

技术专论

飞机结构日历寿命及腐蚀防护研究应关注的问题

陈群志, 房振乾

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘要: 介绍了飞机寿命体系, 阐述了典型飞机服役环境和飞机使用寿命情况。列举了典型飞机结构的腐蚀实例, 并剖析了腐蚀失效的原因。在综合分析当前我国飞机面临的腐蚀和日历寿命主要问题的基础上, 阐明腐蚀是引起飞机结构失效的主要损伤模式, 也是严重影响飞机飞行安全和经济修理的主要因素, 探讨了飞机结构日历寿命及腐蚀防护研究应重点关注的一些问题。

关键词: 飞机结构; 腐蚀; 服役环境; 日历寿命; 飞行安全; 经济修理

中图分类号: TG172; V250.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0072-06

Consideration on Some Calendar Life and Corrosion Protection Questions of Aircraft Structures

CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Service life system of aircraft was introduced. The service environment and service life of typical aircrafts were elaborated. The corrosion cases of typical aircraft structures were listed, and the causes of corrosion failure were analyzed. Based on the comprehensive analysis of the corrosion and calendar life questions of aircraft in our country, it was concluded that corrosion is the main damage mode led to aircraft structural failure and is also the main factor seriously affecting flight safety and economic repair of aircraft. Some focal point questions of calendar life and corrosion protection of aircraft structures were discussed.

Key words: aircraft structure; corrosion; service environment; calendar life; flight safety; economic repair

1 飞机的寿命体系

飞机的使用效能能否得到充分发挥, 很大程度上取决于结构使用寿命及寿命期内的可靠性。飞机

寿命问题是国内外航空界极为关注的问题, 它不仅十分复杂, 而且涉及材料、设计、制造、腐蚀防护、试验、使用维护、修理和管理等诸多环节和领域。因此, 针对飞机寿命领域的关键技术开展深入研究, 对于提高飞机完好率和出勤率、减少维修成本、延长使

收稿日期: 2012-09-10

作者简介: 陈群志(1963—), 男, 湖南临澧人, 博士, 高级工程师, 主要从事飞机结构寿命与腐蚀防护研究。

用寿命、保障飞行安全、降低飞行事故率至关重要。

飞机的寿命体系包含疲劳寿命和日历寿命2项指标,以先达到的指标作为飞机大修或到寿的依据^[1-5]。飞机的疲劳寿命与日历寿命有一定的关联性,但其影响因素和侧重点有明显差别。飞机的疲劳寿命与疲劳损伤密切相关,取决于结构细节抗疲劳设计、载荷谱、无损检测与疲劳损伤修理技术等。飞机的日历寿命与腐蚀损伤密切相关,取决于飞机结构的抗腐蚀品质、环境谱、外场腐蚀防护、腐蚀修理技术与防腐改进措施等。

自2004年以来,笔者先后对20多个机型数百架飞机的技术状态进行了检查和评估,收集并整理了近年来我国飞机大修中发现的故障或问题,获得了大量结构损伤与故障数据信息。不难发现,腐蚀和疲劳问题已经成为当前我国飞机结构面临的主要问题,而腐蚀问题尤为突出^[1-8]。

2 典型飞机的服役环境和使用寿命

飞机腐蚀与服役环境密切相关,主要取决于机场环境。就自然环境而言,与日本、俄罗斯等国相比,我国飞机的服役环境更为严酷,结构材料腐蚀速率更快。国防科技工业自然环境试验研究中心和日本自然环境试验中心对相同的铝合金、钢试样在日本广岛和我国重庆联合进行的大气暴露对比试验表明,铝合金和钢在我国重庆的大气腐蚀速率远高于日本广岛。目前我国环境污染不断加剧的局面还没有得到有效控制,工业废气、废水等有害介质大量排出,导致环境对飞机的腐蚀呈现明显增长趋势,特别是在沿海和内陆湿热地区,飞机服役环境更为严酷,结构腐蚀也更为严重。

结构材料产生严重腐蚀需要一定时间,我国典型材料的长期暴露腐蚀数据统计表明,在沿海和内陆湿热地区,典型材料进入腐蚀快速发展阶段的时间约为6 a。这意味着目前我国有相当数量的飞机已经或即将进入腐蚀快速发展阶段。

