

TRIBO-FATIGUE

Wear-Fatigue Damage and its prediction



# 摩擦疲劳学

磨损——疲劳损伤及其预测

[白俄] L.A.索斯洛夫斯基 著

高万振 译

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

TRIBO-FATIGUE

Wear-Fatigue Damage and its prediction

# 摩擦疲劳学

磨损——疲劳损伤及其预测

[白俄] L.A. 索斯洛夫斯基 著

高万振 译

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

## 内 容 提 要

本书主要内容包括:体积断裂及表面损伤、荷载摩擦副系统和磨损—疲劳损伤、磨损—疲劳试验方法、正向效应和负向效应、荷载摩擦副系统的计算方法。

本书适用于大学的教师和学生、科学工作者、研究生、工程师和所有渴望了解如何评定和改善运行在复杂载荷条件下的机械系统使用寿命的读者。

江苏省版权局著作权合同登记号:第10—2013—331号

Translation from the English and Russian manuscripts:

TRIBO-FATIGUE

by L. A. Sosnovskiy

All Rights Reserved

本书中文简体字版译自 L. A. Sosnovskiy 著《TRIBO-FATIGUE》的英文和俄文书稿。原著作者 L. A. Sosnovskiy 授权中国矿业大学出版社独家出版。版权所有。

### 图书在版编目(CIP)数据

摩擦疲劳学:磨损—疲劳损伤及其预测/(白俄)  
索斯洛夫斯基著,高万振译. 徐州:中国矿业大学出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1925 - 1

I. ①摩… II. ①索… ②高… III. ①疲劳磨损—研究 IV. ①TH117. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 147082 号

书 名 摩擦疲劳学——磨损—疲劳损伤及其预测  
著 者 L. A. 索斯洛夫斯基  
译 者 高万振  
责任编辑 于广云 万士才 于世连  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 21.75 插页 4 字数 549 千字  
版次印次 2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 100.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



L. A. 索斯洛夫斯基 (L. A. Sosnovskiy), 科学技术博士, 白俄罗斯国立交通大学 (Belarusian State University of Transport) 教授, 白俄罗斯“摩擦疲劳学”科研和产业集团负责人, 白俄罗斯跨部门“摩擦疲劳学”联合实验室主任, 国际摩擦疲劳学合作委员会 (The International Coordination Council on Tribo-Fatigue) 共主席, 俄罗斯理论和应用力学国家委员会委员, 白俄罗斯功勋科学家, 乌克兰国家奖获得者; 曾荣获苏联经济成就博览会银质奖章, 表彰他“对摩擦疲劳学方法论和理论原理发展的贡献” (1989)。他是摩擦疲劳学 (Tribo-Fatigue) 的创始人。2001年以他为第一作者的第一部关于摩擦疲劳学的俄文版国际专著[《Wear-fatigue damage and its prediction (Tribo-Fatigue)》], 作者为: L. A. Sosnovskiy, V. T. Troshchenko, N. A. Makhutov, Gao Wanzhen, A. V. Bogdanovich, S. S. Shcherbakov]同时在白俄罗斯戈梅利、俄罗斯莫斯科和乌克兰基辅出版。2003年, 他独著的“ОСНОВЫ ТРИБОФАТИКИ (摩擦疲劳学原理)”俄文版专著在白俄罗斯出版。2004年斯普林格出版社 (Springer Publishing House) 出版了他独著的“TRIBO-FATIGUE Wear-Fatigue Damage and its prediction (摩擦疲劳学—磨损-疲劳损伤及其预测)”英文版专著。



