



陈石卿、孙宝清編

美国航空 金属材料現况



國防工業出版社



國防部、科學出版社

美國航空 金屬材料現況



國防部、科學出版社

內 容 簡 介

本書的主要任务在于反映美国航空材料的現况及發展方向，数据和論点均取自近两年美国出版的公开杂志。主要内容有高溫輕合金及鉄、鋁、鈷合金、鈦、鎢等高熔点合金、塗層、射綫防护材料。書中附有大量統計表，可供航空材料研究人員及飞行器設計人員参考。

國防·工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第074号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

787×1092 耗 $1\frac{1}{32} \cdot 15\frac{15}{16}$ 印張·18,000字

1958年10月第一版

1958年10月北京第一次印刷

印数: 0,001—3,500册 定价: (10) 0.17元

統一書号: 15034·223 NO. 2231

目 录

序言	2
铝合金	3
镁合金	5
钛合金	7
铍	8
镍基合金	11
钴基合金	13
铬基合金	14
铁基合金	14
超高强度钢	20
钨合金	22
铌	22
锆	23
陶瓷金属	24
陶瓷涂层	26
原子动力装置的防护材料	28

序 言

过去20年，特別在二次大战后，航空材料有了很大的發展。以动力装置为例，優質耐热鋼的研究成功，促使活塞式發動机演进到渦輪發動机，而且渦輪發動机的發展是和鎳基、鈷基合金性能的不断改善相关連的。就目前来看，燃气渦輪工作溫度的进一步提高，有待于高熔点合金及耐火材料的掌握。飞机构架材料的情况也大致是这样，目前鋁合金的应用受到一定的限制，要求發展新的合金，它的發展在很大程度上要看在鈦合金、沉淀硬化不銹鋼方面的研究結果。超高速飞机及火箭的出現，为材料带来了許多新的問題，等待解决。

为了滿足航空技术对材料提出的日益不断增長的要求，許多国家在航空材料的研究及發展工作上均投入很大的人力和物力，且取得了一些成就。本書的任务是反映美国在这方面的發展現况。由于航空材料的發展工作本身帶有很大的保密性，又由于資本主义国家的报刊杂志帶有夸大宣傳性，因此反映它的真实情况有一定困难。但考虑到許多讀者在超英超美的大跃进的今天，希望了解一些这方面的情况，故編出这个小册子，提供讀者参考。

鋁 合 金

美国飞机上应用的鍛造鋁合金主要有两大类，一类是鋁銅鎂系合金，其代表为2024，另一类为鋁鋅鎂系合金，其代表为7075。近年来，美国發展了一系列的高溫鍛鋁合金，較新的有X7079，X7178，X7001，X2219，但大多处于試驗阶段。

正式使用的鋁合金的化学成分

	牌 号	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Cr	Ti	Al
鍛鋁 合金	7075	1.6	2.5	—	—	—	—	5.5	0.2	—	其余
	2024	4.5	1.5	—	—	0.65	—	—	—	—	其余
	2014	4.5	0.5	0.9	—	0.8	—	—	—	—	其余
	2618	2.2	1.6	—	1.1	—	1.05	—	—	0.07	其余
	5058	0.1	4	—	—	0.45	—	—	—	—	其余
	6061	—	—	—	—	—	—	—	—	—	其余
鑄鋁 合金	355	1.3	0.5	5.0	—	—	—	—	—	—	其余
	A355	1.4	0.5	5.0	—	0.8	0.8	—	—	—	其余
	142	4.0	1.5	—	—	—	2.0	—	—	—	其余

从上表所列成分可以看出，2024 鋁合金相当于苏联的Д16硬鋁合金，工作溫度約250℃。7075鋁合金与苏联的B95高强度鋁合金相近，是120℃以下的高强度合金。两类合金的使用均受到溫度的限制，在250℃以上，需采用新的合金，正在發展的鋁鋅錳合金有X7178、X7079、X7001。据称X7178及X7001的抗張强度接近70公斤/公厘²；X2219除含Cu6.0，Mn0.3外，含有少量的鈳及銻，可用于260℃；X7079用于鍛造大零件，淬透深度可达15公分，有較高的疲劳强度及

抗蝕性。

在鑄造合金方面，新發展的試驗性合金有 XA 140，含Cu 8%，Mg 6%，Mn 及 Ni 各 0.5%，在 315°C 100 小時的抗張強度為 25 公斤/公厘²，屈服強度 20 公斤/公厘²。

