



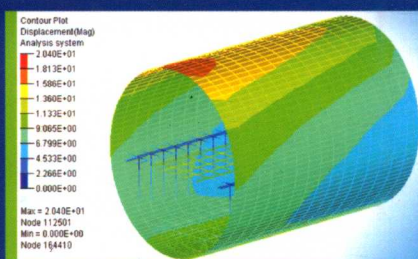
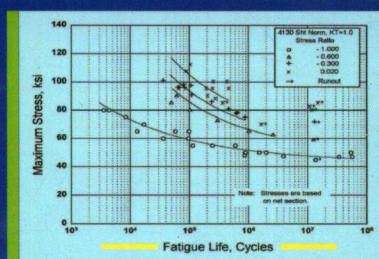
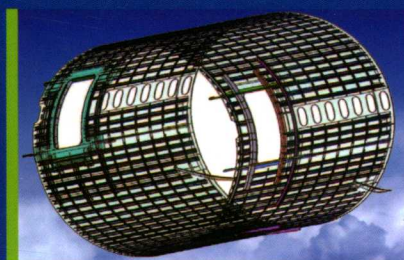
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



民机结构分析和设计

第 1 册

民机材料和结构性能数据手册



秦福光 主 编
张嘉振 胡震东 副主编



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机结构分析和设计

第 1 册

民机材料和结构性能数据手册

秦福光 主 编

张嘉振 胡震东 副主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是民机材料和结构性能数据方面的参考书,主要包含以下内容:①民机材料性能测试标准及认证流程,介绍民用飞机结构常用的金属及复合材料力学性能测试标准,试验样本选择原则和数据统计处理方法及材料性能适航取证流程;②关键结构材料设计用力学性能,囊括 13 种飞机结构常用材料的常用力学性能数据;③材料性能数据的可靠性分析及有效利用研究,介绍不同母体特性的统计推断技术及高置信度设计许用值求取方法,为试验数据处理提供参考;④典型结构细节应力集中系数计算方法,给出应力集中系数的计算方法及典型结构的具体求解;⑤民机典型结构应力强度因子的计算方法,除计算方法外,还根据实际工作经验给出一些典型结构应力强度因子的计算算例;⑥民机典型结构裂纹扩展及含裂纹结构件剩余强度分析技术,给出含裂纹结构裂纹扩展及剩余强度的计算方法及相应算例。

本书可供民机结构设计及强度计算人员参考,也可作为民机结构维护、维修领域相关人员的辅助工具书。

图书在版编目(CIP)数据

民机结构分析和设计. 第 1 册, 民机材料和结构性能
数据手册 / 秦福光主编. -- 北京: 北京航空航天大学
出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-5124-1763-2

I. ①民… II. ①秦… III. ①民用飞机—航空材料—
技术手册②民用飞机—结构性能—数据—技术手册 IV.
①V271-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 082727 号

版权所有,侵权必究。

民机结构分析和设计

第 1 册

民机材料和结构性能数据手册

秦福光 主 编

张嘉振 胡震东 副主编

责任编辑 张艳学 陈守平

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京宏伟双华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:889×1 194 1/16 印张:23.5 字数:760 千字

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-1763-2 定价:130.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

《民机结构分析和设计手册》

编写委员会

主 任 杜善义

副主任 李东升 梁 波 姜丽萍 朱广荣

主 编 秦福光

副主编 张嘉振 胡震东

编 委 周良道 刘建中 董登科 周振功 张博明 汪 海

编写人员

《民机材料和结构性能数据手册》

张金玲	齐 绿	魏绎邴	李 明	王 裕	马立敏	王新林	向敬忠
宋 欣	潘承怡	吴雪峰	戴 野	沙 宇	白士刚	韩建勇	王亚辉
魏 东	王 涛	朱 辉	孔泳力	赵岩成	李振远	沈 阳	陈杨柳
高梦瑾	董登科	张 侃	陈 安	窦秋芳	张海英	刘建中	陈 勃
高倩倩	胡本润						

《民机结构分析手册》

冯 娟	刘 倩	王安俊	肖 浩	苏怀忠	邱 菊	杨洪琴	李忠峰
史 前	张继鹏	王 玥	赵 元	王时玉	祖士明	刘海涛	余 音
刘魏光	刘龙权	彭 蒙	于哲峰	陈 艳	宁宝军	唐占文	于雅琳
郭艳丽	祁国成	孟姗姗	甘民可				

