

强烈塑性变形表面纳米化的研究现状

欧信兵¹, 张津^{1,2}

(1. 重庆工学院材料学院, 重庆 400050; 2. 北京科技大学材料学院, 北京 100083)

[摘要] 强烈塑性变形表面纳米化 (SPD-SNC) 技术是近几年才开始备受人们广泛关注的新技术, 它不仅为研究形变诱发的纳米化过程和宽尺寸范围内 (从微米到纳米量级) 结构与性能的关系提供思路, 制备理想样品; 而且将纳米材料的优异性能应用于改造传统工程材料, 显著地提高金属材料的性能, 可望在工业上获得实际应用。从 SPD-SNC 的方法、机理、组织结构和性能等方面总结了该技术近年来取得的进展和存在的问题, 指出了今后的研究发展方向。

[关键词] 强烈塑性变形; 表面纳米化; 方法; 组织性能;

[中图分类号] TG179

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)03-0060-05

Research Progress in Surface Nanocrystallization Induced by Severe Plastic Deformation

OU Xin-bing¹, ZHANG Jin^{1,2}

(1. College of Materials Science & Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing, 400050, China;
2. Beijing College of Materials Science & Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

[Abstract] As a newly developing technology, surface nanocrystallization (SNC) induced by severe plastic deformation (SPD) has been spotlighted in recent years. The SNC technique can not only prepare ideal samples for the investigation of deformation-induced grain refinement process and the structure-property relationship in a wide region from nanometers to micrometers, but also apply excellent traits of nanocrystalline materials in metals to significantly enhance the properties of the metallic materials, therefore it is expected to achieve practical application in industry. The SNC technique (including the SNC principle, synthesizing methods, structure, property) will be presented and the problems and investigation prospects are generalized finally.

[Key words] Severe Plastic Deformation (SPD); Surface Nanocrystallization (SNC); Methods; Structure and property

0 引言

与常规粗晶材料相比, 纳米材料表现出独特和更优越的性能。现在, 在实验室里人们已经可以通过不同的方法制备出纳米材料, 但是, 由于一些因素的制约, 纳米材料还不能够工业化的大批量生产和在现实生活中被普遍应用^[1]。

与制备块体纳米材料不同, 近年来备受人们关注的表面纳米化 (Surface Nanocrystallization, SNC) 技术只是在材料的表面制备一定厚度的纳米晶结构层, 因为在服役时, 材料的破坏和失

效一般始于表面, 如磨损、疲劳断裂等, 因而提高材料的表面性能就可以延长材料的服役寿命。强烈塑性变形, 亦称为深度塑性变形或大塑性变形 (Severe Plastic Deformation, SPD) 是一种产生表面纳米化的新方法, 其实质是通过外加载荷在材料表面产生大量应变和高应变率致使材料表面的晶粒尺寸细化, 直至纳米量级^[2]。与其他纳米化技术相比, 这种通过强烈塑性变形诱发表面纳米化 (SPD-SNC) 的技术具有许多优点^[2], 如纳米层与基体不会脱落分离; 实用性强, 对设备和材料的要求都较低等。

目前, 人们已经通过这种 SPD 方式在一些工程金属材料上实现了表面纳米化, 并且通过实验证明了 SPD-SNC 可以显著改善材料表面和整体的性能。本文从 SPD-SNC 的实验方法、机理和它对材料组织结构和性能的影响等方面总结 SPD-SNC 技术近年来取得的进展, 并指出了 SPD-SNC 存在的问题和今后的发展方向。

[收稿日期] 2008-02-20

[基金项目] 国家教育部 (207095); 重庆市教委项目 (KJ070617)

[作者简介] 欧信兵 (1984-), 男, 福建霞浦人, 硕士, 研究方向为表面工程。

1 SPD-SNC 方法

强烈塑性变形是一种细化金属材料晶粒的方式,过去它被用于制备超细晶和纳米晶块体材料,如等通道角挤压法(Equal Channel Angular Pressing, ECAP)、累积轧合法(Accumulative Roll Bonding, ARB)、高压扭转法(High Pressure and Torsion, HPT)等^[3]。这些方法均是将材料整体或块体局部强烈塑性变形而获得超细晶块体材料的方法。而 SPD-SNC 却是通过材料表面的强烈变形,在表面有限薄层内产生超细晶或纳米晶的方法。其实质是在一般喷丸基础上利用高能弹丸(粒子)高速撞击材料表面,根据弹丸的多少、产生高速弹丸的能量、弹丸的运动模式不同分别有以下几种工艺方法。

