

控制带技术在纳米产业职业危害管理中的应用

唐仕川¹, 朱鹏², 余珉³, 张元宝¹

摘要:

纳米产业存在的潜在职业接触风险与健康危害问题给职业卫生安全防范工作提出了新的挑战。尽管纳米产业中的不同作业岗位存在着不同程度的暴露风险,但职业性接触所致的潜在健康危害和职业接触限值尚处于研究过程。因而,应当依据现有风险管理决策对纳米产业加以职业危害风险管理。其中,控制带技术在应对不确定性风险方面有着相对优势,且在全球职业卫生领域中有着近20年的发展历程,是一类针对作业场所所有毒有害物质进行定性和(或)半定量风险评估和管理的策略手段。纳米产业职业危害风险管理控制带技术的探索与发展不仅可为职业卫生管理提供依据,还可指导职业健康监护工作。

关键词: 控制带; 暴露风险; 危害分类; 纳米技术; 风险管理

引用: 唐仕川, 朱鹏, 余珉, 等. 控制带技术在纳米产业职业危害管理中的应用[J]. 环境与职业医学, 2017, 34(6): 555-559. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.16771

Application of control banding to occupational hazard management in nanotechnology industry TANG Shi-chuan¹, ZHU Peng², YU Min³, ZHANG Yuan-bao¹ (1. Beijing Key Laboratory of Occupational Safety and Health, Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China; 2. Graduate School, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 3. Institute of Occupational Diseases Prevention and Control, Zhejiang Academy of Medical Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310013, China). Address correspondence to TANG Shi-chuan, E-mail: tsc3496@sina.com · The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract:

The potential exposure risks and health hazard issues in nanotechnology industry pose a new challenge to occupational health and safety. In nanotechnology industry, different work sites might have varied exposure risks, but the adverse health effects due to occupational exposure and relevant occupational exposure limits remain being investigated. Accordingly, state-of-art risk management strategy should be implemented in nanotechnology. Among them, control banding has merit in dealing with uncertainty, has progressed for almost 20 years in global occupational hygiene, and is a quantitative and/or semi-quantitative risk assessment and management strategy for occupational hazards. The discovery and development of nanotechnology-oriented control banding may not only provide scientific evidence for occupational hygiene, but also instruct occupational health surveillance.

Keywords: control banding; exposure risk; hazard classification; nanotechnology; risk management

Citation: TANG Shi-chuan, ZHU Peng, YU Min, et al. Application of control banding to occupational hazard management in nanotechnology industry[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2017, 34(6): 555-549. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.16771

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

[基金项目]北京市科学技术研究院2016创新团队计划课题(编号:IG201402C2);北京市科学技术研究院市级财政项目(编号:PXM2016_178304_000020);国家安全生产监督管理总局2015年安全生产重大事故防治关键技术科技项目(编号:Beijing-0003-2015AQ)

[作者简介]唐仕川(1963—),男,研究员,研究方向:职业安全与健康;E-mail: tsc3496@sina.com

[通信作者]唐仕川, E-mail: tsc3496@sina.com

[作者单位]1.北京市劳动保护科学研究所,职业安全健康北京市重点实验室,北京100054;2.华北科技学院研究生院,北京101601;3.浙江省医学科学院,职业病防治研究所,浙江杭州310013

随着纳米技术的发展与应用,纳米相关产品愈发贴近人们的日常生活。在1814种消费品中,所用纳米材料多达39种。其中,846种产品至少含有1种纳米材料,62种产品含有2种以上纳米材料。此外,671种产品使用到金属和金属氧化物纳米材料,89种产品涉及到炭黑、单(多)壁纳米碳管等碳系纳米材料^[1]。在纳米材料的研发、生产、使用过程中,人们面临着接触风险。纳米材料的收集和分选、称重和混合、研磨等岗位存在着纳米材料散逸的可能性,纳米材料合成装置的清洁和维护作业也存在着暴露风险^[2]。大量纳

米技术相关产业(纳米产业)的职业卫生学调查资料提示,机械研磨和气相合成法存在的暴露风险远大于化学蒸汽合成法;高压喷射法可使悬液状态下的纳米材料以气溶胶形式扩散至空气环境。不同生产工艺、处理与加工以及转运方式下的暴露水平监测数据有利于暴露水平预测模型的建立^[3]。即便如此,现阶段公认的纳米材料职业接触限值的缺失,仍会给纳米产业职业卫生防护措施提出带来挑战。在应对不确定性风险的情况下,风险预警防护原则具有相对优势。而化学品职业危害控制带(Control Banding, CB)技术可提高纳米产业职业危害风险管理的效益^[4-5],亟需在作业场所中加以实践并得以优化完善。为此,本文就CB技术在职业卫生应用领域中的核心理念与实践,在纳米产业中的发展趋势以及典型技术模型的应用近况等内容作一综述,为保障国内纳米产业的可持续发展提供指引。

