

材料力学性能的激光调控

(邀请报告)

陈光南

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 介绍了几种调控材料力学性能的特种激光加工方法。所谓激光毛化,是利用高功率密度激光在轧辊表面制造指定形貌和粗糙度,该方法不仅可以改善轧辊的性能与功能,还可以通过冷轧工艺改善所轧薄板的质量与性能。所谓激光界面强化,是在电镀铬前先对基体进行激光离散热处理,以此影响电镀时该基体上镀层原子的沉积过程、细化镀层组织并优化其与基体的界面结构,从而提高镀层部件的性能和寿命。所谓激光辅助成形,则是利用激光热效应作用工件的局部区域,通过诱导弹性应力做塑性功,实现其塑性成形或改善其形状精度。

关键词 激光技术;离散加工;激光毛化;激光界面强化;激光辅助成形

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0601006

Regulation of the Mechanical Properties of Materials by Laser

Chen Guangnan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract Several special laser processing methods for regulating the mechanical properties of materials are introduced. The so-called laser texturing is to engrave the specify morphology and roughness on the surface of rolls using high-power-density laser. This method can not only improve the performance and function of the rolls, but also improve the performance of the rolled metal sheet by the cold rolling process. Using the laser strengthening method of coating interface, the coating and its interface structure between the coating and the substrate can be optimized through influencing the atomic deposition process while plating. The laser-assisted forming method is using the laser thermal effect to induce the elastic internal stress to do plastic work for forming the parts or improving accuracy of their shape.

Key words laser technique; discrete processing; laser texturing; laser interfacial strengthening; laser-assisted forming

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 140.3530; 160.0160

1 引 言

强度与韧性、表层与基底以及局部与整体的性能协同性,是决定金属工件使用性能和使用寿命的关键因素,也是材料加工和机械制造等行业中普遍存在的生产技术难题。

激光具有能量密度高、方向性和可控性强、能够在常规条件下实施加工等一系列优势,但也存在作用区域小和只适于表面处理的局限性。如何将这种局限转化为特色,发展可以兼顾增强与增韧、改形与改性、性能与功能且具更高加工效率的金属工件力学性能调控方法,是作者及其研究团队多年坚持的研究方向。本文将结合 3 个典型实例,介绍相关的

研究成果及其应用情况。

2 激光毛化方法及其应用

2.1 工程背景

生产冲压级优质毛面金属薄板需要采用毛面轧辊^[1~3]。但我国相关行业对此一直认识不足^[4],以致很长一段时间,即使引进了国外先进的轧制设备,与国外同类产品的质量相比,国产产品仍存在相当大的差距。

我国的轧辊激光毛化技术研发和应用工作,始于 20 世纪 90 年代初。1992 年,在首都钢铁公司钢铁研究所、中国大恒公司和北京吉普有限公司等单

收稿日期: 2011-03-10; 收到修改稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(59836220, 50471087, 10872199, 50901084)和中国博士后基金(20090460537)资助课题。

作者简介: 陈光南(1948—),男,博士,研究员,主要从事材料力学性能与激光加工等方面的研究。

E-mail: gnchen@imech. ac. cn

位的配合下,中国科学院力学研究所研制出我国首台 YAG 激光毛化设备,开发了针对冷轧辊的激光毛化工艺^[5~7],同年将其成功应用于我国第一家专门生产精密薄带钢的秦皇岛龙腾公司。不久,在武汉钢铁公司的配合下,华中科技大学也研制成功我国首台 CO₂ 激光毛化设备^[8]。1993 年,YAG 激光毛化轧辊技术成果被国家科委列为国家重点科技推广项目(《国家科技成果重点推广计划》,项目编号 I 4-1-4-22)。

2.2 轧辊激光毛化特点^[5,9]

轧辊激光毛化的技术原理是,用高重复频率和高功率密度脉冲激光(CO₂ 激光用机械方法调制脉冲,YAG 激光用 Q 开关调制脉冲),按照一定的分布(有规则或随机分布),逐点对轧辊表层材料进行微米尺度的熔凝加工,同时利用高压气流,按设定方向、位置和形态移动并堆积熔体。因此,所谓轧辊激光毛化加工,实际上是以激光和气流为手段,对轧辊表面进行的有一定图案和形貌要求的显微雕塑过程(见图 1、2)。

2.3 轧辊激光毛化延寿机制^[9]

轧辊激光毛化既可应用于平整工序,亦可应用于冷轧工序。

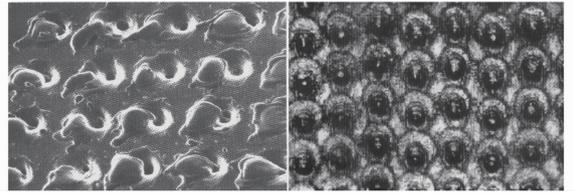


图 1 YAG 激光毛化花样(左:单脉冲;右:多脉冲)
Fig. 1 YAG laser texturing patterns (left: single pulse; right: multiple pulses)

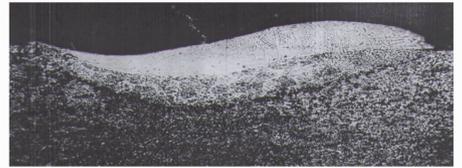


图 2 单脉冲激光毛化点剖面形貌(500×)
Fig. 2 Sectional profile under single pulse (500×)

对比实验结果(图 3)表明,在平整工序中,轧制对象是退火冷轧薄板,压下率一般小于 1%,激光毛化轧辊的磨损率远低于常用的喷丸毛化轧辊,其轧制产品的长度亦是后者的 2 倍以上[图 3(a)];在冷轧工序中,轧制对象是热轧坯板,压下率可超过 50%,与通常使用的普通辊(即砂轮打磨辊)相比,激光毛化轧辊的优势也相当显著[图 3(b)]。

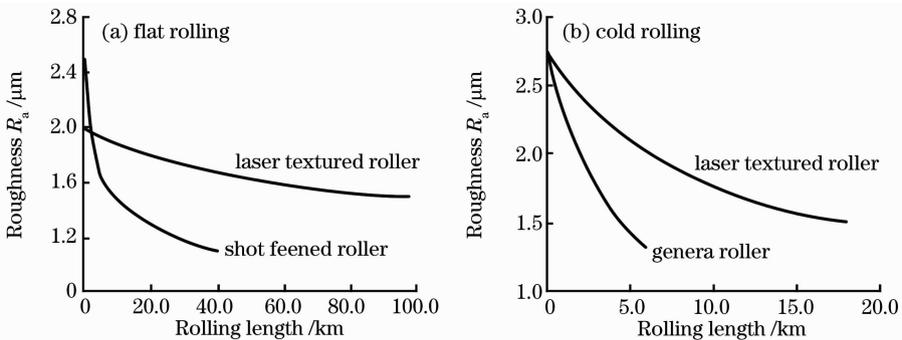


图 3 不同方法毛化轧辊的寿命比较

Fig. 3 Comparison of rolling lengths between different textured rolls

2.3.1 降低表层残余压应力强度(减压增韧)

