

镁合金板料数控热渐进成形时的摩擦和润滑性能

冯甜甜¹, 张青来¹, 肖富贵¹, 韩寅奔², 高霖³, 韩伟东⁴

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013; 2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;
3. 南京航空航天大学 机电工程学院, 南京 210016; 4. 宝鸡市博信金属材料有限公司, 宝鸡 721013)

摘要: 利用数控实验机床和摩擦实验研究 AZ31 镁合金板料数控热渐进成形时的摩擦和润滑机理。结果表明: 镁合金薄板在加热条件下可以实现单点渐进成形; 固体润滑膜可分为粘结型和吸附陶瓷型两种; 固体石墨和 MoS₂ 润滑剂的初始摩擦因数均小于 0.12, 均可保证热渐进成形件获得良好的内外表面质量, 没有任何划痕和裂纹等缺陷; 吸附多孔陶瓷型固体润滑膜具有润滑和自润滑作用, 固体润滑剂颗粒大小对初始摩擦因数有一定影响; 固体 BN 粉末没有起到润滑作用, 不能单独作为热渐进成形用固体润滑剂; 当温度小于 500 °C 时, 固体石墨和 MoS₂ 粉末按一定比例配置的润滑复合喷剂的初始摩擦因数均小于 0.2, 且表现出一定的协同作用。

关键词: 镁合金; 热渐进成形; 固体润滑剂; 摩擦因数

中图分类号: TG146.2; TG386

文献标志码: A

Friction and lubrication performances of magnesium alloy sheet in numerically controlled hot incremental forming

FENG Tian-tian¹, ZHANG Qing-lai¹, XIAO Fu-gui¹, HAN Yin-ben², GAO Lin³, HAN Wei-dong⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;
4. Baoji Boxin Metal Materials Co., Ltd., Baoji 721013, China)

Abstract: The friction and lubrication mechanism of AZ31 magnesium alloy sheets in numerically controlled hot incremental forming were investigated by numerically controlled machine tools and friction tests. The results show that the single point incremental forming (SPIF) of magnesium alloy sheets can be achieved by heating. The solid lubricant film can be divided into two types, bonded and adsorbed ceramic coatings. The initial friction coefficients of graphite and MoS₂ solid lubricant are both less than 0.12, which can ensure to obtain good inner and outer surface of hot incremental forming parts, without any defects such as scratches or cracks. The adsorbed porous ceramic solid lubricant film works as both lubrication and self-lubrication. The size of solid lubricant particles has an influence on the initial friction coefficient. The solid BN powder does not play the role of lubrication. As a result it can not be employed alone as a solid lubricant in hot incremental forming. When the temperature is lower than 500 °C, the initial friction coefficient of the composite sprays mixed with solid graphite and MoS₂ powders by a certain proportion is less than 0.2, exhibiting a synergistic effect.

Key words: magnesium alloy; hot incremental forming; solid lubricant; friction coefficient

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。AZ31 镁合金板

料塑性成形在加热条件下完成, 如热拉深成形^[1]、超塑性成形^[2]、气胀成形^[3]和数控渐进成形。最近几年,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50774037, 51175231)

收稿日期: 2010-12-23; 修订日期: 2011-04-02

通信作者: 张青来, 教授, 博士; 电话: 13641843740; E-mail: zhangql196210@163.com

板料热渐进成形是国内外研究的焦点之一,其中包括 AZ31 镁合金板料温/热渐进成形及其工艺参数等方面的研究^[4-11]。

加热方式和摩擦条件是实施难加工金属板料数控渐进成形的重要影响因素。DUFLOU 等^[12]利用激光源动态局部加热 Al5182 和 Ti-6Al-4V 金属板料改善了成形性能而实现了渐进成形。FAN 等^[13-14]研究了动态局部电阻加热方法进行 Ti-6Al-4V 钛合金板料渐进成形。对纯铝和 08 钢进行常温加工,润滑剂采用润滑油;对金属板料进行中高温条件塑性加工,可采用 MoS₂、石墨和 BN 等固体润滑剂,如固体 MoS₂ 作为镁合金板料热渐进成形润滑剂^[5]。通过多孔陶瓷中浸入固体润滑剂达到抗磨减摩目的,制备了多孔氧化铝陶瓷储油材料^[15]。通过孔中引入石墨和六方氮化硼制得了自润滑复合陶瓷材料,其摩擦因数低至 0.17^[16]。利用微弧氧化(MAO)技术使金属板料表面形成大量微孔,通过吸附固体 MoS₂ 润滑剂达到润滑和自润滑效果^[8-9]。利用电沉积制备了具有良好自润滑性能的铜基二硫化钼复合涂层,并应用在动态电加热热渐进成形中^[14]。

