

激光冲击强化和时效处理对 AZ80 镁合金形变孪晶及析出相的影响

张青来¹ 郑玄玄¹ 邵 伟¹ 张冰昕² 韩伟东³ 刘 惠¹

¹江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

²上海交通大学密西根学院, 上海 200240

³宝鸡市博信金属材料有限公司, 陕西 宝鸡 721013

摘要 采用固溶+激光冲击强化(LSP)+时效方法,研究了AZ80镁合金轧板和铸态组织参数(形变孪晶和析出相)和残余应力演变,以及时效处理对其影响。结果表明,固溶+LSP处理后轧板强化层内形成高密度孪晶的形变带,铸态合金高密度形变孪晶产生于晶界附近,均产生于应力集中和高能区域,产生一次或多次孪晶,呈平行或交叉孪晶。时效后连续析出大量的颗粒状 β 相,其优先于形变带内、孪晶界面或片状孪晶内析出,与晶粒尺寸相关。时效后轧板和铸态冲击表面残余压应力分别为由-100.8 MPa和-68.9 MPa转变为-67.8 MPa和-35.9 MPa,即应力松弛为32.7%和48.7%。LSP次表层硬化效果明显,其时效强化效果较弱。残余压应力及其热稳定性是影响高密度形变孪晶的形成主要因素之一。

关键词 激光技术; AZ80镁合金; 激光冲击强化; 时效处理; 形变孪晶; 析出相

中图分类号 TN249; TG146.2+

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0106001

Effect of Laser Shock Peening and Aging Treatment on Deformation Twins and Precipitates of AZ80 Magnesium Alloy

Zhang Qinglai¹ Zheng Xuanxuan¹ Shao Wei¹ Zhang Bingxin² Han Weidong³ Liu Hui¹

¹School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²Joint institute, University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

³Bao Ji Bo Xin Metal Materials Ltd, Baoji, Shaanxi 721013, China

Abstract In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on mechanical properties of magnesium alloys, the tensile stress-strain curves and microstructures of AZ31 and AZ80D-T6 magnesium alloys are investigated by electronic universal tensile machine and with Nd: glass laser with the wavelength of 1064 nm and pulse width of 20 ns. The results show that after LSP, the tensile strength of AZ80-T6 and AZ31 alloys are increased by 4.6% and 15.7%, the surface hardness are increased by 22.7% and 31.8%, respectively. The strengthening effect of LSP on AZ31 is more significant than AZ80D-T6. The LSP generates high value residual compressive stress and high-density twins as well as the lamellar or short columnar or dynamic precipitation β phases. The grains are refined and the ultrafine grains are formed. The effect of pre-aged β precipitates on LSP strengthening effect and tensile fracture characteristics are discussed.

Key words laser technique; AZ80 magnesium alloy; laser shock processing; aging treatment; deformation twins; precipitates

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 340.7840

1 引 言

激光冲击强化(LSP)作为表面改性技术,是利用激光在纳秒时间内产生的超高压,使表层产生剧烈的

收稿日期: 2015-07-06; 收到修改稿日期: 2015-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(51175231)

作者简介: 张青来(1962—),男,博士,教授,主要从事镁合金,钛合金及激光加工技术方面的研究。

Email: zhangql196210@163.com

塑性形变,主要以滑移和孪生变形机制进行,与冲击载荷大小及其分布相关^[1]。关于LSP机理及其应用开展了大量的试验工作,但对组织结构与变形机理的关联研究较少^[1-3]。

LSP处理能显著提高镁合金的力学性能、耐腐蚀性、疲劳性能及热稳定性,其原因在于高幅值残余应力产生、高密度位错及亚晶或纳米晶形成^[4-9]。张青来等^[8,10-11]对LSP过程中镁合金微观结构演变及其变形机理进行了研究,在AZ31镁合金LSP表层观察到大量的高密度位错和孪晶,而在时效型AZ91合金表层却少见孪晶的存在,这说明滑移和孪生是镁合金激光冲击剧烈塑性形变条件下的变形机制,但受到析出相、变形速度等因素的影响。

