

论服役效能在材料科学与工程中的地位和作用 ——西安交通大学金属材料强度研究所 40 年历程的思考

Position and Role of the Performance in Materials Science and Engineering

顾海澄

(西安交通大学材料科学与工程学院, 金属材料强度国家重点实验室 西安 710049)

一、材料科学与工程的发展简史 和研究内容

1957 年 10 月 4 日苏联发射第一颗人造卫星, 重 80 公斤; 11 月 3 日苏联在一个月內发射第二颗人造卫星, 重 500 公斤。这表明当时苏联已具备发射洲际导弹的能力。同时, 赫鲁晓夫还扬言, 苏联已制成新型号的氢弹, 由于威力太大而不能在本国领土内进行试验。美国迅速作出反应。1958 年 1 月 31 日, 美国发射了“探索者 1 号”人造卫星, 但重量只有 8 公斤。在此前后, 美国原子能委员会(AEC)、海军研究所(ONR)、国家科学院(NAS)、总统科学顾问委员会(PSAC)、国防部(DOD)、国家宇航局(NASA)等不约而同地向总统提出报告, 警告在科技竞争中美国已落后于苏联, 而关键问题则是材料。1958 年 3 月 18 日艾森豪威尔总统通过科学顾问委员会发布“全国材料规划”, 随后决定在 12 所大学成立材料研究实验室(MRLs), 以后扩大到 17 所, 开始由国防部管理, 从 1972 年转由美国自然科学基金会(NSF)管理。这一系列行动就导致了不同于冶金、陶瓷、聚合的新的综合性学科——材料科学与工程的诞生。1985 年 10 月美国国家科学院与国家工程科学院联合召开学术会议总结经验教训, 并公布了这些史实^[1]。今天我们重提往事, 至少可以得到两点启示: 第一, 材料研究居于新兴学科的前沿, 在高技术领域起到主导作用; 第二, 完全不同于研究宇宙中的黑洞, 材料科学从其诞生之日起就注定具有极强的实用性和紧迫性。

从 1984 年起, 美国国家科学院和国家工程科学院再次组织 246 位专家, 成立 12 个委员会, 研讨材料科学与工程的有关问题, 历时数年, 于 1989 年公布了研究报告^[2]。报告的第一章为“什么是材料科学与工程”, 提出材料科学与工程是研究材料的四

个基本要素, 即组织与成分、性能、合成与加工、服役效能, 以及它们之间互相关系的学科, 可用一个四面体来表示(见图 1)。对于这个四面体的底部包含的三个要素, 人们早已比较熟悉。传统的金属学、陶瓷学即是研究成分、组织和性能及其互相关系的科学。从金属的熔炼、铸造、锻造、焊接和热处理, 以及高分子材料的合成和加工来看, 人们对底面的另一角也不陌生。比较遗憾的是国内材料界对四面体的顶点至今尚未达成共识, 甚至译名也不统一。有人把 Performance 译为“演技”, Performance 确有“演出、演奏、表演”的意思, 但如说钢具有“演技”, 多数人会感到茫然。又有人译为“用途”, 这个概念也过于宽泛, 如工具钢都用来制造工具, 但钢种和材质可以千差万别。还有人译作“使用性能”, 这就与底面的另一角“性能”相重复; 所谓“性能”应该包括材料物理的、化学的、力学的基本性能, 这些也是使用中所要求的。我们建议把 Performance 译为“服役效能”, 它的原意是指材料在实际服役过程中所表现出来的行为, 服役过程涉及载荷与应力、机械接触、温度变化、腐蚀环境等等, 行为则包括承载能力、可靠性、持久性、安全性、性能退化、使用寿命等, 还包含经济性和社会满意度(能否再生利用、会不会污染环境等)。采用“服役效能”的术语可概括上述主要内容。

1989 年的这份报告在好几个地方都强调“服役效能”的重要性, 认为这是影响美国工业产品在世界市场中竞争力的重要因素。国外对材料的服役效能非常重视。在美国有 J. of Materials Engineering and Performance 期刊, 在英国 Materials Performance 期刊, 若加上疲劳、冲击、断裂、腐蚀、磨损等方面的, 与“服役效能”相关的国际期刊有 20 多种。英国还在伯明翰大学和南斯旺西大学成立“高服役效能应用材料跨学科研究中心”(Interdisciplinary Research Centre in Materials for High

