

宏观碳足迹上有着明显的优势,主要用于城市或国家层面的碳足迹计算。

3 碳足迹计算的意义与发展现状

3.1 碳足迹计算的意义

碳足迹的计算对碳减排有着重要的指导意义。对于政府、企业而言,确定碳足迹是减少碳排放行为的第一步,它能帮助企业辨识自己在产品生命周期中主要的温室气体排放过程,以利于制定有效的碳减排方案。而在方案制定过程中,根据碳足迹的分析结果,还可以预测拟采用的减排措施会对目前的温室气体排放情况的影响,从而实现对不同拟减排措施的择优与改进。企业还可以通过碳足迹的计算宣传自己的碳减排行动。而对于公众而言,碳足迹更注重从个体的角度看待碳减排,有意让公众认识到减少碳排放量不仅仅是政府、企业等组织的行为,更且是每个公民的责任。通过碳足迹计算器等工具,可有效地引导公众自发地进行碳减排,自觉抵制“高碳足迹”产品,减少浪费是促进生产端碳减排的最有效措施,而且从消费端考虑问题,也可以改变发展中国家需要承担全部产品生产造成环境污染的被动局面。

3.2 碳足迹的发展与应用现状

国际上已有较多组织在大力推行碳足迹的应用。UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 在 2007 年成立了碳足迹专项研究组,讨论碳足迹的具体计算方法与应用领域^[7];世界可持续发展工商理事会与世界资源研究所共同完成了关于全生命周期温室气体的计算和审计标准——温室气体盘查议定书(GHG Protocol),目前在世界范围内具有较高的认可程度^[8,9]。世界标准化组织也预计将在 2011 年推出 ISO14067 标准,规范国际上的碳足迹计算^[10]。日本、英国、美国等国家也相继开展了碳足迹的相关评价研究^[11-15]。目前,碳足迹在应用方面可以分为个人碳足迹、产品/企业碳足迹和国家碳足迹三大层面。

(1) 个人碳足迹 个人碳足迹计算是以个人消费结构、

能源用量、交通型態等为依据,配合碳足迹计算器,评估个人或家庭日常生活的温室气体排放量,主要用于指导公众自发的碳减排行为。英国政府的环境、食品管理机构于 2007 年 6 月首先发布了针对个人或家庭的碳足迹计算器,随后,美国、德国等也纷纷引入,这些工具可以使公众随时计算自己每天生活中排放的二氧化碳量,并同时提供减小碳足迹的方法与对应的碳抵消(Carbon Offsets)途径。

(2) 产品/企业碳足迹 产品碳足迹是计算产品在原材料开采、运输、产品制造、使用、直至最终废弃等阶段中因燃料使用以及制造导致的温室气体排放量。目前碳足迹在产品中的应用主要体现在:产品的碳足迹分析与对比、产品的碳减排潜力分析及产品的碳足迹生态标识。以产品的生态标识为例,英国的 Carbon Trust 公司在 2007 年发起了首个碳标识工程“Carbon-Reduction Label”,要求制造商在包装上明确标识产品的碳足迹与未来两年的减排承诺。目前该标识已经涵盖超过数百种产品,并与 ISO、WRI/WBCSD 等组织合作,预计此标准将在 2010 年全球推广^[16,17],类似的工程在澳大利亚(Carbon Reduction Institute)、加拿大(Carbon-Counted)、欧洲(Ecolodge Net)以及美国(The Climate Conservancy)也相继展开。而企业碳足迹相较于产品碳足迹更为复杂,在产品碳足迹的基础上,还增加了非生产性的活动,例如相关投资、企业管理等的碳排放量的计算,为企业的决策提供依据。

(3) 国家碳足迹 国家碳足迹着眼于整个国家的总体物质与能源的耗用所产生的温室气体排放量,这种计算与个人的碳足迹相反,通常从生产端考虑,即计算一个国家每年实际产生的温室气体总量。例如,哥本哈根会议上公布的世界资源研究所计算的全球主要温室气体排放国与人均碳足迹,见图 1。从图 1 中可以看出,2009 年我国温室气体排放总量虽居世界首位,但人均碳足迹仍远低于大部分主要碳源国。应该注意的是,碳足迹在工业或国家层面的应用,不能只考虑排放可能造成的气候