将强烈塑性变形应用于材料表面纳米化首先是由卢柯和吕坚等于 1999 年提出的^[4],并发展为表面机械研磨处理(Surface Mechanical Attrition Treatment, SMAT)^[5-6]。与传统强烈塑性变形制备块体超细晶或纳米晶方法不同,SMAT 是通过高频或超音频的振动来使装在容器内的弹丸高速运动,而不是传统的高速气流带动弹丸的方式,使许多高速运动的弹丸反复、多方向地撞击材料的表面,致使材料表面产生大量的高速率的应变^[5],该方法最先在钢铁材料上实现了表面纳米化^[7],并且逐渐扩展到有色金属合金等常用工程材料上,随后国内外其他研究人员相继开始研究表面纳米化的设备、工艺和表面纳米化对材料性能的影响。

继 SMAT 之后,通过改进弹丸直径和振动频率等实验工艺参数,产生了相似的超声喷丸(Ultrasonic Shot Peening, USSP)^[8-9]和高能喷丸(High-Energy Shot Peening, HESP)^[10]。这三种方法可使用同一个仪器设备,只是 USSP 仪器的振动频率达到几千赫兹量级,远远大于 SMAT 和 HESP 几十赫兹的振动频率,而 USSP 的弹丸直径则比另外 2 种小 2 倍左右。HESP 与 SMAT 基本相似。与这些方法相似的,还有美国 K. Dai 等^[11]报道的表面纳米化和硬化(Surface Nanocrystallization and Hardening, SNH)方法,它也是通过容器高频振动的方式带动其中的弹丸高速撞击材料表面,不同的是所使用的弹丸数量只有 5 个,称为五丸法。

通过弹丸轰击的方式使材料表面纳米化的方法还有与传统喷丸工艺极其相似的喷丸法(Shot Peening, SP)^[12-16]和超音速颗粒轰击法(Supersonic Fine Particles Bombardment, SFPB)^[17]。前者所用的设备一般与喷丸工艺的相同,但增大了喷丸时的空气压力和减小弹丸直径等协调喷丸工艺参数使材料表面纳米化;后者使用气压驱动弹丸的方式实现材料表面纳米化。日本学者 M. Umemoto 等发明的 Ball Drop (BD)^[18-19]和 Particle Impact (PI)^[19],使用弹丸或粒子撞击的方式,其特点是试验中只使用 1 个弹丸,弹丸的能量通过 2 种不同的方式获得,第一种是将弹丸镶嵌在 1 个圆柱形重物的底部,然后使重物从高处落下撞击材料表面;另一种方式是特制的氦气枪射击的方式,使粒子不断撞击材料表面,称为单球法。

除了传统的弹丸变形方式外,日本学者 Masahide Sato 等^[20]提出了丝刷法(wire-brush, WB),它通过不锈钢丝刷研磨材料表面,通过刷子的高速旋转和施加一定的压力使材料表面

逐渐变形。此外,我国王东坡等人^[21]使用的超声表面加工处理方法(Ultrasonic Surface Processing, USP)和乌克兰学者 Bohdan N 等^[22-23]使用的 Ultrasonic Impact Peening (UIP) 技术都采用了一个或多个圆柱状的压头,在超声速的振动频率下反复撞击试样表面,压头在撞击材料表面的同时可以旋转或压头不旋转而工件旋转。这里将它们称为压头振动法。

从上面的分析中可以看出,目前 SPD-SNC 研究应用最多的变形方式是高速弹丸撞击的方式,其中又以 SMAT、USSP、HESP 和 SP 等方法使用最普遍。表 1 列出了这些 SPD-SNC 方法的原理和示意图。

