

微弧氧化陶瓷层对 AZ31 合金 板料渐进成形的影响

张青来¹,冯甜甜¹,肖富贵¹,郭海玲¹,李长生¹,高霖²,韩伟东³

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院,江苏 镇江 212013; 2 南京航空航天大学 机电工程学院,江苏 南京 210016;
3 宝鸡市博信金属材料有限公司,陕西 宝鸡 721013)

摘 要: 利用数控试验机床 (CNC) 和微弧氧化处理技术,对 AZ31 镁合金板料热渐进成形和多孔陶瓷层润滑机理进行了研究. 结果表明: 镁合金表面微弧氧化多孔陶瓷层吸附固体二硫化钼颗粒,形成多孔陶瓷 - 二硫化钼润滑膜. 在摩擦初始阶段,多孔陶瓷固体 MoS_2 润滑膜的室温摩擦系数约为 0.08,满足镁合金板料热渐进成形润滑和减摩条件. 多孔陶瓷层为固体 MoS_2 润滑剂提供了良好润滑平台,加工件内表面光滑,且没有任何缺陷. 由于陶瓷层孔中吸附大量固体 MoS_2 粉末,所研究的润滑陶瓷层在渐进成形中具有自润滑作用. 与无微弧氧化处理相比,多孔陶瓷润滑层具有更好的润滑效果.

关键词: 镁合金;渐进成形;微弧氧化;陶瓷层; MoS_2

中图分类号: TG146.2+2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2009)06-0606-06

镁合金是具有良好前景的轻型结构材料,广泛应用于航空、电子和汽车等工业领域. 由于镁合金室温塑性差,难以塑性加工,所以其塑性加工受到国内外广泛关注,如镁合金薄板热拉深成形^[1]、超塑性成形^[2]和胀形^[3]. 近 10 年来形成了一种无模数控渐进成形^[4-6]. 2008 年国外报道了关于 AZ31 镁合金板料渐进成形的最新研究动向^[7-8]. 渐进成形的特点是缩短新产品开发周期,降低成本,小批量,多品种产品生产.

润滑剂选择是影响镁合金板料热渐进成形和成形件内表面质量的重要因素之一. 对纯铝和 08 钢常温加工,采用润滑油^[9],但对中高温条件下塑性加工可采用 MoS_2 、石墨和 BN 等固体润滑剂,如用 MoS_2 作为镁合金板料热渐进成形润滑剂^[8]. 微弧氧化 (MAO) 技术通过调整电解液组分和工艺参数来控制膜层的相组成及显微组织,以改性镁合金表面状态,微弧氧化膜层含有大量微孔^[10-11]. 利用多孔陶瓷的这一优点,通过在多孔陶瓷中浸入固体润滑剂可以达到抗磨减摩目的. 顾秀娟等^[12]制备了多孔氧化铝陶瓷储油材料. 通过在孔中引入石墨和六方氮化硼制得

了自润滑复合陶瓷材料,其摩擦系数低至 $0.17^{[13]}$.

迄今为止,国际上对数控渐进成形技术还处于探索阶段,理论方面的研究还不成熟. 研究镁合金板料渐进成形对补充和完善镁合金塑性加工技术具有理论和实际应用价值.

本文作者针对 AZ31 变形镁合金,通过板料渐进成形和微弧氧化表面处理来研究固体润滑剂对镁合金渐进成形的影响.

1 实验部分

试验用材料为工业镁合金 AZ31 板料,其厚度为 1.0 mm,化学成分 (质量百分数): 95.736% Mg, 3.000% Al, 0.950% Zn, 0.280% Mn, 0.022% Si 以及 0.012% Fe.

微弧氧化前,用超声波清洗机清洗板料. 采用微弧氧化方法在 $\text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{K}_4\text{PO}_4 + \text{KF}$ 电解溶液中制备镁合金多孔陶瓷层. 微孔均匀分布在陶瓷层中,其大小约为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,见图 1(a);陶瓷层由多孔疏松层和密实层构成,其厚度约为 $10 \mu\text{m}$,且密实层和镁合金基体结合良好,没有间隙或裂纹等,见图 1(b).

收稿日期: 2008-11-27; 修回日期: 2009-05-25; 联系人: 张青来, e-mail: qlfzhang@sh163.net

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50774037); 江苏大学高级人才基金资助项目 (05JDG009).