1 CB技术在职业卫生领域的应用概述

1.1 CB技术在全球的发展

CB技术由英国的健康与安全委员会(Health and Safety Executive)奠基和扩展,并于1998年介绍了CB技术的基本框架模型,即控制措施取决于危害分级和暴露等级^[6]。其中,危害分级参考欧盟风险指数(Risk Phrases),而暴露等级考虑化学物质的用量、挥发性(液态物质)和(或)扬尘性(固态物质)。在新型化学物质日益增多且中小企业逐年增加的形势下,新型化学物质职业卫生接触限值的研制工作面临着巨大压力。国际劳工组织(International Labor Organization, ILO)认为,可先将化学物质按照危害程度进行分组,而后对进入不同分组的化学物质选择相应层次的控制对策,如执行良好的工业卫生操作管理,使用局部通风换气系统,增设密闭式作业空间,寻求职业卫生专家的详细建议^[7]。国际标准、物质的使用量及其挥发性和扬尘性是危害程度分类的重要参数。由于CB技术的相对便利性特点,全球陆续颁布了一系列基于该技术的职业卫生管理策略和方案。如ILO的International Chemical Control Toolkit,法国的Risk Potential Hierarchy,德国的Chemical Management Guide,荷兰的Stoffenmanager,挪威的KjemiRisk,比利时的Regetox and SOBANE,新加坡的Semi-Quantitative Risk Assessment,韩国的Control Toolkit,中国的工作场所职业病危害作业分级(生产性粉尘、化学物、高温)。

1.2 CB技术的实践应用

CB技术是一类针对作业场所所有毒有害物质进行定性和(或)半定量风险评价和管理的策略手段,其研制和实施过程涉及五个环节,即技术的形成,技术的应用,风险控制措施的落实执行与维护,风险管理后期的职业卫生状况评价,风险控制与管理中的失误分析^[8]。作业场所往往存在多种有毒有害物质,最为典型的是涂料生产车间。该类车间CB技术的形成与应用环节主要包括:①确定某一作业岗位所有的化学物质清单(如丙酮、乙苯、甲苯、二甲苯、丁酮),每个班次相应化学物质的质量百分比(纯度)及其用量。其中,化学物质清单和纯度可从原料供应商获取,用量可细分为少(<2.5L)、中(2.5~1000L)、多(1000L)3个等级;②查询所用化学物质的挥发性、沸点、风险指数及毒性危害。这些数据资料可从安全技术说明书(Material Safety Data Sheet, MSDS)获取;③根据CB技术模型获得各化学物质的暴露等级和危害分级,在考虑已有职业卫生防护措施条件下,综合提出控制措施^[9]。

CB技术提出的控制措施有利于促进作业场所职业卫生安全。一项针对20个作业岗位的控制措施建议对比分析结果显示,由CB技术建议的15个作业岗位控制措施与认证工业卫生师所提建议一致,也与职业卫生现状需求吻合;由CB技术建议的5个作业岗位控制措施过于保守或不能满足防护需求^[10]。在职业卫生防护措施改善的情况下,CB技术中的暴露等级应做相应修正。如局部通风设施改造提升至密闭式作业车间后,作业场所的暴露等级预测值可降至原先的1/10^[9]。然而,CB技术在使用过程中可能存在失误。就暴露等级评定而言,CB技术的不同使用者对同一作业场所的暴露情况相关参数的赋值可能存在差异。如在木材行业中,认为打磨与检测岗位的木尘暴露等级预测值为中等水平者的比例为76.9%(10/13),认为钻孔岗位的木尘暴露等级预测值为低水平者的比例为61.5%(8/13);在印刷行业中,认为成像油印刷岗位的石油和烃类物质暴露等级预测值为低水平者的比例为23%(3/13);在金属锻造业中,认为打磨岗位的金属粉尘暴露等级预测值为低水平者的比例为38.5%(5/13)^[11]。工种、场所通风、防护措施以及有毒有害物质扩散点是否处于呼吸带等参数都会影响暴露等级的判定结论^[11],提示在暴露等级决策时应对这些内容加以论证,最大程度降低CB技术在使