《民机结构设计手册》

郭红军	包伟英	温顺达	姬杨玲	侯亚峰	黄海龙	许 延	谷 斌
王 裕	聂 磊	汤家力	赵 毅	朱林刚	刘朝妮	刘衰财	汪 洋
李 强	季佳佳	徐东明	刘长玮	方 芳			

序

《运输类飞机适航标准》对民用飞机(简称“民机”)的研制提出了通用性原则和基本的安全性要求,对民机结构材料的性能、结构分析和设计方法都有明确的要求。

民用飞机研制需要准确的材料设计许用值与结构设计参数,以规范民机结构设计,保证分析和计算结果的可比性和可靠性。随着飞机设计思想的进步和技术水平的提高,对飞机结构材料性能的要求也越来越高。目前,我国民机研制还没有一部系统的、能够满足适航要求的民机材料和结构性能手册。

随着世界民机市场竞争的不断加剧,现代的民机结构不断朝着轻量化、长寿命和高可靠性方向发展,其结构分析和设计方法也随着设计水平的提高、材料性能的改善而改变。结构分析和设计手册作为民用飞机设计公司的设计基础及依据,直接关系到民机的产品质量和市场竞争能力。国外飞机设计公司将多年的设计经验固化在其分析和设计手册中,通过手册进行知识和经验的传承,以满足其不断发展的需要。我国的民机发展战略刚刚确立,迫切需要一套完整、系统的民机结构设计分析方面的手册,为民机在研制过程中提供基础数据和有关设计规范,推进民机研制的顺利开展。在一定意义上,编写民机结构分析和设计手册是我国民机发展方面一项重要的技术和工程建设,能够为我国民机研制、特别是适航取证提供重要技术支撑,推动我国民机研制技术的快速发展,具有重要而深远的意义。

《民机结构分析和设计》编写组通过走访我国航空工业集团和中国商飞公司一线的有关设计和研制人员,充分了解了国内现有手册的优点及不足,在此基础上提出了本手册的编制思路。首先,研究了《运输类飞机适航标准》对民机结构设计的具体要求,用适航的要求对材料、结构、强度和试验等流程的经验进行总结;然后,充分借鉴了中国商飞公司在研的型号 ARJ21 和 C919 的结构分析和设计经验,结合工程实际,针对典型的飞机结构,用大量的设计和分析实例对问题进行深入说明,方便结构分析和设计工程师深入体会和理解各种结构的分析和设计方法;最后,收集和整理了大量的国外文献和资料,引用了包括 MMPDS、MIL-HDBK-17、ESDU 等大量数据、方法和标准。

编制手册是一项系统工程,需要长期的投入和不断更新,编写组收集和整理了大量的资料,完成了《民机结构分析和设计》的编写。但是,民机的材料、结构设计和分析技术日新月异,随着民机技术的发展,还需要不断对手册内容进行更新,使其更具有参考价值。相信此手册对我国民机的研制和发展定会起到重要的推动作用。

中国工程院院士 杜善义

前 言

材料和结构性能是飞机设计的基石。世界各主要民用飞机(简称“民机”)生产国家都已经编撰了完善的材料和结构性能手册,并且不断对其进行更新和细化,使之成为民用飞机设计的坚实基础。

在 ARJ21 和 C919 的研制过程中,中国商飞公司目前主要采用国外手册提供的材料性能数据进行分析和设计。《民机材料和结构性能数据手册》的编制旨在满足适航要求,并为我国民用飞机的研制和适航取证工作提供技术支持。

本书收集整理了型号采用或准备采用的结构材料力学及疲劳和损伤容限性能,并从民机材料性能适航审定要求出发,介绍了民机材料性能测试标准及认证流程,对典型民机结构应力集中系数和应力强度因子进行了收集和整理,对民机典型结构裂纹扩展分析技术进行了研究。

在本书的编制和修改过程中,得到了北京航空材料研究院、中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院、中航工业飞机强度研究所等单位的大力支持,特别得到杜善义院士的专门指导和极大帮助,在此一并感谢。

