

民用飞机金属与复合材料结构损伤评定差异性研究

蔡禹舜*

上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241

摘要: 根据 MSG-3 分析理论, 对先进民用飞机结构损伤评定方法进行研究, 结合国产民用飞机维修工程研制经验, 比较金属与复合材料结构损伤分析流程, 提出了金属与复合材料飞机结构意外损伤及环境损伤在评定范围、评级指标及评定方式等方面的要点和区别。通过典型金属与复合材料结构部段损伤评定验证, 分析了 4 种评定方式的适用性。得到的结论为, 金属结构适用性较好的评定方式为不考虑 AD 影响, AD 和 ED 独立评定。复合材料结构适用性较好的评定方式为考虑 AD 的影响, AD 与 ED 联合评定。

关键词: 飞机结构; 复合材料; 意外损伤评定; 环境损伤评定; MSG-3

中图分类号: V267+.31

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 08-0021-06

民用飞机结构维修大纲制订技术的关键在于建立适用于飞机结构设计特性、满足运营需求与适航要求的损伤评定方法。由于飞机结构设计特性不同以及飞机主制造商对损伤评定方法的理解存在差异, 因此, 各类机型的损伤评定方法也不尽相同。特别是对于复合材料结构, 由于独特的材料特性与损伤机理导致其损伤评定方法与金属结构相比差异显著^[1,2]。本文研究并揭示差异原理以制订有效的损伤评定方法, 对于未来先进材料飞机的研制与使用维护具有重要意义。

本文通过对美国航空运输协会 (ATA) 发布的最新版维修大纲制订指南 (MSG-3 指南) 中结构损伤评定原则的分析, 参照国际上先进民用飞机结构损伤评定方法, 结合作者从事国产民用飞机结构维修大纲制订工作的认识, 从损伤评定范围、评级指标、评定方式等环节提出并分析金属与复合材料结构损伤评定不同之处, 并以某民用飞机典型结构部段为损伤评定对象进行评定方法的工程验证, 得到适用性较好的方法, 以期应用于民用飞机研制工程。

1 损伤评定范围

1.1 损伤评定类别

根据 MSG-3 分析思想, 现代民用飞机结构损伤类型包括服役期遭受的意外损伤 (AD)、环境损伤 (ED) 与疲劳损伤 (FD)。这些损伤对于航线检查是不明显的, 结构损伤评定不包括大的鸟撞、发动机非包容性破坏及重着陆等特殊事件引发的离散源损伤^[3,4]。

1.2 损伤评定结构项目

通过量化的等级进行损伤评定的结构只限于重要结构项目 (SSI), 其他结构项目进行非量化评估。

对于金属结构的 SSI, 需要对 SSI 进行 AD 与 ED 评定。若 SSI 是损伤容限项目, 则需进行损伤容限评定。若 SSI 是安全寿命 (SAFE LIFE) 项目, 则进行安全寿命分析确定疲劳寿命与检查及更换间隔^[5]。

对于复合材料结构的 SSI, 由于现代民用飞机复合材料结构采用冲击损伤容限设计思想, 其损伤具有“损伤无扩展”特性, 因此复合材料结构无需进行疲劳评定, 只进行 AD 与 ED 评定。图 1 为 ATA MSG-3 结构分析流程。

收稿日期: 2016-06-03; 退修日期: 2016-06-19; 录用日期: 2016-06-20

* 通讯作者. Tel.: 18721229730 E-mail: caiyushun@comac.cc

引用格式: Cai Yushun. Research on the differences of damage rating between metal & composite civil aircraft structure [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (08): 21-26. 蔡禹舜. 民用飞机金属与复合材料结构损伤评定差异性研究 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (08): 21-26.