**高万振** 1984年在机械部机械科学研究院获工学硕士学位。1984年至今，在机械部武汉材料保护研究所（现为武汉材料保护研究所）历任工程师、摩擦磨损研究室主任、高级工程师、所总工程师、研究员、硕士研究生导师、博士研究生导师、所长。曾任中国机械工程学会摩擦学分会第五、六届委员会副主任委员，中国机械工程学会表面工程分会第二届委员会副主任委员。现任国际摩擦疲劳学合作委员会共主席，中国机械工程学会摩擦学分会第一届顾问委员会委员，湖北省机械工程学会摩擦学专业委员会主任委员，“摩擦学学报”副主编。主持完成部级以上科研项目10项，参加完成2项；主持完成国家自然科学基金面上项目2项，参加完成国家自然科学基金重点项目1项（子项负责人）。任第三届摩擦疲劳学国际会议（北京，2000）组委会主席，并主编《第三届摩擦疲劳学国际会议论文集》，在会上与白俄罗斯教授 L.A.Sosnovskiy 合作作大会主旨报告。任第四届摩擦疲劳学国际会议（泰尔诺皮尔，2002）组委会主席，作大会特邀报告。任第五届摩擦疲劳学国际会议（伊尔库斯科，2005）大会副主席，作大会特邀报告。任第六届摩擦疲劳学国际会议（明斯克，2010）大会共主席，作大会特邀报告。参编《机械工程手册》，《表面工程手册》，《现代表面工程技术》和《机械工程材料手册》。与白俄罗斯、俄罗斯、乌克兰科学家合著《Wear-fatigue damage and its prediction (Tribo-Fatigue)》于2001年7月在白俄罗斯、俄罗斯和乌克兰出版。发表论文80余篇。获中国发明专利3件和中国实用新型专利2件。获国家科技进步三等奖一次（1991）、机械部科技进步二等奖二次（1990，1997）和三等奖二次（1991，1999）、湖北省科技进步一等奖一次（2009）和中国机械工业联合会科技成果一等奖一次（2009）。荣获国际摩擦疲劳学合作委员会授予的“摩擦疲劳学25周年”荣誉奖章和“对摩擦疲劳学发展作出贡献”证书两项国际奖（2010）。荣获中国机械工程学会摩擦学分会授予的“摩擦学杰出贡献奖”（2013）。享受国务院政府特殊津贴（2002）。

## 中文版序言<sup>①</sup>

中文版《摩擦疲劳学》的出版令人信服地证明,摩擦疲劳学在新的知识领域具有重大意义和应用前景。

近二十年来,在4个国家召开的6次国际会议记录下了摩擦疲劳学研究的发展历程。

首届国际会议于1993年在白俄罗斯的戈梅利市召开,并一下子成为“轰动科学界的事件”(参见:A. В. Богданович 主编,作者有 В. И. Стражев, К. В. Фролов, М. С. Высоцкий 等的《漫话摩擦疲劳学》,戈梅利—明斯克—莫斯科—基辅:Remika, 1996,共132页)。

第二届国际会议于1996年在俄罗斯的莫斯科市召开,并以“摩擦疲劳学的辉煌成就”而值得回忆,譬如,来自白俄罗斯、俄罗斯和乌克兰的20位学者的首批论文(著作)在这里获得了由俄罗斯、白俄罗斯和乌克兰三个国家科学院的副院长共同签发的荣誉证书。

第三届国际会议于2000年在中国的北京市召开,首开摩擦疲劳学在中国发展的先河[参见:高万振、李健主编的《Proceedings of III International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2000: Oct. 22-26, 2000, Beijing, China),湖南大学出版社,2000,共653页];这个“先河”在很大程度上取决于高万振教授,如果没有他的巨大努力,简直就不可能实现。在第三届国际会议上,共有35位各国学者获得了由国际摩擦疲劳学合作委员会(International Coordinative Council on Tribo-Fatigue)四位共主席签发的“为发展摩擦疲劳学做出贡献”的荣誉证书,其中包括薛群基、温诗铸、谢友柏、赵源等十多位中国学者。第三届摩擦疲劳学国际会议论文集共收录139篇论文,全部以英文结集正式出版。

随后,又召开了两届国际会议(第四届于2002年在乌克兰的泰尔诺皮尔市,第五届于2005年在俄罗斯的伊尔库斯科市),也都成为摩擦疲劳学发展的里程碑,这两届国际会议都有中国学者的论文参加[参见:В. Т. Трощенко 主编的《Pro-

<sup>①</sup> “中文版序言”由原著作者 L. A. Sosnovskiy 教授代拟,用俄文写成。遵照他的建议,“中文版序言”由葛世荣和高万振署名。“中文版序言”由武汉材料保护研究所的柳斌研究员翻译成中文。

ceedings of IV International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2002: Sep. 23-27, 2002, Ternopil, Ukraine), 泰尔诺皮尔国立科技大学出版, 2002, 第 1 卷共 530 页, 第 2 卷共 317 页; 以及 A. П. Хоменко 主编的《Proceedings of V International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2005: Oct. 3-7, 2005, Irkutsk, Russia), 伊尔库斯科国立交通大学出版, 2005, 第 1 卷共 498 页, 第 2 卷共 384 页, 第 3 卷共 389 页]。