就目前我国飞机使用及寿命情况而言,大多数机种处于一种“飞少停多”的局面^[1-5,9],日历寿命是现役飞机使用寿命的主要控制指标。大量事实表明,地面停放时间越长,飞机的腐蚀情况越严重;年平均飞行时间较多的飞机,其腐蚀问题相对较少。

典型机种使用寿命统计结果表明,68%的飞机日历寿命先于疲劳寿命到达,某些机种全部为日历寿命先到,从而出现疲劳寿命严重浪费的现象。为减少飞机疲劳寿命浪费,通常采取大修、特检或专项检查等措施来延长飞机的日历寿命,但这种办法的缺点在于会带来腐蚀修理费用的大幅增加、航材保障困难及飞行安全风险增加等一系列问题^[9]。

3 典型飞机的腐蚀实例与现状

3.1 实例一

2006年1架×1型飞机左平尾大轴在全机疲劳试验中发生断裂,如图1所示。随后对数十架该型飞机进行普查,发现多架飞机平尾大轴中有大量积水。采用内窥镜和X光检测发现,所有飞机平尾大轴内腔都存在不同程度的腐蚀,尤其在焊缝周围腐蚀更为严重,其中21架飞机平尾大轴腐蚀严重;5根平尾大轴出现腐蚀裂纹,因而不得不更换平尾大轴。×2和×3型飞机在特检、大修中也发现平尾大轴普遍存在较严重的腐蚀问题,如图2所示。平尾大轴是×1,×2和×3型飞机关键承力结构,腐蚀问题不仅会对飞机的安全飞行构成较大隐患,而且也将严重影响该型飞机的正常训练和修理。



图1 ×1型飞机平尾大轴在疲劳试验中的断裂情况

Fig. 1 Fracture of horizontal tail in ×1 type aircraft in fatigue test



图2 ×2和×3型飞机平尾大轴内腔存在较严重腐蚀

Fig. 2 Serious corrosion of horizontal tail inner cavity in ×2 and ×3 type aircrafts in special inspection and overhaul check

正常情况下,平尾大轴不可能发生疲劳破坏,这是因为断裂部位应力水平远低于材料的疲劳强度,而且断裂部位没有发现材料和机械加工缺陷。断口分析表明,疲劳裂纹扩展区存在大量的腐蚀产物。因此,疲劳裂纹起始于定位焊点处的腐蚀坑,腐蚀和焊接残余应力是导致其断裂的2个主要原因。进一步分析表明,腐蚀介质能够通过平尾大轴的结构缝隙渗入内腔且难以排出,使得内腔长期处于恶劣的腐蚀环境中。另外,平尾大轴内腔表面防腐处理存在严重缺陷,导致内腔焊接区的腐蚀损伤十分严重。在疲劳载荷作用下,应力腐蚀损伤严重的焊接区萌生疲劳裂纹后,导致平尾大轴从焊接处断裂^[10]。

3.2 实例二

2001年1架×4型飞机42框下半框腹板发生腐蚀断裂而报废,如图3所示。42框是该型飞机关键承力结构,如果该腐蚀故障没有被及时发现,飞机将会发生空中解体的重大事故。后续检查又发现100多架飞机同部位有不同程度的腐蚀问题,造成了大批飞机停飞^[2-4]。



图3 ×4型飞机42框下半框断裂部位的腐蚀情况

Fig. 3 Corrosion fracture of the lower half of 42 frame in ×4 type aircraft

×4型飞机的密封性较差,腐蚀介质渗入或外界温差变化会引起凝露和积水。与其它部位相比,42框所在的6号软油箱部位通风状况较差,局部环境更恶劣。含氯离子的雨水渗入并长期积聚以及潮湿空气凝露是造成42框和机翼前梁腹板腐蚀的主要原因。腐蚀部位的主要腐蚀形态为点蚀和剥蚀。

