

创新·严谨·团结·奋进

当前位置：首页 > 科学传播 > 力学家地 > 情系科学

情系科学

【情系科学】热塑剪切带 (I)

发布时间：2024-10-17

编者按：国际著名力学家，中国科学院院士、欧洲科学院院士，第十、十一届全国政协委员，国家自然科学基金委员会数学物理科学部原主任，中国科学院力学研究所原副所长，中国力学学会原理事长白以龙研究员，因病于2024年5月9日9时21分在北京逝世。白院士曾在2020年撰写了回忆录《求索（八十年的个人经历和感悟）》，其中不少篇章谈及他从事科研的体会，展示了深厚的学术功底、对复杂问题有独特的见解和正确的判断能力，对年轻学子颇有启发意义。本刊特此选取其中的第五章文字，分三次连载（编者对文字做了一些修订，并在排版上做了一些调整），以飨读者。

热塑剪切带 (I)

白以龙

对热塑剪切带的研究，是我的研究生涯中的十分重要的一环，前前后后持续了一、二十年，而且从理论分析，实验研究，以及数值模拟等多个方面，进行了全方位的研究，更获得了国际上的认可和声誉，例如，美国的John Reinhart奖的颁奖词中写道：“对剪切带形成的理论做出了原创性的贡

献 (seminal contributions) ”。因此,我觉得有必要在这里把有关这个问题的研究背景、存在问题、研究思路,等等,做一个比较系统的归纳和总结。

1. 缘起

最早引起我对热塑剪切带的重视,是在七十年代中期,我还在二室,正处于从“文革”混乱,向能搞科研的状态发生转折的阶段。我之所以重视这个问题的来源有两个。第一是,那时的二室三组是在做坦克的穿甲和破甲问题,主要是与五机部(后来改名为兵器工业部)下属的几个工厂以及研究所合作,我们则作为龙尾跟着他们跑,我曾经参加了一部分这些合作的事情。在这些五机部的研究所中,有一个是位于包头的五二所,是专门配合兵器应用,从事材料研究的。他们所有一位女研究人员,名叫羨梦梅,她的专长是金相分析。那时,羨梦梅的主要研究工作是,配合穿甲试验,研究穿甲中材料的金相变化,以便为进一步的兵器材料研制提供线索。她拍了很多在穿甲以后的靶板的金相照片。这些照片显示,在穿甲弹孔附近的靶板上出现了许多白色的,若干微米宽的条带,这些白色的条带往往与靶板里出现的微裂纹相关。她从金相学的角度判读,这些白色的条带,应该是靶板的钢材里发生了马氏体相变。所以,我们在一起讨论,在穿甲过程中,为什么会发生这些白色的、马氏体相变条带,以及这些条带的形成对于靶板抗穿甲的能力到底起着什么作用。(很可惜,她不久调离了五二所,离开了这项工作,我们失去了联系。)

研究这个问题的第二个来源在于,那时,我们正在推进我们四组(材料力学性能研究)发展方向的调研。在七十年代中期,正是国外发展起来的断裂力学,在国内狂飙突起,大为盛行的年代,加之穿甲过程又是穿甲造成的冲塞与靶板分离的过程,因此不少人认为,应该用新兴的断裂力学来研究穿甲过程。但是,羨梦梅和我们都感觉,穿甲中发生的冲塞与靶板分离的过程,不像是断裂力学中所涉及的一条宏观裂纹的失稳。因为,断裂力学最成功的地方,是所谓的I型(拉张型)宏观裂纹的失稳,穿甲中的现象,显然不是拉张型裂纹。断裂力学所涉及的另外两类裂纹是II型(滑开)和III型(撕开),虽然穿甲中的冲塞与靶板的分离,与其中的II型滑开剪切宏观裂纹类

似，但是，穿甲中出现的白色马氏体相变，只有在高温下才会出现，而且，穿甲中冲塞的形成，不涉及任何已经存在的初始宏观裂纹，而这却正是断裂力学的前提。

我们专门针对材料的动态力学性质，进行了仔细的调研，后来还以我和赵士达，林玉环、寇绍全、杨根宏合作的形式，写成了一篇综述“材料动态力学性质研究简况”，发表在了《力学进展（力学情报）》（1979）上。在这篇文章中，不仅概括了我们调研后列出的材料动态力学性质的七类重要的现象，更单独列了一节‘动态破坏’。在这一节的开头，我们写了下面这么几句话，实际上，这些话是我们当时经过调研，所形成的观点，也是我们后来进行研究的潜在指南。