作者简介: 张青来 (1962-), 男, 博士, 硕导, 主要从事镁合金和钛合金等研究方向.

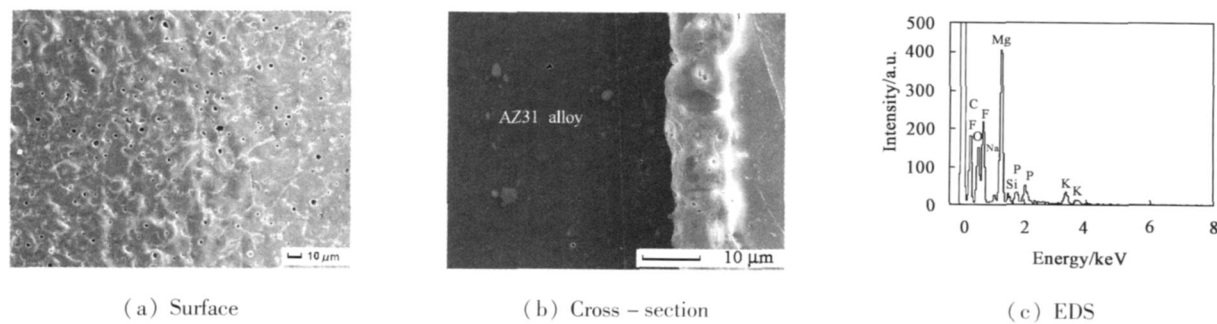


Fig. 1 SEM micrographs and EDS spectrum of ceramic coating of magnesium alloy
图 1 镁合金微弧氧化陶瓷层形貌 SEM 照片和 EDS 分析结果

陶瓷层的 EDS 分析结果表明,陶瓷层含有 O, Si, P, K, F 元素,见图 1(c).

渐进成形试验设备是基于 UG 的数控渐进成形机床 NH-SK1060. 利用上下压边圈固定被加工板料,在配有 CAD/CAM 软件的数控机床上控制成形工具头来实现板料的连续局部塑性成形. 在数控装置下,通过事先被加热的板料与成形工具之间的单点运动促使三维轮廓得以成形,成形工具沿着模型的内表面成形,板料的边缘固定不动,成形工具由边缘向心部逐渐成形,直至成形完成. 成形过程如图 2 所示,图中 α 是板料成形面与水平方向的夹角,即成形角;变形区厚度变化符合余弦定律,即 $t = t_0 \cos \alpha$; P 为压头对板料所施加的力; $\Delta \delta$ 为压头的道次压下量. 试验中采用专用的渐进成形工具头,工具头的头部为半球形,球头直径为 12 mm,刀杆长度不小于 140 mm,工具头的材料为高速钢. 工具头安装在渐进成形机的专用套筒上.

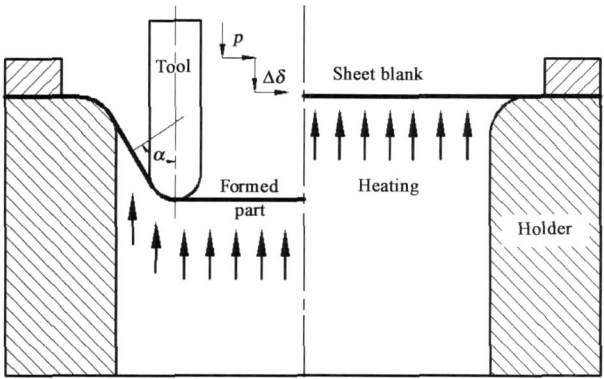


Fig. 2 Schematic illustration of the incremental forming of metal sheet
图 2 金属板料渐进成形过程示意图

摩擦试验是在 MG22000 摩擦试验机上进行. 试验方式:用材料为 1828 不锈钢的环状与 AZ31 镁合金板进行对摩试验,事先在镁合金板上涂覆固体

MoS₂ 润滑剂,形成润滑膜. 试验参数:试验温度为常温,试验速度为 2 000 mm/min,压力为 1~5 N.

利用“虚拟靠模导向法”估算变形后合金壳体壁厚分布规律. 用 LEICA MEF4M 金相显微镜对板材微观组织进行分析,并用型号为 Hitachi S-125 的扫描电镜观察断口形貌.

