

GLARE 层板性能研究进展

陈琪, 关志东, 黎增山

北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191

摘要 GLARE 层板是高级飞行器结构中使用新型纤维金属层板, 它的使用给航空工业材料发展注入新的血液。本文回顾了纤维金属层板的发展历程, 介绍了 GLARE 层板种类及制造方法, 着重分析了 GLARE 层板的基本力学性能、抗冲击性能、挤压性能、疲劳性能、缺口剩余强度和耐久性能, 检测和修理的相关内容亦有所介绍。总结已有的 GLARE 层板相关性能研究进展, 提出了 GLARE 层板研究领域需要解决和关注的若干问题, 包括基本力学性能实验、裂纹增长预测与模拟、高温高湿情况下损伤处剩余强度研究等。

关键词 GLARE 层板; 基本力学性能; 冲击; 挤压; 疲劳; 缺口剩余强度; 耐久性

中图分类号 V257

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.07.008

Review of GLARE Technology

CHEN Qi, GUAN Zhidong, LI Zengshan

School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract GLARE (glass-reinforced aluminum laminate) is a new kind of hybrid materials, used in advanced aircraft. This paper gives a brief overview of the history of fiber metal laminates, the manufacturing processes of GLARE and commercially available GLARE grades. Special attention of the review is paid to the following areas, mechanical properties, impact resistance, bearing resistance, fatigue resistance, residual strength, environment durability, inspection and repair of GLARE. Some urgent research topics are pointed out, including the mechanical tests, the modeling of crack growth and the residual strength of GLARE under hygrothermal environment.

Keywords GLARE laminates; mechanical properties; impact; bearing; fatigue; residual strength; durability

0 引言

玻璃纤维-铝层板(laminate)是荷兰代夫特科技大学和荷兰国家航空航天实验室共同的研究成果^[1]。它是一系列板组成的层压板族, 由厚度为 0.3~0.5mm 的高强 2024-T3 铝合金薄板和厚度为 0.2~0.3mm 的玻璃纤维预浸料(单向或多向玻璃纤维环氧树脂板)交替铺成, 最后在热压罐中热压成形。

GLARE 层板在 1988 年和 1989 年得到广泛认可, 在德国的空客 A330/340 机身测试; 1995 年 10 月, 第 1 次在飞行器中使用是在美国空军基地的一架银河系 C5-A 中作为胶结修补片^[1]; 第 1 次应用在民用飞机是波音 B777 的货舱地板^[2]和导弹手利尔喷气机 125; 第 1 次大规模应用是在空客 A380-800 机身上前段和后段蒙皮、水平尾翼和垂直尾翼前缘^[3-5]。

GLARE 层板独特的构成方式决定了它既不同于以往的复合材料也不同于传统的金属材料, 它既有金属板的特性, 又有玻璃纤维的优点: “桥接”机理使其具有优异的抗疲劳特性; 玻璃纤维的存在使其缺口强度保持较高水平; 金属板的抗湿性能使 GLARE 层板具有良好的抗湿热性能; 玻璃纤维层的抗腐蚀性, 使其耐腐蚀性能不容小觑; 同样厚度的板材, GLARE 层板比同体积铝板减重可达 15%~30%; 除此之外, GLARE 层板可以制成半成品, 再通过热压罐固化成大型构件, 比如一个带有共固化补强处和加筋处的大曲度板; 拼接技术可以使 GLARE 层板的大板一次成形。改变玻璃纤维预浸料、层板类型和厚度、堆叠顺序、纤维方向、表面预处理技术等, 使 GLARE 层板广泛应用于各种环境条件^[6]。

收稿日期: 2012-12-19; 修回日期: 2013-01-16

作者简介: 陈琪, 博士研究生, 研究方向为飞机复合材料结构设计, 电子信箱: chq@ase.buaa.edu.cn; 关志东 (通信作者), 教授, 研究方向为复合材料结构损伤容限, 复合材料力学, 电子信箱: zdguan@buaa.edu.cn

