

汽车用金属板料热成形过程中摩擦行为研究进展

邓 亮

(上海应用技术大学 机械工程学院, 上海 201418)

摘要: 以硼钢和铝合金板料为工件的热成形工艺在以实现汽车轻量化和提高碰撞安全性为需求的汽车制造领域的应用广泛。然而, 在热成形过程中的高温、高压强的工况下, 金属板料与模具之间的摩擦磨损导致板料拉毛、模具磨损和成形偏差, 进而影响生产效率。近年来的国内外研究表明, 在热成形生产周期内, 摩擦行为受到接触界面内涂层、表面形貌和润滑效果下降等因素的综合影响。为了力求更加准确地预测摩擦行为, 面向工业应用的摩擦磨损的模拟仿真从基于接触条件的宏观层面面向考虑表面情况的介观层面推进。通过回顾近年来热成形工艺过程中的摩擦学研究, 为厘清研究方向、开展下一步研究提供借鉴。

关键词: 热成形; 摩擦; 模具磨损; 有限元模型; 摩擦试验

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.002

中图分类号: TG305 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0014-07

Research progress on friction behavior during thermoforming for automotive sheet metal

Deng Liang

(Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The thermoforming process using boron steel and aluminum alloy sheet metals as workpieces has been widely used in automotive manufacturing field to realize lightweight and improve crash safety. However, under the conditions of high temperature and high pressure in the thermoforming process, the friction and wear between sheet metal and die lead to sheet metal flaring, die wear and forming deviation, which in turn affects the production efficiency. In recent years, the domestic and foreign studies show that during the production cycle of thermoforming, the friction behavior is comprehensively affected by the factors such as inner coating of contact interface, surface morphology and decline of lubrication effect. In order to predict the friction behavior more accurately, the simulation of friction and wear for industrial applications is moving from the macroscopic level based on contact conditions to the mesoscopic level considering surface conditions. Therefore, the tribological research in the thermoforming process in recent years is reviewed to provide support for clarifying research direction and carrying out further research.

Key words: thermoforming; friction; die wear; FE model; friction test

“冲压硬化 (Press Hardening)” (即金属热成形) 最早见于 1914 年瑞士批准的一项专利技术, 在 1930 年代用于生产农用品^[1]。19 世纪 70 年代由瑞典吕勒奥工业大学联合沃尔沃卡车和 Norrbottens Järnverks 公司开发了现在用于汽车结构件的金属热成形技术, 由瑞典 SSAB Hardtech 公司于 1977 年注册为专利技术^[2]。1984 年瑞典萨博汽车首次应用热

成形技术生产 SAAB 9000 系列汽车的侧碰撞梁。1996 年第 1 条热成形防撞梁被用于雷诺汽车, 1990 年代, 萨博汽车使用热成形件作为汽车 B 柱, 2000 年宝马汽车使用热成形件作为汽车 A 柱^[1]。随后各大汽车逐步使用热成形件作为汽车结构件, 因为它很好地兼顾了高强度与轻量化的需求。以高强度硼钢为例, 硼钢板料首先在加热炉内被加热至奥氏体状态 (约 930 °C^[3]), 然后转移到模具上冲压并在合模阶段冷却工件, 通过材料相变为马氏体获得硬化效果, 最后切除余料, 见图 1。硼钢的热成形工艺可以生产出强度 1500 MPa 的成形件^[4], 被越来越多地应用于汽车结构件, 为实现汽车轻量化并保持高强度结构起到至关重要作用。例如, 沃尔沃

收稿日期: 2021-07-16; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (52005339);

上海应用技术大学引进人才科研启动项目资助 (YJ2020-8)