2 试验结果

2.1 润滑剂选择

在渐进成形工艺中,板料在工具头滑动和滚动作用下产生塑性变形,金属板材在变形过程中的应力状态表现为二向拉应力状态. 板材与工具头发生相对运动时在工具头接触部位产生剪切应力,在这样的摩擦系统下产生摩擦与磨损,为了减轻摩擦磨损、避免零件刮伤和延长工具头的寿命而引入润滑剂. 金属板材渐进成形加工的突出特点是板材的变形是表面区域有实质性的增强,暴露出新生的初始表面. 润滑的成效对制品的质量、加工时的力与所需的功率以及塑性变形本身产生的可能性有较大的影响.

对于本加工工艺中使用的润滑剂,主要有以下几方面要求:

- (1) 良好的成膜性. 能隔离工具头与工件表面,防止金属间直接接触.
- (2) 控制摩擦. 低摩擦可降低加工时对力和动力的需求,并使工件成形均匀.
- (3) 储存和高温使用稳定性. 在储存和使用过程中润滑剂应保持稳定状态,不受温度和氧化的影响,防止污染.
- (4) 易于除去,不破坏被加工表面.
- (5) 价格低廉.

因此,本试验选用固体二硫化钼作为润滑剂,可满足高温润滑使用条件.

2.2 摩擦系数测定

图 3(a)为试验用固体二硫化钼粉末,其颗粒尺

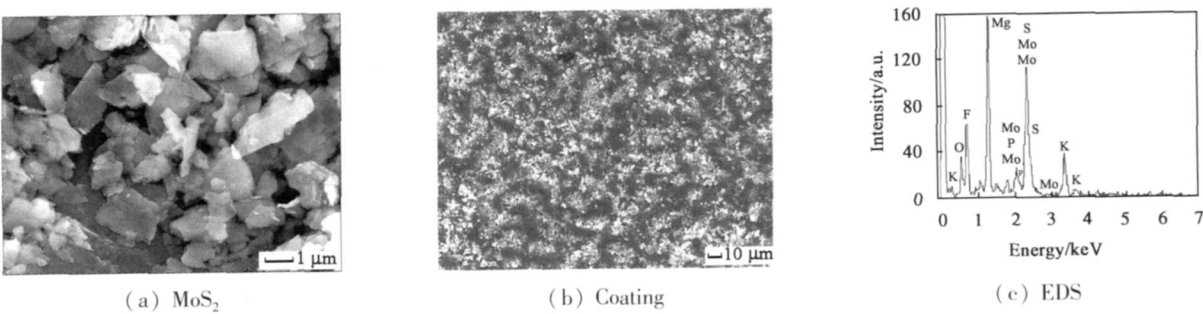


Fig.3 SEM micrographs and EDS spectrum of MoS₂ powder and coating
图3 MoS₂ 颗粒和其涂层 SEM 形貌照片以及 EDS 分析结果

寸约为 1 μm. 首先将固体 MoS₂ 颗粒涂覆在镁合金板料表面微孔陶瓷层上,使陶瓷层表面形成固体润滑膜. 固体润滑剂颗粒是否能被微孔吸附而留在孔洞内或被凸凹不平表面所吸附,取决于颗粒大小和微孔尺寸. 从图 3 可观察到,本试验使用的 MoS₂ 颗粒 (约 1 μm) 小于微孔尺寸 (1~5 μm),基本上全部留在孔洞中和吸附在凹凸表面上,见图 3 (b). EDS 成分分析结果证明,MoS₂ 陶瓷润滑层有大量 Mo 和 S 存在,如图 3 (c) 所示.

为了证明所研究的润滑层润滑效果,在摩擦试验机上进行了摩擦试验. 本试验是单点接触逐步成形,工具头和板料摩擦是在很短时间内完成的,区别于其他润滑条件下摩擦性能要求^[12-13]. 因此,对于评价润滑材料的摩擦性能,最初摩擦时的摩擦系数和润滑条件是影响加热条件下单点渐进成形的主要参数之一. 从图 4 可知,在摩擦初始阶段,固体 MoS₂

并具有良好的润滑效果和减摩性能.