表 3 GLARE 层板的压缩性能
Table 3 Compressive properties of GLARE laminates

压缩性能	测试方向	GLARE1		GLARE2		GLARE3		GLARE4		GLARE5	2024-T3 (1.6mm 厚)
		2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	3/2	2/1	
0.2%压缩屈服强度/MPa	纵向	447	424	390	414	319	309	349	365	283	304
	横向	427	403	253	236	318	306	299	285	280	345
压缩弹性模量/GPa	纵向	63	67	69	67	63	60	62	60	61	74
	横向	56	51	56	52	62	60	57	54	61	74

表 4 GLARE 层板的剪切性能
Table 4 In-plane shear properties of GLARE laminates

剪切性能	测试方向	GLARE 4-5/4	GLARE 4-3/2	GLARE 4-2/1	Al 2024-T3
剪切屈服强 度/MPa	纵向	101	105	119	207
	横向	98	107	117	207
剪切模量 /GPa	纵向	13.67	15.26	15.77	28
	横向	13.84	14.33	17.50	28

GLARE 层板的剪切性能还需要进一步的研究。

3.4 应力-应变曲线

GLARE 层板的应力-应变曲线具有双线性特征, Hagenbeek 等^[13]详细介绍了适用于所有单轴复合材料板,尤其是单轴 GLARE 层板的应力-应变关系计算工具——SSCP (Stress-Strain Calculation Program)。该方法考虑了层板金属层的塑性,固化后由于组分热胀系数不同产生的内应力,以及预紧力对层板的作用。施加预紧力情况下考虑了 Bauschinger 效应,即塑性变形的逆效应。该方法既简单又精确地给出了纤维金属板的应力-应变曲线。使用该方法所得曲线与实验所得曲线对比如图 3 所示。

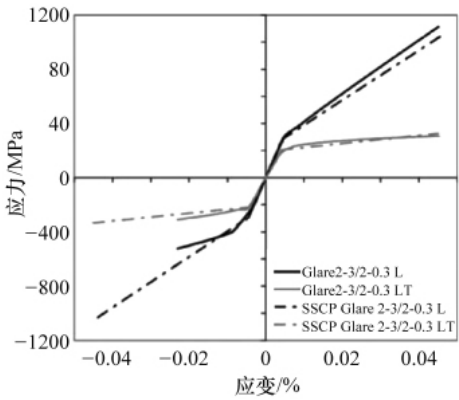


图 3 计算结果与实验结果对比
Fig. 3 Comparison of the calculated and experimental stress-strain curves for GLARE 2-3/2-0.3

4 GLARE 层板的冲击性能

Volt^[1,2,14]研究了 GLARE 层板静压入、低速冲击和高速冲

击特性,与金属 Al2024-T3 和玻璃纤维复合材料作对比。研究发现, GLARE 层板受冲击后只在非冲击面金属层产生裂纹,产生初始裂纹的能量明显比其他层板高,尤其是在高速冲击加载情况下。除此之外,损伤模式主要有金属层和纤维层的层间分层、纤维断裂及不同方向的纤维内部分层,损伤区域仅在冲击凹坑周围很小的范围内,如果层板是各向纤维等量的,损伤区域大致呈圆形;如果不是等量的,则是椭圆形。GLARE 层板除具有上述损伤模式外,层板内金属层受冲击后会产生塑性变形, 综上所有破坏形式使得 GLARE 层板可以吸收较多的冲击能量。此外,可视塑性变形凹坑及冲击点附近可视冲击损伤也有益于损伤检测。

冲击后剩余强度测试^[6,8,9,15]表明, GLARE 层板具有较高的冲击损伤容限特性。铝合金的冲击后疲劳测试是没有任何预兆突然破坏, GLARE 层板冲击后的疲劳实验(表 5)显示, GLARE 层板冲击后的疲劳寿命是铝板的 2~3 倍^[16]。