作者简介: 邓 亮 (1986-), 男, 博士, 讲师

E-mail: liangdeng@sit.edu.cn

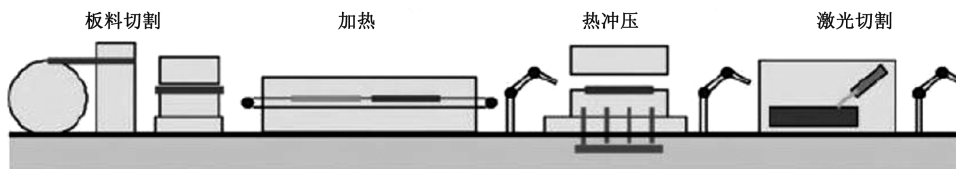


图1 热成形工艺典型的生产步骤

Fig. 1 Typical production steps of thermoforming process

XC90 汽车上使用的热成形硼钢构件已经占全车车身重量的 38%^[5]。为了避免裸钢在热成形工艺过程中的氧化问题,铝硅涂层的硼钢板料被广泛用于汽车结构件的热成形生产中^[6]。

铝合金热成形工艺与硼钢热成形工艺接近,板料在高温下(通常在 450 °C 左右)冲压成形,同时闭合的模具对板料冷却,辅以后效处理以获得较高的最终强度。铝合金热成形构件凭借其优良的强度-重量比、良好的抗腐蚀和热、电导率以及可回收等特性,在汽车和飞机等制造领域得到了广泛应用^[7-9]。国内乘用车轻量化产业技术发展路线提出通过加大高性能钢及铝合金在汽车覆盖件、发动机和底盘关键零部件的应用研究,在 2025 年实现整车减重 12%~20%的轻量化目标^[10]。热成形常用的铝合金为 5、6、7 系铝合金板材:5 系铝合金在室温下有较好的成形性,但是它的屈服强度较低;7 系铝合金有较好的强度,但是在室温下成形性较差;6 系铝合金的成形性和强度介于两者之间。铝合金热成形通常指固溶-淬火-时效配合热成形的技术,首先铝合金材料被加热至固溶热处理 (Solution Heat Treatment) 温度,并保持一段时间以便获得充分的

单相固溶态,随后板材被传送至常温模具并冲压。当模具闭合时,铝合金板料经历冷却淬火并生成过饱和固溶体 (Supersaturated Solid Solution)。在随后的时效处理中,纳米尺寸的沉积相 (Precipitates) 生成并粗化,最终提升成形件的抗拉强度^[11]。经过 T6 热处理后,铝合金强度可达 500 MPa 以上^[12]。

热成形生产中板料和模具之间的摩擦磨损是制约热成形件批量生产的瓶颈问题,一方面会造成板料上的划伤、拉毛,另一方面在模具上的磨损会加剧板料拉毛和成形尺寸偏差,缩短模具的使用寿命,见图 2。硼钢板料在热成形过程中会辅以铝硅涂层,在成形过程中起到一定的润滑作用,并且铝硅涂层不会对板料后期的涂装和焊接造成严重的影响。但是,它容易在热成形的高温、高压强以及循环冲击的工况下形成严重的粘结磨损 (Galling)。铝合金板料由于存在铝元素,在热成形过程中会更快形成粘结磨损,进而改变摩擦行为,增加工艺质量的不稳定风险。所以,研究热成形工况下摩擦磨损机理很有必要。本文从试验和有限元建模两个角度回顾现有的汽车用金属板料热成形过程中的摩擦学研究,并基于此展望将来的研究趋势。

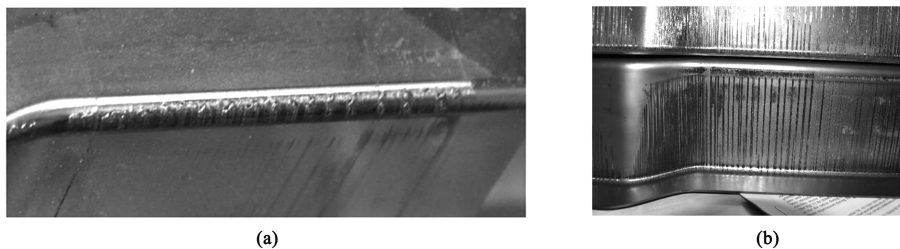


图2 模具经 400 次热成形后形成的粘结磨损 (a) 与对应板料上的拉毛 (b)