Performance Applications)。还有很多国际学术会议以“高服役效能”为号召,如“High Performance Metal and Ceramic Matrix Composites”,“High Performance High Hardness High Speed Steels”,“High Performance Plastics”……等等。

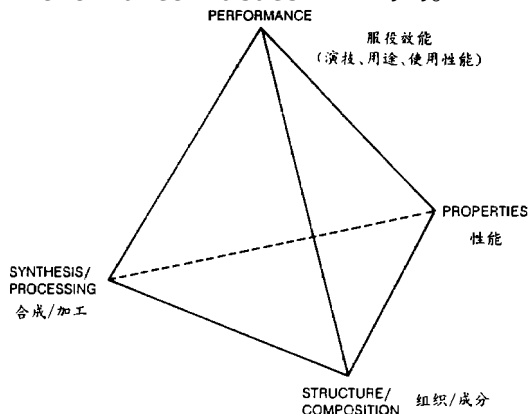


图1 材料科学与工程四个要素

二、对我所40年科研实践的历史回顾

1955年国务院决定交通大学内迁西安,1957年周总理又批准迁校调整方案,到1958年迁校已大体完成,周惠久教授(已于今年2月不幸病逝)出任机械制造系主任。1959年陕西省和中国科学院陕西分院决定在交大成立金属和冶金研究所,周惠久兼任所长;这是金属材料及强度研究所的前身,当时主要进行了多次冲击试验。1962年中央在广州召开全国科学工作会议。会议明确了高等学校是我国科学研究的重要方面军,并决定由国家科委、中科院、高教部共同制订1963~1972年科学技术发展规划,材料强度是机械学规划中的一个中心问题。1963年高教部决定在西安交通大学成立首批专职科研机构,金属材料及强度研究室即是其中之一。1964年国家科委评定重大科技成果100项,多冲理论也在内。

图2是几种典型钢种的多冲曲线,从中可见具有不同强度、塑性、韧性钢材的曲线互相相交。这件事具有重大意义,说明在高能量、少次数冲击载荷下,塑性韧性高的材料占优势;而在低能量、多次冲击载荷下,强度高的材料占优势,这点正是对传统概念的突破。在多冲理论指导下,解决了一大批承受冲击载荷零件的生产实际问题,诸如铆钉窝、凿岩机活塞和钎尾、模锻锤锤杆、柴油机曲轴、石油井射孔器等,使零件的使用寿命大幅度地提高。

多冲理论的精髓是根据服役条件来选择和评价材料,这一思想具有普适性。随后对疲劳的研究也发现,不同材料的疲劳曲线也存在交点;对于承受低周疲劳的零件要求材料具有高的塑性,而对于承受高周疲劳的零件要求材料具有高的强度。这类

的例子还有很多。

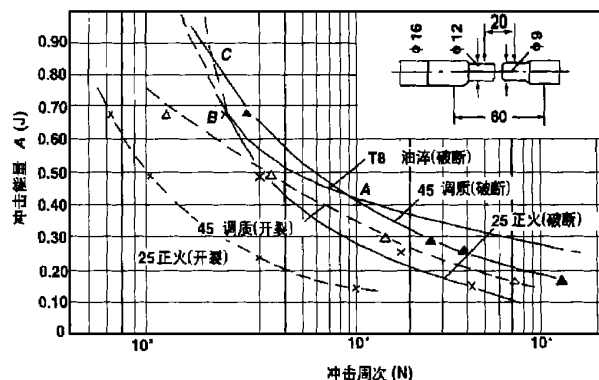


图2 三种典型材料的多冲曲线

在多冲试验中还发现,在一定的强度塑性韧性配合下,多冲抗力会出现高峰。由此推理低碳钢淬火后能得到优异的机械性能,这点很快得到实验的证实。研究发现低碳钢淬火后能得到低碳马氏体组织,由马氏体板条和板条间的残余奥氏体薄膜所组成,这就从微观组织来解释了宏观性能。我们还和钢厂和机械厂合作,开发了一系列适用于各种尺寸零件的低碳马氏体新钢种。低碳马氏体钢在石油、煤炭、农机、汽车、铁道、军工等部门得到广泛的应用,取得了巨大的经济效益。此一成果曾获1987年度国家科技进步一等奖。

