

中国航空材料手册

CHINA AERONAUTICAL MATERIALS HANDBOOK

第 1 卷

结构钢 不锈钢

第 2 版

《中国航空材料手册》编辑委员会 编

中国标准出版社

有高品质量原材料
料才能制造出
精品产品

张笑东

發展航空工

業，材料先行

呂東

发展高科技
研制新材料

宋健



二〇〇〇年六月

發展材料科學
振興航空工業

莫文祥

发展材料工程

振兴航空工业

刘彦倬

二〇〇〇年七月

攀登材料科学高峰
加速航空工业发展

张彦仲

二〇〇〇年七月十日

顾问委员会

主任委员 师昌绪
委员 王淀佐 关 桥 刘大响 刘多朴
(按姓氏笔画排序) 李恒德 周 廉 高镇同 张立同
顾诵芬 傅恒志 曹春晓

总编辑委员会

主任委员 颜鸣皋
常务副主任委员 刘伯操 李金桂
副主任委员 吴世平 华 俊 徐炳仑 李成功
曾凡昌 吴学仁 周利珊 黄炳印
刘国普
委员 马济民 史伟琪 刘 颖 刘静安
(按姓氏笔画排序) 仲增墉 曲选辉 李志广 肖为国
汪武祥 余应梅 邹小英 陈荣章
陈润斋 郑瑞琪 赵 进 赵广文
赵振业 张凤翻 张茂松 张绍雄
张洪雁 姚俊臣 骆兴正 费洪柱
章怡宁 高 莹 寇开昌 曹寿德
韩雅芳 谢永琴 戴圣龙 戴永耀
常务编辑 赵 进 朱之琴

第2版序言

材料科学与工程是现代科学技术的重要领域,航空材料则处于材料科学与工程中最富有挑战性的研究前沿,是决定航空产品技术水平和发展的关键因素之一。

航空产品设计和制造技术的先进性在很大程度上取决于航空材料的水平,因此,航空材料是发展航空工业技术的物质基础和先导。从近百年的航空技术发展史中可以清楚地看出,新型高性能飞机、发动机和机载设备对材料提出越来越高的要求,推动着航空材料一代一代地更迭。同时,各种高性能材料的相继出现及相关热工艺、测试技术的进步,又引发了新的设计思想、设计方案并使其变为现实。如此,相互促进发展,构成了一部绚丽多彩的航空技术发展史。

为适应我国航空工业自行设计、研制航空产品的需要,在原中国航空工业部的领导下,于1988年编写出版了《中国航空材料手册》第1版。它出版发行迄今已有十几年了,“七五”至“九五”期间我国航空技术与航空材料技术有了迅猛的发展,在航空材料领域取得了一批重要成果,达到了一个新的水平。

20世纪80年代以来,疲劳耐久性,特别是损伤容限设计等新的设计思想和设计方法引入我国飞机、发动机的设计规范。与此同时,为进行结构设计开展了大量的航空材料性能与测试技术的研究,取得了一批非常宝贵的结构材料的静力、疲劳、裂纹扩展、断裂、蠕变、腐蚀及热暴露等性能参数。

以高新技术与多学科交叉为特征的航空材料技术,为满足航空产品的设计、制造、使用和维护提出的更新、更高的要求,在第1版《中国航空材料手册》的基础上进行了补充、完善、提高,编写出版体现我国航空材料最新研究应用成果和水平的第2版《中国航空材料手册》。

第2版《中国航空材料手册》是一部集先进性、综合性、可靠性与实用性于一体的大型工具书,分10卷21篇,共收入2188个材料牌号,其中新增材料牌号595个,较第1版《手册》增幅达25%。这是国家投入巨大的人力和财力,是航空工业系统和材料工业部门、中国科学院及有关高等院校的材料科技工作者几十年潜心研究的结晶,是我国飞机、发动机和机载设备设计师、制造工程师几十年来进行精心选材和应用的结果,也是高新技术研究发展的重要成果。