冷轧工作辊多用 9Cr2Mo 等高强合金工具钢制造。淬火是提升其表层硬度和耐磨损能力的重要措施,但由此形成的残余压应力也会增大其表层的脆性和崩裂风险。工程上往往采用提高回火温度的办法来改善轧辊的韧性,但这是以牺牲其表层的硬度为代价的。

X 射线应力仪测试结果(图 4)表明,当激光毛化点间距与其直径相等时,轧辊表层的残余压应力强度随作用于毛化点的激光脉冲数的增加而下降,但只有在激光脉冲数大于 6 时,残余应力才会呈现

拉应力状态,即在一定的参数范围内,激光毛化可以显著降低轧辊表层的残余压应力强度,提高其韧性水平。

2.3.2 离散提升表层硬度(改性增强)

激光毛化轧辊时,激光功率密度可以达到甚至超过 $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$,脉冲激光离散作用于辊面,作用时间在 $1 \mu\text{s}$ 左右。毛化点内熔融物的冷却与凝固,主要依赖轧辊材料的良好热导率和轧辊自身巨大的热容量。不难理解,其冷却速度以及由此形成的凝固组织的细化程度和硬度水平,不仅远高于常规热处理,也明显高于连续激光加工。

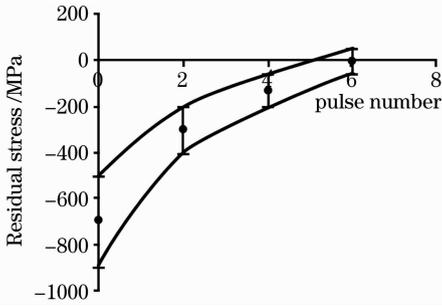


图4 激光脉冲数对辊面残余应力强度的影响
Fig. 4 Effects of the number of laser pulses on the residual stress

2.3.3 改善接触条件(改形减磨)

前面已经提到,激光毛化在轧辊表面形成的微结构,是离散分布的封闭微坑和相对光滑的凸包。轧辊轧制时,这种微结构会与轧件之间形成如图5所示的接触状态。由于相互咬合良好,双方不易发生滑动,既不易在轧件表面形成划痕和犁沟,轧辊自身也不易磨损。此外,由于是封闭型微坑,坑内的轧制液可在轧辊与轧件咬合后产生高压,既有利于保持其润滑作用,又有利于减小轧辊与轧件发生粘连的可能性。而粘连是薄板冷轧工序和退火薄板平整轧制工序中常见的一种有害现象。

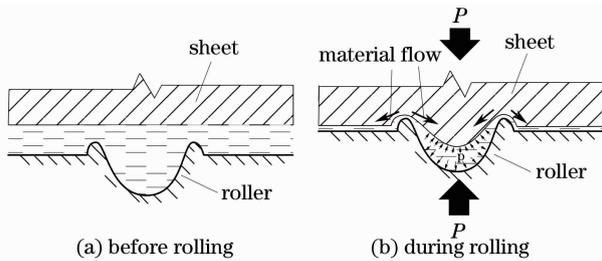


图5 辊面激光毛化形貌改善及其与轧件接触条件示意图

Fig. 5 Schematic for morphological improvement and contact condition

激光毛化区间距与工件耐磨损能力的实验表明^[10],激光强化区相切时,工件的磨损失重最小,即此时工件的耐磨损能力最强(见图6)。

2.4 激光毛面薄板性能优化机制

相关实验结果表明^[3],无论是否给予润滑,在冲压速度大于1 m/s时,激光板的摩擦系数均明显低于喷丸板。也就是说,在相同成形条件下,激光板的流动性更好,其成形能力更强(见图7)。与光面板、喷丸板和放电板(用电火花毛化轧辊平整的钢板)相比,激光板的映像清晰度最为优越(见图8)。

图8中还有一个事实值得注意,那就是激光蒸发型(采用仅有微坑的毛化轧辊平整)钢板的映像清

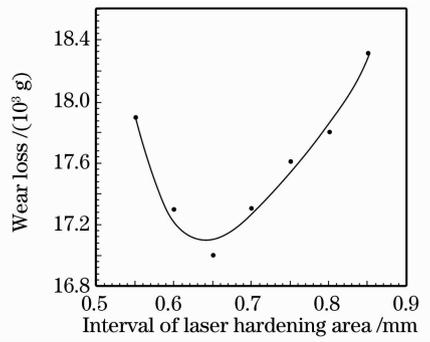


图6 激光强化区间距与磨损率的关系
Fig. 6 Relationship between laser hardening interval and wear loss

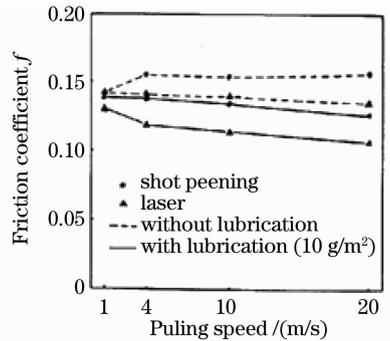


图7 不同毛面板的冲压速度与摩擦系数
Fig. 7 Friction coefficients of different textured plates

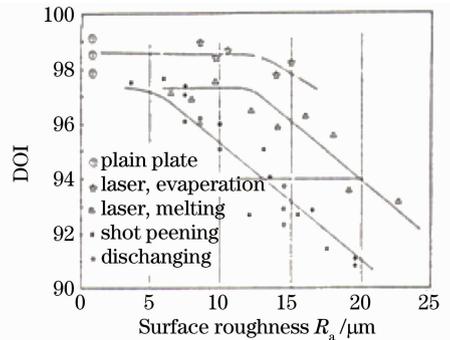


图8 不同毛面板的映像清晰度

Fig. 8 DOIs of different textured plates

晰度,明显优于激光熔融型(即由既有微坑又有凸包的毛化轧辊平整)钢板。但从成形能力角度考虑,材料的流动性既与微坑的形态有关,也与微坑的尺寸有关。因此,冷轧薄板产品的表面形貌和粗糙度,需要依据其用途和质量要求统筹设计。

图9表明^[11],在无摩擦拉伸变形条件下,08F激光毛面薄板(0.35 mm厚)的延伸率 δ 接近光面板(即砂轮打磨轧制的钢板)的5倍;光面板样件上未见明显的滑移带和颈缩,而激光板样件的滑移带非常丰富,其集中性失稳是滑移带在相当宽的区域充分发展之后才出现的。

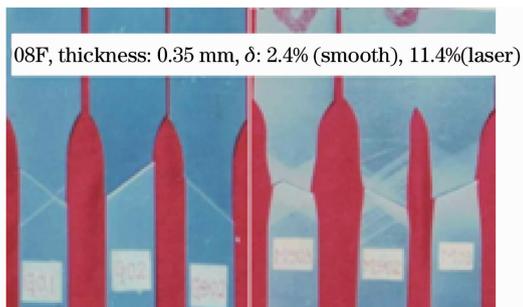


图 9 08F 钢激光板与普通板拉伸性能对比
Fig. 9 Stretched performance of laser-textured and general 08F steel sheets