鉴于国产钢材强度太低,材料的强度潜力远远没有得到发挥,虽然人们已经熟知强化金属的各种方法,但对提高强度后是否安全还存有疑虑,我们系统地研究了材料力学性能的变化规律。从钢的塑性、冲击韧性、断裂韧性(K_{IC} , J_{IC} , K_{ID})、韧—脆转变、疲劳缺口敏感度、疲劳过载损伤、疲劳裂纹萌生和扩展,到疲劳门槛等方面,都积累了大量的试验数据。同时我们又和工厂合作,把理论放到生产实践中去检验。我们曾和西宁钢厂、天水风动工具厂、北京大台煤矿、安徽铜陵煤矿及南京梅山铁矿等合作,研制高寿命的凿岩机活塞和钎尾;与大冶钢厂、宝鸡石油机械厂、胜利油田等合作,研制用高强韧钢来制造轻型石油钻采工具;与鞍钢、铁道部鞍山工务器材厂合作,研制高强度鱼尾螺栓,并在全国铁路系统大量使用;与太原钢厂和第一汽车厂合作,研制了一批铆螺钢,应用于汽车高强度螺栓等;与包钢、南昌齿轮厂合作,研制稀土渗碳钢,应用于拖拉机制造;与贵阳钢厂合作,改进、研制钎具钢,等等。在科学试验和生产实践基础上,我们总结并提出了发挥材料强度潜力的理论,即根据服役条件,寻求强度塑性韧性三者的合理配合。这项理论成果获国家教委科技进步一等奖和1988年度国家自然科学三等奖,并入选建国40周年《中国基础研究百例》。

以后我们又把服役条件扩大到机械接触(磨损、微动、接触疲劳)、腐蚀介质(细菌腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳)、高温(蠕变、氧化、热腐蚀)和低温等。鉴于多种失效类型都是从表面损伤开始,我们又开辟了“表面工程”新的分支学科,材料种类也由钢铁扩大到有色金属(钛、铅、钨等)、金属基复合材料等。尽管结构陶瓷和金属材料在性能上有很大差别,但服役效能有相同的规律。我们成功地解决了窑具、火箭发动机隔舱、反应堆B₄C控制棒等重大课题。除了结构材料以外,我们还把研究工作向功能材料延伸,解决了软磁和硬磁材料、触头材料、电子发射材料、框架引线材料等服役效能问题。通过以上的种种理论探讨和工程实践,我们深深地体会到,服役效能是材料科学与工程领域的制高点。

有一条红线始终贯穿着周惠久院士的学术思想,这就是“三合一”,即把解决实际问题、开展理论研究和培养高层次人才这三者有机地结合起来。我们始终将眼光盯住国民经济主战场的重大问题,如三峡和小浪底的水轮机过流部件材料、石油和煤炭钻采机具、石油和天然气输送管道、超临界火电机组耐热钢管、核电结构材料以及高速列车的动力及行走部件等。同时我们又致力于知识创新,开拓边缘科学。如把材料科学和固体力学相结合(研究约束条件对材料性能的影响)、和物理学相结合(从电子层研究材料塑性)、和生命科学相结合(研究生物材料和仿生材料)、和能源科学相结合(能源材料的基础研究,材料和能量的交互作用)、和信息科学相结合(信息材料的基础研究和把人工智能引入材料科学)等等。在完成上述两方面科研任务的同时,也锻炼了新生代的学科带头人,培养了高层次人才,每年招收博士生、硕士生30余名,经过40年的辛勤培植,终于在黄土高原上生长出根深叶茂的“大树”。

三、对21世纪我国材料科学与工程的一点刍议

1 可持续发展

我国不能再沿用80年代的经济增长方式,否则有限的宝贵资源和能源就会很快枯竭,对此我们已专门进行了评述^[3]。20多年以前,我们曾提出“一吨钢顶几吨钢用,一个零件顶几个零件用”的战略目标,当时曾得到国家经委的大力支持。1997年日本启动的“超级钢”规划提出“强度提高一倍,寿命延长一倍”,也是同样的意思。我们必须十分珍惜资源、节约材料,使材料能达到最佳的服役效能,同时考虑对环境的保护。面对当前废塑料造成的白色污染,材料工作者不能说自己毫无责任,本来应该在研究聚合的同时也研究降解。应该吸取这个教训。