由于水平和资源的限制,书中错误、疏漏和不合适之处,请使用者指正。

编 者

2016 年 12 月

目 录

第 1 章 民机材料性能测试标准及认证流程

1.0 符号说明	1
1.1 金属材料静态力学性能测试标准	4
1.1.1 ASTM E 8(金属材料拉伸试验方法)	4
1.1.2 ASTM E 9(金属材料压缩试验方法)	7
1.1.3 ASTM E 111(杨氏模量、切向模量和弦向模量测试方法)	9
1.1.4 ASTM E 143(金属材料室温剪切模量测试方法)	11
1.1.5 ASTM E 238(金属材料挤压性能测试方法)	13
1.1.6 ASTM G 34(2×××系列和 7×××系列铝合金剥离腐蚀敏感性测试方法)	15
1.1.7 ASTM G 47(高强铝合金应力腐蚀敏感性测试方法)	16
1.1.8 ASTM B 769(金属材料剪切试验方法)	17
1.1.9 ASTM B 831(金属材料薄板剪切试验方法)	19
1.2 金属材料疲劳性能测试标准	20
1.2.1 ASTM E 466(金属材料疲劳试验方法)	20
1.2.2 ASTM E 561(金属材料 R 曲线试验方法)	23
1.2.3 ASTM E 606(金属材料疲劳性能应变控制试验方法)	26
1.2.4 ASTM E 647(金属材料疲劳裂纹扩展试验方法)	29
1.2.5 ASTM E 739(金属材料疲劳试验数据统计方法)	33
1.3 金属材料断裂力学性能测试标准 ASTM E 399 及金属材料断裂韧性试验方法	36
1.4 复合材料层合板结构力学性能测试标准 ASTM D 3039/D 3039M-07 及聚合物基 复合材料拉伸性能标准试验方法	39
1.5 聚合物基复合材料吸湿性能和浸润平衡的标准试验方法	51
1.6 金属材料高温拉伸试验方法	59
1.7 夹层结构或芯子剪切性能试验方法	64
1.8 夹层结构平拉强度试验方法	68
1.9 试验样本的选择原则及数据统计处理方法	70
1.9.1 金属材料	70
1.9.2 复合材料	70
1.10 材料性能适航取证流程	71
1.10.1 试验责任部门	71
1.10.2 试验负责人	73
1.10.3 承制单位	73
1.10.4 试验承制单位	73
参考文献	74

第2章 关键结构材料设计用力学性能

2.0 符号说明	77
2.0.1 普通符号	77
2.0.2 铝合金状态/热处理符号及命名法	78
2.1 铝合金设计用力学性能	79
2.1.1 2000 系列铝合金	79
2.1.2 7000 系列铝合金	101
2.1.3 新型合金	134
2.2 钛合金数据	134
2.3 15-5PH 不锈钢	153
参考文献	156

第3章 材料性能数据的可靠性分析及有效利用研究

3.0 符号说明	157
3.1 小子样母体特性的统计推断技术	159
3.1.1 小子样母体特性及置信下限求取	160
3.1.2 其他相关技术	164
3.2 不同数据来源与样本量条件下的母体推断技术	169
3.2.1 异常数据检测	170
3.2.2 k 样本 Anderson-Darling 检验	171
3.2.3 其他样本检验方法	173
3.3 高置信度的设计许用值求取方法	174
3.3.1 非结构数据的基准值求取	176
3.3.2 结构数据的基准值计算方法	180
参考文献	183

第4章 典型结构细节应力集中系数计算方法

4.0 符号说明	185
4.1 应力集中系数计算方法	188
4.1.1 二维问题的应力集中系数	189
4.1.2 三维问题的应力集中系数	190
4.1.3 接触问题的应力集中系数	191
4.1.4 有限元法求解应力集中系数的建模规范及流程	192
4.2 典型圆截面轴应力集中系数	193
4.2.1 含一个圆弧台阶的实心圆柱	193
4.2.2 含贯穿孔的实心圆柱	200
4.2.3 含贯穿孔的空心圆柱	203
4.2.4 含半圆沟槽的实心圆柱	207
4.2.5 含半圆沟槽的空心圆柱	219
4.2.6 含两个圆弧台阶的实心圆柱	220
4.3 耳片的应力集中系数	221

4.4 含钻孔的板的应力集中系数	224
4.4.1 含一个圆孔的无限板	224
4.4.2 含 n 个圆孔的无限板	254
4.4.3 含一个圆孔的有限板	261
4.4.4 含两个不同圆孔的无限板	269
4.5 开口板的应力集中系数	271
4.5.1 含两个对称倒圆角的板	271
4.5.2 含四个对称倒圆角的板	275
4.5.3 含一个半圆形开口的板	281
4.5.4 含两个半圆形开口的板	287
4.5.5 含椭圆形翻新加工的半无限板	292
4.5.6 含一个倒圆角的板	292
4.5.7 含椭圆翻新加工的无限板	296
4.6 螺栓和铆钉组的应力集中系数	305
参考文献	307