2 表面组织结构与机理

虽然 SPD-SNC 的实现方式有多种,但是它们的实质都是在材料表面引入大量的高速率的应变,因而这些方法使材料表面组织结构的变化十分相似:生成了表面纳米晶、晶粒尺寸随距离表面的深度增加而不断增大的梯度结构。具体说来,根据表面的晶粒尺寸和应变的大小可以将表面纳米化的表面组织结构分为 4 个层次:表面纳米晶层、表面细晶层、粗晶应变层和基体无应变层,如图 1 所示^[5]。各层的厚度随工艺参数的变化而变化,从大多数文献研究结果来看,表面纳米晶层的厚度一般在 10 ~ 20 μm 左右,但根据工艺参数不同,可以达到 50 μm ^[24]。细晶层一般 200 μm 左右,而粗晶应变层可以达到 600 μm 。透射电子显微镜的观察结果表明:纳米晶是呈等轴状的,取向随机。表面细晶层的晶粒尺寸在 100 ~ 1000 μm 之间,在这一层中可以观察到大量塑性变形所产生的位错、位错墙、小角晶界和变形孪晶等。粗晶应变层和基体无应变层的区别在于是否发生应变和加工硬化现象,它们之间的晶粒尺寸差别不大,粗晶应变层的组织结构与传统的应变组织相似。从表面纳米晶层到粗晶应变层都属于变形层,变形层的厚度与实验的工艺参数有关,一般说来,在开始阶段随实验时间的延长而增加;而在实验的后期变形层的厚度随时间的变化很小。变形层的厚度还与强烈塑性变形的强度有关,一般随着强度的增加而增加^[25]。

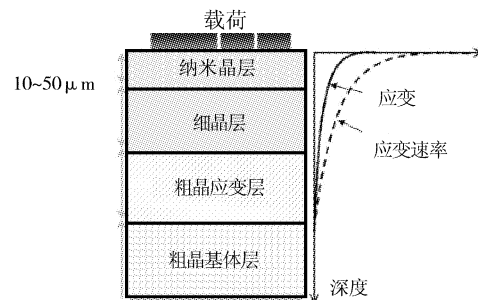


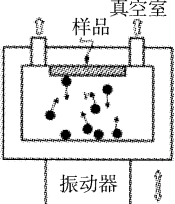
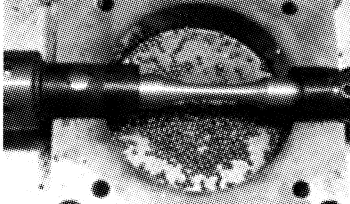
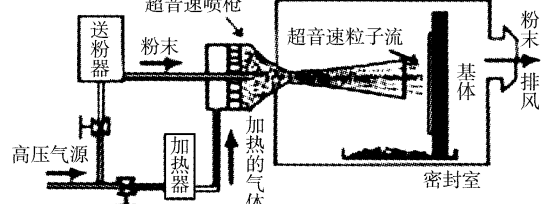
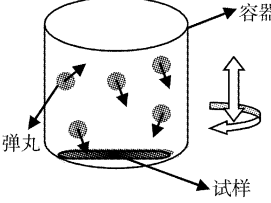
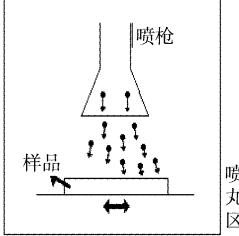
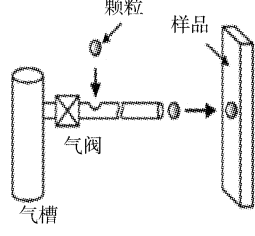
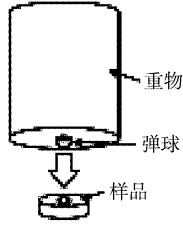
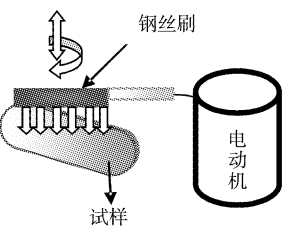
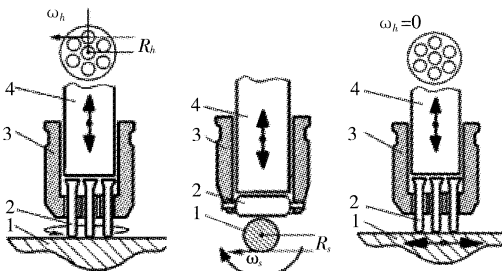
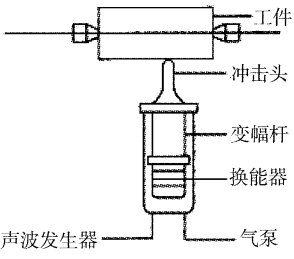
图 1 SPD-SNC 表面组织结构和应变及其速率沿厚度变化示意图^[5]