扫描电镜(SEM)动态观察(图 10)表明,激光板表面的预先变形硬化区域(凸包和凹坑)对滑移线的运动具有阻滞效应,即预先硬化区具有均化和稳定变形、延缓变形集中,从而提升激光板塑性变形能力的功能。

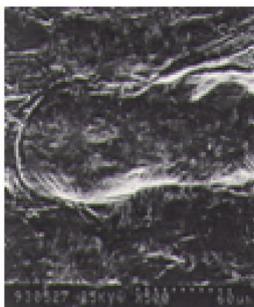


图 10 激光板微坑变形状态

Fig. 10 Status of a micro pit on the laser-textured plate

依据薄板拉伸变形损伤理论^[12],激光毛面薄板的表面粗糙度需要控制在其安全阈值范围内。对于冷轧低碳薄钢板,其拉伸变形允许的表面损伤极限尺度不宜超过板厚的 1%。

2.5 YAG 激光毛化技术发展应用概况

关于轧辊方面的有通过改善板面接触条件防止带钢退火粘结的技术^[7],通过提高其表层的强韧水平延长轧辊寿命的技术^[8]等。关于轧机方面的有通

过改善轧辊与薄板间的摩擦条件提高轧机轧制速度的技术^[13]以及利用上下工作轧辊的粗糙度差异在普通冷轧机上实现异步轧制的技术^[14]。关于薄板产品的有光亮度和冲压性能兼优的精密带钢和镜面钢板生产技术^[7,15,16]等。

到目前为止,我国自行研发的轧辊激光毛化技术与装备,已得到冶金行业的广泛认可。应用激光毛化技术的产品也从最初的低碳钢板,逐渐扩大到普碳钢、合金钢甚至铝合金产品。激光毛化轧辊的应用从冷轧平整工序扩展到了冷轧工序,从以生产毛面钢板为主要目标扩展到以提高轧辊的使用性能和使用寿命为主要目标,形成了兼顾改形与改性、功能与结构以及增强与增韧的多目标综合应用技术。

3 激光镀层强化方法及其应用

3.1 工程背景

因具有优良的高温强度、化学稳定性和耐磨损能力,电镀锌工件在工程上用途广泛。影响这类工件寿命的主要问题是镀层易于过早开裂剥落。此前发展的多种改进技术措施,包括前处理(如改善基体材质或对基体进行强化处理等)、过程处理(如改善电镀工艺和镀液配方等)以及后处理(即对镀层进行去应力退火^[17]和重熔^[18]等),虽在解决镀层过早开裂剥落方面有所进展,但其综合效果还是难以满足不断提升的工程需求。

我们提出的技术方案^[19,20]是,在电镀锌前先对基体进行激光离散热处理。某钢基电镀锌部件需要反复经受高温、高压和强烧蚀环境,虽经多次技术攻关、应用了已有的各种技术措施,其寿命仍不能达标,成为其投入实际应用的关键难题,直至采用本技术方案。

3.2 技术特点与应用效果

基体激光预处理形成的电镀锌镀层结构如图 11 所示。

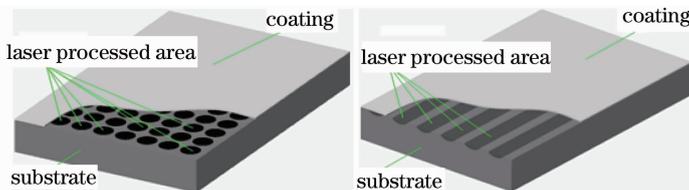


图 11 不同离散方式的基体激光预处理电镀锌复合材料结构

Fig. 11 Structures of composite materials with various discrete patterns

某钢基电镀锌部件的设计综合寿命应为 3000 周次,但采用传统处理方法其综合寿命只能达到 2000 周次,采用基体激光预处理方法后其综合寿命

超过 3000 周次,进一步改进激光工艺后,其综合寿命也进一步提高,达到 4500 周次。

图 12(a)、(b)分别为激光预处理和无激光处理

电镀铬部件,(a1)、(a2)、(a3)和(b1)、(b2)、(b3)分别为其出口、中部和近燃烧室部位的镀层寿终状态。该图清晰地反映出激光预处理方法的作用效果:不

论哪一部位,(a)部件的镀层剥落和磨损程度都明显低于(b)部件。

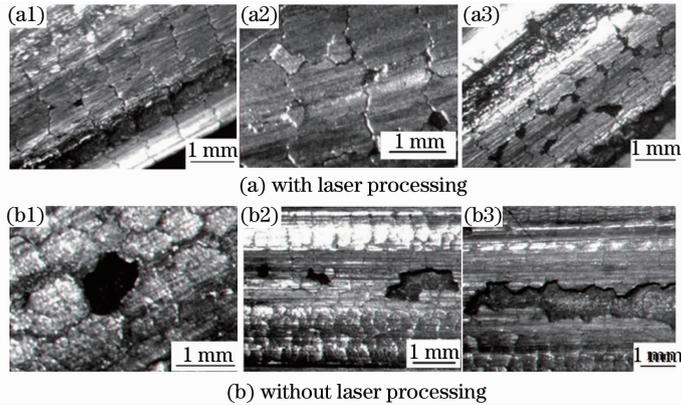


图 12 激光离散预处理部件和无激光处理部件的镀层失效情况对比(表面)

Fig. 12 Coating failure status samples with and without laser processing (surface)

剖面图(图 13)更清晰地显示出二者的差异:热机械冲击(热、化学和机械力联合作用)3000 周次后,(a)部件的口部镀层仍基本完整,其近燃烧室部位虽烧蚀严重但仍有镀层残留;但(b)部件仅经受热机械冲击 2000 周次,相应部位的镀层便消失殆尽,近燃烧室部位基体的开裂现象严重^[21]。

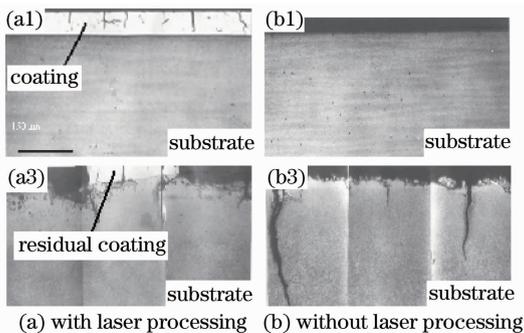


图 13 激光与无激光处理部件寿终时镀层失效情况对比

Fig. 13 Coating failure status of the parts with and without laser processing

两种镀层超声腐蚀试验结果(图 14)表明^[22,23],激光预处理镀层[(b)系列]的耐腐蚀能力明显高于传统镀层[(a)系列]。

3.3 激光延寿机制分析

3.3.1 改性强化机制^[21]

