

综述

铝合金成形中摩擦与润滑的研究进展

邓 亮¹, 娄思源¹, 毛 轩¹, 孙瑞金²

(1. 上海应用技术大学 机械工程学院, 上海 201418; 2. 上海应用技术大学 工程创新学院, 上海 201418)

摘要: 铝合金在汽车、航空航天、船舶等行业中应用广泛。不同种类铝合金的应用和成形工艺不同。室温下铝合金成形有回弹、开裂等缺陷, 温度升高可提高铝合金的成形性, 但摩擦磨损也会加剧。以铝合金的不同成形工艺为脉络, 介绍了不同工况条件下 (主要为温度和压强) 铝合金成形中工件与模具接触副之间的磨损机制和润滑剂的应用, 使用适当的润滑剂可以减少摩擦磨损, 增加表面质量, 提高铝合金工件的生产效率; 梳理了不同铝合金成形工艺下常用的摩擦学试验方法, 总结了标准实验和非标准实验的适用场合和存在的问题, 为后续铝合金成形中的摩擦行为和润滑剂的研究做了铺垫和启发。

关键词: 摩擦学行为; 磨损; 摩擦因数; 润滑剂; 涂层

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.001

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0001-11

Research progress on friction and lubrication in aluminum alloy forming

Deng Liang¹, Lou Siyuan¹, Mao Xuan¹, Sun Ruijin²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. School of Engineering Innovation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Aluminum alloy is widely used in automotive, aerospace, shipbuilding and other industries. The application and forming process of different kinds of aluminum alloy are different. The defects such as springback and cracking may occur in the forming of aluminum alloy at room temperature, and the formability of aluminum alloy can be improved with the increasing of temperature, but the friction and wear will also be aggravated. Based on the different forming processes of aluminum alloy, the wear mechanism and the application of lubricant between workpiece and die contact pair in the forming of aluminum alloy under different working conditions (mainly temperature and pressure) was introduced. The use of appropriate lubricant could reduce the friction and wear, increase the surface quality and improve the production efficiency of aluminum alloy workpiece. The tribological test methods commonly used in different forming processes of aluminum alloy were reviewed, and the application occasions and existing problems of standard and non-standard experiments were summarized, which laid the foundation and enlighten the research on friction behavior and lubricants in the forming of aluminum alloy.

Key words: friction behavior; wear; friction coefficient; lubricant; coating

目前, 轻量化技术可以有效提高燃油效率, 已成为汽车工业发展的趋势^[1]。铝合金因其高强度的质量比、良好的耐腐蚀性和导热性, 成为汽车、航空航天、船舶等行业的首选合金^[2]。根据化学成分和应用领域的不同, 铝合金分为铸造合金和变形合金。具有高硅含量的铸造合金用于铸造, 例如变速

器外壳或活塞, 而变形铝合金用于锻造和钣金成形。变形铝合金进一步分为不可热处理材料和可热处理材料。不可热处理铝合金的力学性能完全来自合金元素和成形过程, 而可热处理 (也称为时效硬化) 铝合金需要特定的热处理来获取其最大强度^[3]。铝合金的成形工艺有很多, 应用领域也各不相同。铝合金板料成形常用于复杂零件的成形; 铝合金轧制用于增强铝合金板材的强度; 铝合金挤压则用于铝合金切削废料的回收, 将铝合金切削废料熔成铝坯后进行挤压成板材或线材; 铝合金锻造一般用于生产汽车轮毂等圆形工件。板料成形过程具有复杂的应变路径, 会产生如回弹 (即在压力释放后导致偏离所需形状的弹性恢复)、局部变薄以及损伤的成核和扩展等问题^[4-7], 这些问题导致铝合金室温下

收稿日期: 2023-09-17; 修订日期: 2023-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005339); 清华大学高端装备界面科学与技术全国重点实验室开放基金资助项目 (SKLT-KF22B16); 上海应用技术大学协同创新基金 (No. XTCX2024-02)

作者简介: 邓 亮 (1986-), 男, 博士, 讲师

E-mail: liangdeng@sit.edu.cn

通信作者: 孙瑞金 (1993-), 女, 学士, 助理实验师

E-mail: sunruijin@sit.edu.cn

的成形性能较低^[8]，因此，铝合金被认为具有较低的室温成形性能。在高温下成形既提升了成形性能，又减少了回弹，允许设计更复杂的零件几何形状，但通常力学强度会降低^[9]。

摩擦磨损是铝合金成形过程中不可避免的问题，尤其铝合金热成形过程中发生的粘结磨损。工件和模具接触所造成的摩擦磨损是制约热成形工件批量生产的关键性问题，一方面摩擦磨损会造成板料表面的划伤、拉毛，另一方面模具上的磨损会使板料拉毛和成形尺寸偏差更为严重，减少模具的使用寿命^[10]。在铝合金板料成形工艺中，摩擦对成形件质量的影响日益突出，摩擦过大会产生表面划痕，过小则会产生回弹、开裂等缺陷^[11]。在铝合金轧制中会发生粘着摩擦和犁耕摩擦，影响铝合金工件的表面质量和工作辊的表面形貌，同时还有其他材料如润滑剂等位于接触副界面处产生的粘性阻力，导致摩擦条件更为复杂^[12]。铝合金挤压工艺通常为高温高压工况，接触副界面处的摩擦机理非常复杂^[13]。铝合金锻造过程中摩擦较为严重，冷锻下模具与工件表面具有很大的表面膨胀和压强，高温下铝合金具有粘附摩擦^[14]。因此，对铝合金成形中摩擦的研究具有重要的理论和实际意义。

铝合金材料活性较大，与模具钢对磨过程中较易发生粘结磨损^[15]。目前，为了应对摩擦学方面的挑战和提高生产效率，业内采用了不同的减少磨损的策略。在铝合金冲压、轧制及锻造过程中通常使用润滑剂和表面工程技术保护模具表面，例如使用物理气相沉积（Physical Vapor Deposition, PVD）涂层减少模具与工件表面的接触。模具涂层也能减少铝合金工件的表面粗糙度，达到在某些工况下减少粘结磨损的效果^[16]。在铝合金坯料挤压过程中，在密闭模具段多采用涂层或者自润滑材料进行润滑^[17]。润滑剂的种类有很多，其中固体润滑剂有石墨、二硫化钼和六方氮化硼，可以单独使用，也可以作为添加剂在液体润滑剂中使用。液体润滑剂可分为油基润滑剂和水基润滑剂。本文根据铝合金成形工艺的不同，介绍了不同的摩擦机制和摩擦学特性，以及不同工艺下所适用的摩擦学研究方法，根据摩擦磨损对铝合金成形的影响，介绍了不同润滑剂在铝合金成形中的应用，并对铝合金成形工艺中润滑剂的发展进行了讨论。

1 铝合金成形的摩擦学行为特性

在铝合金成形过程中，由于工件与模具形成的

接触界面中的接触条件是随着拉延过程动态变化的，因此接触压力在模具与工件表面上分布不均匀。在模具接触转角处容易发生接触压力和滑动速度的快速变化^[18-20]。由于接触面之间的局部约束造成压力不均匀，从而产生相对运动，导致接触副的磨损严重程度也不尽相同^[21-22]。接触界面之间的温度不均匀分布也是影响摩擦磨损的重要因素^[23-24]。以下将从高温、高压工况来分析铝合金热成形过程中的摩擦磨损。