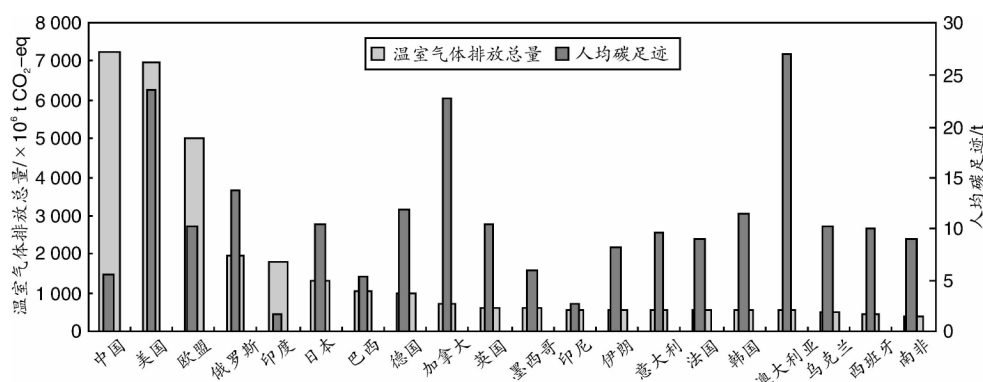


图1 世界主要碳源国温室气体排放总量与人均碳足迹

变化而忽略其它环境影响,那将会影响决策的客观性与准确性,而真正的可持续消费和生产需要统筹考虑所有与评价对象相关的环境影响,包括酸化、人体健康损害、土地破坏等等。

4 碳足迹在材料工业节能减排中的应用

4.1 材料产品的碳足迹计算意义重大

我国材料产业能源消耗总量巨大,约占到整个工业能耗的75%左右^[18],主要材料品种的平均单位能耗和碳排放与国际先进水平仍存在一定差距,减排空间巨大。积极开展材料领域的碳足迹分析,寻找在产品设计、生产和供应等过程中降低温室气体排放的机会,指导宏观产业结构调整与碳减排措施制定,对实现我国温室气体减排目标具有重要意义。

4.2 土地覆盖变化的碳排放计量不可忽视

在碳足迹的计算中,若不考虑产品在生命周期中的土地使用造成的间接碳排放,可能会造成评价结果与实际情况产生较大偏差^[19,20]。2008年Science上发表的一篇对生物燃料与化石燃料的碳足迹比较研究显示^[21],虽然生物燃料无论从能源的角度或是温室气体排放的角度均优于化石燃料,但其在农作物种植阶段,开垦耕地引起的土地覆盖变化会一次性造成大量的碳排放,根据使用土地类型不同,其排放量最多可以达到每年由生物燃料替代化石燃料减少温室气体排放量的423倍,也就是说可能需要几个世纪才能完全抵消土地覆盖变化造成的气候变化影响。有关估算认为^[22],一百多年来土地覆盖变化引起的温室气体排放约占到同期人类活动总排放量的1/3。尤其是对于一些土地依赖型产业,与土地使用相关的碳足迹会占到产品碳足迹总量的很大部分。

5 结 语

“碳足迹”作为一项新兴的温室气体排放量计算方法,结果直观,易于理解与接受;计算数据需求较少,可以简便地计算出个人或家庭在一段时期内造成的温室气体排放;从消费端来计算环境影响,提供了一种新思路。

材料产业的碳减排是我国节能减排工作的重中之重,碳足迹作为目前国际上碳减排的主要决策依据,也必将在未来发挥重要作用。而在进行综合性决策时,碳足迹不应该成为环境问题唯一的衡量标准,还需要与其它综合评价工具(如LCA方法)相互配合。

