

·学科进展·

# 超急速传热对材料结构性能的影响

刘登瀛

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

杨院生

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110015)

**[摘要]** 以金属快速凝固为例, 概述超急速传热对金属材料结构与性能的重要影响, 指出由超常传热引起的非平衡相变过程是造成材料结构性能显著变化的主要原因; 分析了对材料高热流短脉冲加热与快速凝固过程的超常传热特点, 其主要表现为传热过程的非平衡特性。为了探索超急速传热对材料结构性能的影响机理, 需要将这种非平衡传热过程与材料的非平衡相变过程耦合起来。

**[关键词]** 超急速传热, 材料性质, 非平衡相变

在材料的形成与制备过程中, 往往伴随着热量的传递。随着现代材料科学的发展, 瞬态高热流密度作用下的超急速传热过程, 对高新材料的研制与材料的改性将起到越来越重要的作用。研究超急速传热对材料结构性能的相互影响, 既是工程热物理学科、也是材料学科的前沿课题。

所谓超急速传热, 是指物体在瞬时高热流密度下温度变化率达到  $10^3-10^7$  K/s, 甚至更高时的超常非稳态传热过程。它不仅包含了传热的微时间尺度概念, 同时包含了高热流密度的概念; 可以是短脉冲高热流加热, 也可以是高温急骤冷却, 因而它反映了传热过程的剧烈程度。正是这种剧烈的超常传热过程, 引起材料结构性能的巨大变化, 其中最典型的例子就是金属快速凝固。

1960年, 美国科学家 Duwez 等首先发现, 高温液态金属在  $10^5-10^7$  K/s 的冷却速度下快速凝固, 使合金组织和性能发生了重大变化。这一发现, 为全世界的物理冶金和材料科学工作者开辟了一个全新的领域。30多年来, 关于金属快速凝固工艺的研究有了长足的进展, 发展了熔体喷射急冷法, 雾化急冷法, 表面急速熔凝法等多种快凝工艺。大量的研究结果表明, 快速凝固可以实现对合金凝固过程的结晶控制与偏析控制, 使晶粒细化 2—3 个数量级, 可以得到非晶合金, 从而使材料的各项性能, 包括强度、塑性、耐磨性、耐蚀性、磁性以及触媒效率等都有了大幅度提高和显著的改善。

金属性能与晶相组织之所以能在快速凝固时发生显著的变化, 主要源于超常传热条件下

本文于 1997 年 10 月 20 日收到。

的超常相变。金属快速凝固过程实质上是一种非平衡凝固过程。由于在快凝过程中,液/固相变界面的前进速度很快,当晶体生长速度超过液相中溶质原子的扩散速度时,固液界面前沿的溶质原子将部分或全部被生长着的固相所吞没,即发生所谓溶质捕获,最后导致材料内部结构偏离平衡态,出现过饱和固溶体,使材料处于亚稳态。正是这种非平衡的相变过程给新材料的晶相结构和性能带来了一系列重大变异。因此,迄今为止,人们对快速凝固以及其它表面熔凝处理的研究焦点集中在非平衡相变过程上。但是,目前这种研究的一个严重缺陷,就是对由超常传热过程引起的非平衡相变过程的分析,基本上仍沿用常规的传热规律和常规的材料热物性,这就不能不严重地限制了这种传热分析的可靠性与适用性。

超急速传热现象在金属材料的表面淬火,表层与局部合金化,表面涂敷与激光熔凝复合处理,半导体薄膜表面沉积,离子植入表面的退火以及表层微晶化处理等领域,也起着重要的作用。