Figure 1 Schematic illustration of microstructure characteristics and distributions of strain and strain rate along depth in the surface layer subjected to the SPD-SNC

从图 1 可以知道,在材料的表面塑性变形量和变形速率都是最大的,随着厚度的增加,变形量和变形速率都逐渐减小,因而出现了晶粒尺寸沿厚度方向逐渐增大的梯度结构。表面纳米

表1 SPD-SNC 实验方法简介

Table 1 A brief introduction to experimental methods of SPD-SNC

方 法	表面机械研磨处理法 ^[5-6]	超声喷丸法 ^[8-9]	高能喷丸法 ^[10]	超音速颗粒轰击法 ^[7]	
示意图					
实验原理	在1个柱状的容器内放置一些弹丸,通过容器的上下高频振动带动弹丸从不同方向反复撞击容器内的材料表面,致使表面发生强烈塑性变形。三者间的差别在于振动的频率和弹丸尺寸的大小,实验相同的实验设备。			使用自制的设备,通过特殊结构设计的喷枪形成携带硬质颗粒的超音速双相流轰击样品表面,与传统喷丸工艺相似。	
方 法	五丸法 ^[1]	普通喷丸法 ^[12]	单球法	落球法 ^[18]	颗粒撞击法 ^[19]
示意图					
实验原理	在1个柱状的容器内放置5个(WC/Co)球体,通过容器的三维立体式高频振动带动球体从不同方向反复撞击容器内的材料表面。	通过改造传统喷丸等工艺使材料表面产生强烈塑性变形而发生纳米化。		通过重物从高处下落,使粘结在重物底部的球体反复撞击材料表面,或通过高压气的气枪射出颗粒反复撞击材料表面,两者的特点是实验中只使用一个弹丸。	
方 法	丝刷摩擦法 ^[20]	超声撞击法 ^[22-23]	压头振动法	表面超声处理法 ^[21]	
示意图					
实验原理	用不锈钢丝刷研磨材料表面,丝直径和长度分别为0.3、14mm,总共有2500根。	1. 样品 2. 压头 3. 机身 4. 超声器 ω_h ——机身转速 ω_s ——样品转速 R_h ——机身孔半径 R_s ——研磨球半径	1个或多个圆柱状的压头在超声速的振动频率下反复撞击试样表面,可以选择压头旋转或工件旋转方式。		

晶尺寸随着实验时间的延长会达到一个稳定值,最小的纳米晶尺寸在10~30nm之间;但是实验时间的增加可以使纳米晶层的厚度增加。SPD-SNC一般不会使材料的表面成分发生改变,然而表面可能存在由弹丸材料引入的杂质原子,而且这种可能性和杂质的含量随着实验时间的延长而增大增多^[24]。奥氏体不锈钢如AISI304不锈钢^[26]在纳米化过程中表面会发生马氏体相转变。

SPD-SNC的实质是由于大量塑性变形使大尺寸晶粒“破碎”,形成细小晶粒直至纳米晶的过程。这种“破碎”不像普通玻璃在压力的作用下立即脆性分裂的过程,而是在位错、孪晶等不同的基本变形方式下逐渐在大尺寸晶粒内引入小角晶界,小角晶界发展成大角晶界,从而细化成小晶粒,如此反复的过程。决定材料的基本变形方式的是材料的层错能和晶体结构,由于这两者的差异,不同种类的材料晶粒细化的具体过程是各异

