

现代飞机结构的新型铝合金

603所 王 哲

摘 要 总结了新型铝合金的特性及在现代飞机结构上的应用情况,并介绍了铝合金的发展动向。

关键词: 现代飞机 新型铝合金

1 引言

铝合金是在飞机结构上大量采用的材料,约占飞机结构重量的80%左右。尽管复合材料、钛合金、铝—锂合金等用量在不断扩大,铝合金仍以其较高的比强度、比刚度,良好的成型、加工性能及较低的价格在飞机结构选材中占主导地位。新型铝合金主要分两大类,强度刚度高的铝—锌—镁—铜合金(7000系列)和韧性较好的铝—铜—镁合金(2000系列)。传统铝合金的缺点是:铝—镁合金强度较高,韧性较差;铝—铜合金韧性较好,强度偏低。经过多年的研究,采用特殊热处理,提高合金纯净度,增添新的合金元素等方法弥补传统合金之不足,形成新型铝合金,在现代飞机结构上大量应用。

2 新型铝合金的特点

2.1 采用特殊热处理

通过对铝合金进行分级时效处理,可提高铝合金的抗应力腐蚀和抗剥蚀能力。分级时效能使晶粒产生固溶化梯度,获得抗应力腐蚀开裂的晶界组织。采用T7x双时效处理可提高铝合金的抗应力腐蚀能力,但使强度降低约10%;采用热—机械处理可以显著提高部分铝合金的韧性。铝合金在不同的热处理状态下有不同的机械性能。如7075-T6

人工时效,抗应力腐蚀能力差。通过分级时效即T73状态,抗应力腐蚀能力增强,抗拉强度比T6约低10%。对于要求抗剥蚀的铝合金,可采用T76状态,它比T73时效温度高、时间长,抗剥蚀能力增强。T736过时效处理、Tx51、Tx52状态,可消除厚板或锻件应力,以减小机械加工出现的变形。T74或T74511状态是介于T76和T73状态之间的过时效状态,这一状态下的抗应力腐蚀开裂性能优于T76状态,略低于T73状态,而静强度则高于T73状态,略低于T76状态。

2.2 提高合金的纯净度

通过严格控制铝合金中的铁、硅杂质含量,提高纯度,使疲劳强度和断裂韧性明显提高。这是由于铝合金在由液相冷凝为固相的过程中,形成 $FeAl_3$ 、 $SiAl_3$ 等针状或颗粒状的第二相粗大质点,质点与合金之间易形成裂纹源。新型铝合金把Fe、Si控制在0.15%以下,产生裂纹源的概率低,所以高纯铝合金都具有较高的断裂韧性和疲劳强度。

2.3 增添新的合金元素

在铝合金中增添锆等元素,或微量调整合金元素的含量,形成新的铝合金,如7075、7010、7150、2224、2324等。新型铝合金抗应力腐蚀能力强、断裂韧性好、强度高。添加微量元素Zr,形成 $ZrAl_3$,具有较大的界面

强度,有效地细化铸态组织,抑制再结晶,使合金的强度、韧性提高。

3 几种新型铝合金主要特性

2024,“O”退火状态供货,热处理T62,T42仅用于厚度小于2.5mm的板材,防止产生应力腐蚀。

温度较高处可用2000系列合金,当刚度和抗弯强度是主要设计要求时,有时宜采用2124-T851。

2024-T62薄板

T62是由冶金厂供给“O”状态料,用户进行固溶处理,人工时效。与T4状态相比,组织更稳定、强度高、抗蚀性好,但韧性差。适宜用于工作温度在120℃以上的薄壁构件。

2024-T81薄板

T81是由冶金厂固溶热处理、冷作硬化、人工时效,与T6状态相比,强度更高、韧性相当。适宜于变形不大、形状简单、要求强度高的结构件。

2024-T851、2124-T851厚板

T851是由冶金厂固溶热处理、拉伸产生1~3%永久变形,以消除应力,再人工时效。其强度、韧性与T81相当,但低于7075-T6,高温(>120℃)性能优于7075-T6,并具有良好的断裂韧性、抗疲劳性和抗腐蚀性。2124-T851的短横向性能优于2024-T851,机械加工时变形小,适宜于工作温度大于120℃的厚截面结构件。