致谢 感谢《中国材料进展》杂志的特别邀请和刘宇、孙博学博士研究生对本文的共同探讨。

参考文献 References

[1] Wiedmann T, Minx J. A Definition of “Carbon Footprint”[M]//

- Pertsova C. C. *Ecological Economics Research Trends*. Hauppauge NY: Nova Science Publishers, 2008: 1–11.
- [2] UK Carbon Trust. *Carbon Footprinting: An Introduction for Organisations*[R]. UK: Carbon Trust, 2008.
- [3] European Commission. *Carbon Footprint-What It Is and How to Measure It*[EB/OL]. [2010–01–04]. http://lca.jrc.ec.europa.eu/Carbon_footprint.pdf. 2007.
- [4] ETAP. *The Carbon Trust Helps UK Businesses Reduce their Environmental Impact*[EB/OL]. [2010–01–04]. http://ec.europa.eu/environment/etap/pdfs/jan07_carbon_trust_initiative.pdf. 2007.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). *2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*(2006年国家温室气体清单指南)[M]. Geneva: IPCC, 2006.
- [6] International Organization for Standardization (ISO). *ISO International Standard 14040: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*[M]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [7] SETAC Europe LCA Steering Committee. *Standardisation Efforts to Measure Greenhouse Gases and “Carbon Footprinting” for Products* [J]. *Int J LCA*, 2008, 13(2): 87–88.
- [8] Bhatia Pankaj, Ranganathan Janet. *A Corporate Accounting and Reporting Standard*[M]. Washington: World Resources Institute, 2004.
- [9] World Resources Institute, World Business Council For Sustainable Development. *The GHG Protocol for Project Accounting*[M]. Washington: World Resources Institute, 2005.
- [10] Finkbeiner M. Carbon Footprinting—Opportunities and Threats [J]. *Int J LCA*, 2009, 14(2): 91–94.
- [11] Johnson E. Charcoal versus LPG Grilling: A Carbon-Footprint Comparison [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(6): 370–378.
- [12] Giurco D, Petrie J G. Strategies for Reducing the Carbon Footprint of Copper: New Technologies, More Recycling or Demand Management? [J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20(9): 42–853.
- [13] Johnson E. Disagreement over Carbon Footprints: A Comparison of Electric and LPG Forklifts [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(4): 1569–1573.
- [14] Welch B, Iffert M, Kazacos M S. Applying Fundamental Data to Reduce the Carbon Dioxide Footprint of Aluminum Smelters [J]. *Journal of the Minerals*, 2008, 60(11): 17–24.
- [15] British Standards Institution. *PAS 2050 Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services*[M]. UK: British Standards Institution, 2008.
- [16] Carbon Trust. *Carbon Footprint Measurement Methodology*[R]. London: Carbon Trust, 2007.
- [17] Carbon Trust. *Carbon Trust Carbon Trust Labelling Scheme Rolls Out across the Country*[R]. London: Carbon Trust, 2007.
- [18] National Bureau of Statistics(国家统计局). *China Statistical*

- Yearbook in 2008 (中国统计年鉴 2008) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [19] Baument K A, Herzog T, Pershing J. *Greenhouse Gas Data and International Climate Policy* [M]. Washington: World Resources Institute, 2005.
- [20] Greenhalgh S, Daviet F, Weninger E. *The Land Use, Land-Use Change, and Forestry Guidance for GHG Project Accounting* [M]. Washington: World Resources Institute, 2005.
- [21] Fargione J, Hill J, Tilman D, et al. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt [J]. *Science*, 2008, 319(5 867): 1 235–1 238.
- [22] IPCC. *Land Use, Land-Use Change and Forestry* [R]. Geneva: IPCC, 2000.

西安交通大学学者发现金属孪晶变形的强烈晶体尺寸效应

——孙军教授等完成的论文在《Nature》上发表

西安交通大学金属材料强度国家重点实验室微纳尺度材料行为研究中心研究生余倩,在导师孙军教授、肖林教授、马恩教授和单智伟教授的悉心指导下,与美国宾夕法尼亚大学李巨教授、丹麦瑞瑟国家实验室黄晓旭博士合作,对微小尺度金属单晶材料中的孪晶变形行为及其对材料力学性能的影响进行了深入的研究,发现了单晶体外观尺寸对其孪晶变形行为的强烈影响,以及相应材料力学性能的显著变化。此项研究成果已在 2010 年 1 月 21 日出版的《Nature》杂志上发表。论文评审人对此项研究中所完成的大量首创性的工作给予了高度评价,认为文章的作者们在材料力学性能尺度效应的研究方面取得了重大进展。