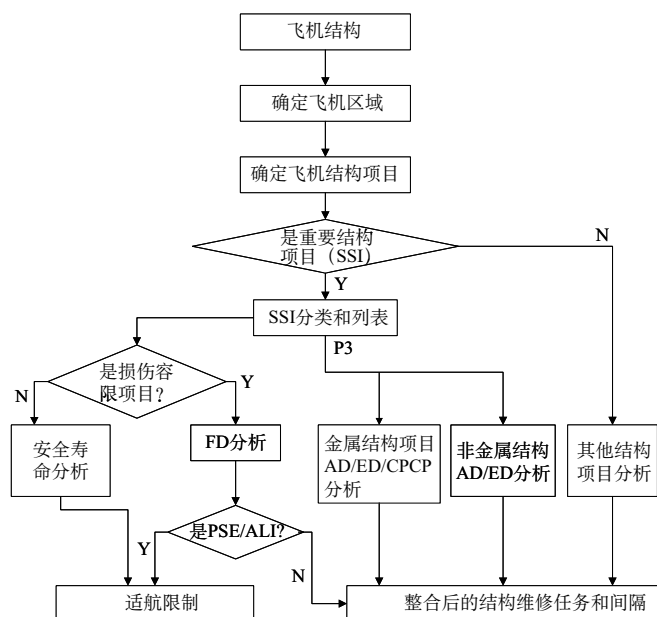


图1 MSG-3 结构分析流程

Fig.1 MSG-3 structure analysis process

2 评级指标

2.1 金属结构

MSG-3 指南对金属结构的损伤评级指标范围归纳为损伤敏感性与可检性两类。本文将其细化,构建了典型金属结构评级指标体系,如图2所示。

(1) 意外损伤评定 (ADR)

损伤敏感性包含损伤可能性与剩余强度,可检性包含可见性与损伤增长敏感性。

(2) 环境恶化损伤评定 (EDR)

损伤敏感性包含环境恶化可能性与环境保护性,可检性包含 SSI 可见性与腐蚀敏感性。

(3) 疲劳损伤 / 损伤容限评定 (DTR)

损伤敏感性包含初始裂纹尺寸与剩余强度,可检性包含可见性与裂纹扩展速率。尽管金属结构评级指标包含敏感性与可检性两类,但敏感性指标更贴近结构属性而可检性指标的可见性具有非常强的主观性,飞机主制造商需根据设计与检查水平确定是否包含可见性指标。

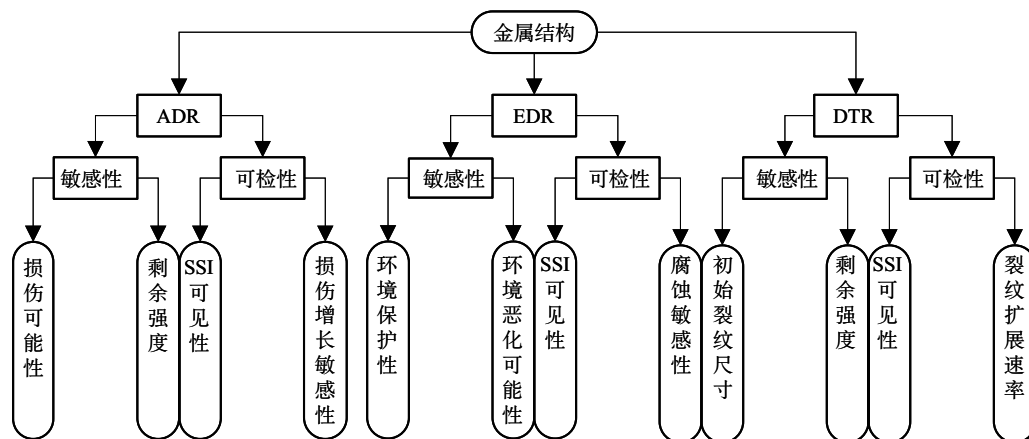


图2 金属结构损伤评级指标

Fig.2 Metal structure damage rating index

2.2 复合材料结构

复合材料结构损伤评定指标并没有全部包含损伤敏感性与可检性,本文根据 MSG-3 指南构建的评级指标体系,如图3所示。

(1) 意外损伤评定

冲击损伤是复合材料意外损伤最敏感的损伤形式,现代民用飞机复合材料结构采用“损伤无扩展”思想设计,意味着即使冲击导致复合材料结构内部出现大面积损伤,其外表面仍然可能目视不可检,并且损伤无扩展^[6,7]。复合材料结构意外损伤可检性不能以类似于金属结构的“可见性”和

“损伤增长速率”评定。因此复合材料 ADR 只有敏感性指标,即损伤可能性与剩余强度。

(2) 环境恶化损伤评定

环境恶化损伤敏感性包含环境恶化可能性与环境保护,但是对于因环境恶化造成的复合材料结构内部分层、脱胶损伤同样目视不可见,因此可检性只包含结构退化敏感性。由此可见,复合材料结构“不可检性”是造成其与金属结构评级指标差异的主要原因,同时由于复合材料结构具有各项异性且分层设计特性,ED 敏感性与 AD 的敏感性都与结构材料类型与组成形式密切相关,ED 与 AD 评级指标关联性较强。