Fig. 2 Adhesion wear formed after 400 times of thermoforming for die (a) and galling on corresponding sheet metals (b)

1 热成形工况下的摩擦行为研究

1.1 接触副内的复杂耦合场

近年来,随着对热成形过程中摩擦、磨损问题的持续研究,板料与模具之间的复杂物理场也被逐

渐揭示。首先,金属板料在加热过程中会产生不同的氧化物覆盖层,这在随后的热成形过程中起到一定的润滑作用^[13]。在循环冲压过程中,模具表面的涂层可能破裂,结合磨损粘结物和氧化物碎片等形成接触副杂质,接触副杂质在变形硬化作用下会变得坚硬,引起三体磨粒磨损与粘结磨损的混合磨损

状态^[14]；其次，在连续冲压过程中，模具表面有加工硬化效应^[15]，加之涂层内元素在高温下逐渐扩散会在纵向上形成不同的硬度^[16]；再者，逐渐被高温板料加热的模具表面在接触副杂质的循环冲击下还可能生成致密的摩擦-化学层（Tribo-chemical Layer）^[17]。事实上，高温板料与模具机械表面之间的摩擦磨损处于一个复杂的高温-力学-化学耦合场之中，见图3。

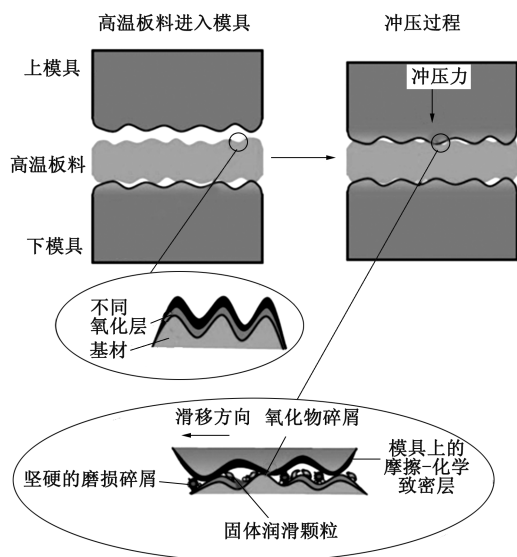


图3 热成形过程中板料与模具之间复杂摩擦行为示意图

Fig. 3 Schematic diagram of complex friction behavior between sheet metal and die in thermoforming process

1.2 润滑剂和涂层的影响

为了稳定摩擦阻力、减少磨损，较直接的方式是使用润滑剂。Yanagida A 和 Azushima A^[18]明确了润滑油对热成形工艺中摩擦磨损的积极作用，并且研究了在不同温度和压强下的工件与模具之间的摩擦行为。水、油性润滑剂在高温工况下容易退化，固体润滑剂是较好的替代方案。王伟等^[19]研究了温成形工况下的石墨粉末的润滑性能，从宏观的摩擦因数和石墨粉末在接触表面形成的润滑层微观结构方面明确了其减低摩擦阻力、减缓磨损的积极作用。张伟等^[20]在 800 °C 工况下发现模具承受适当加载会使固体润滑粉末的润滑层产生滑移和延展，提高润滑性能。Ghiotti A 等^[21]对石墨、二硫化钼和氮化硼在热成形工况下的润滑性能的研究发现：磨损起始于滑移过程中润滑剂与接触面黏附能力下降造成的润滑失效，而石墨润滑剂较好的黏附能力能够有效延后润滑失效。可见，固体润滑颗粒在粗糙表面结构上的“削峰填沟”作用需要进一步探索。