最近的一届, 即第六届国际会议(国际摩擦疲劳学纪念大会)于 2010 年在白俄罗斯的首都明斯克市召开, 来自中国的组织者是高万振教授。共有 8 位中国学者作为报告人出席了会议, 由高万振、金学松和刘启跃撰写的论文“Overview of progress in the study of wheel-rail system in China using tribology and tribo-fatigue methods”作为特邀报告在大会第一天的全体会议上作了报告。在第六届国际会议上, 对新的、具有前景的机械学分支——摩擦疲劳学二十五年的研究和发展进行了总结(大盘点), 出版了 ISTF' 2010 论文集, 以纪念摩擦疲劳学诞生 25 周年和 L. A. Sosnovskiy 教授 75 寿诞[参见: M. A. Журавков 等主编的《Proceedings of VI International Symposium on Tribo-Fatigue》(ISTF' 2010: Oct. 25-Nov. 1, 2010, Minsk, Belarus), БГУ 出版, 2010, 第 1 卷共 840 页, 第 2 卷共 724 页]。ISTF' 2010 期间还举行了“哲学、协同学与摩擦疲劳学”学术研讨会, L. A. Sosnovskiy 教授被白俄罗斯国家科学院哲学研究所授予荣誉证书, 以表彰他为学科间交叉的研究和发展, 对现代哲学知识的传播以及采用哲学方法研究出创新原理(规律)以解决最现实的自然科学问题和技术课题等方面所做出的杰出贡献。有来自各国的 25 位学者和专家获得了“摩擦疲劳学 25 周年”荣誉奖章, 以表彰他们在组织国际会议及持续十余年在该领域进行科研与试验设计工作所做出的特殊贡献; 其中, 中国代表是高万振教授。同时, 还有 120 多位各国的学者获得了“对摩擦疲劳学发展作出贡献”荣誉证书, 其中包括中国的高万振教授, 以表彰他们为发展摩擦疲劳学所做出的贡献。

最近十年来, 密集的科学研究和高效的应用工作成为摩擦疲劳学的显著特征。2004 年, 根据 П. А. Витязя(白俄罗斯国家科学院院士、技术科学博士、教授)、Л. Г. Красневского(白俄罗斯国家科学院通讯院士、技术科学博士、教授)、В. И. Сенько(技术科学博士、教授)、В. А. Жмайлика(技术科学副博士)和 Л. А. Сосновского(技术科学博士、教授)的建议, 在白俄罗斯创建了部际联合摩擦疲劳学实验室, 以解决科学、教育和生产领域的学科间的一些问题。于是, 在白俄罗斯国立大学的教学计划中(根据物理数学博士 М. А. Журавкова 教授的建议)为

机械数学系学生引进了“摩擦疲劳学的主要和实用任务”课程,还出版了必备的教科书(由 Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков 著的《摩擦疲劳学的主要和实用任务:讲课教程》,明斯克,БГУ 出版,2010,共 488 页;由 В. И. Сенько, Л. А. Сосновский 著的《摩擦疲劳学的基本概念及其在工业大学中的研究现状:教科书》,戈梅利,БелГУТ 出版,2005,共 187 页)。

主要科研成果有:发展了机械学新分支——摩擦疲劳学的方法论、理论及实验的基础;确切阐述了新的物理学科——机械热力学的基本原理并予以分析;提出了带有智能元件的复杂动力学系统演化的一般理论;发展了与黄金分割率(golden proportions)具有有机联系的 L 风险的基本概念;在辩证理念的基础上,产生了摩擦疲劳学寿命(Tribo-Fatigue life)作为有生命、有智能的生物体中损伤累积(damage accumulation)的特别方式的设想;开启了辩证法中定量方法的进程;确切阐述了不可逆损伤(有效能量)的  $\Lambda$  交互作用的一般理论,它导致了机械学中因素分析向现象学分析的转变;构建了系统跨极限状态(translimiting states of systems)基础理论,该理论提出了某些变化于  $(1, \infty)$  区间的事件的可靠性概念;发现了先前未知的 Тропный 现象(Troppy phenomenon,即“波浪形损伤现象”);确切阐述和证明了荷载摩擦副系统(摩擦疲劳学)中摩擦的普遍法则;提出了摩擦的形态损伤(宏观)机制向分子(纳米尺度)机制过渡的现象学模型;发展了富有创新性的试验技术,发明了新型试验仪器,即 SI 系列磨损—疲劳试验机;在疲劳损伤与断裂力学、摩擦学、固体力学、弹性理论和接触力学等领域获得了大量新成果。