目前,国内外对渐进成形的研究多数仅限于金属板料成形性能的研究,对于板料渐进成形用润滑剂及摩擦机理的研究很少。由于板料热渐进成形涉及加热方法、润滑剂选择及润滑机理,因此,有必要对镁合金板料热渐进成形过程中摩擦和润滑问题进行详细研究和探讨。本文作者通过研究不同固体润滑剂的摩擦性能和热渐进成形实验,探讨 AZ31 镁合金加热板料数控渐进加工成形及其不同固体润滑剂的润滑效果,为完善镁合金塑性变形技术和基础理论及提高板料热渐进成形件的质量提供技术支持。

1 实验

1.1 实验材料

本渐进成形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(质量分数)如下:Al 3%, Zn 0.95%, Mn 0.28%, Si 0.022%, Fe 0.012%, 其余为 Mg。

图 1 所示为本实验所使用各种固体润滑剂的形貌和尺寸。由图 1 可见,固体石墨粉末是片状的,其尺寸大小不一,平均为 2~150 μm,大片状石墨(以下简称“Cb”)如图 1(a)所示,小尺寸石墨(以下简称“Cs”)如图 1(b)所示;固体 MoS₂ 粉末颗粒为细小多边形形状,其尺寸平均为 1 μm(见图 1(c));BN 固体颗粒形状是圆

形的,其平均尺寸为 100 nm(见图 1(d));固体混合润滑喷剂的组成(质量分数)如下:6%~30%Cs+MoS₂ 固体润滑剂,45%~90%有机粘结剂(聚亚安酯),2%~5%抗氧化剂(P₂O)和 1% K₂Ti₄O₉ 晶须^[17],其中 K₂Ti₄O₉ 晶须提高高温摩擦性能。

1.2 实验设备与仪器

镁合金板料渐进成形试验设备^[7-11]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由边缘向心部逐渐成形。

摩擦试验是在 MG2000 摩擦试验机上进行。将固体润滑喷剂涂覆于盘状试样(尺寸为 $d 70 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),用材料为 18-8 不锈钢的环状与盘状试样进行对磨试验。试验参数如下:试验温度分别为常温和 500 °C,试验速度为 2 000 mm/min,压力为 1~50 N。

摩擦因数按下式计算

$$\mu = M / (pr) \quad (1)$$

式中: M 为计算机采集的摩擦力矩, N·m; p 为正压力, N; r 为试样回转半径, m。

用型号为 JEOL JSEM-7001F 的扫描电镜观察断口形貌和表面状态分析。

1.3 实验方案

表 1 所列为本试验所使用的润滑方法和润滑结果。粘结型润滑膜是由有机粘结剂(聚亚胺酯)膜和固体润滑剂构成(试验 A~D),即在镁合金板料表面喷涂有机粘结剂,加热后形成与基体(板料)之间具有足够粘结力的有机膜,再涂敷薄薄一层固体润滑剂,如石墨粉末、MoS₂ 粉末、BN 粉末或其几种混合固体润滑剂。固体润滑喷剂(试验 E):6%~30%Cs+MoS₂ 固体润滑剂,45%~90%有机粘结剂(聚亚胺酯),2%~5%抗氧化剂(P₂O)和 1% K₂Ti₄O₉ 晶须,直接喷涂在镁合金板料表面,加热后直接形成固体润滑膜。试验 F 是将固体石墨粉末直接撒在光滑的镁合金板料上进行渐进成形。

物理吸附多孔陶瓷型固体润滑膜(以下简称“陶瓷型固体润滑膜”)(试验 G)特点是将固体石墨或 MoS₂ 粉末直接涂敷在微弧氧化(MAO)处理后形成的多孔陶瓷层镁合金板料上,利用吸附作用而形成一层润滑层^[8-9]。