润滑剂的使用可能造成后续的车漆附着困难和虚焊等问题，利用表面工程技术（如 PVD 涂层等）能够有效地提高表面质量，减少清洗润滑剂时可能出现的污染问题。Dessain C 等^[22]考察了铝硅涂层工件在热成形过程中的摩擦行为，发现主要磨损机理是粘结磨损与磨粒磨损的混合状态，模具表面的离子渗氮处理能够有效地提高抗磨损性能。Decroix-Triquenaux J 等^[23]利用高温往复试验考察了模具 DLC 和 PVD 涂层在铝合金热成形过程的摩擦学性能，发现摩擦因数受表面粗糙度的影响颇大，在抛光表面甚至难以发觉黏结磨损。进一步研究发现，表面形貌结构是否有利于滞留润滑剂从而形成润滑层对降低摩擦因数和减缓磨损粘结有重要作用，模具涂层中是否含有铝元素对粘结磨损剧烈程度有决定性影响^[24]。Mozgovoy S 等^[16]针对几种常用的模具 PVD 涂层进行研究，发现无涂层硼钢与 PVD 涂层工具钢的接触副在试验起始阶段得到了较低的摩擦因数，随着滑移距离的增长却造成摩擦性能不稳定。他们在对试样做截面观测时发现了明显的涂层断裂结构，同时通过分析磨损粘结物在断裂涂层上的堆积结构，指出模具涂层及粘结物在反复冲压下形成的表面结构可能是影响摩擦磨损的重要因素。涂层的表面形貌和微观结构在持续摩擦过程中，将会是研究摩擦行为的重要考虑因素。

1.3 磨损碎屑的影响

随着研究的深入，摩擦轨道内的接触副杂质对摩擦行为的重要性被逐渐认识。Hardell J 和 Prakash B^[17]研究了热成形在 40~800 °C 时的摩擦磨损行为。研究发现，磨损是粘结磨损和由氧化碎屑引起的磨粒磨损共同造成的。摩擦因数随着温度的升高而降低，这是由于在高温下生产的氧化物或者金属间化合物（Intermetallic Compounds）覆盖摩擦轨道，从而抑制了进一步的粘结磨损。进一步的研究^[25]发现，在销-盘对磨试验条件下，被压实在轨道内的磨损碎屑在反复的挤压下形成保护层，这是摩擦因数平稳和磨损减缓的主要原因。白植雄等^[26]利用球-盘线性往复试验机也研究了高温下热作模具钢的摩擦行为，发现氧化物在高温下对摩擦性能起到关键作用：随试验温度的逐渐升高，氧化层从局部覆盖发展到全覆盖，起到润滑作用，但是当生成的氧化层过厚而剥落时，则造成摩擦因数不稳定。可见，磨损碎屑和氧化物碎屑等接触副杂质既在摩擦过程中产生，又通过改变当下表面结构而影响后续的摩擦过程。

王义林等^[27]总结了近年来围绕铝合金热成形工艺的研究成果,指出现阶段的研究仍处于工艺试验阶段,针对工业应用的研究还较少。一个显著的体现便是通用摩擦学试验机与热成形实际工况的差异较大,对磨损碎屑在接触副内的影响的研究还较少。为了克服传统的盘-销/环-销这类往复运动的摩擦试验机中试样在轨道内反复碾压的弊端,高凯翔等^[28-29]自主设计了高温滑移摩擦试验机,确保模具钢试样始终在“新鲜”板料上滑移,并展开了对硼钢的高温摩擦行为研究。类似的滑移试验还见于文献[30]和文献[31]的工作以及由Deng L等^[14, 32]开发的高温滑移摩擦试验平台。其次,现阶段较多的研究关注磨损机理的定性分析,着重揭示粘结磨损起始的临界条件。Heide E V D等^[33]利用滑块-平板对磨试验,明确了板料冲压中的粘结磨损与摩擦闪温的关联,同时提出,使用高热传导材料及润滑剂能够有效地降低粘结临界温度,从而推迟粘结物的产生。Patrik Karlsson等^[34]在滑块-平板对磨试验中比较了几种常用的模具钢材料,确定了粘结磨损起始时的临界加载压力。然而,在连续热成形过程中磨损是一个对摩擦行为有影响的累积过程,临界条件需要从表面结构的改变、磨损状态的演化等动态的角度审慎考察。蒋斌和吴晓春^[35]在总结了现阶段的热成形模具摩擦磨损研究之后,敏锐地指出,对于磨粒磨损与粘着磨损共同存在的热成形接触副,粘结物的生成与断裂是高温下原子扩散、加载应力、粘结物与基材结合强度等多方面因素共同造成的,探究其在累积滑移下的演化机理需要有理论创新。综上所述,模具表面的涂层情况、工作硬化层和氧化物覆盖物与断裂的粘结物碎屑在连续热成形过程中的相互作用,以及由此涉及的试验设计和理论创新,是研究热成形工艺的摩擦行为演化机理的重要因素。