总之,目前,对于摩擦疲劳学的科学研究的主要成果体现在:第一,成为形成新的物理学科——机械热力学的主要基础[参见: Sosnovskiy L. A., Sherbakov S. S. Mechanothermodynamical system and its behavior. Continuum Mech. Thermodyn. 2012, Vol. 24, Issue3, pp. 239-256.; Сосновский Л. А., Щербаков С. С. О возможности построения механотермодинамики // Наука и инновации (Sosnovskiy L. A. 论建立机械热力学的可能性//科学与创新). 2008. №2(60). pp. 24-29.; Высоцкий М. С., Витязь П. А., Сосновский Л. А. Механотермодинамическая система как новый объект исследования // Механика машин, механизмов и материалов (Sosnovskiy L. A. 等. 作为新的研究对象的热力学系统//机器、机构及材料力学). 2011. №2(15). pp. 5-10.];第二,奠定了带有智能元件的复杂动力学系统演化的一般理论基础[参见: Сосновский Л. А. Динамические системы с элементами разума: проблема и перспективы исследования //《Механика-2011》(Материалы V Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике,



Минск, 26-28 октября 2011 г.) (Sosnovskiy L. A. 动力学系统与智能元件: 研究的问题与前景 // 《力学—2011》(第五届白俄罗斯理论和应用力学会议资料, 明斯克, 2011 年 10 月 26—28 日)). Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2011. Т. I. С. 64-79.; Сосновский Л. А. О возможности построения общей теории эволюции систем // Философия в Беларуси и перспективы мировой интеллектуальной культуры (Материалы Международной научной конференции к 80-летию Института философии НАНБ, Минск, 14-15 апреля 2011 г.) (Sosnovskiy L. A. 论建立系统演化一般理论的可能性 // 白俄罗斯哲学与世界智力文化的前景(纪念白俄罗斯国家科学院哲学研究所成立 80 周年国际学术会议, 明斯克, 2011 年 4 月 14—15 日)). Минск: Право и экономика, 2011. С. 152-157. ]。这里要强调 L. A. Sosnovskiy 教授对上述技术科学、物理学科和哲学观念研究方面所做出的特殊贡献[参见: П. А. Витязь, М. С. Высоцкий, В. А. Жмайлик 著的“学者型机械专家 L. A. Sosnovskiy(科学履历)” // М. А. Журавков 等主编的 Proceedings of VI International Symposium on Tribo-Fatigue (ISTF' 2010; Oct. 25-Nov. 27, 2010, Minsk, Belarus), БГУ 出版, 2010, 第 1 卷 pp. 55-64]。

正值中文版《摩擦疲劳学》出版之际, 可以相信, 摩擦疲劳学在中国的研究将获得新的推进。因此, 我们认为, 摩擦疲劳学作为教学课程走进中国的大学校园也为期不远。因为在中国正计划出版一部独一无二的百科全书式的《摩擦疲劳学大辞典》, 该辞典将收入机械学、物理学以及疲劳损伤、摩擦与磨损、磨损—疲劳复合损伤和损伤统计学, 还有相关学科所需的资料(数据)(材料的强度及构成, 材料学等)。这部百科全书式辞典兼具一般辞典(可速查所需信息)和手册(以最小容量信息满足读者需求)的优点。辞典正文部分包括五大类别: (1) 对各种术语的简明定义(包括必要的数据库信息); (2) 对最迫切问题的分析和简评; (3) 对各种用于计算的参数和系数的定义和简明分析; (4) 材料的机械性能(配有其性能一览表); (5) 简明的历史数据(资料)。