铝合金板料在高温下成形时的摩擦因数（Coefficient of Friction, COF）比在室温下成形时的大，这是因为铝合金的粘附性随温度的升高而增加，导致铝元素转移加剧^[25-26]。Liu Y 等^[27]通过热拉拔试验发现，在室温下铝合金板材的摩擦主要为磨粒摩擦，少见粘结磨损，而随着试验温度升高至 400 和 500 °C 时，铝合金碎屑附着在模具表面，主要摩擦机制为粘着摩擦。Flitta I 等^[13]提出轧制工艺中，较高温度下，坯料与模具的初始接触是粘着和滑动摩擦结合或者完全粘着摩擦。同时有研究表明，在轧制工艺中，300 °C 左右的中等温度下，由于温度升高，逐渐出现粘着磨损，试验温度继续升高，粘着物被剥落，磨损增大。Rigas N 等^[28]通过在 300 °C 下的平带拉伸和深拉延试验，观察到铝合金表面存在锯齿状形貌，粘着在模具表面的铝合金碎屑在滑动过程中被撕裂剥落，由于粘结物的硬度较高，会继续划伤铝工件表面，损伤表面质量。Jain M 等^[29]提出随着摩擦过程的持续，块状磨粒粘结在成形模具表面，形成粘结瘤，当受到切向力作用时，粘结瘤发生脱落，并在接触面之间滑动，使磨损进一步增大。吴佳松等^[30]提出随着温度的升高，金属塑性成形的摩擦机制由单一的粘着磨损转变为粘着磨损、氧化磨损和磨粒磨损的混合。Olsson D D 等^[31]提出高温下铝合金表面生成氧化层，致使摩擦磨损加剧。在高温工况下，润滑剂的润滑性能会发生变化，从而影响摩擦，温度的提升对润滑剂也有显著的影响。Yang X 等^[32]发现相较于室温，300 °C 时润滑脂粘度降低，油膜厚度下降的速度加快，润滑层过快发生破裂。Xia J S 等^[33]通过销-盘摩擦试验发现，温度升高导致油基润滑剂（含二硫化钼和氮化硼）的粘度降低，铝合金表面氧化膜被破坏，铝合金表面发生转移附着力。温度对固体润滑剂以及涂层润滑剂的耐磨性也有影响。Hanna M D^[34]采用平对平往复摩擦试验机，发现在 300~450 °C 时金属接触副表面的氮化硼涂层很容易被剥离，导致铝元素大量转移

到模具钢上, 铝板表面有明显磨损, 而在 100 °C 时则在工件表面未观察到明显划痕。虽然, 以上研究涉及的具体工况不尽相同, 但高温确实是在铝合金成形中影响磨损机理和润滑剂使用的重要因素。

铝合金板料成形工艺中压强一般为几十兆帕到几百兆帕不等^[35-37], 过高的压强会导致工件破裂, 所以室温下铝合金成形性较差。文献 [38] 和文献 [39] 中提及, 铝合金挤压的压强大概为 40 ~ 250 MPa; 铝合金轧制时将铝合金坯料通过一对旋转轧辊的间隙, 因受轧辊的压缩使材料截面减小, 一般压强较大, 为 100 ~ 250 MPa^[40-41]; 铝合金锻造工艺因为赋予工件大变形, 其成形过程中压强最高, 可以从几百兆帕到 1000 MPa^[42]。压强对摩擦学行为的影响与工件和模具之间的相互滑移是分不开的。Scholz P 等^[43]提出干摩擦状态下局部热效应会产生硬度较高的铝合金氧化层磨粒并与铝合金表面发生相对滑移, 加剧工件表面的犁耕和沟槽, 增加磨损; Rusin N M 等^[44]采用铝和钢盘摩擦的试验方法, 发现较轻压力下局部热效应产生的铝合金氧化颗粒导致铝和钢表面均产生细且小的尖锐划痕, 而压强较大时, 划痕则较宽且扁平化; Steiner J 等^[45]提出, 压强增大, 板材与模具的粗糙度峰之间发生粘连, 接触副之间的粘附作用增加, 磨损增大。Dou S S 等^[46]通过销-盘式摩擦试验机, 发现在边界润滑条件下, 随法向载荷的增加, 表面沟槽深度增大, 润滑剂流入槽内, 增加了润滑效果。在润滑条件下, Steiner J 等^[45]提出接触压力增大, 板材表面的微凸体逐渐扁平化, 高接触压力和低滑动速度下, 可以防止润滑剂被挤出滑动表面, 减少磨损; Sabet A S 等^[47]采用销-盘摩擦试验, 研究了接触压力、滑动速度和不同板温对铝合金摩擦磨损的影响, 提出随着接触压力和滑动速度的增加, 摩擦因数有减小的趋势, 这是因为此时铝板表面凹凸不平的犁耕和压平是主要的摩擦磨损机理。Bay N 等^[48]提出在铝合金的全正向冲击挤压 (Full Forward Impact Extrusion, FFIE) 过程中, 工具和工件会产生高摩擦载荷, 其表现形式为极高的高接触法向应力和显著的表面增大效应, 从而导致严重磨损。值得注意的是, 相较于压强, 温度是摩擦学行为的一个更为显著的影响因素。当温度升高时, 铝合金工件屈服下降, 使得成形的压强相对降低, 但摩擦因数却增加^[35, 37]。比如, 在温成形 300 °C 工况下铝合金板料的摩擦因数为 0.7^[26], 与之对应的是铝合金锻造工艺的压强最大, 有几百兆帕, 但摩擦因数却能够低

至 0.25^[49]。高温下更高的摩擦因数往往是与粘结磨损有关。这是因为实际接触面积为微凸峰的总和^[50], 温度升高导致铝合金更软, 进而接触面积增大, 犁耕效应也增加; 此外, 在高温下铝元素活跃, 导致铝合金工件与模具之间的粘附性增大, 加剧粘着磨损^[14]。

2 铝合金成形中摩擦学行为的研究方法

根据铝合金不同制造工艺的工况, 研究者采用不同的试验设备来研究其摩擦学系统, 如销-盘、销-板、带材拉伸、拉拔头、弯曲、半球形拉伸、拉伸或带材收缩^[51-53], 其中销-盘、销-板等试验为标准摩擦学试验, 有规制的仪器设备, 而带材拉伸、半球形拉伸、拉拔头等试验则是研究者根据试验工况尽可能地模拟铝合金成形工况制作的试验设备, 为非标准摩擦学试验。在铝合金成形过程中, 局部摩擦学条件在成形的不同阶段有所不同, 如模具几何形状、局部接触压力和局部表面形貌频繁变化^[47]。随着温度和压强等工艺参数的变化, 摩擦副的表面形貌和摩擦机制也会发生变化。

2.1 标准摩擦学试验

铝合金板料成形试验通常采用标准摩擦学试验装置, 试验通常在低于铝合金固溶温度下进行。同时, 由于铝合金板料成形中稳定摩擦过程中的压强较小, 因此, 在摩擦学测试中设置的法向载荷和压强均较小。Sabet A S 等^[47]采用销-盘摩擦试验研究了滑动速度和表面温度对摩擦因数的影响, 同时, 采用库伦经典模型 (有恒定的 COF 值) 和有限元模拟, 试验在室温和 100 °C 两种表面温度下进行, 采用较大的压强, 分别为 4、7、13 和 16 MPa, 在使用润滑剂的情况下, 室温下 5182 铝合金和 6016-T4 铝合金的 COF 值在 0.06 ~ 0.12 之间, 然而在 100 °C 温度下, 润滑剂的特性发生变化, COF 值相应增大 (0.09 ~ 0.17)。观察表面样貌可看到磨损区域塑性变形的机制是由于法向压力导致的凸起变平, 以及由于模具凸起 (材料较硬), 沿滑动方向施加力而产生的犁沟, 当接触压力增大时, 板料的凸起会变得平坦, 在相同温度下 COF 值反而会降低。因此, 销-盘摩擦试验中磨屑被反复压实在摩擦轨道内, 在黏结磨损为主的情况下导致摩擦过程实际发生在销、盘表面的磨屑层之间, 而高温滑移试验和带材拉伸试验则可以通过更换板料的方式实现模具钢销与板料之间的接触不重复^[54]。

