工作场所中有关纳米技术的伦理和科学问题

Paul A. Schulte[1] and Fabio Salamanca-Buentello[2]

[1]美国俄亥俄州辛辛那提市疾病控制与预防中心国家职业安全与健康研究所；[2]加拿大安大略省多伦多市多伦多大学生物伦理和基因组与全球健康加拿大项目联合中心。

在缺乏对纳米颗粒职业性暴露的潜在健康效应有科学的阐释的情况下，对于危害、风险和控制决策的制定，需要有一个指南。发现其中涉及的伦理学问题，可能对决策制定者、特定的雇主、工人、投资者和健康权威人士有帮助。因为职业安全和健康的目标是预防工人中的疾病，人们已经发现一些伦理学上的问题对于工人的影响最大。这些问题包括a)科学家、权威人士和雇主发现危害和风险并进行通告；b)工人对风险的接受程度；c)选择和实施风险控制；d)建立医学筛查项目；以及e)对毒理学和控制研究进行投资。伦理学问题涉及不怀偏见地确定危害和风险、无危害（不产生损害）、自主、正义、保密和促进对个人尊重。随着伦理学问题被确定并进行探索，就可以为决策制定者建立一些可供选择的方案。此外，关于工作场所纳米技术风险的社会学考量可以通过对小型企业的特别关注和采用全球化的视野得到加强。关键词: **ethics, hazards, nanotechnology, occupational safety and health, particles, toxicology. Please cite to the original English version of this article— *Environ Health Perspect* 118:000–000 (2010). doi:10.1289/ehp.9456 available via *http://dx.doi.org/* [Online 25 September 2006]**

科学和技术已经发现尺寸在1–100nm范围内的材料有独特的特性［健康和安全执行委员会(HSE)2004；国家纳米技术计划(NNI)2004］。这些特性可能产生极其深远的社会效益，但是它们也会产生危害和风险。人们关注的产生危害的一个领域是工作场所–包括研究实验室、启动公司、生产设施或加工、使用、处理或回收工程纳米材料的操作场所。这些场所，是有些工程纳米颗粒的社会暴露第一次发生的场所。这类暴露有可能是由于疏忽和无意的。尽管政府、企业、非政府组织（NGOs）、贸易协会、学术机构和工人们已经通过努力达成共识，去认识和强调潜在的工作场所危害[Bartis 和Landree 2006; Hett 2004; 国家职业安全和健康研究所(NIOSH)2006;国家科学和技术委员会(NSTC) 2006; Roco和Bainbridge2003; 工程和新发现的健康风险科学委员会(SCENIHR)2005]，但是工人们仍有可能暴露于纳米材料。

许多关于纳米技术的伦理学方面的研究都侧重于一般性的问题，如公平性、保密性、安全性、环境影响和有关人–机交互的理论上的应用(Mnyusiwalla 等. 2003; Moor 和 Weckert 2004; Singer 2004)。而具体到工作场所的伦理学研究目前尚无人做过。为了帮助人们预期纳米技术可能产生的影响，为工作场所中涉及纳米技术的伦理和科学问题提供一个框架是十分重要的。伦理分析可以向社会保证，纳米技术广阔的前景不会掩盖其在工作场所所带来的危害和风险。正在出现的一种观念是，纳米科学和技术不能基于过去的实践经验，从前的经验是，在使用一种新发展的科学时，伦理和社会的反省只是其后的第二步；而实际上，伦理学的考量必须伴随着研究之路的每一步（美国工程研究院，2004）.我们写这篇文章的目的，是为了确定在工作场所中与纳米技术直接相关的伦理学问题，以及它们对工人健康和安全的意义。

伦理学评价的框架

考虑伦理学问题的框架可以从Gert等（1997）、Gewirth(1978, 1986)和Schrader–Frechette (1994)的工作以及从Beauchamp 和Childress (1994)的 “原则主义者” 方法中得出。在涉及纳米材料的工作中，对工人影响最大的伦理学问题与科学家、权威部门和雇主确定和告知危害与风险、工人对风险的接受程度、实施控制、参加医学筛查的选择方案以及在毒理学和暴露控制研究上充分的投入紧密相连（Table 1）。伦理学问题涉及危害和风险的发现与评价、无危害（不产生损害）、自主（自我决断）、正义（风险分布的公平性）、保密（在处理医疗信息上）和对个人的尊重。

基于事实的科学知识，是关于职业安全和健康的伦理决策的基础，但是也会受到偏见和价值观的影响(Kantrowitz 1995)。科学知识不可避免地承载着价值观。没有什么科学理论可以被认为是完全客观的，不过，可以认为一种理论比另一种更为客观(Shrader–Frechette 1994)。在伦理决策之下，是描述纳米技术的方法、潜在的效益和相关的危害与风险。在关于纳米颗粒危害的信息存在疑问的时候，关键的问题是，如何在必要的保护水平与给定保护水平的残余风险之间划定界限。

风险评估部分上是客观的，另一总部则可能有高度的政治倾向。因此，所有的风险估计也都承载着价值观。没有哪个单一描述风险和控制的方案能够满足需要，因为纳米技术的异质性和发展的自然属性。伦理学问题将是特异性的，只是基于特定时间、针对特定产品和使用场合的知识。研究者们已经建议，即使是在这种特异性的方式里，也需要可替代的评估，以发现伦理学和政治上的价值，从而为那些涉及纳米技术的政策提供信息(Schrader–Frechette 2002).。

目前关于纳米技术危害和风险的知识状况

描述纳米技术的方式，可以影响社会对工作场所纳米材料潜在危害的研究、发展、以及预防和控制方法的反应(Berube 2004)。术语“纳米技术”具有误导性，因为它不是一种单一的技术，而是一种多学科交叉技术，包括物理学、化学、生物学、工程学和电子学的方法、材料、应用和概念，在这一技术中，尺寸决定了特性(Aitken et al. 2004)。然而，在纳米技术的定义中，关于尺寸、表面特性、稳定性、化学成分和其他物理化学特征等问题并没有很好地解决。一个更全面的定义还包括新性能的结构，这种结构可以在原子尺度上操作(NNI 2004; Salamanca–Buentello et al. 2005)。

至少可以考虑把纳米颗粒分为两大类：工程制造的纳米颗粒和意外发生的（或偶然发生的）纳米颗粒。工程纳米颗粒是根据非常特定的特性设计的。偶然发生的纳米颗粒（自然的或人为的）是通过相对难以控制的方式产生的，和工程纳米颗粒相比，通常在物理和化学上具有异质性（NIOSH 2006。虽然目前4种主要的工程纳米颗粒生产方法（气象合成、汽相沉积、胶质和磨擦）可能会使工人通过吸入、皮肤吸收和食入的方式暴露于纳米颗粒，但是工人的暴露量和可能性尚未确定。关键问题（基于能够获得的有限信息）是关于危害与风险的评估。综合的问题是，虽然纳米颗粒比相对大块头的物质体积要小，但是它们的单位质量内的表面积大、颗粒物数量多。由于反应性潜力增加，这些特性通常会增加毒性潜力(Aitken et al. 2004)。这一理论适合于整个纳米技术领

Address correspondence to P.A. Schulte, NIOSH, 4676 Columbia Parkway, Cincinnati, OH 45226 USA. Telephone: (513) 533-8302. Fax: (513) 533-8588. E-mail: pschulte@cdc.gov

We thank the following for input or comments on earlier drafts: M. Ellenbecker, S. Samuels, H. Kipen, M. Hoover, E. Kuempel, R. Zumwalde, C. Geraci, V. Murashov, P. Middendorf.