关于镁合金塑性变形过程中滑移和孪生变形机制,通常利用透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)及金相等手段研究挤压、轧制和温成形中孪晶和位错形成及其相互作用^[12-14]。经检索,关于镁合金LSP形变强化层内孪生的形成机制以及孪晶形状和分布等未见系统研究,弄清楚LSP诱导的残余应力与滑移、孪生和析出相的相互关系,观察在时效过程中形变孪晶特征,有助于理解镁合金LSP强化及LSP+时效复合强化。

本文将以AZ80镁合金为研究对象,针对轧制板材和连铸棒材靶材(两种不同晶粒尺寸)进行LSP处理,仅借助金相观察研究时效前后LSP强化层组织参数(孪晶及析出相)演变,并通过残余应力讨论了形变孪晶和析出相的形成机制。

2 试 验

2.1 试验材料与试验方法

试验选用AZ80D镁合金轧制板材和连铸棒材(直径为90 mm)。在LSP处理前,靶材进行热处理。连铸棒材均匀化处理:415 °C/16 h/WQ;轧制板材固溶处理(T4)制度:410 °C/3 h/WQ;时效处理(T6)制度:为了防止时效过程中试样冲击表面氧化和影响残余应力测试值,首先将试样封闭在真空管内,然后加热至170 °C,保温16 h后空冷(AC)。

在激光冲击过程中,用流动的去离子水作为约束层,选用厚度为100 μm的铝箔作为吸收层,光斑搭接率为50%。激光器参数:光斑直径为3 mm,脉宽20 ns,波长为1064 nm。激光脉冲能量选择5 J,对应功率密度为3.53 GW/cm²。激光功率密度 I 计算公式为: $I = 4E/(\pi\tau D^2)$,其中 E 为激光脉冲能量, τ 为脉宽, D 为光斑直径。

采用X350A型X射线应力测定仪测试激光冲击靶材的表面残余应力。运用HVS-1000Z型显微硬度仪测量显微硬度。利用LEICA DM2500M型正置透反射光学显微镜进行观察和分析。

3 结果与分析

3.1 LSP处理对轧制板材孪晶形成的影响

3.1.1 固溶后微观组织

图1为固溶后AZ80镁合金轧制板材的微观组织。AZ80合金板材热轧和随后冷却过程中,沿晶界不连续析出少量的 β -Mg₁₇Al₁₂相,而且伴随着孪晶和形变带的产生。轧制板材形变带的出现是滑移和孪生共同作用的结果^[7]。为了使Mg₁₇Al₁₂析出相溶解和固溶体Al原子溶入Mg基体,避免晶粒长大,对热轧板进行了固溶处理(410 °C/3 h/WQ)。由于固溶时间较短,仍残有部分形变带[图1(a)]。在高倍显微镜下清楚地观察到,形变带内部产生具有细长的片状孪晶,其贯穿整个晶粒,且同一晶粒内部的孪晶大都相互平行[见图1(b)]。这种孪晶属于拉伸孪晶^[14],拉伸孪晶片层可以有效切割晶粒,使得组织产生类似细晶强化的效果。同时还观察到

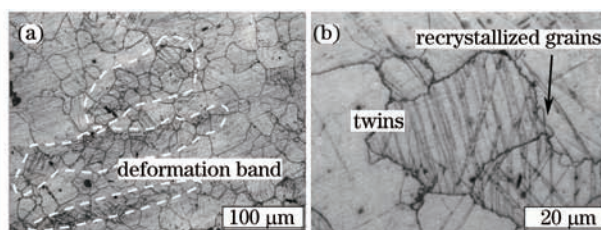


图1 AZ80-T4镁合金板材的微观组织

Fig.1 Microstructures of AZ80-T4 magnesium alloy sheet

再结晶晶粒,主要出现在孪晶片层较集中的形变带区域以及晶界(GBs)附近,而这些区域应力集中显著,有足够的应变储存能,为静态再结晶提供了驱动力,而部分孪晶保持了其层片状结构,没有发生静态再结晶。

