

细观力学: 细观结构与力学的纽带

G.K.Haritos J.W.Hager A.K.Amos M.J.Salkind

美国空军科研处

A.S.D.Wang

Drexel 大学

提要 细观力学 (mesomechanics) 对于发展非均匀材料的非连续介质力学是一种新的研究推动力。通过促进材料科学和固体力学学科之间的更密切合作, 这种新推动力力图把力学原理应用到多相材料的细观结构组成上, 从而把细观结构与力学之间的关系置于定量的基础之上。本文阐述了由细观力学的研究而产生的一些挑战和良机。

1 引言

结构力学主要是从应用数学发展而来的。在历史上, 力学家曾假设结构材料是均匀和各向同性的。近来, 考虑到材料的某些各向异性而非均匀性而修正了这种方法。材料学科是从化学发展出来的一门学科, 它包括得到所希望的材料性能的工艺过程。显微镜能够使材料学家研究材料的细观结构及其与力学性能之间的关系, 在得到所希望的细观结构和性能的金属工艺过程方面已经取得了更大的进展。

随着工程多相材料 (最值得注意的是纤维复合材料) 的出现, 设计具有特殊性能的材料细观结构的前景给固体力学家和材料科学家都提供了一个新的机会和新的挑战。例如, 在纤维复合材料中, 可以精确控制纤维-基体的排列方式, 这样就有可能修改其刚度、强度和其他有关的力学性质, 以便满足指定的功能要求, 并且有可能在力学原理的基础上用数学来描述这些性质。可以预料, 在设计具有其他的相几何形状和组分类型相结合的多相材料时也可应用类似的方法。因此, 这种新趋势是把工程设计的事实上无限可能性考虑为一大批新材料, 这些新材料拥有事前指定的性质, 这些性质将能满足所要求的精度, 或者将在非常恶劣的环境中维持正常工作。

这种新趋势引起了固体力学界和材料科学界对各自所起的作用及其相互关系进行重新探讨。现在, 为了定量描述各种类型的细观结构, 为了了解特种类型的细观结构对载荷是如何响应, 以及它是如何失效的, 为了列出合适的本构关系式, 以及为了研制获得所希望的细观结构所必需的工艺过程, 这两个学术界的更密切合作是必需的。Drucker(1981) 将这种趋势描述为: “……细观结构的设计是为了给出任何所希望的……宏观性能的综合。” 根据 Salkind (1976) 的看法, 这种材料设计的观点是先进复合材料的真正革命性影响。

在过去的几年中, 在固体力学界组织了几次研讨会 (美国国家科学基金会 (NSF,

1984), 美国机械工程师协会 (ASME, 1985), 美国国防部高级研究计划局海军研究署 (DARPA-ONR, 1984), 其目的在于确定未来有关研究方向, 并促请政府增加研究基金。这些活动为未来的固体力学研究开辟了广泛的领域, 其中包括材料在生物工程、电子、地质和结构等方面的应用。所有这些研究领域的一个共同点是, 需要在本构基础上建立材料细观结构与细观结构对宏观响应的影响之间的关系。

2 细观力学: 研究倡议

空军科研办公室认识到, 固体力学界的新倡议有理由认为是一种新的研究推动力, 并且以“细观力学: 细观结构与力学的纽带”的题目表示这一倡议 (Haritos et al, 1987)。此研究倡议的主要目的, 是根据力学原理来建立定量的细观结构与性能之间的关系。

产生这个新方向的部分原因, 是由于人们很快接受了新材料, 最值得注意的是复合材料。在过去20年里, 复合材料的使用率从2% (F-15) 增加到10% (F-18) 和30% (AV-8B); 按照 Salkind (1986) 的说法, 先进战斗机 (ATF) 的设计将含有40%—60%的复合材料。这些新的结构材料同样已经广泛应用于民航机、汽车、体育用品以及机械工业。在降低工艺成本和材料成本的基础上, 纤维复合材料的使用将继续扩大。力学和材料工艺科学在研制和应用复合材料方面正起着更密切的作用。

然而, 纤维复合材料仅仅是通过设计细观结构而制成的一类多相材料。目前有兴趣研究的其他材料包括陶瓷、陶瓷-金属基复合材料、短纤维复合材料和颗粒复合材料, 碳-碳复合材料和胶结复合材料。确信, 将研制出具有至今还不能想象其细观结构的其他多相材料, 以便提供更高的劲度和强度, 或控制声阻尼和振动阻尼, 或改善材料抗冲击载荷和抗恶劣环境的能力。

