

金属机械性能

第一册

[苏] Я. Б. 弗里德曼 著



机械工业出版社

金属机械性能

第一册

〔苏〕Я. Б. 弗里德曼 著



机械工业出版社

Я. Б. ФРИДМАН
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

1

 ДЕФОРМАЦИЯ И
РАЗРУШЕНИЕ

Издание 3-е, переработанное и дополненное
Москва Машиностроение 1974.

* * *

金属机械性能
第一册

[苏] Я. Б. 弗里德曼 著

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 14⁵/₈·字数 380 千字
1982年8月重庆第一版·1982年8月重庆第一次印刷
印数 00,001—13,000·定价 1.80 元

*

统一书号: 15033·5217

译者序

Я. Б. 弗里德曼“金属机械性能”第三版遗作，同前两版一样，是以金属变形和断裂规律为基础，综述金属机械性能的一本专著。本书第一篇阐述金属变形与断裂的规律，第二篇主要叙述机械性能试验方法及结构强度。

自第二版问世以来，材料科学、强度科学发展十分迅速，各国学者发表了大量研究金属材料变形、断裂以及机械性能其它一些问题的专著和论文，大大丰富了强度科学的内容。根据这种情况，作者在第三版中增添了许多新的章节和内容，如“断口分析”、“变形与断裂的位错概念”、“缺口敏感性与裂纹敏感性”等等，从而使新版更适合于目前的需要。

由于机械性能学科所探讨的内容十分广泛，要对每一部分都作详细阐述，必然使内容庞杂、篇幅过大。因此，作者不企求叙述整个强度科学范畴内的近代概念，而是基本上从宏观方面，简洁地叙述了最典型的结果和原理，这些结果和原理对于理解变形与断裂的物理本质，对于理解试验方法的原理及最重要的实际应用都是有帮助的。

由于作者的这种意图，以及由于书中所用的数据主要引自苏联的文献，因而与现代材料科学及强度科学的发展就有了一定的距离。须知，许多问题如变形与断裂、疲劳、蠕变等等，不从宏观与微观的结合上来进行研究是不能深入的。

虽然如此，由于作者以简洁明瞭的方式统一阐述了材料机械性能学说的主要内容，因此对于正确选择、合理使用金属材料、发挥金属材料强度潜力，以及研制新材料都是有益的。无疑，这是冶金工作者、设计工作者、工艺工作者极为需要的一本参考书。

鉴于国内有关论述机械性能的专著比较少，为了满足教学、科研与生产的需要，我们集体翻译了这本书。参加本书翻译工作的有：孙希太(第三版序言、编者的话、绪论、作者的话)；杨道明(第一、四、七章)；吕广庶(第二、三、五、六章)；周天健(第十一、十三、二十章)；束德林(第八、十七、二十二、二十三章)；郑炆曾(第十八、二十四章)；戴雅康(第十四、十五、十六章)；蒋伯诚(第十九、二十一章)；何锡祥(第二十五章)；邵尔玉(第二十六、二十七章)；刘大燊(第十二章)；吴浩泉(第十章)；李一平(第九章)。初稿完成后先由各译者分别校对，然后分别经孙希太、石霖、郑炆曾、束德林同志第二次校对，最后由束德林同志负责校订整理全部译稿。

由于译者业务水平及文字水平所限，因此谬误之处在所难免，敬希读者批评指正。

第三版 序 言[⊖]

材料在结构中的行为，不仅决定于它的机械性能，而且还与结构本身的特性、部件与零件的加工工艺、环境介质以及其他使用条件有关。

在“金属机械性能”的第一版中，Я. Б. 弗里德曼教授力求使材料的机械性能联系结构强度问题，其中包括断裂问题。断裂现象被视为一个与许多因素有关的、随时间延续以不同方式进行的过程。

在研究和解释变形与断裂过程，以及在研究和解释提高结构强度方法的基础上，Я. Б. 弗里德曼确立了综合地研究材料性能、结构与工艺特性以及加载条件的原则。

Н. Н. 达维金科夫在本书第一版序言中指出，Я. Б. 弗里德曼从有关机械性能学说的许多相互矛盾的材料中，以明确和精炼的方式阐明了整个学科有赖统一的综合观点。同时还研究了现有的其他不同观点，并注明所引证观点的出处(原始文献)，这就增添了本书的价值。