用过程中的失误。暴露等级决定着有毒有害物质所致机体危害产生的可能性,而危害严重性直接取决于有毒有害物质的毒作用特征。有毒有害物质的危害严重性和可能性决定了其危害程度。有学者归纳总结了石棉、铍、铅、矽尘等有毒有害物质的危害程度及其相应的职业卫生管理措施建议^[12],可供CB技术的实践者参考。CB技术在有毒有害物质危害管理中的实践与发展,为全球防治工作相关疾病、职业病、工伤提供了明确清晰的策略与方法^[13-15]。

2 CB技术在纳米产业职业危害管理中的探索

2008年,荷兰和美国学者率先将CB技术应用于纳米产业,并形成“CB Nanotool”模型^[16]。该模型沿用CB技术的基本框架,组建了基于相对暴露等级和相对危害严重性的矩阵,并对各矩阵点提出相应的职业卫生管理措施建议。相对危害严重性系数由13个参数指标决定,涉及表面化学特性、形态、粒径、溶解性、致癌性、生殖毒性、致突变性、皮肤毒性等8个与纳米材料物质自身相关的参数,还结合了由同种化学物质构成的微米级粉尘的职业卫生接触限值、致癌性、生殖毒性、致突变性、皮肤毒性等5个参数;相对暴露等级系数由5个参数指标决定,包括纳米材料的产量、扬尘性、工人人数、操作频率、操作时长。根据作业场所实际情况,参照“CB Nanotool”模型中的各参数赋值说明依次对参数赋值,计算风险等级并获取相应的职业卫生防护建议信息。在分析纳米多孔金属泡沫合成、火焰法纳米陶瓷生产、纳米碳管合成、二氧化铈制备/干燥、纳米陶瓷粉固结等5个作业岗位的职业卫生防护措施时,CB Nanotool提出的防护措施能满足实际职业卫生防护需求,可作为指导职业卫生安全工作的手段^[16]。

近年来,针对纳米产业的CB技术模型有所发展。荷兰的Stoffenmanager Nano源于Stoffenmanager CB技术,直接提供了20种纳米材料的相对危害等级,赋予不同生产方式、扬尘性、相对湿度(固态粉体)、相对黏度(液态物质)等参数的相应权重^[17]。Stoffenmanager Nano便于企业职业卫生管理部门掌握不同纳米材料的危害性以及材料合成方式的潜在职业卫生问题。在纳米材料危害性分析方面,法国学者设计了一套决策流程图,便于CB技术的使用者确定纳米材料的危害等级。同时,还对纳米材料可能存在的物理状态进行了定义,便于对不同物理状态下纳米

材料的散逸水平进行分析和判定^[18]。纳米材料职业性暴露危害风险管理是一个良性循环的模式,包括暴露控制、接触评定和危害评估3个环节。其中,危害评估的“CB Nanotool”模型,提供了基于危害风险防范的控制带思路,以达到减少接触机率或降低接触水平的暴露控制目标,而接触评定中的纳米材料职业接触限值或基准值是衡量控制措施恰当与否的判断依据^[19]。瑞士的Precautionary Matrix的总体思路是对作业场所的暴露控制和危害评估做出快速的初步判断。当得分超过一定数值时,则进行暴露控制的二次评估,排查潜在暴露高危风险点,采取相应的职业卫生防护对策^[20]。此外,Precautionary Matrix还可分析纳米产品消费者的纳米材料接触情况和纳米材料废弃物进入环境的风险^[20]。

尽管CB技术模型在应对纳米产业的职业危害风险方面有所进展,但不同模型的暴露等级和(或)危害分类及其依据尚存在差异,如Stoffenmanager Nano将纳米材料的危害等级分为A、B、C、D、E 5个等级^[17];而CB Nanotool的危害等级分为低、中、高、严重4个等级^[16]。Precautionary Matrix和CB Nanotool重点考察纳米材料的散逸程度,随后得出暴露等级;Stoffenmanager Nano在权衡纳米材料的散逸、扩散以及现有防护控制措施条件后决策暴露等级^[21]。此外,在应用CB技术相关模型(如Precautionary Matrix、CB Nanotool和Stoffenmanager Nano)时,由于纳米材料的MSDS的缺失,危害等级的识别仍需依靠专家判定^[22]。定量证据权重法为收集、分析、总结纳米材料危害性提供了新的思路^[23]。NanoRiskCat平台使企业主和政府管理部门能更为便捷地对消费品中涉及的纳米材料危害及其暴露情况进行识别评估和信息沟通^[24]。CB技术在工程纳米材料职业风险管理中的使用标准(International Organization for Standardization, ISO/TS 12901-2: 2014)为提高纳米产业职业卫生领域的CB技术模型的规范化和统一性提供实践指南。

