

引文格式: 秦志, 李斌, 张涵, 等. 金属表面强化后梯度显微结构对力学性能的影响[J]. 航空制造技术, 2022, 65(15): 41-50.

QIN Zhi, LI Bin, ZHANG Han, et al. Effect of gradient microstructure on mechanical properties after surface strengthening of metals[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(15): 41-50.

金属表面强化后梯度显微结构对力学性能的影响*

秦志, 李斌, 张涵, 薛红前

(西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 表面强化后具有梯度显微结构的材料由于其出色的力学性能受到广泛关注。从梯度显微结构的制备、对力学性能(强度-塑性、加工硬化、摩擦磨损和疲劳性能)的影响两个方面展开综述。首先,按照工艺制备原理的不同总结了金属梯度显微结构形成机理和制备方法。其次,归纳了梯度显微结构金属力学性能(强塑性、加工硬化、摩擦磨损)研究最新进展及对增强机理进行分析,同时对出现的反常试验现象进行了解释。从表面强化后形成的梯度显微结构与残余应力等方面综合分析金属材料低周、高周疲劳性能提高的原因。最后,指出目前梯度显微结构金属面临的一些问题及未来的研究方向。

关键词: 表面强化; 梯度显微结构; 制备工艺; 力学性能; 疲劳性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.15.041



秦志

博士研究生,主要从事结构、材料的疲劳与强化研究。

目前在航空航天领域,金属材料 and 关键结构部件面临的最主要问题是疲劳破坏^[1-3]。据统计,在航空飞行器发生的所有关键结构失效破坏中,疲劳破坏约占80%^[1,4]。因此如何提高材料的疲劳性能成为科研人员研究的焦点,而表面强化工艺作为航空制造业在实际生产过程中最为常用的提高材料力学性能和疲劳性能的手段,受到广大科研工作者的关注^[5-6]。

对材料进行表面强化处理后,不仅会在材料表层引入一层有益的压缩残余应力^[7-10],而且还会在材料表层产生一定深度的空间梯度纳米显微结构,主要包括晶粒尺寸、孪晶尺寸和层片厚度的变化等。在实际应用过程中,材料表面经强化处理后,其表层微观组织将沿深度方向呈梯度分布,即材料的结构单元尺寸(晶

粒尺寸)在空间上呈梯度变化,从纳米尺度连续增加到亚微米或微米尺度^[11-12]。表层微观晶粒尺寸呈梯度连续变化可以有效避免因尺寸突变导致的性能突变,抑制表层纳米晶粒结构在变形过程中可能产生的应变集中和早期颈缩,从而延迟表面纳米晶粒结构的变形局域化和裂纹萌生,使材料表现出良好的强度-塑性匹配。另外,在梯度显微结构中表层的纳米晶粒结构依靠其高强度延缓了疲劳裂纹的萌生,芯部的粗晶结构则会阻碍裂纹的扩展。由此可见,表面强化后产生的梯度显微结构对材料的疲劳性能有显著的有益影响。

为此,科研人员针对材料表层梯度显微结构的制备以及其对材料力学性能的影响和强化机理开展了大量的研究^[13-16]。本文分析了梯度显

* 基金项目: 国家自然科学基金(91860206)。

微结构的形成机理和对材料力学性能的影响,指出在梯度显微结构研究方面存在的问题与挑战,为后续优化表面处理工艺,提高梯度显微结构金属材料的力学性能提供借鉴。

1 表面强化梯度显微结构形成机理与制备工艺

在对材料表面进行强化处理过程中通过施加外部载荷使材料表层产生塑性变形,塑性变形可令金属中产生大量微观结构缺陷(如位错、晶界、孪晶界等),随着材料表层不断产生往复、多方向的塑性变形,导致位错大量增殖,晶粒内的位错不断地滑移、堆积、相互作用、缠绕和空间重排等,导致稠密位错墙(Dense dislocation wall, DDW)和位错缠结(Dislocation tangle, DT),位错墙和位错缠结不断发展形成低能量的位错胞结构,最终逐渐将粗大的原始晶粒分割成多个细小亚晶。

基于上述材料塑性变形导致晶粒细化的原理,在过去的20年里发展了几种成熟的表面塑性变形技术,可以实现金属表面层的晶粒细化,由于变形量、变形速率和变形梯度由表及里呈梯度变化,从而在材料表层形成梯度显微结构,图1为

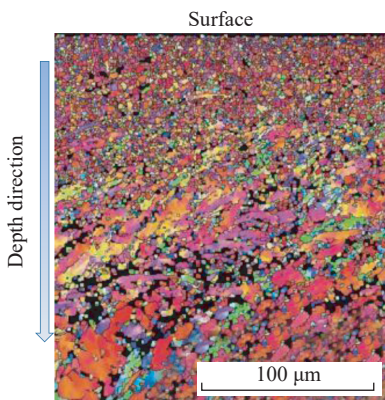


图1 Ti6Al4V 钛合金表面强化处理形成的梯度纳米结构晶粒^[17]
Fig.1 Gradient nanostructured grains formed by surface strengthening treatment of Ti6Al4V titanium alloy^[17]

在钛合金表层形成的梯度纳米晶粒结构层^[17]。在大块金属材料的表面层中产生梯度纳米结构的表面机械处理方法主要分为以下几种:表面机械研磨处理(Surface mechanical attrition treatment, SMAT)^[18]、表面机械碾磨处理(Surface mechanical grinding treatment, SMGT)^[19]、表面

机械滚压处理(Surface mechanical rolling treatment, SMRT)^[20]、激光喷丸(Laser shock peening, LSP)^[21]、累积叠轧(Accumulative roll bonding, ARB)^[22],如图2所示。表1总结了用于制造梯度显微结构金属和合金的各种塑性变形方法与工艺的工艺参数、梯度厚度和样品类型。