表 5 GLARE 层板冲击后疲劳性能
Table 5 Post-impact fatigue test results of GLARE

层板	冲击能 量/J	产生裂纹所需 循环次数	失效所需循 环次数
GLARE4	54	37500	61200
GLARE5	46	48000	71500
GLARE5	36	30000	84000
Aluminum 2024-T3	58	没有明显裂纹， 突然破坏	25500

5 GLARE 层板的挤压性能

作为飞机蒙皮的备选材料,必然会面对各种连接节点,而挤压强度是连接节点在使用中力学失效的重要指标。GLARE 层板的组成方式决定了 GLARE 层板各向异性的力学特征,描述 GLARE 层板的挤压强度要比单一材料的挤压强度研究复杂很多^[13,17,18]。

GLARE 层板的挤压测试有无横向约束的别针式挤压 (pin-type bearing) 和有横向约束的螺栓式挤压 (bolt-type bearing) 两种形式。表 6 给出了室温下,所有 GLARE 层板的别针式和螺栓式挤压的屈服强度 BYS (Bearing Yield

Strength) 和挤压极限强度 BUS (Bearing Ultimate Strength)^[18]。可明显看出,有横向约束的螺栓式挤压要优于无横向约束的别针式挤压。别针式挤压由于产生分层屈曲而导致挤压强度很低。螺栓式挤压的固定装置阻止了板外位移,没有发现屈曲,仅有一些被限制的分层发生。

与纯铝板相比, GLARE 层板的挤压性能更加复杂。GLARE 层板的挤压强度与一些参数有关^[19]。主要包括:材料参数,例如纤维类型、树脂类型、纤维方向、层板铺叠顺序、纤维体积分数、纤维表面处理办法;紧固参数,例如紧固类型(螺栓式、别针式、螺丝钉、铆接等)、紧固件尺寸、夹紧力、孔洞尺寸、误差;设计参数包括层板厚度、几何尺寸(边缘距离、孔洞形式等)、节点类型(单圈、单顶帽等)、加载方向和加载速率等。

表 6 GLARE 层板挤压特性
Table 6 Bearing properties of GLARE

层板	挤压极限强度 /MPa	螺栓型挤压屈 服强度/MPa	挤压极限强 度/MPa
GLARE2-3/2	549	530	709
GLARE3-3/2	537	546	789
GLARE4-3/2	510	518	658

6 GLARE 层板的疲劳性能

很多学者^[19,20]对 GLARE 层板的疲劳性能进行了广泛和深入的研究。主要研究了等幅加载和交变加载两种情况^[6]。

在等幅加载情况下,铝合金板的裂纹增长速率随着裂纹长度增加而迅速增长,而 GLARE 层板由于具有“桥接”特性,它的裂纹扩展速率几乎是常数。3 种板材的裂纹长度 a ~循环次数 N 曲线对比如图 4 所示。图中 $S_{\max}$ 为最大应力, R 为裂纹尖端半径, W 为试件宽度, L 为试件长度, f 为加载频率, $2a_0$ 为初始裂纹长度。