超急速传热规律与常规传热有重大差别。对于材料的瞬时高热流加热和快速凝固过程,其差别集中表现为所谓“非傅立叶效应”与“热波理论”。我们知道,在常规情况下,当物体受热后的温度变化率较低时,其传热过程较为缓慢,此时的导热规律可以用传统的傅立叶定律来描述。但当物体因受瞬时高热流加热而达到很高的温度变化率时,其热量的传播不再与外加温度场的建立同步,而有一个滞后的“驰豫时间  $t_0$ ”。此时的傅立叶导热公式需要增加一个修正项,变为:

$$t_0 \frac{\partial \dot{q}}{\partial t} + \dot{q} = -k \nabla T$$

其相应的导热微分方程亦将由传统的抛物线方程变为双曲线方程。许多研究报告还指出,此时热量的传播将不仅仅是靠分子的扩散,而主要通过声子的振动,以温度波(即热波)的形式来传播。迄今为止,已有大量工作研究了不同传热条件下非傅立叶方程的求解问题,其中的一个焦点即是驰豫时间的产生条件、数值与影响因素。有的研究报告提出,不同材料在不同温度条件下将有不同的  $t_0$  值:一般均质金属材料在常温下  $t_0$  约为  $10^{-11}$  s,非均质多孔材料的  $t_0$  达 10—20 s,生物材料的  $t_0$  可高达 100 s 左右。由于可靠的实验数据不多,因而对  $t_0$  的准确数值及产生条件还有不同观点,但有一点是多数人的共识,这就是这种超急速过程是一种非平衡的超常传热过程。在这方面,1992年由国际知名传热学家田长霖先生等提出的“两步加热模型”(《Int. J. Heat Mass Transfer》,1992, 35(3): 719—726.)最有代表性。他们深入分析了短脉冲强激光对金属表面加热的微观传热过程,系统论述了两步加热理论:第一步,由材料表面的电子吸收光子的能量;第二步,通过电子与声子的碰撞而使材料晶格发热。当激光的脉冲宽度甚大于电子与声子的碰撞时间时,热电子即有足够时间来建立晶格的局部热平衡,因而电子与晶格的温度相同,这时传热过程就只是由电子对光子能量的吸收这一步完成,即常规的平衡传热过程。但当激光脉冲宽度与电子-声子碰撞时间相当或更短时,电子与声子的碰撞即成为控制因素。此时,高温电子几乎不可能与晶格处于温度平衡状态,而是在非热平衡状态下完成其能量的微观传递过程。在常温下,电子-声子的碰撞时间约为 20 ps。由于电子与声子间的动量差很大,要实现有效的能量传递,通常需要碰撞几十次,因而这时的导热  $t_0$  要小一个数量级,为  $10^{-11}$  s。另有一些研究报告指出,对于非均质材料(多孔与生物材料), $t_0$  并非限于电子-声子碰撞的同一等级上,因而  $t_0$  更长,并同其分子间

的空隙、单位体积的电子数有关。当然,这种差别究竟有多大,还有待深入研究。总之,这种微观传热过程的分析突出说明了超急速传热过程是一个非平衡传热过程,不能用传统的平衡条件下传热的规律来描述。

最近,中国科学院工程热物理研究所关于圆球体材料非傅立叶导热的理论分析结果表明,当球体受到超急速加热时,球体内部将出现瞬时局部过热,即球内某些局部位置的温度将超过表面加热温度。这对平衡条件下的传热过程是不可理解的,而这正是波动传热带来的特有结果,它对材料表面处理以及医学工程都有潜在的应用前景。

关于超急速传热的研究目前尚处于起步阶段,许多问题有待深入,对于有相变的超急速传热,尤其是上述非平衡相变问题还几乎无人涉及。因此,如何将非傅立叶导热与热波理论的研究成果用于金属快速凝固和其它类似过程的传热分析,就面临着一个很大的困难。虽然我们已较为清楚地知道了超急速传热将引起金属快凝的非平衡相变,但是关于材料的研究和关于传热的研究彼此脱节。研究超常的材料相变用常规的传热公式,而研究超常传热却未考虑相变。我们面临的任务就是要把二者耦合起来。作为非平衡传热在考虑非平衡相变时,不仅要考虑液-固组织结构与成分的不平衡,同时,又可预见到这种非平衡相变也将是在固-液非等温条件下完成的,这无疑增加了分析的难度,但这是无可回避、并终将要解决的课题。