7475-T73板材

断裂韧性 K_{Ic} 、 K_{IIc} 很高,裂纹扩展率在铝合金中最低,不易产生应力腐蚀裂纹。

7075-T7351板材

动、静强度兼优,不易产生应力腐蚀,用于非关键零件。

7000系列的T6状态具有峰值强度,对应力腐蚀裂纹十分敏感且易产生层状剥蚀,

不采用。允许厚度小于2.5mm的内部零件采用此状态,但需涂较厚的漆层。T76能提高板材和挤压件防层状剥蚀能力;T73有利于防止应力腐蚀裂纹;T74(以前为T736),7050采用,抗应力腐蚀裂纹能力强。除板料外,所有形式的坯料均经机械方法消除应力后供货,分别对它们采用预拉伸或压缩Tx51或Tx52状态。

7075-T76薄板

T76是固溶热处理后,双级人工时效,其强度比T6状态低,比2024高,其韧性、抗剥落腐蚀与抗应力腐蚀性能优于7075-T6,适宜于工作温度120℃以下的结构件。

7075-T7351、7475-T7351、7475-T7651、7050-T7651厚板

Txx51是由冶金厂固溶热处理后拉伸产生1.5~3%永久变形,以消除应力,再双级人工时效,其强度比2024高,7475、7050比7075有更好的抗疲劳性和断裂韧性。T7351具有满意的抗应力腐蚀性能。T7651具有满意的抗剥落腐蚀性能,强度略高于T7351,韧性相当。7475合金在铝合金中具有较高的断裂韧性。

7075-T73、7075-T7352、7050-T7452板件

T73是固溶处理后双级人工时效。Txx52是由冶金厂固溶处理后,压缩产生1~5%残余变形,以消除应力。双级人工时效,可消除机械加工过程中的变形,7075-T73需在热处理之前粗加工。7050的淬透性是铝合金中最好的,优于7050、7075-T73、T7352及7050-T7452,是120℃以下厚截面构件的优选材料,其强度高(但比T6低),且有好的抗应力腐蚀性和较高的断裂韧性。

2024-T62、2024-T851、7075-T7351、7075-T7651型材

T62是由用户从“O”状态成形,固溶处理或新淬火状态下成形,再人工时效。退火状态材料易成形,固溶处理后,残余应力

导致机械加工过程中翘曲变形,其温度比T4状态高、韧性低。适宜用于120℃以上形状复杂的结构件。

Txxx11是由冶金厂固溶处理后,拉伸产生1~3%永久变形,以消除应力,再单级或双级人工时效,拉伸后的挤压制品可少量矫直,只宜于少量变形,主要为机械加工件。由于拉伸消除残余应力,机械加工过程中不易翘曲变形,可获得满意的(特别是改善长横向、短横向)抗应力腐蚀和抗剥落腐蚀性能,其温度比T6状态低,韧性比T6状态高。

表1 高强高纯铝合金的性能数据

合金状态	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_2 (%)
7475-T61 包铝薄板	509	430	9
7475-T61 不包铝薄板	540	460	9
7475-T761 包铝薄板	490	410	9
7475-T7351	440	350	6
7050-T736	500(LT) 470(ST)	420(LT) 390(ST)	9 7
7050-T7652	480(L) 470(LT) 460(ST)	400(L) 370(LT) 360(ST)	9 4
7050-T7851	560	490	7
7175-T74	533(L) 480(LT) 476(ST)	434(L) 414(LT) 414(ST)	9 5 5
7075-T73651	490	430	9
7075-T651	530	450	8
7075-T7351	480	390	13
2024-T4	480	420	8
2024-T351	378	245	7
7150-T651	607	572	12
7150-T7751	607	572	12
7178-T651	607	503	10
7055-T7751	648	634	11