的^[2,5]。例如,同样具有高层错能的纯铁和纯钛,由于具有的晶体结构不同,在晶粒细化过程中纯铁基本上都以位错滑移的方式进行,而纯钛在开始时是先通过机械孪生的变形方式,当温度增大时再以位错滑移的方式参与晶粒细化过程。与此相似,具有相同晶体结构的铝合金和 304 不锈钢,由于层错能相差较大,致使它们晶粒细化的变形方式完全不同。

3 材料性能的变化

材料的结构决定其性能,SPD-SNC 不仅改变了材料表层的晶粒尺寸等显微组织,而且还使材料表面粗糙度,表面内应力等发生变化,不仅显著增强了材料的表面力学性能如硬度,摩擦磨损等;而且还提高材料的整体力学性能如抗拉强度、疲劳强度等^[2,5,27],这是表面纳米化所追求得到的。另一方面,因表面结构晶粒尺寸的改变、应力的增加会极大地影响其耐腐蚀性,这方面的研究还不够深入和不全面。

其实材料本身是否能生成钝化膜、钝化膜与基体的结合力、形成钝化膜的钝化元素在材料表面的分布以及材料表面的残余压应力等其他因素也会对材料的耐蚀性产生显著的影响。

首先,对于那些表面没有钝化膜防护的活泼金属如低碳钢^[28],其耐蚀性主要受晶粒尺寸的影响。由于晶粒尺寸越小,晶界体积分数越高,而处于晶界处的原子能量往往高于晶内原子,反应活性较强,因此一般认为材料晶粒细化后,参与腐蚀反应的活性原子数增加,腐蚀速度加强。

其次,对于那些表面有钝化膜防护的钝性金属材料,其耐蚀性不仅仅与材料表面的晶粒尺寸有关,还与材料表面钝化膜与基体的结合力、形成钝化膜的钝化元素在材料表面的分布以及材料表面的残余压应力等其他因素有关,因此在研究时要综合考虑。SPD-SNC 不仅使材料表面生成纳米晶结构,还会使材料表面的粗糙度发生变化,引入大量的残余压应力和位错等缺陷。如果在表面纳米化后进行低温的退火处理^[13],在不影响材料表面晶粒尺寸的情况下,大大消除材料表面的残余压应力和位错等缺陷,可以使材料表面生成的钝化膜与基体的结合力增加,钝化膜形成元素分布均匀,而同时纳米晶的高晶界体积分数也使钝化膜的再生能力增强,因此提高材料的耐腐蚀性;镍基合金耐腐蚀动电位循环极化曲线测试实验也得到了与上面相同的结果^[16]。对于同样的不锈钢材料,在无低温退火处理的条件下,发现表面纳米化样品的耐蚀性下降^[29-30],出现严重的均匀腐蚀,且腐蚀坑大而深。

此外,材料表面纳米化可使抗应力腐蚀的性能增强^[18,30-31],这是因为晶粒尺寸细小,晶界体积分数高,表面存在残余压应力等恰好是抗应力腐蚀性能提高的有利因素,表面晶粒细小,不易萌生裂纹;且晶粒晶界体积分数大,可以阻碍裂纹扩展,而材料中存在残余压应力时相当于减小了外加应力。从上面的分析可以看出,材料的耐腐蚀性能的影响因素较多,不能简单只考虑材料表面晶粒尺寸的影响。

4 存在的问题与发展方向

通过上面对强烈塑性表面纳米化的实验方法、表面组织和

机理、表面纳米化对性能的影响等方面总结分析可见,强烈塑性变形表面纳米化还处于初期的研究阶段,离工业化实用还有一段距离,但是也可以看出表面纳米化具有巨大的发展潜力。从目前已有的结果来看,SPD-SNC 存在的问题和急需解决的问题有以下几方面^[5,27]:

- 1) 扩大 SPD-SNC 应用材料的范围;深入进行 SPD-SNC 工艺参数与其组织和性能的相关性研究。
- 2) 深入研究不同晶系金属和多相材料的表面纳米化形成机理,并与计算机模拟相结合。
- 3) 深入开展 SPD-SNC 对材料耐蚀性及电化学特性的影响规律研究。
- 4) 表面纳米层结构稳定性的研究。
- 5) 研发满足不同工业化需求的表面纳米化的实用化设备。