2 热成形工况下的摩擦行为的有限元建模

2.1 摩擦行为的数学模型

金属冲压成形中的摩擦行为通常以库伦摩擦因数、摩擦做功生热等形式在工艺设计阶段的数值模拟分析中得到运用。湖南大学的聂昕等^[36]将工件与模具之间摩擦热纳入热-力耦合的数值本构模型,将温度场、应力场、应变场进行耦合分析,有效地

提高冲压成形模拟的准确性。在上汽大众汽车有限公司与上海交通大学的联合研究中,苏友煌等^[37]利用有限元软件对汽车内覆盖件的拉延过程进行仿真,通过摩擦测试平台所得的摩擦因数结合工艺参数的正交试验方案,优化压边力、拉延筋的设置,从而减少板料开裂与起皱风险。上汽通用五菱汽车股份有限公司的张波等^[38]利用有限元对U形弯曲件冲压建模,明确了凹模圆角角度大小、压边力、冲压速度和材料强度与摩擦功之间的关系,为优化冲压成形工艺参数提供了指导。这类摩擦行为数学模型通常只考虑接触副的初始表面形貌,难以对模具累积损伤进程中的摩擦行为做出预判。

2.2 表面形貌的数值模拟

Hu Y等^[39]在摩擦行为的数值模拟中引入表面形貌特征,做出了先行性探索。他们利用销-盘摩擦试验模拟铝合金热成形工况,开发了把润滑膜厚度作为预测润滑失效的数值模型,该模型考虑了摩擦副在经历了滑移过程后,其表面粗糙度对摩擦磨损行为的动态影响。然而,仅仅依靠粗糙度可能难以表征实际模具的表面形貌。Pelcastre L^[40]通过企业调研和开展摩擦学试验后指出,热成形模具接触表面的形貌特征是多样且复杂的,不同的表面粗糙度、偏斜度、加工方向等对摩擦行为均有重要影响。另外,模具初始加工手段和磨损进程中的累积损伤均会导致不一样的形貌结果。Deng L等^[41-42]考虑了初始表面加工方向与摩擦滑移方向的因素,通过试验结果拟合磨损模型的相关参数。研究发现,以滑移距离线性缩放磨损量的预测模型难以准确计算一定冲压次数之后的实际磨损情况^[42]。为了实现持续摩擦磨损过程准确的模拟计算,研究人员从以下两方面入手。

首先,为了表征摩擦阻力的形成过程,对摩擦行为的数值模拟需要从库伦摩擦定律推进到粘着摩擦理论。粘着摩擦理论认为粗糙表面上的摩擦阻力是由接触的微凸体的粘着、滑动和犁沟效应共同组成的^[43]。继而,Archard模型认为固体之间的磨损是两个表面上微凸体接触、粘结继而断裂的过程,通过定义磨损系数(代表断裂的微凸体的概率)巧妙地将磨损量与接触正压力、滑移距离联系起来^[44]。Deng L等^[41-42]基于Archard磨损模型结合高温滑移试验成功开发了基于接触条件的热成形模具的磨损模型,建立了基于生产过程参数(如温度,压强等)与摩擦、模塑系数的响应面,用来预测模