《摩擦疲劳学大辞典》编委会主席为葛世荣(俄罗斯工程院外籍院士, 中国矿业大学校长, 工学博士, 教授), 副主席为 M. A. Zhuravkov(俄罗斯矿业科学院院士, 白俄罗斯矿业科学院院士, 国际生态、人类和自然科学院通讯院士, 物理数学博士, 教授, 白俄罗斯国立大学第一副校长、白俄罗斯国立大学理论和应用力学部主任, A. N. Sevchenko 自然科学奖获得者); 《摩擦疲劳学大辞典》主编为 L. A. Sosnovskiy(技术科学博士, “摩擦疲劳学”科学与生产集团负责人, 白俄罗斯国立交通大学教授, 白俄罗斯部际联合摩擦疲劳学实验室主任, 白俄罗斯共和国功勋

科学家,乌克兰国家奖获得者,俄罗斯理论和应用力学国家委员会委员,国际摩擦疲劳学合作委员会共主席),副主编为高万振(工学硕士,武汉材料保护研究所前所长,教授,中国机械工程学会摩擦学分会顾问委员会委员,“摩擦学学报”副主编,国际摩擦疲劳学合作委员会共主席)。一些著名的中国和白俄罗斯学者和专家将参与编撰这部辞典。

我们非常高兴地强调,摩擦疲劳学在中国的发展必将会通过我们的大学而得到进一步推进。

中国矿业大学校长,工学博士,教授 **葛世荣**  
武汉材料保护研究所前所长,工学硕士,教授 **高万振**

2013年3月12日

## 致 读 者<sup>①</sup>

“摩擦疲劳学”在中国正式出版意义重大：目前该书已有俄、英、中三个版本了，这就意味着摩擦疲劳学实际上已推介到世界各地的技术领域。希望就像在白俄罗斯一样，摩擦疲劳学课程也在中国的大学中开设，这样，中国青年也可以在一个全新的、且极富前景的知识领域中去翱翔。

我万分感谢高万振教授，他十余年来为摩擦疲劳学在中国的发展付出了一切，而且功效卓著。他也是中文版的“摩擦疲劳学 名词术语”标准（先于英文版）的首个翻译者。

我代表摩擦疲劳学领域的所有同仁，对葛世荣教授在中文版“摩擦疲劳学”的组织、翻译和出版工作中所付出的辛劳表示衷心感谢。

**L. A. Sosnovskiy**

2013年3月10日于戈梅利

---

① “致读者”由原作者 L. A. Sosnovskiy 教授用俄文写成，由武汉材料保护研究所的柳斌研究员翻译成中文。

## 英文版序言

序言作者第一次读到关于摩擦疲劳学概念的讲稿是于1985~1986年在白俄罗斯国立交通大学,这些讲稿于1998年以“基于疲劳和耐磨性判据的荷载摩擦副系统可靠性综合估计(摩擦疲劳学原理)”为题目公开出版。

为大学生们编写一部关于任何学科的教科书都是一项具有挑战性的任务;而写一部第一次引进大学课程的关于新学科的教科书尤为艰巨。这就解释了从前述出版物到第一部教科书出版间隔达十四年之久的原因。这是对摩擦疲劳学进行持续地深入研究的十四年。实事求是地说,在这段期间发表了超过200篇关于摩擦疲劳学的论著,包括几部专著;召开了四届摩擦疲劳学国际会议(1993,白俄罗斯,戈梅利;1996,俄罗斯,莫斯科;2000,中国,北京;2002,乌克兰,泰尔诺皮尔)。

尚无任何可用信息表明存在这样一部关于摩擦疲劳学的英文手册。现在,斯普林格出版社(Springer Publishers)填补了这一空白,使各国专家能够获知第一手的关于摩擦疲劳学的理念和该领域的研究成果。

摩擦疲劳学是机械学的一个充满活力的新分支,它是随着机器制造业的现实挑战应运而生的。无论排他地从摩擦学观点还是纯粹地从机械疲劳的观点出发,都不可能全面地进行一类特殊机械系统的损伤、寿命或极限状态评估(理论的或试验的),这类机械系统运行在(滑动、滚动、冲击或其他)摩擦条件下,同时还产生着和传递着交变负荷。这要用这样一种事实来解释,即在这类系统(摩擦疲劳学将之命名为“荷载摩擦副系统”)的运行中,出现了复合的磨损—疲劳损伤。这是确切的,鉴于这类荷载摩擦副系统在任何机器中通常都是最重要的这一事实。这类系统的任何失效都导致重大的材料损失和人员安全保障的崩溃。