本《手册》的先进性是指它收录了我国几十年来研究成功的各种新型航空材料,如超高强度结构钢、新型不锈钢、铝合金、钛合金、变形高温合金、铸造高温合金(含定向凝固和单晶合金)、粉末合金、先进复合材料、高性能聚合物材料,以及某些带有发展方向性的和应用前景的新型功能材料,如形状记忆合金、非晶态软磁合金、超导材料等。

本《手册》的综合性是指它不仅包括了飞机机体、发动机、机载设备等所用的新材料,还包括了高性能的金属材料、有机和无机非金属材料;既有结构材料,又有功能材料,既有材料的物理、化学性能数据,又有材料和零部件的热、冷加工的工艺性能数据,可使读者获得对每项材料有比较全面、完整的了解。本《手册》还新增了镀覆层与防锈材料篇。

本《手册》的可靠性是指它给出的材料性能数据真实、可靠,是经过严格处理与核实的,其中多数取之于有关科研、生产、使用、维护单位的经过实践检验的数据。对一些重要的结构材料给出了平均值、标准差、变异系数、子样数和设计许用值,对某些关键结构材料还给出了A基值、B基值。

本《手册》的实用性是指按材料牌号给出了技术标准、品种规格、供应状态、应用概况和生产、使用中应注意的事项等,对合理选用材料富有参考价值。它的实用性还体现在本《手册》不仅可供航空产品设计与研制人员使用,还可供从事科研、生产、维修人员使用。对航天、兵器、船舶、汽车、仪器仪表、机械制造,以及冶金、化工、石油、建材、轻工、纺织等部门的工程技术人员也有重要参考价值,还可供有关高等院校的广大师生在教学中参考。

第2版《手册》的编撰工作,是在中国人民解放军总装备部、国防科学技术工业委员会、中国航空工业第一集团公司和第二集团公司的领导下进行的,得到了航空工业系统和有关材料工业部门厂所、院校及中国科学院有关院所的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

由于材料科学正处在蓬勃发展之中,加之编者的水平所限,不足之处在所难免,恳切期望广大读者予以批评指正。

编者

2001年6月

第1版序言

材料是现代科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。航空材料已成为材料科学中富有开拓性的一个独立分支,是航空工业现代化的物质基础,是航空工业发展速度的决定性因素之一。

航空材料集中了材料科学的精华,反映着一个国家科学技术和基础工业的综合水平,并推动整个材料科学与工业的发展,是航空产品不断改进、更新、优质和稳定生产的可靠保证。

航空材料与航空产品设计和制造的关系十分密切。新型高性能飞机和发动机的设计和制造,对材料的要求越来越高,从而推动着航空材料的发展。同时,各种新型材料的出现和工艺、测试技术的进步,又促进了新的设计方案的实现和制造技术的变革。例如,根据发动机原理,只有在增压比和涡轮前温度相匹配提高的条件下,才能获得发动机的最大单位推力,以达到提高推力和降低燃油消耗的目的。这一事实促进高温合金不断发展及钛合金的扩大应用。最终导致定向凝固及单晶合金叶片、粉末冶金涡轮盘及性能更好的钛合金等新材料、新工艺的诞生,从而为高推重比发动机的研制成功奠定了基础。

减轻结构重量对于航空产品具有特殊的意义,既可增加飞机运载能力,提高机动性能,加大航程,又可减少燃油或推进剂的消耗。比强度(σ_b/ρ)和比刚度(E/ρ)是衡量航空结构材料力学性能的一种重要指标。高强度铝合金、钛合金、铝锂合金以及先进复合材料在飞机上的应用,对减轻结构重量,提高性能具有明显效果。复合材料将更多地应用于飞机次受力构件,并逐步扩大到承力构件上,尚需要继续研究解决许多新课题。透明材料及工艺研究将为崭新的圆弧风挡座舱结构提供可靠的依据。高性能的新型燃料及润滑材料的开发,从另一角度显著提高飞机的效率。