带材拉伸试验是铝合金板料成形常用的试验方法。在带材拉伸中,坯料在正常载荷下夹紧,并通过一组扁平模具(称为压缩区)进行拉拔,测量的拉力用于计算 COF 值。Liu X J 等^[55]在室温下使用带材拉伸摩擦实验机进行实验,着重研究了具有电火花织构表面处理(Electro Discharge Texturing, EDT)的 6016 铝合金板材与 Cr-钢 1.2379 (Cr12Mo1V1)之间的滑动摩擦行为。当板材拉伸方向与轧制方向平行时,获得最大摩擦因数。de Argandoña E S 等^[56]使用带式拉伸摩擦计研究了 1050 铝板材不同电火花织构表面处理对表面粗糙度($Ra=0.14\sim 1.7\ \mu\text{m}$)的影响。试验在室温条件下进行,压强分别为 1、2、5、10 和 15 MPa。当表面粗糙度为 $1\ \mu\text{m}$ 时, COF 最小,降低表面粗糙度可改善成形性能。Flegler F 等^[17]使用带式拉伸摩擦计研究了无润滑和边界润滑条件下具有光滑表面(Mill Finish, MF)的 5083 铝合金板材的实际接触面积对摩擦磨损的影响。试验在室温条件下进行,且压强较大,为 75 MPa,这与材料以及温度有关。Flegler F 等^[17]通过微纹理调整接触面积,以实现 17%~65%范围内不同的承载比。在高承载比下,磨损量减少了 90%。同时, Liu Y 等^[27]也提出拉拔试验相较于球-板摩擦试验和销-盘摩擦试验,减少了往复运动造成的非必要摩擦,更符合铝合金板料热成形的实际工况。铝合金板料成形摩擦试验中,试验压力一般较小,且销-盘等摩擦试验中的压力均通过名义载荷计算,试验所能达到的名义压力均较低,滑移距离较小,难以模拟热成形中可能出现的较大压力的摩擦情况^[54]。

Pop M F 等^[57]采用环压缩法测定了室温下润滑条件对 6068 铝合金镦成形的摩擦性能的影响,采用库仑摩擦模型确定 3 种表面润滑条件(干摩擦、矿物油润滑和石墨油润滑)下的 COF 值,结果表明,润滑条件好的状况下 COF 减小,同时,在环压缩试验中润滑条件会影响铝合金内径,进而影响铝合金的应力、应变。大量研究人员使用环压缩测试来研究摩擦,但这种摩擦仅限于低摩擦水平^[58]。铝合金挤压和轧制成形过程的特征是镦粗操作,因此,环压缩试验方法可应用于铝合金锻造、轧制等工艺。

标准试验参数和试验条件较为常规,不同研究之间可以进行定量比较,但成形温度不会太高,同时根据不同的工艺工况要求,压强较低,且一般采用名义载荷计算,不太符合热成形等工艺的实际工况。

2.2 非标准摩擦学试验

高温下,铝合金成形过程中的摩擦学行为机理更为复杂。铝合金板料冲压的摩擦试验方法之一是深拉延(Deep Drawing)试验^[59]。Tenner J 等^[60]采用深拉延试验研究了 AA6014 铝合金板料冲压中模具涂层和润滑剂对 COF 和成形性的影响,试验表明,使用无涂层的模具时,铝合金工件表面有明显凹槽,铝颗粒粘附在模具表面,涂层可以防止粘附,且硬度较大,可以增加模具的使用寿命,模具涂层和润滑剂可以有效降低铝合金板料成形中的摩擦磨损。为了能更好地模拟铝合金成形的实际工况,研究者发明了不同的摩擦试验机,以满足摩擦试验中高温或者高压的要求。Zhou R 等^[61]使用平对平摩擦计研究了室温下不同接触条件下的电火花织构和打磨光滑表面对 AA6111-T4 片材摩擦行为的影响,平对平摩擦试验相较于销-盘摩擦试验更容易控制,且更换成对接触副,可使每次接触时接触表面均为初次接触,避免了往复式运动,但更换接触副需要注意对中性问题^[54]。Funazuka T 等^[62]采用热向前向后挤压(A Hot Forward-back Ward Extrusion)摩擦试验研究了较高温下($425\sim 500\ ^\circ\text{C}$) 7075 铝合金的剪切 COF 值。Hu C L 等^[63]将向前向后挤压摩擦试验发展为冷锻摩擦试验,与传统的摩擦试验(如环压缩试验)相比,该试验的特点是具有更高的表面积膨胀比和接触正应力,可以作为复杂锻造和挤压过程的摩擦试验。Kalin M 等^[64]通过高温滑动两根杆的双杠交叉摩擦试验机研究了 6060 铝合金和 H13 模具钢之间的 COF 和铝合金向模具钢的转移。试验结果表明,涂层可减少铝元素的转移,且滑动距离越大转移越多,但随着温度升高,同一种涂层对减少铝合金转移的效果发生变化。相比带材拉伸试验,该试验装置所允许的滑移距离更长,可达 65 mm,且滑移距离会影响摩擦因数的变化趋势。Yanagida A 等^[65]提出了一种自制扁带材拉伸试验装置,该装置直接将加热后的毛坯送入压缩区,用于润滑工况下高温轧制的参数研究。该试验用于铝合金板料热成形工艺中的摩擦学研究。该装置板料加热至固溶温度后,可直接进行拉伸,加热炉和摩擦装置的距离较小,温度损失较少,但铝合金热成形中的入模温度对铝合金成形性能的影响研究还不够。Hanna M D^[34]开发了一种新的台架测试方法,评估了 5083 铝合金板材接触的模具材料在磨损和粘附方面的摩擦学特性。研究者采用接触电位量化板材与模具之间的摩擦,大量的粗糙接触会产生低接触电

位, 接触电势给出了通过接触面积测量的表面粗糙相互作用程度的定量指示。这些测量还可以帮助确定润滑油膜或表面涂层的变化, 以帮助确定粘附的开始, 并评估涂层及其润滑效果。

非标准试验的限制条件相对较少, 工艺条件可以设置为更高的温度和压强, 以及更长的滑移距离, 可以更好地模拟铝合金成形的实际工况, 且可以将试验结果更加直观地显示出来。但由于非标试验的工艺参数差别较大, 因此, 不同非标试验设备所得结果之间较难进行定量比较。

3 铝合金成形中润滑的研究

在金属成形过程中, 摩擦过程对模具的使用寿命、材料的可成形性和成品的质量起着非常重要的作用^[66]。摩擦引起工件材料转移而形成粘结磨损, 而粘结磨损导致的形貌改变会再影响后续的摩擦过程。合适的润滑剂可以减少摩擦, 缓解磨损, 这对成形性较差的铝合金制造尤为重要。润滑方案的确定直接与工艺参数相关联。不同牌号铝合金的固溶处理和热处理温度也不相同, 针对批量化生产的铝合金热成形件的工艺参数研究正在高速发展, 其相关工况下的润滑方案还在探索阶段。

3.1 铝合金板料冷成形

在室温下, 通常油基润滑剂的润滑性能较好。Podgornik B 等^[67]使用由 12-羟基硬脂酸锂增稠剂、优质矿物油、缓蚀剂和抗氧化剂制成的商用 NLGI 2 类润滑脂作为基础润滑剂, 将六方氮化硼固体润滑剂粉末手动混合在锂脂润滑剂中进行搅拌, 相比于王佳贝等^[68]制备润滑剂时在室温下进行搅拌, 此研究提前预热至 50 °C 后再进行搅拌, 可以确保六方氮化硼粉末在润滑剂中更好地分散, 润滑剂也尽可能多地减少模具与工件表面的接触面积。研究发现, 最佳润滑性能与特定粗细固体添加剂的配制比例有关, 由于六方氮化硼粉末的硬度较大, 其粒径和浓度会影响润滑剂的润滑性能, 甚至可能发生颗粒聚沉。同时, 在高浓度润滑脂中加入大粒径的六方氮化硼粉末, 可以增加润滑剂的承载能力。试验在常温下进行, 且材料选取为市售的成品润滑脂。何熙等^[69]以具有特殊双硫醚结构的二硫代二苯甲酸和异辛醇为原料合成了目标酯类润滑油, 其具有良好的氧化安定性和热稳定性, 分别对钢/铜、钢/铝摩擦副进行摩擦学性能测试, 通过对磨斑表面分析, 此酯类润滑油具有抗极压性能, 且润滑油在钢/铝摩擦副