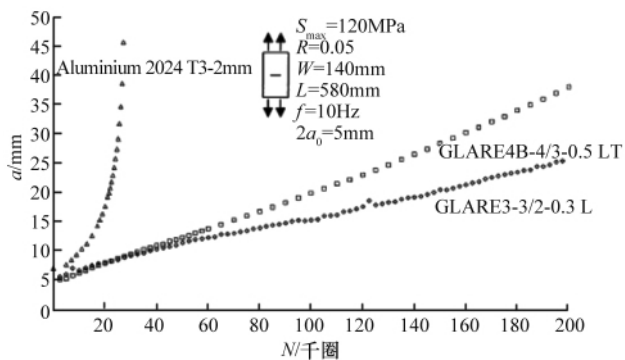


图 4 GLARE 层板的疲劳特性
Fig. 4 Fatigue crack growth behavior of GLARE

GLARE 层板在交变载荷下的开裂可分为:铝层内裂纹、玻璃纤维层内裂纹、铝层和纤维层界面分层,三者裂纹扩展

相互影响。GLARE 层板在交变载荷下裂纹扩展过程如图 5 所示。板内应力水平达到一定程度外层铝板产生裂纹,铝层和玻璃纤维预浸料分层,裂纹扩展受到玻璃纤维层的制约,应力重新分布,裂纹尖端由完好的玻璃纤维承受载荷,玻璃纤维断裂,裂纹继续扩展。裂纹尖端始终保持只有铝板层开裂,玻璃纤维完好的状态。在实际加载情况下,纯铝板的裂纹增长速率要比 GLARE 层板快 10~100 倍。GLARE 层板在所有的飞行器加载情况下都表现出优越的抗疲劳性能。

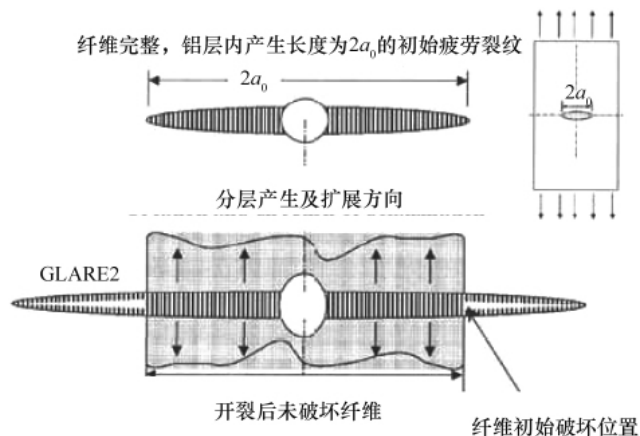


图 5 GLARE 层板的疲劳裂纹扩展过程
Fig. 5 Fracture process of GLARE

GLARE 层板在损伤容限方面较为特别的是裂纹“桥接”机理^[8],如图 6 所示。所谓“桥接”是由完整的玻璃纤维在开裂处对裂纹开口约束的现象。有效的“桥接”仅在金属层与复合材料层分离,即分层情况下才可能发生。分层可以给纤维足够的空间伸长,以便使纤维充分发挥作用。实验中观察到的裂纹扩展和分层增长两种损伤保持平衡,使得层板裂纹扩展速率保持恒定。

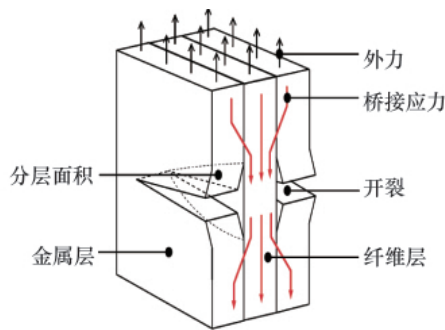


图 6 GLARE 层板的裂纹扩展机理
Fig. 6 Schematic diagram of fatigue crack growth mechanism

影响层板疲劳寿命的因素有:层板的铺层,金属层与非金属层厚度比等。如前所述,裂纹起始于外层表面,一旦裂纹

开始增长,裂纹很难传递到第二层。因此,纤维层板很少见贯穿裂纹,损伤只限于外侧表层。当脱胶面积变大,比如金属层与纤维层厚度比太大,桥接效果就不太明显,裂纹开裂的延迟作用就会弱很多,进而影响层板的疲劳寿命。

7 GLARE 层板的缺口剩余强度

缺口剩余强度是设计时考虑的重要因素,因为在实际飞行器上,诸如舷窗、舱门等缺口都是无法避免的。与大多数纤维加强复合材料一样,GLARE 层板对缺口敏感。然而,高极限强度和高破坏应变的玻璃纤维使 GLARE 层板在缺口剩余强度方面又优于其他纤维金属层板,比如 ARALL 层板^[6]。