“细观力学 (mesomechanics)”这个术语的意图是描述一个在材料的细观结构-宏观性能关系与非连续介质力学之间架起桥梁的研究领域。这与将本构模型建立在唯象材料性能基础上的传统方法不相同。细观力学的目的是发展基本原理和有关的方法学, 这些原理和方法学一方面可以指导创造具有所希望细观结构的多相材料, 另一方面可以预测所创造出的多相材料在使用中的细观和宏观行为。

不能夸大在这种新尝试中内在的困难。对这里所提出的内容, 无疑将对现有力学理论引起极大修正, 并且可能产生新的力学概念。为了摆脱传统连续介质概念的束缚, 将要求在分析力学和实验力学二者的研究中作出创新。

3 力学和材料研究中的新推动力

针对上述情况, 新的研究倡议将包括下列一般领域的基础研究。

3.1 建立多相材料的本构模型 本构模型是材料对施加外载 (包括环境因素) 所作的变形响应的一种数学表达。传统的连续介质力学方法是建立一组联系内应力和变形即应变的数学关系。假设这些关系对任意体积的材料体都一律有效, 这意味着质点的相互作用是局部的, 或者是在任意无限小范围内的。这种假设使得在整个物体内部和边界上可应用微分学的极限概念进行计算。例如, 梯度定理和散度定理就是连续介质假设的直接结果 (Fung, 1965)。因此, 对于某一类型的材料只要作一些光滑性假设就可能导出一组通用的本构关系, 而无需追究其材料的细观结构和变形的细观机理。

当然, 连续介质假设在有限大小的细观结构尺度上不再适用, 对于大多数单相金属材料

料, 这种有限尺度很可能是晶粒尺寸的量级; 或者, 在聚合物情况下, 是晶体分子尺寸的量级。在多相材料中, 例如纤维复合材料, 这种有限尺度是纤维直径或层厚的量级。不管是怎样的有限尺度, 都必须掌握材料细观结构和变形细观机理的全面知识, 这样才能在材料本构行为的唯象描述中保持这种细观结构和细观机理的重要影响。

例如, 对于显示出非弹性行为的材料, 由于非弹性源可能来自任何可能的细观变形和损伤机理, 因此, 建立在连续介质假设基础上的材料本构行为的统一描述就变得困难了。合适的非弹性分析将取决于特殊的材料细观结构及其与载荷之间的相互作用上。以前和现在的金属塑性理论都曾试图在本构关系表达式中把晶界量级的材料细观机理包括进去 (Taylor, 1938; Bodner & Partom, 1975)。然而事实上, 由于材料细观结构的复杂性和缺乏对加载下细观机理的了解, 通常采用的仍然是经验或半经验的方法。

细观结构影响的另一个例子是残余应力。已知它出现在纤维增强复合材料之类的多相材料中。例如, Weitsman (1979) 指出, 固化变量能够显著地改变纤维增强聚合物复合材料的残余应力状态。为了在预测本构行为时包括残余应力的影响, 一种直接的方法可能是在合适的尺度上考虑具有恰当细观结构的材料。这里需要一个高度超静定结构的细观力学模型, 它必须根据作用在其上的特殊载荷来进行分析。

图 1 是 Lin & Ribeiro (1981) 针对多晶固体的晶粒结构说明这种细观力学模型的一个例子。每个晶粒的就地性质假设为已知, 当在一个或多个晶界上连续剪切滑移时, 由于这里所确定的简单细观机理, 固体的变形被理想化了。数学上, 滑移机理可用弹簧阻尼器模型描述, 滑移条件由晶界剪切强度 τ_c 确定。

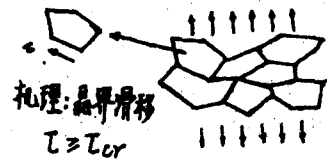


图 1 多晶固体的细观力学模型, 假设晶界为剪切滑移机理 (Lin & Ribeiro, 1981)