2 3 渐进成形试验

根据大量镁合金板料渐进成形试验得出,加工工艺制度如下:成形温度为 180~200 ℃,成形角选为 55°;工具头的进给量和移动速度分别为 0.4 mm 和 2 000 mm/min. 在固体二硫化钼润滑剂作用下,对微弧氧化处理板料和未处理板料分别进行方锥体渐进成形. 结果表明,2 种不同方法加工的成形件外表面均光滑、形状完整,且没有裂纹等任何缺陷,如图 5 (a) 和 5 (b) 所示. 未经微弧氧化处理板料处于非连续润滑条件下单点渐进成形,成形件内表面粗糙,局部有划痕,见图 5 (c);而多孔陶瓷层为固体 MoS₂ 润滑剂提供了良好润滑平台,加工件内表面光滑,且没有划痕等缺陷,见图 5 (d). 表明固体 MoS₂ 润滑剂在多孔陶瓷层表面显示出良好的润滑和自润滑效果.

3 分析及讨论

本试验的目的为通过在微孔中储存固体润滑剂,防止加工过程中润滑膜破裂造成成形工具和板料合金的直接接触,并避免工具过早失效和成形件表面质量降低,其润滑机理与减摩复合陶瓷^[13]相同.

图 6 是 AZ31 镁合金陶瓷膜层润滑过程示意图. 为了讨论和说明陶瓷膜层润滑原理,下面分 2 种情况进行讨论.

第一种润滑方法,见图 6 上半部分,固体二硫化钼粉末直接涂在未经任何处理的镁合金板料上,由于金属表面是致密的,无法吸附固体颗粒,因此成形工具头沿预定加工轨迹运动时,和金属表面发生接触,形成新的金属表面;如果固体二硫化钼粉末不能覆盖其新的金属表面,则无法保证加工表面连续润滑,将使工具头和金属处于干摩擦状态. 从而导致加工表面出现划痕,加工件表面质量降低,甚至无法完

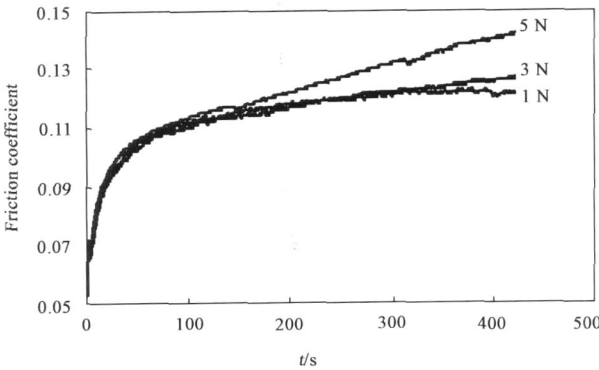


Fig 4 Friction coefficient of MoS₂ coated ceramic coating at loads of 1, 3, 5 N and sliding speed of 2 000 mm/min
图 4 含有 MoS₂ 陶瓷润滑层在不同载荷下的摩擦系数