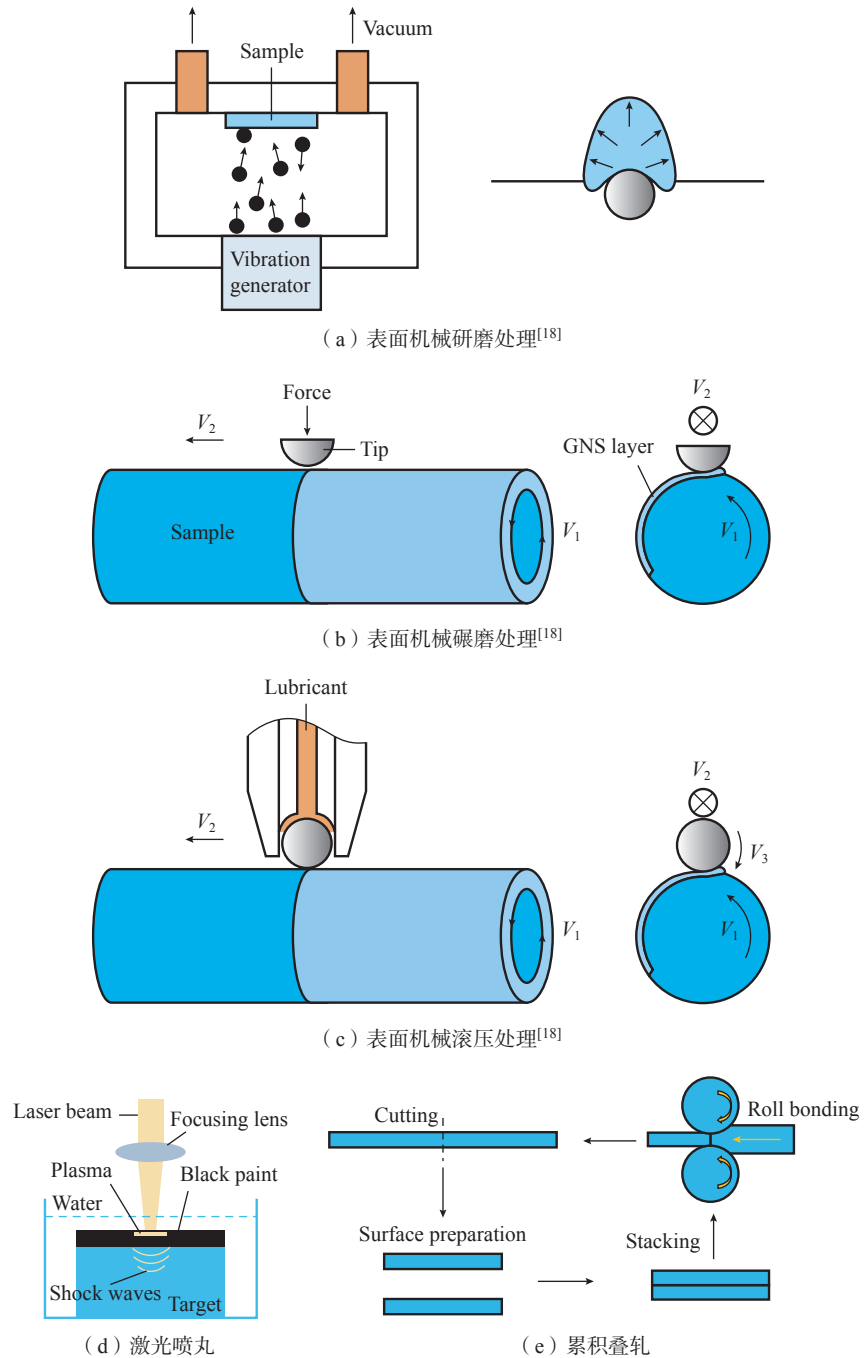


图2 制备梯度显微结构工艺
Fig.2 Preparation of gradient microstructure processes

表 1 制备梯度显微结构塑性变形方法比较

Table 1 Comparison of plastic deformation methods for preparing gradient microstructures

制备方法	工艺参数	微观结构梯度分布	样品形状和类型
表面机械研磨处理	弹丸直径、撞击速度、撞击时间等	几十 nm (表面)~ 10 μm (基体)	薄板; 金属和合金
表面机械碾磨处理	半径、旋转和滑动速度、处理时间、温度等	几 nm (表面)~ 10 μm (基体)	圆棒; 金属和合金
表面机械滚压处理	半径、旋转和滑动或滚动速度、处理时间、温度等	几 nm (表面)~ 10 μm (基体)	圆棒; 金属和合金
激光喷丸	功率、能量密度、激光持续时间、光斑直径等	几十 nm (表面)~ 10 μm (基体)	复杂几何形状; 金属和合金
累积叠轧	轧辊旋转速度、厚度减少量、退火温度等	几十 nm (表面)~ 10 μm (基体)	薄板; 金属和合金

SMAT 是一种在传统喷丸技术基础上发展起来的表面纳米结晶工艺,通过超声振动激励弹丸介质,随机撞击材料表面,如图 2 (a)所示^[18]。Wu 等^[23]利用 SMAT 工艺在 316L 不锈钢表面制备一层约 10 μm 厚的梯度纳米晶粒层,研究纳米晶不锈钢热稳定性。Novelli 等^[24]利用 SMAT 工艺分别在常温和低温环境下对 304L 不锈钢表面进行处理,研究结果显示在低温环境下梯度纳米结构层的厚度最大可达 250 μm。目前,SMAT 工艺主要用于对纯金属、合金以及钢材料的表面处理,受材料形状限制较少,且目前已经应用到工业生产中,但是同时也发现 SMAT 工艺处理后的材料表面粗糙度较高。

SMGT 工作原理为通过外力将硬质球形压头(WC/Co 等材质)压入材料表面,并使压头与材料发生相对位移,利用压头与材料之间产生的摩擦力使材料表层发生塑性变形,表层应变变量及应变速率随深度增大呈梯度减小,累积应变变量随碾磨次数增多及预压入深度增大而增大,实现材料表层梯度纳米化,如图 2 (b)所示^[18]。如 Han 等^[25]利用 SMGT 工艺在纯铜表面制备了一层厚度约为 80 μm,晶粒尺寸范围从 ~80 nm 到几 μm 的梯度纳米晶粒层。相较于 SMAT 工

艺,其优点是在保证制备相当厚度的梯度纳米显微结构层的同时降低了材料的表面粗糙度。

SMRT 的工作原理与表面机械碾磨处理工作原理类似,只是将 SMGT 中的不可滚动的硬质球形压头换为可以滚动的球形压头,使压头在材料表面滚动,利用压头滚动在材料表层产生塑性变形,如图 2 (c)所示^[18]。Carneiro 等^[26]采用 SMRT 工艺在 316L 不锈钢表面制备一层厚度为 500 μm,晶粒尺寸范围为 30~300 nm 的梯度纳米晶粒层,结果显示 SMRT 工艺明显提高了材料的疲劳性能。与 SMGT 工艺相比,SMRT 工艺制备的梯度显微结构层拥有更厚的厚度和更低的粗糙度。

LSP 处理是一种用于处理各种金属构件表面的表面强化技术^[27-28]。其原理是利用高能、超短持续时间(~10~30 ns)的激光脉冲在材料表面产生压缩冲击波。冲击波携带数十 GPa 量级的应力,在超高应变速率(~10⁶ s⁻¹)^[29]下产生巨大的塑性变形。经过多次冲击后,处理表面的初始粗晶粒经过大塑性变形分解为许多细小晶粒。激光诱导的激波随深度衰减,形成了一个具有梯度显微结构的表层,如图 2 (d)所示。一般来