因而想出了一种以搜索格式为基础的逐步载荷-滑移计算程序, 由它得出所希望的载荷-变形关系。原则上该格式可以计算任何加载或卸载时刻每个晶粒中及其边界上的细观应力场, 这样就提供了“材料均匀化”的基础, 以便直接获得适于所考虑加载条件的材料本构关系。

计及细观结构和细观机理的影响的这种“强力”格式是可能导出材料本构关系的, 不过对具有三维细观结构的非常复杂的多相材料可能行不通。

另一种方法是用一种具有“合适的”材料细观结构和细观机理影响的非均匀介质来代表

多相材料。为此, 为了在材料本构关系中充分描述这些细观影响, 仍然需要在细观尺度上的足够详细的细节。因而, 对所发展的与传统连续介质假设有关的方法需要作重要的修改。

图 2 描述了连续介质力学本质与预想的非均匀方法本质的比较。在我们认识前者严重局限性的同时, 我们也看到了后者的令人生畏的挑战。

细观力学的主要挑战是数学上描述材料的

细观结构——各相的复杂形态、方向和分布, 这将是力学家和材料科学家同样都要使用的

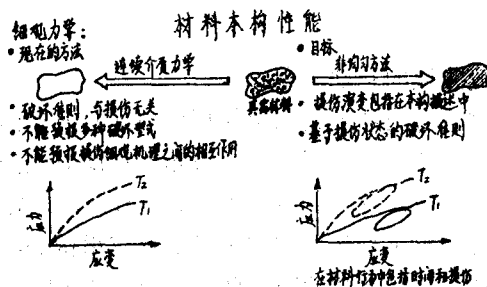


图 2 细观力学的本质: 克服了连续介质方法内在的局限性, 又面临着非均匀方法固有的困难

共同语言。图 3(a)–(f) (略) 描述了在确定细观结构的材料性能的各维尺度上所检查的结构材料的抽样性能。虽然这些图都是二维断面的, 但它们仍然显示出严重的困难。定量的显微镜观测或立体显示与几何的概率概念相结合, 已经建立了材料细观的结构特性 (如相体积, 表面积, 积分曲率, 截距等等) 与金属强度性质之间的关系 (Underwood, 1970; Underwood & Bancrji, 1986)。最近几年, 应用分形几何来描述金属和陶瓷断裂表面的形态学, 为发展定量描述细观结构的通用方法开辟了另一条可能途径 (Mandelbrot et al, 1984; Mecholsky & Passoja, 1985)。这些方法需要进一步探索, 而发展一种描述细观结构的通用数学语言是力学家和材料科学家的首要任务。

第二个挑战, 也许是更困难的挑战, 是将细观结构演变的运动学与力学联系起来。联系细观结构演变与热力学力的大多数工作已经包括在冶金学领域中。例如, Taylor & Cahn (1986) 指出, 晶体中一个晶尖角的形成, 数学上可能与各向异性表面能的最小化有关。DeHoff (1984) 将烧结过程中多孔介质的几何单元结构运动学与界面的扩散通量联系起来。然而, 把细观结构的不均匀变化与力学作用力联系起来, 似乎需要更好了解变化的载荷和细观结构相互作用的机理。正如在确定整体结构响应中, 细观结构和性质表征不能与力学函数分开一样, 通过材料本构方程将细观结构演变效应与力学理论联系起来, 是细观力学的一个真正的挑战。

3.2 多相材料的损伤力学 连续介质力学的破坏理论是以一点处的应力状态为基础的。塑性理论使应力集中区附近屈服区扩展的描述有了可能。位错理论提供了对材料中由于剪切而破坏的弱滑移线或滑移面的识别。断裂力学理论则跟踪裂纹尖端及其扩展轨迹。以上这些破坏理论都是从唯象学观点出发处理局部的影响, 并且需要一种与材料本构关系有区别的、基于物理上稳定和不稳定的准则。近年来, 由 Kachanov (1986) 提出的连续介质损伤概念已经把损伤作为一个状态变量包括在材料本构关系中 (Bodner & Chan, 1986)。