既然摩擦疲劳学的主要概念已经得到了确切的阐述、解析性的描绘和试验证实,就可将它们系统化地梳理如下:

(1) 已经发现,由接触(摩擦)载荷和非接触(交变)载荷造成的损伤并不叠加,而是以一种复杂方式交互作用。在这种非线性系统中,传统的损伤累加理论获得了一个新的、料想不到的推进。是的,立即出现了两个问题:应如何定量评定形式多样、数量众多的损伤变化?它们交互作用的可能结果是什么?

W. Weibull 和 V. Bolotin 首先发展了线性应力状态下统计学的尺度效应理论。根据这个理论,被施载试样体积中的极限应力的依赖关系已被确定。运用 W. Weibull 和 V. Bolotin 的工作成果,L. Sosnovskiy 针对任意组合的应力状态,确切地阐述了带有一个危险体积的可变形固体的统计学模型。它对第一个问题给出了明确的答案:一个计算损伤测度的新方法被研究成功——周期应变、摩擦、复合加载过程中的相对危险体积。损伤张量的概念归纳了这一研究。事实上,在任意加载条件下将危险体积处理为可变形固体损伤,是一个现象学的等效的做法,是入情入理的。

为了回答第二个问题,一个(现象学的)损伤交互作用理论得到了发展。它基于交互作用的  $\Delta$  函数(或  $R$  参数)的概念,可获得三组值。如果  $\Delta \gg 1$ ,各种载荷导致的损伤过程显著增大;相反,如果  $\Delta \ll 1$ ,损伤过程急剧减弱;而当  $\Delta = 1$ ,存在一个传统上所研究的惯常的损伤总和。很容易明白,当  $\Delta \gg 1$ ,它们是在运行过程中自然变弱的系统;当  $\Delta \ll 1$ ,它们是在运行过程中自然变强的系统;而当  $\Delta = 1$ ,系统是稳定的。

(2) 这似乎是清楚的,即如果荷载摩擦副系统能够达到其极限状态,个别的迹象表明:它或是机械疲劳判据(体积断裂),或正好是磨损判据(临界表面损伤),或同时是这两个判据。事实上,由接触载荷和非接触载荷引起的复杂的损伤交互作用却从根本上纠正了这些概念。它的结果是疲劳抗力特性强烈地依赖于摩擦条件和过程。而且,已从理论上和试验上确定摩擦连同磨损可双双显著地削弱或增强系统的疲劳抗力。由此,出现了正向效应的概念。

看来似乎正向效应已被专家们自然地预料到和意识到,与此同时,负向效应的概念却是没有预料到的;它最初反而被认为是是不可能的。尽管如此,观念上的革命还是发生了。虽然摩擦学家一百五十多年以来已经将磨损和摩擦过程仅仅地和排他地归因于接触载荷,我们现在却明确地觉察到非接触交变载荷能够强烈地增大(或减小)磨损和相对地改变摩擦系数。

(3) 既然正向效应和负向效应已被确切阐述,就有必要发展在考虑这两个效应情况下的荷载摩擦副系统极限状态理论,即运用非传统方法。应力条件暂且不能对促进这种方法起作用。它的发展涉及更一般的、能量的概念。

如同损伤交互作用理论的发展情况那样,也立即出现两个问题:如何在总输入能量中识别出例外消耗于损伤萌发和扩展的那部分能量?什么是临界能量,超过它系统状态就会变成极限状态?

根据极限状态方程的边界条件,虽然形式上但却简单地回答了第一个问题。

即使从损伤力学观点看,这个答案从严格数学角度看来好像不是完全确证的;但用于识别总能量的有效部分的参数显然应当取决于加载条件。本书给出的这个参数的确定步骤没有作这一条件约束。这一可能的误差是被抵消的,事实上,在极限状态判据中已引入了对加载条件的任何变化都极其敏感的损伤交互作用  $\Delta$  函数。

会出现一种与导致荷载摩擦副系统转变到极限状态的临界能量有关联的特殊情况。这一能量应当与达到极限状态的方式无关,也与损伤的什么机械—物理机制起作用无关。因此,这一能量应当是物质的一个基本特性。本书作者意识到这一特性能够是而且应当是原子键的断裂能(或断裂过程激活能)。