鋁合金的機械性能

合 金	室 溫				高溫 100 小時 的持久強度， 公斤/公厘 ²		蠕變強度 (100 小時 0.1% 變 形)，公斤/ 公厘 ²	
	度 強 度 公斤/公厘 ²	度 強 度 公斤/公厘 ²	延 伸 率 %	疲 勞 強 度 公斤/公厘 ² , 10 ⁶ 循環	204°C	315°C	204°C	315°C
7075-T6	57.4	50.4	11	20.3	11.9	5.85	9.1	2.59
2024-T4	47.6	32.2	22	21.7	25.9	7	14.7	2.52
2014-T6	49	42	13	21	23.1	5.6	16.8	1.96
2618-T61	44.8	37.8	10	21.7	27.3	7.7	14.7	3.15
X2219-T6	43.4	30.1	16	—	26.6	14	16.8	6.3
M237	48.3	37.1	12	—	32.2	10.5	18.9	5.6
355-T51	19.6	15.1	1.5	—	14	4.9	—	—
A355-T51	19.6	16.8	1.5	—	13.3	6.3	—	—
142-T77	21	16.1	2	—	16.1	7.7	—	—
XA-104TF	23.8	20.3	1.0	—	25.9	14	—	—
燒結鋁合金 M257	26.6	17.5	17	—	14.7	11.2	11.2	7.7
燒結鋁合金 M276	35.7	23.8	7	—	22.4	15.4	15.4	—

根據最近資料的報導，美國正在研究一種合金 X2020，系試驗性合金，其成分未宣布，內加有鋰，彈性係數比普通鋁合金高 8%。根據計算，利用該合金可降低飛機重量 3%，可用於 200°C。

鋁粉燒結合金自從在瑞士研究成功後，美國即大力進行

研究。目前处在实验阶段的有M257、M276合金，其典型机械性质见上表。

此外，目前正在研究将铝粉烧结的薄片和板料用于制造蜂巢结构。

镁合金

飞机上用的镁合金主要有两大类，一是铝锌锰系合金，目前正式使用的有10种之多，这类合金一般用于 150°C 以下，另一类是加有稀土元素的合金，蠕变强度较高，一般可用于 250° ，近年来又着重发展在 250°C 以上工作的镁钍合金。

铝锌锰系合金的品种很多，其中具有代表性的有AZ31 (Al 2.5~3.5, Zn 0.6~1.4, Mn 0.20) 锻造合金，其室温抗张强度 28.7 公斤/公厘²，屈服强度 22 公斤/公厘²，延伸率 14%，铸造合金具有代表性的有AZ92 (Al 8.3~9.7, Zn 1.6~2.4, Mn 0.10) 其室温抗张强度 28 公斤/公厘²，屈服强度 16 公斤/公厘²，延伸率 2%。

镁合金中加入稀土元素，可大大提高合金的强度，EZ33A 镁合金，加有拌和合金 2.5~4%，抗张强度达 16.2 公斤/公厘²，屈服强度 11.2 公斤/公厘²，与苏联的МЛ10 镁合金大致相等。

镁钍合金的研究工作开始较早，研究成功并已投入生产的有HK-31A 铸造合金及HM21X8-T8。

鎂鈰合金的化学成分, %

合 金	Th	Zn	Zr	Mn	Mg
HK-31	2.5~4.0	—	0.5~1.0	—	其余
HZ-32	2.5~4.0	1.7~2.5	0.5~1.0	—	其余
ZH-62	1.4~2.2	5.2~6.2	0.5~1.0	—	其余
HM21XA	1.5~2.2	—	—	0.35~0.8	其余

鎂鈰合金的机械性能

合 金	温 度 °C	抗張强度, 公斤/公厘 ²	屈服强度, 公斤/公厘 ²	延伸率, %
HM21XA-T8	室温	23.8	17.5	10
	150	—	—	—
	204	12.6	12	30
	260	11.2	10.5	25
	315	9.8	8.4	15
	370	7.7	5.6	50
HK-31A-H24	室温	25.9	20.3	8
	150	18.2	16	20
	204	16.8	14.7	21
	260	14	10.9	19
	316	9.1	4.9	70