随着多相材料的出现, 需要建立新的材料破坏概念以便计及在相的尺度上的通有因素。一个重要因素是材料各相之间的界面结合。纤维复合材料的经验 (Salkind, 1968) 表明, 可以控制纤维-基体的界面结合来改变细观裂纹的起裂和并合机理, 并得到表观材料韧性和其他宏观性能的大量数值。图 4 示出在 II 型断裂条件下单向石墨-环氧树脂复合材料中, 在纤维-基体界面的脱层裂纹前方基体中形成的细观裂纹带。Corleto et al (1987) 提出, 这些细观裂纹是脱层扩展期间应变能耗散的主要来源, 但细观开裂的机理、真正形成过程以及它们与纤维-基体界面性能之间的关系并不很清楚。在唯象层次上, 脱层断裂无法真实地模拟。

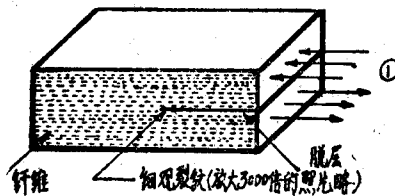


图 4 脱层前在纤维-基体界面中形成的细观裂纹, 试件为 II 型断裂加载的单向石墨-环氧树脂复合材料 (Corleto et al, 1987) ①产生 II 型裂纹扩展的载荷

另一个因素是相的尺度的明显无规性。已观测到复合材料中的细观裂纹是在宏观均匀的应力条件下无规地产生的, 这引起了统计分布的破坏和破坏型式 (Harrison & Bader, 1983)。Reifsnider & Highsmith (1981) 指出, 另一方面这些分布细观裂纹的扩展固有的地受材料细观结构的几何形状的控制。

图 5 展示的例子为交叉铺层的石墨-环氧树脂层板受轴向拉伸载荷的作用。在拉伸载荷

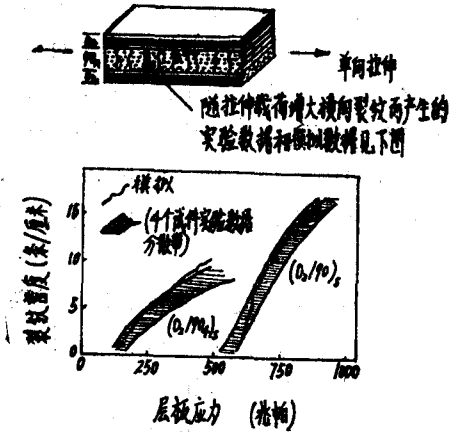


图 5 在石墨-环氧树脂 $[0_n/90_n]_s$ 层板中 90° 层横向裂纹的扩展。仿真模型的基础是假设在 90° 铺层中具有分布的有效裂隙 (Wang, 1984)

增加的情况下, 90° 的内层可以受垂直于载荷方向的多条裂纹的损害。这些 90° 层的裂纹的形成发生在诸如脱层或纤维断裂之类的其他损伤方式之前。可以看到, 这些裂纹相对于所施加的拉伸载荷而言的演变本质, 是随该 90° 内层的厚度而变化的。这种模拟计算是 Wang (1984) 利用断裂模型来提供的, 其基础是在材料铺层中假设材料裂隙是分布性的, 并计及层板细观结构的影响。

总的来说, 在多相材料中, 细观开裂的扩展或损伤的扩展是一个随载荷、空间和时间而演变的过程。这种演变过程的不稳定性通常决定了宏观尺度上材料的表观破坏。图 6 (略) 是 Reifsnider & Bakis (1986) 给出的一个例子。图中

示出了在有一个穿透小孔的复合材料层板中, 在疲劳加载的三个阶段所拍摄的损伤扩展的 X 射线照片, 可以看出, 损伤从小孔边界处以基体开裂和脱层的形式扩展。然后这些损伤以疲劳循环方式稳定地扩展。扩展型式、扩展速率和导致失稳破坏的临界扩展, 都受到层板细观结构布局的影响。为了描述这种过程和建立失稳的通用判据, 看来需要把统计方法和细观力学方法相结合。

3.3 应力波和动态响应 应力波传播的应用包括从地震监测到材料细观缺陷检测的广阔领域。主要在连续介质力学的基础上发展了描述固体中波运动的理论, 例如, 在 Kolsky (1963) 著的教科书中就可找到。在连续介质假设的限制范围内表述, 但包括了材料的非均匀性影响的本构理论, 主要在有向介质中的应力波方面取得了进展 (Eringen, 1976)。然而随着多相材料的出现, 对于与相的特征尺寸相当的应力波长, 将需要采用一些新的方法, 来研究如非线性弥散、能量耗散、多次散射和表面波效应之类的现象。这方面的任何一种尝试, 都需要一种迭代方法, 在这种方法中, 应力波源的特征、材料各相在原处的力学性质、固有的细观结构和细观机理都是相关的。为了恰当地描述多相材料中应力波传播的真实本质, 需要涉及分析模拟或数值模拟的相关研究, 这种模拟的基础是非连续介质本构关系, 是在相的尺度和总体结构的尺度二者上的响应的实验测量。