中的润滑性能为化学反应与物理吸附共同作用的结果。根据磨斑表面分析发现, 润滑剂成分与在摩擦副基材表面的化学反应对润滑性能起重要作用。同样地, Hironaka S 等^[70]将长链和极性的季戊四醇辛酸半酯物质分散在基础油中合成了润滑剂, 并将其应用在铝-钢销盘摩擦试验, 发现润滑剂在铝合金表面形成单分子层吸附膜, 有效降低了磨粒磨损, 降低了 *COF* 值。王佳贝等^[68]详细地介绍了石墨烯作为添加剂, 其在成品润滑油中的制备方法, 试验中未考虑不同质量分数的石墨烯和其他分散剂对润滑剂的影响, 对添加剂的种类和浓度、粒径等参数对润滑剂润滑性能的影响可以进行系统的研究。

铝合金板料冷成形中会应用水基润滑剂。姚娜等^[71]研究了一种含元素 P、N 的油酸基水基润滑添加剂 (Oleic Acid-based Extreme Pressure Water-based Lubricant Additive, OWELA)。通过四球摩擦试验机进行减摩抗磨试验, 发现与纯水、聚合 P-N 二元醇等其他润滑剂相比, 含极压元素 P、N 的油酸基水性润滑添加剂可以与钢形成高强度化学反应膜, 同时, 也可以与脂肪酸分子在金属表面形成物理吸附膜, 两者协同增效, 使其具有良好的润滑性能。试验在室温下进行, 且含极压元素 P、N 的油酸基水性添加剂的防腐蚀性能好。Chen L 等^[72]制备了氧化石墨烯/聚乙二醇 (Graphene Oxide/Polyethylene Glycol, GO/PEG) 复合水基润滑剂, 在室温下进行球盘往复摩擦试验, 结果表明, GO/PEG 复合水基润滑剂在水中具有优异的悬浮性能, 与水润滑相比, GO/PEG 复合水基润滑剂的平均 *COF* 值和磨损率分别降低了 78.8% 和 88.8%。GO/PEG 复合水基润滑剂的优异润滑效果能有效减少冷焊和粘着磨损现象, 主要是因为 GO/PEG 复合水基润滑剂首先填充摩擦配合的凹凸表面形成高质量的润滑膜, 同时, 氧化石墨烯 (GO) 具有特殊的空间结构和低剪切力。Kreivaitis R 等^[73]研究了一种氨基聚合物 Pil 作为水基润滑剂添加剂, 其较容易在金属表面形成吸附层, 帮助隔绝铝-钢摩擦副的直接接触, 改善水基润滑剂的润滑性能, 还可以提高水基润滑剂的防腐性能。

3.2 铝合金板料温成形

在不同的铝合金成形工艺中, 润滑剂的作用机理和影响润滑剂性能的因素可能不尽相同。Schell L 等^[74]提出在铝合金板料温成形和热成形过程中, 润滑剂的性能可能取决于其在接触副之间充分覆盖的能力。随着对磨过程的持续, 当润滑状态由全膜润滑状态转变为边界润滑状态时, *COF* 增大。而在室温

条件下, 润滑剂的润滑效果受接触压力和滑动速度的影响, 接触压力的增大和滑动速度的降低, 导致膜厚的减小速率增大, 更早地发生润滑油击穿现象^[75]。

随着温度的升高, 油基润滑剂会有起火的风险^[76], 因此, 水基润滑剂更能适应高温工况。水基润滑剂具有导热性能好、环保和性价比高等优点^[77-78]。Yanagida A 等^[79]研究了在 200 ℃ 的预热模具上喷洒两种水基锻造润滑剂, 并将其应用于板料热成形工艺中。试验表明, 相对于干燥条件, 22MnB5 钢的平均 COF 可有效降低 48% (从 0.58 降至 0.30), 而带有 Al 涂层的 SPHC 钢的平均 COF 可降低 65% (从 0.43 降至 0.15)。因此, 在铝合金板料热成形中, 水基锻造用润滑剂是否可以减少摩擦磨损, 需要进行试验研究。Decrozant-Triquenaux J 等^[80]使用商用润滑剂, 由聚合物和硅氧烷的水乳液组成, 在 300 ℃ 下进行干燥和润滑试验, 将使用 DLC、CrN、CrTiN 和 CrAlN 涂层工具钢的测试结果与未涂层工具钢的测试结果进行了比较, 发现 DLC 和 CrN 涂层与聚合物润滑剂配合使用在减少铝元素转移方面是最有效的。一方面, 模具超硬涂层表面较光滑, 有效减少了摩擦过程中因表面缺陷引发的材料转移; 另一方面, 润滑剂在铝合金板料的接触面上形成“蓄水池”, 增加了润滑性能。这与郑友华等^[81]的研究结果一致。试验材料处理同样采用了先加热至高于固溶温度, 再进行冷却时效处理的方法, 试验在 300 ℃ 高温工况下进行, 符合铝合金热成形的实际工况。研究表明, 合适的涂层与润滑剂搭配使用可以增加润滑剂的润滑性能, 但单独的涂层进行干摩擦时却发生了大量的铝元素转移和严重的粘着摩擦, 且涂层的粗糙度也会对粘着摩擦的程度有一定影响。因此, 在铝合金热成形摩擦过程中搭配使用涂层和水基润滑剂时, 涂层与金属的粘着程度、涂层磨屑对润滑剂工作过程中的影响、涂层的粗糙度是否合适以及涂层元素与润滑剂, 以及基材金属中的元素是否匹配等问题需要进一步探索。

3.3 铝合金板料热成形

在高温下, 由于复杂的摩擦学条件, 包括铝合金热成形中温度的多变和材料的受力复杂, 典型的润滑剂无法正常工作。Ngaile G 等^[82]通过在聚二甲基硅氧烷油中添加六方氮化硼粉末, 制备了六方氮化硼硅油润滑剂, 板料温度保持在 430 ℃, 模具温度分别为 260 和 370 ℃, 大致符合铝合金热成形的实际高温工况。该研究进一步指出, 相比石墨六方氮化硼硅油润滑剂在高温时硅油氧化分解, 六方氮

化硼硅油润滑剂可以减少六方氮化硼层片之间和六方氮化硼与金属表面之间的摩擦。硅油和六方氮化硼一起作为润滑膜有效地降低了 COF 。硅油在较低温度下表现不佳, 但在 370 ℃ 高温状况下, 润滑效果得到明显提升, 双润滑机制则增加了六方氮化硼硅油润滑剂的润滑性能。余均武等^[83]在工业白油中加入适量的添加剂, 用作不锈钢板材拉伸冲压用润滑剂的研究, 能够有效提升润滑性能。这是因为不锈钢板材拉伸时温度可以达到 400 ℃ 以上, 而氯化石蜡在温度高达 120 ℃ 以上时, 就可以进行分解, 生成金属保护膜, 配以二硫化钼粉末, 共同提高了润滑性能。研究中的润滑剂是根据不锈钢薄板拉伸具有的拉伸力大、加工硬化严重、摩擦力大、局部高温、易产生粘结瘤等特点来选择和配比, 则铝合金热成形过程中的润滑剂也应该根据其受力复杂、铝元素易转移、高温工况等特点来进行选择和制备。配制润滑剂时也可以以几种物质为原料合成新的物质来提升润滑性能。