3.1.2 LSP 形变孪晶

图2为激光冲击后轧制AZ80镁合金的显微组织。由图2可知,LSP强化层产生了具有高密度孪晶特征的多边形变带(深颜色区域),并构成网状形变带结构,而且孪晶密度分布极其不均匀,其中形变带内部的孪晶密度高于其他冲击影响区,离冲击表面越近,孪晶密度越高,如图2(a)所示。镁合金具有典型的密排六方(HCP)结构和较低的层错能,基面和棱柱面滑移系均为 a 位错滑移,滑移方向平行于基面而垂直于 c 轴,无法协调 c 轴方向在变形过程中产生的应变,孪生萌生于滑移受阻而引起应力集中,应力集中将导致大量的孪晶形核和长大^[13,15]。在孪晶的生长过程中,由于50%光斑搭接率,表层同一晶体内受到多次连续的高能高速激光冲击作用,相邻或相间的孪晶面相继开动,从而产生孪晶交割,而已有的孪晶(图1)更容易发生二次或多次孪生,协调晶体取向并在一定程度上释放应力集中,激发进一步滑移,使滑移和孪生交替进行,从而形成高密度孪晶变形带。根据形变带腐蚀颜色可确定,LSP强化层厚度约为1.0 mm。

在高倍显微镜下可清楚地观察到,形变带内部含有大量的形变孪晶,而且晶粒内产生高密度孪晶,孪晶取向各不相同,多个变体同时存在,如平行孪晶和交叉孪晶等,如图2(b)和(c)所示;低密度孪晶区域与形变带内的孪晶区别在于分布、大小及形状,如晶粒内部存在大量的细小片状平行孪晶,互相垂直的孪晶,甚至在小晶粒内存在高密度微小片状孪晶[图2(d)],因为孪生主要发生在粗晶内部,而细晶镁合金仅在变形速度极快时才会产生大量孪晶^[13,16]。LSP处理的镁合金表面塑性变形是一个近似压缩过程,产生的形变孪晶应属于压缩孪晶{1011}^[15]。

硬度分析表明,相同冲击截面[图2(a)]中形变带和非形变带的硬度 $HV_{0.1}$ 分别为89.9 HV和66.9 HV,即形变孪晶区硬度提高了34.4%左右,而次表层形变带硬度值达到94.6 HV。因此,高密度形变孪晶主要可归于激光冲击剧烈塑性形变及高幅值残余压应力^[10],而不同位向孪晶与重复冲击次数和光斑搭接率密切相关。

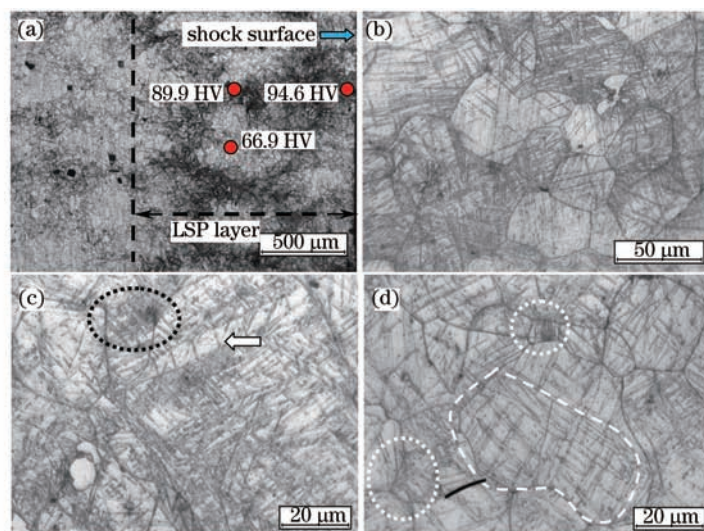


图2 LSP处理AZ80镁合金板材显微组织

Fig.2 Microstructures of AZ80 alloy sheet by LSP

由于LSP诱导镁合金产生的高密度位错^[4],孪晶很难穿过它,必须考虑孪晶与位错之间的相互作用,即位错阻碍孪晶的生长,以及残余压应力的作用,这也是本课题下一步研究内容。

3.1.3 时效对LSP形变孪晶的影响

图3所示为时效处理后轧制AZ80镁合金LSP强化层的显微组织。由图3可清楚地观察到,经170℃/16h真空时效处理后,强化层仍保留着大量的形变带,时效前后冲击表层形变带显微硬度分别为94.6 HV和95.8 HV,而影响区形变带硬度分别为89.9 HV和86.1 HV,硬度增量均未发生明显变化,这是时效强化、再结晶软化和残余应力松弛的共同作用结果,如图2(a)和3(a)所示。