一个相关的挑战是搞清造成损伤的应力波力学, 例如, 受冲击载荷材料的崩落。如图 7 示意地所示, 崩落现象包含整体的 (振动) 响应和局部的 (应力波传播) 响应以及它们的相互作用。在近代, 冲击动力学和动态断裂领域的研究引起了广泛的兴趣 (Gold-

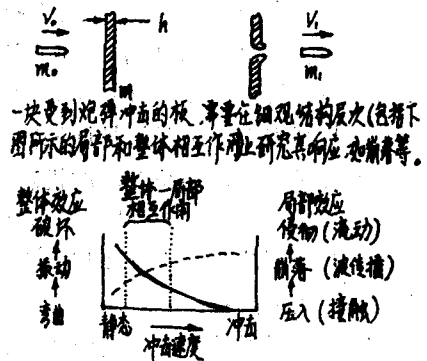


图 7 在受到炮击的结构板中, 整体 (实线) 和局部 (虚线) 效应的主要影响示意图。整体和局部的相互作用区域发生在一定的冲击速度范围内

smith, 1960; Williams & Knauss, 1985)。然而,在细观力学这范围内还有多得多的事物有待研究。

3.4 极高温行为 目前对于在高温条件下运行的结构材料的需要和对于延长使用期限的需要日益增长。例如,未来的高超声速运输机在长距离飞行期间,其机翼的蒙皮必须能够在2000°F以上的高温下保持住它的刚度、强度、尺寸稳定性和其他一些性能。未来的透平发动机部件必须在比这还要高的温度下工作。象陶瓷复合材料和金属间化合物这类新材料系统就具有满足这些苛刻要求的潜力。

这些特殊材料的力学正处于初期发展阶段,甚至处于唯象研究层次上。在修改现有力学方法以适应一些新现象方面已取得了一些进展。例如,Dvorak & Wung (1984)把各向同性材料的热弹性原理推广到了复合材料和其他各向异性材料,推广到了非弹性变形状态;Aboudi (1985)和Rubin (1986)通过引入内变量在以唯象方法导出的本构理论中加入了温度的影响。

Shahinian & Sadananda (1976)研究了IN-718合金在高温疲劳和蠕变下的裂纹扩展,发现累积损伤传统的线性法则不能解释表现的加载顺序效应。图8是一个例子,其中有预裂纹的IN-718试件在1200°F下的试验。该试件先加拉伸载荷至一峰值并保持一段时间,然后在此峰值载荷下进行疲劳循环。显然,在初始保持的一段时间内有蠕变变形,并且裂尖附近可能有细观结构的变化。这使得下一步的疲劳裂纹扩展率(da/dN)受到了初始保持时间的重要影响。在这种情况下,不能根据一些简单的累积损伤法则来预计裂纹的扩展,因为在这种模型中没有能计及蠕变和疲劳损伤机理之间的相互作用。

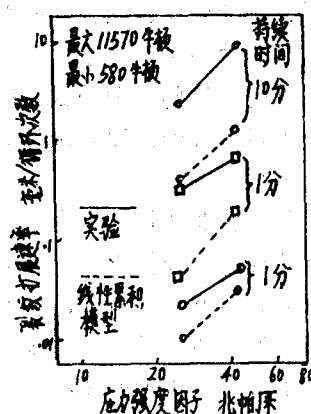


图8 在1200°F下测得IN-718合金持续时间(蠕变)对疲劳裂纹扩展速率的影响。根据线性累积损伤法则得到的计算结果(虚线)

(Shahinian & Sadananda, 1976)

现在已知的大多数高温材料性能局限在简单加载条件下(例如,一维蠕变),因此缺乏普遍的应用。为了建立能够考虑暂态、高应变率和多方向热学-力学载荷的细观力学模型,需要对产生在材料细观结构尺度上的热学-力学变形和损伤有更深入的了解。