目前主要研究了两种缺口形式的 GLARE 层板的缺口剩余强度。有圆形缺口或钝缺口和尖锐的裂纹型缺口。尖锐型缺口的应力集中强度要比圆形缺口的高很多。可知,同样尺寸的尖锐缺口的强度要比圆形缺口的强度低。

初始缺陷是裂纹或尖锐型缺口时,GLARE 层板总会发生分层,而分层会延迟纤维的破坏,增加含缺口板的强度。而钝缺口的强度是随着缺口尺寸的增加而增大的。这是由于玻璃纤维加强层合板的分层使缺口附近的应力分布更加均匀,保护了缺口附近的玻璃纤维。

研究发现^[21],缺口附近的应变硬化区以及铝板较低的屈服强度可以提高层板的剩余强度。提高刚度和降低纤维的极限应变可以降低层板的剩余强度,其原因在于层板最终的破坏是由纤维决定。

影响 GLARE 层板缺口剩余强度的因素主要有:纤维体积分数、组分材料的性质、纤维方向和缺陷本身的属性。

8 GLARE 层板的环境耐久性

GLARE 层板的环境耐久性,包括温度湿度影响、抗腐蚀性、阻燃性能。实验^[22]表明,GLARE 层板的基本力学性能受温度湿度影响不大,只有在边缘、缺口、切口等纤维预浸料裸露处才可能受到影响^[23-26]。GLARE 层板的外层总是金属铝薄板,而铝对环境变化不敏感,所以 GLARE 层板的环境耐久性要比复合材料性能好。需要特别注意的是,高湿度对 GLARE 层板应力集中处的强度影响较大。

研究发现^[23],GLARE 层板具有很好的抗腐蚀性能,因为所有的铝板层都做了阳极化处理,并且在黏结前涂了一层抗腐蚀的底漆。也正是由于该原因使得 GLARE 层板中的薄铝板比纯铝板的抗腐蚀性能更好。GLARE 层板的加速腐蚀实验发现,腐蚀即使发生也只发生在外侧铝板,因为纤维层就像一个屏障,阻止了厚度方向的腐蚀。

对于厚板,从 4/3 铺层开始,纤维金属层板可阻止火焰穿透层板^[8]。当层板遇到火焰,外层铝板迅速融化,第二层纤维碳化,阻止了火焰进一步穿透层板,同时由于热胀系数不同引起分层,形成空气层隔离热量。铝板的热消散性能也提高了层板的阻燃性能。

9 GLARE 层板的检测和修理

关于 GLARE 层板检测和修理的相关研究是由 Rob Fredell 在 1991 年开始的^[9]。由于 GLARE 层板自身结构特点,GLARE 构件本身无需按周期进行无损检测^[1],即使发现损伤需要修理也可以直接应用现有的铝合金构件修理技术进行修理。

GLARE 层板的热胀系数与铝板相近,且具有良好的疲劳特性,科研人员^[27-29]正在研究用 GLARE 层板作为修理配件,对现有飞行器中铝结构进行胶结修理。单向 GLARE1 和 GLARE2 主要用来胶结修理完好裂纹。双向 GLARE3 和 GLARE4 主要用于铆接修理。采用 GLARE 层板修理后,可使周围区域构件的疲劳寿命得到提高。

10 结论

GLARE 层板具有卓越的抗疲劳特性、静强度、抗冲击性能、剩余强度和钝缺口强度、阻燃性能和抗腐蚀特性等,是新一代飞行器结构中非常有前景的备选材料。

通过比较国内外在 GLARE 层板相关性能研究领域的进展和成果,对 GLARE 层板相关性能研究提出如下建议:

(1) 公开发表的有关 GLARE 力学特性方面的信息明显不足,尤其是国内,相关文章还不足 10 篇。在国内,GLARE 层板还属新生事物,要将此种层板应用于国内的军用飞机和民用飞机,还需投入大量的人力物力,对 GLARE 层板性能进行系统深入的研究。