“动态破坏现象虽然大量是从连续到非连续过渡的困难问题，近年来仍获得各方面的重视。主要是因为，

第一，动载荷下材料破坏与否，比起变形大小要重要得多。一些结构，如防护工事，装甲车辆等，即使变形大点，但只要不破坏就是成功。而另一些结构，如弹壳，即使变形再大，但不破碎，也就不能充分发挥威力。

第二，不管本构方程的理论和实验如何不完备，在工程上仍可借鉴静态，或加了动态修正的材料力学实验数据。但是对动态破坏，不研究它本身，甚至最粗略的估计，也难以做出来。

第三，动态破坏现象面貌独特，便于单刀直入，而不受传统破坏观念的束缚。”

接着，该文章除介绍了大规模塑性流动这类依然是连续性的问题外，集中讨论了三类从连续到非连续过渡的破坏现象：裂纹的动态扩展，崩落，绝热剪切不稳定性。

对于“绝热剪切不稳定性”，当时写道：

“在承受弹道或炸药爆炸的金属和合金中，常见到有很薄的大剪切变形区。由于动态过程很快，塑性功便绝热地加热着这个区域，造成该区的热软化，以至剪切变形更容易发生，并恶性循环，因此称为绝热剪切不稳定性。

目前大量的工作是做显微观察和分析，弄清楚基本的物理特征。已表明，绝热剪切和断裂是既相关又不同的现象，在显微照片上，断裂是张开的，发生在压缩消失之后，而绝热剪切在压缩条件就可产生。”

“关于绝热剪切的宏观准则。目前工作还不多，基本上是两大类。一类是最大塑性功，另一类是极限剪切变形条件。实验方法主要是做冲击剪切。目前给出的数据较少，即使如此，有的数据还相互矛盾。”

从以上两个方面可以清楚地看出，我后来投入热塑剪切带研究的背景和动机。

这里应该提到，在这篇调研报告之后，寇绍全曾专门就绝热剪切写了一篇调研综述《力学进展》（1979），标题为“绝热剪切——一个值得重视的材料破坏问题”，把我们在简况一文中对这个问题研究情况的简介，进一步做了展开性的、全面的介绍。那时，我已经到了牛津，我们之间中断了联系。十分遗憾的是，寇绍全在写了这篇调研综述之后，可能因为国内各种事情太多的干扰，他自己却没有切入进这个问题，去做具体的研究工作，而将事情搁置在那里了。而我在牛津，开始是集中全部精力跟着Harding做复合材料的冲击试验，后来是一边白天做试验，一边晚上做热塑剪切的分析，一天到晚心无旁骛，全心全意埋头在这个研究工作之中。

2. 突入热塑剪切带

在第一次访问牛津的时候，我把大量的时间和精力，都用在了和John Harding 合作的关于复合材料的研究中。实验工作量很大，试验的各种环节也比较多，我都一件件努力地、用心去做。John对于我的工作进展还比较满意，可是，我对自己却不太满意。因为，我这时正在发愁，John不太爱提炼科学概念和形成文字，我的大量照片和数据堆在那里，形不成东西！这时，我在牛津的时间已经过去差不多一半时间了，我没有看到什么让我兴奋

起来的科学进展。而且，因为实验工作比较多，所以除了做实验的个别晚上，一般晚上就没有太多的事情可干了，也就是看看电视，提高一下英文，增加一些对英国的了解，我的心里有些空得发慌。我觉得与其这样度过时光，不如自己干点“私活”，也就是干点自己觉得有兴趣的科学问题，可能更有意义一些。于是，我开始动手，把在国内时已经干了一段的对“热塑剪切带”的研究，重新拣起来，每天晚上有空时，接着再往下做。

通过前几年的调研工作，我发现，当时国际上对绝热剪切带的研究工作，大体上是两类：一类是试验显微观察；一类是经验性准则，如最大剪应力准则、临界应变准则、临界应变率准则等等，不一而足。但是，我所受到的科学教育告诉我，科学研究的探索是不能陷入这样的、无穷尽的表面假设之中的，对于真正的力学研究，更不应该是如此。对于一个涉及多个不同的物理过程的复杂现象，我应该做的是：去揭示他们之间的相互关系，特别是要阐明它们在整个问题中的相对重要性。

于是，我决定根据大家已有的经验认识，把这些感性的认识，转化为理性的物理机理。这样，我根据前几年看到的穿甲冲塞的实际状况，先把问题提炼为空间一维，但是依赖时间变化的、简单剪切问题。这样一来，针对这个简单剪切问题的力学的三大定律：质量、动量和能量守恒，加上一个包含应变率和温度的本构关系，就导致了一组简洁明了的偏微分方程组。这时，我忽然意识到，我找到了认识热塑剪切带这一复杂现象的，一个与前人不同的、物理上又扎实可靠的、新的出发点和钥匙！