传统的极限状态判据主张,在一个对象中有效应力的激化相当于可靠性和寿命的丧失。本书给出的荷载摩擦副系统极限状态的能量判据实际上却“允许”不同的情况:在一定的条件下,接触载荷和非接触载荷增大,而系统的可靠性也同时增加;然而,在另外条件下,即使这样的载荷是轻微的,却与预期相反,加速了系统衰退。这样异乎寻常的陈述已经获得了试验验证。例如,相较于不受任何接触载荷影响的寿命极限(即纯机械疲劳的寿命极限——译者注),接触—机械疲劳过程中(当接触载荷和非接触载荷同时起作用时)的寿命极限能增大 1.5 倍多(正向效应)。如果一个额外的交变载荷在系统中被激励起来,能容许系统的极限接触压力增大 1.25 倍(负向效应)。对此,可有说服力地、容易地解释为:这是一个在给定条件下发生的损伤交互作用真实过程的问题。

(4) 对材料抗磨损—疲劳损伤新特性的试验测定的意义作过高的评价是困难的。大量的发明和天才的设计方案已经催生了磨损—疲劳试验的新方法和高科技,目前,已在各种条件下测定了这些特性。事实上,以 SI 系列磨损—疲劳试验机为代表的试验设备新种类已经开发出来。对它们独一无二的潜力在本书中有简明的描述。

(5) 摩擦学家的主要任务显然是与磨损作斗争;全世界为此花费了巨大的努力和经费。预防疲劳断裂想来是机械疲劳领域专家们的主要任务;全世界为此又花费了巨大的努力和经费。从摩擦疲劳学观点来看,现在是改变这种做法的时候了,即与其试图阻止这些损伤现象,倒不如去理性地控制它们,至少在某些情况下;因为如上所述,从荷载摩擦副系统的行为这个意义上说,磨损,交变应力也同样,是能有所用处的。本书给出一个法则,指导如何解决对机器和设备中荷载摩擦副系统的复合磨损—疲劳损伤进行最优化控制的问题。

(6) 目前,强度计算方法已经达到近乎圆满的水平。但是,不可能声称摩擦和

磨损的计算也已获得了这样高的成就。按我们的观点,这只是部分地为这一事实所解释,即与其说摩擦和磨损的计算是基于可变形固体力学倒不如说是基于具有粗糙表面的物体之间的非连续接触力学。以深度表示的线性磨损相当于粗糙表面上微凸体高度,如果可接受它为零,那么摩擦磨损过程中配副件之间的交互作用显然应当用非粗糙接触表面的变形容限和表面损伤来描绘。

本书描述了强度计算方法发展中的下一个重要步骤:发展一种采用表面强度(即耐磨性)判据进行计算的工程程序。它基于已被试验验证的这一事实,即周期变形过程和摩擦过程的全疲劳曲线具有相同的形式,都包含四个主要区间,分别描绘准静定、低周循环、多周循环和千兆周循环的损伤和断裂。于是,假如不考虑损伤和断裂的机制,就可能构想出一个统一、规则的结构元件、摩擦副和荷载摩擦副系统强度的计算程序。为此,修正了材料强度中所描述的被施载对象的横截面尺寸确定方法:摩擦过程对机械疲劳特性的影响被加以考虑。此外,计算摩擦过程中所需接触面积尺寸以及确定摩擦系数大小以确保系统的标准可靠性的类似程序也已制定出来。

这是荷载摩擦副系统零件的体积强度和表面强度计算方法的基本特征,在这个方法中充分考虑了正向效应和负向效应。

因此,现在是转变的时候了,即从计算单个零件的强度转变到采用摩擦疲劳学判据去设计机器的荷载摩擦副系统。摩擦疲劳学提供的荷载摩擦副系统损伤和极限状态的设计和试验测试方法支撑着这个转变。