2 钢铁强国

这里强字读作qi ng,去声,是动词,不是形容词。尽管在发达国家,知识经济的成份已达到GDP的50%,但从中国实际情况来看,在相当长时期内,仍将是农业经济、工业经济和知识经济并存的局面。我们不能简单地把钢铁工业看作夕阳工业。就是在日本也把“超级钢”列为面向新世纪科技规划中的重点项目。对此我们已著文评述^[4]。至少在21世纪初叶,钢铁仍将是各种材料中的“脊梁”。振兴钢铁工业还可带动能源、交通、机械、建筑、国防等产业群。例如我国80%的能源来自火电,每年烧6亿吨煤,而火电的平均热效率只有20%多,国外火电热效率的先进水平已达60%。开发高蒸汽参数火电设备就能提高热效率,但这就受到耐热钢的制约。又如作为第二次交通革命标志的高速铁路,我国与国外先进水平有20余年的差距。从斯蒂文森发明火车起,似乎疲劳事故就一直伴随着铁路运输,这在很大程度上也归咎于材料。去年德国高速列车出轨重大事故就是由车轮疲劳断裂引起的。

人们常说,国产钢材产量有余,而质量不高,对此也要分析。如上所述,评价材料质量的最终判据是其服役效能。例如,一般认为细晶粒钢优于粗晶粒钢;但用于高温的场合,蠕变空洞却首先在晶界萌生,单晶高温合金却反而具有最佳的服役效能。当然也不是晶粒愈细愈好,已有报道,晶粒细到纳米量级,其强度反而降低。又例如,二次炼钢被看作是发生于60年代钢铁革命的主要内容,由此开发了“洁净钢”;但钢也不总是愈纯净就愈好,例如轴承钢中适当放宽硫含量,其接触疲劳寿命反而延长。钢中的铜常被看作是有害的,会引起热裂和降低表面质量,其实铜也有有益的作用,如含铜钢可代替HY80—HY130钢用于舰船制造,力学性能相当同时却有很好的焊接性。再如奥氏体耐热钢中加入铜,其持久强度提高1倍。我们决不能离开服役效能来笼统地侈谈钢的质量。

3 精益生产

精益生产(Lean Production)又译作精节生产。70年代起日本汽车大量涌入美国市场。为此,麻省理工学院Womack等人历时5年,考察了14个国家的汽车业,特别是日本丰田汽车公司,提出精益生产的新概念。采用精益生产可使人员、厂房、投资、库存和开发新产品的费用都减半,被认为是生产方式的重大革命。现在国外已把精益生产引入到钢铁业和铸造业^[5,6]。精益生产也将是我国企业走出粗放运营困境的必由之路。在市场经济,特别是全球经济一体化条件下,我国钢铁工业的最大弱点是成本过高,由此也使机械产品中材料成本的比例偏高。把主要精力集中于提高材料的服役效能,而对其它次要因素放宽限制,将有利于降低成本。

(下转第27页)

的复杂程度,即分维完整地解译了最大水深分布图中所隐含的关于洪水灾害空间分布的复杂信息。从这个意义上来说,完全有理由相信:它将成为“图谱理论”^[9]中的有效的分析方法。