1952年出版的本书第二版成为书刊评论的珍品，无论在苏联或国外都没有能代替它的同类著作。第二版问世到现在，金属强度科学在许多方面都发生了变化。

Я. Б. 弗里德曼以世界上近代金属机械性能学说的概念，对第三版手稿作了重要的修改和补充。

本书由两部分组成。第一部分“变形与断裂”主要叙述并涉及这两种现象的动力学的一般科学原理，因而可以定量地评定材料对裂纹发展的抗力。由于新技术的发展和高强度材料的应用，

⊖ 第一、二版序言从略，第三版序言翻译时作了删减。——译者

这种评定变得十分迫切。Я. Б. 弗里德曼及其学派在原有研究断裂工作的基础上, 对断口分析给予了颇大的注意。在第一部分中还简要地叙述了理解变形与断裂的宏观过程所必需的统计概念和位错概念。

第二部分“机械性能试验、结构强度”主要研究与加载条件有关的金属机械性能。这里包括加载方式, 对缺口和裂纹的敏感性, 相似条件, 尺寸因素, 等强度原则以及按机械性能评定金属的结构强度等, 后者为所有已叙述内容的综合, 并系安全服役选材的依据。

Я. Б. 弗里德曼提出, 根据变形抗力指标与断裂抗力指标综合评定材料时, 应考虑弹性能储备对断裂性能指标的影响, 也要考虑复杂的应力状态以及其他因素, 只有这样才能更好地解决选择重要零件的用材问题。在塑性变形受到严重限制的情况下, 根据应力强度因子评定材料的断裂抗力的方法愈来愈广泛地被采用。这一方法在本书中也有所反映。

本书探讨的问题非常广泛。其中的每一个问题都有俄文的和其他文字的专门文献。即使对这些材料作极其扼要的叙述, 也将使本书的篇幅过于庞大。为了弥补这一不足, 本书每一章的最后都列出了与该问题有关的基本文献, 这就有助于读者比较全面地和客观地了解所探讨的问题。

书中叙述的原理及结构材料在载荷作用下所表现的行为之最典型结果, 对设计工作者、工艺工作者、冶金工作者以及其他行业相近的专家, 正确地理解与选择材料和研制与材料有关的问题是有利的, 对有关专业的大学生也是有所裨益的。

在手稿接近完成时, Я. Б. 弗里德曼突然逝世致使工作中断。三版的准备工作是由与他最亲近的学生和同事们完成的。

就整体而言, 本书是综合了现代变形与断裂宏观过程的概念和评定材料性能方法的一本科学著作。

院士 С. Т. 基什金

编者的话^①

亚科夫·包里少维奇·弗里德曼 (Яков·Борисович·Фридман) 用自己生命的最后六年从事“金属机械性能”一书第三版的准备工作。他修改了九章, 新写了五章。但是考虑好的部分章次, 例如, “固体结构的一些知识”、“高压下的机械性能”、“环境介质的影响”以及拟定原有章次中增补的节, 却没有来得及写出。他的下述意图也未来得及实现: 在基本上从宏观方面解释机械性能的情况下, 将论述变形和断裂规律的位错概念作为一章增添到本书的第一部分。

亚科夫·包里少维奇逝世后, 他最亲近的同事们[Т. К. 基洛娃(Т. К. Зилова), Н. Д. 索巴列夫(Н. Д. Соболев), Б. А. 德罗兹多夫斯基(Б. А. Дроздовский), Е. М. 莫罗卓夫(Е. М. Морозов)和 Ю. И. 李哈乔夫(Ю. И. Лихачев)]主动承担完成本书第三版的准备工作。对 Я. Б. 弗里德曼修改与新写的章次作了审查, 并补全了插图和文献。对他未来得及修改的章次, 重阅并审查了原书第二版的有关内容, 删去了一些陈旧的概念, 部分地更新了插图和文献。同时还最大限度地保留了作者手稿中原有的文字。也保留一些引证的早期文献来源, 这些文献是奠基性的, 从而保持了原书的科学价值。

本书第一部分增加了“晶体变形与断裂的位错概念”一章。这一章是由 Б. М. 斯特鲁宁(Б. М. Струнин)执笔, Я. Б. 弗里德曼生前曾多次与他商讨过编写这一章的可能方案。“残余应力”一章是 И. А. 比尔盖尔(И. А. Биргер)和 М. Л. 杜罗夫斯基(М. Л. Туровский)重新写的。本书第二部分的