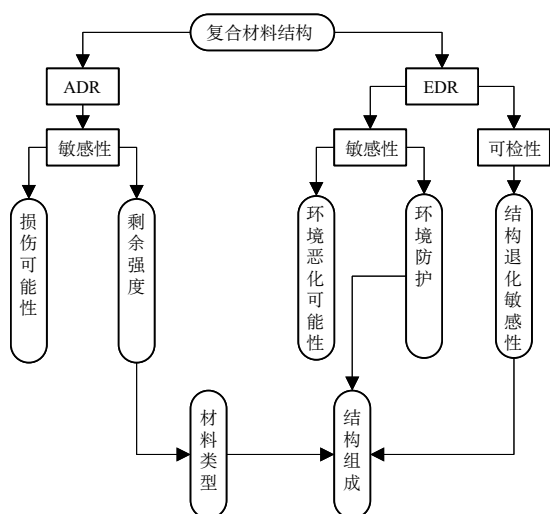


图3 复合材料结构损伤评级指标

Fig.3 Composite structure damage rating index

3 评定方式

3.1 流程比对

图4为MSG-3指南给出的金属/复合材料结构AD与ED评定流程。对于金属结构,该流程强调的是检查要求能否满足腐蚀防护与控制大纲(CPCP)要求,并没有明确AD与ED的评定方式。对于复合材料结构,MSG-3指南确定了AD与ED的损伤评定方式,强调结构对AD敏感程度的判别和AD对ED的影响。

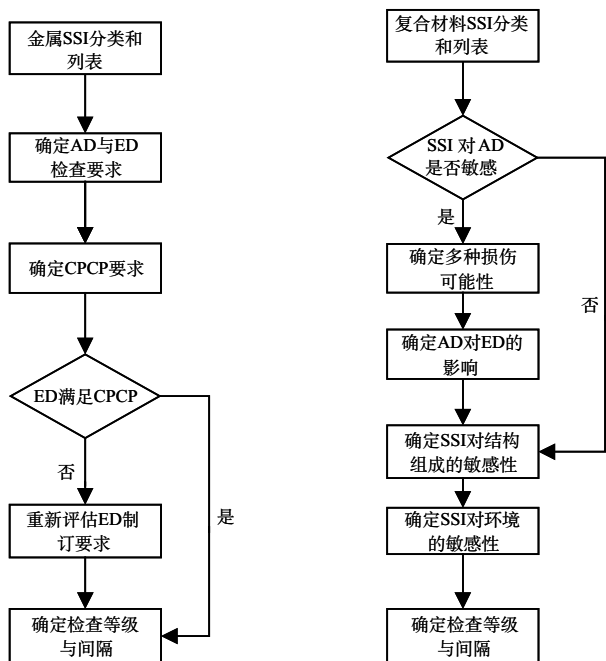


图4 金属/复合材料结构AD与ED评定流程

Fig.4 Metal/Composite structure AD/ED rating process

3.2 金属结构

3.2.1 AD与ED评定方式

金属结构AD与ED评定方式主要分为以下2种^[8]:

(1) AD独立评定(不考虑AD对ED的影响)

此方式认为AD与ED对损伤等级贡献是独立的,需要进行AD与ED的单独评定,不考虑AD对ED的影响,分别评定AD/ED等级。每一类损伤等级由其评级指标通过适当的数值统计方法得到。统计方法包括求和法、求和平均法、加权平均法等。然后取两者等级最严重的损伤等级为最终等级。此种方式得到的是AD或ED等级与检查任务。

(2) AD并入ED评定(考虑AD对ED的影响)

此方式认为金属结构AD很可能造成金属表面的保护层破坏,降低结构的抗腐蚀能力,对ED的影响主要体现在环境防护性。认为AD对损伤等级的贡献在于对ED的影响,因此不进行AD评定,只考虑AD的可能性,若AD可能性高,则在ED评定时考虑AD对ED的影响。若AD可能性低,则无需考虑AD对ED的影响。此种方式得到的是ED最终等级和检查任务。图5为这2种方式的评定流程。