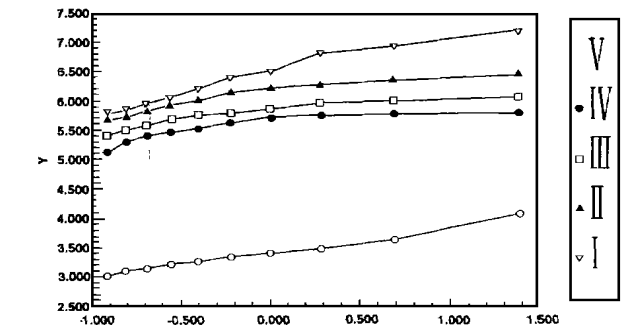


图1 广州市洪水灾害危险性分析空间分维计算图

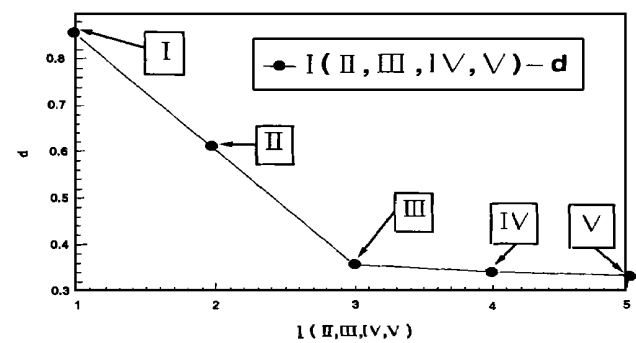


图2 广州市洪水灾害不同等级危险性空间分布的分维值与其危险性等级之间的关系

4 结语

(上接第33页)
本而又提高质量,实现精益生产。例如,对于海洋平台用钢,未再结晶控轧后的抗分层能力就远优于传统的双相区轧制,而成本大为降低。

4 基础研究

在基础研究的国际竞争中只有金牌的位置。中国应该有机会夺取几块金牌。第一是虚拟材料的性能预报。半个多世纪以前钱学森就开创了物理力学新学科,倡导从微观结构来预测材料的宏观性能,但对固体的强度和塑性却没有办法。固体的性能决定于多个层次的因素,由于各相邻学科的进展,应该说现在已具备“毕其功于一役”的条件。第二是按指定用途来设计材料。计算材料科学要能真正取得根本性的创新,并转化为现实生产力,必须从指定用途出发,而不单是从第一原理出发。第三是严酷工况下材料的失效机理及预防对策。人类正在向极限挑战,高科技对材料提出愈来愈高的要求,服役条件将愈来愈严酷,先进材料必须具备相应的服役效能。我们深信,作为人类文明里程碑的材料一定会迎来新的辉煌。

复杂理论为日趋复杂化的洪水灾害系统的研究提供了崭新的方法论。分形作为复杂性理论的基本的数学工具之一,为定量描述洪水灾害空间分布的复杂程度提供了有效的工具,同时也为“图谱”的解译提供了崭新的途径。毋庸置疑,通过开展洪水灾害空间分布的复杂性的研究,将促进人类对洪水灾害空间的分布规律的认识,对减轻洪水灾害对人类的危害起到积极的作用。

参考文献

[1]魏一鸣,金菊良 洪水灾害研究进展 大自然探索 1998, 2: 10~15
[2]钱学森,于景元,戴汝为 一个新的学科领域——开放的复杂巨系统及其方法论 自然杂志 1990, 1: 3~10
[3]Mitchell W aldorp (陈玲译). 复杂 北京:生活·读书·新知三联书店, 1997, 1~6
[4]魏一鸣 自然灾害复杂性研究 地理科学 1998, 1: 25~29
[5]袁征 广东省自然灾害地图集 广州:广东省地图出版社, 1995: 58
[6]Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: Freeman Company, 1982: 2
[7]Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension Science. 1967, 156: 636~638
[8]郝柏林 分形与分维 科学 1985, 1: 9~17
[9]陈述彭,何建邦,承继成 地理信息系统的基础研究——地球信息科学 地球信息 1997, 3: 11~20

(责任编辑 王宏章)

参考文献

[1]P. A. Psaras and H. D. Langford (edited). Advancing Materials Research, Washington, DC USA: National Academy Press, 1987
[2]Committee on Materials Science and Engineering, Materials Science and Engineering for the 1990s, Washington DC USA: National Academy Press, 1989
[3]顾海澄 论我国钢铁等材料产业的可持续发展战略 科技导报,总第116期, 1998(2): 37
[4]顾海澄 对日本超级钢规划的透析和对我国钢铁、机械工业的政策建设 西安交通大学材料科学与工程学院科技资料, 1998
[5]J. W. Edington. Total quality in the steel industry: the challenge. Ironmaking and Steelmaking, 1993, 20(4): 246
[6]G. Engels Foundries challenges are global in scope. Foundry management and technology, 1993, (6): 46

(责任编辑 王宏章)