铝合金热冲压的摩擦试验一般采用销-盘摩擦, 但此种试验方法中润滑油很容易被往复运动中的销“挤压”出去^[4]。固体润滑剂具有良好的耐高温性, 通过隔离模具与板材之间的直接接触, 减少元素相溶性, 防止发生铝元素转移, 同时, 本身较低的层间剪切力也提供了不错的润滑性能。但随着温度升高, 润滑剂附着力会降低, 隔离作用消失。Liu Y 等^[27]研究了固体润滑剂 (石墨、二硫化钼和六方氮化硼) 对铝合金成形摩擦的影响。石墨具有优异的润滑性能, 基本不受工件温度的影响。二硫化钼在室温下的润滑效果良好, 但随着温度升高, 附着力减弱, 润滑效果减弱。Rapoport L 等^[84]将纳米无机富勒烯二硫化物 (IF-MoS₂/IF-WS₂) 作为添加剂加入到基础油中。富勒烯二硫化物纳米粒子具有球状结构, 渗入到接触界面时, 接触副表面的摩擦方式为滚动摩擦, 纳米粒子在接触副的间隙中, 分离出分子膜覆盖在粗糙表面, 降低了表面活性, 减少了接触面积, 大大提高了润滑性能。六方氮化硼在高温下 (400 ℃ 以上) 不易氧化, 润滑性能优异^[27]。这是因为在较高温度下, 六方氮化硼润滑剂与模具间的附着力较强, 可以提供良好的吸附效果, 进而整体润滑性能得到提升。修天洵等^[10]采用高温销-盘摩擦试验方法, 研究得出在 800 ℃ 高温工况下, 单层 (层厚为 6.0 μm) 的六方氮化硼粉末相比干摩擦具有润滑减摩效果, 且使用多层粉末 (层厚为 15.0 μm) 时的 COF 更小。石墨同层原子间的结合力比平面间结合力大很多, 层与层之间发生相对位

移所需的切向应力相对较小, 因此 COF 很低。

在铝合金板料热成形中, 随着温度升高, 粉末润滑剂也有良好的效果。Rigas N 等^[28]提出在高温状况下, 粉末润滑剂熔化后附着在表面, 可以隔离铝合金表面和模具钢表面之间的接触。Ghiotti A 等^[85]采用石墨粉末分散在水中, 以水基触变凝胶的形式存在, 液体可填充铝合金板表面的山谷, 在高温状况下, 水成分蒸发, 石墨元素粘附在表面, 使表面粗糙度降低, 从而减小 COF 。Hanna M D^[34]采用氮化硼粉末润滑剂进行 5083 铝合金板料摩擦学行为的研究, 在粉末润滑剂附着期间, 相对于无润滑的铝合金板, 氮化硼粉末润滑的铝合金板的 COF 更低。同时, 由于温度 (450 °C 以上) 和摩擦时间等因素的影响, 润滑剂在铝合金板料表面的附着减少。因此, 在铝合金板料热成形工艺中, 润滑剂在接触副表面的附着性能与工况之间的定性、定量关系需要进一步探索。

3.4 铝合金轧制

在铝合金轧制过程中需要使用润滑剂-冷却剂以减少 COF , 减少接触面压力, 减少模具弹性变形, 从而提高表面质量, 提高工艺效率。Shatalov R L 等^[86]研究了 3 种润滑剂 (棕榈油、润滑油 LC 和工业油) 对铝合金带材轧制特性的影响, 试验采用试验室双辊机, 在室温条件下进行。在无润滑的条件下, 铝合金轧制的 COF 为 0.092。试验表明, 使用润滑剂会使带材厚度的纵向差异减小, 降低轧制力, 减小 COF 。同时, 该研究者还研究了室温下不同轧辊润滑材料对给定化学成分的 AD33 铝合金薄材沿长度方向冷轧的应变和功率指标影响的定量规律, 结果表明, 工业油的润滑效果最好, 能提高轧制的功率和轧机出口带材长度的稳定^[87]。

润滑剂的使用与轧制材料以及表面粗糙度有关, 表面粗糙度会影响润滑膜的性能进而影响摩擦因数^[22]。对于铝板, COF 随着工件表面粗糙度的增大而减小, 但表面粗化处理会使不锈钢板轧制时的润滑状况变差。随着夹带速度的增大, 光滑工件的 COF 减小, 粗糙工件的 COF 增大, 随着滑动速度的增大, COF 减小^[88-89]。

3.5 铝合金挤压

铝合金挤压中, 润滑剂的主要作用为隔离模具与工件之间的接触。Prieske M 等^[90]提出润滑剂可以被用作中间材料, 来保证模具和工件表面的物理分离, 达到防止磨损和增加模具的使用寿命的目的。润滑剂有效防止金属接触的条件是改善在接触表面

所形成的润滑膜厚度^[91]。吴立波等^[92]研究了水基润滑剂中石墨含量对铝合金筒体凸台的侧向挤压成形 COF 的影响, 结果表明, 石墨的质量分数 18% 时, 石墨粉末可以均匀地覆盖在接触表面, 形成润滑薄膜, 润滑剂的 COF 显著降低, 适合铝合金高温挤压成形。对于铝合金温热挤压技术, 由于高温工况, 不仅要求润滑剂具有比传统润滑剂更好的润滑作用, 还要能够承受高温、高压等苛刻的工作条件^[93]。肖华等^[94]提出滑石粉对不同温度下铝合金温挤压的 COF 和成形性有不同影响, 这是因为在不同工况下, 润滑剂的流动性和表面附着力不同, 铝合金温挤压试验结果表明在 350 °C 时 COF 最小, 成形性最好。

铝锭挤压成棒材的过程中, 铝合金在成形段和容器中是密封的, 直接喷涂润滑剂受限^[62], 采用起润滑作用的模具涂层是一种替代方案。文献 [64]、文献 [95] 和文献 [96] 使用高温滑动两根杆的双缸交叉摩擦试验机对热挤压铝合金进行了一系列摩擦试验, 研究了 CrN 和 TiAlN 模具涂层对铝合金热挤压中摩擦磨损的影响。在 300 ~ 500 °C 的温度范围, TiAlN 涂层因其优异的抗铝热粘附性能得到最低的摩擦因数。Birol Y 等^[97]进行了滑动磨损试验, 摩擦副为 6063 铝合金和制备了涂层的 H13 模具钢, 发现与镀有 CrN 涂层的模具相比, 镀有 AlCrN 和 TiAlN 涂层的模具的 COF 和磨损量更低。AlTiN 涂层对铝具有较高的耐化学性能, 可减少铝元素的转移, 使表面铝沉积更少, 更加光滑, 铝合金具有更高的硬度、耐磨性和抗氧化性。这些研究表明, 模具涂层在铝合金成形中能显著降低摩擦力。

3.6 铝合金锻造

在冷锻过程中, 采用生物润滑油可以降低 COF , 减少对周围环境的污染。Yahaya A 等^[98]采用棕榈油基润滑油研究了生物润滑剂在冷锻过程的影响, 发现棕榈硬脂 (Plam Stearin, PS) 油基润滑剂可以有效减少金属与金属之间的接触面积, 减少摩擦, 但由于该润滑剂在室温下保持半固体状态, 粘度较大, 磨损碎屑被困在接触副表面, 很难被挤压剥离出去, 成形工件的表面粗糙度较大, 导致表面质量较差。Buchner B 等^[99]采用石墨在水、水和矿物油的乳液、矿物油中分散的润滑剂进行铝合金的镦粗试验, 通过试验观察工件的表面样貌和 COF , 得出了润滑剂具有减小 COF 和表面粗糙度的作用。他们进一步指出, 使用石墨在水中扩散的润滑剂的 COF 和工件表面的粗糙度更低, 但因为模具的温度太低, 后两种含矿物油基的润滑剂无法蒸发承载剂,