The findings and conclusions expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily represent the views of the National Institute for Occupational Safety and Health.

The authors declare they have no competing financial interests.

Received 23 June 2006 ; accepted 25 September 2006.

This translation is provided by School of Public Health, Fudan University, China. EHP strives to ensure that its foreign-language materials are faithful translations of their original English-language counterparts. Please report any problems or discrepancies to hu1@niehs.nih.gov.

域而不是某个特定的纳米颗粒或过程，只会增加而不是减少危害和风险的不确定性。除了颗粒物的尺寸，人们发现越来越多的其他特性（如表面特性）也会影响到毒性(Donaldson 等 2006; Warheit 等. 2004)。这些特性的变化非常大。因此，用更精确的语言去描述纳米颗粒的危害和风险，在不确定性上确定一些界限，这是很有用的。因为颗粒物混合成分和产生过程的多样性，基于个案的危害和风险的评估可能更精确，或至少是根据生产方法的类型以及颗粒物是否嵌入在基体中还是游离的。

关于危害和风险的知识。关于涉及纳米技术的工人的健康效应数据下分有限，因为这一领域还处于初期的特性、至今为止潜在暴露的工人的数量较少，以及缺乏发展和检测出慢性病的时间。人类对此最相关的经验大是超细颗粒物（包括直径小于<100nm的颗粒物）和细颗粒物（直径小于2.5μm的颗粒物）暴露。人们已经在流行病学的空气污染研究和暴露于矿物质粉尘、纤维、焊接烟雾、燃烧产物和难溶、低毒性颗粒物（例如二氧化钛、黑烟末）的职业队列中评估了超细和细颗粒物(Maynard and Kuempel 2005; Nel et al.2006)。也在动物研究中发现了这些暴露以及工程纳米颗粒物暴露的危害(Donaldson et al.2004, 2006; Elder et al. 2006; Lam et al. 2004,2006; Oberdörster et al. 2005; Shvedova et al.2005; Warheit et al. 2004)。在表面积、氧化应激和纳米颗粒物在肺内的促炎性效应之间存在很强的关联。氧化应激越强，越有可能发生炎症和细胞毒性的风险(Nel et al. 2006; Oberdörster et al. 2005)。在动物研究中的发现，最终需要通过人类可能接受到的暴露（剂量）来解释。虽然仍然存在一些争议，但是来自于空气污染研究的证据已经把颗粒物空气污染（一部分较细的颗粒物，PM2.5，空气动力学直径<2.5μm）与人群中易感成员（尤其是有呼吸系统和心血管疾病的老年人）的不良健康效应联系在一起[Mark 2004; Peters 2005; U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) 2004]。此外，与可测量的人群健康效应相关的暴露浓度相当低(Aitken et al. 2004)。

在职业研究中，重复地暴露于可吸入的有害矿物质粉尘和纤维（例如，分别是石英和石棉）的人群，其与呼吸剂量有关的健康效应已经了解地很充分(Maynard and Kuempel 2005)。对于石棉，发生呼吸系统疾病的关键危险因素是纤维长度、直径和生物持久性。对于难溶、低毒性的粉尘（例如二氧化钛）、在纳米尺寸范围的小颗粒物，在动物研究中似乎能基于尺寸和表面积引起肺癌风险的上升(Heinrich et al. 1995; Oberdörster et al. 2005; Tran et al. 2000)。

虽然这些发现并非结论性的，各种在动物中的工程纳米颗粒研究已经引起了人们对受到暴露的工人中可能存在的危害及其严重程度的关注(Kipen and Laskin 2005)。可能的不良效应包括短期暴露于碳纳米管之后发生纤维化和其他肺部效应(Lam et al. 2006;Oberdörster et al. 2005; Shvedova et al. 2005)，纳米颗粒通过嗅神经转移到脑，纳米颗粒转移到循环系统的能力，以及纳米颗粒激活血小板、促进血栓症的潜力（Radomski et al. 2005)。

关于危害的属性和程度，这些发现中没有一个是结论性的，但是它们足够证明需要采取预防措施。

最终，危害信息的重要性依赖于工人们对这些危害的暴露程度有多深。这是风险的定义原则（一个暴露的工人可能发生疾病的概率）。人们已经认识到，需要纳米颗粒物特异性的风险评估（即，那些使用最适当的剂量指标而不是通常的质量的评估方法），这些评估是针对纳米技术独一无二的(National Academy of Engineering 2004; SCENIHR 2005)。

风险评估已经被广泛地用于管理新引进的化学物或方法带给人类的风险的不确定性。然而，纳米技术包括一系列不同的组成成分、结构的应用，因此，单一的风险评估和管理策略不一定是合适的(Wardak and Rejeski 2003)。纳米技术包括在纳米尺度上处理物质以生产材料、结构，生产包括各种颗粒物形态、尺寸、表面特性的设备和涂层。对这些颗粒物的研究，最好是通过一系列的、针对所评估的颗粒物类型（成分、表面特征和形状）的特异性风险评估。因为颗粒物尺寸与表面积之间总的负相关关系，剂量反应关系可能是随着总表面积和颗粒物数量、而不是随着质量单位变化的函数(SCENIHR 2005)。风险评估在反映颗粒物尺寸和表面积的效应上是有用的，但是他们还需要反映出颗粒物的其他特征。此外，目前仍不清楚基于纳米颗粒物的物理化学特性，能在多大程度上对其毒代动力学（风险评估的一个重要内容）进行预测(SCENIHR 2005)。

危害控制的证据基础。在工作环境中最常用的模型确定了危害的来源和暴露途径（例如，吸入，皮肤）[Office of Technology Assessment (OTA) 1985]。可以在每一个来源和途径一引入控制。职业安全和健康专家已经基于可靠性的效率确定了一种分级的控制，对环境的控制应该在对工人的控制之前这一原则是采取任何一种干预行为时都需要的(OTA 1985)。在这一分级控制的最简单的方式中，它明确了工程控制（包括替换、密封、隔离和通风）优先选择个人防护设备（例如防护服和呼吸器）。工作实践常常与风险管理措施结合在一起，以使工人的暴露降至最低，并且作为使用工程控制的补充措施。行政控制，例如工人轮班，有时也包括在分级控制之中，在工程控制和工作实践控制不能达到所期望的对工人的保护水平时，它通常组成了“第三道防线”（OTA 1985）.

