



山东建筑大学

本科毕业论文

题 目： 表面多重旋转碾压处理对

45 钢组织和性能的影响

院（部）： 材料科学与工程学院

专 业： 材料成型及控制工程

班 级： 成型 072

姓 名： 梁梁

学 号： 2007101199

指导教师： 李阳 孙德明

完成日期： 2011 年 5 月 30 日

摘 要

本文详细阐述了利用表面多重旋转碾压设备处理 45 钢实验板材，使其表面晶粒达到纳米级别的详细过程。论文探讨了在相同转速、压强，不同加工时间下表面多重旋转碾压实验对材料表面晶粒细化的影响程度，并用金相显微镜、显微维氏硬度仪、X 射线衍射仪等分析检验试样组织和性能的改变。在相同的转速 1800r/min 和相同的压强 0.4Mpa 的条件下，随加工时间的增加，45 钢实验板材表面晶粒细化程度逐渐增强，通过金相组织的观测，当达到最长加工时间 60min 时，板材表面晶粒细化程度达到最大化。此时，表面多重旋转碾压使试样的表层显微硬度明显增加，表层的显微硬度较未加工板提高了约 74.1%，达到 343.8HV，经 X 射线衍射检测和计算测得表面的平均晶粒尺寸约为 37.5nm，达到了表面纳米化的目的。实验结果表明：通过表面多重碾压加工处理，45 钢可以实现表面纳米化。

关键词：表面多重旋转碾压；45 钢；表面纳米化；平均晶粒尺寸；显微硬度

ABSTRACT

This text introduced to make use of surface to weigh to revolve Nian to press an equipments processing to try kind more and made crystal grain of its surface attain a Na rice Class of detailed process. The thesis inquired into in the homology and turn soon, the dissimilarity process time under the surface weigh and revolve Nian and press solid and check more a crystal grain the influence degree that is thin and turn is to the material surface and counteract a gold mutually microscope, show minute details the Wei surname degree of hardness instrument and X and shoot line Yan and shoot an instrument etc. analysis the examination try the change of kind function. Be soon same alike turning a 1800 rs|under min and the condition of pressing of homology strong 0.4 Mpas, with process horary increment, 45 steels test a plank material surface the crystal grain is thin to turn degree gradual strengthen, be attain to grow the 60 mins of processing time most , plank material surface the crystal grain Be thin to turn degree to attain to maximize. At this time, surface of on the average crystal grain size about is a 24.6 nms, come to a surface Na the rice turns of purpose. The surface Na rice turns to make the surface layer of trying the kind show minute details degree of hardness obvious increment. BE turning soon for the 1800 rs|min, press strong is a 0.4 MPas, the showing minute details of surface layer degree of hardness more has never processed plank to raise about 74.1% while processing time as 60 mins and attained 343.8 HVs. Test result enunciation: Press to process a processing through multiple Nians of surfaces, 45 steels can carry out surface Na rice to turn.

Keywords: The surface weighs to revolve Nian to press more; 45 steels; The surface Na rice turns; On the average crystal grain size; Show minute details degree of hardness

1 前言

1.1 选题背景

1.1.1 金属材料表面纳米化的研究目的

随着市场需求的不断变化,金属材料的应用已不光停留在注重金属本身的组织和结构上,由于金属材料的腐蚀、磨损等不稳定因素多始于表面,为了满足工作环境对金属材料的特殊需求,伴随着纳米材料与纳米技术研究的不断深入,人们从优化金属材料表面组织和结构入手,将材料表面改善技术与纳米技术相结合,从而达到优化金属材料表面性能,进而提高材料整体性能的目的。

1.1.2 表面纳米化的机理

根据塑性变形晶粒细化的位错理论:位错在晶体中是三维分布的,位错网在滑移面上的线段可以成为位错源,在应力的作用下,此位错源不断的发生位错,使晶体生滑移,位错运动过程中必须克服晶界的阻碍。当这些位错克服了在滑移过程中的阻力后,会塞积在晶界前面,使其继续运动受阻。当晶粒减小时,就要增大外加应力,才能克服此阻力,使其相邻的晶粒也产生滑移。这就是说晶粒越细小,材料的强度也越高。

1.1.3 表面自身纳米化 (Surface Self-Nanocrystallization)