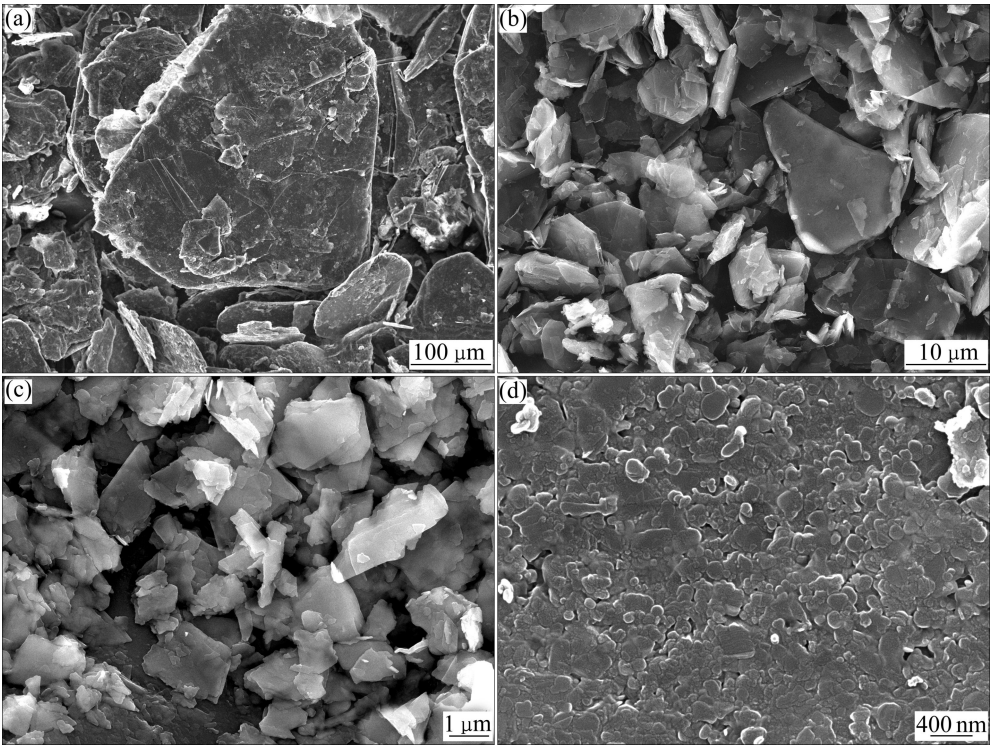


图 1 固体润滑剂颗粒 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphologies of solid lubricant particles: (a) Big graphite (Cb); (b) Small graphite (Cs); (c) MoS₂; (d) BN

表 1 润滑方法和润滑效果

Table 1 Lubricating methods and results

Test No.	Lubricant	Application method	Quality of formed surface
A	MoS ₂	Coated with binder	Good
B	Graphite	Coated with binder	Good
C	Graphite +MoS ₂	Coated with binder	Good
D	BN	Coated with binder	Bad and cracked
E	Solid spray	Sprayed	Good
F	Graphite	Without binder	Rough and nicked
G	Graphite or MoS ₂	Coated with MAO	Good

2 结果与分析

2.1 初始摩擦因数

针对金属板料数控渐进成形的特点, 成形轨迹是成形工具头沿着事先设定模型的内表面单点运动, 由边缘向心部逐渐成形。在此成形过程中, 成形工具头与板料的摩擦特点是瞬间摩擦, 区别于传统的摩擦概念。因此, 本实验测定固体润滑剂的室温初始摩擦因数, 并以此作为评定板料单点渐进成形润滑效果好坏的尺度。

图 2 所示为陶瓷型固体润滑剂的摩擦因数曲线。从图 2 可知, 大片石墨的初始摩擦因数(曲线 1)约为 0.07, 而小片石墨的初始摩擦因数(曲线 5)约为 0.12, 即大片石墨润滑效果优于小片石墨的。而粘结型石墨及石墨+MoS₂ 混合型润滑膜的摩擦因数(曲线 3 及曲线 4)高于陶瓷型石墨及石墨+MoS₂ 混合型自润滑膜的摩擦因数(曲线 1、曲线 2 和曲线 5), 也就是说石墨和 MoS₂ 摩擦因数相差不大, 但多孔微弧陶瓷层大大降低了固体润滑剂的摩擦因数, 即改善其润滑效果, 这是由于连续润滑和自润滑作用结果。尽管如此, 无论是粘结型固体润滑剂, 还是陶瓷型固体润滑剂, 其初始摩擦因数均小于 0.12, 都具有良好的润滑性能。这说

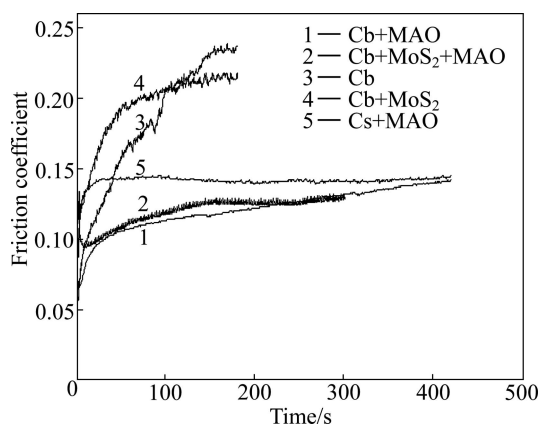


图 2 陶瓷型固体润滑剂摩擦因数

Fig. 2 Friction coefficients of ceramic solid lubricants (Load=5 N)

明初始摩擦因数主要取决于固体润滑剂种类, 受润滑方式影响较小。

图 3 所示为粘结型固体 BN 润滑剂的摩擦因数曲线。从图 3 可知, 固体 BN 润滑剂对不同固体粘结剂的组合协同效果是不同的, 但对石墨或 MoS_2 润滑膜的初始摩擦因数没有影响, 即粘结型石墨润滑剂和石墨+BN 混合润滑膜的初始摩擦因数均为 0.07, 与图 2