第5章 民机典型结构应力强度因子的计算方法

5.0 符号说明	309
5.1 应力强度因子基础理论	310
5.1.1 叠加原理	310
5.1.2 权函数法	311
5.1.3 能量释放率	312
5.1.4 裂纹尖端张开位移	313
5.1.5 J 积分(J - integral)	313
5.1.6 M 积分(M - integral)	314
5.1.7 C^* 积分(C^* - integral)	315
5.1.8 交互积分(Interaction Integral Method)	316
5.1.9 虚拟裂纹闭合法(VCCT)	316
5.2 应力强度因子计算方法	317
5.2.1 有限元方法	317
5.2.2 工程法	317
5.2.3 试验方法	318
5.3 应力强度因子分析步骤及算例	318
5.3.1 应力强度因子分析步骤	318
5.3.2 实例分析	319
5.4 总 结	326
参考文献	326

第6章 民机典型结构裂纹扩展及含裂纹结构件剩余强度分析技术

6.0 符号说明	327
6.1 民机典型结构裂纹扩展分析技术	328
6.1.1 基本原理和特征	328

6.1.2	裂纹扩展速率基本方程	329
6.1.3	高载迟滞模型	330
6.1.4	裂纹扩展寿命计算方法	336
6.1.5	裂纹扩展分析步骤及算例	338
6.2	含裂纹结构件剩余强度分析	343
6.2.1	剩余强度概要	343
6.2.2	剩余强度分析相关适航要求分析	344
6.2.3	剩余强度分析原理	345
6.2.4	剩余强度许用值	348
6.2.5	剩余强度分析步骤	351
6.2.6	算 例	353
6.2.7	总 结	364
参考文献		364

第 1 章 民机材料性能测试标准及认证流程

1.0 符号说明

符号	单位 ^①	物理意义
A	mm[in]	工作段长度
A	mm ² [in ²]	横截面积
A	mm ² [in ²]	平均横截面积
A_0	mm ² [in ²]	原始横截面积
$\hat{A}$		A 的估计值
$\bar{X}$		X 平均值
a_0	mm[in]	试样初始的裂纹尺寸
w		
YS		屈服强度 GPa[psi]
a_e	mm[in]	试样有效裂纹尺寸
a_p	mm[in]	物理裂纹长度
Δa_e	mm[in]	裂纹扩展增量
B	mm[in]	夹持段长度
B	mm[in]	试件厚度
B_N	mm[in]	侧槽试样厚度
B_y	%	关于试样 y 轴(窄平面)的弯曲百分比
B_z	%	关于试样 z 轴(宽平面)的弯曲百分比
B_{total}	%	总弯曲量
b		疲劳强度指数
C	mm[in]	夹持段宽度(近似)规范化的 K 梯度
CV	%	样本母体统计离散系数
c		疲劳延性指数
Δc	mm[in]	拉伸增量
D	mm[in]	直径
D_0	mm[in]	圆管外部直径
D_i	mm[in]	圆管内部直径
d	mm[in]	直径
da/dN	mm/cycle	疲劳裂纹扩展速率
E	GPa [psi]	杨氏模量
E^{chord}	GPa [psi]	弦向拉伸弹性模量
E^*	GPa [psi]	循环弹性模量
E_{NC}	GPa [psi]	压缩弹性模量
E_{NT}	GPa [psi]	拉伸弹性模量