激光预处理后,基体表层材料因改性而得到硬化,电镀铬层与基体原始组织之间剧烈的硬度差异也因此得到缓解(见图 15)。工件表层的寿终与初始硬度曲线[图 15(b)]表明,3000 次热机械循环后,工件整体软化,镀层的硬度下降尤其严重,但镀层和激光强化区域的硬度仍然高于基体原始组织。这充

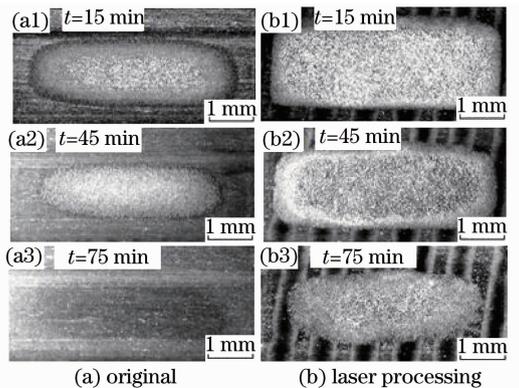


图 14 传统(无激光)镀层与激光预处理镀层超声耐蚀性对比

Fig. 14 Ultrasonic corrosion performance of original and laser pre-processed coatings

分体现了激光预处理对于工件全寿命的意义。

3.3.2 结构性能遗传机制^[21,24,25]

通过 SEM 观察不难发现,激光预处理电镀铬镀层的界面结构[图 16(b)和(d)]精细、致密、清洁,明显优于常规电镀镀层[图 16(a)和(c)]。透射电镜(TEM)的组织衍射分析表明,激光预处理镀层组织的尺寸[图 17(b)]明显小于常规镀层[图 17(a)]。纳米硬度实验表明,激光预处理镀层的力学性能也明显优于常规镀层(图 18)。鉴于镀层生长过程中并无激光作用,因此两种镀层的组织和性能差异只能源于所依附的基底,即基底对于镀层具有强烈的遗传效应。

3.3.3 强韧协同机制^[26]

激光预处理镀层部件服役时,其硬质部分是支撑和抵御外载荷的主力;其韧性部分则可以缓解和

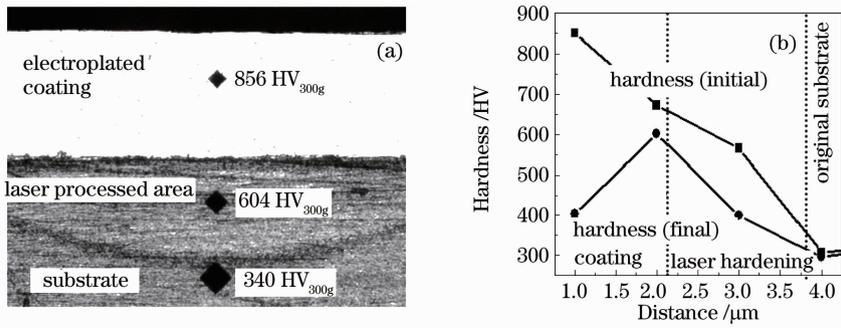


图 15 激光预处理对电镀铬镀层体系硬度的影响

Fig. 15 Influence of laser pretreatment on the hardness of the chromium coating system

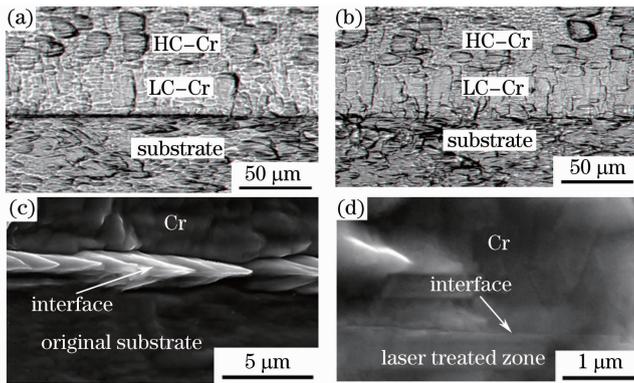


图 16 激光离散热加工对镀层界面结构的影响

Fig. 16 Influence of laser discrete processing on the interfacial structure of the coating systems

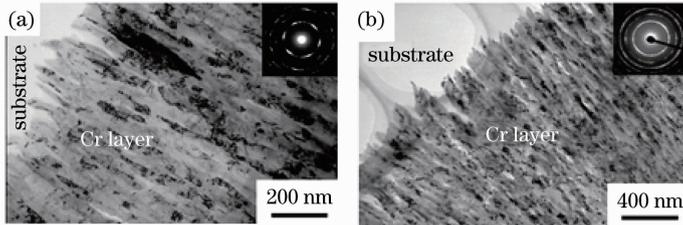


图 17 普通镀层与激光预处理镀层界面的结构比较

Fig. 17 Microstructures of the original and the laser pre-processed coating systems

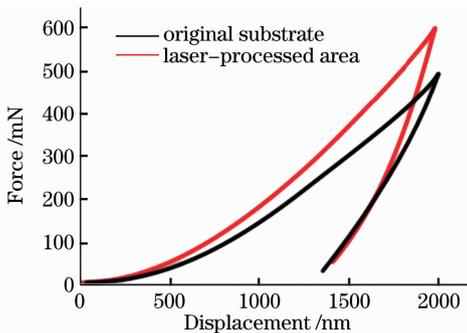


图 18 激光预处理对电镀铬层力学性能的影响

Fig. 18 Influence of laser pretreatment on mechanical properties of the chromium coating systems

吸收硬质部分在抵御外载荷过程中产生的应力和变形。因此,这种强韧结构可以有效减少和延滞镀层中的裂纹形成。

在电镀铬过程中,因铬原子的沉积、结晶形核和长大,镀层内应力会逐渐增大以至于超过电镀铬的断裂强度。因此,即使是尚未服役的电镀铬镀层,其内部也往往存在大量的微裂纹。服役过程中,在初始内应力和外载荷共同作用下,镀层中一些局部地区的微裂纹会串联、长大,逐步发展形成由表及里、贯穿整个镀层厚度、直达基体的分割性裂纹(图 19)^[27]。这类裂纹在工程中不受欢迎,但却往往无法避免。

激光离散预处理基体可以通过控制残余应力分布来调控镀层的分割性裂纹间距(图 20)。服役时,这些分割性裂纹会发展成走向与激光扫描路径平行、间距等于激光预处理离散度的条状主裂纹[见图 12(a)]。