在缺乏充分的毒性信息和广泛的工程纳米材料应用历史的情况下，控制指导的原则是基于控制偶然性超细颗粒物暴露和气体暴露的经验。空气传播的纳米颗粒物通常被认为没有惯性-因此，它们被的表现类似气体，在没有完全密封的情况下会扩散(Aitken et al. 2004)。气溶胶科学的丰富历史描述了气溶胶的基本特性和对它们的控制方法[American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 2001; Brown 1993; Burton 1997; Davies 1966; Friedlander 1977; Fuchs 1964; Hinds 1999; Ratherman 1996]。虽然一些权威人士认为超细颗粒物等同纳米颗粒物(SCENIHR 2005)，它们通常（但并不是唯一地）位于纳米尺度的上端。如果空气传播的纳米颗粒物服从较大的颗粒物所遵守的经典物理学和空气动力学，那些在捕获细和超细颗粒物、气体中有效的控制措施（例如关闭来源、局部排气通风和个人防护设备）也会对目前产生的这些纳米颗粒物有效。认为大多数用于细和超细颗粒物以及用于气体的控制方法也会对控制纳米颗粒物有用是有道理的，但是没有理由期望采用这些方法去控制新纳米颗粒

表1 关于涉及纳米材料的工作场所的伦理学问题

有工作有关的情景	涉及的伦理学原则	决策制定问题
发现并通告危害与风险	科学家的责任 无危害 自主 对个人的尊重	对数据的长处与短处的确定程度 公众讨论的参与程度 通告的精确性 通告的及时性
工人对风险的接受程度	自主 对个人的尊重 正义	工人在决策制定中的参与程度
工作场所控制手段的选择与实施	无危害 有益 对个人的尊重	所采用的控制技术的水平
纳米技术工人的医学筛查	自主 保密 对个人的尊重	医学筛查原理的适宜性 参与的自愿程度 维护测试结果的保密性
在毒理学和控制研究上投资	无危害 正义 对个人的尊重	投资的充分性

物产生过程的效果，会比以前在微米尺度的粉末和气体控制中所表现出来的更好(Aitken 2004)。有相当一部分观点指出，纳米颗粒物的不良效应不能基于化学成分和表面特性相似的大尺寸材料的已知毒性预测（或获得）(SCENIHR 2005)。纳米颗粒物控制的选择方案范围是从不控制到使用在放射物、气体和生物化学物质中采用的隔离和封锁。问题是，在这一系列方案中，应该从哪里选择控制措施。这也可以解释成，应该在这之中投入多少钱。当知道风险是高还是低的时候，作决策相对容易，通常适当的控制策略也很明显。然而，在危害不确定的情况下（正如纳米颗粒物产生的危害），困难在于确定怎样的控制水平以保证安全（图1）。鉴于毒性信息稀少，控制指南必须看作是临时的，一些权威人士认为这些措施应该是预防性的，即倾向于尽可能地减少暴露。

对危害和控制的证据的概括。已经有很多文献回顾了有关纳米技术危害和控制的证据基础(Hett 2004; Maynard和Kuempel 2005; National Academy of Engineering 2004; NIOSH,2006; Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004; SCENIHR 2005)，我们把它们总结在表2中，并用危害和控制以及我们的意识分为4类认知来描述。

这些类别是可变的，与特定时间的认知状态相关联。第1类（“知已知”），表示我们有一些关于某些类型的纳米颗粒物（如超细颗粒物）和气体所带来的健康危害以及如何控制它们的知识。这一类别适用于目前这一代的工程纳米颗粒物，是当前的控制指南中大部分内容的基础。第2类认知（“知未知”）是目前正在进行的或计划中的大部分研究的基础，我们对新的或预期的工程颗粒的危害或是否已经采取了充分的预防措施知之甚少。主要的问题不仅仅是如何控制暴露，而且包括控制的程度和成本究竟多少才合适？第3类认知（“不知已知”）表示我们对已经掌握的知识利用不充分。这就是说，科学家们对于电离辐射、生物介质、药物、颗粒物、矿物质粉尘和空气污染的危害和暴露控制方面已经有广泛的经验。可以更直接地把这些经验用于工作场所纳米材料危害的控制。此外，这一类别还可以包括私人拥有的、尚未用于危害评估的关于纳米颗粒物的信息。第4类认知（“不知未知”）表示了哲学探索中一个永久的领域（Caws 1998）。这一类别包括关于危害的力量和风险的范围的一系列想定。是否这些新的想定提出了暴露和风险的新类型？关于纳米技术的流行文献充满了对未来可能出现的场景的特征描述，但是没有推测关于工作场所的危害与风险（Drexler 1986; Regis 1995）。第4类认知还包括对影响一个问题的因素缺乏意识。要解决这种意识缺乏，可以通过动员有兴趣的、广泛的、多样性的学科和社区对一个问题的特征加以分析（HSE 2004）。第4类认知还包括我们持有的、可能不正确的信念。这些信念会导致我们根据错误的假设采取或不采取防护措施。最终。第4类认知会转化为第2类，然后再转化为第1类。

不管我们考虑哪一种认知，最终的伦理学要求是精确地描述关于一种危害或风险的认知状态，不要保守也不要夸大。然而，根据纳米技术的发展属性，关于潜在危害的认知会随着时间而改变，需要重新描述，有可能要对指南进行修订。在缺乏充分的危害和风险评估数据的情况下，伦理学的问题是多少警惕才足够。

伦理学问题

发现和通告危害与风险。风险分析的“危害识别”阶段是风险管理决策制定的基础。人们常常对这一阶段的结果展开争论，因为推理的过程主要是定性的以其它的结果会引发其他阶段关于预防措施的分析与决策(Crawford-Brown 和 Brown 1997)。关于纳米材料危害的科学信息的解释，是通告工人所经受的危害和风险的基础。解释和通告危害和风险信息是雇主采取的整体风险管理中的一部分。雇主的决策制定，将集中于决定应该采用哪一种预防控制去确保一个安全和健康的工作场所。

雇主和工人期望科学家和权威性的组织去帮助解释危害和危险信息，并把它们与现实情况相结合。这一期望可能会迫使科学家们不仅仅是做研究。在科学与道德之间的界限是非常复杂的，但是通常认为科学家们会对社会的大多数怀有伦理责任(Pimple 2002; Schrader-Frechette 1994; Weil 2002)。然而，在实现科学研究内在的专业责任之外，对于这些伦理责任的属性尚未达成共识。为纳米技术领域的科学家的伦理责任建立一个清楚、有条理的方法是一件艰巨的任务。至少，这种方法要求科学家们在发表的文章中使用合适的限定语，在总结他们的结果的时候小心谨慎。更广泛地说，这意味着，在考虑他们的工作的意义的时候不要退缩，即使尚未掌握全部的科学细节。