① 翻译时作了删减。——译者

“表面活性介质对金属机械性能的影响（莱宾杰尔效应）”由Е. Д. 苏金（Е. Д. Шукин）执笔，它相当于作者拟写的“环境介质的影响”章次中的一节。

科学博士Л. А. 格里克曼（Л. А. Гликман）、Н. А. 兹拉金以及科学院院士С. Т. 基什金等审阅了手稿的部分章节，为准备原稿做了大量工作，并为组织出版本书第三版的工作给予了很大的支持与协助。

主要符号和术语

$A_p(A_{TP})$ ——预制裂纹试样在冲击或静弯曲下的断裂总功，
公斤力·米(kgf·m)；

$a_{PD}, a_{PS}(a_{TY}, a_{TC})$ ——预制裂纹试样在冲击或静弯曲下的断裂比功，
公斤力·米/厘米²(kgf·m/cm²)；

$a(a)$ ——变形比功，公斤力·米/厘米³(kgf·m/cm³)；

$A_K(A_K)$ ——缺口试样的冲击总功，公斤力·米(kgf·m)；

$a_K(a_K)$ ——缺口试样的冲击韧性，公斤力·米/厘米²
(kgf·m/cm²)；

$b(b)$ ——试样宽度，毫米(mm)；

$D(D)$ ——强化模量(塑性模量)，公斤力/毫米²(kgf/mm²)；

$E(E)$ ——正弹性模量，公斤力/毫米²(kgf/mm²)；

$e(e)$ ——真实相对伸长，(%)

$$e = \int_{l_0}^{l_K} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_K}{l_0} = \ln(1 + \delta) = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right) = \ln \frac{F_0}{F_K};$$

$e_x, e_y, e_z(e_x, e_y, e_z)$ ——在 x, y, z 座标轴方向的伸长；

$e_1, e_2, e_3(e_1, e_2, e_3)$ ——主伸长，代数值； $e_1 > e_2 > e_3$ ；

$e_{\max}$ 和 $g_{\max}(e_{\max}$ 和 $g_{\max})$ ——最大真实相对伸长和最大真实相对切应变，
%；

e_n 和 $g_n(e_n$ 和 $g_n)$ ——八面体真实相对伸长和真实切应变，%；

$$e_n = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3};$$

(塑性变形时一般认为 e_n 等于零。)

F_0 和 $F_K(F_0$ 和 $F_K)$ ——试样的原始截面积和最终截面积，毫米²
(mm²)；

$G(G)$ ——切变弹性模量(切变模量)，公斤力/毫米²
(kgf/mm²)；

$g(g)$ ——真实相对切变，%；

$g_{xy}, g_{yz}, g_{zx} (g_{xy}, g_{yz}, g_{zx})$ ——在座标 xy, yz, zx 平面上的切应变;

$G, G_I (G, G_I)$ ——应变能释放率或裂纹扩展力, 公斤力·米/厘米² ($\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$), (下角标 I 表示张开型裂纹扩展; 不带脚标者, 未说明裂纹扩展类型);

$G_C, G_{IC} (G_C, G_{IC})$ ——临界应变能释放率, 以能量形式表达的断裂韧性, 公斤力·米/厘米² ($\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$), 或尔格/厘米² (erg/cm^2);

$K (K)$ ——体积弹性模量, 公斤力/毫米² (kgf/mm^2);

$K_\sigma (K_\sigma)$ ——重复—交变载荷下有效应力集中系数;

$K, K_I (K, K_I)$ ——裂纹尖端的应力强度因子, 公斤力/毫米^{3/2} ($\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$) (下角标 I 表示张开型裂纹扩展; 不带脚标者, 未标明裂纹扩展性质);

$K_C, K_{IC} (K_C, K_{IC})$ ——临界应力强度因子, 材料的断裂韧性,

$K_C = \sqrt{EG_C}$ (平面应力状态),

$K_{IC} = \sqrt{\frac{EG_{IC}}{1-\mu^2}}$ (平面应变状态),

公斤力/毫米^{3/2} ($\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$);

l_0 和 $l_K (l_0$ 和 $l_K)$ ——试样的原始长度和最终长度, 毫米 (mm);

$l_{0T}, l_T (l_{0TP}, l_{TP})$ ——轴向拉伸试验时, 试样中心裂纹的原始和瞬时长, 或紧凑拉伸及三点弯曲试验时裂纹的原始和瞬时长, 毫米 (mm);

$l_T - l_{0T} = \Delta l_T (l_{TP} - l_{0TP} = \Delta l_{TP})$ ——裂纹长度 (半长) 的增值, 毫米 (mm);