(2) 基本力学性能方面,比如面内剪切强度等,还需要大量的实验数据来进一步证明。冲击后疲劳性能和剩余强度相关研究有限,需要大量实验数据以及冲击后损伤预测模型。

(3) GLARE 层板疲劳性能的相关研究明显不足,国外的一些学者提出了一些模型来模拟 GLARE 层板裂纹增长,但模拟结果与实验结果有出入。因此,需要更多切实可行的模型来预测 GLARE 层板的裂纹增长和 GLARE 层板铺层、最大应力和裂纹几何尺寸的关系。

(4) 目前,环境耐久性以及检测和修理相关研究国内没有开展,这些领域国外的学者也是处于初步了解阶段,需要进一步研究。此外,需要公开发表更多以解析和数值模拟为基础并通过实验证明的分析结果,这些成果可以促进 GLARE 层板在未来飞行器结构中有更好的发展。

参考文献 (References)

- [1] Vlot A, Vogelesang L B, de Vries T J. Towards application of fibre metal laminates in large aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1999, 71(6): 558-570.
- [2] Vlot A. Impact loading on fibre metal laminates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(3): 291-307.
- [3] Frizzell R M, McCarthy C T, McCarthy M A. An experimental investigation into the progression of damage in pin-loaded fibre metal laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39: 907-925.

- [4] Gunnink J W, Vlot A, De Vries T J, et al. GLARE technology development 1997—2000 [J]. Applied Composite Materials, 2002, 9: 201-219.
- [5] Vermeeren C A J R, Beumler Th, De kanter J L C G, et al. GLARE design aspects and philosophies [J]. Applied Composite Materials, 2003, 10: 257-276.
- [6] Wu G C, Yang J M. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures[J]. Failure in Structural Materials, 2005, 1: 72-79.
- [7] Pora J. A380 结构的先进材料和技术—未来发展的技术平台[J]. 工程与技术, 2003, 6: 50-52.
Pora J. Engineering & Technology, 2003, 6: 50-52.
- [8] Sinke J. Development of fibre metal laminates: Concurrent multi-scale modeling and testing[J]. Material Science, 2006, 41: 6777-6788.
- [9] Vermeeren C A J R. An historic overview of the development of fiber metal laminates[J]. Applied Composite Materials, 2003, 10: 189-205.
- [10] Bucci R J, Muller L N. Treatise on materials science and technology[M]. San Diego, CA: Academic Press Inc, 1989: 295-322.
- [11] Wu H F. Use of the rule of mixtures and metal volume fraction for mechanical property predictions of fiber-reinforced aluminum laminates [J]. Journal of Material Science, 1994, 29: 4583-4591.
- [12] Cook J, Donnellan M E. Tensile and interlaminar properties of GLARE laminates [R]. Report NADC-91087-60 Warminster, PA: Naval Air Development Center, 1991.
- [13] Hagenbeek M, van Hengel C, Bosker O J, et al. Static properties of fibre metal laminates[J]. Applied Composite Materials, 2003, 10: 207-222.
- [14] Volt A, Krull M. Impact damage resistance of various fibre metal laminates[J]. Journal de Physique IV, 1997, 7: C3-1045-C3-1050.
- [15] Wu G C, Yang J M, Thomas H H. The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates[J]. Material Science, 2007, 42: 948-957.
- [16] Laliberte J F. Post-impact fatigue damage growth in fiber-metal laminates[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 249-256.
- [17] Slager W J. Bearing strength prediction for some glare grades[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 6(17): 2542-2566.
- [18] Wu H F. An investigation on the bearing test procedure for fiber-reinforced aluminum laminates[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29: 4592-4603.
- [19] Alderliesten R C, Homan J J. Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 1116-1123.
- [20] Shim D J, Alderliesten R C, Spearing S M, et al. Fatigue crack growth prediction in GLARE hybrid laminates [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 1759-1767.
- [21] de Vries T J. The influence of the constituent properties on the residual strength of GLARE[J]. Applied Composite Materials, 2001, 8: 263-277.
- [22] Botelho E C, Almeida R S, Pardini L C, et al. Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate [J]. International Journal of Engineering Science, 2007, 45: 163-172.
- [23] Borgonje B, Ypma M S. Long term behavior of Glare [J]. Applied Composite Materials, 2003, 10: 243-255.
- [24] Da Silva D A, Botelho E C, Rezende M C. Hygrothermal aging effect on fatigue behavior of GLARE [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2009, 28(20): 2487-2499.
- [25] Park S Y, Choi W J, Choi H S. The effects of void contents on the long-term hygrothermal behaviors of glass/epoxy and GLARE laminates[J]. Composite Structures, 2009, 6: 1-7.
- [26] Beumler T, Borgonje B, Sinke J. A contribution of environmental investigations for glare riveted joint sizing[C]. 25th ICAF Symposium, Rotterdam, the Netherlands, May 27-29, 2009.
- [27] Heida J H, Platenkamp D J. In-service inspection of Glare fuselage structures [R]. NLR-TP-2001-608, Amsterdam: National Aerospace Laboratory of the Netherlands, 2002.
- [28] Woerden H J M, Sinke J, Hooijmeijer P A. Maintenance of GLARE structures and GLARE as riveted or bonded repair material[J]. Applied Composite Materials, 2003, 10: 307-329.
- [29] Bisle W, Meier T, Mueller S, et al. In-service inspection concept for GLARE—An example for the use of new UT array inspection systems[C]. 9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, Germany, September 25-29, 2006.