决策制定者可以拥有不充分的科学信息，来帮助他们决定他们的方法该有多大程度的预防性。为了确定一个决策是否符合无害的原则，决策必须确定，如果如同初步的危害信息所提示的那样纳米颗粒物是有毒的，会发生怎样的危害。关于空气污染和工业超细颗粒物的数据表明，既定质量的纳米颗粒物比同等质量的大颗粒物的生物反应性更高、因此潜在毒性也高强（Seaton 2006）。因此，与直径>100nm的颗粒物相比，对较小的纳米尺度的粉尘的控制水平需要更严格。最终，更严格的控制水平所产生的风险等于或小于大颗粒物所带来的风险。权威组织和雇主有责任告知在采取了适当的控制措施之后工人所面对的的风险。如果不能做到这一点，有可能会妨碍工人行使自主权。这一问题可能会因这样一个事实所受挫，即雇主出于私人的利益不去发布有关“纳米产品”和工件场所控制的信息。

原则主义者的伦理学方法集中于类似无害和自主这样的原则，但是未能评价职业安全和健康和社会和组织环境，未能评价从业者在与总体结构的关系中的作用(Gert et al. 1997; Samuels 2003)。至于纳米技术，对从业者和权威的环境压力来自于公司或社会对纳米技术生长和发展的需要和期望。说到对健康的潜在关注，可以看作是杞人忧天、无稽的以及对这一领域的发展有害。然而，相反的一面是，从业者的需求冲突来自于他既是公司的代理又是自主的专业人士，这就形成了一个社会和组织上的难题，而不是个人的伦理学难题(Draper 2003; Samuels 2003)。一个解决方案是，健康声明是出于促进对纳米技术的关注而独立地制定。

工人对风险的接受程度。风险的接受程度是一个相对的概念，包括对风险的确定性和严重性的判断、所产生的健康将就的程度、任何替代方案的风险和优势以及对所遭受风险的补偿（Fischoff 1994）。认定工人在接受哪种工作和工作条件方面有自由选择权，这是个错误的假设。虽然存在一些自主决定的成分，但是经济和社会条件对工人选择工作、忍受的风险水平以及参与风险管理的能力方面产生了很大的影响。工人参与风险管理不是一个不变的概念，在过去35年里，随着实施团队方法、管理系统、共同责任以及知情权和行动权运动，工人的参与已经增长了很多 (Gallagher 1997; Jensen 2002; Lynn 1997; Shearn 2005)。然而，工人通常不能完全拒绝他们认为有危险的工作而是仍然保留着他们的工作。顺应自主的原则依赖于工人能在多大程度上投入到他们的工作场所的风险管理中，以及在实施了控制之后他们经受的风险程度有多大。

正义也与工人的决策制定有关。问题是，和一般公众相比工人暴露于风险的程度究竟高多少，或换种方式说，改变激励的方式，例如对来自纳米颗粒物暴露的额外风险增加薪水或危险岗位津贴是否合适(Schrader-Frechette 2002)。如果纳米颗粒物控制能把工人的风险水平降至一般公众的水平，这一问题可能就不那么重要；如果可能的话，对两个问题都要了解。很显然，社会上承认一些工作本质上就比其他其他更具危险。然而，在许多国家，社会的目的是为所有的工人提供安全和健康的工作场所。

选择和实施控制。有关纳米颗粒物控制的关键伦理学问题是在预防损伤和疾病方面是否采取了足够的控制措施。如果没有，工人暴露可能会导致伤害风险增加或发生真正的伤害。重要的科学事实是纳米颗粒物产生的风险还没有被很好地认识。然而，初步的信息提示，对

纳米颗物所付出的关注至少应该和对工业细和超细颗粒物所采取的措施一样，应该为纳米颗粒物设立相等的防护水平(Hett 2004; Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004; Seaton 2006)。超细颗粒物暴露产生的任何风险是它们的潜在毒性和暴露程度的函数。基于有限的风险毒理学证据和不断提升的关注水平。最好的方法应该是，把纳米颗粒物当作有潜在的职业危害看待，使用谨慎的健康防护，用基于风险的方法建立临时的防范措施，这些措施应该与良好的、专业的职业安全和健康实践相一致(Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004)。

这种临时的措施应该包括进行工作场所暴露评估、实施工程控制、分配工作任务以及建立临时的过程或工业暴露界限为核心要素的指南。如果暴露控制集中于可呼吸尺寸的空气传播的颗粒物，这种方法可能是有用的，可以反应出有经验的从业者的职业判断，如果皮肤吸收是一种有能的暴露途径，应该建立预防皮肤暴露的指南。不幸的是，想进行一个很强的基于风险的评价以为决策提供信息，我们所掌握的数据还不充分。

证据提示，和有相同化学物的较大颗粒物相比，至少一些人工制造的纳米颗粒物在单位质量上有更强的毒性(Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004)。然而，一些证据表明，随着使用现有的对细或超细颗粒物控制方法，工人发生肺部疾病的风险不会不受限制地增加。例如，基于动物研究的估计值表明，工人暴露于超细二氧化钛在0.1mg/m^3，暴露时间为终生工作时间45年，其肺癌的超额风险是<1/1000，并且事实上所拥有的风险趋近于0(Kuempel et al. 2004)。这些发现的基础是小尺寸的颗粒物在既定的质量时表面积增加带来的风险，正如从动物研究中所得到的结果并外推至人类中。这种分析与其他纳米颗粒物的相关程度有多大尚不清楚，而且可能随着形态学、表面活性以及生物持久性改变。此外，来自于这些超细颗粒物暴露的精确风险只有在获得充分的动物或人类数据的时候才能确定。而且，如果颗粒物能够转移到中枢神经系统或循环系统，在做出结论之前需要更深入的研究(Oberdörster et al. 2005)。

简而言之，鉴于目前这一代的纳米颗粒物产带来的危害的证据尚不充分，我们希望我们所采用的那些被推荐用于已知的工业超细颗粒物的控制措施能够使风险（不管是什么风险）降低。这一结论得到了这些证据的支持：a)对于难溶、低毒性颗粒物的一般化的风险评估是基于表面积；b)事实上，这类颗粒物在空气中的传播服从精典的物理学和空气动力学法则。然而，未来的风险评估可能是不同的，这依赖于生物持久性、结构、新颗粒物的表面活性以及通过内皮细胞屏障转移的信息。这果这些主题是风险告知和管理措施的重点，总的看起来这与伦理的无害和有益的原则一致。与此同时，没有强有力的证据表明在这些环境中的工人没有超额风险。只有在定量评估的基础上，以及使用了对某些颗粒物证明是有效的控制时，才能对最小的风险做出假设。