说,晶粒的大小从几十 nm (表面层的几 μm)增大到数百 nm (内部)。有时,由于超高的压应力,在顶部表面会形成厚度为 ~10 nm 的非晶层^[18]。

ARB 处理是在两层或多层材料之间形成强界面结合的常用技术。在过去的 5 年里,ARB 被用于制造各种梯度纳米层金属和合金^[30-32]。在这个过程中,金属样品被两个旋转的轧辊碾磨和压缩,如图 2 (e)所示。在每个轧制周期中,试样厚度减小,同时附加剪切变形诱导晶粒细化,甚至形成梯度显微结构,这与 SMRT 相似。随着滚动次数的增加,晶粒变细,梯度层变厚。轧制后的试样在高温下退火,实现局部再结晶。与 SMAT、SMGT 和 SMRT 相比,ARB 更适合于大型板状材料的加工和工业规模生产。

2 梯度显微组织结构对力学性能的影响

2.1 强度-塑性匹配

一般认为对于常规的金属和合金材料,当其强度高时,塑性往往会很差,当其塑性很好时,强度反而不高,即所谓的强度和韧性不可兼得。目前,金属材料的这种强度-塑性“倒置”关系逐渐成为制约材料进一步发展的重要因素。而梯度纳米结构金属的出现为解决这一问题提供了一种新的途径,这主要归因于梯度纳米结构的独特变形机制。由式(1)Hall-Petch 关系可知,减小晶粒尺寸可以有效提高材料的屈服强度。由于材料的非均匀变形行为,材料的微观结构差异改变了宏观力学性能,梯度显微结构中纳米晶区高强度与粗晶区高塑性的协同作用促进了金属材料的高强度和高塑性。在拉伸过程中,梯度显微结构材料表面的纳米细晶粒为材料提供了主要的强度,而基体中的粗晶则为材料提供了主要的塑性,梯度显微

结构组织在拉伸过程中可有效抑制表层纳米晶粒结构可能产生的应变集中和早期颈缩,从而延迟了表面纳米晶粒结构的变形局域化和裂纹萌生,这就使得梯度纳米结构材料表现出良好的强度和塑性匹配,如图3所示^[33]。

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

式中, σ 为材料屈服强度; σ_0 为移动单个位错时产生的晶格阻力; k_y 为材料常数; d 为晶粒尺寸。

段宝华^[34]和何东^[35]等分别利用 SMRT 和 SMGT 技术在纯铜表面制备出梯度纳米晶粒结构,拉伸试验结果显示,经过表面强化处理之后,具有梯度显微结构晶粒纯铜的屈服强度比粗晶铜均有大幅提高,同时塑性损失很小。Lu 等^[36]利用高能喷丸工艺成功地在 CrCoNi 中熵合金 (MEA) 中引入了梯度纳米晶结构,即晶粒尺寸从表层的纳米级 (~50 nm) 到中间层的微米级 (~1.3 μm),拉伸试验结果显示,这种梯度纳米晶结构 CrCoNi 中熵合金显示出优异的强度和延展性匹配性能,分别拥有高屈服强度(约 1215 MPa)和极限抗拉强度(约 1524 MPa),同时保持约 23% 的良好延展性,如图 4 (a) 所示。Lei 等^[37]采用 SMRT 工艺在 316L 不锈钢表面制备了一层平均粒径约为 40 nm 的梯度晶粒结构层,力学性能试验结果显示经过 SMRT 处理后 316L 不锈钢的屈服强度为 370 MPa,远高于原始粗晶材料的 210 MPa,提高了约 76%,同时具有梯度晶粒结构层的材料的延伸率仍为粗晶材料的 84%,显示出了良好的强度-塑性匹配,如图 4 (b) 所示。谢小龙等^[38]利用超音速微粒轰击工艺在低碳结构钢表面制备一层梯度纳米晶粒结构层,通过单轴拉伸试验发现,经过中间淬火和超音速微粒轰击组合处理后具有梯度纳米结构材料的抗拉强度得到提高,最高可

达 820.02 MPa,同时塑性损失较小,延伸率仍然可以达到 14.7%,最终使得材料的综合力学性能得到提高。夏双五等^[39]在不同热处理后的 AZ31 镁合金表面通过 SMAT 制备一层梯度纳米晶粒结构,经过 SMAT 处理 3 min 之后, AZ31 镁合金的屈服强度由 185.5 MPa 提高到 277 MPa,提高了约 49.3%,与此同时延伸率仅从 17% 降到 9%,体现了梯度纳米结构晶粒镁合金良好的强度-塑性匹配。陈正阁等^[40]采用 LSP 技术对片层组织的 TC11 钛合金进行表面强化处理,对强化后的 TC11 钛合金测试其力学性能发现相较于未处理试样,强化处理后的材料的屈服强度和抗

拉强度均有提高,分别提高了 19.4% 和 18.3%,而延伸率仅下降了 8.9%,这主要是由于在单向拉伸过程中,材料表层的梯度纳米结构晶粒抑制了纳米结构产生的应力集中和早期颈缩,进而防止变形局域化和裂纹过早萌生,同时芯部粗晶组织提供了良好的拉伸应变和加工硬化能力,最终使处理后的 TC11 钛合金获得良好的强度-塑性匹配。但科研人员在研究过程中也发现并不是所有具有梯度显微结构材料符合强度-塑性匹配这一特性,如 Shi 等^[41]对 Mg-Gd 合金表面采用 SMAT 进行强化处理,试验结果显示处理后材料的屈服强度得到了明显提高,但同时也发现处

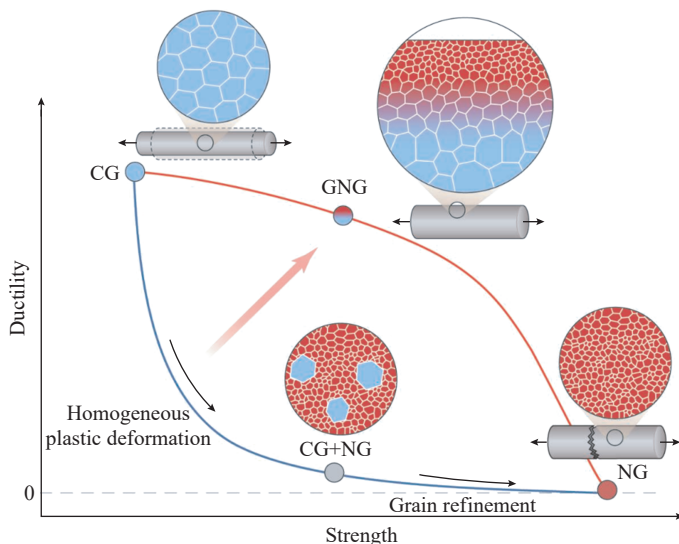
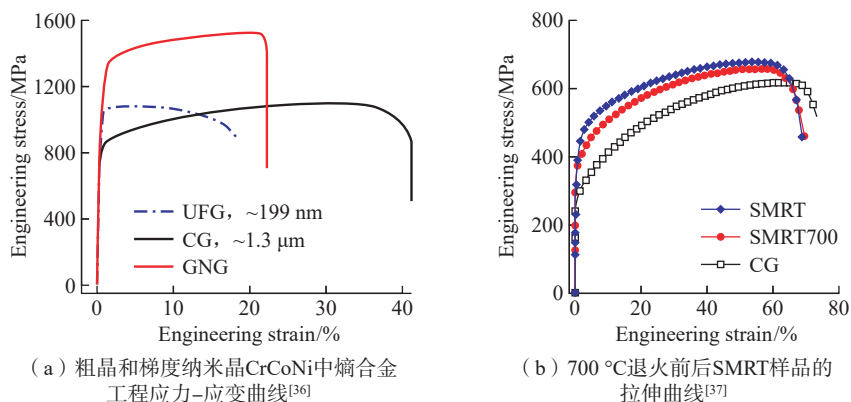