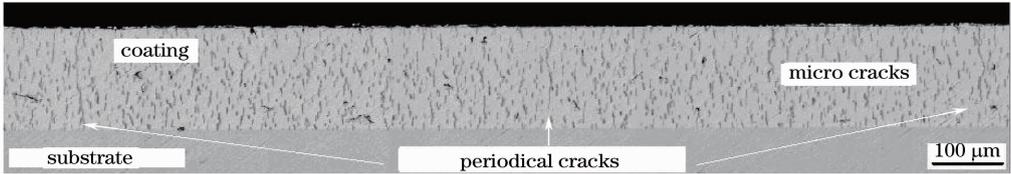


图 19 服役前激光预处理镀层中的裂纹形态

Fig. 19 Cracks in laser pretreatment coating before utilized

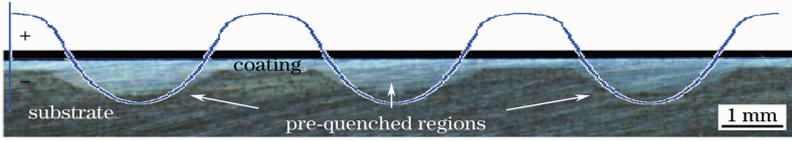


图 20 离散分布的淬火区与镀层周期性应力示意

Fig. 20 Discrete quenched area and a periodical stress distribution

从镀层对基体的防护角度看,希望减少镀层中主裂纹的数量,因为这样有利于降低热环境对基体的伤害。然而,从利用主裂纹降低界面应力(也可视为界面破坏驱动力)的角度看,希望将主裂纹的间距控制在其能有效发挥作用的范围之内,即控制在图 21 所示的应力曲线左侧。

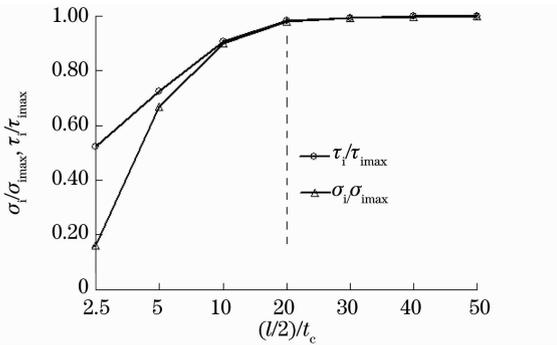


图 21 界面参考节点应力与裂纹间距的关系

Fig. 21 Dependence of the interface stresses on the crack spacing

基体激光预处理的扫描间距 l_c 可通过关系式求得

$$l_i/l_c = 3.71 \times (r_E/r_i)^{0.38}, \quad (1)$$

式中 $r_i = t_c/t_s$ 和 $r_E = \overline{E_c}/\overline{E_s}$, $\overline{E_c} = E_c/(1-\nu_c^2)$, $\overline{E_s} = E_s/(1-\nu_s^2)$, t_c 为涂层厚度, t_s 为基体厚度, E_c 为涂层弹性模量, ν_c 为涂层泊松比, E_s 为基体弹性模量, ν_s 为基体泊松比。

3.4 镀层界面结合性能表征

激光强化镀层派生出的一个新问题,是如何表征和评价强结合镀层的界面性能。对于界面结合强度低于 90 MPa 的涂镀层,工程上大多采用粘胶拉伸和弯曲等传统方法评价其界面性能^[28]。钢基电镀铬属于强结合镀层体系,经激光预处理后其界面强度更高,因此急需相应的界面性能表征方法。

为此发展了如图 22 所示的侧面压入方法^[29~33]。该方法利用圆锥压头压入镀层样件的基体一侧[图 22(a)],通过基体材料膨出造成镀层开裂[图 22(b)]和剥落[图 22(c)]。

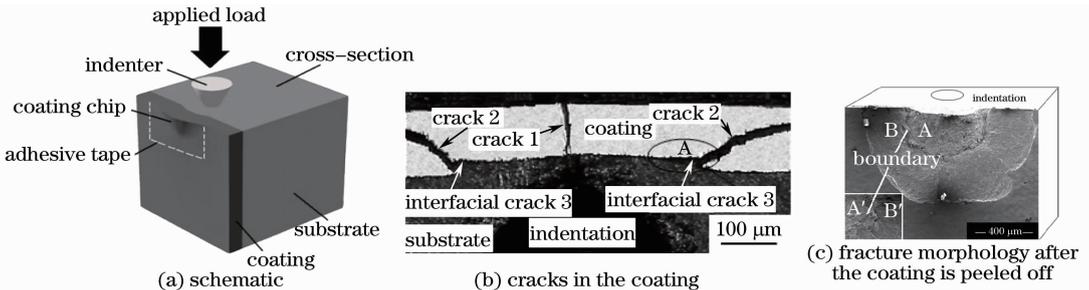


图 22 侧面压入方法

Fig. 22 Sectional indentation

4 激光辅助预应力成形方法

4.1 工程背景

成形是机械制造领域的重要制造方法之一。这

里所说的成形制造,专指对钣金零件即薄壁或薄壳类零件实施的弯曲或拉弯等方式的变形,使之获得设定尺寸和形状的加工过程。在这类成形制造中有

这样一类钣金零件,或因其结构形状复杂(譬如马鞍形工件),或因其有网状高筋条的支撑作用(譬如整体壁板),难以采用上述方法实现其成形目标。

目前,解决这类零件成形难题的主要方法是喷丸^[34~36]和时效^[37~39]。喷丸方法又分为自由喷丸成形^[34]和预应力喷丸成形^[36]两类。在前一类方法中,零件呈自由状态,用高速钢球撞击零件表面使其表层伸长变形,利用由此产生的弯矩迫使零件弯曲成形。在后一类方法中,零件被夹持在模具上并被施以弹性弯曲载荷,同样用高速钢球撞击零件表面使其表层伸长变形,不过此时导致零件表层伸长变形的能量,除喷丸外还有零件弹性内能的贡献。因此其成形能力高于自由喷丸成形。时效成形,又称预应力高温蠕变成形,该方法是将被夹持在模具上并施以弹性弯曲载荷的零件,整体置于加热罐中,令其在高温条件下(对于铝合金零件,一般在 110 ℃~

170 ℃保温 20 h^[39])通过蠕变作用实现成形。

时效成形的能力强于喷丸,但时效成形零件必须采用时效强化材料制作,以克服热软化效应。喷丸成形时,零件表层的变形抗力不断增大,故其成形能力相对较小(无模喷丸的成形能力更低),成形大尺寸或有高肋条支撑的薄壁零件必须进行中间退火。激光辅助预应力成形方法有利于克服上述局限性^[40~46]。

4.2 激光辅助预应力成形方法原理

与激光焊接、切割、熔覆、表面热处理方法以及激光快速原型制造和激光弯曲成形方法不同,该方法成形的主动力源自零件的弹性内能,激光的主要作用是降低零件弹性内能集中区域材料的变形抗力,通过弹性能做塑性功实现零件的弯曲成形,如图 23 所示。