润滑膜在室温和不同载荷下的摩擦系数均保持在 0.08 左右,受加载大小 (1~5 N) 的影响是很小的. 试验结果证明了,微弧多孔陶瓷层表面具有润滑膜,

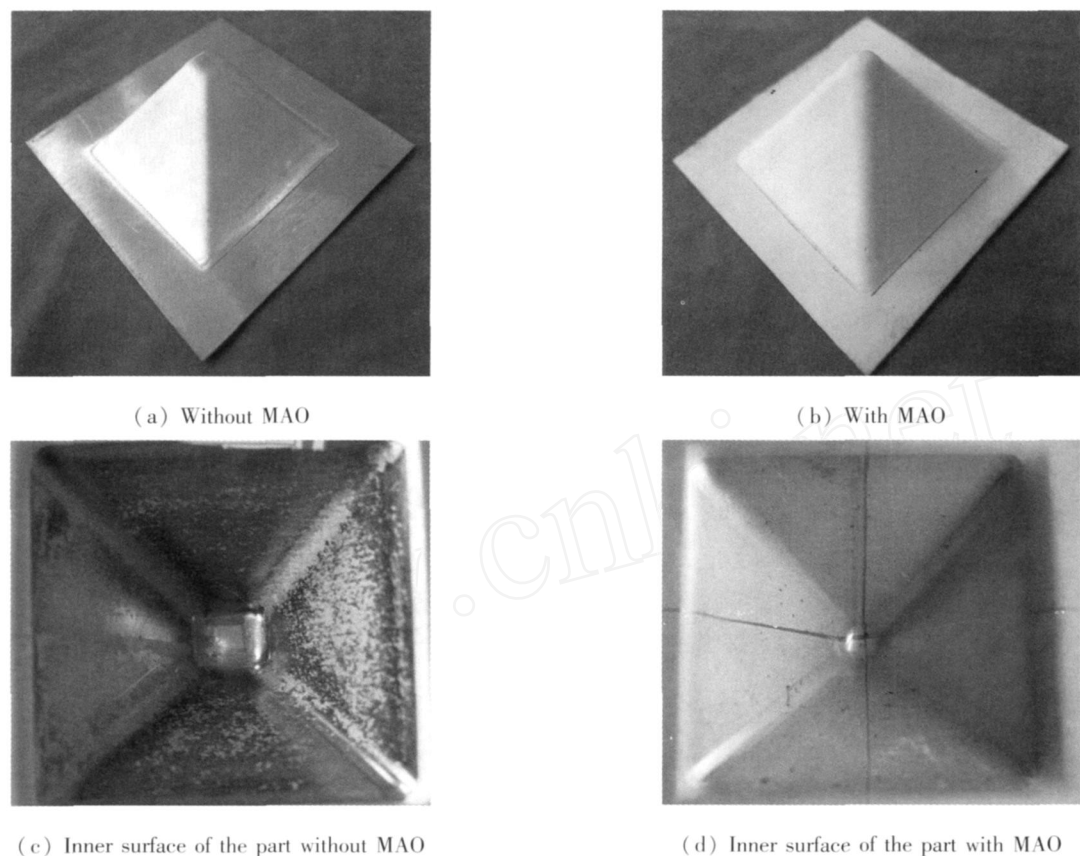


Fig. 5 Square cone of incremental forming of AZ31 alloy
图 5 AZ31 合金渐进成形方锥体样品

成渐进成形;同时由于摩擦力大而降低工具头的寿命.因此,必须有足够多的二硫化钼润滑剂来覆盖整个被加工表面,以保证工具头和金属之间的润滑;但润滑剂添加太多,将影响加工精度并浪费润滑剂.

第二种润滑方法,见图 6 下半部分.第一步:形

钼粉直接涂在被加工的板料微弧氧化多孔陶瓷膜层 [图 6 ()] 上.图 8 表明,由于陶瓷孔洞吸附固体二

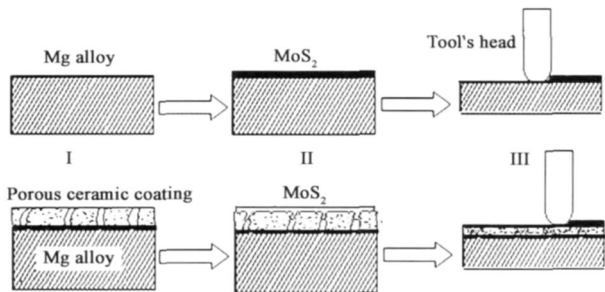


Fig 6 Lubricating mechanism of MAO film
图 6 陶瓷膜层润滑过程示意图

成多孔陶瓷层 [图 6 ()],图 7 是微弧氧化膜层结构模型放大示意图.由图 7 可以清楚地观察到:镁合金表面形成一致密保护层,可保护镁合金氧化和腐蚀,在外表面形成多孔陶瓷层;第二步:固体二硫化

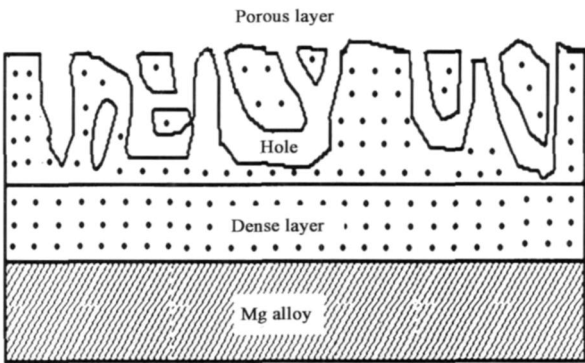


Fig 7 Schematic diagram of MAO film on AZ31 alloy
图 7 AZ31 合金微弧氧化膜层结构模型

化钼颗粒,随着渐进成形的进行,成形件厚度变薄,特别是在成形深度约为 10 mm 时壁厚减薄率最大,也是容易发生破裂的位置,成形表面积逐渐增大,陶瓷润滑膜层厚度也相应地变薄 [图 6 ()].由于陶瓷层的硬度高于镁合金,很难像镁合金一样