鎂鈰合金的蠕变强度較普通鎂合金高出許多, 在 300°C 具有一定强度, 工作温度可望达到 370°C。

鎂合金內加入鋰 10~15%, 可将屈服强度提高到 31 公斤/公厘² 以上, 但抗蝕性下降 (鋁鋅鈰系鑄造合金 AZ 92 的屈服强度 16 公斤/公厘², AZ 31 鍛造合金 22 公斤/公厘²)。

目前在鑄造薄壁高强度鎂合金零件上取得較显著的改进。

鈦 合 金

近几年来，美国鈦的产量上升較快，海綿鈦54年产量4000吨57年上升至20000吨。但根据最近資料的报导，美国对鈦的需要量显著下降，不如前几年所預料的那样。

对鈦需要量减少的原因，从技术角度看就是鈦合金有它的缺点。一方面鈦的成本还是很高，鈦在430℃强度降低很快，焊接性差，薄板的冷軋証明已不可能。另一方面不銹鋼近年来有了新的發展，不銹鋼的成本較鈦低而且加工性能及高溫性能較好。估計鋼在蜂巢結構上将取得一定地位。因此鈦及鋼在軍事上的应用正面临着竞争。

目前工业鈦的最小抗張强度为35~55公斤/公厘²，一般在70公斤/公厘²左右，延伸率18~22%，N的含量可控制在0.08%範圍內，碳的含量控制在0.2%範圍內。

鈦合金中主要有两大类，一是 α 合金，其中以5Al-2.5Sn的强度最高，达81公斤/公厘²，但加工困难，一是 $\alpha + \beta$ 合金具有較高的强度和塑性，强度最高的合金达到105公斤/公厘²（見表）。目前正在研究的試驗性合金有7Al-3Mo，3Al-3Mo，4Al-3Mo，4Al-1Mo-Cr-2V合金，其中7Al-3Mo据称是有可能用于430~540℃。

美国钛合金的化学成分及机械性能

化 学 成 分, %	机 械 性 能				
	σ_b 公斤/公厘 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/公厘 ²	δ , %	R' 公 厘	σ_{320} (320°C 时)
7~8Mn	84	77	10	2~3T①	65
5Al; 2.5Sn	81	77	10	3~4T	50
3Mn; 1.5Al	84	77	12	2~3T	—
5Al; 1.4Cr; 1.3Fe; 1.4Mo	105	98	12	—	83
6Al; 4V	91	84	10	—	80
4Al; 4Mn	98	91	10	—	85
3Al; 5Cr	105	98	6	—	80
5Al; 2.75Cr; 1.25Fe	105	98	10	—	90②
2Cr; 2Fe; 2Mo	91	84	12	—	—
3Mn; 1Fe; Cr; Mo; V	110	91	12	—	—
3.5Cr; 1.5Fe	84	77	12	—	60

① 板厚 (公厘)

② 平均值

③ 20°C 时 $\sigma_b = 120$ 公斤/公厘²

铍

铍作为合金元素是我们所熟知的。20年前就有人想把铍用作航空结构材料，目前已积累了不少资料，正研究铍有无前途作为结构材料。

铍的密度与镁同，大约为铝的 2/3。铍制结构的重量只及铝的 1/2 弱，一些技术上的问题如能获得解决，在高温下这种情况仍可保持。铍的弹性系数很高，为铝的 4 倍多，但目前生产的铍的塑性低，限制了它作为结构材料的应用。

由于铍的热性质较铜好6倍，美国航空諮詢委员会实验室认为它有前途用作制导弹头部的材料。

但铍有很大的缺点，这就是性脆，成本很高，每公斤约50美元，此外铍的毒性很大。

铍的物理性质

密度	1.84~1.86克/公分 ³ (A)
熔点	1285±10°C
比热: 在0°C时	0.4卡/克/度
在700°C时	0.7卡/克/度
热膨胀系数(每度):	
25~100°C	11.54×10^{-6}
25~700°C	17.23×10^{-6}
导电率	当铜的35~45%
音速	12,600公尺/秒
反射率	对白光, 50~55%.
导热系数:	
当100°C时	0.38卡·公分 ⁻² ·秒 ⁻¹ (度, 公分 ⁻¹) ⁻¹
当500°C时	0.34卡·公分 ⁻² ·秒 ⁻¹ (度, 公分 ⁻¹) ⁻¹

