



中国塑性力学的开拓者

—— 李敏华院士



毛天祥¹⁾ 王柏懿

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 介绍了李敏华院士历经国难艰苦求学以及毕生奉献塑性力学的经历. 她在抗战期间随清华大学南迁至昆明西南联大, 再漂洋过海到美国麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 攻读, 在抚育两个幼子的情况下获得了博士学位, 成为 MIT 工科的第一位女博士. 她在美国国家航空咨询委员会 (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA) 的工作期间, 以独特的构思解决了旋转盘强度问题, 得到国际塑性力学界的关注. 正当她与丈夫吴仲华在美国工作如日中天之时, 他们冲破重重阻力于 1954 年回到了祖国. 她积极投身到中国科学院力学研究所的筹建工作, 为我国塑性力学的建立、发展和人才的培养倾注了毕生的心血. 李敏华关心我国航空事业的发展, 在航空发动机涡轮轴断裂故障处理的课题中, 她认识到研究疲劳问题的重要性, 尽管当时已经 60 高龄还毅然转行带领学生开始低周疲劳的科研工作. 李敏华作为一位女科学家, 她在处理科研工作与家庭事务的关系方面亦是学习的典范.

关键词 李敏华, 传略, 塑性力学, 低周疲劳, 发动机涡轮轴

中图分类号: O344 **文献标识码**: A

doi: 10.6052/1000-0879-15-050

1 美国麻省理工学院机械系第一位女博士

1917 年 11 月 2 日, 李敏华 (图 1) 出生于江苏省吴县, 幼年时曾在振华附小读书, 以后随家人迁居上海继续学习. 1935 年, 她从务本女中毕业后考入清华大学, 抗战爆发后随学校南迁到昆明, 继续在西南联大学习. 1925 年的“五卅惨案”、1931 年的日本侵略东北三省以及 1935 年的“一二·九”学生运动, 都给李敏华留下深刻的印象, 她决心以己所学报效祖国, 并以“航空救国”为目标, 成为联大新成立的航空工程学系的第一批学生. 1940 年大学毕业后, 李敏华留在航空系任教, 1944 年她与丈夫吴仲华一同

抵达美国, 就读于麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 机械工程系, 并先后在 1945 年和 1948 年获得了硕士和博士学位, 毕业论文分别是《用散射光弹解轴扭转》和《亚谐振动的解法》, 都获得很好的结果.



图 1 献身力学、热爱生活的李敏华院士

那时的美国对妇女还很歧视, 她在选读博士时, 麻省理工学院机械工程系负责本科生的教授说: “我不能看到机械系有女博士.” 幸好负责研究生工作的苏特勃教授支持她. 在读博士期间, 李敏华选修了热力学课程, 肯能教授在一次总结考试结果时说: “这次考题很难, 很多人不及格, 第一名考 95 分, 是吴夫人.” 30 多年后, 当 1979 年中国学者访问 MIT 时, 她的老师还记得此事, 并说: “一个小个子的女孩子打败了所有男孩子!” 况且, 当时李敏华已经有了两个儿子需要照顾, 李敏华回忆说: “我之能够学成, 是由于有学成后回国服务的坚定信念; 也是和吴仲华帮助我照顾孩子和家务分不开的.” 当

本文于 2015-03-03 收到.

1) E-mail: tmao@imech.ac.cn

引用格式: 毛天祥, 王柏懿. 中国塑性力学的开拓者 —— 李敏华院士. 力学与实践, 2015, 37(2): 265-269

Mao Tianxiang, Wang Boyi. The pioneer of plastic mechanics in China—Academician Li Miahua. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(2): 265-269

李敏华终于成了麻省理工学院的第一位工科女博士时,波士顿报纸在报道该届麻省理工学院毕业典礼时提到:“中国的李敏华,几个孩子的母亲,证明妇女可以与男子一样,获得博士学位。”

李敏华在 MIT 攻读学位时,一边念研究生,一边照顾孩子. 1975 年她的小儿子病重期间,以及 1988 年初吴仲华肝癌手术后到 1992 年病故期间,她都是在一边工作、一边照顾病人中渡过的. 李敏华用实际行动展示了她是如何处理学业、工作和家庭的关系,她不愧是妇女科技工作者的典范.