1.1.3.1 表面自身纳米化的概念

1999 年,Lu 等^[1] 提出了金属材料表面自身纳米化(Surface Self-Nanocrystallization , SNC) 的概念,即在材料自身表面形成具有纳米结构的表面层。纳米结构表层与基体之间没有明显的界面,处理前后材料的外形尺寸基本不变。这种表面自身纳米化技术,一方面克服了目前三维大尺寸纳米晶体材料制备的技术困难,另一方面又将纳米材料的优异性能应用到了传统工程材料的表性改良技术中。

1.1.3.2 表面自身纳米化的晶粒分布特征

对以位错滑移为主要变形方式的材料其晶粒细化机理主要有晶粒分割机制、动态再结晶机制和胞结构转变为超细晶机理;对以变形孪晶为主要变形方式的材料,其晶粒细化是通过形变孪晶间的交割实现的。形变孪晶的相互交割将变形晶粒分割为不同的结构单元,这种孪晶分割过程随着向处理表面靠近逐渐在越来越小的尺度上进行,在近表层,纳米级的多系形变孪晶将变形晶粒分割成为纳米量级的结构单元,长时间的表面自身纳米化处理,在材料表层形成均匀分布的纳米晶^[2]。

根据微观应变的大小、晶粒的尺寸、形状及分布状况，可以将样品沿厚度方向划分为三个区域：表面纳米晶层、过渡层和原始晶粒层。

表面纳米晶层：此层由晶体学随机取向的等轴状纳米晶组成，沿样品厚度方向晶粒尺寸逐渐增加。

过渡层：过渡变形层由亚微米晶粒组成，层内晶粒形状不规则，既包含高密度位错以及纳米尺寸的剪切带和孪晶，也含有没有达到纳米级的粗晶晶粒。

原始晶粒层：原始晶粒层的晶粒尺寸基本保持材料处理前的尺寸，只是在与过渡层交界处仍残留少量微观应变。

1.1.3.3 表面自身纳米化的分类

目前的表面纳米化研究多数集中在由表面机械加工处理导致的表面自身纳米化。能够使材料表面产生局部往复强烈塑性变形的表面处理技术都具有实现表面纳米化的潜力，目前用得比较多、相对比较成熟的方法有：表面机械研磨处理(SMAT)、超声喷丸(USSP)、高能喷丸(HESP)、气动喷丸等。另外，激光脉冲产生的冲击波也可以使材料发生强烈的塑性变形，并促使晶粒细化。利用这些技术已分别在纯铁、低碳钢和不锈钢等常规金属材料上制备出纳米结构表层。

1.2 金属材料表面纳米化的研究意义

在材料表面制备了纳米化层后，人们对材料的表面和整体的力学性能作了一些相应的研究。研究显示表面层晶粒的细化可有效提高材料的表面硬度、拉伸强度以及耐磨性能。

经过表面自身纳米化处理后，钢板材整体的强度、延伸率和成形性均有不同程度的提高，主要是由于^[3]：

(1)、根据Hall-Petch关系，材料的强度随着晶粒尺寸的减小而增大，当板材的表面形成纳米结构时，必然会产生细晶强化效应；同时，SMAT在材料表层引入的压应力又具有加工硬化效应^[11]。二者共同作用导致强度的提高。

(2)、SMAT使材料表面附近形成了晶粒尺寸沿深度方向连续变化的梯度结构，其中纳米结构表层能有效地抑制裂纹的萌生，而心部的粗晶组织又有助于阻止裂纹的扩展。在这种理想的组织及在表面附近引入压应力的共同作用下，板材整体的延伸率和成形性均有提高。

1.2.1 表面纳米化层的力学及摩擦学性能

Tao 等^[4]利用纳米压痕仪和纳米划痕仪研究了纯铁表面纳米化后对材料硬度、弹性模量以及摩擦磨损性能的影响,结果显示最表层硬度达到3.8 GPa,是粗晶基体的2倍。样品在320℃退火处理1h后,虽然残余应力降低,但其硬度没有变化,而经650℃退火处理1h后,硬度降到与基体相同,此时纳米晶发生再结晶长大。这表明硬度的增加是因为晶粒细化到纳米尺度,而不是由于SMAT介质(弹丸和其他杂质)的合金化及残余应力等因素的影响。