利用 SPD-SNC 提高金属材料表面的强度、硬度、疲劳和磨损等力学性能,改善工程材料的整体性能和使用寿命是今后的主要方向,具体应用可将表面纳米化处理与化学热处理相结合,降低化学处理的成本,使精密零部件能够经过变形小或无变形的低温化学热处理而获得高性能和多功能;将 SPD-SNC 处理与其它表面工艺(喷涂、电镀和沉积等)相结合,有望提高表层的致密性、与基体的结合力等各方面性能;将表面纳米化处理与化学处理相结合,在材料表面制备高性能的复合表层,可望为利用常规工程金属材料取代昂贵材料提供一条新途径。

由于强烈塑性变形表面纳米化技术简单、处理成本低,对用途广、用量大的各种常规金属材料均有普适性,它能有效地实现材料结构功能一体化设计,为传统工程金属材料赋予高性能和多功能,因此有着广阔的市场开发空间。

[参 考 文 献]

- [1] Tjong S C, Chen Haydn. Nanocrystalline materials and coatings [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, R 45:1-88
- [2] 刘刚,周蕾. 工程金属材料的表面纳米化技术(1)[J]. *纳米科技*, 2006,3(1):56-60
- [3] 陈彬,林栋棵,曾小勤,等. 深度塑性变形法的研究现状和前景[J]. *材料导报*, 2006,20(9):73-76
- [4] Lu K, Lu J. Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials: presentation of the concept behind a new approach [J]. *Materials Science and Technology*, 1999, 15: 193-197
- [5] Lu K, Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 375-377: 38-45
- [6] Roland T, Retraint D, Lu K, et al. Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54:1949-1954
- [7] 卢柯,吕坚. 一种金属材料表面纳米层的制备方法[P]. 中国专利:99122670.4, 1999-12-24
- [8] Tao N R, Sui M L, Lu J. Surface nanocrystallization of iron Induced by ultrasonic shot peening [J]. *NanoStructured Materials*, 1999, 11(4): 433-440
- [9] Wu X, Tao N, Hong Y. Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of Al-alloy subjected to USSP

- [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50:2075-2084
- [10] Liu G, Wang S C, Lou X F, et al. Low carbon steel with nanostructured surface layer induced by high-energy shot peening [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 44:1791-1795
- [11] Dai K, Villegas J, Stone Z, et al. Finite element modeling of the surface roughness of 5052 Al alloy subjected to a surface severe plastic deformation process [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52:5771-5782
- [12] Wang X Y, Li D Y. Mechanical and electrochemical behavior of nanocrystalline surface of 304 stainless steel [J]. *Electrochimica Acta*, 2002, 47: 3939-3947
- [13] 赵新奇, 徐政, 张俊宝, 等. 40Cr 钢表面纳米层的微观结构 [J]. *材料科学与工程学报*, 2003, 21(5): 706-710
- [14] Wang Tiansheng, Yu Jinku, Dong Bingfeng. Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200: 4777-4781
- [15] Raja K S, Namjoshi S A, Misra M. Improved corrosion resistance of Ni-22Cr-13Mo-4W alloy by surface nanocrystallization [J]. *Materials Letters*, 2005, 59: 570-574
- [16] 邱诗龙, 任瑞铭, 王生武. 高能喷丸表面纳米化对工业纯钛疲劳性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2005, 30:282-285
- [17] 熊天英, 王吉孝, 金花子, 等. 0Cr18Ni9Ti 钢焊接接头表面纳米化及接头抗 H₂S 应力腐蚀性能的研究 [J]. *材料保护*, 2005, 38(1):13-16
- [18] Umemoto M, Huang B, Tsuchiya K, et al. Formation of nanocrystalline structure in steels by ball drop test [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46: 383-388
- [19] Umemoto M, Todaka K, Tsuchiya K. Formation of nanocrystalline structure in carbon steels by ball drop and particle impact techniques [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 375-377:899-904
- [20] Masahide Satoa, Nobuhiro Tsujib, Yoritoshi Minaminob, et al. Formation of nanocrystalline surface layers in various metallic materials by near surface severe plastic deformation [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2004, 5: 145-152
- [21] 王东坡, 宋宁霞, 王婷, 等. 纳米化处理超声金属表面 [J]. *天津大学学报*, 2007, 40(2):228-233
- [22] Bohdan N Mordiyuk, Georgiy I Prokopenko. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 308: 855-866
- [23] Mordiyuk B N, Prokopenko G I. Fatigue life improvement of a-titanium by novel ultrasonically assisted technique [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 437: 396-405
- [24] Tian J W, Villegas J Z, Yuana W, et al. A study of the effect of nanostructured surface layers on the fatigue behaviors of a C-2000 superalloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 468-470:164-170
- [25] Villegas Juan C, Dai Kun, Leon L, et al. Nanocrystallization of a nickel alloy subjected to surface severe plastic deformation [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 410-411:257-260
- [26] Zhang H W, Hei Z K, Liu G, et al. Formation of nanostructured surface layer on AISI 304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51:1871-1881
- [27] 刘刚, 周蕾. 工程金属材料的表面纳米化技术(2) [J]. *纳米科技*, 2006, 4(2):51-56
- [28] 李瑛, 王福会. 表面纳米化对金属材料电化学腐蚀行为的影响 [J]. *腐蚀与防护*, 2003, 24(1):6-8, 12
- [29] 吕爱强, 张洋, 刘春明, 等. 表面纳米化 316L 不锈钢在酸性介质中腐蚀性能的研究 [J]. *材料与冶金学报*, 2004, 3(2):129-132
- [30] 石继红, 武保林, 刘刚. 316L 不锈钢表面纳米化后腐蚀性能研究 [J]. *材料工程*, 2005, 10: 42-46
- [31] 王志平, 王吉孝, 纪朝辉, 等. 表面纳米化 0Cr18Ni9Ti 焊接接头抗应力腐蚀性能 [J]. *焊接学报*, 2007, 28(1):5-8