2 毅然回国开拓中国塑性力学研究领域

为了取得进行科研工作的实际经验,李敏华决定和吴仲华一起应聘到美国国家航空咨询委员会 (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA) 的路易斯飞行推进实验室工作. 她在强度研究室任研究科学家,进行塑性力学的研究. 朝鲜战争爆发后,他们立即离开 NACA 转到美国布鲁克林理工学院 (Polytechnic Institute of Brooklyn, PIB) 机械系工作,为回国做准备. 其时,李敏华夫妇均已进入了科学研究“如日中天”的境地,李敏华发表了数篇 NACA 报告,还在 1950 年秋举办的第三届塑性年度会议宣讲了重要论文《论应变硬化区中轴对称平面塑性应力问题》,从而奠定了她在塑性力学领域里的地位. 鉴于学术上的成就,她被遴选为希格玛塞 (Sigma Xi) 学会的会员,这是优秀青年科学家才能够得到的一项崇高荣誉. 尽管他们的工作性质很适合、家庭生活很富裕,而且有关方面一直要求他们加入美国国籍,然而他们没有忘掉自己学习工程的主要原因,因此决心回来建设祖国. 但是,由于美国政府对在大学工作的中国理工科留学生的回国事宜横加阻挠,他们历经数年努力,尝试过出国参加学术会议、到印度等地找寻工作、争取联合国的亚洲工程项目以及赴港省亲等途径,均未成功. 最后决定以暑期旅欧名义出行,而且特地选择了星期日乘飞机离美赴英的方案,才避开了移民局的纠缠. 1954 年 8 月,李敏华一家终于离开了美国,绕道西欧、前苏联,并于 11 月通过满洲里回到了祖国.

当时的新中国百废待兴,周恩来总理接见李敏华夫妇时亲切地讲道:“像你们这样年轻科学家夫妇,我国还很少,你们要好好工作.” 这给了李敏华夫妇很大鼓励,他们也是一直这么做的. 从 1955 年秋开始,李敏华以极大的热情投入了钱学森和钱伟长领导下的中国科学院力学研究所的创建工作,她

作为高级研究人员担任了力学所设立的 4 个研究组之一的塑性力学组组长,成为我国塑性力学的开拓者. 20 世纪 50 年代中期,塑性力学在我国尚属空白,她便和王仁、杜庆华等学者一起,携手培育塑性力学的研究人才,在力学所精心组织塑性力学文献讨论会,通过集体学习方式,高效率地吸收国外科研成果和工作经验. 参会者除了有关院校的著名学者外,还有力学所塑性力学组的年轻学子. 李敏华特别安排年轻人参加文献调查和讨论会,使大家从实践中学到科学知识并了解做研究必须具备的科学态度和基本功. 随后,李敏华在钱学森倡导成立的工程力学研究班以及中国科学技术大学力学系开设塑性力学课程,为我国塑性力学事业造就了一支中坚力量.

3 矢志不渝为航空航天事业奉献终身

李敏华从年青时代起就立志理工救国,决心投身航空事业,并取得了一系列重要的研究成果.