图3 梯度纳米结构材料的强度-塑性匹配关系^[33]

Fig.3 Strength-plasticity matching relationships in gradient nanostructured materials^[33]



(a) 粗晶和梯度纳米晶CrCoNi中熵合金工程应力-应变曲线^[36]

(b) 700 °C退火前后SMRT样品的拉伸曲线^[37]

图4 原始粗晶材料与梯度显微结构金属应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves for coarse crystalline material and gradient microstructure metals

理后材料延伸率急剧下降,这主要是由于位错累积和相互作用产生的应变硬化导致的。

2.2 加工硬化性能

金属材料的加工硬化(也称为应变硬化)是通过加工硬化速率来量化的。研究发现,梯度纳米晶粒结构金属在单向拉伸过程中表现出了传统均匀晶粒金属所不具备的额外的加工硬化行为^[42],导致这种行为产生的主要原因为梯度显微结构具有弹性均质性和塑性非均质性导致宏观应变梯度。由于变形的不协调,应变梯度将单轴应力转化为多轴应力,使粗晶区的应变局部化和加工硬化成为可能。因此,特殊的应力分布可能会增强位错的形核和扩展,诱发额外应变硬化。具体来说,梯度晶粒金属在单轴拉伸变形过程中有3个变形阶段。在第1阶段,梯度显微结构材料发生弹性变形。在第2阶段,粗晶结构区开始塑性变形,而纳米晶表面层仍保持弹性变形。这种不兼容性将单轴应力转化为双轴应力。此外,随着外加应变的增加,存在两个弹塑性界面并向表面移动。应力和应变梯度的出现,有利于强化和背应力的协同作用,从而提高屈服强度。在第3阶段,粗晶层和纳米晶层均发生塑性变形。不稳定的颈缩首先发生在纳米晶层中。然而,收缩受到稳定的粗晶层的约束。在颈缩层和中心稳定层的界面附近出现了陡峭的应变梯度,通过几何必须位错和背应力的累积,提高了应变硬化能力。此外,颈缩/稳定界面从表面向中心层迁移,伴随高密度位错的积累,提高了应变硬化速率,从而提高了梯度显微结构材料的延性。

Lin等^[43]通过精确控制晶粒尺寸制备出不同梯度范围纯镍样品,研究不同梯度范围晶粒对力学性能的影响,如图5(a)所示,随着应变的增加,梯度纳米结构纯镍试样相较于于

粗晶试样和纳米晶样品,初期的加工硬化速率更好,且后期衰减速度更慢。Cheng等^[44]研究结果也发现类似现象,即具有双梯度的梯度显微结构纳米晶铜的加工硬化速率高于无梯度显微结构铜,特别是当应变高于2%以后,这种区别更为明显,如图5(b)所示。Wu等^[42]在研究梯度纳米结构钢的力学性能时同样发现在小拉伸应变~1.5%时出现非单调和瞬态硬化行为,如图5(c)所示。Shao等^[45]在Fe-Mn-C TWIP钢中引入线性梯度晶粒尺寸,试验结果显示梯度纳米显微结构材料的加工硬化速率要优于原始粗晶材料,而且在整个塑性变形过程中梯度纳米显微结构材料的加工硬化速率没有明显下降。Zhou等^[46]研究了梯度纳米晶铜在300 K和77 K下的拉伸性能和应变硬化行为,试验结果发现,与原始粗晶铜相比,梯度纳米晶铜在77 K拉伸时表现出相当的应变硬化行为,屈服强度和抗拉强度明显提高。梯度纳米晶试样的应变硬化行为是由低温拉伸抑制纳米晶粗化和激发纳米孪晶引起的。但同时也发现当梯度纳米晶铜在300 K拉伸时随着应变率的增加,梯度纳米晶铜的应变硬化行为与粗晶铜相比退化明显,这可能是由于表层纳米晶粒的软

化作用引起的。

2.3 摩擦、磨损性能

金属材料在干滑动和磨损时,通常会在表面或表面附近发生损伤,在实际应用中,由于滑动引起的较大的塑性变形会大大缩短材料的使用寿命。因此,提高金属材料的减摩擦耐磨性能至关重要。由于纳米结构金属的耐磨性能强于粗晶材料,所以通过在材料表面构筑梯度纳米结构来提高其耐磨性是可行的。Zhang等^[47]采用SMAT方法在纯铜表面制备一层梯度纳米结构,研究了其在室温条件下滑动及微动摩擦磨损性能,结果显示具备梯度纳米结构的纯铜表层摩擦磨损性能明显优于粗晶纯铜,如图6所示。Amanov等^[48]利用SMRT技术在316L不锈钢表面制备梯度纳米结构,研究其在腐蚀环境下的摩擦性能,结果显示在腐蚀环境下梯度纳米结构材料的抗摩擦性能更为出色。沈明学等^[49]为了提高316L不锈钢材料的强度和摩擦性能,采用超声纳米晶表面改性(UNSM)工艺在材料表面制备一层200 μm的梯度纳米晶粒结构,试验结果显示,与未处理试样相比,经过UNSM试样的摩擦因数和耐磨性均有显著提高。但是也应该注意,梯度纳米结构并不总是提高材料的抗摩

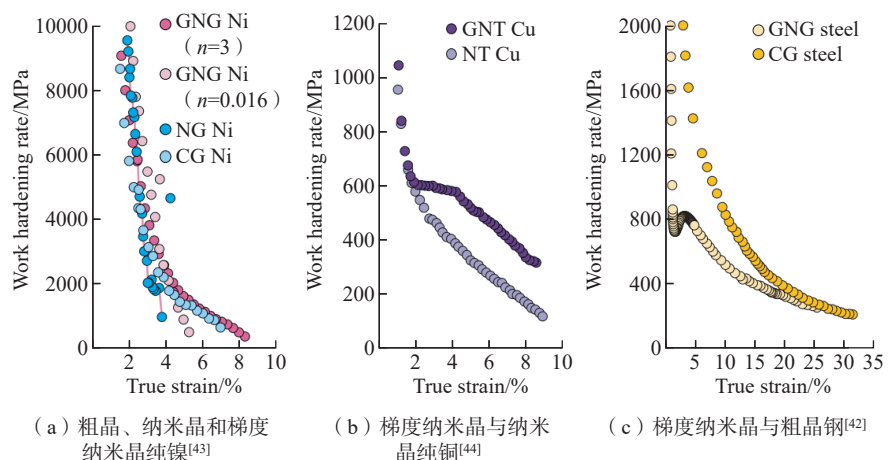


图5 梯度纳米结构与均质金属和合金加工硬化率随真应变的变化

Fig.5 Work-hardening rates of gradient nanostructured alloys and homogeneous metals and alloys vs. true strain