在锻粗过程中, 润滑剂容易被挤出模具-工件界面, 不能完全阻止铝元素的粘附, 因此, 矿物油基润滑剂更适合较高温度下的模具使用^[99]。

热锻过程中, 大部分发生摩擦和剧烈温度变化的严重变形区域属于接触副表面和毛坯的中心或边缘部位, 形状复杂, 因此, 需要润滑剂来应对复杂的工作环境。Lee S W 等^[58]将试样加热至 200 ℃, 在含有石墨润滑剂的水中淬火, 再通过电加热器加热至 450 ℃形成固体石墨润滑剂涂层, 附着在工件表面上, 分别在 300、350、400、450 和 500 ℃的较高温度下进行试验, 试验所得的 *COF* 在 0.05~0.30 之间。润滑剂会因工件的严重变形而损坏, 随着温度的升高, 润滑剂稳定性会相应地减少, 润滑性能相对降低。特定加工温度和润滑剂的最佳性能需要进一步研究。研究学者也通过在基础油中加入添加剂来提高润滑性能。Alimirzaloo V 等^[100]研究了有氧化铜和氧化铝纳米颗粒制成的纳米润滑剂对锻件表面质量的影响, 发现纳米润滑剂可以显著改善表面粗糙度, 减少金属接触副间的摩擦。Fann K J 等^[101]在油基润滑剂中加入石墨或二硫化钼制备成润滑剂, 在 6061 铝合金热环压缩试验中发现其可以有效降低摩擦因数, 提升表面质量。Sabet A S 等^[102]对铝合金成形常用润滑剂进行质谱分析, 发现了防腐剂抑制剂、抗氧化剂以及摩擦改进剂和抗磨添加剂, 可用于控制摩擦、减少磨损。

4 结论与展望

(1) 通过对铝合金多种成形工艺的分析, 得出温度、压强和表面粗糙度是影响摩擦学行为的重要因素。随着成形温度的升高, 摩擦机理由冷成形的磨粒摩擦磨损为主转变为温成形的粘着摩擦、磨粒摩擦、氧化摩擦混合, 再转变为较高温度下的粘着摩擦为主, 摩擦因数也相应增加, 表面粗糙度增加。润滑剂和模具涂层可在一定程度上减少粘结磨损和磨粒磨损, 且铝合金挤压处更依赖涂层进行润滑。但不同工艺中接触条件复杂, 对铝合金摩擦学行为的影响缺乏系统性的研究。

(2) 标准试验可以定量比较, 但由于试验设备的限制, 试验条件设置趋向于低压强, 往复式的对摩副不能很好地模拟铝合金成形的实际工况。非标准试验中, 研究者根据研究因素研制设备, 更好地模拟了接触副表面的接触条件, 但会产生其他不确定性因素, 如对中性、温度控制等。铝合金成形过

程中影响摩擦学行为的因素较多, 试验设备的系统性以及如何更好地模拟实际工况需要进一步研究。

(3) 不同的铝合金成形工艺中, 应对摩擦磨损的策略和方法不同。润滑剂可尽可能地覆盖接触副表面, 减少摩擦。模具涂层可改善表面质量, 减少粘结摩擦。根据铝合金成形各类工况的摩擦学行为分析, 温度是影响润滑剂和涂层稳定性和润滑性能的重要因素。因此, 结合具体工况, 通过制备最合适的润滑剂并配合表面工程技术是当下应对极端工况中剧烈摩擦磨损的重要手段。

参考文献:

- [1] Hosseini-Tehrani P, Nikahd M. Two materials S-frame representation for improving crashworthiness and lightening [J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44 (4): 407-414.
- [2] Kim H J, McMillan C, Keoleian G A, et al. Greenhouse gas emissions payback for lightweighted vehicles using aluminum and high-strength steel [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14 (6): 929-946.
- [3] Hornbogen E. Hundred years of precipitation hardening [J]. *Journal of Light Metals*, 2001, 1 (2): 127-132.
- [4] Liu Y, Zhu Z J, Wang Z J, et al. Flow and friction behaviors of 6061 aluminum alloy at elevated temperatures and hot stamping of a B-pillar [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 4063-4083.
- [5] Teller M, Ross I, Temmler A, et al. Investigation of friction conditions in dry metal forming of aluminum by extended conical tube-upsetting tests [J]. *Key Engineering Materials*, 2018, 767: 189-195.
- [6] Merklein M, Johannes M, Lechner M, et al. A review on tailored blanks-Production, applications and evaluation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214 (2): 151-164.
- [7] Yue Z M, Chu X R, Gao J. Influence of ductile damage on springback prediction of aluminum alloy sheet under changing loading paths [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 15: 716-721.
- [8] Deng L, Wang X Y, Jin J S, et al. Springback and hardness of aluminum alloy sheet part manufactured by warm forming process using non-isothermal dies [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 2388-2393.
- [9] Yanagimoto J, Oyamada K, Nakagawa T. Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings [J]. *CIRP Annals*, 2005, 54 (1): 213-216.
- [10] 修天洵, 王伟, 张毅, 等. 800 ℃高温下 SKD61/B1500HS 摩擦界面的 BN 粉末润滑特性研究 [J]. *中国科技论文*, 2018, 13 (16): 1822-1828.
- [11] Xiu T X, Wang W, Zhang Y, et al. Investigation on lubrication properties of BN powder for B1500HS-tool steel SKD61 tribo-pair under 800 ℃ high temperature [J]. *China Sciencepaper*, 2018, 13 (16): 1822-1828.
- [12] Wang W R, Zhao Y Z, Wang Z M, et al. A study on variable friction model in sheet metal forming with advanced high strength steels [J]. *Tribology International*, 2016, 93: 17-28.
- [12] Lenard J G. The effect of roll roughness on the rolling parameters