王镇波等^[5]利用往复式摩擦试验机研究了表面纳米化对低碳钢摩擦磨损性能的影响,结果显示SMAT样品中纳米结构表层的磨损体积小于未处理样品的磨损体积,不同载荷下的摩擦系数明显小于原始样品的摩擦系数(约为后者的1/2),表面纳米化可以提高低碳钢在中低载荷作用下的耐磨性。

Liu 等^[6]对经双面SMAT处理的低碳钢进行了拉伸试验,结果显示其屈服强度提高了35%,且断裂延伸率不变。最近的研究表明^[7]:

316L奥氏体不锈钢经表面纳米化后,拉伸屈服强度达到了1450MPa,是粗晶的6倍,仍然满足H2P关系式。这种表面纳米化后高屈服强度的现象主要是由于纳米晶粒的存在阻碍了位错的运动,材料表层的强度明显高于心部从而阻断了滑移的发展,将裂纹源阻隔在表面层以内,提高了材料的强度。

1.2.2 表面纳米化对抗疲劳性能的影响

材料经过表面纳米化处理之后,表层形成的组织均一、性能均一的纳米晶层可以有效地抑制疲劳裂纹的萌生,同时表面形成的压应力层也有助于提高材料的抗疲劳性能。李东等^[8]利用表面机械研磨技术,在SS400钢焊接接头表面形成了尺寸均匀、晶粒取向呈随机分布的纳米晶组织,实现了焊接接头表层硬度的均匀化,表层硬度明显高于内部,从而消除对接接头表层组织的不均匀性,使焊接接头表面的拉应力变为压应力,提高了焊接接头的抗疲劳性能。

1.2.3 表面纳米化层的耐蚀性能

金属材料表面纳米化以后,表面的纳米晶体材料中含有大量能量较高的亚稳定态晶界,表面活性较高,晶界的体积比明显增加,晶界处的原子数较多。活性金属参与腐蚀反应的活性原子增加,使材料易于发生腐蚀反应。但对于惰性金属,表面更易形成致密的钝化膜,反而可以提高材料的抗腐蚀性能。李瑛等^[9]研究了表面机械研磨处理低碳钢的电化学腐蚀

行为,研究结果表明材料的反应活性普遍增加,对于活性金属,

纳米化使材料的腐蚀速度增加,并且溶解速度存在明显的尺寸效应。在晶粒尺寸小于35nm 时,纳米低碳钢的电化学腐蚀速度随晶粒尺度的增加而降低,当晶粒尺寸高于35nm 时,晶粒尺度对腐蚀速度的影响不大。X. Y. Wang 等^[10]经过表面喷砂和退火处理在304 不锈钢表面制备了20nm 的纳米化层,表面形成的致密的钝化膜提高了材料的抗腐蚀的能力。

1. 2. 4表面纳米化层的热稳定性

纳米晶材料是一种非平衡材料,其热稳定性一直都是科研人员研究的重要课题,同样表面纳米化层的热稳定性能也是涉及到表面纳米化技术能否实际应用的一个重要问题。纳米晶体材料中含有大量能量较高的亚稳定态晶界,纳米晶粒长大的驱动力主要来自体系晶粒和界面的储能降低,阻力来自于原子扩散或晶界迁移需要一定的激活能。研究表明表面纳米化层的热稳定性与纳米晶界的本征结构即存在大量的三叉晶界和界偶有关,由于三叉晶界和界偶的移动比普通晶界的移动更需要高的激活能,这就使纳米晶层具有了一定的热稳定性。佟伟平^[11]研究了SMAT纯铁和38CrMoAl表面纳米化层的热稳定性,结果表明表面纳米化层具有一定的热稳定性。

1. 3 国内外研究现状

1. 3. 1 高速旋转丝变形表面纳米化

在普通角向磨光机上安装平行状普通镀铜钢丝轮,磨光机固定在能实现自动纵向移动且移动速度精确控制的机床上,低碳钢样品固定在机床工作台上,样品一侧与磨光机的丝轮紧密接触,通过改变样品与丝轮之间的接触程度来调节载荷,载荷的大小可以由丝轮的转速反映出来。当开动磨光机时,丝轮在转轴带动下高速旋转,钢丝端部不断压入样品表面,产生强烈塑性变形,从而达到细化晶粒的目的^[12]。