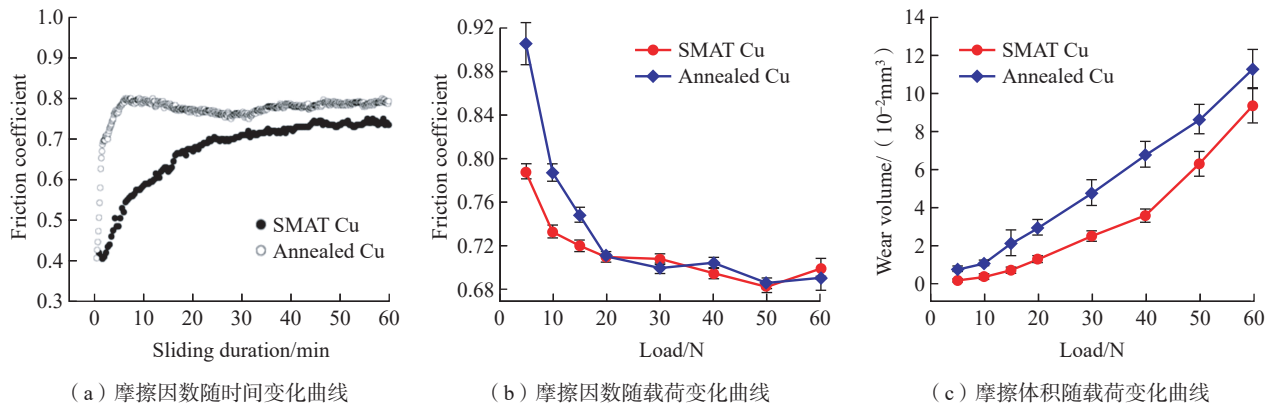


图6 梯度纳米结构纯铜与粗晶纯铜材料摩擦磨损性能对比^[47]

Fig.6 Frictional wear performance of gradient nanostructured pure copper compared to coarse crystalline pure copper materials^[47]

擦磨损性能,如袁俊瑞等^[50]利用新设计的一种新型高效的平面滚压方法来制备梯度纳米结构材料并对其磨损行为进行研究,结果显示在干摩擦条件下,低载时抗摩擦能力和抗黏着能力较好,但在高载时梯度纳米结构材料的摩擦性能反而降低,这主要是由于高载导致表面的纳米结构晶粒发生严重塑性变形,发生局部微断裂以及随后的三体磨损最终导致了摩擦性能的降低。

2.4 疲劳性能

在大多数情况下,疲劳裂纹在循环载荷作用下萌生于材料表面并逐渐向内部扩展,因此通过强化材料的表面状态可以有效延缓疲劳裂纹的萌生和降低裂纹扩展速率。梯度纳米结构中的表层纳米晶粒具有较高的强度和硬度,因此可以有效延缓裂纹萌生,另外梯度纳米结构中的原始粗晶粒又具有良好的塑性,因此可以降低裂纹扩展速率,所以具有梯度纳米结构金属材料拥有良好的低、高周疲劳性能。

2.4.1 低周疲劳

航空飞行器中的某些关键部件(如涡轮叶片、起落架、涡轮轴等)在服役过程中容易发生低周疲劳破坏。科研人员研究发现在材料表层制备一层梯度纳米结构可有效提高材料的低周疲劳性能,如Zhou等^[51]使用SMAT工艺处理316L不锈钢表面并

分析其对低周疲劳性能的影响,发现SMAT主要在低周疲劳循环早期产生影响,在低、中应变幅(0.5%、0.8%)下,经过处理的试样较未处理低周疲劳性能得到提高。Pandey等^[52]利用超声喷丸工艺对7075铝合金进行表面强化处理,在表面得到一层梯度纳米结构,结果显示处理后的试样的低周疲劳寿命得到明显提高,当喷丸时间为180s时,超声喷丸处理过的试样与未处理试样相比,疲劳寿命提高了220%。但是同时也发现如果喷丸强化时间过长,反而会降低试样的疲劳寿命,这主要是由于:(1)当喷丸时间达到一定程度时,引入材料表层的压缩残余应力逐渐达到饱和,喷丸时间的延长对提高材料表层压缩残余应力效果有限;(2)过长的喷丸时间会导致材料表面粗糙度提高和发生损伤,甚至会在材料表面产生微裂纹,如图7(a)所示^[52]。Chen等^[53]在AZ31B镁合金表面利用SMAT工艺制备一层梯度纳米晶粒结构,在应变控制模式下,研究了应变速率和弹丸尺寸对SMAT试样低周疲劳行为的影响,发现在相同的应变率下,与原始粗晶试样相比SMAT试样的疲劳寿命显著提高,这主要是由于残余压应力和梯度显微结构层抑制裂纹萌生的共同作用。同时发现,SMAT和原始粗晶试样的疲劳寿命随着应变速率的增

加而增加,这是因为高应变速率有利于孪晶活动,抑制位错滑移,从而提高了疲劳裂纹的抗裂性,延长了疲劳寿命,如图7(b)所示^[53]。

上述研究结果均显示具有梯度纳米结构材料拥有良好的低周疲劳性能,这主要是由于材料表面的梯度纳米结构提供了更高的强度和硬度,同时在制备梯度纳米结构过程中,在材料表面引入了对提高疲劳性能有益的压缩残余应力,在保证表面完整性条件下,压缩残余应力延缓了裂纹的萌生并平衡了部分外部疲劳载荷,这两方面的共同作用使梯度纳米结构材料拥有良好的低周疲劳性能。在保证表面完整性条件下,增加表面处理强度与处理时间,进而提高表面梯度显微结构层的厚度和表面压缩残余应力,都会提高材料的低周疲劳性能。但少数研究显示,在低周疲劳试验中,大振幅循环应变可能会导致整体试样的组织恢复、晶粒粗化或组织均匀化,从而导致梯度纳米晶层中压缩残余应力的快速释放^[54-55]。在这种情况下,压缩残余应力对提高梯度纳米晶金属低周疲劳寿命的影响可以忽略不计,这从另一个角度也能间接说明材料的低周疲劳性能的提升主要来源于强化后的表层梯度显微结构。然而,残余应力对低周梯度纳米晶金属和合金组织演变,以及循环性能的影响尚不完全清楚,需要进