2004年在×4型飞机检查评估过程中发现,1架飞机左后减速板连接部位有异常晃动。拆下减速板分解检查发现,一根钛合金支臂梁已完全断裂,如图4所示。2007年又有两架该型飞机TC4减速板支臂梁发生断裂故障,其断裂破坏情况与上一架情况相似。

为确定×4型飞机TC4减速板支臂梁断裂原因和破坏机理,进行了取样分析。取样结果表明,TC4



图4 ×4型飞机减速板TC4钛合金支臂梁断口形貌

Fig. 4 Image of airbrake TC4 titanium alloy supported beam in ×4 type aircraft

钛合金支臂梁断裂是环境腐蚀和疲劳载荷共同作用所至,结构防腐措施和细节抗疲劳设计不合理是导致该型飞机减速板TC4钛合金支臂梁断裂的主要原因。含氯离子介质的腐蚀作用造成铆钉孔周围产生腐蚀坑,疲劳裂纹正是从这些腐蚀坑萌生,在疲劳载荷和腐蚀环境的作用下不断扩展,最终导致结构断裂^[6]。

2002—2005年期间,先后发现20多架×2型飞机外翼前梁与中央翼连接交点铝合金支架出现严重的腐蚀疲劳裂纹(如图5所示),因而不得不对其进行更换。



图5 ×2型飞机外翼前梁与中央翼连接交点铝合金支架的腐蚀疲劳裂纹

Fig. 5 Corrosion fatigue Crack of aluminum alloy support of outer wing front spar and central wing joint in ×2 type aircraft

腐蚀环境和疲劳载荷共同作用是导致外翼前梁与中央翼连接交点铝合金支架产生腐蚀疲劳裂纹的主要原因。目前,大多数情况下对于飞机结构出现的裂纹,其产生机理和原因还不十分清楚。因此,应从环境腐蚀和疲劳2个方面进行综合分析,而不是

单纯从疲劳角度考虑。

3.3 实例三

×2型飞机的起落架舱中央翼1墙、外翼前墙、外翼下壁板、进气道调节板等重要承力结构存在较严重的腐蚀问题,如图6、图7所示。



图6 ×2型飞机中央翼1号大梁下缘、壁板和加筋框严重剥落腐蚀

Fig. 6 Serious exfoliation corrosion of central wing number one beam lower edge, wallboard and reinforced frames in ×2 type aircraft

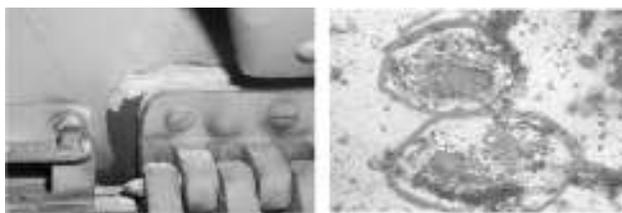


图7 ×2型飞机外翼前墙和下壁板的严重腐蚀

Fig. 7 Serious corrosion of outer wing front wall and lower panel in ×2 type aircraft

×5型飞机大修检查中发现,机体结构腐蚀问题十分突出,主要集中在机翼翼梁铝合金缘条、垂尾方向舵和平尾升降舵悬挂支架等结构部位,特别是搭铁线连接部位的腐蚀尤为严重,如图8所示。



图8 ×5型飞机机翼下缘条严重腐蚀

Fig. 8 Serious corrosion of wing lower edge in ×5 type aircraft

中央翼1墙、外翼前墙、外翼下壁板、进气道调节板、机翼翼梁铝合金缘条、垂尾方向舵和平尾降舵

悬挂支架等都属于半封闭式或密封较差的结构部位,雨水容易渗漏,温度变化将会导致含氯离子和硫化物的潮湿空气形成凝露。腐蚀介质渗透到致密性较差的漆膜或阳极化膜下与铝合金基体接触,进而引发腐蚀。漆膜下局部环境较闭塞导致腐蚀介质酸化,进一步加速了腐蚀,特别是搭铁线与铝合金之间电位差较大,电偶腐蚀易于发生,因此搭铁线连接部位的腐蚀问题更为严重。