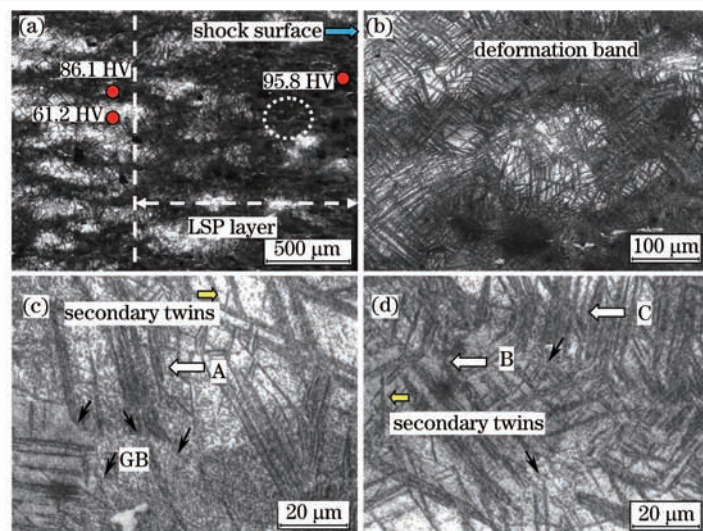


图3 时效处理对LSP处理的AZ80镁合金板材显微组织的影响

Fig.3 Effect of aging on microstructures of AZ80 alloy sheet by LSP

在高倍金相显微镜下同样可观察到,形变带内部产生高密度孪晶,如图3(a)所示。图3(b)为图3(a)中虚线区域放大图,在形变带内及其附近形成高密度孪晶和高密度析出相,且孪晶片层间位向混乱,既有平行孪晶又存在交叉孪晶。在形变带内和非形变带区域均观察到大量的平行孪晶(白色箭头A,B和C所指),其一端源于GB(黑色箭头所指),与GB位向约为 60° ,而在一次孪晶间存在一定数量的二次和三次孪晶,如图3(c)和(d)所示。

对比图2和3中孪晶特征,时效后孪晶片层变宽,此时孪晶包括相变孪晶和压缩孪晶两种,即冲击表层产生的残余压应力使得压缩孪晶具有良好的热稳定性,得以在 $170^\circ\text{C}/16\text{h}$ 时效过程保留下来,而相变孪晶则是由于 β 相析出引起的。试验结果^[12]表明,经 $200^\circ\text{C}/10\text{h}$ 时效处理后,AZ80镁合金压缩变形后的变形带消失,这是因为压缩变形时产生的残余应力在时效保温过程中逐渐消失。这也进一步证明了激光冲击可使形变孪晶具有良好的热稳定性。

由图3还可观察到,合金中弥散连续析出大量的颗粒状 β 相,析出相优先在应力集中的形变带内、孪晶界面和孪晶片层内析出,从而产生高密度的颗粒析出相。孪晶界作为一种特殊晶界,相对基体能量较高,可为析出相形核提供能量,使得孪晶界面析出高密度的 β 相。根据文献[17],AZ80合金高温(310°C)时效时,颗粒状连续析出 β 相在晶界及孪晶界面等能量较高处形核和生长,形核初期生长较快,当长大至 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 时已基本达到平衡即停止生长,而且这种 β 相与基体没有确定的位向关系,与基体的界面为非共格界面,且界面能较高。由此可得出,LSP诱导的高密度孪晶界可为 β 相析出提供更高的界面能,则在 170°C 较低时效温度条件下析出了高密度的颗粒状 β 相。

在时效处理前后,LSP强化层具有不同取向的高密度孪晶变体。根据文献[17],AZ80镁合金沿特定方向拉伸或压缩时, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生会成为主导的变形模式,而在 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶面上产生6个等价的孪晶变体。孪晶变体间存有约 60° 的取向差,那么多种孪晶变体的激活会增加孪晶片层的交互作用而限制孪晶的长大;如果单个晶内有一种孪晶变体(0° 取向差)或一个孪晶变体对(7.4° 取向差),那么孪晶片层几乎是平行的,可避免孪晶片层交互作用而有利于孪晶的长大。