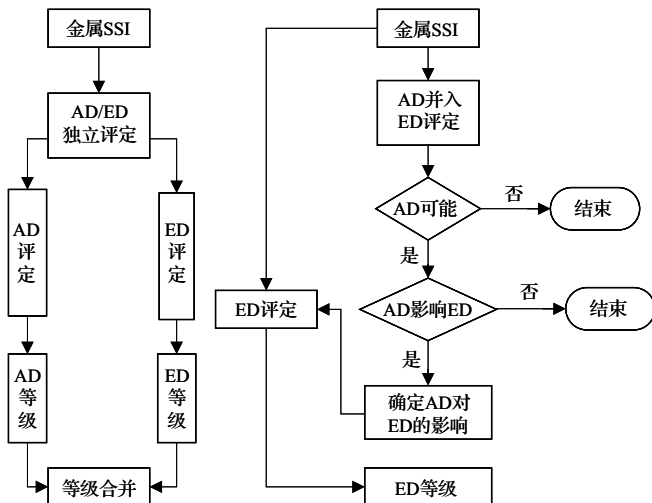


图5 金属结构AD/ED评定流程

Fig.5 Metal structure AD/ED rating process

3.2.2 FD评定方式

FD对完整性的影响是随飞机服役时间呈稳定增长趋势。AD与ED对FD的影响在于:

(1) 腐蚀环境会影响疲劳裂纹的扩展,腐蚀所造成的点状凹坑会形成新的疲劳损伤源;

(2) AD可能引起结构的刚度产生变化,产生应力集中,加速FD扩展速率。

以上影响因素可以在裂纹扩展分析中通过定义裂纹扩展假设与计算模型来加以考虑,损伤评定只需确定可检裂纹长度^[9]。

3.3 复合材料结构

复合材料结构 AD 与 ED 评定也分为 2 类^[10]:

(1) AD 与 ED 联合评定 (考虑 AD 对 ED 的影响)

根据敏感性 / 损伤可能性进行 AD 等级评定,同时考虑材料对 AD 与 ED 的影响,评定结构等级与 ED 等级,将 AD 对 ED 的影响通过结构等级评定联系起来,最后将结构等级、AD 与 ED 合并成为最终等级。

(2) AD 独立评定 (考虑 AD 对 ED 的影响)

根据 AD 的可能性,考虑 AD 对结构材料性能 (强度的影响),评定独立的 AD 等级与任务,在 ED 评级中考虑 AD 的影响,评定 ED 等级与任务。

图 6 为复合材结构 AD 与 ED 损伤评定流程。通过对图 5 与图 6 对比分析可知,相比于金属结构,复合材料结构 AD 与 ED 评定侧重在:

(1) AD 极有可能使复合材料结构内部产生分层、脱胶

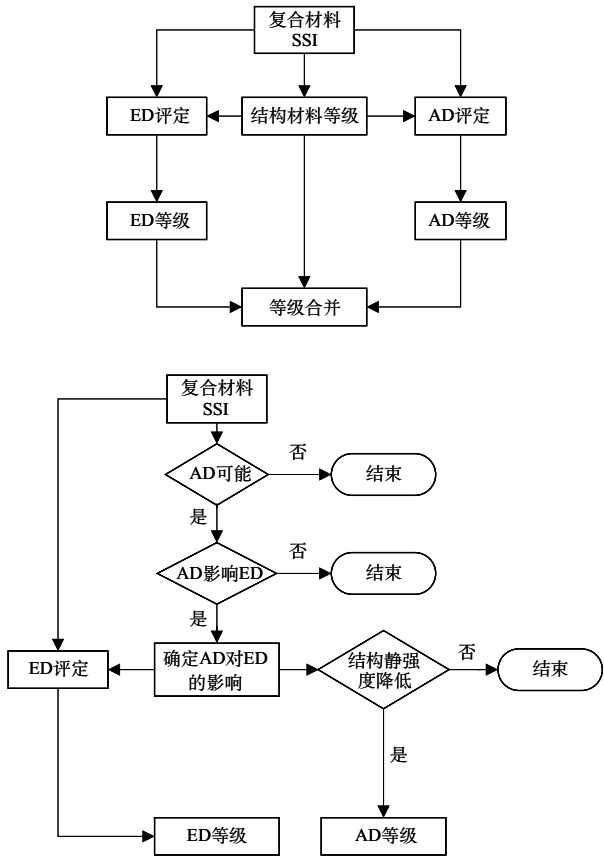


图 6 复合材料结构 AD 与 ED 评定流程
Fig.6 Composite structure AD/ED rating process

损伤,从而改变复合结构材料抵抗 ED 的能力,AD 对 ED 的影响较大,因此,ED 的评定与 AD 密切相关;