(责任编辑 张玉肖,王媛媛)

· 科学共同体介绍 ·

中国航海学会

中国航海学会 (China Institute of Navigation) 于 1963 年 12 月被批准设立, 1979 年 4 月正式成立。学会是由航海科技工作者及交通、海军、海洋和渔业系统中的有关单位自愿组成, 并依法登记成立的具有公益性、学术性的法人社团, 挂靠中华人民共和国交通运输部, 业务主管单位是中国科学技术协会。

中国航海学会于 1988 年加入国际航行学会联合会, 现有包括各地航海学会在内的 179 个团体会员和近 18000 名个人会员。会员网络覆盖全国航海界及相关领域。全国 22 个省、市、自治区均有地区航海学会组织。

学会的宗旨是遵守国家宪法、法律、法规和政策, 遵循社会道德风尚, 弘扬尊重知识、尊重人才; 倡导“献身、创新、求实、协作”精神, 团结和组织航海科技工作者, 以经济建设为中心, 坚持科学技术是第一生产力的指导思想, 实施科教兴国战略、人才强国战略和可持续发展战略, 深入落实科学发展观, 促进航海科学技术的繁荣和发展, 促进航海科学技术人才的成长和提高, 为中国航运经济的发展和航海事业的腾飞而努力奋斗。

中国航海学会开展航海科技领域内的学术交流、科学普及、决策咨询、技术服务、

成果鉴定, 中国航海学会科学技术奖、航海学会奖学金、优秀论文、优秀期刊论文的评审和颁奖, 参与技术标准和规范的制定, 组织全国海洋船舶系列高级技术职务任职资格评审、技术推广、转让和产品展览, 从事书刊编辑和出版、技术业务培训和再教育、史志研究、先进表彰和奖励等工作。学会现有海洋船舶驾驶、船舶机电、通讯导航、内河海事、内河航运开发建设等 19 个专业委员会以及《中国航海》、《航海技术》两个期刊编辑部。

中国航海学会现历第 7 届理事会, 理事长徐祖远, 常务副理事长刘功臣, 秘书长赵东野。

(责任编辑 秦政)