① 本书的量和单位以中华人民共和国国家标准为准,但考虑到在实际设计工作中,很多资料(尤其是外版资料)大量应用英制单位,为方便读者使用,亦保留部分英制单位。

符号	单位	物理意义
E_{eff}	GPa [psi]	有效弹性模量
F_{tu}	MPa [ksi]	试验方向的极限拉伸应力
F_{su}	MPa [ksi]	试验方向的极限剪切强度(取最小值)
G	mm[in]	标距
G	GPa[psi]	试样剪切模量
h	mm[in]	试样厚度
J	mm ⁴ [in ⁴]	中心部分惯性极矩 对子数
K	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	比例极限以下使 $\theta - T/K$ 接近常数所选择的常数
K_{max}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	应力强度因子 最大应力强度因子
K'	MPa[ksi]	循环强度系数
K_{app}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	表观断裂韧度
K_{c}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	平面应力断裂韧度
K_{IC}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	平面应变断裂韧度
K_{Q}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	条件断裂韧度
K_{R}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	裂纹扩展阻力
K_{t}		理论应力集中系数
$\dot{K}_{\text{I}}$	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} · s ⁻¹ [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$} · s ⁻¹]	加载速率
ΔK	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	裂纹尖端应力强度因子
ΔK_{I}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	应力强度因子范围
ΔK_{th}	MPa · m ^{$\frac{1}{2}$} [ksi · in ^{$\frac{1}{2}$}]	疲劳裂纹扩展门槛值
L	mm[in]	总长
L	mm[in]	标距
L_{min}	mm[in]	所需粘贴式加强片的最小长度
L_0	mm[in]	原始标距长度
L_{g}	mm[in]	引伸计标距
N	cycle	循环次数
N	cycle	疲劳寿命
N	cycle	试样数量
N_{f}	cycle	失效(或破坏)循环次数
$2N_{\text{f}}$	cycle	失效(或破坏)的反复次数
n		自由度
n'		循环强度指数
P	N[lbf]	载荷
P_{max}	N[lbf]	最大载荷
P_i	N[lbf]	第 i 个数据点的力
P_0	N[lbf]	条件载荷
Δp	N[lbf]	力的增量
R	mm[in]	过渡半径
R_v		线性相关系数
R_v		净截面应力有效准则
r	mm[in]	过度圆弧半径

符号	单位	物理意义
S	MPa[ksi]	剪切强度
S_{n-1}		样本的标准差
T	mm[in]	厚度
	N · m[lbf · in]	转矩
ΔT	N · m[lbf · in]	扭矩增量
W	mm[in]	试样宽度
X	%	加载轴向应变
$\bar{X}$	%	加载轴向应变均值
$\bar{x}$		样本平均值
x_i		测量或导出的性能值
Y	MPa[ksi]	加载轴向应力
$\bar{Y}$	MPa[ksi]	加载轴向应力均值
δ	mm[in]	偏离量
δ_i	mm[in]	第 i 个数据点的引伸计位移
$\Delta\delta$	mm[in]	偏移增量
θ	°	扭转角
$\Delta\theta$	°	扭转角增量
ϵ	%	真实应变
ϵ_1	%	应变计 1 的纵向应变值
ϵ_2	%	应变计 2 的纵向应变值
ϵ_3	%	应变计 3 的纵向应变值
ϵ_{ave}	%	平均计算应变
ϵ_f	%	正面传感器显示的应变
ϵ_b	%	背面传感器显示的应变
ϵ_i	%	第 i 个数据点的拉伸应变
$\Delta\epsilon$	%	应变增量
$\Delta\epsilon_t$	%	两个纵向应变点间横向应变差值
$\Delta\epsilon_l$	%	两个纵向应变点间纵向应变差值
$\Delta\epsilon/2$	%	应变幅
$\Delta\epsilon_t/2$	%	总应变幅
$\Delta\epsilon_e/2$	%	弹性应变幅
$\Delta\epsilon_p/2$	%	塑性应变幅
ϵ'_f	%	疲劳延性系数
μ, ν		泊松比
ρ	mm [in]	塑性区尺寸
$\Delta\sigma$	MPa [ksi]	应力增量
$\Delta\sigma/2$	MPa [ksi]	应力幅
σ_{net}	MPa [ksi]	截面屈服强度
σ_{FS}	MPa [ksi]	有效屈服强度
σ_{YS}	MPa [ksi]	屈服强度
σ_{ULT}	MPa [ksi]	极限强度
σ'_f	MPa [ksi]	疲劳强度系数
σ_i	MPa [ksi]	第 i 个数据点的拉伸应力
ϕ	mm [in]	直径

1.1 金属材料静态力学性能测试标准

1.1.1 ASTM E 8 (金属材料拉伸试验方法)

1. 适用范围

本标准适用于室温下任意形式的金属材料拉伸试验,规定了屈服点延伸率、屈服强度、拉伸强度、断面收缩率和延伸率的测定方法。大多数的圆形截面试样 E8 方法选用 4D 标距,E8M 方法选用 5D 标距,E8 与 E8M 最大的区别是标距长度不同。对于特殊材料指定规范或试验方法时,可能需其他试验方法,如: A370、B557、B557M。温度范围为 10~38 ℃,可以使用国际单位(SI)和英制单位(BS)。