注: A) 根据含氧铍计得的。纯铍的理论密度为1.845克/公分³。

铍的机械性能

	室 温	430°C	540°C	650°C	820°C
抗張强度 公斤/公厘 ²	23.1~ 35.7	17.5~ 28.0	14.0~ 28.0	10.5~17.5	1.4~5.6
屈服强度 0.2%, 公斤/公厘 ²	18.9~ 23.1	11.2~ 24.5	9.8~ 21.0	7.0~17.5	1.4~4.2
延伸率, %	1~4	19~26	15~20	5~15	1~5

(續)

	室 溫	430°C	540°C	650°C	820°C
断面收縮率, %	1~3	40~45	35~42	4~14	1~3
彈性系数 10 ⁶ , 公斤/公厘 ²	0.0308	0.0294	0.028	0.0190~ 0.0259	0.0059~ 0.0166
动荷系数 10 ⁶ , 公斤/公厘 ²	0.0308	0.028	0.0272	0.0266	0.0252
壓縮屈服强度 2%, 公斤/公厘 ²	17.5~ 21.0	14.0~ 16.1	10.5~ 13.3	6.3~8.4	0.7~2.1
壓縮系数 10 ⁶ , 公斤/公厘 ²	0.0294	0.028	0.021	0.0147~ 0.0182	0.0035~ 0.0049
扭力屈服强度 公斤/公厘 ²	8.5~ 11.9	9.1~9.8	7.0~8.4	5.6~6.3	
扭轉系数 10 ⁶ , 公斤/公厘 ²	0.0158	0.0136	0.012	0.0091	
波松系数	0.024				

挤压皱的机械性能

性 質	低温挤压	低温挤压和退火	高温挤压
抗張强度, 公斤/公厘 ² 在室温下 在540°C下	56~77 26.6~35	49~70 23.1~29.4	49~63 24.5~28
屈服强度 0.2%, 公斤/公厘 ²	57.4~66.5	31.5~45.5	23.1~35
延伸率, % 在室温下 在540°C下	0~7 20~25	2~10 30~35	5~25 15~20
壓縮屈服强度, 0.2%, 公斤/公厘 ²	59.5~63	35~42	24.5~35
波松系数	0.03	0.03	0.032
抗剪强度, 扭轉力, 公斤/公厘 ²	31.5~35	45.5~49	52.4~59.5
剪力屈服强度, 0.2%, 公斤/公厘 ²	21~24.5	12.3~14	9.8~11.2

鎳基合金

普通的高溫合金主要是以四個元素為基組合成的，即鎳基、鈷基、鉻基和鐵基，其中加有不同的合金元素。渦輪材料主要由鎳基、鈷基及鐵基合金製造。

在鎳基合金方面，由於加入鋁及鈦等元素，合金性能有顯著的改進，目前真空熔煉技術的採用，可以制取強度更高、疲勞強度及塑性好的合金。

鎳基合金的化學成分

合 金	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Cb	Ti	Al	Fe	其他
Inconel	0.04	0.35	0.20	15.5	76	—	—	—	—	—	—	7	—
Inconel W	0.04	0.60	0.25	15	75	—	—	—	—	2.5	0.6	7	—
Inconel“X”	0.04	0.7	0.3	15	73	—	—	—	0.9	2.5	0.9	7	—
Inconel“X”550 型	0.04	0.7	0.4	15	73	—	—	—	0.9	2.4	0.9	7	—
Hastelloy A	0.10	2.0	0.7	—	59	—	20	—	—	—	—	20	—
Hastelloy B*	0.10	0.8	0.7	1.0	65	—	28	—	—	—	—	5	—
Hastelloy C*	0.10	0.8	0.7	16	57	—	17	4	—	—	—	5	—
Hastelloy D*	0.10	1.0	10.0	—	85	—	—	—	—	—	—	1	4.0 Cu
Hastelloy X	0.15	—	—	22	45	—	9	—	—	—	—	其餘	—
Waspaloy	0.05	0.7	0.4	19	58	14	3	—	—	2.5	1.2	2	—
M-252	0.10	10	0.7	19	54	10	10	—	—	2.5	0.75	2	—
Hastelloy R	0.10	0.25	0.6	15	66	2.5	5	—	—	2.5	2.25	7	—
Inco 739	0.07	0.5	0.15	15.5	77	—	—	—	—	1.7	2.7	0.5	—
Inco 700	0.10	—	—	15	48	28	3	—	—	2.5	2.5	1	—
Udimet 500	0.10	—	—	19	55	14	4.25	—	—	3	3	1	—

