,在加温加压以后,泡沫孔隙中的气体会释放出来,从而破坏芯材与面板之间的粘接。但如果PVC泡沫经过特殊的热处理,则可以达到120℃、0.1MPa以上,例如Divinycell HT, Klegecell TR, 和Airlite/Herex C71,而且热处理还会提高泡沫的热尺寸稳定性,即泡沫的热蠕变性能。

根据树脂或预浸料的固化温度要求,表2中列出了常见的树脂和预浸料适用的泡沫类型。

表2 不同树脂和预浸料适用的泡沫

树脂/预浸料	温度/℃	压力/MPa	适用泡沫
聚酯	室温	–	各种泡沫
环氧	室温	–	各种泡沫
低压固化环氧预浸料	> 80	–	PVC(高温),PEI,PMI
标准环氧预浸料	125~175	0.3~0.7	PEI,PMI
BMI树脂	190	0.7	PMI

6 泡沫、巴萨木和蜂窝之间的对比

多年以来,船舶制造中使用的芯材是巴萨(Balsa)轻木,更多情况下也采用普通的 (下转第19页)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

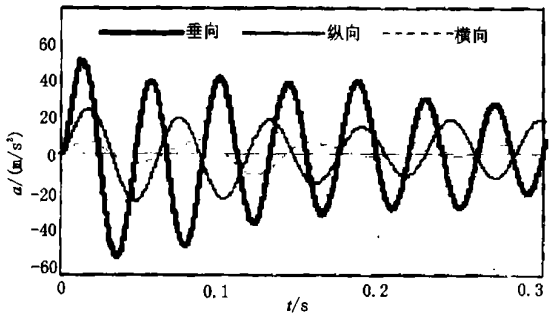

图 7 柴油机冲击的加速度响应

图 8 为在冲击作用下, 有无管系时柴油机垂向位移的对比, 两者的最大值基本接近, 但是在管系的作用下, 隔振系统的刚度提高, 固有频率增大, 响应波动的时间短, 在阻尼的作用下衰减更快一些。因此在考虑隔振系统的抗冲击性能时, 除了要考虑支撑外, 还应注意其它非支撑因素可能对抗冲击性能产生的影响。在实际工程中, 在设备与机座之间连接的管系必须安装挠性接管, 以减少管系对隔振系统固有特性的影响, 并允许设备与机座之间产生一定的弹性变形, 从而减少冲击作用下管系的破坏, 提高隔振系统的抗冲击性能。

5 结论

直接积分法的算法原理决定了它特别适合于求解双层隔振系统的振动和冲击响应, 算法程序简单、易于编制。

由于机组受到基础的冲击时间很短, 系统的最大响应通常发生在冲击结束后, 冲击响应会在阻尼的作用下衰减, 其速度取决于阻尼的大小, 系统阻尼在双层系统抗冲击中起到了良好的作用。

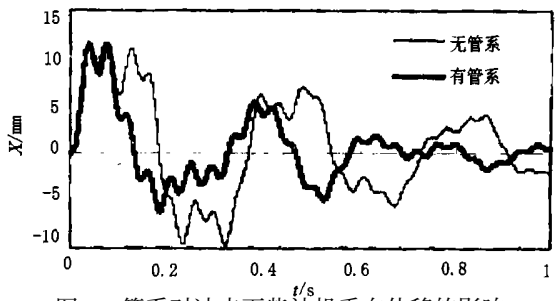

图 8 管系对冲击下柴油机垂向位移的影响

在考虑隔振系统的振动和抗冲击性能时, 除了要考虑支撑外, 还应注意其它非支撑因素可能产生的影响。例如管系对隔振系统的抗冲击性能有明显的影响, 其作用相当于增加了隔振器的刚度。

参考文献

1 庞剑, 严济宽, 沈荣瀛. 具有刚度非线性双层隔离系统的冲击响应. 武汉造船, 1993(5)

2 Cyril M Harris, Charls E Crede. Shock and Vibration Handbook Second Edition. McGraw-Hill Book Company, 1976

3 J Edward Alexander. Nonlinear System Mode Superpostion Given a Prescribed Shock Response Spectrum Imput. IMAGXX: A Conference on Structure Dynamics, 2002

4 刘永明, 沈荣瀛, 严济宽. 多层隔振系统冲击响应研究. 噪声与振动控制, 1996(3)

5 郑兆昌, 丁奎元. 机械振动(中册) 北京: 机械工业出版社, 1986

6 沈荣瀛, 卢峥. MTU 柴油机发电机组的隔振装置固有特性分析. 噪声与振动控制, 1994(3)

(上接第 6 页)

木胶合板。这类材料相对成本较低, 具有很高的压缩强度, 但是比泡沫要重, 一般密度都大于 100kg/m^3, 而且容易吸水, 最终腐烂。和 Balsa 相比, 泡沫芯材轻, 吸水少, 耐腐蚀。泡沫的疲劳性能和耐久性也比 Balsa 好。但是有些情况下, 例如局部荷载很高或交叉接头的位置, 例如引擎安装处或楔子周围, Balsa 要优于泡沫材料。如果使用高密度泡沫, 价格相对 Balsa 要高很多。

蜂窝材料例如 Nomex(芳纶纸和酚醛树脂) 和铝蜂窝常用在航空领域, 因为它们具有高强度、高温稳定性和轻质的特点。但是蜂窝在船舶制造中存在许多缺点, 蜂窝和面板的粘接接触面积相对较小, 抗疲劳性能较差, 蜂窝的开孔容易渗水, 导致芯材和面板的粘接破坏等等。

7 结论

泡沫芯材在造船行业的应用越来越普遍, 泡沫芯材有各种各样不同的类型、密度和使用方法。在使用、设计泡沫芯材夹层结构的过程中, 芯材的选择非常关键。必须考虑到使用环境、固化方法、荷载要求和综合成本等诸多因素。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net