本书包含若干肯定会为专家们所欣赏的其他新成果。例如,他们将记住关于风险和安全评估的概念,它摒弃任意主观地评估材料损伤的做法;基于机械特性的材料质量定量分析方法;荷载摩擦副系统中摩擦系数的概念,它的确定考虑了非接触交变载荷的影响,等等。我们分享这样的共同观点,即摩擦疲劳学是一个明确的途径,它所设定和解决的问题,是关乎在节省制造和运行环节的劳动和材料成本的同时,发展和施行现代机器的荷载摩擦副系统可靠性改善方法这样的实际问题。我们愿意提醒专家们关注发展系统超极限状态理论的必要性。这个理论的初期基础在本书中有简要的叙述。

……当我们在此提及 L. A. Sosnovskiy 教授在本书中公开的一些工作时,读者们将必定理解他的同事们和合作者已经并将继续为这一新而有前景的知识领域的研究成果做出的巨大贡献。摩擦疲劳学产品和研究集团有限公司(戈梅利)的专家们已经与俄罗斯科学院 A. A. Blagonravov 机械研究所(IMASH)(莫斯科)、乌克兰国家科学院强度问题研究所(基辅)、白俄罗斯国家科学院机械力学与可靠

性研究所(IMINMASH)(明斯克)的研究人员及其他研究人员进行了多年的深入和富有成果的合作。第五届摩擦疲劳学国际会议将于2005年召开。它将提供一个机会让来自许多国家的研究者去评价摩擦疲劳学研究进展已过去的阶段。本书英文版的出版无疑将支持来自不同国家的科学家之间在一个新的跨学科的知识领域的共识。

我们相信本书将适用于大学的教师和学生、科学工作者、研究生、工程师和所有渴望了解如何评定和改善运行在复杂载荷条件下的机械系统使用寿命的读者。

**K. V. Frolov** 教授,技术科学博士,俄罗斯科学院院士,白俄罗斯国家科学院院士

**N. A. Makhutov** 教授,技术科学博士,俄罗斯科学院通讯院士

2004年5月



## 英文版自序

任何一个作者都会因为自己著的书以另一种(外国的)语言开始其新生命而高兴。

到目前为止,已经有几部关于摩擦疲劳学的专著以俄文出版了。本书曾以“摩擦疲劳学原理”为书名作为工科大学的教科书进行筹划和写作。“摩擦疲劳学原理”科目首次被引进白俄罗斯国立交通大学的课程是因为该校的机械系主任 V. I. Senko 教授(现任白俄罗斯国立交通大学校长)的倡议。

据我们所知,涉及这一新的知识领域的公开文献中,根本没有以英文写成的书,而且与用俄文写的论文大量发表的情况相反,只发表了几篇用英文写的论文。因而本书可以作为对希望获得一些关于摩擦疲劳学的主要理念和成就方面信息的任何科学家和工程师都有用的一本专著。

摩擦疲劳学的初步知识早已出现在科学领域了。例如,在 1950 年代对于机械疲劳专家而言,一个普通认识是,磨损是降低结构零件疲劳极限的诸多因素之一。20 世纪 50 年代末至 60 年代初,首次发表了一项试验工作的结果,在它里面报道了在影响摩擦副磨损强度的诸多因素中,交变应力是其中之一,它是由非接触载荷引起的。在 1960 年代到 1970 年代,大量发表的涉及微动研究的论文认为,作为对疲劳行为有重要影响的因素,微动显著降低耐疲劳特性(微动疲劳)。然而,达成与上述不同的认识却花了三十多年,即认识到一方面摩擦和磨损,另一方面机械疲劳,它们都不是影响彼此的因素,而是以一种复杂方式彼此交互作用(相互作用)的现象。

这两种关于材料损伤和极限状态分析的方法的重要差别在于:因素的影响总是清楚的;这个或那个危险因素的增长都势必引起强度或耐磨性降低的结果。然而,如果是接触载荷(磨损和摩擦)加到交变载荷(机械疲劳)上,损伤现象交互作用的结果却是错综复杂的,并常常是料想不到的;这样,系统的可靠性和耐用性或可能相当大地降低(如所预料的),或相反,可能增加(绝对料不到的),或可能维持原先的水平(这可能是“容许的”)。这些结果取决于损伤现象交互作用的条件。当上述情况被揭示,就在摩擦学和疲劳断裂力学的交叉中诞生了摩擦疲劳学。那是发生在 20 世纪 80 年代中期的事情。这样,摩擦疲劳学研究的是不同损伤现象之间的复杂交互作用,而不是分开的损伤因素彼此间的