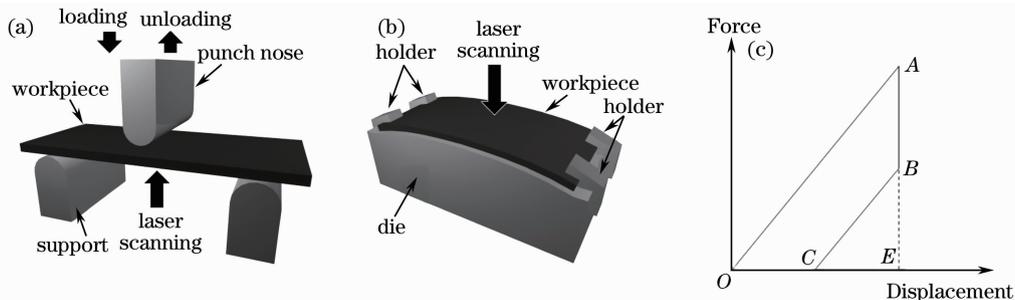


图 23 激光辅助成形及其载荷位移曲线示意图

Fig. 23 Schematic for laser-assisted forming and force-displacement curve

依据图 23 中的载荷位移曲线,如果没有激光干预,弹性弯曲零件卸载后,其载荷位移曲线应由 A 点回到 O 点,零件不会产生塑性变形。在承受并保持弹性载荷的条件下,对零件弹性能集中区域进行激光干预,其载荷位移曲线将由 A 点降至 B 点。卸除剩余载荷后,该曲线再由 B 点弹性回复到 C 点。区域 OABC 的面积大小即为弹性内能转化塑性功的大小。以 W_{OAE} 、 W_{BCE} 分别代表零件总内能和剩余弹性内能,则激光辅助成形的弹性能转化效率 ξ 可表示为

$$\xi = \frac{W_{OAE} - W_{BCE}}{W_{OAE}} \times 100\% \quad (2)$$

由于结构复杂或有肋条支撑的薄壁零件的弹性内能往往集中于其几何发生突变或肋条所在的部位,激光辅助预应力成形时激光只需对这些部位进行干预。整体壁板零件弹性内能分布的数值计算结果(图 24)表明,其 90% 的弹性内能集中于表面积不超过 10% 的结构增强区域(图中发亮区域)。因此,对这样的零件,所谓激光辅助成形只需要对这 10% 的区域进行即可。

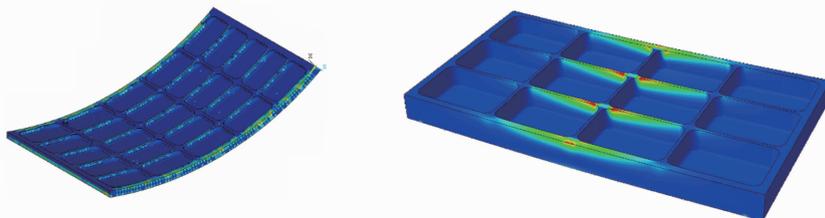


图 24 整体壁板弯曲时的弹性内能分布

Fig. 24 Elastic strain energy distribution on the bent integral panel

4.3 成形效果举例

4.3.1 薄板样件

对铝合金、低碳钢、钛合金等常用成形材料薄板样件进行了激光辅助成形实验。其结果如图 25 所示,虽然不同材质样件激光辅助成形能力的提高幅度不同,但提升效果都很显著。

4.3.2 整体壁板(肋条支撑)样件

分别对 7075 铝合金整体壁板样件进行了激光辅助和时效成形,其结果如图 26 所示。激光辅助作用时间 30 min,卸载后样件成形高度为 12.5 mm。时效成形工艺参数为 170 °C,22.5 h,卸载后成形高度为 13.6 mm。

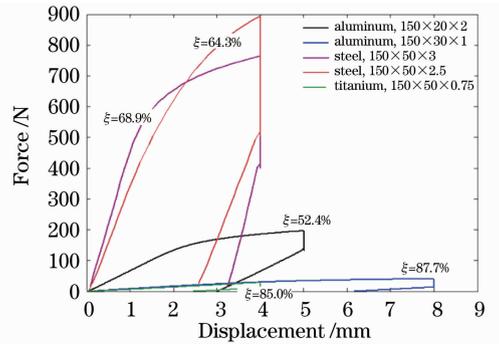


图 25 薄板激光辅助成形载荷位移曲线
Fig. 25 Force-displacement curve of sheets in laser-assisted forming



图 26 7075 铝合金结构样件在不同方法下的成形效果

Fig. 26 Results of the 7075 aluminum structures formed by various technologies

实验还发现,在初始弹性内能(即样件挠度)一定的情况下,样件的弹性内能转换效率会随激光扫描次数的增加而下降,重复扫描 7 次后能量转换趋于饱和(图 27),要继续提高样件的成形量需要适时提升其挠度。

4.3.3 激光辅助成形对样件性能的影响

对包铝 2024 铝合金进行的对比实验表明,激光辅助成形前后,两种样件的组织结构之间没有明显差异(见图 28)。激光辅助成形样件的疲劳寿命,可能因激光作用区的材料发生热软化而降低。但只要对这些区域进行喷丸强化处理,激光辅助成形样件的疲劳寿命不仅不会降低,还可能超过原始材料(图 29)^[40]。

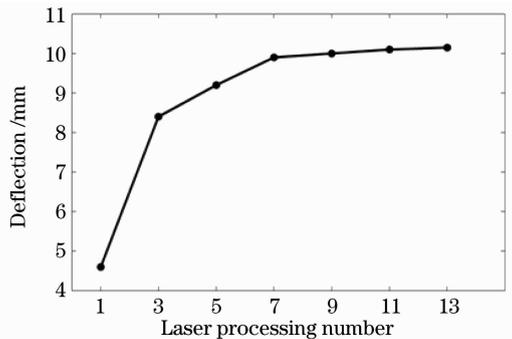


图 27 激光扫描次数对 7075 铝合金整体壁板样件成形量的影响

Fig. 27 Effect of laser scanning number on the bending of the 7075 aluminum structures

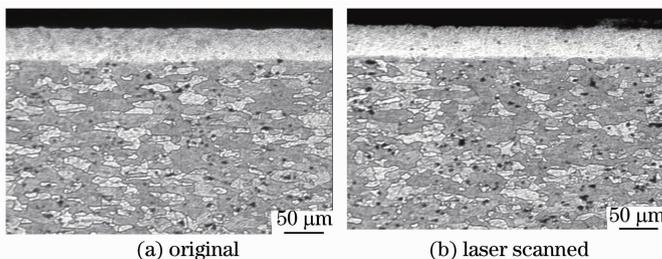


图 28 包铝 2024 铝合金板料激光作用前后的组织形态(激光作用区温度 150 °C)

Fig. 28 Microstructures of alclad 2024 alloy as original and laser scanned sample (the temperature in laser scanning region is 150 °C)

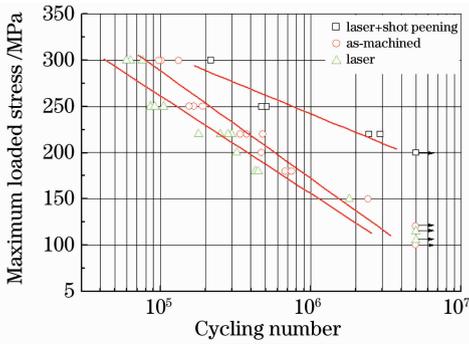


图 29 包铝 2024 板料不同状态样件疲劳寿命对比
Fig. 29 Fatigue curves of alclad 2024 alloy samples

5 结 论

上述新技术及其应用效果表明:

1) 激光离散熔凝处理轧辊表面,可以制造出设定的形貌和粗糙度,可在提升表层韧性的同时获得高性能熔凝组织,使轧辊的使用效果和使用寿命显著改善。

2) 激光离散预处理基底表面,不仅可以增强基底,还可以显著提高基底与镀层的界面结合能力,甚至改善镀层的组织和性能。

3) 激光局部热软化辅助预应力,可以在不损害、甚至提升其性能的前提下,显著提高金属工件尤其是复杂金属结构工件的成形能力。

致谢 感谢先后参与本文工作并为其做出贡献的全体课题组成员,博士后研究人员以及硕士、博士研究生。感谢为本文工作提供过支持和帮助的非线性力学国家重点实验室以及北京工业大学激光工程研究院的相关工作人员。

参 考 文 献

- 1 J. Crahay. Method and Apparatus for Forming Microcavities on the Surface of a Rolling Mill Roll[P]. US Patent: US4322600, 1979
- 2 A. Bragrad, J. Crahay, W. Desmul. Texturing the roughness of work rolls by means of laser pulses: the process tomorrow? [C]. London: Advances in Cold Rolling Technology, 1985
- 3 K. Nishimura, N. Soeda, S. Ujihara. Development of high image clarity steel sheet by laser texturing[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1991, **68**(8): 46~56
- 4 Liu Jianguo. Analysis of the problems about steel product quality[J]. *Steel Rolling*, 1999, **16**(6): 5~6
刘建功. 钢材产品质量亟待解决的问题浅析[J]. *轧钢*, 1999, **16**(6): 5~6
- 5 Yang Mingjiang, Chen Guangnan, Wu Jian *et al.*. A High Repetition Rate Nd: YAG Laser Texturing System with Multi-Pulse and Its Processing Methods[P]. China Patent: CN92113223. 9, 1992
杨明江, 陈光南, 吴 坚 等. 高重复调制多脉冲 YAG 激光刻花系统及加工方法[P]. 中国专利: CN92113223. 9, 1992

- 6 Chen Guangnan, Yang Mingjiang, Wu Jian *et al.*. The Cold Rolling Work Rolls Used to Avoid Annealing Heat Treatment Bonding of Steel Sheet[P]. China Patent: CN93221266. 2, 1993
陈光南, 杨明江, 吴 坚 等. 用于解决薄钢板热处理退火粘结问题的冷轧工作轧辊[P]. 中国专利: CN93221266. 2, 1993
- 7 Chen Guangnan, Yang Mingjiang, Sun Chuanxiang *et al.*. The Cold Leveling Rolls Used to Improve the Performance of Steel Sheet[P]. China Patent: CN93221264. 6, 1993
陈光南, 杨明江, 孙传香 等. 用于改善冷轧薄钢板使用性能的平整工作轧辊[P]. 中国专利: CN93221264. 6, 1993
- 8 Zuo Duluo, Li Shimin. Review on fast axial flow CO₂ lasers[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(1): 4~8
左都罗, 李适民. 快轴流 CO₂ 激光器评述[J]. *激光技术*, 2000, **24**(1): 4~8
- 9 Chen Guangnan. Laser Texturing Roll Technology and Its Applications[R]. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1993. 9
陈光南. 轧辊激光毛化技术及其应用[R]. 中国科学院力学研究所, 1993. 9
- 10 Luo Gengxing. The Organization and Its Physical Properties by Dispersed Pulse Laser Remelting [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999
罗耕星. 脉冲激光离散重熔热物理及组织性能研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999
- 11 Shen Huan, Chen Guangnan, Li Guochen. The plastic instability behavior of laser textured steel sheet[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 1996, **219**(1-2): 156~161
- 12 Chen Guangnan. Deformation Damage Tensile Instability and Limit Strains of Sheet Metals[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1991
陈光南. 板材拉伸变形的损伤、失稳与成形极限研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1991
- 13 Qian Kunqing, Chen Guangnan. Mechanism and application on optimizing material properties with dot laser processing [J]. *Research of Metal Materials*, 1999, **28**(3): 1~20
钱昆庆, 陈光南. 用强激光点状加工方法优化材料性能的机理及应用研究[J]. *金属材料研究*, 1999, **28**(3): 1~20
- 14 Gao Hong, Chen Guangnan. Asymmetrical cold rolling realized on plain mill for steel sheet by laser textured rolls[J]. *Iron and Steel*, 1998, **33**(3): 63~66
高 宏, 陈光南. 利用激光毛化技术在普通冷带轧机上实现异步轧制[J]. *钢铁*, 1998, **33**(3): 63~66
- 15 Zhu Huaqing, Chen Guangnan, Nie Dejun *et al.*. A Surface Morphology and Patterns with a Special Cold-Rolled Steel Sheet [P]. China Patent: CN93221265. 4, 1994
朱怀清, 陈光南, 聂德钧 等. 一种表面带有特殊形貌与图案的冷轧薄钢板[P]. 中国专利: CN93221265. 4, 1994
- 16 Chen Guangnan, Shen Huan, Zhu Huaqing. Service properties of the laser-textured steel sheets [J]. *Iron and Steel*, 1996, **31**(5): 13~16
陈光南, 沈 还, 朱怀清. 激光毛面钢板的使用性能[J]. *钢铁*, 1996, **31**(5): 13~16
- 17 R. S. Montgomwry. Laser Treatment of the Chrome-Plated Steel[R]. US AD A363854. 1980
- 18 Manz Herbert, Tuncer Haluk, Zaepfer Manfred. Apparatus for Hardening the Inside Contour of a Gun Barrel with Laser Radiation[P]. US Patent: US6040551, 2000
- 19 Chen Guangnan, Wu Xiaolei, Luo Gengxing *et al.*. A Laser Enhanced Method and Device for Inner Surface of Tubular Workpieces[P]. China Patent: CN99116728. 7, 1999
陈光南, 武晓雷, 罗耕星 等. 管状工件内表面激光强化方法与装置[P]. 中国专利: CN99116728. 7, 1999
- 20 Chen Guangnan, Luo Gengxing, Zhang Kun *et al.*. A Method of Strengthening and Toughening on the Interface between Metal Substrate and Coating by Laser[P]. China Patent: ZL02149191. 7, 2002