3 CB技术模型在纳米产业中的应用现状

CB Nanotool是应用相对广泛的一种CB技术模型。CB Nanotool已对27种作业条件下的碳系、金属和其他种类纳米材料的防护措施建议进行了分析。其中,CB Nanotool认为有必要对量子点、氧化铁、金、硫化铅纳米材料的合成与加工车间增设排风罩或局部通风设施;在碳管、金、铜、铝、镍、银等纳米材料

进行样本表征或检验前的样本准备时,工人需提高安全防护意识,配置必要的防护设施;在废液处置或检测区域,企业应意识到一般通风不足以保护工人的健康安全^[25]。

Stoffenmanager Nano对25 nm的铁粉包装车间分析数据显示,当车间设有局部通风设施,但操作未在橱柜中进行且无个体防护用具的情况下,每日工作0.5~2.0h,每周工作4~5d的作业者的暴露等级为3级(最高等级为4级)^[17]。此暴露等级并非由仪器检测所得,且铁粉扬尘性估算过于保守,这可能会导致防护措施决策过于谨慎。由于用于接触评定的定量检测数据不足,CB技术模型不能精准地反映纳米产业作业场所的职业卫生状况,也就不能客观地衡量控制措施的稳健性^[26]。在定量检测数据缺失的情况下,蒙特卡罗模拟或可辅助CB技术模型对作业场所的暴露监测数据做出预测,并有利于提高控制措施的可靠性^[27]。另外,扬尘性是影响粉尘扩散至环境介质的重要因素,一定程度上反映了粉体与作业者的接触可能性,可弥补定量检测数据缺失的不足。已有实验给出了纳米镍、钴、锰、银、碳管等粉体在不同湿度下的扬尘性^[28]。这些数据可为CB技术模型中的参数提供参考值。结合纳米氧化铁在生态环境的持久性和稳定性以及生态毒性等数据的条件下,Precautionary Matrix认为部分改性纳米氧化铁材料仅需采取相对低级别的防护措施^[29]。

除提供职业卫生安全防护措施建议外,CB技术模型在纳米材料接触人群的生物效应指标探索方面具有现实意义。CB Nanotool曾将13家纳米材料生产企业的458名工人划分为4个等级的相对风险水平,随后分析不同风险水平下个体间呼出气体成分的差异^[30]。这些CB技术模型的实践将会进一步完善模型参数及其赋值,探寻同类生产方式下的暴露等级或同种物质的危害分级,探讨不同风险等级下机体生物效应指标的变化特征。

至今,CB技术已有近20年的历史,表现出了便捷性和普及性优点,在促进全球中小企业职业卫生管理工作方面具有积极意义。CB技术模型在纳米产业职业危害风险管理中的发展也有9年历程。尽管以CB技术为关键词的文献资料数已达230余篇,但在纳米产业中的应用案例为数不多。今后,仍需对CB技术模型加以完善与优化,特别是针对纳米产业暴露等级和危害分级的参数。此外,还应丰富CB技术模型的培

训与实践,按照不同生产方式制定各类特征性的CB技术模型操作指南及其在纳米产业中的风险管理手册。CB Nanotool、Precautionary Matrix和Stoffenmanager Nano等CB技术模型在更多纳米技术企业中的实践不仅可为职业卫生管理提供依据,还可指导职业健康监护工作。

参考文献

- [1] Vance ME, Kuiken T, Vejerano EP, et al. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory [J]. *Beilstein J Nanotechnol*, 2015, 6: 1769-1780.
- [2] Ding Y, Kuhlbusch TA, Van Tongeren M, et al. Airborne engineered nanomaterials in the workplace—a review of release and worker exposure during nanomaterial production and handling processes [J]. *J Hazard Mater*, 2017, 322: 17-28.
- [3] Kuijpers E, Bekker C, Brouwer D, et al. Understanding workers' exposure: Systematic review and data-analysis of emission potential for NOAA [J]. *J Occup Environ Hyg*, 2017, 14(5): 349-359.
- [4] Maynard AD. Nanotechnology: the next big thing, or much ado about nothing? [J]. *Ann Occup Hyg*, 2007, 51(1): 1-12.
- [5] Eastlake A, Zumwalde R, Geraci C. Can control banding be useful for the safe handling of nanomaterials? A systematic review [J]. *J Nanopart Res*, 2016, 18: 169.
- [6] Zalk DM, Nelson DI. History and evolution of control banding: a review [J]. *J Occup Environ Hyg*, 2008, 5(5): 330-346.
- [7] Alli BO. *Fundamental principles of occupational health and safety* [M]. Geneva: OIT, 2001, 140.
- [8] Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. *Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: control banding (CB); a literature review and critical analysis* [R]. Washington DC: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2009.
- [9] Lee EG, Slaven J, Bowen RB, et al. Evaluation of the COSHH essentials model with a mixture of organic chemicals at a medium-sized paint producer [J]. *Ann Occup Hyg*, 2011, 55(1): 16-29.