$P (P)$ ——载荷, 公斤力 (kgf);

$q (q)$ ——交变—重复载荷下的缺口敏感系数;

$r (r)$ ——交变载荷下的循环特征或循环对称系数;

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}};$$

$r_y, r_{Iy}(r_y, r_{Iy})$ ——裂纹尖端塑性区的半径 (下角标 I 表示平面应变条件下);

$S_x, S_y, S_z(S_x, S_y, S_z)$ ——垂直于坐标轴 x, y, z 面的正应力[⊖], 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$S_1, S_2, S_3(S_1, S_2, S_3)$ ——主正应力, $S_1 > S_2 > S_3$, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$S_{\max}$ 和 $t_{\max}(S_{\max}$ 和 $t_{\max})$ ——最大真实的正应力和切应力,

$$t_{\max} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}, \text{ 公斤力/毫米}^2$$

(kgf/mm²);

S_n 和 $t_n(S_n$ 和 $t_n)$ ——八面体正应力和切应力, 其值

$$S_n = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} \text{ 叫做平均流体静压力, 公斤力/毫米}^2 \text{ (kgf/mm}^2 \text{);}$$

$S_K(S_K)$ ——未说明断裂类型 (正断和切断) 时的最终断裂的真实正应力, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$S_{OT}(S_{OT})$ ——正断抗力, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$S_b(S_B)$ ——用真实正应力表示的强度极限, 公斤力/毫米²(kgf/mm²),

对脆性 (低塑性) 材料, 拉伸时:

$$S_b = S_K = S_{OT} = \sigma_b,$$

对塑性材料拉伸时

$$S_K > S_b > \sigma_b;$$

$S^n(S^n)$ ——根据第二强度理论计算出的相当拉应力 (单向拉伸时 $S^n = S$), (不要和八面体拉应力 S_n 混淆), 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

⊖ 机械性能符号广泛采用字母 σ 和 τ 表示正应力和切应力 (如强度极限 σ_b 等), 它们都是条件应力 (相对于原始截面积)。字母 S 和 t 表示真实的正应力和切应力。

$t_{xy}, t_{yz}, t_{zx} (t_{xy}, t_{yz}, t_{zx})$ ——在 xy, yz, zx 平面上的切应力, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$t_1, t_2, t_3 (t_1, t_2, t_3)$ ——主切应力, 公斤力/毫米²(kgf/mm²)

$t_K (t_K)$ ——最终断裂时的真实切应力 (切断抗力)
公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$t_{0.2}, t_P (t_{0.2}, t_{0.2})$ ——扭转屈服强度和扭转比例极限, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$t (t)$ ——试样厚度, 毫米(mm);

V_0 和 $V_K (V_0$ 和 $V_K)$ ——试样原始的和最终的体积, 毫米³(mm³)
或厘米³(cm³);

$\alpha_K (\alpha_K)$ ——应力集中系数 (通常指弹性范围内的),

无量纲, $\alpha_K = \frac{S_{\max}}{S_m}$, S_m 为平均应力;

$\gamma (\gamma)$ ——条件切应变, %;

δ 或 $\varepsilon \ominus (\delta$ 或 $\varepsilon)$ ——相对伸长, %;

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l_K}{l_0};$$

$\delta_P (\delta_{\text{уолн}})$ ——全伸长, 根据缩颈处收缩率 ψ 计算出来的相对伸长,

$$\delta_P = \frac{\psi}{1 + \psi};$$

$\mu (\mu)$ ——泊松比, 无量纲;

$\sigma_b (\sigma_B)$ ——强度极限, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

σ_T 和 $\tau_T (\sigma_T$ 和 $\tau_T)$ ——没有规定残余变形量的屈服极限 (或弹性极限), 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$\sigma_{0.2} (\sigma_{0.2})$ ——规定残余变形量为 0.2% 的拉伸屈服强度, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$\sigma_{0.001} (\sigma_{0.001})$ ——规定残余变形量为 0.001% 的拉伸弹性极限, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

$\sigma_P (\sigma_{\text{пк}})$ ——拉伸比例极限, 公斤力/毫米²(kgf/mm²);

⊖ 一般用 δ 表示延伸率, ε 表示瞬时伸长。——译者注

$\sigma_{cb}(\sigma_{TP}, \sigma_{PYTTO})$ ——有裂纹试样全截面(包括裂纹面积)上的平均拉应力, 公斤力/毫米² (kgf/mm²); 平板试样为 P/bt , 圆柱试样为 $4P/\pi d^2$ (d 为试样直径);