总地说来，随着科学家们发展出新的材料、进行毒理学或者其他健康效应研究，与纳米材料有关的认知的基础不是静态的而是不断变化的。因此，需要对健康风险进行持续性的评价，伴随着符合本文中所讨论的伦理原则的持续性的通告、不断发展的管理方案。

建立医学筛查项目。医学筛查是把检验应用于无症状的个人，以发现那些处于疾病早期或处于疾病风险之中的人。因为职业状况的特殊属性以及雇主的责任，工作场所的医学筛查不同于在一般人群中的医学筛查(Halperin et al. 1986; Harber et al. 2003)。关于工人的医学筛查以及发现结果的应用与意义，人们已经确定了范围广泛的伦理学问题(Ashford et al. 1990; Schulte 1986)。这些问题涉及筛查的基本原理、筛查的自愿特性、对检验结果阳性工人应该采取的措施以及哪些个人可以接触到检验信息。

当材料的毒性和工人的风险未知时－大多数纳米材料都是这种情况，医学筛查通常不能保证是可靠的。此外，对于肺癌这样的疾病（这是一些纳米颗粒暴露可能导致的结果），没有强有力证据基础支持常规的筛查；通常不推荐使用一般人群中的肺癌筛查方法[National Cancer Institute (NCI)2006]。这些筛查不仅不能降低来源于肺癌的死亡，它还会导致假阳性结果和不必要的侵入性的手术或治疗。工人的医学筛查对于一些纳米技术操作中的非恶性呼吸系统效应可能是有作用的，在这些操作中，采取控制措施之后有可能发生明显的残余风险。这种筛查应该是综合风险管理项目

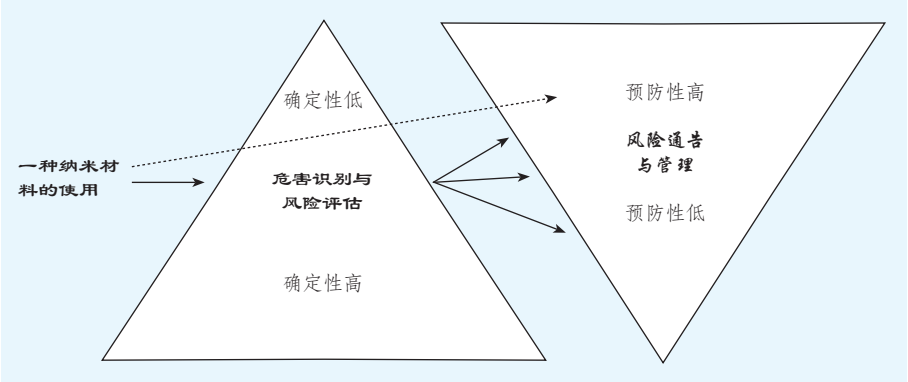

图1.工作场所中纳米颗粒物风险管理的决策制定：怎样的控制水平才适当？

表2. 对纳米颗粒物危害和控制的认知状况的概括

认知意识	认知内容（危害和控制）
1.知已知	超细颗料物、空气污染和纤维的健康效应
	如何控制工作场所的超细颗粒物
	尺寸、表面积、表面特征的重要性
	纳米颗粒物在动物中和严重健康效应
	一些纳米材料在动物体内沿着嗅神经转移
2.知未知	测量和确定特征的技术
	新型工程颗粒物的危害
	在体内转移的程度
	与工作场所中污染物的交互作用
	皮肤暴露的重要性
	对工人的健康效应
	对工人的风险
	控制的效果
	医学筛查与生物监测的明智性
	对工人家庭的风险
3.不知已知	在控制有害物质和介质（放射、生物媒介和药物）方机可利用的广泛经验，可以用于纳米颗粒物
	私人拥有的纳米颗粒物信息
	从以前的“新”技术中获得的教训
4.不知未知	尚未预料的新危害
	尚未预料的新控制方法
	对危害和控制的错误假设

中的一部分，它不仅仅考虑了呼吸系统危害，而且考虑了心血管和神经学的风险以及对其他各种潜在靶器官系统的风险(Oberdörster et al. 2005; Radomski et al. 2005; Tran et al. 2005)。如果发现各种各样的纳米材料有毒性效应，而且如果对于在暴露工人中的这些效应存在合适的（有效的）早期检测手段，那么医学筛查可能有保障作用。然而，从历史的观点来看，医学筛查在分级的控制中只是第二位的预防措施(Ashford et al. 1990)。

适用于工人医学筛查的伦理学问题包括筛查是否是自愿的、谁能接触到检查结果，以及这种接触检查结果的目的是什么。筛查通常要求在诊断作出确认；对于阳性者，筛查要求及时的治疗。谁承担这些程序的费用？在使用筛查的结果去标记或歧视工人或把他们排除在工作之外时，也会产生伦理学问题。筛查结果还会产生心理上的负担。解决这些伦理学问题，部分依赖于工人在多大程度上被告知筛查结果是被如何使用的。

确保在毒理学和控制研究中有充分的投资。对涉及到的危害没有充分认识的时候，就不能充分解决纳米技术中的伦理学问题。关于数量不断增长的纳米材料的安全性，因为可获得的信息有限，需要持续地研究努力以符合自主、有益和无害的原则。此外，需要关于暴露程度和控制效果的研究。从国际上看，这种研究正在进行之中。

然而，关于这种研究的投资水平问题也具有伦理学意义，因为目前许多的控制指南都是预防性的，而且不是基于很有说服力的定量风险评估。对这种缺乏合适信息，唯一的解决途径就是深入的研究。

一些评价家已经呼吁放慢对纳米颗粒物的研究和发展，相反，其他一些人则发现需要增加健康效应研究和伦理学分析[Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) 2003, 2004; Mnyusiwalla et al. 2003]。人们已经发现需要基于健康的研究，应该包括以下一些主题：暴露与剂量、毒性、度量衡、流行病学、控制技术、安全性、教育、建议以及在近期内的应用。（NIOSH 2006）。

研究人员可以通过评估全球在纳米技术研究和发展上的预算，以及通过确定在这一领域需要在职业安全和健康研究、伦理研究中投入的实际资金数量，帮助我们把有关伦理问题的讨论进一步深化。从全球来说，这样的信息并没有很好地形成文件；但是，可以考虑美国已有的数据。自从美国国家纳米计划（NNI）接受资助发来，2005年的资金第一次是按照项目组成的领域分类。对社会维度组成领域的资助包括针对环境、健康和安全的3900万美元和针对公众教育（关于纳米技术在社会上的广泛应用，包括经济、工作场所、教育、伦理和法律意义）的4300万美元。这一资助来自于11个部门，对纳米技术的合并预算大约是10.54亿美元。有人批评认为，对于社会维度组成的资助及其下层的职业安全和健康的资助水平（总额的7.8%）不够充分(Bartis and Landree 2006; Maynard 2006; Service 2005)。尽管如此，国际已经有一个协议，要努力解决纳米材料在健康和安全方面的问题(NSTC 2006; Thomas et al. 2006)。