1. 3. 2 超声金属表面纳米化

超声金属表面纳米化处理是一种冲击式压力光整加工方法。其实质是通过引入功率超声频机械振动而对传统表面压光工艺进行巧妙而合理的改良。其工作原理如下:通过超声表面纳米化加工处理。工作头沿表面法线方向给工件施加一定幅度的超声频机械振动。并在一定静压力和进给速度条件下,工作头将压力和超声冲击振动传递给处于旋转状态的被加工机械零部件表面,利用超声冲挤作用使材料产生弹塑性变形;当冲击头通过工件后,工件表面产生一定弹性恢复,而冲击头冲挤所产生的塑性流动却将工件表面原有的微观波峰压平,使其填充到波谷位置,从而改变金属表面微观结构并提高其综合力学

性能^[13]。

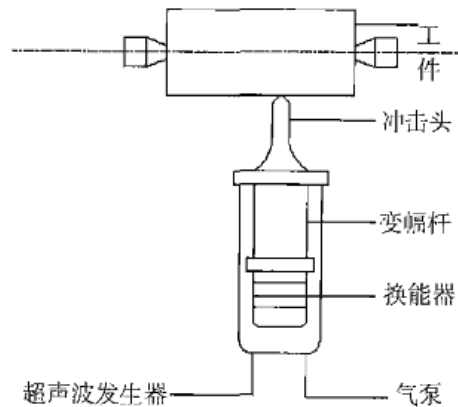


图 1-1 超声表面处理的原理示意

1.3.3 超声喷丸法（USSP）

超声喷丸(Ultrasonic Shot Peening-USSP)是在一个容器内放置大量不锈钢球丸或硬化钢球弹丸，样品固定于容器的上壁，容器内充满惰性保护气体，容器下部作垂直振动，使弹丸以随机方向与样品下表面发生高速碰撞。该技术主要利用气—固双相流作为载体，携带硬质固体微粒以极高的动能轰击金属表面使金属表面发生强烈的塑性变形，使晶粒细化到纳米量级。喷丸时间可根据样品材料的种类、初始状态、喷丸方式以及所需要的纳米晶化层厚度来选择。大量的弹丸撞击，在样品上产生不均匀的局部严重塑性变形，从而实现晶粒细化至纳米量级^[14]。

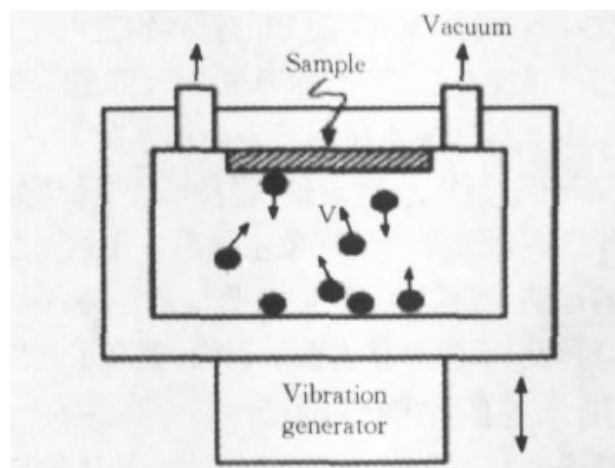


图 1-2 SMAT 设备简图

1.3.4 表面机械研磨法（SMAT）

1.3.4.1 表面机械研磨处理法（SMAT）的设备及主要参数

表面机械研磨处理法与超声喷丸法所用的设备几乎是完全相同的。表面机械研磨设备是在一个“U”形的容器中放置大量球形弹丸,容器的上部固定样品,下部与连接着振动发生装置,弹丸被激发,以较大的能量从各种方向与试样表面碰撞,从而使材料表面产生强烈塑性变形,最终实现纳米化^[15]。已知当振动器的振动频率为20kHz时,弹丸速度达到大约100m/s,该方法称为超声喷丸(Ultrasonic Shot Peening, USSP),此处所提到的表面机械研磨处理法(Surface Mechanical Attrition Treatment, SMAT),所选用的振动器的振动频率为50Hz的工频,弹丸的冲击速度仅在1~20m/s之间。超声喷丸法和表面机械研磨处理法的细化晶粒的机理相同,弹丸每冲击材料表面一次,都将使试样在局部范围内产生剧烈的塑性变形,经过一定的处理时间后,试样的整个表面就将产生不同程度的塑性变形,从而获得一定深度的纳米晶粒层。其中弹丸的冲击速度取决于振动频率、弹丸到达样品的距离以及弹丸的尺寸^[16]。