一步研究。

2.4.2 高周疲劳

与低周疲劳一样,梯度纳米结构金属也同样具有良好的高周疲劳性能。吴宇坤等^[56]利用SMRT工艺在钛管上制备了一层梯度纳米结构,研究了其拉-扭双轴疲劳性能,结果显示SMRT处理可以有效提高钛管的高周疲劳性能,梯度纳米结构纯钛与原始粗晶钛相比疲劳强度提高了约10%,疲劳寿命最大提高了约300%,这是由于梯度显微结构中的纳米晶在疲劳循环过程中发生应力诱发晶粒长大,提高了裂纹萌生抗力,如图8(a)所示^[56]。Liu等^[57]研究了梯度纳米结构7075-T651铝合金的疲劳性能,研究结果显示梯度纳米结构

对低、高周疲劳都有提高,当疲劳寿命大于 10^5 时,具有梯度纳米结构铝合金疲劳强度相较于未处理试样提高约20%,疲劳强度的提高主要来源于梯度显微结构层的强化作用,如图8(b)所示^[57]。Yasuoka等^[58]利用超声纳米晶表面改性(UNSM)技术在304不锈钢表面制备了厚度为30~200 μm 的梯度纳米结构层,疲劳试验显示经过处理后的材料的疲劳强度得到了明显提高,分析发现表面硬化层是提高疲劳强度的主要原因。

从以上研究结果可以归纳出梯度纳米结构提高材料疲劳性能主要通过以下3条途径:(1)梯度显微结构中的纳米晶表层为材料提供了额

外的高强度和高硬度,有利于抑制疲劳裂纹的萌生并降低了循环加载过程中材料的应变局域化,结构梯度可以显著改变裂纹尖端附近的应力分布和塑性区大小;(2)制备梯度纳米结构过程中引入的压缩残余应力促进了裂纹的闭合,有效减缓了裂纹扩展,平衡了部分循环疲劳外载荷;(3)材料中的梯度纳米结构使材料组织均匀化,降低了晶粒间的应力集中,阻碍了疲劳裂纹的萌生。

3 结论

经表面强化后具有梯度显微结构金属与常规金属相比,其通常拥有优异的力学性能,明显提高了材料的综合性能,这些力学性能的提高主要

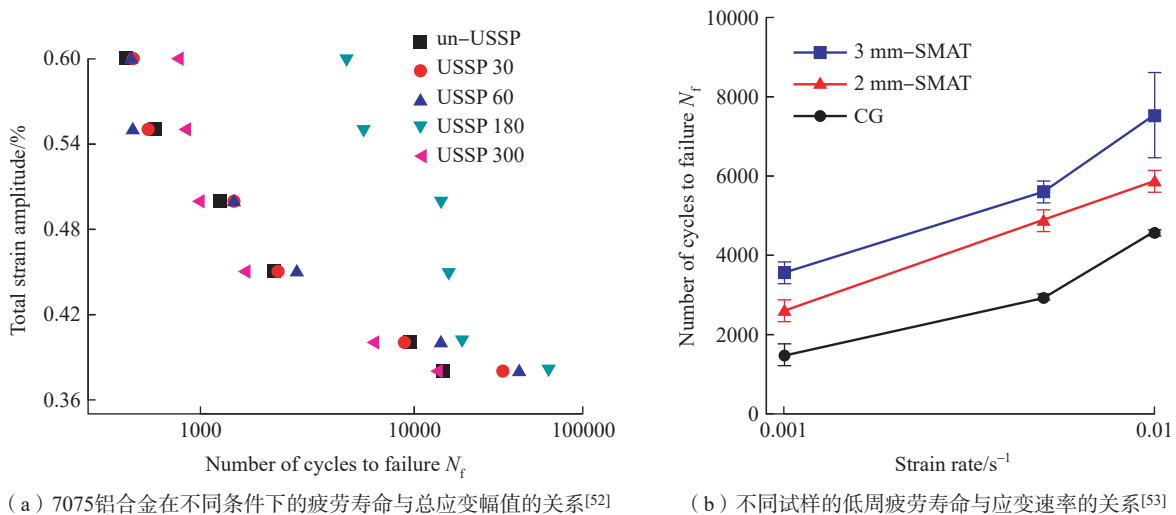


图7 梯度纳米结构材料低周疲劳性能测试结果

Fig.7 Low cycle fatigue performance test results for gradient nanostructured materials

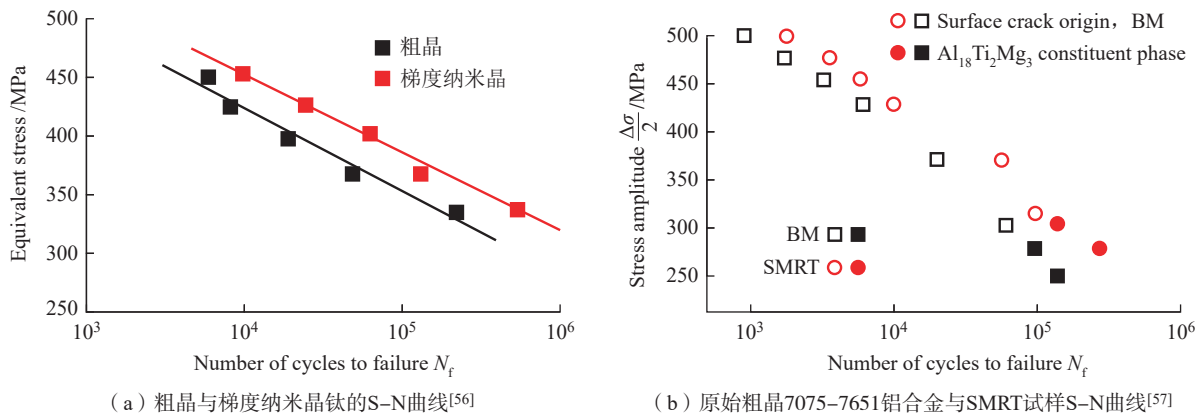


图8 梯度纳米结构材料高周疲劳性能测试结果

Fig.8 Results of high cycle fatigue performance tests on gradient nanostructured materials

来源于梯度显微组织,其中激活了一系列非均匀塑性变形机制,涉及多种变形特征和机制,包括显著的应变梯度、新型位错活动和机械驱动晶粒粗化。目前尽管在梯度显微结构金属和合金的制备、力学性能研究方面取得了一些进展,但仍有许多关键问题需要解决,例如对某些条件下梯度显微结构材料的力学性能与常规金属相比反而出现下降现象,对此科研人员有不同解释,因此对于梯度显微结构金属还需深入研究。在梯度纳米结构的设计和优化方面目前在很大程度上是依据经验的,实现梯度显微结构的精确调控是制备加工技术面临的主要难题,因此未来迫切需要发展理论和计算模型框架,以量化微观结构梯度(如结构梯度的程度和分布,以及构建的尺寸和方向的变化)与梯度显微结构材料力学性能之间的相关性。另外,目前对于梯度显微组织金属疲劳性能的研究大多集中于低、高周范围内,对于超高周疲劳范围内的疲劳研究相对较少,且超高周疲劳失效机理不同于低、高周疲劳,因此未来对具有梯度显微组织结构金属的超高周疲劳失效机理需要进一步揭示,其次残余应力对梯度显微结构材料的疲劳性能的影响目前在学术界还未有统一认识,仍有待澄清。