(1) 独特构思有效地求解航空发动机强度问题

20 世纪 50 年代初,航空发动机强度是一个挑战性的前沿问题. 李敏华卓有成效地将塑性力学应用于飞机发动机旋转盘的设计,为解决发动机强度问题做出了独特的贡献. 她在 NACA 路易斯飞行推进实验室工作时,进行圆形薄膜在侧压作用下考虑材料硬化的塑性应力应变分析工作. 当时,塑性力学刚刚兴起不久,考虑材料硬化的解更少见,通常都采用形变理论但需迭代求解. 她采用形变理论,运用椭圆方程的角度 α 和无量纲有效应变 γ/γ_c 来表达冯·米泽斯 (von Mises) 屈服条件,使问题由 5 个未知应力应变分量和未知材料参数降为 2 个未知变量 α , γ/γ_0 及未知材料参数. 由于 α 在边界上已知, γ/γ_0 是随应变分量变化的未知量,仍需要迭代求解. 李敏华又引进了一个任意常数 k 将半径无量纲化为 γ/k , 这样在一个边界选定了 γ/γ_0 值,从此边界沿 γ/k 进行计算,直到 α 满足另一个边界值. 这时的 γ/k 值等于 β/k , 由此可定出任意常数 k , 从而不需要迭代可得到精确解. 这种通过无量纲变换和引进任意常数的巧妙构思,从而不需要迭代可得到精确解. 在当时计算机尚不发达的情况下,这种可用于轴对称平面应力问题的方法是非常有意义的. 对此,美国学者斯托威尔 (Stowell E. T.) 评价道:“在求解应变硬化材料塑性应力分布时,几乎不能精确地求解. 而对于轴对称问题,作者 (李敏华) 得到的解就属于精确的或近乎精确的解. …… 即使是

在非常简单的圆孔薄板的一维情况，要同时满足协调方程、平衡方程、应力应变关系和边界条件，也不是一件容易的事。由于作者非常巧妙地引进了任意常参数，作者相当精确地满足了上述条件。”他最后说：“作者提供了一系列精确解的典范，这是她的特殊贡献。”

当时，人们对形变理论是否适用有不同看法，尽管薄管实验结果已经证明：对于比例加载（即加载过程中主应力方向和比值不变），形变理论是可用的。李敏华针对轴对称平面应力问题，给出了两种不同硬化性能材料在不同载荷下圆孔薄板和旋转盘问题的解。结果表明：每种材料在不同载荷下的 $\alpha-\gamma/\beta$ 曲线接近；而且对这一组轴对称平面应力问题，主应力的比值 σ_r/γ_0 和 α 成线性关系。这说明在加载过程中各点满足比例加载，因而形变理论能用于轴对称平面应力问题。李敏华将此结果在布朗大学举行的塑性力学学术会议上报告，受到几位著名塑性力学家的重视。李敏华还发现，不但上述每种材料的 $\alpha-r/b$ 曲线很接近，而且两种材料的 $\alpha-r/b$ 曲线及 $\gamma/\gamma_0-r/b$ 曲线也分别的比较接近。因此，她又对理想塑性材料（即幂硬化指数 $n=0$ ），以及包括大部分工程材料的幂函数近似范围内的 n 值进行了计算。结果显示，不同 n 值的 $\alpha-r/b$ 曲线簇及 $\gamma/\gamma_0-r/b$ 曲线簇都分别的相当接近。因此，她对协调方程和用幂函数近似材料曲线的平衡方程进行分析，略去其中的低阶小项，得到了材料曲线对主应力比值分布和比例应变分布的影响都不大但比例应力分布因受材料 $\tau(\gamma)$ 的影响各不相同之结论。这表明对塑性变形问题应变协调起主导作用，并由此提出一个近似解法。对每一个轴对称平面应力问题，只需计算一个解，所得到的 $\gamma/\gamma_0-r/b$ 曲线可作为该问题的无量纲有效应变分布的近似解，再用实际材料曲线得到应力分布和外载。此近似解并可用来求解当时无法解决的非均匀材料性能，包括不同温度分布引起的非均匀材料性能的问题。随后，李敏华又通过计算推广到轴对称平面应变问题，通过实验推广到平面应力问题。由以上的这些工作她认为若零件所受外载比例增加，对塑性大应变问题、形变理论可以应用，而且也具有上述塑性形变的特性。

回国以后，李敏华又通过计算对上述工作进行了推广，研究了材料的应力应变曲线对于塑性平面应力问题解的影响。相关工作获 1956 年中国科学院自然科学奖（国家级）三等奖。鉴于科研工作的成