- [10] Bracker AL, Morse TF, Simcox NJ. Training health and safety committees to use control banding: lessons learned and opportunities for the United States[J]. J Occup Environ Hyg, 2009, 6(5): 307-314.
- [11] Landberg HE, Berg P, Andersson L, et al. Comparison and evaluation of multiple users' usage of the exposure and risk tool: stoffenmanager 5.1[J]. Ann Occup Hyg, 2015, 59(7): 821-835.
- [12] Zalk DM, Kamerzell R, Paik S, et al. Risk level based management system: a control banding model for occupational health and safety risk management in a highly regulated environment[J]. Ind Health, 2010, 48(1): 18-28.
- [13] Won YL, Ko Y, He KH, et al. Banding the world together; the global growth of control banding and qualitative occupational risk management[J]. Saf Health Work, 2011, 2(4): 375-379.
- [14] 张敏, 李涛, 缪剑影, 等. 国内外化学品职业危害分类控制技术研究进展[J]. 工业卫生与职业病, 2008, 34(1): 59-63.
- [15] 何永华, 周志俊, 金泰虞. 职业危害管理工具箱[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2007, 25(3): 182-183.
- [16] Paik SY, Zalk DM, Swuste P. Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures[J]. Ann Occup Hyg, 2008, 52(6): 419-428.
- [17] Van Duuren-Stuurman B, Vink SR, Verbist KJ, et al. Stoffenmanager Nano version 1.0: a web-based tool for risk prioritization of airborne manufactured Nano objects[J]. Ann Occup Hyg, 2012, 56(5): 525-541.
- [18] Claude O, Michael R, Jérôme T, et al. Development of a specific control banding tool for nanomaterials: report[R]. Maisons-Alfort: SERVAL, 2010.
- [19] Juric A, Meldrum R, Liberda EN. Achieving control of occupational exposures to engineered nanomaterials[J]. J Occup Environ Hyg, 2015, 12(8): 501-508.
- [20] Höck J, Epprecht T, Hofmann H, et al. Guidelines on the precautionary matrix for synthetic nanomaterials Version 2.0 [M]. Berne: Federal Office of Public Health FOPH, Federal Office for the Environment FOEN, 2010.
- [21] Brouwer DH. Control banding approaches for nanomaterials [J]. Ann Occup Hyg, 2012, 56(5): 506-514.
- [22] Sánchez Jiménez A, Varet J, Poland C, et al. A comparison of control banding tools for nanomaterials[J]. J Occup Environ Hyg, 2016, 13(12): 936-949.
- [23] Hristozov DR, Zabeo A, Foran C, et al. A weight of evidence approach for hazard screening of engineered nanomaterials[J]. Nanotoxicology, 2014, 8(1): 72-87.
- [24] Hansen SF, Jensen KA, Baun A. NanoRiskCat: a conceptual tool for categorization and communication of exposure potentials and hazards of nanomaterials in consumer products [J]. J Nanopart Res, 2014, 16(1): 2195.
- [25] Zalk DM, Paik SY, Swuste P. Evaluating the control banding nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures[J]. J Nanopart Res, 2009, 11(7): 1685-1704.
- [26] Gordon SC, Butala JH, Carter JM, et al. Workshop report: Strategies for setting occupational exposure limits for engineered nanomaterials[J]. Regul Toxicol Pharmacol, 2014, 68(3): 305-311.
- [27] Erbis S, Ok Z, Isaacs JA, et al. Review of research trends and methods in nano environmental, health, and safety risk analysis[J]. Risk Anal, 2016, 36(8): 1644-1665.
- [28] Evans DE, Turkevich LA, Roettgers CT, et al. Dustiness of fine and nanoscale powders[J]. Ann Occup Hyg, 2013, 57(2): 261-277.
- [29] Filser J, Arndt D, Baumann J, et al. Intrinsically green iron oxide nanoparticles? From synthesis via (eco-)toxicology to scenario modelling[J]. Nanoscale, 2013, 5(3): 1034-1046.
- [30] Wu WT, Liao HY, Chung YT, et al. Effect of nanoparticles exposure on fractional exhaled nitric oxide (FENO) in workers exposed to nanomaterials[J]. Int J Mol Sci, 2014, 15(1): 878-894.

(收稿日期: 2016-11-25; 录用日期: 2017-03-29)
(英文编辑: 汪源; 编辑: 洪琪, 丁瑾瑜; 校对: 葛宏妍)