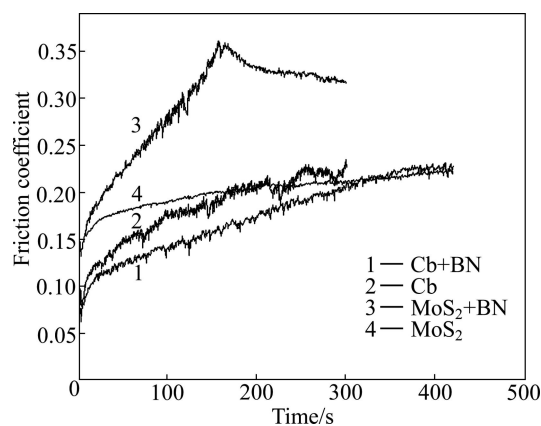


图 3 粘结剂型固体润滑剂摩擦因数

Fig. 3 Friction coefficients of bonded solid lubricants (Load=1 N)

中石墨的初始摩擦因数相同; 而粘结型 MoS_2 润滑膜和 MoS_2 +BN 混合润滑膜的初始摩擦因数均为 0.12。

为了研究压力与温度对固体混合喷剂的摩擦因数的影响, 将不含和含有 $\text{K}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$ 的固体润滑膜试样进行室温和 500 °C 下摩擦实验, 用 18-8 不锈钢的环状与 1Cr18Ni9Ti 盘状试样进行对磨试验。图 4 所示为固体混合润滑喷剂的 SEM 形貌和摩擦因数曲线。从

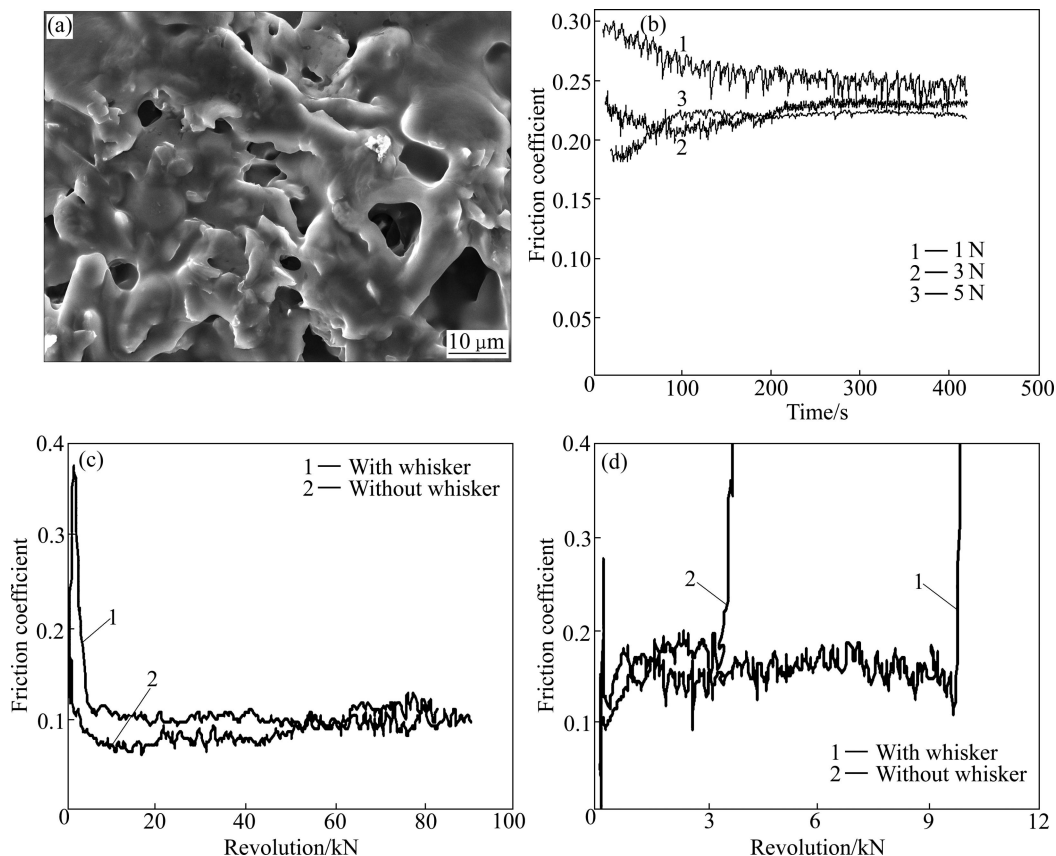


图 4 固体混合喷剂的 SEM 形貌和摩擦因数

Fig. 4 SEM morphology and friction coefficients of solid mixed spray: (a) SEM morphology of solid spray; (b) Load=1, 3, 5 N at room temperature; (c) Load=50 N at room temperature; (d) Load=50 N at 500 °C