$\sigma_{cn}(\sigma_{TP \text{ HeTTO}})$ ——有裂纹试样净截面上的平均拉应力, 公斤力/毫米² (kgf/mm²);

$\sigma_r(\sigma_R)$ ——未注明循环特征(或循环对称)系数的疲劳极限, 公斤力/毫米² (kgf/mm²);

$\sigma_{-1}(\sigma_{-1})$ —— $r = -1$ 时, 即对称循环下的疲劳极限, 公斤力/毫米² (kgf/mm²);

$\tau_{-1}(\tau_{-1})$ ——同上, 用切应力表示的;

$\psi(\psi)$ ——条件断面收缩率, %。

第一强度理论——最大拉应力理论;

第二强度理论——最大拉应变理论;

第三强度理论——最大切应力理论;

第四强度理论——形状弹性变化的最大势能理论;

切断——由切应力引起的塑性断裂, 不同材料的切断可能在不同的加载方式下发生(拉伸, 扭转, 压缩等);

正断——由拉应力或拉应变引起的宏观脆性断裂, 可能在不同的加载方式下发生;

滑断(скол)——由切应力引起的脆性断裂, 如玻璃。

目 录

主要符号和术语

绪论	1
----------	---

第一篇 变形与断裂

第一章 连续介质力学基本知识	7
一、连续均匀介质中的应力与应变	7
二、加载及其引起的变形与断裂	41
三、材料组织及其在加载时的变化	63
参考文献	69
第二章 弹性变形	72
一、虎克定律及其适用范围	72
二、弹性范围内的某些应力应变状态	77
三、材料的弹性性能	85
参考文献	90
第三章 塑性	91
一、基本概念	91
二、应力应变图	94
三、单晶体的塑性	106
四、宏观塑性理论概述	114
五、塑性的变形理论和流变理论	117
六、宏观蠕变理论	122
七、塑性和蠕变时的应力状态特点	125
八、宏观理论的适用范围	140
参考文献	151
第四章 断裂	154
一、基本概念	154
二、宏观裂纹的萌生及损伤	164
三、临界断裂指标与过临界断裂指标	168
四、断裂图	180

五、完全断裂指标 (正断和切断, 总塑性和总寿命)	187
参考文献	197
第五章 时间、加载速度、变形速度和高压的影响	202
一、基本概念	206
二、非高速时速度的影响	206
三、惯性抗力	215
四、波动过程	216
五、高速对断裂条件的影响	219
六、固体在高压下的机械性能	220
参考文献	224
第六章 加载温度与变形温度的影响	225
一、温度影响的意义及类比温度	225
二、温度对弹性性能的影响	227
三、变形温度对未断裂非弹性过程的影响	230
四、温度对断裂抗力、塑性和韧性的影响	235
参考文献	240
第七章 力学状态图与力学状态示意图	241
一、基本概念	241
二、力学状态示意图	242
三、力学状态图	247
参考文献	258
第八章 残余应力	259
一、一般知识	259
二、测量残余应力的方法	260
三、残余应力的产生	262
四、残余应力的稳定性	275
五、残余应力对零件在各种使用条件下工作效能的影响	280
参考文献	291
第九章 弹性不完整性	294
一、基本概念	294
二、内耗	297
三、弹性后效	300
四、滞后	303

五、包申格效应	305
参考文献	306
第十章 机械性能的各向异性	308
一、基本概念	308
二、弹性性能的各向异性	311
三、非弹性性能的各向异性	315
四、断裂性能的各向异性	319
五、各向异性的计算、利用和控制	323
参考文献	328
第十一章 断口分析	329
一、基本概念	329
二、宏观断口学	333
三、显微断口学	348
参考文献	353
第十二章 变形和断裂的统计概念	355
一、基本概念	355
二、多晶体弹性常数的计算	367
三、断裂和尺寸效应的统计理论	373
四、宏观强度理论的统计综合	378
五、机械性能试验结果的统计处理	381
参考文献	394
第十三章 晶体变形和断裂的位错概念	397
一、概论	397
二、理想晶体和理论切变抗力	398
三、位错的几何性质	401
四、位错运动和塑性变形	409
五、位错作用力	413
六、位错的弹性性质	417
七、晶体中的位错	426
八、观察位错的实验方法	430
九、晶体强化的位错概念	436
十、断裂的位错概念	448
参考文献	451