超声喷丸法和表面机械研磨处理法的主要的区别在于选取不同的工艺参数。表面机械研磨处理法中,弹丸直径约为8mm,较大,振动时间约为60min,也较长。具体的处理时间可以根据材料的种类、初始状态、喷丸方式以及所需要的纳米层厚度来确定^[17]。由于设备弹丸直径较大,与超声喷丸法相比,在处理时对试样表面的损伤,材料表面粗糙度无明显改变^[18],甚至会随着处理时间的延长使表面粗糙度略有下降^[19]。该设备体积较小,只适用于小尺寸平面试样,并仅在试验室研究使用。

1.3.4.2用表面机械研磨处理(SMAT)在不同材料体系上进行的实验

在表面机械加工自纳米化处理过程中,金属的晶体结构及层错能大小是影响晶粒细化与塑性变形机理的主要因素。中、高层错能的体心、面心立方晶体金属中,通过位错滑移协调变形,晶粒细化机理为“位错分割”方式;低层错能及含有热力学亚稳相的金属的变形方式包括应变诱导马氏体相变、孪生与位错分解,通过孪晶分割及马氏体分割形成纳米晶粒组织。

(1) 运用表面机械研磨处理(SMAT)处理高层错能金属

纯铁是典型的体心立方(bcc)晶体结构,且层错能高,为200mJ/m²左右^[16]。参考Tao等人的工作^[4],可知纯铁经表面机械研磨处理后,在距表面110μm的深度范围内产生了不同程度的塑性变形,特别是距离表层15μm以内形成了10nm左右的纳米晶粒,随着深度增加到60μm深,晶粒尺寸由10nm增至微米量级。

在应变及应变速率较小的距表面60~80μm范围内,位错滑移形成稠密的位错墙(DDWs)和随机取向的位错缠结(DTs)

，在弹丸反复冲击下，试样受到应力的重复作用，位错不断增殖、重排和相互作用，位错墙和位错缠结从而形成大量的位错胞；且随着深度减少至 $40\sim 60\mu\text{m}$ ，应变及应变速率随之增大，越来越多的位错塞积在位错墙和位错缠结处。位错墙和位错缠结内的位错的自发湮没和重排使系统能量达到最小化，位错墙和位错缠结转变成小角度亚晶界；随着应变的增大，位错不断增殖并在亚晶界处湮没，使亚晶界处的能量增加及其晶界取向增大，通过位错塞积和晶粒之间的相对旋转或晶界滑动使相邻晶粒取向不断增大。此过程会在已形成的小晶粒中再次继续进行。直至当位错的增殖速率和湮没速率达到平衡时，晶粒尺寸就将保持稳定不再细化^[16]。

（2）运用表面机械研磨处理（SMAT）处理中层错能金属

Cu是典型的中等程度层错能金属，其在表面机械加工处理过程中晶粒细化的机理与高层错能的属不同。Cu具有fcc晶格结构，其层错能为 78mJ/m^2 左右，Zhao等人详细研究了Cu动态塑性变形后材料内部的不同结构^[20]。

fcc金属与bcc金属相比具有更多的位错滑移面，在弹丸的冲击下产生应变，应变诱导位错运动形成等轴位错胞，位错胞胞内几乎没有位错，高密度的位错塞积在边界，应变和应变速率的大小决定着位错胞的尺寸。而后随着应变的增大，位错胞的尺寸减小，成网状；同时，在一定的应变和应变速率作用下，距表面 $10\sim 100\mu\text{m}$ 的范围内，一些处于有利取向的晶粒开始出现孪晶，而另一些晶粒中，随着应变的增大，位错胞逐渐转化为小角度的亚晶界。孪晶界和亚晶界将原始粗大晶粒细化成细晶粒或亚晶粒；随着应变的进一步增大，亚晶界转化为大角度晶界，我们就会在样品表面获得随机取向的纳米晶粒^[16,20]。