促进对个人的尊重。在有关纳米技术的争论背后，是在对社会产生预望效益的环境中，一些人对潜在危害的忍受程度。这种想法深深体现在功利主义者的观点之中，他们认为，对一个人的损害以可通过对另一个人所带来的更多效益来弥补。这种观点与伦理学尊重个人的原则相悖，这一原则强调个人的权利并与金标准（“己所不欲，勿施于人”）联系在一起（Gewirth 1978, 1986）。在工作场所，这一原则可以解释为承认每一个工人都有权利获得安全和健康的工作环境。这一权利要求雇主和政府承担相应的责任，他们必须保证工人在安全与健康的工作场所方面的权利Gewirth 1986)。妨碍这一解释的是雇主以及社会对于来自于纳米技术的收获和效益权利，会与（或看起来是）工人的权利发生冲突。当两种权利彼此发生冲突时，必须找出合理的途径去确定它们的相对优先性。Gewirth(1986)为这种优先性确定了一个重要原则，作为采取行动的必要性尺度。例如，在雇主的收益权力可能与工人的安全与健康权利发生冲突的情况下，健康损失或安全威胁会降低一个人的行动能力，这种损失比另一个人资产、财富的减少或控制这种损失所丧失的自由要高。这一原则的实践意义在于：在缺乏有关纳米技术危害、风险和控制的充分信息的情况下。雇主应该倾向于使用更多的而不是更少的控制措施（Hett 2004）。进行现场特异性的危害评估、使用适当的控制，这才是与尊重个人的原则相吻合的做法，并与自主、有益和无害的原则相一致。然而，需要采取什么程度的控制是争论的关键问题。在许多情况下，对当前这一代大多数工程纳米颗粒物的控制还处于现有技术能力的范围之内。问题是，在特定的工作场所，应该在使用这些技术上做多少投资。

支持伦理决策制定的战略

对小企业给予特别关注。小企业的职业安全和健康问题已经是人们关注的焦点，尤其是在最近十年，自从大多数工作场区划分为小企业（即根据不同的定义，工作场所中雇佣的工人少于250、100或20名）以来。这种情况对于涉及纳米技术的工作场所来说也是一样的，但是并没有很好地在文件中给好描述(Aitken et al. 2004; Rocoand Bainbridge 2003)。职业损伤和疾病在小企业发生的频率，可能会超过该产业在一个地区包括所有企业的总体平均水平；但是，在单独一个公司中的发生频率可能并不明显（NIOSH 1999）。人们通常认为小企业没有多少时间和资源投入到职业安全和健康方面。

小企业是大多数经济的驱动力量，包括与纳米技术相关的那部分经济(Rocoand和Bainbridge 2003)。独立咨询顾问、行业协会、保险公司、产品供货商和政府部门，是小企业获得职业安全和健康信息的主要来源。职业安全和健康信息也可以从上游的供应商传递到下游的纳米颗粒用户。事实上，对于已经记录在案的危害，供应商有伦理和法律上的义务把这些信息传递给下游的客户。对于小企业来说，需要有关于纳米技术危害和控制的职业安全和健康指南方面的信息。

采用全球化的观点。纳米技术的发展是一个全球化的现象，需要对危害与风险采用全球化的手段，尤其是在工作场所中。这个世界需要对纳米技术材料采用国际通用的标准以及统一的术语(American Society for Testing and Materials 2005; Hett 2004)。没有统一的术语，研究者、保险公司、管理者、政府、公司和工人就会在交流和采取协调行动方面存在困难。

在全球化的经济中，物资流程跨越很多边界，包括那些发展中国家(Salamanca-Buentello et al. 2005)。因此，为了确保工人的安全和健康，决策制定者（无论他们是雇主还是政府权力部门）必须知道和理解在各种过程和操作中使用了什么样的材料。这一问题十分复杂，因为在基于科学和基于法律的文献中，可能使用了很多不同的定义和描述。为了发展风险最小的纳米技术，必须通过国际化的合作去发现和解决有关的知识缺口。同时还需要透明的风险评估框架，它应该能得到广泛的接受（SCENIHR 2005）.

共享职业安全和健康的全球化方法需要不断增加获取信息的机会和能力。有权知道相关的风险—或广义地说，知情权—甚至没有在全球获得认可(Pantry 2002)。世界卫生组织（WHO）促进所有人在工作中的健康权利。信息是认识到这种权利的一条途径。尽管WHO成员国很广泛，真正能接触到信息并把它在国家间传播，仍然是个难题。

风险告知（包括材料安全性清单）应该反映国际间的一致化程度。国际合作可以确保危险的过程不是转嫁到劳动力廉价或环境控制松懈的市场（Singer et al. 2005, 2006）。一个既有国家意义又有国际意义的关键问题是，各国是否把由某种物质制造的纳米材料与由相同物质制造的较大的颗粒物区别对待。纳米颗粒物的特性可能与同样成分的较大的颗粒物不同。例如，大多数由碳制造的材料通常表现出很小的健康风险；然而，碳制造的纳米管可能会带来更高的健康风险，而目前对它的管理处于较低的防护水平（Shvedova et al. 2005）。

问题是，是否对两者推荐同时的风险告知和管理策略。根据碳纳米管的例子，似乎至少对某些纳米颗粒物需要新的标准和风险告知内容。

结论

关于工作场所纳米技术的伦理学问题，起源于对纳米材料的危害以及它们可能对工人带来的风险的认知现状。对这些问题缺乏明确的认识，要求对目前可能存在于各种场所的危害和风险有一个临时的评估。只有在发现可能导致危害的过程、风险评估是透明和可以理解的情况下，工人才能够行使他们的自主权。雇主要做到遵从自主、有益、无害、正义、保密和尊重个人的原则，需要a)准确地描述危害与风险，b)在他们的方法中对危害采取预防措施，c)开展对工人的告知与对话，以及d)采取必要的措施去控制风险以使风险在工人看来是合理的和可接受的。

References

ACGIH. 2001. Industrial Ventilation: a Manual of Recommended Practice. Cincinnati, OH:American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

Aitken RJ, Creely KS, Tran CL. 2004. Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review. Health Safety Executive, Research Report 274. London:HSE Books.

Ashford NA, Spadafor CJ, Hattis DB, Caldart CC. 1990. Monitoring the Worker for Exposure and Disease: Scientific Legal and Ethical Considerations in the Use of Biomarkers. Baltimore, MD:The Johns Hopkins University Press.