由于恶劣环境所造成的困难,通过实验识别热学-力学响应的基本机理是一个重大的挑战。目前在细观结构尺度上进行的就地测量方面,仪器的数量和精密度两者都感欠缺。因而,在这个方向上的努力,必须伴之以发展包含细观结构效应和损伤效应的任何先进的本构模型。

需要研究细观结构的演变在高温加载响应方面的后果,包括材料性能变化和损伤累积(例如,在蠕变破坏和热疲劳中所表现出的),以便为破坏准则提供可靠的依据;为具有修整过的细观结构的人工合成材料得到所希望的高温工作性能提供可靠的基础。

3.5 非线性结构的行为 多相材料力学本质上是非线性的。非线性的直接后果是使叠加原理不再适用。对于多次加载或激励条件下的响应不能通过简单相加每种情况的单独效应来

合成。非线性的另一个后果是对于给定的一组不同稳定特征的工作条件，可能的平衡位形具有多样性。

这两个后果对材料的合成和应用的所有方面都有重要的意义。从描述材料特性的观点来看，在把小尺寸试验的数据或者测量结果外推到大尺寸的部件；或者从简单加载条件外推到复杂加载条件，都必须考虑其非线性尺度效应。如果复杂的动态载荷、热载荷和其他时间相关的载荷都适合于用细观力学来分析，那就必须了解载荷的加载次序效应。

在工程结构系统中，多相材料非线性行为的稳定性含义开辟了另一个基础研究的领域。最近对几何上非线性系统中浑沌运动的研究已发现了在线性系统中找不到的行为 (Thompson & Stewart, 1986)；同样还表明了浑沌运动发生在受没有任何无规输入的决定性激励系统中 (Moon, 1980)。随着多相材料的出现，本构起源的局部非线性响应，例如唯象地显示出的滞后、应变硬化、松弛和蠕变等，必须从整体结构系统的稳定性观点出发来研究。

3.6 计算力学和实验力学 细观力学中所研究的问题一般来说本质上是非线性的、时间相关的和三维的。这些问题的数学解对计算力学提出了一个前所未有的挑战。甚至具备了装备有并行处理机系统的高速超级计算机的条件，在不久的将来在细观力学范围内进行分析和模拟仍然是不现实的。

虽然近年来在非线性结构力学和固体力学中现代计算方法已经得到了广泛的研究和发展，但在准确计算非线性真正解和完全解方面仍然存在着问题 (Noor & McComb, 1980; Noor & Atluri, 1987)。例如，在有限元应用中，提高数值计算精度的网格加细将综合考虑物理系统固有的非线性效应。看来未来计算方法的任何发展必须包含有洞察力的建模，并与所要模拟的细观力学机理的物理学密切相关。

必须在广泛的尺寸范围内分辨所要探测和测量的物理量。对于许多多相材料来说，微米和亚微米尺度的测量对于分辨细观结构的变化是必需的。例如，云纹干涉法的最新进展已经能够观测到纤维复合材料中被表面下细观结构复杂化了的高梯度应变场。图 9 (略) 是 Post (1987) 得自具有 $[\pm 45/0_2]$ 结构的硼铝复合材料层板的云纹位移场的一个例子。由于在 45° 的外层中纤维-基体的相互作用，局部应变的改变引起了中心切口附近条纹图形的剧烈扭曲。

显然，利于遥感和就地监测方法在细观尺度上进行无损、实时测量所希望的量，需要革新仪器和试验技术。测量的高精度要求，极短的响应时间，以及进行测量的恶劣的试验环境，都要求实验力学有崭新的发展。

4 结 语

在本文中，我们努力为未来结构研究和材料研究中越来越重视的领域给出了一个大致的轮廓。比以前任何时候都更明显的是，力学家和材料科学家共同努力和集体攻关是非常必要的。本任务要求不断重复进行对考虑之中的现象的物理学了解和数学描述以及改善它们之间的相互联系。这将对这两个学术界的重大挑战。同时，我们相信，本文所概述的研究领域代表了正在出现的细观力学领域的一些例子，而细观力学领域对材料和结构技术的未来进展提供了重要的良机。

参考文献 (39篇, 略)

孔园波译自: *Int. J. Solids Structures*, 24, 11 (1988):
1081—1096. (程屏芬校)