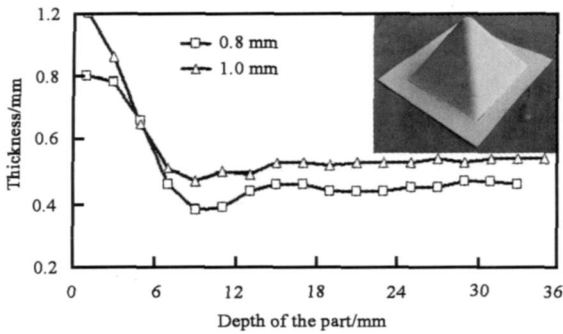


Fig 8 Variations of thickness of incremental forming cone - shaped pieces

图 8 板料渐进胀形方锥件的厚度变化曲线

发生塑性变形,即使在成形过程中润滑膜破坏,孔隙中的润滑剂仍可起到补充润滑作用.由于试样经镶嵌后再研磨抛光处理后很难显示出多孔特征,但从图 9 可以观察到,在镁合金表面有一层陶瓷层,其层中有孔隙的存在痕迹(非规则形状黑色部分),具体组成成分和结构有待于进一步研究和分析.以上试验足以证明陶瓷层中二硫化钼颗粒存在,润滑膜始终处于连续的润滑状态,即具有自润滑效果.朱成顺^[14]指出,按一定比例使用固体石墨和 MoS_2 混合润滑剂,可降低其摩擦系数和发挥其协调作用,也将作为板料热渐进成形润滑剂今后研究方向之一.

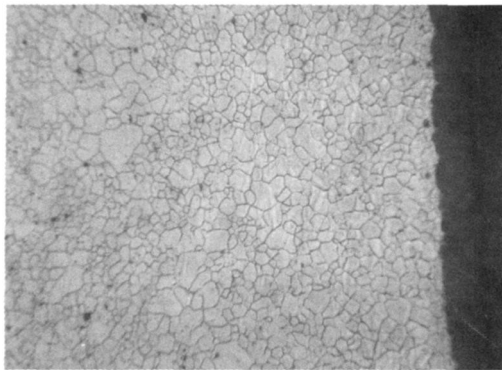


Fig 9 Cross - sectional microstructures of AZ31 alloy after warm incremental forming

图 9 热渐进成形后 AZ31 合金微观组织

因此,与无微弧氧化处理相比,对 AZ31 镁合金板料来说,多孔陶瓷润滑层具有更好的润滑效果.

4 结论

a 镁合金表面微弧氧化多孔陶瓷层吸附固体二硫化钼颗粒,形成多孔陶瓷 - 二硫化钼润滑膜,使板料在高温下点渐进成形保持连续润滑,具有自润滑作用.

b 在摩擦初始阶段,多孔陶瓷固体 MoS_2 润滑膜在室温和不同载荷下摩擦系数均保持在 0.08 左右,具有良好的润滑和减摩性能.

c 与无微弧氧化处理板料相比,多孔陶瓷层为固体 MoS_2 润滑剂提供了良好润滑平台,加工件内表面光滑,且没有任何缺陷.

参考文献:

[1] Yoshihara S Effect of blank holder force control in deep - drawing process of magnesium alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170: 579 - 585.

[2] Kim W J, Chung S W, Kum D. Superplasticity in thin magnesium alloy sheet and deformation mechanism maps for magnesium alloys at elevated temperatures [J]. Acta mater, 2001, 49: 3 337 - 3 345.

[3] 严红革,刘俊伟,陈振华,等. AZ31 镁合金板材超塑性气胀成形研究 [J]. 热加工工艺, 2006, 35 (5): 47 - 50.

Yan H G, Liu J W, Chen Z H, et al Research on superplastic gas bulging forming of magnesium alloy AZ31 [J]. Hot Working Technology, 2006, 35 (5): 47 - 50.