American Society for Testing and Materials. 2005. New Standard Terminology for Nanotechnology. WK8051. Available: http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK8051.htm?L+mystore+rdik5786+1158038968 [accessed 11 September 2006].

Bartis JT, Landree E. 2006. Nanomaterials in the Workplace: Policy and Planning Workshop on Occupational Safety and Health. Arlington, VA:RAND Corporation.

Beauchamp TL, Childress JI. 1994. Principles of Biomedical Ethics. 4th ed. New York:Oxford University Press.

Berube DM. 2004. The rhetoric of nanotechnology. In: Discovering the Nanoscale (Baird D, Nordman A, Schummer J, eds). Amsterdam:IOS Press, 173–192.

Brown RC. 1993. Air Filtration. New York: Pergamon Press.

Burton J. 1997. General methods for the control of airborne hazards. In: The Occupational Environment—Its Evaluation and Control (DiNardi SR, ed). Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.

Cairns J Jr. 2003. Integrating top-down/bottom-up sustainability strategies: an ethical challenge. Ethics Sci Environ Politics 1–6. Available: http://www.int-res.com/articles/esep/2003/E26.pdf#search= %22cairns%20integrating%20top-down%202003%22 [accessed 11 September 2006].

Caws P. 1998. Communication lag. Sci Commun 20:14–20.

Crawford-Brown DJ, Brown KG. 1997. A framework for assessing the rationality of judgments in carcinogenicity hazard identification. Risk 8.307. Available: http://www.piercelaw.edu/risk/vol8/fall/Cr-Br+.htm [accessed 11 September 2006].

Davies CN. 1966. Aerosol Science. London: Academic Press.

Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forrest G, et al. 2006. Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. Toxicol Sci 92:5–22.

Donaldson K, Stone V, Tran CL, Kreyling W, Borm PJA. Nanotoxicology. 2004. Occup Environ Med 61: 727–278.

Draper E. 2003. The Company Doctor: Risk and Responsibility and Corporate Professionalism. New York: Russell Sage Foundation.

Drew S. 1999. Building knowledge management into strategy: making sense of a new perspective. Long Range Planning 32:130–136.

Drexler KE. 1986. Engines of Creation. New York:Anchor Press/Doubleday.

Elder A, Gelein R, Silva V, Feikert T, Opanashuk L, Carter J, et al. 2006. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. Environ Health Perspect 114:1172–1178.

ETC Group. 2003. The Big Down: From Genomes to Atoms. Winnipeg, Ontario, CN:Action Group on Erosion, Technology and Concentration.

ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration). 2004. Down on the Farm: The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture. http://www.etcgroup.org/upload/publication/80/01/etc_dotfarm2004.pdf [accessed 16 November 2006].

Fischoff B. 1994. Acceptable risk: a conceptual proposal. Risk 5.1. Available: http://www.piercelaw.edu/risk/vol5/winter/Fischhof.htm [accessed 11 September 2006].

Friedlander SH. 1997. Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior. New York:John Wiley and Sons.

Fuchs NA. 1964. The Mechanics of Aerosols. Oxford, UK:Pergamon Press.

Gallagher C. 1997. Types of health and safety management systems. In: Health and Safety Management Systems: An Analysis of System Types and Effectiveness. Canberra, ACT:Office of the Australian Safety and Compensation Council.

Gert B, Culver CM, Clouser, KD. 1997. Bioethics: A Return to Fundamentals. New York:Oxford University Press.

Gewirth A. 1978. Reason and Morality. Chicago:University of Chicago Press.

Gewirth A. 1986. Human rights in the workplace. Am J Ind Med 9:31–40.

Halperin WE, Ratcliffe J, Frazier TM, Wilson L, Becker SP, Schulte PA. 1986. Medical screening in the workplace: proposed principles. J Occup Med 28:547–552.

Harber P, Conlon C, McCunney RJ. 2003. Occupational medical surveillance. In: A Practical Approach to Occupational and Environmental Medicine (McCunney RJ, ed). Philadelphia:Lippincott Williams and Wilkins, 582–599.

Harris CE. 2003. Methodologies for case studies in engineering ethics. In: Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering. Washington, DC:National Academy of Sciences, 79–93.

Heinrich U, Fuhst R, Rittinghauseen S, Creutzenberg O, Bellmann B, Koch W, et al. 1995. Chronic inhalation exposure of Wistar rats and 2 different strains of mice to diesel-engine exhaust, carbon black, and titanium dioxide. Inhal Toxicol 7:533–556.

Hett A. 2004. Nanotechnology: Small Matter, Many Unknowns. Zurich:Swiss Reinsurance Company. Available: http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/ULR-68AKZF/$FILE/Publ04_nano_en.pdf [accessed 16 November 2006].

Hinds WC. 1999. Aerosol Technology. New York:John Wiley & Sons.

HSE. 2004. Nanotechnology HSE Information Note. Horizons Scanning Information Note no. HSIN1. London: Health and Safety Executive.

Jensen PL. 2002. Assessing assessment: the Danish experience of worker participation in risk assessment. Econ Ind Democracy 23:201–207.

Kantrowitz A. 1995. The separation of facts and values. Risk 6:105. Available: http://www.piercelaw.edu/Risk/vol6/spring/Kantro2.htm [accessed 12 September 2006].

Kipen HM, Laskin DL. 2005. Smaller is not always better: nanotechnology yields nanotoxicology. Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol 289(5):L696–L697.

Kuempel ED, Wheeler M, Smith R, Bailer J. 2004. A quantitative risk assessment in workers using rodent dose-response data of fine and ultrafine titanium dioxide. In: Report of Presentations of Plenary and Workshop Sessions and Summary of Conclusions. Nanomaterials—A Risk to Health at Work? 12-14 October 2004, Buxton, UK. Buxton, UK:Health and Safety Laboratory. Available: http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymrep_final.pdf [accessed 12 September 2006].

Lam CW, James JT, McCluskey R, Hunter RL. 2004. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. Toxicol Sci 77:126–134.

Lam CW, James JT, McCluskey RL, Arlli S, Hunter RL. 2006. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. Crit Rev Toxicol 36:159–217.

Lynn FM. 1997. Public Participation in Risk Management Decisions: The Right to Define, the Right to Know, and the Right to Act. Risk 1.95. Available: http://www.piercelaw.edu/risk/vol1/spring/lynn.htm [accessed 11 September 2006].

Mark D. 2004. Nanomaterials—A Risk to Health at Work? Buxton, UK:Health and Safety Laboratory,SK17 9 JN. Available: www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymrep_final.pdf [accessed 11 September 2006].

Maynard AD. 2006. Nanotechnology: A Research Strategy for Addressing Risk. Washington, DC:Woodrow Wilson International Center for Scholars.