图 4(b)和 4(c)可知, 摩擦因数随着压力的增加而逐渐降低且保持相对稳定, 其摩擦曲线特征区别于上述固体粘结剂的摩擦曲线(见图 2 和 3)。当压力为 1~5 N 时, 固体混合润滑喷剂的摩擦因数均为 0.22, 其值大于粘结剂型固体润滑剂的初始摩擦因数 0.07~0.1; 常温下当压力为 50 N 时, 固体混合喷剂的摩擦因数均为 0.1; 当压力和温度分别为 50 N 和 500 °C 时, 固体混合喷剂的摩擦因数均为 0.15。

2.2 渐进成形试验

关于镁合金板料热渐进成形工艺及相关技术, 张青来等^[7-11]进行了大量详细的研究。渐进成形工艺制度如下: 成形温度为 250 °C, 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。下面主要介绍粘结剂型固体润滑剂对镁合金热渐进成形及成形件表面质量的影响, 试验方案与结果详见表 1。

大片固体石墨粉末(试验 F)直接撒在光滑镁合金板料表面。由于石墨粉末与板料基体之间没有粘结力, 处于松散状态, 因此工具头有可能与板料表面直接接触, 特别是石墨粉末不能覆盖其新的金属表面时, 将无法保证被加工表面连续润滑, 以致工具头和金属的

接触面处于干摩擦状态。这种润滑条件将导致被加工件表面出现划痕, 降低加工件内表面质量, 如图 5(a)所示, 甚至因开裂无法完成渐进成形。由于摩擦力大会降低工具头的寿命, 因此必须有足够量的固体润滑剂来覆盖整个被加工表面, 以保证工具头和金属的接触面润滑, 但将大量浪费润滑剂和影响加工精度。

为了使固体润滑剂与金属板料之间具有足够的粘结力, 先在镁合金板料表面喷涂有机粘结剂(聚亚安酯), 加热后板料表面形成一层薄薄的有机膜, 再涂敷一层固体润滑剂, 如石墨粉末、MoS₂ 粉末、BN 粉末或混合固体润滑剂, 这样就在板料表面制备好了一层粘结型固体润滑膜(试验 A~D)。

试验结果表明, 粘结型固体石墨和 MoS₂ 润滑粉末(试验 A 和 B)与板料之间的粘结力足以保证完成热渐进成形所需的连续润滑效果, 加工后的内表面有一层固体润滑膜, 且这些固体润滑剂分布均匀, 表面光滑和无任何划痕等缺陷; 外表面完整、光滑、无裂纹, 如图 5(b)和 5(c)所示。BN 虽然是一种良好的高温润滑剂, 但在工具头沿板料表面作单点渐进轨迹运动时, 工具头与板料之间发生严重摩擦, 将粘结型固体 BN 粉末(试验 D)完全从金属板料表面挤出, 导致板料严重划伤和工具头磨损, 甚至出现新的金属表面, 无法