- during cold rolling of an aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152 (2): 144–153.
- [13] Flitta I, Sheppard T. Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow [J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19 (7): 837–846.
- [14] Hu C L, Ding T R, Ou H G, et al. Effect of tooling surface on friction conditions in cold forging of an aluminum alloy [J]. *Tribology International*, 2019, 131: 353–362.
- [15] 章小峰, 张祥林, 王爱华, 等. 铝合金板成形中摩擦与润滑的研究进展 [J]. *金属热处理*, 2007, 32 (12): 11–17.
Zhang X F, Zhang X L, Wang A H, et al. Research and development of friction and lubrication for aluminum alloy sheet forming [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, 32 (12): 11–17.
- [16] Schedin E. Galling mechanisms in sheet forming operations [J]. *Wear*, 1994, 179 (1–2): 123–128.
- [17] Flegler F, Neuhäuser S, Groche P. Influence of sheet metal texture on the adhesive wear and friction behavior of EN AW-5083 aluminum under dry and starved lubrication [J]. *Tribology International*, 2020, 141: 105956.
- [18] Mori K, Abe Y, Miyazawa S. Warm stamping of ultra-high strength steel sheets at comparatively low temperatures using rapid resistance heating [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108: 3885–3891.
- [19] Karupannasamy D K, Hol J, de Rooij M B, et al. A friction model for loading and reloading effects in deep drawing processes [J]. *Wear*, 2014, 318 (1–2): 27–39.
- [20] Karbasian H, Tekkaya A E. A review on hot stamping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210 (15): 2103–2118.
- [21] Pereira M P, Yan W, Rolfe B F. Sliding distance, contact pressure and wear in sheet metal stamping [J]. *Wear*, 2010, 268 (11–12): 1275–1284.
- [22] Wang Z, Dohda K, Haruyama Y. Effects of entraining velocity of lubricant and sliding velocity on friction behavior in stainless steel sheet rolling [J]. *Wear*, 2006, 260 (3): 249–257.
- [23] Liu X C, Ji K, El Fakir O, et al. Determination of the interfacial heat transfer coefficient for a hot aluminum stamping process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 158–170.
- [24] Fan X B, He Z B, Zhou W X, et al. Formability and strengthening mechanism of solution treated Al-Mg-Si alloy sheet under hot stamping conditions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 228: 179–185.
- [25] Gali O A, Riahi A R, Alpas A T. The tribological behavior of AA5083 alloy plastically deformed at warm forming temperatures [J]. *Wear*, 2013, 302 (1–2): 1257–1267.
- [26] Wang L L, He Y, Zhou J, et al. Effect of temperature on the frictional behavior of an aluminum alloy sliding against steel during ball-on-disc tests [J]. *Tribology International*, 2010, 43 (1–2): 299–306.
- [27] Liu Y, Zhu B, Wang K, et al. Friction behaviors of 6061 aluminum alloy sheets in hot stamping under dry and lubricated conditions based on hot strip drawing test [J]. *Tribology International*, 2020, 151: 106504.
- [28] Rigas N, Merklein M. Characterization of the tribological behavior of different tool coatings and dry lubricant for high-strength aluminum alloys at elevated temperatures [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25 (15): 2201650.
- [29] Jain M, Allin J, Bull M J. Deep drawing characteristics of automotive aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 256 (1–2): 69–82.
- [30] 吴佳松, 蒋怡涵, 王武荣, 等. 7075 铝合金板材热冲压成形中的高温摩擦 [J]. *工程科学学报*, 2020, 42 (12): 1631–1638.
Wu J S, Jiang Y H, Wang W R, et al. High-temperature friction of 7075 aluminum alloy sheet during hot stamping [J]. *Chinese Journal on Engineering*, 2020, 42 (12): 1631–1638.
- [31] Olsson D D, Bay N, Andreassen J L. Prediction of limits of lubrication in strip reduction testing [J]. *CIRP Annals*, 2004, 53 (1): 231–234.
- [32] Yang X, Liu X C, Liu H L, et al. Experimental and modelling study of friction evolution and lubricant breakdown behavior under varying contact conditions in warm aluminum forming processes [J]. *Tribology International*, 2021, 158: 106934.
- [33] Xia J S, Zhao J, Dou S S. Friction characteristics analysis of symmetric aluminum alloy parts in warm forming process [J]. *Symmetry*, 2022, 14 (1): 166.
- [34] Hanna M D. Tribological evaluation of aluminum and magnesium sheet forming at high temperatures [J]. *Wear*, 2009, 267 (5–8): 1046–1050.
- [35] Zhou J, Yang X M, Wang B Y, et al. Springback prediction of 7075 aluminum alloy V-shaped parts in cold and hot stamping [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119: 203–216.
- [36] Esmailpour R, Tiji S A N, Kim H, et al. Stamping of a cross-shaped part with 5052, 5754 and 6016 aluminum alloy sheets-experimental and finite element analysis comparison [A]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [C]. San Francisco, CA: IOP Publishing, 2019.
- [37] Jin J S, Wang X Y, Deng L, et al. A single-step hot stamping-forging process for aluminum alloy shell parts with nonuniform thickness [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 228: 170–178.
- [38] Wu X H, Zhao G Q, Luan Y G, et al. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 435: 266–274.
- [39] Duan X J, Sheppard T. Simulation and control of microstructure evolution during hot extrusion of hard aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 351 (1–2): 282–292.
- [40] Yu Z H, Wang Y S, Xiu W, et al. Numerical and Experimental Study on cold rolling process of 5B02 aluminum alloy tubes [A]. *Journal of Physics: Conference Series* [C]. Nannig: IOP Publishing, 2024.
- [41] Gong H, Cao X, Liu Y Q, et al. Simulation and experimental study on the inhomogeneity of mechanical properties of aluminum alloy 7050 plate [J]. *Metals*, 2020, 10 (4): 515–524.
- [42] Kim Y H, Ryou T K, Choi H J, et al. An analysis of the forging processes for 6061 aluminum-alloy wheels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123 (2): 270–276.
- [43] Scholz P, Börner R, Kühn R, et al. Dry forming of aluminum sheet metal: Influence of different types of forming tool microstructures on the coefficient of friction [J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 651: 516–521.

- [44] Rusin N M, Skorentsev A L, Kolubaev E A. Dry friction of pure aluminum against steel [J]. *Journal of Friction and Wear*, 2016, 37: 86–93.
- [45] Steiner J, Merklein M. Investigation of influencing parameters for tribological conditions in dry forming processes [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2015, 28: 1435–1441.
- [46] Dou S S, Xia J S. Analysis of sheet metal forming (Stamping process): A study of the variable friction coefficient on 5052 aluminum alloy [J]. *Metals*, 2019, 9 (8): 853–8868.
- [47] Sabet A S, Domitner J, Ökstüz K I, et al. Tribological investigations on aluminum alloys at different contact conditions for simulation of deep drawing processes [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 546–557.
- [48] Bay N, Azushima A, Groche P, et al. Environmentally benign tribo-systems for metal forming [J]. *CIRP Annals*, 2010, 59 (2): 760–780.
- [49] Yahaya A, Samion S, Musa M N, et al. Determination of friction coefficient in the lubricated ring upsetting with palm kernel oil for cold forging of aluminum alloys [J]. *Jurnal Tribologi*, 2020, 25: 16–28.
- [50] Van Beek A. *Advanced Engineering Design* [M]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
- [51] Wang C G, Ma R, Zhao J, et al. Calculation method and experimental study of coulomb friction coefficient in sheet metal forming [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27: 126–137.
- [52] Kim Y S, Jain M K, Metzger D R. Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application to cup drawing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 69–78.
- [53] Trzepieciniski T, Lemu H G. Recent developments and trends in the friction testing for conventional sheet metal forming and incremental sheet forming [J]. *Metals*, 2019, 10 (1): 47–80.
- [54] 邓亮, 徐冰倩. 一种模拟热成形工况的高温摩擦试验机的设计及探讨 [J]. *润滑与密封*, 2023, 48 (6): 180–186.
- Deng L, Xu B Q. Design and discussion of a new high-temperature tribological test machine simulating hot stamping conditions [J]. *Lubrication Engineering*, 2023, 48 (6): 180–186.
- [55] Liu X J, Liewald M, Becker D. Effects of rolling direction and lubricant on friction in sheet metal forming [J]. *Journal of Tribology*, 2009, 131 (4): 042101.
- [56] de Argandoña E S, Zabala A, Galdos L, et al. The effect of material surface roughness in aluminum forming [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 591–595.
- [57] Pop M F, Neag A V, Sas-Boca I M. Experimental and numerical study on the influence of lubrication conditions on AA6068 aluminum alloy cold deformation behavior [J]. *Materials*, 2023, 16 (5): 2045.
- [58] Lee S W, Lee J M, Joun M S. On critical surface strain during hot forging of lubricated aluminum alloy [J]. *Tribology International*, 2020, 141: 105855.
- [59] Gao Y R, Li H X, Zhao D Y, et al. Advances in friction of aluminum alloy deep drawing [J]. *Friction*, 2024, 12 (3): 396–427.
- [60] Tenner J, Andreas K, Radius A, et al. Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 2245–2250.
- [61] Zhou R, Cao J, Wang Q J, et al. Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211 (10): 1643–1649.
- [62] Funazuka T, Dohda K, Takatsuji N, et al. Effect of die coating on surface crack depth of hot extruded 7075 aluminum alloy [J]. *Friction*, 2023, 11 (7): 1212–1224.
- [63] Hu C L, Yin Q, Zhao Z. A novel method for determining friction in cold forging of complex parts using a steady combined forward and backward extrusion test [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 57–66.
- [64] Kalin M, Jerina J. The effect of temperature and sliding distance on coated (CrN, TiAlN) and uncoated nitrided hot-work tool steels against an aluminum alloy [J]. *Wear*, 2015, 330: 371–379.
- [65] Yanagida A, Azushima A. Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test [J]. *CIRP Annals*, 2009, 58 (1): 247–250.
- [66] Li L X, Peng D S, Liu J A, et al. An experimental study of the lubrication behavior of A5 glass lubricant by means of the ring compression test [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 102 (1–3): 138–142.
- [67] Podgornik B, Kosec T, Kocijan A, et al. Tribological behavior and lubrication performance of hexagonal boron nitride (h-BN) as a replacement for graphite in aluminum forming [J]. *Tribology International*, 2015, 81: 267–275.
- [68] 王佳贝, 孔尚, 胡文敬, 等. 石墨烯作为添加剂在两种成品润滑油中的应用可行性研究 [J]. *摩擦学学报*, 2022, 42 (4): 775–784.
- Wang J B, Kong S, Hu W J, et al. Application feasibility of graphene as additive in two kinds of lubricating oil [J]. *Tribology*, 2022, 42 (4): 775–784.
- [69] 何熙, 董瑞, 马琳, 等. 二硫代二苯甲酸二异辛酯作为铜、铝合金润滑剂的摩擦学性能及机理研究 [J]. *摩擦学学报*, 2023, 43 (2): 167–177.
- He X, Dong R, Ma L, et al. Tribological properties and mechanism of diisooctyl dithiodibenzoate as a lubricant for copper and aluminum alloy [J]. *Tribology*, 2023, 43 (2): 167–177.
- [70] Hironaka S, Sakurai T. The effect of pentaerythritol partial ester on the wear of aluminum [J]. *Wear*, 1978, 50 (1): 105–114.
- [71] 姚娜, 李梅, 李守海, 等. 油酸基极压水性润滑添加剂的合成及性能研究 [J]. *润滑与密封*, 2022, 47 (7): 90–96.
- Yao N, Li M, Li S H, et al. Study on synthesis and performance of oleic acid-based extreme pressure water-based lubricant additive [J]. *Lubrication Engineering*, 2022, 47 (7): 90–96.
- [72] Chen L, Tu N, Wei Q Y, et al. Inhibition of cold-welding and adhesive wear occurring on surface of the 6061 aluminum alloy by graphene oxide/polyethylene glycol composite water-based lubricant [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2022, 54 (3): 218–230.
- [73] Kreivaitis R, Gumbytė M, Treinytė J. Investigation of tribological properties of environmentally friendly ionic liquids as a potential lubricity improving additives for water-based lubricants [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2022, 74 (3): 294–301.
- [74] Schell L, Sellner E, Massold M, et al. Tribology in warm and hot aluminum sheet forming: Transferability of strip drawing tests to forming trials [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25 (15): 2201900.