3.4 实例四

2005—2008年期间,长期在海南地区服役的4架×6型飞机在大修检查时发现机体结构存在严重的腐蚀问题。腐蚀现象主要集中在中央翼上、下壁板和机身上长桁外部蒙皮铆钉处、短舱外蒙皮、尾部框条等部位,如图9所示。

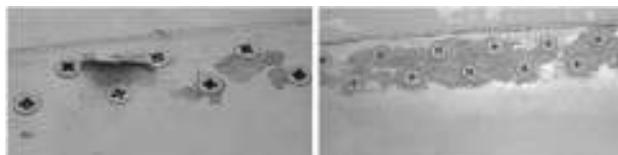


图9 ×6型飞机中央翼上壁板的腐蚀情况

Fig. 9 Corrosion of central wing upper panel in ×6 type aircraft

海南地区服役的飞机长期处于“4高”环境,即高温、高湿、高盐雾和高紫外线辐照,环境条件十分严酷,而且飞机表面防腐涂层性能较差,从而导致结构(尤其是铝合金结构)的抗腐蚀品质较差。

2011年,对×7和×8型飞机检查评估时发现,这两型飞机机体结构普遍存在严重腐蚀问题,已成为飞机安全使用的严重隐患。为切实摸清飞机的腐蚀情况,抽调了一架×8型飞机返厂进行分解检查评估。结果表明,铝合金结构的腐蚀问题非常突出,特别是机身、机翼、平尾、垂尾等结构部位桁条与蒙皮之间胶接点焊部位出现了大面积腐蚀损伤,多处桁条腐蚀断裂,失去了承载能力;机翼后梁、平尾后梁、机身地板梁等关键结构也出现严重腐蚀,如图10所示。

×7和×8型飞机长期在高温、高湿和工业污染的环境下服役,而且在设计、制造中所采用的防腐技术较陈旧,结构材料抗腐蚀性能差,结构防腐措施(尤其是密封防水工艺)存在明显缺陷,从而导致雨水、潮湿空气等腐蚀介质容易进入飞机内部,外场难以发现和排除。另外,这两型飞机在服役期间95%

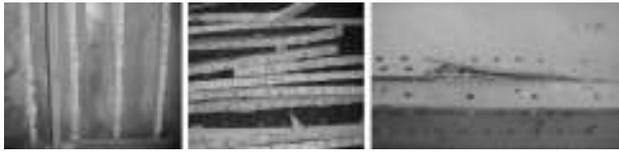


图10 X-7和X-8型飞机蒙皮与长桁胶接点焊结构、中外翼铝合金壁板严重腐蚀

Fig. 10 Serious corrosion of spot welded structure of bonded skin-stringer and outer wing aluminum alloy panel in X-7 and X-8 type aircrafts

以上的时间处于地面停放状态。大量的事实表明,飞机停放时间越长,腐蚀、老化问题越突出。尽管两型飞机目前只消耗了30%左右的飞行小时寿命,疲劳寿命余量很大,但经过第3次大修延长日历寿命后,服役日历时间高达31~37 a,已进入腐蚀/老化问题高发期和快速发展阶段。

3.5 实例五

2009—2012年期间,在多个机型近100架飞机检查评估时发现,40%左右的飞机机翼、平尾对接部位螺栓槽内存在积水和油脂变质现象^[1],如图11所示。目前已在飞机大修中发现对接螺栓槽出现了严重腐蚀,有的飞机螺栓槽底部已出现腐蚀穿孔。

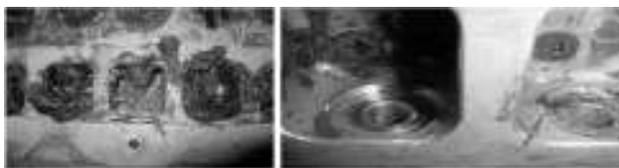


图11 多个机型对接螺栓槽积水导致油脂变质、结构严重腐蚀
Fig. 11 Grease deterioration and serious structure corrosion due to the seep of bolt slot of abutting parts in several type aircrafts