参考文献

[1] 王彬文,陈先民,苏运来,等. 中国航空工业疲劳与结构完整性研究进展与展望[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 1-39.
WANG Binwen, CHEN Xianmin, SU Yunlai, et al. Research progress and prospect of fatigue and structural integrity for aeronautical industry in China[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 1-39.
[2] 孙侠生,苏少普,孙汉斌,等. 国外航空疲劳研究现状及展望[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 45-70.
SUN Xiasheng, SU Shaopu, SUN Hanbin, et al. Current status and prospect of overseas research on aeronautical fatigue[J]. Acta

Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 45-70.
[3] 崔德刚,鲍蕊,张睿,等. 飞机结构疲劳与结构完整性发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 524394.
CUI Degang, BAO Rui, ZHANG Rui, et al. Development of aircraft structural fatigue and structural integrity: Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 524394.
[4] 赵振业. 高强度合金应用与抗疲劳制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 50(10): 30-33.
ZHAO Zhenye. Application of high strength alloy and anti fatigue manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(10): 30-33.
[5] 高玉魁. 喷丸强化对TC4钛合金组织结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536-1539.
GAO Yukui. Effect of shot-peening on microstructure of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536-1539.
[6] 罗学昆,艾莹璐,王欣,等. 喷丸强化对TB6钛合金疲劳性能和表面完整性的影响[J]. 钛工业进展, 2017, 34(4): 33-38.
LUO Xuekun, AI Yingjun, WANG Xin, et al. Effect of shot peening on fatigue property and surface integrity of TB6 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2017, 34(4): 33-38.
[7] UNAL O, MALEKI E, KARADEMIR I, et al. Effects of conventional shot peening, severe shot peening, re-shot peening and precised grinding operations on fatigue performance of AISI 1050 railway axle steel[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 155: 106613.
[8] SOYAMA H, CHIGHIZOLA C R, HILL M R. Effect of compressive residual stress introduced by cavitation peening and shot peening on the improvement of fatigue strength of stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116877.
[9] YANG S, ZENG W, YANG J S. Characterization of shot peening properties and modelling on the fatigue performance of 304 austenitic stainless steel[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 137: 105621.
[10] LUO X K, DANG N, WANG X. The effect of laser shock peening, shot peening and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2021,

153: 106465.
[11] FANG T H, LI W L, TAO N R, et al. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper[J]. Science, 2011, 331(6024): 1587-1590.
[12] 卢柯. 梯度纳米结构材料[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 1-10.
LU Ke. Gradient nanostructured materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 1-10.
[13] 贺琼瑶,吴桂林,刘聪,等. 表面纳米化技术制备梯度纳米结构金属材料的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 267-276, 295.
HE Qiongyao, WU Guilin, LIU Cong, et al. Research progress on gradient nanostructured metals prepared by surface nanocrystallization technique[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 267-276, 295.
[14] MEYERS M A, MISHRA A, BENSON D J. Mechanical properties of nanocrystalline materials[J]. Progress in Materials Science, 2006, 51(4): 427-556.
[15] GLEITER H. Nanostructured materials: Basic concepts and microstructure[J]. Acta Materialia, 2000, 48(1): 1-29.
[16] JEONG D H, GONZALEZ F, PALUMBO G, et al. The effect of grain size on the wear properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(3): 493-499.
[17] WANG Z, GAO C F, LIU Z Q, et al. Investigation of microstructural evolution in a selective laser melted Ti-6Al-4V alloy induced by an ultrasonic surface rolling process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138696.
[18] LI X Y, LU L, LI J G, et al. Mechanical properties and deformation mechanisms of gradient nanostructured metals and alloys[J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5(9): 706-723.
[19] LI W L, TAO N R, LU K. Fabrication of a gradient nano-micro-structured surface layer on bulk copper by means of a surface mechanical grinding treatment[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(5): 546-549.
[20] YANG J, LIU D X, ZHANG X H, et al. The effect of ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue property of GH4169 superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105373.
[21] WANG C, WANG L, WANG C L, et al. Dislocation density-based study of grain