3.2 LSP处理对连铸镁合金孪晶形成的影响

3.2.1 均匀化对微观组织的影响

图4为 415°C 保温 16h 均匀化处理后连铸AZ80镁合金显微组织。由图4可以看出,均匀化铸态组织中分布于晶界及枝晶间的粗大和网状 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相^[7]几乎完全溶解于 $\alpha\text{-Mg}$ 基体中,形成单相过饱和的 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体,随后冷却过程中,少量的Al以沉淀相 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 脱溶析出,残留在晶界或晶内处,晶粒粗大且不均匀,其尺寸范围 $100\sim 400\ \mu\text{m}$ 。

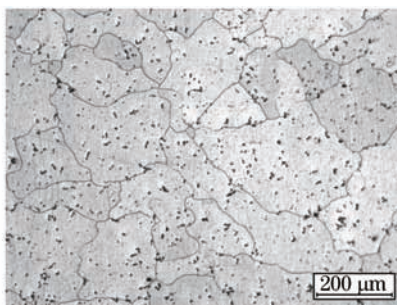


图4 均匀化后 AZ80 铸态镁合金微观组织

Fig.4 Microstructure of AZ80 casting alloy after homogenization

3.2.2 LSP 形变孪晶

图5所示为铸态 AZ80 镁合金 LSP 处理后的显微组织。由图5可见,在超高速高压激光冲击作用下,冲击表层发生剧烈的塑性形变,使晶界处产生高度应力集中和高密度孪晶(深颜色),强化层也达到 1.0 μm 左右,如图5(a)所示。LSP 后晶粒内部产生平行的片状孪晶,孪晶位相基本保持一定规律,与冲击方向呈 65°左右,区别于轧制镁合金(图3),如图5(b)~(f)所示。对于粗大等轴晶粒,其一端始于晶界,另一端在晶内,且片状孪晶间存在大量的二次形变孪晶,而二次孪晶内部可观察到三次孪晶,如图5(b)和(c)所示;对于粗大片状孪晶来说,平行孪晶一端优先在孪晶自由程较短的晶界形核和长大,另一端在晶内或横跨晶粒,如图5(d)所示。在较小晶粒内部观察到细小的片状高密度孪晶,其特征与轧制镁合金中孪晶[图2]类似,如图5(e)所示。在冲击影响区,由于残余压应力较小,形成了密度小且粗大的等距平行孪晶,而且二次孪晶密度较小,与一次孪晶位相关系近似为 45°,如图5(f)所示。因此,高密度孪晶主要产生于压应力集中和能量高的冲击表层内晶界附近和片状孪晶内部。