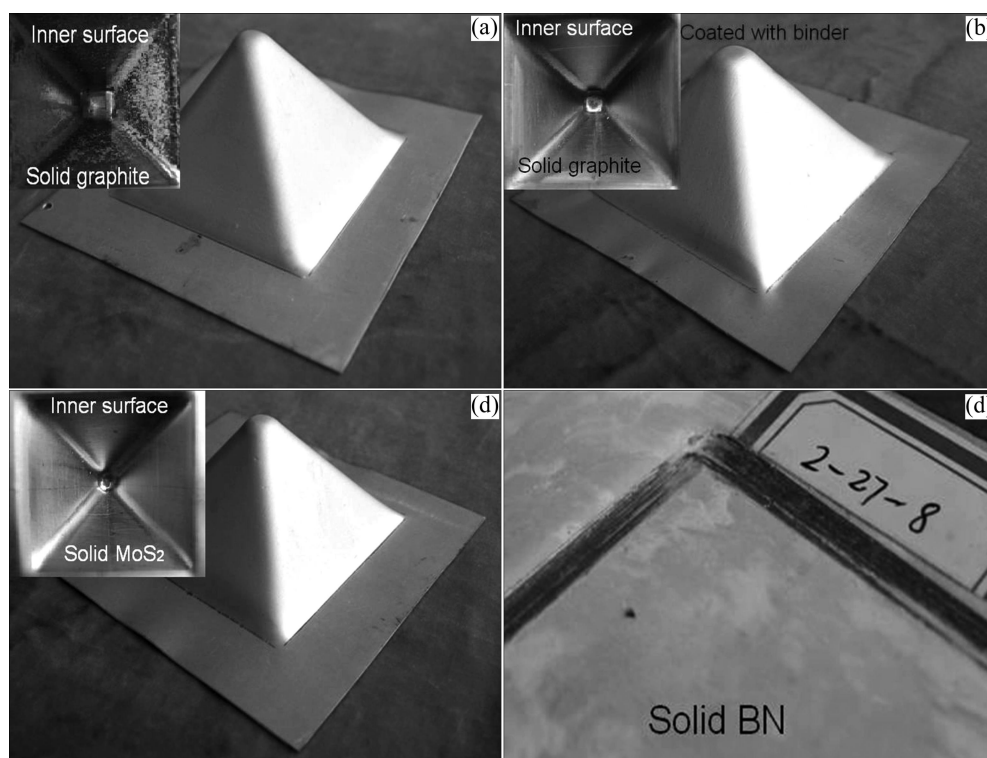


图 5 不同润滑条件下单点渐进成形锥体件

Fig. 5 Formed cone parts in SPIF under different lubricating conditions: (a) Without binder+Cb; (b) Binder+Cb; (c) Binder+MoS₂; (d) Binder+BN

完成渐进加工成形,如图 5(d)所示。这表明粘结型固体 BN 润滑膜的粘结力很小,使固体 BN 粘结剂在加工中没有起到润滑作用,导致成形工具头与板料之间的摩擦主要以黏着磨损为主,这一结果与 TC4 板料在高温下渐进成形的情况一致^[14]。

如果将固体混合润滑喷剂(试验 E)均匀地喷涂在镁合金光滑板料表面上,加热后在固体润滑剂与板料表面形成一定结合力,可提供工具头沿板料运动足够的润滑能力,成形件内外表面质量良好,达到粘结型固体石墨和 MoS_2 润滑效果(见图 5(b)和 5(c)),即内外表面完整、光滑、无划痕和裂纹等缺陷,如图 6(a)所示。从图 6(b)可看出,固体润滑薄膜完全覆盖金属板料表面,即具有良好的连续润滑作用。朱成顺等^[17]指出,按一定比例使用固体石墨和 MoS_2 混合润滑剂,可发挥各种固体润滑剂的协同作用。

多孔陶瓷型固体 MoS_2 润滑膜(试验 G)具有良好的润滑作用,加工件内表面光滑,且没有划痕等缺陷,见图 7(a)。从图 7(b)可观察到,陶瓷层中微孔存在大量固体 MoS_2 颗粒,这足以证明多孔陶瓷固体润滑层的自润滑作用。

3 讨论

板料渐进成形技术是使用成形工具头在计算机控制下沿等高线层面上的加工轨迹运动,以工具头的运动所形成的包络面来代替模具的型面,对板材进行逐次局部变形代替整体成形。加工中成形力主要集中在工具头与板料的接触区。本实验中采用电加热方式将整体被加工板料加热到成形温度而实施渐进成形的,所需要的润滑剂和润滑方式也是不同的。

众所周知,石墨粉末、 MoS_2 粉末、BN 粉末以及自润滑陶瓷膜材料可作为高温固体润滑剂。固体润滑膜可分为粘结型固体润滑膜和陶瓷型固体润滑膜。

张青来等^[8-9]对陶瓷型固体润滑机理进行了详细研究和分析,即利用微弧氧化技术在金属板料形成陶瓷层,其表面分布着大量微孔,利用其多孔吸附作用来实现陶瓷层润滑和自润滑作用。这种润滑方式的优点如下:1)非常简单,易操作和实用,成形前可防止镁合金表面氧化和腐蚀;2)具有良好的润滑和自润滑

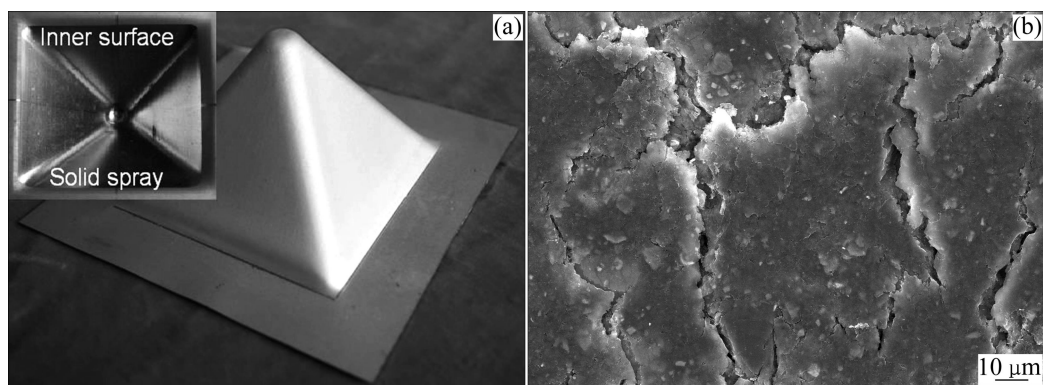


图 6 固体混合喷剂润滑时单点渐进成形锥体件

Fig. 6 Formed cone part in SPIF by solid mixed spray: (a) Formed part by solid spray; (b) SEM morphology of inner surface