2. 测试方法概要

本试验方法通过对试样施加单轴拉应力得到材料强度和延性数据,绘制应力-应变曲线。根据试样大小及形状选择对应的试验机、夹具,控制试验过程中的试验速率,得到试验数据。试验数据主要包括拉伸强度、屈服强度、弹性模量、延伸率、断面收缩率等。

3. 试验设备

试验设备主要包括试验机、夹持装置、尺寸测量装置、引伸计等。试验机要求符合 E4 标准,测量抗拉强度、屈服强度时,使用的载荷应在 E4 要求的试验机载荷之内。多种类型的夹持装置都可以用来传递试验机对试样所施加的载荷,为保证标距内的轴向拉应力,试样轴线应与试验机头部中心线一致。标准中主要给出了楔形夹具、用于螺纹和台肩试样及脆性材料的夹具、薄板夹具、线形夹具等。尺寸测量装置要求使用测量直线尺寸的千分尺或其他装置,至少应达到每个要求测量尺寸的最小单位一半的精度。用在拉伸试验中的引伸计应满足方法 E83 里的相关章节对引伸计分级的规定;屈服强度和断裂延伸率对应的应变应使用引伸计测量。

4. 试样要求

试样应按需要试验的材料产品技术条件,使用实际全尺寸或机械加工的尺寸。拉伸试样可采用多种形式,主要包括板状试样、薄板试样、棒状试样、带状试样、扁线状试样等。这里主要对使用广泛的板状试样及棒状试样进行阐述。图 1.1-1 和图 1.1-2 分别为矩形拉伸试样和标准圆形试样示意图,其尺寸见表 1.1-1、表 1.1-2。

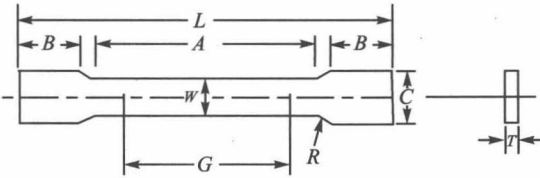


图 1.1-1 矩形拉伸试样

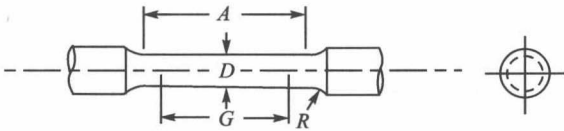


图 1.1-2 标准圆形试样

试样取样位置要求,试样轴线在母材中位置应满足:

- 1) 厚度、直径或两面间距 $\leq 40\text{mm}$ [1.500in]的试样,位于母材中心;
- 2) 厚度、直径或两面间距 $\geq 40\text{mm}$ [1.500in]的试样,位于母材中心到表面的中间位置。

表 1.1-1 矩形拉伸试样尺寸

尺寸/mm[in]			
标准试样		小试样	
名义宽度	板型 40[1.5]宽	薄板型 12.5[0.500]宽	6[0.250]宽
G——标距	200.0±0.2 [8.00±0.01]	50.0±0.1 [2.000±0.005]	25.0±0.1 [1.000±0.003]
W——宽度	40.0±2.0 [1.500±0.125,-0.250]	12.5±0.2 [0.500±0.010]	6.0±0.1 [0.250±0.005]
T——厚度	—	材料的厚度	—
R——过渡半径,最小	25[1]	12.5[0.500]	6[0.250]
L——总长,最小	450[18]	200[8]	100[4]
A——工作段长度,最小	225[9]	57[2.25]	32[1.25]
B——夹持段长度,最小	75[3]	50[2]	30[1.25]
C——夹持段宽度,近似	50[2]	20[0.750]	10[0.375]