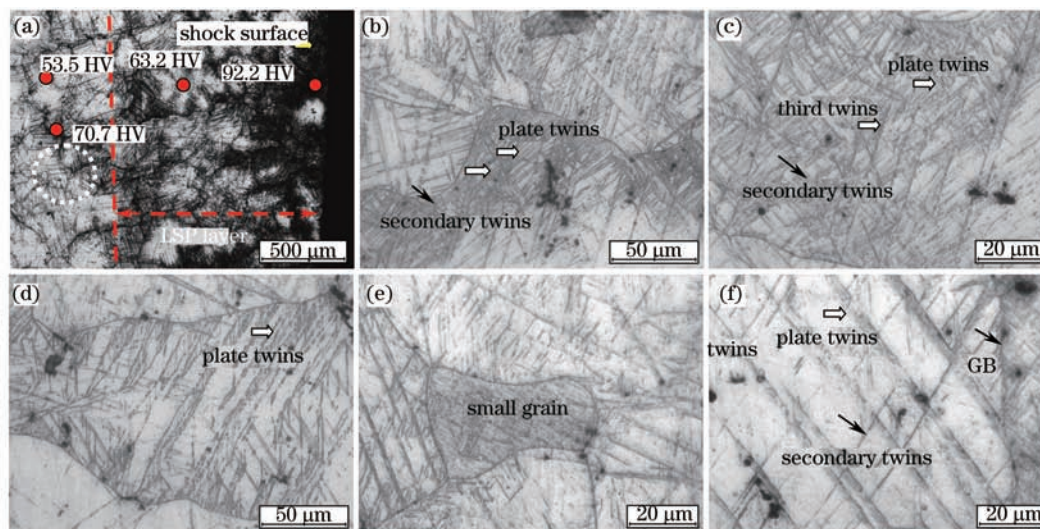


图5 LSP 处理铸态 AZ80 镁合金显微组织

Fig.5 Microstructures of AZ80 casting alloy by LSP

3.2.3 时效对 LSP 形变孪晶的影响

图6所示为经 LSP+时效后铸态 AZ80 镁合金的显微组织。由图6可见,LSP 试样在真空条件下经 170 °C/16 h/AC 时效处理后,片状孪晶内部连续析出大量的颗粒状 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相[见图6(c)和(d)],冲击强化层析出相的体积分数(深颜色)远大于冲击影响区。对比图3和6中析出相,铸态合金(粗晶)析出的 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相主要在片状孪晶内部析出,而轧制板材合金(细晶)的 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相优先在应力集中的形变带、孪晶界面和孪晶片层内析出,这是因为晶粒尺寸越小,其体积分数越大,晶界和孪晶界处应力集中程度和界面能量也越高, β - $Mg_{17}Al_{12}$ 析出相也越多。

在超高速高压激光冲击作用下,冲击表层发生剧烈的塑性形变,使晶界处产生高度应力集中和高密度

孪晶,强化层可达 $1.0\ \mu\text{m}$ 左右(深颜色区域),如图6(a)所示。

时效后激光冲击截面硬度 $HV_{0.1}$ 从表面到基体呈现出递减的趋势,最大硬度值位于材料表面,如冲击区高密度孪晶和析出相微区(深颜色)的硬度值为 $88.8\ \text{HV}$,冲击影响区硬度为 $54.6\ \text{HV}$,LSP和时效双重强化使表层硬化程度提高 62.6% 左右,如图6(a)所示。除了晶粒细化和高密度位错的影响因素外,强化层的硬度提高可能是因为剧烈的塑性应变硬化而致。

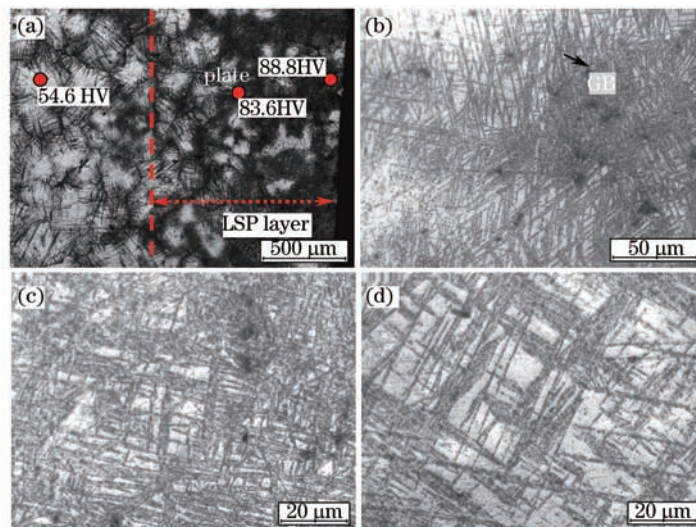


图6 时效对LSP处理AZ80铸态镁合金显微组织的影响

Fig.6 Effect of aging on microstructures of AZ80 casting alloy by LSP

3.3 讨论

在加工和变形过程中,密排六方结构的镁合金很容易产生织构,在室温下仅有基面滑移和 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生是最易开动的变形模式。孪晶在镁合金变形过程中起到重要的作用,晶粒尺寸主要通过滑移和孪生的竞争机制来实现对镁合金室温塑性变形的影响。对大小晶粒并存的镁合金来说,在一般应变速率变形过程中,孪生主要发生在粗晶内部,由于粗晶内位错滑移自由度较大,晶界附近应力集中而诱导产生更多的孪晶,而细晶仅速度极快时才产生大量孪晶^[13,16]。

激光冲击与常规形变的主要区别:超高能量、超高应变速率和形变区域约束高。由于应变速率高达 10^7s^{-1} 以上,激光冲击表层内部将产生剧烈的应变效应,如孪晶和位错增殖等微结构演变。在本试验中,分别以轧制板材和铸态镁合金作为细晶和粗晶材料,来探讨晶粒大小对时效前后LSP表层孪晶演变。试验结果表明,在轧制和铸态镁合金两种LSP表层均观察到明显的孪晶现象,如图2和图5所示。粗晶合金产生的高密度孪晶多集中在晶界附近,而对细晶合金来说,在激光冲击超高速率超短时间内,不仅在应力集中的晶界附近,而且在晶内均可形成大量的形成孪晶,这归于激光诱导的高幅值残余压应力对其贡献,进一步证明了晶粒尺寸和形变速率对LSP诱导的形变孪晶密度影响程度,这是与常规形变产生的孪晶特征不同之处^[16]。