就，1957 年她还被选派参加在莫斯科举行的第六届世界青年联欢节。

(2) 研制试验航天烧蚀材料的瞬时加热加载装置

1958 年 5 月 17 日，毛泽东主席发出“我们也要搞人造卫星”的号召。8 月，中国科学院以力学所为主成立了负责人造卫星运载火箭总体设计和发动机研制的第一设计院（1001 设计院）。李敏华被聘为高级研究人员，她不仅参与了相关研究工作，甚至和年轻人一样过着军事化的集体生活。

由于卫星回地时，重返大气层过程中会遇到高温高速气流冲刷，飞行器表面可能因为材料烧蚀而受损，故而需要研制耐烧蚀材料及地面模拟实验装置，1959 年李敏华作为研究室副主任，接受了筹建实验装置的任务，通过调研决定采用火箭发动机喷焰加热的方式。由于时间紧迫，不可能研制常规的火箭发动机，她提出了炽体引燃方法，从而大大缩短了设计和加工的周期。在不到半年的时间内，课题组便在国内首次实现了驻点温度超过 1000°C 的高温实验。科学院副院长裴丽生亲自带了化学所研制的抗烧蚀材料来做实验，钱学森所长也带了力学所中层干部来参观。航天部有关部门亦极为重视，专门组织参观并进行仿制。

随后，在组织航天预研项目工作中，李敏华又亲自指导建立瞬时加热加载实验装置的工作，此期间常要和年轻人一起到位于南苑东高地的七机部去联系工作，当时交通甚不方便，从中关村出发到达东高地仅在路上就要花去将近两个小时，她依然率队前往。李敏华提出了应变测量方法，并与研究组内科研人员一起调研了几种可能的加热方法并确定了实施方案，以确保得到试件试验段的瞬时均匀温度。历时 4 年时间，他们终于在国内首次研制成功了瞬时加热加载实验装置，这个大型实验装置包括材料试验机（包括恒速加载机构和拉力夹具等）、加热系统（包括加热、控温和测温等）以及载荷变形记录系统三大部分，可以进行高温快速拉伸和短时蠕变实验，从而为高速飞机与飞航导弹等轻结构的设计提供依据。利用这个装置，课题研究组对一系列材料进行了短时拉伸、短时蠕变、恒载等加热率实验。相关工作引起了航天有关部门的高度重视，七机部 703 所经常派人来所里切磋技艺、交流经验，三机部有关研究所还完成了米格飞机尾翼 1/4 模型的加工，准备送到力学所来做模拟实验（后因文化大革命的爆

发而被搁置了)。由于这项工作的完成,课题组被评为力学所的先进集体。

(3) 发展新解法分析航空发动机涡轮轴断轴故障

20世纪70年代初,针对航空发动机涡轮轴断轴故障,李敏华承担了在扭矩作用下喇叭轴应力分析工作,针对问题的症结需要得到小凹槽高应力集中区域的应力应变值。在对飞机发动机涡轮轴应力分析的基础上,她提出变截面轴扭转问题的一个新解法:利用向量的散度与旋度对不同坐标系是不变的特点,通过张量分析,推导出在任意非正交曲线坐标系中变截面轴扭转问题的平衡和协调方程,包括用应力函数表达的协调方程和应力函数与应力分量的关系式;用任意非正交曲线坐标和差分法求解应力函数;将任意非正交曲线坐标引入差分法,以便更准确地给出曲线边界上的边界条件。这样,通过计算得到了全轴的等应力函数线和剪切应力分布,并给出了小凹槽任意点的应力。这个计算结果与光弹实验结果很接近,她还计算了有解析解的空心锥轴,与相应的解析解相比,误差小于 $1/100$,从而验证这个方法的可靠性。这种新解法收敛性好,所需计算容量小,应用方便,便于编排通用程序,计算量较有限元法少,而且由于采用了任意非曲线坐标,因此适用于解决复杂曲线边界问题,提高了通常用的差分法的适应性和灵活性。此外,新方法采用应力函数作为未知量,从所得到的等应力函数线和等位移函数线,还可以看出全轴应力分布概况,并可以帮助改进设计。