7050-T7 丝材

固溶处理 3级人工时效,用于冷铆铆钉。拉伸强度、剪切强度均高于LY10,具有满意的抗应力腐蚀性能。

表2 新型铝合金在现代飞机上的应用

机种	使用部位	合金状态	品种
F-5E	机翼上壁板 机翼上蒙皮 翼梁 肋	7050-T7651 7050-T76 7050-T736 7050-T736	厚板 板材 精锻件 精锻件
F-111	机翼上壁板 机翼下蒙皮	7050-T73651 7050-T76	厚板 板材
C-141	机翼长桁 整体翼梁	7050-T76 7050-T76	型材 锻件
DC-10	机翼整体油箱接头	7050-T73	锻件
B-1	翼盒泡壁	7050-T73651	厚板
F-15	减速板肋	7050-T73652	锻件
F-16	机身接头 机翼梁 整体肋 导管	7175-T736 7475-T7351 7475-T7331 2124-T851 8061-T6	锻件 锻件 厚板 管材
B-707	机翼下壁板 机翼上壁板 机身蒙皮 接头	2024-T4 7178-T6 2024-T4 2079-T6	板材 板材 板材 厚板
B-737	前梁框接头 后梁框接头 框板	7075-T73 7075-T73 7075-T6	锻件 锻件 厚板
B-767	机翼上壁板 上翼面长桁 机翼下翼面蒙皮 机翼面挤压型材	7150-T651 7150-T651 2324-T3951 2224-T351	板材 型材 板材 型材
B-777	机翼上蒙皮 机翼下蒙皮 地板滑轨梁	7055-T7751 2324-T39 7150-T77511	板材 板材 挤压型材
MD-82	机身框、长桁 机翼上翼面蒙皮 机翼下翼面蒙皮 机翼长桁	7075-T6 7075-T76 2024-T351 7075-T6511	板、型材 板材 板材 型材
A320	机翼上壁板 机翼下壁板 机翼梁或肋 机身蒙皮	7150-T651 2024-T351 7050-T7651 2024-T3 T42、T351	板材 板材 厚板 板材

4. 新型铝合金在飞机上的应用

从60年代开始,通过合金化、高纯度、热处理(如T851、T39、T74、T76、T77等)等途径,研制出了2124、2224、2324、7175、7475、7050、7150等高纯高强高韧铝合金。按飞机结构部件受载和环境情况,选用不同铝合金,如B777,下翼面选用疲劳性能好的2324-T39厚板和2234-T3511型材,抗腐蚀性要求高的中小暴露件采用7175-T74锻件,厚大截面的锻件使用7050和7150合金,腐蚀性和高强受力的上翼面选用7055-T77铝合金。国内生产的MD-90飞机,机身和机翼下蒙皮均选用高新裂韧性的2024-T351,机身与机翼对接处蒙皮选用7075-T6、T96和T73状态,机身框和长桁大部分选用静强度高的7075-T6,机身机翼对接加强框选用7075-T73锻件和7075-T6挤压型材,机身下半部货舱开口之间长桁采用7075-T6511和7075-T73511,机翼上翼面蒙皮用抗剥蚀性能较好的7075-T76机加壁板,机翼长桁均采用7075-T6511挤压型材,有高强度要求的翼梁上下缘条采用7075-T73锻件,腹板采用静强度高的7075-T6板材,与机翼后梁连接的主起落架安装接头采用7075-T73锻件。表2列出现代飞机新型铝合金的应用情况。

5 结束语

我国航空工业铝合金热处理状态大多为自然时效和人工时效,LC9过时效热处理已在飞机上应用,高纯高强铝合金也已研制出来。某些飞机已大量选用国外新型铝合金,如:2024-0、7475-0薄板,2124-T851、7050-T7451、7050-T7651、7475-T7351厚板、7050-T7452、7175-T74自由锻件等,大量用预拉伸厚板代替常规小锻件等。美国最新研制的7055-T77挤压型材和厚板,强度比7075-T6高出25%,比7075-T76高出

4%, σ_b 可到648MPa,同时抗腐蚀性能良好,韧性也好,已在新机型B-777主翼蒙皮、肋和机身龙骨梁上大量应用,从而减轻飞机重量、提高性能。▲

(上接第24页)

后减,时效温度增加,强度、硬度先升后降,其中 σ_b 在峰值时效达最大值, $\sigma_{0.2}$ 在轻度过时效达最大值。在峰值时效及过时效状态, δ_5 较低,轻度过时效时最小,随时效时间增加, σ_b 出现两个峰值。

(2) $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 可作为表征金属形变硬化能力的指标。随时效温度或时效时间增加, $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 先增后减,轻度过时效达最大值。固溶温度及固溶时间对 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 影响不大。

(3) 固溶温度增加,电导率下降,固溶时间增加,电导率先降后升,时效温度或时效时间增加,电导率先减后增。

(4) LD5在CS状态电导率及硬度极限值为: $21.6\text{MS/m} \leq \sigma \leq 24.6\text{MS/m}$, $\text{HBS} \geq 97$ 。其中 $21.6\text{MS/m} \leq \sigma < 23.0\text{MS/m}$ 为电导率不确定区, $97 \leq \text{HBS} < 114$ 为硬度不确定区,应将电导率与硬度结合进行检测。

(5) LD5锻件最佳热处理工艺:固溶处理: $515^\circ\text{C} \sim 535^\circ\text{C}$, 45min或 515°C , 80min \sim 100min(保温时间针对厚度为20mm的锻件);人工时效: 155°C , 10h \sim 12h。▲

参考文献略。

参加试验工作的还有刘万发、薛磊、张芙蓉、屠文俊、张有明和平冈等同志。