根据文献[1],在LSP过程中激光能量和冲击压力在空间上均呈高斯分布,形变孪晶的形成仅在微区形变,冲击区材料的塑性变形机制主要为孪生,其原因是:一方面,滑移系的激活和移动受到抑制,孪生成为滞留应变的主要方式;另一方面,形变时间极短,位错的增殖和长程迁移变得困难,为了滞留应变,高应变率加载下的孪生要比低应变率加载表现得更为活跃。这说明了,本试验中LSP表层观察到的高密度孪晶变形区内主要以孪生方式进行塑性形变。

目前,对于析出相和孪生的交互作用的研究还不深入,特别是时效处理对LSP处理后形变孪晶的变形机制的影响研究甚少。析出相对镁合金室温塑性变形具有重要的影响,主要通过位错滑移和孪生的交互作用来影响塑性变形,一般析出相不改变其变形机制,主要表现在其对变形机制的阻碍作用^[13]。

试验表明,LSP诱导的形变处理后进行时效处理,在强化层内仍保留着稳定的形变孪晶带和高密度形变孪晶,且孪晶内弥散分布着大量的颗粒状连续析出相,除位错滑移外,时效析出相对LSP处理后形变孪晶及孪晶界具有钉扎的作用,不仅影响孪生行为和变形织构演变,而且由于预置入不同取向的形变孪晶,会改变

镁合金的各向异性,如析出相对孪晶行为的影响主要是其对孪生形核和长大的影响,同时提高了材料屈服强度,改善了材料各向异性及拉压不对称性^[13]。

为了更好地讨论残余应力对LSP形变孪晶及其热稳定性的影响,测出时效前后LSP表面残余应力值,如表1所示。由表可知,轧制和铸态镁合金激光冲击表面的残余压应力分别为-100.8 MPa和-68.9 MPa,这是导致LSP表层高密度孪晶形成的主要原因。经170 °C/16 h/AC真空时效处理后,轧制和铸态镁合金冲击表面残余压应力分别由-100.8 MPa和-68.9 MPa转变为-67.8 MPa和-35.9 MPa,即应力松弛为32.7%和48.7%,说明粗晶镁合金残余应力松弛相对较快,但LSP表层时效后仍存有足够的残余压应力保证时效时产生高密度的孪晶(见图3和图6),这主要归结于残余压应力的热稳定性^[2-3,8]。由于时效温度较低,在170 °C保温过程中的内应力调整对形变孪晶的微观损伤不明显,再者会形成时效孪晶,由于测试手段有限无法区别形变孪晶和析出孪晶,同时发现,因为再结晶软化和时效析出强化作用相互抵消,时效处理对LSP强化层硬化效果影响较小。

表1 AZ80镁合金表面残余应力测试值

Table 1 Tested value of surface residual stresses of AZ80 alloy

State	Heat treatment	Residual stress before aging /MPa	Residual stress after aging /MPa
Rolling	Solution	39.8±17	46.9±9
Rolling	Solution+LSP	-100.8±18	-67.8±23
Casting	Solution	56.4±22	85.9±21
Casting	Solution+LSP	-68.9±23	-35.9±6

4 结 论

采用LSP方法对轧制和铸态AZ80镁合金进行固溶、表面强化及时效处理,研究了孪晶和析出相及残余应力演变,得出如下结论:

1) 固溶+LSP处理后轧制合金强化层内产生具有高密度孪晶的形变带,离冲击表面越近,孪晶密度越高,产生一次或多次孪晶,其有不同位向关系,如平行或交叉孪晶。时效后连续析出大量的颗粒状β相,其优先于应力集中和高能量的形变带内、孪晶界面和孪晶内析出;

2) 固溶+LSP处理后铸态合金强化层内高密度孪晶主要产生于应力集中的晶界附近;时效后颗粒状β相产生于高能量的片状孪晶内;