伴随着微电子元器件与微机电系统 (MEMS) 等技术的进步,所用材料外形特征尺寸的下限也逐渐减小至亚微米甚至纳米量级,而该尺度正是材料塑性变形基本物理机制作用的空间范畴。也就是说,微纳尺度材料中,材料变形载体的特征尺度,如位错线与孪晶缺陷的特征尺度与作用空间,开始和材料的外部几何尺寸处于相似量级。比如块体钛合金中变形孪晶的尺度一般在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间。当具有不同尺寸的微元器件中零部件所用材料的外形几何尺寸与其相近时,孪晶是否仍然会发生?其临界条件和性能是否会随尺寸而改变?等等,这些都是当前材料科学领域的前沿性课题和令设计工程师们异常感兴趣的问题。因此,如何准确地测量和表征这些微小器件在制备和服役过程中的力学性能,成为其事关设计、制备及安全使用的关键性课题,也是材料科学发展所必须面对的挑战。以前这一方面的研究主要集中在位错的滑移行为,而材料的另一种重要塑性变形方式——孪晶在微小尺度材料中的成核与演化过程,却鲜有报道。此外以位错变形为主导的多晶金属材料存在一定的临界尺度。当材料的晶粒尺寸小于该特征尺度时,描述材料力学行为的经典 Hall-Petch 幂律关系,即“尺寸愈小、强度愈高”,将不再适用。描述孪晶变形的 Hall-Petch 幂律关系的斜率通常要比位错滑移变形的大很

多,也就是说,孪晶变形应表现出更强的尺度依赖性。

文章的作者们通过巧妙的实验设计,基于六方晶体结构金属孪晶、位错滑移变形的特异性,选取钛-5% 铝合金单晶中以孪晶变形为主导塑性变形方式的晶体取向,利用纳米压入仪下微柱体压缩与相应的透射电镜原位定量变形表征技术,有针对性地研究了孪晶变形在微小尺度材料中的行为规律和机理。结果发现,当外观几何尺度减小到微米量级时,与相应宏观块体材料相同,材料的塑性变形仍以孪晶切变为主,但材料的屈服强度及其塑性变形中能够承受的最大流变应力均有显著提高,分别达到其宏观值的近 5 倍和近 8 倍,表现出很强的尺度依赖性。其实验测定的 Hall-Petch 幂律关系指数接近于 1 (远高于多晶的 0.5)。

当晶体的外部几何尺度减小到亚微米量级时,材料的塑性变形方式发生了根本性的转变。受尺寸限制孪晶变形被完全抑制,并由位错滑移变形取而代之。发生这一转变的临界特征晶体尺寸为 $1 \mu\text{m}$ 左右 (远大于多晶纳米材料强度极值 20nm)。小于该临界尺寸, Hall-Petch 幂律关系将不再适用,材料所能承受的最大流变应力接近于所用材料理想强度水平。意味着块体材料原本由于存在晶体缺陷而无法达到的理论强度已经被触及。更为重要的是,这种转变的特征尺度是在微米向亚微米过渡的范围,即小尺度材料在微器件和微机电系统等实际应用的重要尺度范围。由此,文中提出了与光学物理“受激辐射”效应类似的、以螺位错为媒介的孪晶变形“受激滑移”模型,得到 Hall-Petch 幂律指数的理论值为 1,与实验值吻合良好。并且由于仅有 1% 左右的位错可以作为极轴,而晶体尺寸愈小,就愈难于利用螺型位错的极轴作用将两个相邻的滑移面有效地耦合在一起而形成孪晶,完美地解释了孪晶变形具有强烈的晶体尺寸效应和“尺寸愈小、强度愈高”的内在原因。

该项研究得到了国家自然科学基金与 973 计划项目以及国家外专局/教育部首批学科创新引智 (111) 计划项目的共同资助。
(本刊通讯员)