航空零、部件的设计已逐步推行“损伤容限设计准则”,要求

提供断裂韧性、裂纹扩展速率以及模拟使用条件下的疲劳与断裂等数据。

长期以来,我国一直沿用苏联的《航空材料手册》,早已不能满足上述各项要求,远不适应航空工业发展的形势。这给设计、生产、使用和维护带来不少困难,迫切需要一部比较系统、完整的我国自己的航空材料手册。因此,编写本手册就成为航空工业发展的当务之急。

30多年来,随着航空工业的发展,航空材料研究和生产的进展也是很快的。在中国科学院和各材料工业部门所属研究院、所、工厂、高等院校等广大科研工作者的共同努力下,航空材料逐步实现了国产化、系列化,目前已基本上满足了各种型号飞机及其他航空器对材料的要求,达到了航空材料基本立足于国内的目的,走出了一条自力更生发展航空材料的道路。在长期研究、生产、使用过程中,积累了丰富的经验和大量的珍贵数据,为编写《中国航空材料手册》,打下了坚实的基础。

在航空工业部的领导下,《手册》的编写工作得到了中国科学院、冶金工业部、有色金属总公司、化学工业部、石油化工总公司、轻工业部、纺织工业部、建筑材料工业局及其所属研究院、所、工厂、高等院校等单位的大力支持。参加编辑委员会工作或承担编写任务的有各方面经验丰富的专家,提供数据、资料的单位达300多个,参加人员共有1100多人。《手册》中选录了1789个牌号的材料,其中金属材料713个,非金属材料1076个,分7卷20篇,是一部大型的、综合性的实用工具书。它的编成和出版是全国各材料工业部门大协作的结果,是航空材料系统广大科技人员和工人多年辛勤劳动的结晶。

本《手册》有以下几个特点:

1. 先进性 《手册》选录了近年来我国研制的钛合金、先进复合材料、定向凝固和单晶合金、粉末冶金等新型材料,以及某些带有发展方向的、有一定研究成果的新材料,如形状记忆合金、非晶态软磁合金、超导电材料等。列入了各科研、生产和使用单位近年来测定的各种持久、蠕变、疲劳断裂、应力腐蚀以及接近使用条件的各种模拟试验性能的大量数据,在一定程度上反映了我国航空材料研究的成就和已达到的水平。

《手册》的编写格式统一,采用数字编码,便于计算机存贮与检索。

2. 综合性 包括了金属材料、有机和无机非金属材料,既有结构材料,又有功能材料;既有物理、化学、力学性能数据,又有工艺、组织结构方面的参数和扼要描述。

3. 可靠性 所选录的数据大部分是有关科研、生产、使用单位测定和提供的,并且经过严格处理和核算。重要结构材料的拉伸强度性能还提供了A、B基值,为设计提供了许用值。

4. 实用性 按材料牌号给出了技术标准、品种规格、供应状态、应用概况和生产、使用中应注意的事项等,是一部带有标准性质的实用工具书。它不仅可供航空产品设计人员、还可供有关科研、生产和维修人员使用,并对汽车、燃气轮机、船舶、机械、仪表制造业,以及石油、化工、轻工、建材、纺织各有关部门也有重要的参考价值。

编写如此重要和内容广泛的《中国航空材料手册》还是第一次,缺乏经验,难免会出现不足之处,诚请各界广大读者批评指正,以期在增刊和再版时使它更完善,更富有实用价值。

《手册》在编写过程中,承蒙各有关单位的支持,积极提供研究报告、准确的数据、曲线、图表、资料等,在此谨向各有关单位和个人表示深切的谢意。

编 写 说 明

《中国航空材料手册》(第2版)分10卷21篇,包括结构钢、不锈钢;变形高温合金、铸造高温合金;铝合金、镁合金;钛合金、铜合金;粉末冶金材料、精密合金与功能材料;复合材料、胶粘剂;塑料、透明材料、绝缘材料;橡胶、密封剂;涂料、镀覆层与防锈材料;燃料与润滑材料、纺织材料。共2188个牌号,1100多万字,含大量数据、图表、曲线。《手册》中的数据经过严格处理,对某些重要材料,除了提供指标值和典型数据外,还提供了A、B基值。