[4] Hussain G, Gao L. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 419 - 435.

[5] Ambrogio G, Filice L, Micari F. A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 413 - 416.

[6] Kopac J, Kampus Z Incremental sheet metal forming on CNC milling machine - tool [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162: 622 - 628.

[7] Ji Y H, Park J J. Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201: 354 - 358.

[8] Ambrogio G, Filice L, Manco G L. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31 [J]. CRP Annals - Manufacturing Technology, 2008, 57: 257 - 260.

[9] 王莉,莫健华,黄树槐. 金属薄板直壁件数字化渐进成形过程的实验研究 [J]. 锻压技术, 2004, 6: 9 - 11.

Wang L, Mo J H, Huang S H. Experimental study of straight wall parts forming process based on sheet metal digital incremental forming [J]. Forging & Stamping Technology, 2004, 6: 9 - 11.

[10] 章志友,赵晴,陈宁. 镁合金微弧氧化膜相组成及结构分析 [J]. 材料保护, 2008, 41 (3): 19 - 21.

Zhang Z Y, Zhao Q, Chen N. The microstructure and phase composition of micro - arc oxidation coating on magnesium alloy [J]. Materials Protection, 2008, 41 (3): 19 - 21.

[11] 梁军,郭宝刚,田军,等. AM60B 镁合金微弧氧化膜层的结构与性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2007, 15 (3): 309 - 312.

Liang J, Guo B G, Tian J, et al Study on structure and

- properties of microarc oxidation coating formed on AM60B magnesium alloy[J]. *Materials Science & Technology*, 2007, 15(3): 309 - 312
- [12] 顾秀娟,王齐华,王金清. 多孔氧化铝陶瓷储油材料的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(2): 123 - 127.
- Gu X J, Wang Q H, Wang J Q. Tribological behavior of methyl silicone oil - pregnant porous Al₂O₃ [J]. *Tribology*, 2004, 24(2): 123 - 127.
- [13] 桑可正,金志浩,刘林. 一种新型减摩复合陶瓷的研究[J]. *摩擦学学报(增刊)*, 2002, 22(4s): 251 - 254.
- Sang K Z, Jin Z H, Liu L. Study of a new - type self - lubricating composite ceramics[J]. *Tribology*, 2002, 22(4s): 251 - 254.
- [14] 朱成顺,刘育,李长生,等. 纳米 K₂Ti₄O₉ 晶须增强型固体润滑涂层在切削加工中的应用[J]. *工具技术*. 2004, 38(6): 18 - 21.
- Zhu C S, Liu Y, Li C S, *et al* Application of Nano - K₂Ti₄O₉ whisker enhanced solid lubrication coat in machining[J]. *Tool Engineering* 2004, 38(6): 18 - 21.

Influence of Microarc Oxidation Ceramic Coating on AZ31 Alloy Sheet in the Incremental Forming

ZHANG Qing - lai¹, FENG Tian - tian¹, XIAO Fu - gu¹, GUO Hai - ling¹,
LI Chang - sheng¹, GAO Lin², HAN Wei - dong³

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

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China

3. Bao Ji Boxin Metal Materials Co., Ltd, Shanxi Baoji 721013, China)

Abstract: The formability of the hot incremental forming of AZ31 magnesium alloy sheet and the lubricating mechanism of the porous ceramic coating were investigated by CNC machine and microarc oxidation (MAO) treatment. The results showed that the porous ceramic coating on top of AZ31 magnesium alloy was obtained by MAO treatment and after adsorbing MoS₂ powder, porous ceramic - MoS₂ lubricating film was formed. MoS₂ powder coated ceramic coating had the initial friction coefficient about 0.08 at room temperature and can be applied for hot incremental forming of the metal sheet. Porous ceramic coating provided a good lubricating platform for MoS₂ lubricant. The inner surface of the formed part was smooth without any defect. The ceramic coating was self - lubricating in the incremental forming at elevated temperatures. Compared with the sheet without MAO treatment, porous ceramic coating has better lubricating effect.

Key words: magnesium alloy, incremental forming, microarc oxidation, ceramic coating, MoS₂

Author: ZHANG Qing - lai, male, born in 1962, Ph.D., e - mail: qlfzhang@sh163.net