Maynard AD, Kuempel ED. 2005. Airborne nanostructured particles and occupational health. J Nanoparticles Res 7:587–614.

Mnyusiwalla A, Daar AS, Singer PA. 2003. "Mind the Gap": science and ethics in nanotechnology. Nanotechnology 14:R9–R13.

Moor J, Wechert J. 2004. Nanoethics: assessing the nanoscale from an ethical point of view. In: Discovering the Nanoscale (Baird D, Nordmann A, Schummer J, eds). Amsterdam:IOS Press, 301–310.

National Academy of Engineering. 2004. Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering: Papers from a Workshop, 14–15 October 2003, Washington, DC. Washington, DC:National Academies Press. Available: http://newton.nap.edu/books/030909271X/html [accessed 16 November 2006].

NCI (National Cancer Institute). 2006. Lung Cancer (PDQ®): Screening. Available: http://www.cancer.gov/cancertopics/pdq/screening/lung/healthprofessional [accessed 16 November 2006].

Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. 2006. Toxic potential of materials at the nanolevel. Science 311: 622–627.

NIOSH. 1999. Identifying High-Risk Small Business Industries: The Basis for Preventing Occupational Injury, Illness, and Fatality. NIOSH (DHHS) Publ no. 99–107. Cincinnati, OH:National Institute for Occupational Safety and Health.

NIOSH. 2006. Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, Available: http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenano/ [accessed 11 September 2006].

NNI (National Nanotechnology Initiative). 2004. NNI Strategic Plan. Available: www.nano.gov/html/about/strategicplan2004.html [accessed 12 September 2006].

NSTC. 2006. The National Nanotechnology Initiative. Environmental, Health and Safety Research for Engineered Nanoscale Materials. Arlington, VA:National Nanotechnology Coordination Office, National Science and Technology Council.

Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. Environ Health Perspect 113:823–837.

OTA. April 1985. Preventing Illness and Injury in the Workplace. OTA-H-256. Washington, DC:U.S. Congress, Office of Technology Assessment.

Pantry S. 2002. The Unequal OSH (Occupational Safety and Health) World of Information. Available: http://www.sheilapantry.com/oshworld/editorial/2002/200206.html [accessed 16 November 2006].

Peters A. 2005. Particulate matter and heart disease: evidence from epidemiological studies. Toxicol Appl Pharmacol 207:S477–S482.

Pimple KD. 2002. Six domains of research ethics. A heuristic framework for the responsible conduct of research. Sci Eng Ethics 8:191–205.

Radomski A, Jurasz P, Alonso-Escolano P, Drew M, Morandi M, Tadeusz M, et al. 2005. Nanoparticle-induced platelet aggregation and vascular thrombosis. Br J Pharmacol 146:882–893.

Ratherman S. 1996. Methods of control. In: Fundamentals of Industrial Hygiene (Plog B, ed). Itasca, IL: National Safety Council.

Regis E. 1995. Nano: The Emerging Science of Nanotechnology: Remaking the World-Molecule by Molecule. New York: Little Brown and Co.

Roco MC, Bainbridge WS. 2003. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. Nanoscale Science, Engineering and Technology (NSET) Workshop Report, 3-5 December 2005, Arlington, VA. Arlington, VA:National Science Foundation.

Royal Society and Royal Academy of Engineering. 2004. Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and

Uncertainties. London:Royal Society and Royal Academy of Engineering.
Salamanca-Buentello F, Persad DL, Court EB, Martin DK, Daar AS, Singer PA. 2005. Nanotechonolgy and the developing world. PLoS Med 2:e97.
Samuels S. 2003. Occupational medicine and its moral discontents. J Occup Environ Med 45:1226–1233.
SCENIHR. 2005. Request for a Scientific Opinion on the Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Nanotechnologies. SCENIHR/002/05. Brussels: European Commission, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks.
Schrader-Frechette K. 1994. Ethics of Scientific Research. Lanham, MD:Ronan and Littlefield.
Schrader-Frechette K. 2002. Environmental Justice: Creating Equality, Reclaiming Democracy. New York: Oxford University Press.
Schulte PA. 1986. Problems in notification and screening of workers at high risk of disease. J Occup Med 28:951–957.
Schulte PA, Lentz TJ, Anderson VP, Lamborg AD. 2004. Knowledge management in occupational hygiene: the United States example. Ann Occup Hyg 48:583–594.
Seaton A. 2006. Nanotechnology and the occupational physician. Occup Med (Lond) 56(5):312–316.
Service RF. 2005. Calls rise for more research on toxicology of nanomaterials. Science 310:1609.
Shearn P. 2005. Workforce Participation in Occupational Health and Safety in Non-Unionized Workplaces. HSE Report no. HSL/2005/41. London:Health and Safety Executive.
Shvedova AA, Kisin EK, Mercer R, Murray AR, Johnson VJ, Potapovich AI, et al. 2005. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol 289(5): L698–L708.
Singer P. 2004. Nanotechnology Ethics. Designing Nanostructures—A Tutorial. New York:New York Academy of Sciences. Available: http://www.nyas.org/ebriefreps/splash.asp?intebriefID=321 [accessed 16 November 2006].
Singer PA, Daar AS, Salamanca-Buentello F, Court EB. 2006. Nano-diplomacy. Georgetown J Int Affairs Winter/Spring:129–137.
Singer PA, Salamanca-Buentello F, Daar AS. 2005. Harnessing nanotechnology to improve global equity. Iss Sci Technol Summer: 57–64.
Thomas K, Aguar P, Kawasaki H, Morris J, Nakanishi J, Savage N. 2006 Research strategies for safety evaluations of nanomaterials. Part VIII: International efforts to develop risk–based safety evaluations for nanomaterials. Toxicol Sci 92:23–32.
Tran CL, Buchanan D, Cullen RT, Searl A, Jones AD, Donaldson K. 2000. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. Inhal Toxicol 12:1113–1126.
Tran CL, Donaldson K, Stones V, Fernandez T, Ford A, Christofi N, et al. 2005. A Scoping Study to Identify Hazard Data Needs for Addressing the Risks Presented by Nanoparticles and Nanotubes. Research Report. London: Institute of Occupational Medicine.
U.S. EPA . 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter. Vol 1. 600/p-99/002aF. Research Triangle Park, NC:U.S. Environmental Protection Agency.
Wardak A, Rejeski D. 2003. Nanotechnology and Regulation: A Case Study Using the Toxic Substances Control Act (TSCA); A Discussion Paper. Publication 2003–6. Washington, DC:Woodrow Wilson International Center for Scholars, Foresight and Governance Project.
Warheit DB, Laurence BR, Reed KL, Roach DH, Reynolds GAM, Webb TR. 2004. Comparative toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. Toxicol Sci 76:117–125.
Weil V. 2002. Making sense of scientists' responsibilities at the interface of science and society. Sci Eng Ethics 8:223–227.