- 陈光南, 罗耕星, 张 坤等. 金属基体与涂层之间界面的激光强化方法[P]. 中国专利: ZL02149191.7, 2002
- 21 Chen Guangnan, Luo Gengxing, Zhang Kun *et al.*. A laser method to improve the life of plated chrome barrel[J]. *Acta Armanentaria*, 2003, **24**(s1): 6~10
- 陈光南, 罗耕星, 张 坤等. 提高镀铬身管寿命的激光强化新方法[J]. 兵工学报, 2003, **24**(s1): 6~10
- 22 Li Huanxue, Chen Guangnan, Zhang Guoxiang *et al.*. Characteristics of the interface of a laser-quenched steel substrate and chromium electroplate [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, **201**(3-4): 902~907
- 23 Li Huaixue. Interfacial Structure and Adhesion Property of Cr Electroplate with Laser-Discrete Treated Steel Substrate[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- 李怀学. 激光离散热处理延长镀铬枪管寿命的机制研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007
- 24 Zhang Kun, Hu Ying, Chen Guangnan *et al.*. Performance of ablation resistance of plated chrome barrel[C]. Proceedings of the 5th Conference on Aerospace Equipment Failure Analysis, 2006. 395~399
- 张 坤, 胡 莹, 陈光南等. 身管内膛镀铬层的抗烧蚀性能研究[J]. 全国第五届航空航天装备失效分析会议论文集, 2006. 395~399
- 25 Xu Xiangyang, Zhang Kun, Han Jianmin *et al.*. Metallographical sample prepared by ion beam etching[J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2004, **14**(s2): 282~285
- 26 Wu Chenwu. On the Mechanism of the Influence of the Laser As-quenched Substrate on the Fracture of the Coating and Interface [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy Sciences, 2007
- 吴臣武. 激光淬火基体影响涂层及界面破坏行为的力学机制[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007
- 27 Hu Ying, Zhang Kun, Chen Guangnan *et al.*. MATLAB used in analyzing the microcracks of Cr coating[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2005, **30**(suppl.): 161~163
- 胡 莹, 张 坤, 陈光南等. MATLAB在Cr涂层微裂纹组态分析中的应用[J]. 金属热处理, 2005, **30**(增刊): 161~163
- 28 Yang Banquan, Chen Guangnan, Zhang Kun *et al.*. A review on measurement methods for interfacial bonding strength between coating and substrate[J]. *Advances in Mechanics*, 2007, **37**(1): 67~79
- 杨班权, 陈光南, 张 坤等. 涂层/基体材料界面结合强度测量方法的现状与展望[J]. 力学进展, 2007, **37**(1): 67~79
- 29 Zhang Kun, Su Jianyu, Zhang Guoxiang *et al.*. Spalling behavior of the coating interface while cross-sectional indentation [C]. Lanzhou: Proceedings of the 6th Conference on Surface Engineering, 2006. 65~67
- 张 坤, 苏建宇, 张国祥等. 横截面压入时典型涂层界面的剥离行为[C]. 兰州: 第六届全国表面工程学术会议暨首届青年表面工程学术论坛论文集, 2006. 65~67
- 30 Zhang Guoxiang, Zhang Kun, Chen Guangnan *et al.*. Cross-sectional indentation method to evaluate strong interface adhesive strength[J]. *Surface Technology*, 2006, **35**(6): 1~4
- 张国祥, 张 坤, 陈光南等. 评价强界面涂层界面结合能力的横截面压入法[J]. 表面技术, 2006, **35**(6): 1~4
- 31 Zhang Kailiang. Research of the Cross-Sectional Indentation Method to Evaluate Interfacial Properties of Coatings [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010
- 张凯亮. 侧面压入方法评价涂层界面结合性能研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2010
- 32 Yang Banquan. Mechanical Characterization of Strong Interface Coating System [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008
- 杨班权. 界面强结合涂层体系的力学性能表征[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2008
- 33 B. Q. Yang, K. Zhang, G. N. Chen *et al.*. Effect of a laser pre-quenched steel substrate surface on the crack driving force in a coating-steel substrate system [J]. *Acta Materialia*, 2007, **55**(13): 4349~4358
- 34 R. Heaton, J. Champaigne, J. T. Cammett. A big lift for the aerospace industry[J]. *Metal Finishing*, 2005, **103**(3): 18~24
- 35 Zeng Yuansong. Forming overall-panel of civil aircraft by shot-blasting technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, (1): 54~55
- 曾元松. 喷丸成形技术在民用飞机整体壁板研制中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, (1): 54~55
- 36 Li Guoxiang. Pre-stressed and shot-blasting forming of airfoil overall-panel [J]. *Aeronautical Manufacturing Engineering*, 1998, (2): 16~18
- 李国祥. 机翼整体壁板的预应力喷丸成形[J]. 航空制造工程, 1998, (2): 16~18
- 37 Takafumi Adachi, Shirou Kimura, Takahiro Nagayama *et al.*. Age forming technology for aircraft wing skin [J]. *Materials Forum*, 2004, **28**: 202~207
- 38 Zeng Yuansong, Huang Xia, Huang Shuo. The research situation and the developing tendency of creep age forming technology[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, **15**(3): 1~8
- 曾元松, 黄 遐, 黄 硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008, **15**(3): 1~8
- 39 Li Ying, Ji Xiusheng. Heat age forming technology for overall-panel[J]. *Liaoning Economy*, 2007, (6): 54~55
- 李 鹰, 季秀升. 壁板时效成形技术研究[J]. 辽宁经济, 2007, (6): 54~55
- 40 Chen Guangnan, Wu Chenwu, Peng Qing *et al.*. A Forming-Hardening Technology Involves Laser-Assisted Pretress Forming and Shot Peening[P]. China Patent: CN101289733A, 2008
- 陈光南, 吴臣武, 彭 青等. 激光辅助预应力喷丸成形-强化复合方法[P]. 中国专利: CN101289733A, 2008
- 41 Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. A Method for Fine Adjustment of Formed Airplane Outer Shell[P]. China Patent: CN100429589C, 2007
- 陈光南, 王秀凤, 罗耕星等. 飞机外壳成形件激光精调方法[P]. 中国专利: CN100429589C, 2007
- 42 Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. A Hybrid Forming Technique with Bending and Point Heat Source [P]. China Patent: CN100468244C, 2008
- 陈光南, 王秀凤, 罗耕星等. 压弯、点热源复合成形方法[P]. 中国专利: CN100468244C, 2008
- 43 Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. A Hybrid Forming Technique with Bending and Laser Radiation [P]. China Patent: CN100552575C, 2008
- 陈光南, 王秀凤, 罗耕星等. 压弯激光复合成形方法[P]. 中国专利: CN100552575C, 2008
- 44 Chen Guangnan, Luo Gengxing, Wang Xiufeng *et al.*. A Combined Digital Forming Technology for Integral Panel Based on Bending and Moving Heating Source [P]. China Patent: CN100487612C, 2008
- 陈光南, 罗耕星, 王秀凤等. 基于压弯和移动点热源的整体壁板数字化复合成形工艺[P]. 中国专利: CN100487612C, 2008
- 45 Peng Qing, Chen Guangnan, Wang Xiufeng. Similarity criterion of laser-assisted pre-stress forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1261~1266
- 彭 青, 陈光南, 王秀凤. 激光辅助预应力成形的相似性问题[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1261~1266
- 46 Peng Qing, Chen Guangnan, Wu Chenwu *et al.*. Laser-assisted pre-stress forming for integral panels [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, **30**(8): 1544~1547
- 彭 青, 陈光南, 吴臣武等. 整体壁板激光辅助预应力成形[J]. 航空学报, 2009, **30**(8): 1544~1547