面对固体力学里过去不曾涉及的这样一套物理模型方程，我每天晚上憋在家里，把一个个问题进行梳理：例如，这组控制方程应该怎么理解和恰当处理，主控因素都有哪些，怎么切入不稳定性的发生，等等。这时，我大学和研究生学习中的流体力学知识，却直接帮上了我的忙：流体力学中惯用、而固体力学几乎不曾涉及的手段，包括量纲分析和小扰动稳定性分析，帮助我大大地简化和提炼出来了整个问题中的一个核心点：在这个问题里，虽然涉及到了大约十个参量，但是在讨论不稳定性相关现象时，却可以归缩为三个独立的无量纲量： A, B, C 。它们的组合，则决定了均匀的热塑性简单剪切变形模式，是如何就会变得不再是稳定的了。而这三个独立的无量纲量中，

其中最关键的一个是 $B=(\beta P\tau)/(\rho cQ)$ ，即它是包含密度 ρ 、比热 c 、剪应力 τ 、应力随温度变化的导数（热软化 P ）、应力随应变变化的导数（应变硬化 Q ）、塑性变形功转化为热的比例系数 β ，多个物理因素综合在一起的一个无量纲数。或者简单说，是表达热软化、应变硬化、以及塑性功转化为热的几个物理量的组合，其核心物理概念是：在剪应变增量 $d\gamma$ 下，塑性功增量转化为热（温升）导致材料热软化，与该应变增量 $d\gamma$ 导致的应变硬化，二者之比。另外的一个无量纲量 A ，是应力的应变率敏感性与热传导之比，从而是与时间相关量挂钩的一个无量纲量。而第三个无量纲量 C ，则是以上两个无量纲量的一个组合，因此也与时间相关。

接着，我按照我在力学所受到的熏陶，把几年来搜集和积攒下来的，针对实际工程材料的基本数据，放到那些无量纲数中去做量级估计和比较，结果发现， $A \gg 1$, $C \ll 1$ ，从而工程中最常用的最大应力准则，是我所讨论问题的一个近似结果，即 $B \geq 1$ 。所谓的绝热，也只是站在狭窄的剪切带外面，在有限的加载时间里，考察这个问题的一种近似。

当时，我把注意力全部放在了与热塑剪切不稳定性密切相关的无量纲量 B 上面，忽略了无量纲数 A 的物理意义的挖掘。其实无量纲数 A 本质上就是流体力学里面十分重要的Prandtl数，即粘性和热传导之比！我从工程数据中总结出来的 $A \gg 1$ ，其实就是固体材料在动态工况下，其粘性（应力的应变率敏感性）大大地大于其热传导性的表征。因而，在同一个时间尺度下观察，热效应就非常局限在空间上非常狭窄的带状区域里，所谓的热塑剪切带就是自然而然的了！这已经是我几年后，研究这类剪切带的宽度和间距时，才充分认识到了的，见本章的后面几节。

显然，这种先跳出绝热、最大应力等先验性的假设，从物理上全面地来做理论分析，量纲分析，以及基于实际数据的数量级分析，再回过头来审视经验观察和经验规律成立条件的思路，非常有效。

正当这时，John给了我一份在美国将要召开的关于冲击波和高应变率下材料行为会议的有关材料，但是，John和我都觉得我们在冲击载荷下复合材料的力学行为的研究上，还没有拿得出手的科学内容。相反，我对热塑剪切

带的工作，正好有了上述那些比较明确的结果。于是，我抓紧用一些实验数据来做进一步的检验，确实，我得到的那个关键的无量纲数的条件，效果相当不错。而且，我进一步严格论证了，上述无量纲数准则的简化近似，退化经验性的最大剪应力准则的适用条件。在这个基础上，我就把这个结果写成了一篇短文，寄给了美国的会议。虽然，后来国内没有批准我去美国与会的申请，但是，我的这篇短文，在我缺席会议的情况下，仍然被会议主席收在了会议文件及以后的正式出版物里，我就这样，与美国的学术界建立了联系。多年以后，会议两主席之一的Marc Meyers对我说，他当时看见一篇来自中国的稿子，内容很新鲜，论证也很充分，于是决定收下，后来，这篇文章在会上和会后，反响都很好。就这样，我和Marc Meyers未曾谋面，竟成了朋友，直到十多年以后，他邀请我去美国访问，我们才第一次见面。

(未完待续)

下一篇：【情系科学】一件难忘的往事——缅怀李政道先生

版权所有 © 2024 中国科学院力学研究所 京ICP备05002803号-1 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮政编码：100190