李敏华一直坚持亲手推导扭转问题在任意非正交曲线坐标系的方程,而且非常注重理论的实际应用,她结合航空部410厂及420厂的任务,将这个新方法运用到对发动机涡轮轴的应力分析上。那时,李敏华已将近60岁了,仍常常扑在桌上看一张张大大的涡轮轴工程图,不时与航空部有关工厂研讨修改设计参数方案,然后再做数值模拟试验、与实验数据比较,反复核验计算结果。这种作法获得了工业部门的首肯,航空部有关部门专门来信对涡轮轴分析工作进行了评价:“对比有限元、光弹实验及涡轮轴疲劳试验的结果,该计算结果是比较准确的。……该计算可按强度分析需要校核轴外表面任意点处的强度,是它优于有限元法的主要特点。这正是当初故障研究所需。”鉴此,这项工作获1978年中国科学院重大成果奖。

(4) 倡导学科交叉开展材料疲劳研究

李敏华参加航空发动机涡轮轴断轴故障分析会后,深深感到疲劳问题的重要性,便将自己的研究方向从应力应变分析转向疲劳问题研究。她认为力学工作者应当和材料科学家配合起来,协同进行疲劳研究。特别是,力学工作者应逐步考虑微观因素,以便从内在因素进一步了解宏观反应,只有从宏微观结合的角度出发才能较好地研究疲劳机制。于是她主动与中国科学院金属研究所的王中光教授等人密切合作,共同观察,一起分析,解释实验中出现的现象。

李敏华认为,只进行圆棒试件和圆棒缺口试件的宏观疲劳实验,对了解在疲劳加载过程中试棒内部的变化是不够的,因此她不顾“自己的疲劳”而决定要进行低周疲劳的实验研究。为了保证试验件的质量和试验结果的可靠性,她不顾年事已高,亲自到南昌航空工业部的飞机工厂(320厂),请他们用不同厚度的航空铝板加工成实验试件进行实验研究。为便于测量试件在疲劳加载过程中应变分布的变化,她还采用圆孔薄板铝试件来研究应变分布变化规律,由此得出关于应变协调起到主要作用的结论。这样,李敏华又提出用全量应力-应变关系和分段幂函数近似实际疲劳循环曲线的模型(简称为分段全量应力-应变关系模型),指导研究生编制了平面应力问题程序,所得到的计算结果和实验结果比较相当一致。接着,她又指导研究生发展了三维问题的计算程序,用以求算疲劳载荷作用下试件的应变分布和应力分布。与此同时,李敏华还进行了超载对圆孔铝合金薄板试件疲劳寿命影响的实验研究,重点研究拉-拉低周疲劳,得到了超载60%、疲劳寿命增加3~4倍的结果。她还进行了圆缺口小板抛光的铝合金试件的超载对试件晶粒滑移线影响的研究,观察到在超载60%的情况下试件出现由交滑移引起的细而密的滑移带,以及超载滑移带对主载滑移带的发展起阻碍作用的现象。这就解释了一定程度的超载的确可以使疲劳寿命增加的原因。

直到年届80高龄,她还亲自指导研究生从事疲劳研究。

为推动我国疲劳研究工作的学术交流,从1982年开始,李敏华发起组织了两年一届的全国性疲劳学术会议,由中国力学学会和航空学会联合轮流召开,以后机械工程学会和金属学会也先后参加,最终发展成为4个学会联合轮流主持。这样就筑构一

个跨学科平台,强化了力学工作者与材料科学家、理论研究与试验研究相结合,以及宏观研究与微观分析相结合的趋势,推动了疲劳研究的学术交流。

4 良师益友倾心呵护青年学子成长

李敏华对年轻学子的培养,花费了很多心思和精力。每位年轻人分配到研究室、课题组来,她都亲自谈话,了解业务基础、兴趣爱好等情况,以此来确定每个人的工作方向。特别是在建所初期,她首先设法使年轻人具备研究塑性力学必要的基础知识,如固体力学、应用数学、实验技术等,并言传身教培养大家的查阅文献能力。她安排年轻人去北京大学数学力学系及清华大学工程力学班旁听相关课程,让他们参与各种学术会议,还为每一名年轻人聘请一位高级研究人员进行指导,使青年学子迅速成长起来。