机翼、平尾对接螺栓槽部位为关键承力结构,采用超高强度铝合金加工,连接螺栓为高强钢。这两种材料虽然具有静强度高和抗疲劳性能好的特点,但对环境腐蚀十分敏感。螺栓槽对接部位没有采取有效的密封防水措施,雨水或潮湿空气很容易从盖板与机体结合面缝隙或螺孔渗入,随着服役时间增加,雨水渗入量越来越多,油脂不断流失、耗损和变质。现有的维护规程检查周期过长,不能及时发现螺栓槽的积水、油脂损耗和变质。因此,对接螺栓槽

部位积水后就会形成局部恶劣的腐蚀环境,在含腐蚀介质的水中长期浸泡必然会引起结构腐蚀。

大修中发现的腐蚀问题表明,对接部位螺栓槽积水问题已经由一种潜在的隐患或故障逐渐转变为现实的严重问题。

纵观历年来我国飞机发生的事故和故障情况,腐蚀和疲劳都是导致飞机产生灾难性事故的重要原因。大量的事实表明^[1-8],腐蚀已经成为飞机结构的主要失效模式,不仅严重影响飞机的经济修理,而且对飞机安全飞行构成重大隐患。腐蚀和日历寿命问题是我国飞机面临的主要问题。

4 日历寿命与腐蚀防护研究应关注的若干问题

根据典型飞机的使用寿命消耗情况和服役期间暴露的故障问题,今后我国飞机研制设计阶段,应特别关注疲劳寿命和日历寿命指标的合理性,将飞机结构日历寿命指标和抗腐蚀设计要求摆在更为重要的地位。在当前乃至今后相当长的一段时间内,飞机日历寿命和腐蚀防护问题必将成为我国飞机寿命体系中的重大课题,包括如下特别值得关注的问题。

1) 尽快建立飞机日历寿命评定技术体系,完善实验室条件下的加速模拟环境试验技术及对应的理论分析方法,为飞机日历寿命定寿、延寿和腐蚀防护研究提供科学、合理的加速腐蚀试验技术。在此基础上,应结合典型飞机日历寿命和腐蚀问题,深入开展日历寿命评定、结构防腐品质评定与试验验证等工作。

2) 加强新防腐技术的研发与应用,将先进的防腐技术应用于飞机结构腐蚀防护,明确修理是延长飞机日历寿命的重要措施。必须首先确认那些适用于飞机结构防腐的技术,解决实际应用所面临的一系列技术问题,如涂层本身的抗环境老化性能(耐湿热、盐雾和紫外线)、抗划伤性、与金属基体的附着力、工艺性、成本及配套设施等。其次,一种新的防腐涂层要应用于飞机结构中,应通过新型防腐涂层与现役飞机结构涂层在典型腐蚀环境下的性能对比试验给出评定。新涂层只有表现出较现役飞机涂层更好的防腐效果,才允许在飞机结构中推广应用。近年来,北京航空工程技术中心和中科院金属所等单位在飞机的腐蚀与防护领域开展了大量研究,尤

其是在IMR21纳米复合涂料、JMF胶体密封剂、DMF多功能密封防护涂料等防腐技术的研发与应用方面取得了重大进展,有些防腐技术已在实践中获得成功应用,效果良好^[12-17]。

3) 加强飞机结构腐蚀容限评估方法研究。建立腐蚀损伤等级评定准则是对腐蚀损伤程度进行准确判断和采取有效措施的前提,而腐蚀损伤容限是保证飞机服役期间不出现影响飞行安全和经济修理重大腐蚀故障的重要依据。

4) 加大飞机腐蚀防护与修理技术研究。腐蚀防护与腐蚀修理技术是我国飞机维护与修理中的薄弱环节,当前缺少可遵循的科学依据和有效措施。发展先进的腐蚀防护与修理技术,是目前条件下提高飞机结构抗腐蚀品质、抑制或延缓腐蚀的重要措施。现有的腐蚀修理措施难以较好地处理、解决已出现的腐蚀问题,即使对修理过程中发现的腐蚀故障进行了处理,也不能保证在服役期间不会再发生重大腐蚀故障^[1]。例如,×2型飞机在特检中曾对左侧中央翼1号大梁下缘的腐蚀进行了修理,但仅隔一年多时间在重新涂锌黄漆处又出现了较严重腐蚀;×5型飞机也出现过类似情况,1995年机翼前梁腹板发生严重腐蚀,经过紧急抢修,2003年在原修理部位又出现腐蚀穿孔,引起前梁腹板渗漏油故障,导致多架飞机提前返厂大修。