表 1.1-2 标准圆形试样及与标准试样成比例的小尺寸试样范例

尺寸/mm[in]					
对于标距长度为直径 4 倍的试样(E8)					
	标准试样			与标准试样成比例的小试样	
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
G——标距	50.0±0.1 [2.000±0.005]	36.0±0.1 [1.400±0.005]	24.0±0.1 [1.000±0.005]	16.0±0.1 [0.640±0.005]	10.0±0.1 [0.450±0.005]
D——直径	12.5±0.2 [0.500±0.010]	9.0±0.1 [0.350±0.007]	6.0±0.1 [0.250±0.005]	4.0±0.1 [0.160±0.003]	2.5±0.1 [0.113±0.002]
R——过渡半径,最小	10[0.375]	8[0.25]	6[0.188]	4[0.156]	2[0.094]
A——工作段长度,最小	56[2.25]	45[1.75]	30[1.25]	20[0.75]	16[0.625]
G——标距	62.5±0.1 [2.500±0.005]	45.0±0.1 [1.750±0.005]	30.0±0.1 [1.250±0.005]	20.0±0.1 [0.800±0.005]	12.5±0.1 [0.565±0.005]
D——直径	12.5±0.2 [0.500±0.010]	9.0±0.1 [0.350±0.007]	6.0±0.1 [0.250±0.005]	4.0±0.1 [0.160±0.003]	2.5±0.1 [0.113±0.002]
R——过渡半径,最小	10[0.375]	8[0.25]	6[0.188]	4[0.156]	2[0.094]
A——工作段长度,最小	75[3.0]	54[2.0]	36[1.4]	24[1.0]	20[0.75]

在试样加工方面,为了避免影响测试结果,试样工作段应不含加工硬化、缺口、擦伤、刀痕、毛刺、粗糙表面或尖角等有害缺陷;对矩形截面的试样工作段,倒角不能造成实际截面与计算截面有较大误差;对脆性材料,标距两端应使用半径较大的过渡圆弧;为确保断裂在标距内,试样工作段中部的横截面积应最小,在试样工作段允许有微小的锥度。在试样表面光洁度方面,当测试材料按表面状态而非加工状态要求时,表面光洁度应符合试样规范的要求。

5. 试验程序

启动试验机,进行适当预热以使其达到正常的工作温度,从而降低过渡状态引起的误差。取试样工作段中

心位置的横截面积作为计算值。对于小于 5 mm[0.188 in] 试样的仲裁验证,以最小截面处测得的尺寸为准。测量及记录拉伸试样横截面尺寸如下:

- 1) 试样的尺寸 ≥ 5 mm[0.200 in], 精确至 0.02 mm[0.001 in];
- 2) 2.5 mm[0.100 in] $\leq$ 试样尺寸 < 5 mm[0.200 in], 精确至 0.01 mm[0.000 5 in];
- 3) 0.5 mm[0.020 in] $\leq$ 试样尺寸 < 2.5 mm[0.100 in], 精确至 0.002 mm[0.000 1 in];
- 4) 试样尺寸 < 0.5 mm[0.020 in], 至少应精确至 1% 且任何情况不小于 0.002 mm[0.000 1 in]。

通过称重测量具有不对称全尺寸试样的横截面积,长度不小于最大横截面尺寸的 20 倍,质量的测定应精确至 0.5% 或更高精度。试样横截面积等于材料的质量除以长度及密度。对于管壁试样,横截面积计算另行规定。标距的标记一般用打点机轻轻打点,或使用分线规或墨水划线;对缺口敏感的材料及小试样,在记号的位置涂上涂料有助于定位断裂后的原始标距标记。对延伸率小于等于 3% 的材料,试验前原始标距长度精确至 0.05 mm[0.002 in]。试验前,试验机应调零,对有缩减截面试样,试样只可夹持在夹持段,避免夹持在工作段或过渡段影响试验结果。

试验速率主要包括以下几种:

- 1) 试样的应变速率;
- 2) 试样的应力速率;
- 3) 十字头速率;
- 4) 通过完成部分或全部试验经历时间计算的速率;
- 5) 十字头的自由移动速率(空载时试验机十字头移动速率)。

在测定屈服性能时,应力速率法要求控制在 $1.15 \sim 11.5$ MPa/s[10 000 ~ 100 000 psi/min] 范围内;应变速率法要求速率控制在 (0.015 ± 0.006) mm $\cdot$ mm⁻¹ $\cdot$ min⁻¹[in $\cdot$ in $\cdot$ min⁻¹];十字头速度控制法要求十字头速率等于 (0.015 ± 0.003) mm $\cdot$ mm⁻¹ $\cdot$ min⁻¹[in $\cdot$ in $\cdot$ min⁻¹] 工作段或试样非工作段夹头之间的距离。在测量抗拉强度时,试验机速率设置在 $0.05 \sim 0.5$ mm $\cdot$ mm⁻¹ $\cdot$ min⁻¹[in $\cdot$ in $\cdot$ min⁻¹] 范围之内,此速率是相对工作段长度的相对值。