(2) 由于复合材料结构对冲击损伤的敏感性,AD (冲击损伤) 对结构剩余强度的影响程度要远远高于金属结构。

以上 2 种评定方式都突出强调结构对 AD 的敏感性、AD 对 ED 的影响。AD 在损伤总等级中所占据的权重大于金属结构。

4 方法验证

本文以某支线客机和中型客机水平安定面外伸段上壁板外表面为损伤评定对象,应用上述 4 种 AD 与 ED 评定方式与流程,针对金属与复合材料 2 种情况,评定上壁板外表面损伤等级。

4.1 结构组成

金属与复合材料结构信息如表 1 所示。

表 1 结构信息表
Table 1 Structure information table

上壁板蒙皮	材料组成	表面防护	区域	内 / 外部	设计准则
金属	7475 铝合金厚板	7475T7351 阳极化底漆	330/340	外	损伤容限
复合材料	CFRP 实芯层压板	底漆	330/340	外	损伤容限

4.2 评定方式与结果

金属与复合材料结构评定方式与结构如表 2 所示。

表 2 评定方式与结果
Table 2 Rating method and result

上壁板蒙皮	评定方式	评定指标				检查间隔
金属	(1) AD 独立评定, 不考虑 AD 对 ED 影响	ADR		EDR		2 年
		LK	0	EV	2	
		RS	1	PR	2	
		SD	1	SC	1	
		VR	2	VR	2	
复合材料	(2) AD 并入 ED 评定, 考虑 AD 对 ED 影响	ADR		EDR		区域检查间隔
		SC	1	PR	2	
		EDR		EV	2	
		EDR		EV	2	
		EDR		EV	2	
	(3) AD 与 ED 联合评定, 考虑 AD 对 ED 影响	ADR	0	EDR		4 年
		EDR		EV		
		EDR		EV		
		EDR		EV		
		EDR		EV		
	(4) AD 独立评定, 考虑 AD 对 ED 影响	ADR		EDR		区域检查间隔
		EDR		EV		
		EDR		EV		
		EDR		EV		
		EDR		EV		

4.3 结果分析

第一种方式得到最终等级为 ADR 和 AD 检查任务。第二种方式没有产生 AD 与 ED 任务,相应的检查要求由区域检查覆盖。第三种方式得到 AD 与 ED 联合评定的任务。第四种方式也没有产生 AD 与 ED 任务,相应的检查要求由区域检查覆盖。

支线客机与干线客机的结构检查间隔与相似机型 A 与 B 接近。将本文评定对象上壁板蒙皮检查间隔分别与 A、B 机型检查间隔对比,如表 3 所示可知。

表 3 相似机型检查间隔
Table 3 Similar aircraft structure check table

机型	上壁板蒙皮	检查间隔
A	2024 铝合金	4000FC/18 个月
B	GFRP 铝合金蜂窝	8000FC/1500 天
C	CFRP	20 个月
D	CFRP	36 个月

方法一得到的支线客机金属结构检查间隔 2 年与 A 机型 18 个月接近。方法三得到的干线客机复合材料结构检查间隔 1500 天与 B 机型 4 年基本等同。C 和 D 两种机型相似,结构也同样采用复合材料结构,虽然其检查间隔分别为 20 个月与 36 个月,与支线和干线客机评定对象相差较远,但其 20 个月与 36 个月也是其区域检查定义的间隔。其评定方法与方法二和方法四是一致的。

因此,金属与复合材料材料结构的 4 种评定方法适用于支线客机与干线客机该部位的损伤评定。但在使用时需要考虑以下因素:

(1) 在以上 4 种方法中除第一种方法对金属结构计及可见性以外,其他 3 种方式均不考虑可见性。

(2) 对于金属结构第一种方法评级指标全面,采用求和的统计简单明晰。第二种方法需要考虑 AD 对 ED 的影响程度,且评级指标较少,使用中需要具备较丰富的工程经验。