- [75] Hu Y, Wang L, Politis D J, et al. Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behavior during sliding wear [J]. *Tribology International*, 2017, 110: 370–377.
- [76] 丁娅, 陈炳耀, 杨善杰. 润滑油添加剂发展综述 [J]. *山东工业技术*, 2019 (4): 10, 7.
Ding Y, Chen B Y, Yang S J. Overview of lubricant additive development [J]. *Journal of Shandong Industrial Technology*, 2019 (4): 10, 7.
- [77] Yu B J, Qian L M. Friction-induced nanofabrication: A review [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34: 1–26.
- [78] 郑哲, 方建华, 王建华, 等. 新型水溶性润滑添加剂的研究进展 [J]. *摩擦学学报*, 2017, 37 (3): 409–420.
Zheng Z, Fang J H, Wang J H, et al. The research progress of novel water-soluble lubricant additives [J]. *Tribology*, 2017, 37 (3): 409–420.
- [79] Yanagida A, Kurihara T, Azushima A. Development of tribo-simulator for hot stamping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210 (3): 456–460.
- [80] Decrozant-Triquenaux J, Pelcastre L, Courbon C, et al. High temperature tribological behaviour of PVD coated tool steel and aluminum under dry and lubricated conditions [J]. *Friction*, 2021, 9: 802–821.
- [81] 郑友华, 李冀生, 王平, 等. 二硫化钼基润滑涂层在润滑油中的作用机理及实际应用 [J]. *润滑与密封*, 2005 (2): 127–129, 132.
Zheng Y H, Li J S, Wang P, et al. Mechanisms of the molybdenum disulfide solid lubricant film in lubrication and its applications [J]. *Lubricants Engineering*, 2005 (2): 127–129, 132.
- [82] Ngaile G, Botz F. Performance of graphite and boron-nitride-silicone based lubricants and associated lubrication mechanisms in warm forging of aluminum [J]. *Journal of Tribology*, 2008, 130 (2): 021801.
- [83] 余均武, 彭大暑, 林启权, 等. 不锈钢拉深润滑剂的研制与应用 [J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2004, 26 (3): 116–119.
Yu J W, Peng D S, Lin Q Q, et al. Development of deep drawing lubrication oil for 304 stainless steel [J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2004, 26 (3): 116–119.
- [84] Rapoport L, Leshchinsky V, Lapsker I, et al. Tribological properties of WS₂ nanoparticles under mixed lubrication [J]. *Wear*, 2003, 255 (7–12): 785–793.
- [85] Ghiotti A, Simonetto E, Bruschi S. Influence of process parameters on tribological behavior of AA7075 in hot stamping [J]. *Wear*, 2019, 426: 348–356.
- [86] Shatalov R L, Pham V K, Tran V Q. Investigation of the effect of various production lubricants on aluminum alloy strip rolling characteristics [J]. *Metallurgist*, 2022, 66 (1–2): 139–145.
- [87] Shatalov R L, Pham V H, Tran V Q. Influence of lubricants and contact pressure models on the rolling power along thin aluminum stripes [J]. *Metallurgist*, 2021, 65: 660–672.
- [88] Dohda K, Wang Z. Effects of average lubricant velocity and sliding velocity on friction behavior in mild steel sheet forming [J]. 1998, 120 (4): 724–728.
- [89] Dohda K, Wang Z. Effects of lubricant velocity and sliding velocity on friction behavior in aluminum sheet rolling [A]. *Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* [C]. San Francisco, CA: ASME, 1995.
- [90] Prieske M, Hasselbruch H, Mehner A, et al. Friction and wear performance of different carbon coatings for use in dry aluminum forming processes [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 357: 1048–1059.
- [91] Müller M, Hild R, Trauth D, et al. Investigation of different tribological systems during full forward impact extrusion of aluminum alloy EN AW 6082 [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, 72 (6): 709–712.
- [92] 吴立波, 薛勇, 张治民, 等. 铝合金筒体侧向挤压润滑条件分析及润滑剂配比研究 [J]. *轻合金加工技术*, 2013, 41 (8): 41–44.
Wu L B, Xue Y, Zhang Z M, et al. Lubricating condition analysis of cylinder lateral extrusion and study on lubricant burden [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2013, 41 (8): 41–44.
- [93] 李长虹. 石墨对三氧化二铝/铜金属陶瓷复合材料摩擦磨损性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2004 (6): 572–575.
Li C H. Study of graphite action in Al₂O₃-Cu matrix [J]. *Tribology*, 2004 (6): 572–575.
- [94] 肖华, 李保成, 张星. 铝合金温挤压用润滑剂试验研究 [J]. *热加工工艺*, 2011, 40 (5): 110–111, 114.
Xiao H, Li B C, Zhang X. Experiment study of lubricant for warm extrusion of aluminum alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40 (5): 110–111, 114.
- [95] Jerina J, Kalin M. Aluminum-alloy transfer to a CrN coating and a hot-work tool steel at room and elevated temperatures [J]. *Wear*, 2015, 340: 82–89.
- [96] Jerina J, Kalin M. Initiation and evolution of the aluminum-alloy transfer on hot-work tool steel at temperatures from 20 °C to 500 °C [J]. *Wear*, 2014, 319 (1–2): 234–244.
- [97] Birol Y. Sliding wear of CrN, AlCrN and AlTiN coated AISI H13 hot work tool steels in aluminum extrusion [J]. *Tribology International*, 2013, 57: 101–106.
- [98] Yahaya A, Samion S. Friction condition of aluminum alloy AA6061 lubricated with bio-lubricant in cold forging test [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2022, 74 (4): 378–384.
- [99] Buchner B, Maderthoner G, Buchmayr B. Characterisation of different lubricants concerning the friction coefficient in forging of AA2618 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198 (1–3): 41–47.
- [100] Alimirzaloo V, SheydayiGurchinQaleh S, MashhadiKeshtiban P, et al. Investigation of the effect of CuO and Al₂O₃ nanolubricants on the surface roughness in the forging process of aluminum alloy [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017, 231 (12): 1595–1604.
- [101] Fann K J, Chen C C. Grain size in aluminum alloy 6061 under hot ring compression test and after T6 temper [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7 (4): 372–384.
- [102] Sabet A S, Domitner J, Ristić A, et al. Effects of temperature on friction and degradation of dry film lubricants during sliding against aluminum alloy sheets [J]. *Tribology International*, 2023, 180: 108205.