6. 试验结果

测试的试验结果主要包括屈服强度、屈服点延伸率、总延伸率、拉伸强度等。以下主要介绍测量屈服强度的平移法。使用平移法确定屈服强度,首先应保存绘制应力-应变曲线的数据,如图 1.1-3 所示。在图上取

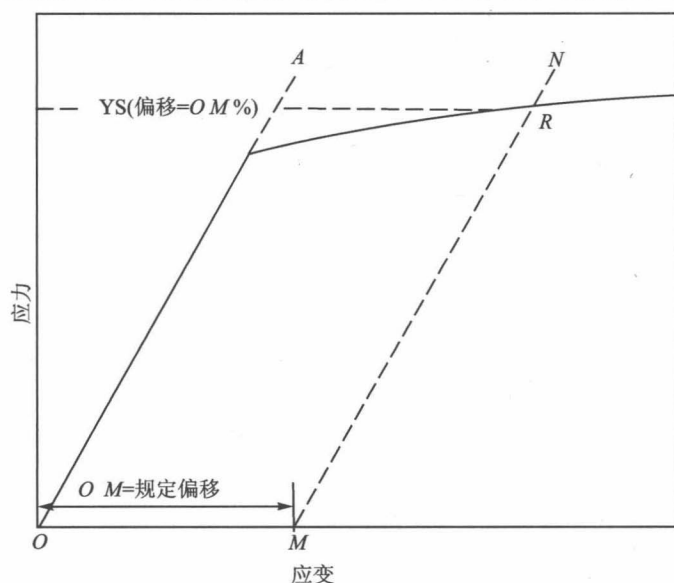


图 1.1-3 使用平移法确定屈服强度的应力-应变图

OM 等于指定平移值,作 MN 平行于 OA,定位 MN 与曲线交点 R。用此方法得到屈服强度值,应在屈服强度后的圆括弧内注明规定的平移值。除此方法外,确定屈服强度的方法还有下伸长法、自动绘图法、载荷停顿法。

试验结果有效数字修约规则如下:

屈服强度及拉伸强度应按方法 E29 试样规范的要求来进行数值修约。规范未作要求时,推荐选择如下规则中的一种修约:

试验结果 500 MPa[50 000 psi]以下,修约至 1 MPa[100 psi];

500~1 000 MPa[50 000~100 000 psi],修约至 5 MPa[500 psi];

1 000 MPa[100 000 psi]以上,修约至 10 MPa[1 000 psi]。

断面收缩率按 E29 或产品规范要求来修约。规范未作要求时,推荐如下:

在 0%~10%之间,修约至 0.5%;大于等于 10%时,修约至 1%。

7. 试验报告

试验报告包括如下内容:

- 1) 引用标准;
- 2) 材料和试样的合格证;
- 3) 试样类型;
- 4) 屈服强度和测定屈服强度的方法;
- 5) 屈服点延伸率;
- 6) 拉伸强度;
- 7) 延伸率;
- 8) 均匀延伸率(如需要);
- 9) 断面收缩率(如需要)。

如有要求时,应包含如下信息:

- 1) 试样工作段尺寸;
- 2) 从大直径管状产品上所取矩形试样,列出计算横截面积的公式;
- 3) 确定试验速率的速率值及方法;
- 4) 试验结果修约方法;
- 5) 替代试样的原因。

1.1.2 ASTM E 9 (金属材料压缩试验方法)

1. 适用范围

本标准适用于室温下金属材料的轴向压缩测试,涵盖了设备、试样及流程。对于碳化物的其他要求,以英寸-英镑为单位的数值作标准,标准中引用的 SI 等效数值取近似值。标准不对试验中的安全问题负责。

2. 测试方法概要

本试验方法通过对试样施加轴向压载荷及对连续或有限增加的载荷与应变的监控来确定压缩性能。压缩试验的数据包括屈服强度、屈服点、杨氏模量、应力-应变曲线及压缩强度。为防止材料在压缩时不经粉碎就断裂失效,压缩强度应与总应变及试样几何形状相关。

3. 试验设备

(1) 试验机

压缩试验使用的测试设备应符合 E4 规定。对于具有常规测试空间的通用设备,压缩中应进行校正操作。在未指定校准设备时,测试机头部的承载表面应一直保持 0.000 2 mm/mm[in/in]平行度。

(2) 承载块

压缩试样的两端应支撑在具有表面平滑且平行度为 0.0002 mm/mm[in/in]的承载块上,通过使用校正的