(3) 对于复合材料结构,第四种方法需要计及结构损伤后剩余强度的下降,这需要飞机结构强度验证与服役数据支持,因此使用要求较高。第三种方法考虑材料本身的性能,不需要考虑结构强度,使用起来较方便。

5 结论

本文通过对 MSG-3 指南与先进民用飞机损伤评定方法的对比分析与工程验证,将民用飞机金属与复合材料结构

损伤评定范围、评定指标及评定方式的差异性总结归纳为:

(1) 以“冲击损伤容限”思想设计的复合材料结构只需进行 AD 与 ED 评定。

(2) 金属结构损伤评定包含对敏感性与可检性的评定,复合材料结构对意外损伤的敏感性与不可检性决定其损伤评级指标更加侧重在敏感性。可见性对于按照“损伤不扩展”思想设计的复合材料结构不适用。

(3) 金属结构 AD 对 ED 影响效果低于复合材料结构,复合材料结构评定方式需要考虑 AD 对 ED 的影响,可以通过 AD 与 ED 联合评定或将 AD 作为影响因子并入 AD 评定的方式进行。

(4) 在型号研制尚未积累服役与损伤评定数据的阶段,对于金属结构,采用可见性指标,以 AD 独立评定,不考虑 AD 对 ED 影响的评定方式适用性较好。对于复合材料结构,采用结构材料等级,以 AD 与 ED 联合评定,考虑 AD 对 ED 影响的评定方式适用性较好。

本文所述观点与方法将为未来民用飞机先进材料结构损伤评定方法的确定和飞机维修大纲制订提供技术支持。

AST

参考文献

[1] Air Transport Association of America Inc. ATA MSG-3: Operator/Manufacturer scheduled maintenance development[S]. America: Air Transport Association of America Inc, 2009.

[2] FAA. AC NO 20-107B: Composite aircraft structure [S]. America: FAA , 2009.

[3] ASD. S3000L: International procedure specification for logistics support analysis LSA1.1 [S]. Brussels: ASD, 2014.

[4] FAA. FAR-25: Airworthiness standards: transport category airplanes [S]. America: FAA, 2012.

[5] 解思适,王世伟. 飞机设计手册 9 载荷强度刚度 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2005: 955-980.

XIE Sishi, WANG Shiwei. Aircraft design manual 9 load strength stiffness[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 955-980. (in Chinese)

[6] 沈真. 复合材料结构设计手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 13-18.

SHEN Zhen. Composite structure design manual [M].Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 13-18. (in Chinese)

[7] 沈真,张晓晶. 复合材料飞机结构强度设计与验证概论 [M].

- 上海:上海交通大学出版社, 2011: 121-135.
- SHEN Zhen, ZHANG Xiaojing. An introduction to design and verification for composite aircrafts structure[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011: 121-135. (in Chinese)
- [8] Boeing. B787 maintenance program development policy and procedures handbook[Z]. America: Boeing, 2007.
- [9] Granson U G. Fatigue issues in aircraft maintenance and repairs [J]. Fatigue, 1997, 20 (6): 413-431.
- [10] Airbus. A318/A319/ A320/A321 maintenance program development policy and procedures handbook[Z]. France: Airbus, 2004.
- 作者简介**
- 蔡禹舜(1973—) 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 民用飞机结构技术服务支援、维修工程分析与技术出版物。
- Tel: 18721229730
- E-mail: caiyushun@comac.cc

Research on the Differences of Damage Rating between Metal & Composite Civil Aircraft Structure

CAI Yushun*

Shanghai Aircraft Customer Service CO., Ltd., Shanghai 200241, China

Abstract: According to MSG-3 theory, made the research about damage rating method of advanced civil aircraft structure with experience of civil aircraft development. Made an comparison with metal and composite material structure damage rating process. Presented the difference of damage rating between the metal and composite aircraft structure including rating range, rating index and rating method. Demonstrated the applicability of the four kinds of method for dealing with damage rating. The conclusion is the AD and ED separated rating without AD effect is of better applicability for metal structure, the AD and ED combined rating with AD effect is of better applicability for composite structure.

Key Words: aircraft structure; composite material; ADR; EDR; MSG-3

Received: 2016-06-03; **Revised:** 2016-06-19; **Accepted:** 2016-06-20

*Corresponding author. Tel.: 18721229730 E-mail: caiyushun@comac.cc