5) 加强飞机的腐蚀监控与检测技术研究,开展飞机技术状态检查评估,以便及时了解飞机结构的腐蚀情况及原因,掌握腐蚀发生和发展规律;对发现的腐蚀问题或腐蚀苗头采取修理或预防措施,对于防止发生影响飞机寿命和飞行安全的重大腐蚀故障具有重要作用。

6) 解决大多数机种日历寿命与疲劳寿命不匹配的问题。我国多数飞机的年平均飞行强度相对较低,服役期间地面停放时间一般占总寿命的95%~99%,飞机地面停放时间越长腐蚀越严重。多数飞机达到日历寿命指标时,飞行小时和起落次数寿命还有很大剩余。若依据日历寿命指标就确定飞机到寿,无疑造成巨大的浪费。因此,日历寿命已经成为我国飞机使用寿命的主要控制指标^[1-5,8]。

7) 尽快改变腐蚀条件下飞机结构无明确寿命的现状。现有飞机结构强度规范及定寿结论基本上是针对一般环境而言,未计及腐蚀环境与载荷的作

用,所给出的飞行小时寿命不能直接用于沿海湿热等腐蚀较严重地区使用的飞机,否则飞机结构使用安全将得不到保证。因此,应深入研究腐蚀对飞机结构疲劳寿命的影响,对常规环境下的疲劳定寿结论进行修正。

参考文献:

- [1] 张福泽. 金属机件腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法[J]. 航空学报, 1998, 20(1): 30—37.
- [2] 陈群志. 典型飞机结构日历寿命评定方法与延寿技术研究[R]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2005.
- [3] 杨晓华, 姚卫星, 陈跃良. 考虑日历环境影响的结构日历寿命研究[J]. 应用力学学报, 2002, 19(3): 157—159.
- [4] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1—6.
- [5] 陈群志, 刘文珽, 陈志伟, 等. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命研究现状与关键技术问题[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 42—47.
- [6] 陈群志, 韩恩厚, 杨蕊琴, 等. 某型飞机减速板钛合金梁断裂原因分析[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 26—29.
- [7] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007(12): 334—337.
- [8] CHEN Qun-zhi. A Discussion on Anticorrosion of Aging Aircraft[C]// Catic Mro Formu. 2009: 47—57. (余不详)
- [9] 陈群志, 吴志超. “飞-停”比对飞机使用寿命消耗的影响[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 1—4.
- [10] 陈群志, 黄卫华, 韩恩厚, 等. 典型飞机机内腔结构腐蚀原因分析及防腐改进[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2): 47—50.
- [11] 陈群志, 杨蕊琴, 房振乾, 等. 飞机密封防水新技术研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 71—74.
- [12] 陈群志, 孙祚东, 陆维忠, 等. SEBF/SLF重腐蚀防护涂层应用于典型飞机结构中防腐性能综合评定[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(6): 365—368.
- [13] CHNE Qun-zhi, FANG Zhen-qian, CUI Chang-jing, et al. Researches on Aircraft Corrosion and Protection[C]// Catic Mro Formu Proceedings. 2011: 49—63. (余不详)
- [14] 刘福春, 韩恩厚, 柯伟. 纳米复合涂料的研究进展[J]. 材料保护, 2001, 14(2): 26—28.
- [15] 刘福春, 杨立红, 陈群志, 等. 纳米复合氟碳涂料的性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 343—346.
- [16] 陈群志, 韩恩厚, 李祥海, 等. IMR纳米复合涂层与现役飞机涂层抗紫外线老化性能对比研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(4): 234—236.
- [17] 管静, 梁红波, 郝名扬, 等. 纳米TiO₂/白氟聚氨酯复合涂层的制备及抗老化性能研究[J]. 表面技术, 2009, 38(1): 30—32.