1958年,中国科学技术大学成立,李敏华担任力学系固体力学专业教研室主任,并亲自为学生们讲授《塑性力学》课程。在中国科大力学系亲耳听过李敏华讲课的学生,深深感受到老师对自己成长的影响。她作为一位科学家,首先在德的方面给大家做了典范。李敏华是兼职教书的,她承担着科研任务,还要帮带所里的年轻科技人员,但是她备课非常充分与认真,使学生们十分感动,也促使他们从大学的学习阶段开始就注意养成对事业负责的品行。其次,李敏华教学生不仅是教知识,而且是教学生怎么去获取知识的方法、怎么处理实际问题的方法、怎么分析问题的方法。在她的教学当中充分体现了这一点,所以学生们从大学的学习阶段开始就懂得了自学与治学的途径。最后,李敏华在教学生们知

识的同时,将整个学科的发展动态都交给学生们了。对于塑性力学的模型、本构关系以及其中的理论,还有处理问题的方法,都给学生们概括得非常清楚,使学生们体会了全局与局部的关系以及必须抓住关键因素解决主要问题的思路。她的教诲使学生们终身受益。

1978年,研究生制度恢复招生时,李敏华招收了8名学生。她对这些研究生的学业要求十分严格,选定了线性代数、常微分方程、数学物理方程、计算方法和张量分析等作为基础课,又指定了弹性力学、振动与稳定、塑性力学和有限元方法作为专业课。由于学生都是学业荒废十多年之后重新拿起书本的,学习相当艰苦,几个学生曾一起商量让李敏华先生免考塑性力学,但她没有同意,并用自己在麻省理工读博士的经验告诉学生:学完一门课程,只有经过考试,才能有深刻的记忆。与严谨甚至苛刻的学术作风成鲜明对照的,是她对弟子们“祖母式”的关怀。当年,由于户籍政策,当时不少研究生们都是长期两地分居达七八年之久,她特别同情两地分居的困难,多次和所里商量,寻找解决问题的办法。李敏华对女弟子、女助手格外关心,经常与她们探讨如何处理学业、工作和家庭的关系。

作为著名的固体力学家,李敏华在事业上奋力求索,在生活上充满情趣。她很爱种花,在办公室和家中的窗台上都是她亲手种植浇灌的花,有吊兰、海棠、蟹爪兰,还有各式仙人掌。她常常说:“科研工作出成果很慢,需要做一些像种花这样的易见成果的事。”李敏华无论在事业上、在生活上都像一朵永远鲜艳的花儿那样美丽芳香!

* 新书架 *

《全国周培源大学生力学竞赛赛题详解及 点评 2015 版》简介

受教育部高教司委托,教育部高等学校力学教学指导委员会、中国力学学会和周培源基金会将于2015年举办“第十届全国周培源大学生力学竞赛”。本次竞赛由《力学与实践》编委会和中国力学学会教育工作委员会承办,由中国力学学会教育、科普工作委员会、山东科技大学、中国人民解放军军械工程学院协办。

为了帮助全国各高校的参赛学生更好地了解竞赛内容及其变化,机械工业出版社已于2015年3月出版了高云峰和蒋持平主编的《全国周培源大学生力学竞赛赛题详解及点评 2015 版》。本书汇集了这项竞赛前九届的全部赛题和详细参考答案,并结合命题小组的赛题设计初衷和全国各赛场的竞赛情况进行了针对性的点评。

本书还附录了高云峰与中央电视台《异想天开》栏目合作策划的大型趣味实践活动。

本书读者购书热线 010-68326294, 010-88379203。