1 取材原则

纳入《手册》材料的条件是:

- (1) 已通过鉴定并已在航空上正式使用的材料;
- (2) 虽未鉴定(非技术原因)但已在航空上正式使用的材料;
- (3) 已通过鉴定,正在或准备在航空上推广应用的材料;
- (4) 航空用关键材料,数据齐全,相近牌号在国外已有成熟使用经验的材料;
- (5) 新研制的带方向性的材料,数据齐全,正在或准备在航空上试用的材料;
- (6) 使用中已暴露出严重问题或已有明文规定停用或限用的材料不编入《手册》。

2 使用建议

为了合理选用材料,《手册》中给出了每个材料牌号的使用建议,其中“推荐”指综合性能好、有推广使用价值的先进材料;“选用”指在航空产品中已经使用,能满足设计要求的定型材料;“限用”指由于资源、性能等原因只限于某些原有产品,不能用于新设计的航空产品的材料。《手册》同时还给出了使用条件或范围的规定。

3 编写格式

《手册》中大部分材料以一个牌号为一个独立编写单元;塑料、橡胶、绝缘材料、涂料、镀覆层与防锈材料及纺织材料,也有以一类材料为一个独立

编写单元的,每个独立编写单元分章、条、款、项进行叙述。

为便于各牌号的材料的技术要求及有关数据进行交流、应用和计算机管理,各牌号的内容采用统一的标题序号编排格式。

金属材料包括结构钢、不锈钢、变形高温合金、铸造高温合金、铝合金、镁合金、钛合金、铜合金、粉末冶金材料、精密合金与功能材料。

《手册》中金属材料各牌号的编排格式如下:

1 概述

- | | |
|-------------|---------------|
| 1.1 材料牌号 | 1.5 热处理制度 |
| 1.2 相近牌号 | 1.6 品种规格与供应状态 |
| 1.3 材料的技术标准 | 1.7 熔炼与铸造工艺 |
| 1.4 化学成分 | 1.8 应用概况与特殊要求 |

2 物理及化学性能

- | | |
|---------|----------|
| 2.1 热性能 | 2.4 磁性能 |
| 2.2 密度 | 2.5 化学性能 |
| 2.3 电性能 | |

3 力学性能

- | | |
|-------------------|----------|
| 3.1 技术标准规定的性能 | 3.4 疲劳性能 |
| 3.2 室温及各种温度下的力学性能 | 3.5 弹性性能 |
| 3.3 持久和蠕变性能 | 3.6 断裂性能 |

4 组织结构

- | | |
|------------------|------------|
| 4.1 相变温度 | 4.3 合金组织结构 |
| 4.2 时间-温度-组织转变曲线 | |

5 工艺性能与要求

- | | |
|-------------|---------------|
| 5.1 成形性能 | 5.4 表面处理工艺 |
| 5.2 焊接性能 | 5.5 切削加工与磨削性能 |
| 5.3 零件热处理工艺 | |

6 功能考核试验

7 使用建议

参考文献

非金属材料包括复合材料、胶粘剂、塑料、透明材料、绝缘材料、橡胶、密封剂、涂料、镀覆层与防锈材料、燃料与润滑材料、纺织材料。

《手册》中非金属材料各牌号的编排格式如下:

1 概述

- | | |
|-------------|-------------|
| 1.1 牌号及名称 | 1.5 供应状态 |
| 1.2 基本组成 | 1.6 应用概况 |
| 1.3 材料标准 | 1.7 研制及生产单位 |
| 1.4 使用工艺说明书 | 1.8 鉴定级别及日期 |

2 性能

- | | |
|-------------|----------|
| 2.1 物理及化学性能 | 2.4 工艺性能 |
| 2.2 力学性能 | 2.5 使用性能 |
| 2.3 耐环境性能 | |

3 使用工艺

4 其他

4.1 包装

4.3 贮存

4.2 运输

4.4 技术安全

5 使用建议

参考文献

4 名词术语

《手册》中的名词术语一律采用国家标准,没有国家标准的,则参照《中国航空百科词典》有关术语。

5 量的单位与符号

《手册》中各种量的单位与符号按照 GB 3100~3102—1993 规定,单位一律采用国务院公布的法定计量单位。如有必要说明,列于相应篇的绪论之后。

《手册》中“化学成分”、“配比”所用的“%”,凡未注明的均为质量分数。

6 单位换算与数值修约

《手册》中的量,由其他单位制换算而来的,在采用法定计量单位后,应适当选择量的单位词头,一般使量的数值处于 0.1~1000 的范围内。

各种测量值或计算值的修约是按照 GB/T 8170—1987《数值修约规则》进行的。

金属材料力学性能试验数据的修约分别参照航空行业标准 HB 5143、HB 5195、HB 5212、HB 5214、HB 5215 的有关规定。

7 数据

编入《手册》的各类数据,均注有出处及相关条件,数据统计处理是参照 MIL-HDBK-5F(金属材料)和 MIL-HDBK-17B(非金属材料)进行的。

《手册》中的数据以下列方式表示:

(1) 当试样数 n 为: $3 \leq n \leq 10$ 时,以单一均值表示;

(2) 当 $10 < n < 30$ 时,以均值、最大值及最小值表示;

(3) 当 $n \geq 30$ 时,以均值、标准差及变异系数表示;

(4) 某些重要结构金属材料(高温合金、钛合金、结构钢等)的室温抗拉强度和规定非比例伸长应力,除了标准值(S基值)、典型值外,还给出了 A、B 基值、 -3σ ,其前提条件是: $n \geq 100$,并且代表几个批次(或厂家)及 10 个以上炉次。

(5) 某些重要结构非金属材料(复合材料、结构胶粘剂等)的室温抗拉强度和剪切强度,除了标准值(S基值)、典型值外,还给出了 A、B 基值,其前提条件是: $n \geq 30$,并且代表几个批次(或厂家)及 5 个以上炉次。