- refinement induced by laser shock peening[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105827.
- [22] KARIMI M, TOROGHINEJAD M R, DUTKIEWICZ J. Nanostructure formation during accumulative roll bonding of commercial purity titanium[J]. *Materials Characterization*, 2016, 122: 98–103.
- [23] WU Y, SUN Z, BRISSET F, et al. In-situ EBSD investigation of thermal stability of a 316L stainless steel nanocrystallized by surface mechanical attrition treatment[J]. *Materials Letters*, 2020, 263: 127249.
- [24] NOVELLI M, BOCHER P, GROSIDIER T. Effect of cryogenic temperatures and processing parameters on gradient-structure of a stainless steel treated by ultrasonic surface mechanical attrition treatment[J]. *Materials Characterization*, 2018, 139: 197–207.
- [25] HAN K, LI X Q, LIU X C, et al. Bending compensated surface mechanical grinding treatment overcoming the strength-ductility trade-off in thin copper sheet[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832: 142391.
- [26] CARNEIRO L, WANG X G, JIANG Y Y. Cyclic deformation and fatigue behavior of 316L stainless steel processed by surface mechanical rolling treatment[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105469.
- [27] LOU S, LI Y, ZHOU L, et al. Surface nanocrystallization of metallic alloys with different stacking fault energy induced by laser shock processing[J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 320–326.
- [28] LAINÉ S J, KNOWLES K M, DOORBAR P J, et al. Microstructural characterisation of metallic shot peened and laser shock peened Ti–6Al–4V[J]. *Acta Materialia*, 2017, 123: 350–361.
- [29] REN X D, ZHOU W F, LIU F F, et al. Microstructure evolution and grain refinement of Ti–6Al–4V alloy by laser shock processing[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 363: 44–49.
- [30] MA X L, HUANG C X, MOERING J, et al. Mechanical properties of copper/bronze laminates: Role of interfaces[J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 43–52.
- [31] MA X L, HUANG C X, XU W Z, et al. Strain hardening and ductility in a coarse-grain/nanostructure laminate material[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 103: 57–60.
- [32] ZHANG L, CHEN Z, WANG Y H, et al. Fabricating interstitial-free steel with simultaneous high strength and good ductility with homogeneous layer and lamella structure[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 141: 111–114.
- [33] LU K. Nanomaterials. making strong nanomaterials ductile with gradients[J]. *Science*, 2014, 345(6203): 1455–1456.
- [34] 段保华, 张柯, 刘平. 纯铜表面纳米化的微观结构演化及其力学性能研究[J]. *有色金属材料与工程*, 2019, 40(4): 19–27.
- DUAN Baohua, ZHANG Ke, LIU Ping. Study on microstructure evolution and mechanical properties of surface nanocrystallization of pure copper[J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2019, 40(4): 19–27.
- [35] 何东, 李强, 王海波, 等. 梯度层含量与应变速率对梯度纳米结构铜变形行为的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(5): 695–699, 694.
- HE Dong, LI Qiang, WANG Haibo, et al. Influences of gradient layer volume fraction and strain rate on plastic deformation of gradient nanostructured copper[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, 36(5): 695–699, 694.
- [36] LU W J, LUO X, NING D, et al. Excellent strength-ductility synergy properties of gradient nano-grained structural CrCoNi medium-entropy alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 112: 195–201.
- [37] LEI Y B, WANG Z B, ZHANG B, et al. Enhanced mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel by pre-forming a gradient nanostructured surface layer and annealing[J]. *Acta Materialia*, 2021, 208: 116773.
- [38] 谢小龙, 杨军, 邹德宁, 等. 马氏体组织对 SFPB 处理双相钢表面纳米结构及力学性能的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(12): 92–98.
- XIE Xiaolong, YANG Jun, ZOU Dening, et al. Influence of martensite characteristics on surface nanostructure and mechanical properties of dual phase steel processed by SFPB[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(12): 92–98.
- [39] 夏双五, 刘勇, 吕坚. 梯度纳米结构镁合金[J]. *中国材料进展*, 2016, 35(11): 825–834.
- XIA Shuangwu, LIU Yong, LÜ Jian. The gradient nano structure of Mg alloys[J]. *Materials China*, 2016, 35(11): 825–834.
- [40] 陈正阁, 武永丽, 薛全喜, 等. 激光冲击强化对片层 TC11 钛合金组织和性能的影响[J/OL]. *表面技术* [2022–07–18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20211112.1515.014.html>.
- CHEN Zhengge, WU Yongli, XUE Quanxi, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and properties of TC11 titanium alloy with lamellar microstructure[J/OL]. *Surface Technology* [2022–07–18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20211112.1515.014.html>.
- [41] SHI X Y, LIU Y, LI D J, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an Mg-Gd alloy subjected to surface mechanical attrition treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 630: 146–154.
- [42] WU X L, JIANG P, CHEN L, et al. Extraordinary strain hardening by gradient structure[J]. *PNAS*, 2014, 111(20): 7197–7201.
- [43] LIN Y, PAN J, ZHOU H F, et al. Mechanical properties and optimal grain size distribution profile of gradient grained nickel[J]. *Acta Materialia*, 2018, 153: 279–289.
- [44] CHENG Z, ZHOU H F, LU Q H, et al. Extra strengthening and work hardening in gradient nanotwinned metals[J]. *Science*, 2018, 362(6414): 1–8.
- [45] SHAO C W, ZHANG P, ZHU Y K, et al. Simultaneous improvement of strength and plasticity: Additional work-hardening from gradient microstructure[J]. *Acta Materialia*, 2018, 145: 413–428.
- [46] ZHOU X, LI X Y, LU K. Strain hardening in gradient nano-grained Cu at 77K[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 153: 6–9.
- [47] ZHANG Y S, HAN Z, WANG K, et al. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper[J]. *Wear*, 2006, 260(9–10): 942–948.
- [48] AMANOV A, LEE S W, PYUN Y S. Low friction and high strength of 316L stainless steel tubing for biomedical applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 71: 176–185.
- [49] 沈明学, 容康杰, 刘德佳, 等. 表面机械滚压处理(SMRT)316L 不锈钢梯度纳米层在腐蚀介质下的摩擦学行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(6): 746–753.
- SHEN Mingxue, RONG Kangjie, LIU Dejia, et al. Tribological behavior of nanocrystalline layer on 316L stainless steel subjected to surface mechanical rolling treatment under corrosion environment[J]. *Tribology*, 2020, 40(6): 746–753.

[50] 袁俊瑞, 徐佳, 周振宇, 等. 滚压诱导纯铜表面梯度纳米结构磨损行为研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24): 49-54.

YUAN Junrui, XU Jia, ZHOU Zhenyu, et al. Study on wear behavior of gradient nanocrystalline structure on pure copper surface induced by burnishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24): 49-54.

[51] ZHOU J, SUN Z, KANOUTÉ P, et al. Effect of surface mechanical attrition treatment on low cycle fatigue properties of an austenitic stainless steel[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 309-317.

[52] PANDEY V, CHATTOPADHYAY K, SANTHI SRINIVAS N C, et al. Role of ultrasonic shot peening on low cycle fatigue behavior of 7075 aluminium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103:

426-435.

[53] CHEN G, GAO J W, CUI Y, et al. Effects of strain rate on the low cycle fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy processed by SMAT[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 536-546.

[54] HUANG H W, WANG Z B, LU J, et al. Fatigue behaviors of AISI 316L stainless steel with a gradient nanostructured surface layer[J]. Acta Materialia, 2015, 87: 150-160.

[55] YANG L, TAO N R, LU K, et al. Enhanced fatigue resistance of Cu with a gradient nanograined surface layer[J]. Scripta Materialia, 2013, 68(10): 801-804.

[56] 吴宇坤, 张帅锋, 王启, 等. 梯度纳米结构钛管的拉-扭双轴疲劳行为研究[J]. 焊管, 2018, 41(12): 1-8.

WU Yukun, ZHANG Shuaifeng, WANG

Qi, et al. Study on biaxial fatigue behavior of the gradient nano-structured titanium tube[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(12): 1-8.

[57] LIU Z P, ZHANG H X, YAN Z F, et al. Cyclic deformation and fatigue behavior of 7075-T651 Al alloy with a gradient structure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 822: 141669.

[58] YASUOKA M, WANG P P, ZHANG K Y, et al. Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 218: 93-98.

通讯作者: 薛红前, 教授, 博士, 研究方向为结构材料疲劳与断裂、装配与连接技术等。

Effect of Gradient Microstructure on Mechanical Properties After Surface Strengthening of Metals

QIN Zhi, LI Bin, ZHANG Han, XUE Hongqian

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Materials with a gradient microstructure after surface strengthening have received a lot of attention due to their excellent mechanical properties. This paper reviews the preparation of gradient microstructures, their effects on mechanical properties (strength-plasticity, work hardening, friction wear and fatigue properties). Firstly, the mechanism of gradient microstructure formation and preparation methods are summarised according to the different principles of process preparation. Secondly, recent progress in the study of the mechanical properties of gradient microstructures (strong plasticity, work hardening, friction wear) and the analysis of the enhancement mechanism are summarised, while the anomalous test phenomena are explained. The reasons for the improvement of low and high cycle fatigue properties of metallic materials are comprehensively analyzed from the aspects of the gradient microstructure and residual stresses formed after surface strengthening. Finally, some of the current problems faced by gradient microstructure metals and future research directions are pointed out.

Keywords: Surface strengthening; Gradient microstructure; Preparation process; Mechanical properties; Fatigue properties
(责编 古京)