(上接第 35 页)

[参 考 文 献]

- [1] 张德生. 冶金设备用传热铜材料及表面强化技术 [J]. *山东冶金*, 2002, 16(10):35-37
- [2] 赵必能. 铜的表面硬化技术 [J]. *国外金属热处理*, 1993, 14(6): 48-50
- [3] 石子源, 丁志敏. 纯铜的表面弥散硬化及其性能 [J]. *大连铁道学院学报*, 1998, 19(1):30-32
- [4] 张运, 武建军. 铜铝合金的内氧化 [J]. *材料科学与工艺*, 1999, 7(2):91-94
- [5] 周国洪, 李华伦, 胡锐. 铜铝合金的氧化分析 [J]. *西北工业大学学报*, 2002, 20(2):176-178
- [6] 王武孝. 影响内氧化生成 Al₂O₃/Cu 表面复合层厚度及组织的因素 [J]. *复合材料学报*, 2001, 18(3):56-59
- [7] 万怡灶, 王玉林. Al₂O₃/Cu 合金复合材料的磨损特性研究 [J]. *材料工程*, 1997, 20(11):6-11

(上接第 51 页)

- [3] 吕正茂, 李成明, 吕反修. 金刚石复合镀层的研究现状 [J]. *表面技术*, 2003, 32(6):1-3, 10
- [4] 郭忠诚. 电沉积多功能复合材料的研究现状与展望 [J]. *云南冶金*, 2002, 31(3):128-137
- [5] 周海飞, 魏洪侠, 王俊. 铸铝表面制备环保型 Ni-P-金刚石化学复合镀层 [J]. *表面技术*, 2007, 36(5):50-52
- [6] 黄高山, 陶莉. 酸性化学镀镍-磷工艺研究 [J]. *电镀与涂饰*, 2001, 20(2):15-18
- [7] 谢华, 钱匡武, 陈文哲. Ni-P-金刚石化学复合镀层的耐磨性 [J]. *机械工程材料*, 2002, 26(10):19-23
- [8] 廖强, 杜楠, 赵晴, 等. 化学复合镀镍-磷-金刚石工艺及性能的研究 [J]. *材料工程*, 2006, 增 1:334-337
- [9] 张信义, 邓宗钢. 热处理对 Ni-P-金刚石复合镀层的结构及性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 1996, 3:32-33