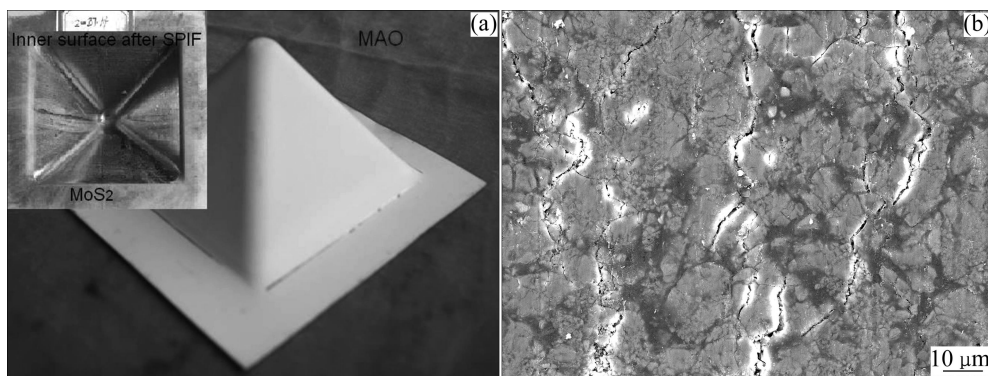


图 7 陶瓷型固体润滑剂单点渐进成形锥体件

Fig. 7 Formed cone part in SPIF by ceramic solid lubricant: (a) Formed part by solid MoS_2 ; (b) SEM morphology of inner surface

作用。陶瓷型固体润滑膜的不足之处在于:250℃时镁合金板料发生软化,其最大流变应力由室温300 MPa降到50 MPa^[11],又由于陶瓷层的硬度远高于镁合金的,很难像镁合金一样发生塑性变形,在成形过程中陶瓷润滑层将发生破裂(见图7(b))。多孔微弧氧化陶瓷层不导电,不适合高温动态电加热TC4板料渐进成形,这是由于电流回路产生高热,同时受润滑剂的限制,如石墨粉末在工具头和板料之间出现电火花,而且在高温和塑性变形下,多孔润滑膜和基体的结合力小,多孔膜完全脱落,增加了板料表面的裂纹。而铜基二硫化钼复合涂层解决了高温动态电加热TC4板料渐进成形的润滑问题^[14]。

关于粘结型固体润滑机理:引入一种有机粘结剂(聚亚胺酯),使镁合金板料表面形成具有足够粘结力的薄薄一层有机膜,目的是增加固体润滑粉末与金属板料之间的结合力,以满足工具头沿金属板料热渐进成形时的摩擦需要。上述渐进成形试验表明,不同固体润滑剂所形成的结合力是不同的。石墨粉末、MoS₂粉末或其混合粉末具有良好润滑作用,满足热渐进成形润滑条件;而BN粉末与粘结剂所形成的结合力很小,不能抵消硬度较高的工具头在较软的金属板料上运动时产生的摩擦力,BN粉末被从接触面挤出来,失去润滑作用(见图5(d))。将固体石墨粉末、MoS₂粉末和有机粘结剂等按比例配置成固体润滑喷剂,然后直接喷涂在镁合金板料表面,加热后形成固体润滑膜,操作简单,润滑效果良好,且能发挥各组分的协同作用。所建议的粘结型固体润滑膜可保证渐进成形件具有良好的内外表面质量,更适合镁合金板料热渐进成形工艺要求。

采用固体润滑剂时,工具头和板料之间的热摩擦可以用“边界摩擦理论”来解释^[14]。边界摩擦又称为边界润滑摩擦,指相对运动的两个金属材料表面被极薄的润滑膜隔开。在边界润滑时,润滑剂的摩擦性能具体数值取决于薄膜的强度和厚度。润滑薄膜分为物理吸附薄膜、化学吸附薄膜以及化学反应薄膜。薄膜的性质取决于润滑剂的组分和金属材料的成分,同时亦取决于接触压力和接触温度。由于镁合金板料成形温度小于300℃,石墨粉末、MoS₂粉末和BN粉末的性能是比较稳定。朱成顺等^[17]指出,在室温和300℃时,K₂Ti₄O₉对石墨-MoS₂固体润滑膜的摩擦磨损性能影响不明显;在500℃时,由于固体润滑剂发生氧化,钛酸钾晶须的增强作用明显,固体润滑膜的耐磨寿命显著提高,而摩擦寿命对板料热渐进成形不是重要参数,关键是润滑膜的初始摩擦因数。这是由渐进成形的特征—单点逐层按轨迹成形决定的。

4 结论

1) 粘结型或陶瓷型固体石墨和MoS₂润滑剂的初始摩擦因数均小于0.12。大片石墨的初始摩擦因数0.07,小于小尺寸石墨的0.12;物理吸附多孔陶瓷型固体润滑膜具有润滑和自润滑作用,与粘结型固体润滑膜具有大致相同的初始摩擦因数。