* 鑄造狀態。

** 最大。

镍基合金的机械性能

合 金	100小时及 1000 小时的持久强度, 公斤/公厘 ²									
	649°C		732°C		816°C		871°C		982°C	
	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000
Inconel	15.5	10.1	7.4	4.7	4.0	2.6	2.9	1.9	1.7	1.1
Inconel W	41.5	26.7	—	—	9.1	—	—	—	—	—
Inconel“X”	54.8	43.6	35.2	28.1	19.7	12.7	12.7	6.3	2.3	1.6
Inconel“X” 550型	—	—	—	—	23.9	14.8	12.7	7.1	2.3	—
Hastelloy A	—	—	—	—	8.1	6.1	—	—	—	—
Hastelloy B*	35.9	28.4	24.6	17.9	13.0	8.8	—	—	—	—
Hastelloy C*	34.8	29.8	22.5	17.6	13.4	10.2	9.2	6.4	—	—
Hastelloy D*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hastelloy X	31.3	21.4	18.3	13.0	10.9	7.0	—	—	—	—
Waspalloy	—	—	37.3	—	19.0	—	12.7	—	—	—
M252	—	—	38.7	27.8	19.4	10.9	—	—	—	—
Hastelloy R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Inco 700	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Inco 739	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Udimet 500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* 鑄造的。

Inconel 是一种 76—15—8 Ni—Cr—Fe 合金, 有高的抗蝕性, 制成薄板广泛用作火焰筒套。Udimet 500 是镍基合金中强度最高的, 649°C的强度 122.5 公斤/公厘², 980°C的达到 30 公斤/公厘²。

近年来对鑄造镍基合金有極大的兴趣, 利用真空熔煉、鑄造、或在惰性气体中鑄造, 性能可提高30°C。

鈷基合金

在鈷基合金方面，近年来的成就是在真空熔煉的合金中加入少量的硼及鎢，对蠕变及塑性有显著的改进。60—30—6 Co—Cr—Mo 广泛用作鑄造渦輪的导向叶片。

鈷基合金的化学成分

合 金	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Cb	Ti	Al	Fe	其他
Vitallium	0.25	0.60	0.60	27	3	62	5	—	—	—	—	1	
L605	0.12	1.50	1.0	20	10	51	—	15	—	—	—	1	
422-19	0.40	0.60	0.60	24	16	51	6	—	—	—	—	1	
X-40	0.40	0.60	0.60	25	10	55	—	8	—	—	—	1	
L251	0.40	1.20	0.50	19	10	54	—	14.5	—	—	—	1	0.03 B

鈷基合金的机械性能

合 金	100 及 1000 小时持久强度，公斤/公厘 ²									
	649°C		732°C		816°C		871°C		982°C	
	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000
Vitallium	35.9	31.1	22.5	15.5	15.5	9.9	11.8	9.3	6.7	4.9
L605	49.2	40.8	30.2	23.2	16.2	12.0	10.9	7.4	4.9	2.6
422-19	—	—	33.1	25.3	20.1	15.2	11.1	10.4	7.0	5.0
X-40	38.7	32.3	31.6	23.2	19.9	16.5	14.8	12.7	7.9	6.9
L251	—	—	33.7	29.1	20.4	17.9	16.2	13.1	7.4	5.1

鉻基合金

近年来对高鉻合金的研究，也給以相当的注意，这是因为鉻的熔点較鈷、鎳等高，达 1950°C 。但鉻合金的制取困难，脆性是一个严重問題。就强度而論，在 1000°C ，其强度較鈷、鎳基高得多，但由于性脆，作受空气动力元件用还有困难。

鉻基合金的化学成分及高温性能

合 金	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	Fe	Ti	870°C下100及1000 小时持久强度， 公斤/公厘 ²	
									100小时	1000小时
CW382	—	—	—	60	—	20	20	—	16.9	—
CM469	0.05	—	—	60	25	—	15	—	24.6	14.8
CM554	0.30	—	—	60	15	—	25	—	14.1	—
CMT	0.10	0.50	0.60	58	25	—	15	20	32.3	26.0

鉄基合金

在鉄基合金方面通过严格的热处理及調整合金元素，在强度及蠕变强度方面均有改进。在18—8 Cr—Ni 不銹鋼中加入少量的鉬、鎢、鈮、鉭等，在1000小时的持久强度可提高1倍多。