3) 时效后轧制和铸态冲击表面残余压应力分别为由-100.8 MPa和-68.9 MPa转变为-67.8 MPa和-35.9 MPa,即应力松弛为32.7%和48.7%。LSP次表层硬度达到88.8~95.8 HV,强化效果明显,时效对其影响较小。高密度孪晶的形成主要归结于残余压应力的贡献及其热稳定性。

参 考 文 献

- 1 Liu Yuanxun, Wang Xi, Wu Xianqian, *et al.*. Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel treated by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103004.
柳沉汛,王 曦,吴先前,等.激光冲击处理304不锈钢表面的形貌特征及其机理分析[J].中国激光,2013,40(1): 0103004
- 2 Lu Jinzhong, Zhang Yongkang, Gu Wei, *et al.*. Residual stress of K24 superalloy surface by laser multiple processing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2): 309-313.
鲁金忠,张永康,顾 韡,等.激光复合处理K24超合金表面残余应力[J].吉林大学学报(工学版),2008,38(2): 309-313.
- 3 Nie Xiangfan, He Weifeng, Wang Xuede, *et al.*. Effects of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1691-1696.
聂祥樊,何卫锋,王学德,等.激光冲击强化对TC17钛合金微观组织和力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2014,43(7): 1691-1696.
- 4 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin, *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803002.
黄 舒,周建忠,蒋素琴,等.AZ31B镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J].中国激光,2011,38(8): 0803002.
- 5 Li X C, Zhang Y K, Chen J F, *et al.*. Effect of laser shock processing on stress corrosion cracking behaviour of AZ31 magnesium alloy at slow strain rate[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(5): 626-630.

- 6 Zhang Qinglai, Qian Yang, An Zhibin, *et al.*. Study on electrochemical corrosion of magnesium alloys by LSP in NaCl solution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903002.
张青来, 钱 阳, 安志斌, 等. 基于激光冲击的镁合金在 NaCl 溶液中电化学腐蚀的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903002.
- 7 Chen X H, Huang X W, Pan F S, *et al.*. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZK60 Mg alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc, China, 2011, 21(4): 754-760.
- 8 Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.
- 9 Yang Genmei, Zhang Lingfeng, He Huanju. Effect of annealing on mechanical properties of AZ31 magnesium after laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0206002.
杨根妹, 张凌峰, 何换菊. 退火处理对激光冲击 AZ31 镁合金力学性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0206002.
- 10 Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Qian Yang, *et al.*. Study on high cycle fatigue properties and laser shock processing of AZ91D-T6 cast magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003008.
张青来, 吴铁丹, 钱 阳, 等. AZ91D-T6 铸造镁合金激光冲击强化和高周疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003008.
- 11 Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Zhang Bingxin, *et al.*. Experimental research of warm laser shock forming of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903002.
张青来, 吴铁丹, 张冰昕, 等. AZ31 镁合金激光冲击温成形试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903002.
- 12 Cai Gangyi, Deng Penghui, Wu Haihong. Effect of preageing process on microstructure and property of AZ80 magnesium alloy followed by thermomechanical treatment[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(S): 75-78.
蔡刚毅, 邓鹏辉, 吴海宏. 预时效对 AZ80 镁合金形变热处理组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(S): 75-78.
- 13 Song Bo, Xin Renlong, Liu Qing. Research progress on effect of precipitation on deformation mechanism of magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2719-2731.
宋 波, 辛仁龙, 刘 庆. 析出相对镁合金变形机理影响的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2719-2731.
- 14 Song B, Xin R L, Chen G, *et al.*. Improving tensile and compressive properties of magnesium alloy plates by pre-cold rolling[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(12): 1061-1064.
- 15 Yang P, Mao W M, Ren X P, *et al.*. Shear bands in magnesium alloy AZ31[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(5): 851-857.
- 16 Barnett M R, Keshavarz Z, Beer A G, *et al.*. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn[J]. Acta Materialia, 2004, 52(17): 5093-5103.
- 17 Tang Wei, Han Enhou, Xu Yongbo, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and properties of AZ80 magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(11): 1199-1206.
唐 伟, 韩恩厚, 徐永波, 等. 热处理对 AZ80 镁合金结构及性能的影响[J]. 金属学报, 2005, 41(11): 1199-1206.

栏目编辑: 张浩佳