2) 粘结型或陶瓷型固体石墨和MoS₂润滑剂均可保证渐进成形件获得高质量的内外表面,没有任何划痕和裂纹等缺陷,可推荐作为金属板料热渐进成形用润滑剂;固体BN粉末没有起到润滑作用,不能作为热渐进成形用固体润滑剂。

3) 当压力和温度分别小于50 N和500℃时,固体石墨和MoS₂混合润滑喷剂的初始摩擦因数均小于0.2,受温度影响较小,成形件具有良好的内外表面质量,此时润滑剂表现出协同润滑作用,非常适合金属板料热渐进成形。

REFERENCES

- [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, PARK J D, YOON U S. Superplasticity and superplastic forming of Mg-Al-Zn alloy sheets fabricated by strip casting method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 464(2): 197–204.
- [3] 于彦东, 张凯锋, 蒋大鸣. 轧制镁合金超塑性和超塑胀形[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 71–75.
YU Yan-dong, ZHANG Kai-feng, JIANG Da-ming. Superplasticity and superplastic bulging capability of rolled magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 71–75.
- [4] 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.
- [5] AMBROGIO G, FILICE L, MANNCO G L. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57: 257–260.
- [6] OTSU MASAOKI, KAI YUSUKE, TAKASHIMA KAZUKI. Simultaneous control of shape and properties of AZ31 magnesium alloy sheets by incremental forming [J]. Materials Transactions, 2008, 49(5): 1124–1128.
- [7] ZHANG Qing-lai, GUO Hai-ling, XIAO Fu-gui, GAO Lin, BONDAREV A B, HAN Wei-dong. Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental

- forming[J]. Journal of Material Processing Technology, 2009, 209: 5514–5520.
- [8] ZHANG Qing-lai, XIAO Fu-gui, GUO Hai-ling, LI Chang-sheng, GAO Lin, GUO Xing-wu. Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 sheet: New lubricating method[J]. Journal of Material Processing Technology, 2010, 210: 323–329.
- [9] 张青来, 冯甜甜, 肖富贵, 郭海玲, 李长生, 高霖, 韩伟东. 微弧氧化陶瓷层对 AZ31 合金板料渐进成形的影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(6): 606–611.
- ZHANG Qing-lai, FENG Tian-tian, XIAO Fu-gui, GUO Hai-ling, LI Chang-sheng, GAO Lin, HAN Wei-dong. Influence of micro-arc oxidation ceramic coating on AZ31 alloy sheet in the incremental forming[J]. Tribology, 2009, 29(6): 606–611.
- [10] 张青来, 肖富贵, 郭海玲, 高霖, 王玉华, BONDAREV A B, 韩伟东. 镁合金板材热渐进成形的实验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(5): 120–125.
- ZHANG Qing-lai, XIAO Fu-gui, GUO Hai-ling, GAO Lin, WANG Yu-hua, BONDAREV A B, HAN Wei-dong. Research on the incremental forming of AZ31B sheet at elevated temperature [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(5): 120–125.
- [11] 张青来, 肖富贵, 郭海玲, 高霖, BONDAREV A B, 韩伟东. 各向异性对镁合金板材渐进成形的影响及微观组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 800–807.
- ZHANG Qing-lai, XIAO Fu-gui, GUO Hai-ling, GAO Lin, WANG Yu-hua, BONDAREV A B, HAN Wei-dong. Effect of anisotropy on incremental forming of magnesium alloy sheet and its microstructure evolution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5): 800–807.
- [12] DUFLOU J R, CALLEBAUT B, VERBERT J, d e BAERDEMAEKER H. Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 273–276.
- [13] FAN G Q, GAO L, HUSSAIN G. Electric hot incremental forming: A novel technique[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48: 1688–1692.
- [14] 范国强, 高霖, 李万军, 孙丰涛. TC4 板料点辅助加热数控渐进成形时摩擦和润滑的研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(2): 201–205.
- FAN Guo-qiang, GAO Lin, LI Wan-jun, SUN Feng-tao. A Study of the friction and lubrication in electric hot incremental forming of TC4 sheet[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(2): 201–205.
- [15] 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 Xiu-juan, WANG Qi-hua, WANG Jin-qing. Tribological behavior of methyl silicone oil-pregnant porous Al_2O_3 [J]. Tribology, 2004, 24(2): 123–127.
- [16] 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, 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.
- [17] 朱成顺, 刘育, 李长生, 宋昌才, 范真, 丁建宁, 杨继昌. 纳米 $\text{K}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$ 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 Cheng-shun, LIU Yu, LI Chang-sheng, SONG Chang-cai, FAN Zhen, DING Jian-ning, YANG Ji-chang. Application of nano- $\text{K}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$ whisker enhanced solid lubrication coat in machining[J]. Tool Engineering, 2004, 38(6): 18–21.

(编辑 何学锋)