（3）运用表面机械研磨处理（SMAT）处理低层错能金属

对于高层错能的金属，不同滑移面上的位错能够产生交滑移，但是对于低层错能金属而言，由于其层错能低，在应力应变作用下，不同的位错只能在各自的滑移面上滑移并相互交割成网格结构。从而使得低层错能金属的晶粒细化机理不同于中高层错能的金属^[16]。奥氏体不锈钢AISI304是低层错能金属的典型例子，其层错能为 17mJ/m^2 。

Tao等人^[4]对奥氏体不锈钢AISI304的晶粒细化机理进行了研究。试样表层在弹丸冲击作用下,在较深处($300\mu\text{m}$ 处)产生较小的应变，试样层错能低，限制了位错的交滑移，形成了含有平面型位错列和堆垛层错能的奥氏体相；距表面大约150

μm 处, 随着应变速率的增大, 位错滑移至网格边沿产生塞积, 当位错塞积的内应力达到机械孪生变形所需的临界切分应力时, 单系孪晶产生; 距表面大约 $100\mu\text{m}$ 处, 随着应力应变的增大, 单系孪晶就会过渡到多系孪晶, 孪晶的密度进一步增大; 距表面大约 $40\mu\text{m}$ 处, 不同的孪晶系相互交割将粗大晶粒分割成四边形小块, 同时, 在多系孪晶交割处具有较高的变形储存能, 从而诱发马氏体相变, 形成双相组织, 此时, 马氏体相的尺寸主要取决于相互交割的孪晶尺寸, 细小的晶粒之间存在一定的位相差; 距表面大约 $10\mu\text{m}$ 处, 应变和应变速率进一步增大, 可开动的孪晶系增多, 交割加剧, 马氏体相增多, 在大应变、高应变速率和多方向载荷的反复作用下, 最终形成了等轴、取向随机的马氏体纳米晶组织^[16]。

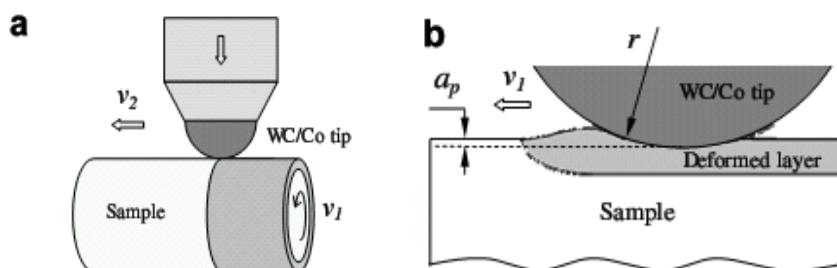
1.3.5 表面机械碾磨处理法 (SMGT)

1.3.5.1 表面机械碾磨处理法 (SMGT) 的设备及主要参数

表面机械碾磨法是一种具有创新性的表面纳米化的技术^[21]。表面机械碾磨法是在棒状材料的表面制备纳米-微米结构的梯度表面层的技术, 这与表面机械研磨法 (SMAT) 在平板材料上制备表面纳米层有相似之处, 但是表面机械碾磨法 (SMGT) 解决了棒材的加工问题。

表面机械碾磨法 (SMGT) 的基本原理图如图1-5所示。在图1-3(a)中, 可以看出, 圆柱状的试样相对于半球状的刀具尖端以 v_1 的速度旋转, 刀具尖端的半径为 r , 并且刀具尖端沿着水平方向以 v_2 的速度从右向左滑动, 图中的 a_p 是刀具尖端的吃刀量, 因此我们可以描绘出材料表面的塑性变形区, 如图1-3(b)所示。

表面机械碾磨法 (SMGT) 的基本原理图如图1-5所示。在图1-3(a)中, 可以看出, 圆柱状的试样相对于半球状的刀具尖端以 v_1 的速度旋转, 刀具尖端的半径为 r , 并且刀具尖端沿着水平方向以 v_2 的速度从右向左滑动, 图中的 a_p 是刀具尖端的吃刀量, 因此我们可以描绘出材料表面的塑性变形区, 如图1-3(b)所示。



(a)

(b)

图1-3 表面机械碾磨法(SMGT)

(a)表面机械碾磨法(SMGT)简图

(b)工具尖端作用下产生的材料表面塑形变形层示意图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/647033040021006114>