8 图表

《手册》中的图、表一般紧跟条文,图号及表号在每个独立编写单元内是按章的顺序编写的。曲线图上,不出现实验点者只表明趋势。

结构钢、不锈钢篇的常用量的符号及单位表

名 称	符 号	单 位	名 称	符 号	单 位
A 基值(概率 99%)	A	—	马氏体转变终止温度	M_t	°C
残余奥氏体	A_0	—	高周疲劳寿命	N	周
奥氏体转变起始温度	Ac_1	°C	低周疲劳寿命	N_f	周
奥氏体转变终止温度	Ac_3	°C	数理统计样本容量	n	—
过共析钢奥氏体转变起 始温度	A_{cm}	°C	存活率	P	%
冷却时奥氏体分解终止 温度	Ar_1	°C	压力	P	MPa
冷却时奥氏体向珠光体 转变的起始点	$A'r$	°C	应力比	R	—
冷却时奥氏体分解起始 温度	Ar_3	°C	S 基值(技术标准规定 值)	S	—
U 型缺口试样冲击功	A_K	J	子样标准差	s	—
U 形缺口试样冲击韧 性值	a_{KU}	kJ/m^2	真实断裂强度	S_K	MPa
V 形缺口试样冲击韧 性值	a_{KV}	kJ/m^2	热力学温度	T	K
B 基值(概率 90%)	B	—	质量分数	w	%
贝氏体转变起始温度	B_s	°C	子样平均值	\bar{X}	—
贝氏体转变终止温度	B_f	°C	平面角	α, β, γ	°
变异(离散)系数	C_v	—	厚度	B	mm
直径	d	mm	断后伸长率	δ_5, δ_{10}	%
疲劳裂纹扩展速率	da/dN	mm/周	弹性蠕变变形	δ_e	%
应力腐蚀裂纹扩展速率	da/dt	m/s	残余蠕变变形	δ_p	%
弹性模量(静态)	E	GPa	总蠕变变形	δ_t	%
弹性模量(动态)	E_D	GPa	应力强度因子	K	MPa $\sqrt{\text{m}}$
切变模量	G	GPa	应力强度因子范围	ΔK	MPa $\sqrt{\text{m}}$
布氏硬度值	HBS, HBW	—	疲劳裂纹扩展门槛值	ΔK_{th}	MPa $\sqrt{\text{m}}$
洛氏硬度值	HRA, HRB, HRC	—	弹性应变范围	$\Delta \epsilon_e$	%
维氏硬度值	HV	—	塑性应变范围	$\Delta \epsilon_p$	%
平面应变断裂韧度	K_{Ic}	MPa $\sqrt{\text{m}}$	总应变范围	$\Delta \epsilon_t$	%
应力腐蚀断裂韧度	K_{Isc}	MPa $\sqrt{\text{m}}$	线应变	ϵ	%
平面应力断裂韧度	K_{Ic}	MPa $\sqrt{\text{m}}$	压力加工变形率, 冷变形 率	ϵ	%
平面应变条件断裂韧度	K_{Ic}	MPa $\sqrt{\text{m}}$	缺口试样倾斜拉伸强度	η	%
理论应力集中系数	K_t	—	下降率		
马氏体转变起始温度	M_s	°C	试验温度	θ	°C, K
			泊松比	μ	—
			比例极限	σ_p	MPa

续表

名 称	符 号	单 位	名 称	符 号	单 位
规定非比例伸长应力	$\sigma_{P0.1}, \sigma_{P0.2}, \sigma_{P0.01}$	MPa	扭转条件比例极限	$\tau_{0.01}$	MPa
旋转弯曲条件疲劳极限	σ_{-1}	MPa	扭转屈服强度	$\tau_{0.3}$	MPa
旋转弯曲缺口疲劳极限	σ_{-1H}	MPa	抗扭强度	τ_b	MPa
压缩屈服强度	$\sigma_{-P0.2}$	MPa	扭转疲劳极限	τ_{-1}	MPa
应力幅	σ_a	MPa	断面收缩率	ψ	%
应力范围	$\Delta\sigma$	MPa	氧化增重, 腐蚀失重	—	$g/m^2,$ mg/cm^2
抗拉强度	σ_b	MPa	氧化速率, 腐蚀速率	—	$g/(m^2 \cdot h)$
抗压强度	σ_{-b}	MPa	腐蚀速度	—	mm/a (毫米/年)
抗弯强度	σ_{bb}	MPa	原子百分数	—	at%
缺口抗拉强度	σ_{bH}	MPa	晶粒度	—	级
最大正应力	σ_{max}	MPa	热导率	λ	$W/(m \cdot ^\circ C)$
最小正应力	σ_{min}	MPa	比热容	C	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
平均正应力	σ_m	MPa	密度	ρ	g/cm^3
持久强度极限	σ_r^0	MPa	线膨胀系数	α	$^\circ C^{-1}$
缺口持久强度极限	σ_{rH}^0	MPa	电阻率	ρ	$\Omega \cdot m$
蠕变极限	$\sigma_{\delta/t}^0$	MPa	磁导率	μ	H/m
抗弯强度	σ_w	MPa			
切应力、抗剪切强度	τ	MPa			