为进一步揭示超急速传热与材料结构性能交叉影响的机理,并发展相应的传热控制理论,以实现对新材料制备与加工过程的能动控制,除应着力解决上述二者的耦合问题外,还需深入开展以下几方面的研究:

1. 非平衡相变与材料各种理化性能的对对应关系。只有分别找出各种不同对应关系的内在机制,才能有针对性地实现对材料制备与加工过程的能动控制,如高强度材料与高磁性材料应有不同的快凝工艺控制方式。只有这样,才能更有效地省能、省材和开发新材料。

2. 材料超急速传热微观过程的研究。从电子、声子与晶格的水平上去探索微观能量传递过程;从离子与电子的排列,从量子与量子隧道的尺度上去探索材料性能的“密码”,进一步把宏观与微观联系起来,以达到实现主动控制的目的。

3. 多孔材料、生物材料、高分子材料等与超急速传热相互影响的研究。这些研究成果对材料科学、生物医学工程、先进干燥技术等都将发挥重要作用。

4. 加强实验研究,大力发展先进的测试技术,尤其应加强超高速频率响应的温度测量理论与测量技术的研究。这是目前这一研究领域的薄弱环节,也是争取在这一研究领域取得突破的关键。

本文引用了中国科学院外籍院士田长霖先生、中国工程院院士胡壮麒先生有关论文的部分内容,谨此致谢。

## EFFECTS OF RAPID TRANSIENT HEAT TRANSFER ON PROPERTIES AND CRYSTAL STRUCTURE OF MATERIALS

Liu Dengying

(Institute of Engineering Thermophysics, CAS, Beijing 100080)

Yang Yuansheng

(Institute of Metal Research, CAS, Shenyang 110015)

**Abstract** Taking the rapid solidification of metals as an example, this paper outlines the important effects of rapid transient heat transfer on properties and crystal structure of materials. The main reason for the great change in the properties of materials is the nonequilibrium phase change caused by extreme heat transfer. The extreme heat transfer characteristics in short-pulse high flux heating and rapid solidification of metals are analyzed, which is mainly shown as nonequilibrium heat transfer process. In order to study the mechanism of effects of rapid transient heat transfer, this nonequilibrium heat transfer process must be combined with the nonequilibrium phase change of materials. Finally, the paper proposes several key projects that need to be further studied in future.

**Key words** rapid transient heat transfer, properties of materials, nonequilibrium phase change

·信息·

## '98 中法双边科技政策研讨会

为期3天的“'98中法双边科技政策研讨会”于2月21日在上海圆满结束。来自国家科委、中国科学院、国家自然科学基金委员会、法国科技指标统计委员会(OST)、法国科研中心(CNRS)、欧盟技术预测研究所、法国原子能委员会、法国国家健康医学研究院等13家单位的30余位中法科技管理专家和学者提交了论文并出席了会议。

国家自然科学基金委员会主任张存浩院士参加了第一天的会议,并在开幕式上讲话。副主任周炳琨院士主持了会议。张主任在致词中着重指出:“开展科研系统的绩效评估,优化科技资源配置,确保科技发展战略得以实现,已经成为各国科技管理部门的一项重要职责”。法国代表团团长、法国OST主席巴蓬(PAPON)教授,法国驻华大使馆科技专员米楠先生也在开幕式上致词。这次会议的主题是:研究水平和质量的评估方法及其对经济的影响。代表们就国家创新体系及其所需的评估指标、评估指标和方法、国家科技政策战略指标、国际科技合作前景等4个方面的议题展开了热烈的讨论和广泛的交流。

这次会议是根据国家自然科学基金委员会与法国OST在1996年的工作协议安排进行的,它被纳入中法双边科技协定签订20周年的纪念活动,得到了法国驻华使馆的大力支持。法方代表团团长巴蓬教授对这次会议给予了高度评价和赞扬,认为此次成功的研讨,必将推动中国与法国及欧盟在科学技术研究和管理领域的深入交流与合作,促进两国科技政策水平的提高。经中法双方协商,一致同意于2000年在巴黎举行第二次法中双边科技政策研讨会,将中法双方科技政策领域的合作带入21世纪。

(政策局 供稿)