具磨损。这类基于 Archard 模型的改进型应用于高温下金属变形的研究还见于文献 [45] 和文献 [46] 等。

其次, 为了实现对摩擦行为的准确建模, 研究从宏观的测量参数推进到介观的粗糙表面上局部温度场、应力场和应变场等。Greenwood J A 和 Williamson J B P P^[47] 首先建立了基于弹性微凸体的不规则表面的接触模型。但是, 微凸体的纯弹性变形假设会导致过大的接触力和过小的接触半径^[48]。之后, 学者引入塑性指数来分析弹塑性变形, 其解析分析可见于文献 [49] 和文献 [50]。然而, 此类接触模型多是针对单个微凸体的解析解或者是把单个微凸体的分析按概率统计的方式模拟到粗糙表面上, 以求解载荷和变形情况, 这可能忽视同一表面上微凸体之间的互相挤压和基材变形的影响。

2.3 介观下摩擦行为的数值模拟

介观下摩擦行为的精细化仿真模拟已经取得一定成果。Westeneng J^[51] 假设板料表面的微凸体在压边圈作用下受力变形为峰原 (Plateau), 通过计算模具表面刚性微峰凸滑过板材表面峰原的摩擦阻力, 再按微凸体顶尖的概率分布模型即可求得整体的板料与模具之间的摩擦力。后续的研究考虑了接触副的边界润滑情况^[52] 和混合润滑情况^[53]。该团队报告的最新成果为可以通过在数值模型中输入的生产工艺参数、表面形貌参数和材料特性计算出真实接触面积、基材变形和摩擦过程中的粘结点增长 (Junction Growth), 从而得到摩擦阻力^[54]。Sigvant M 等^[55] 报告一个运用该模型的冲压仿真案例: 在铝合金冷冲压的仿真中将摩擦因数定义为压强、应变率和表面粗糙度的函数来对冲压工艺进行分析, 实际上, 这是在冲压仿真中根据工艺参数调取事先得到的摩擦因数的数据库。把该模型运用于热成形, 需要从以下几点审慎地考虑: 首先, 很多热成形案例并不使用压边圈; 其次, 模具上的粗糙度随着冲压次数的变化发生显著变化, 微凸峰之间、微凸峰与接触副杂质之间可能有不可忽略的相互作用; 再者, 初始表面的微凸体分布和形状由加工方法决定, 在持续摩擦过程中可能会有较大改变; 在模型中静态地考虑表面形貌, 可能既不足以反映实际表面上的加工方向性、偏斜度等形貌特征, 也可能忽视模具累积损伤 (磨损) 对表面形貌的影响; 另外, 该研究未考虑高温工况下的材料特性和微凸体的“焊接”作用。

3 结语

现阶段对热成形工况下的摩擦学研究已取得丰硕成果, 在控制摩擦、减少磨损方面有较大进展, 基于临界条件的磨损模型已有一些应用, 正从关注宏观接触条件与摩擦因数相关性向局部接触条件、界面微观结构的研究方向转换。能高度模拟热冲压工况的摩擦试验设备需要探索, 摩擦行为的准确数值建模和预测仍在持续地摸索。当前, 对于汽车用金属板料作为工件的高温摩擦学研究仍处于发展阶段, 这主要体现在试验设备、研究对象和数值建模方面, 具体分析如下:

(1) 常规摩擦学试验与热成形实际工况的一致性有待进一步探究。销-盘等常规摩擦试验中由于试样反复在摩擦轨道内摩擦, 可能过分突出了氧化物保护层的缓摩作用, 局部摩擦做功生热可能破坏了润滑条件。基于此, 可能需要慎重分析基于不同摩擦试验设备的文献关于热成形的摩擦行为研究结论的适用范围。

(2) 现阶段热成形过程的摩擦学研究重点关注板料与模具的初始表面和初始润滑条件, 而对整个生产周期内由于持续模具磨损引起的摩擦行为变化的关注还较少, 而正是模具表面累计损伤进程中的摩擦行为突变造成实际热成形件的批量化生产效率降低。

(3) 现有摩擦学研究较多利用摩擦因数结合宏观接触条件, 如名义压强等的分析研究摩擦行为。然而在摩擦过程中, 局部接触条件, 如应力集中、介观下微凸体变形等, 与磨损颗粒的产生、表面的工作硬化层、氧化物覆盖层和润滑剂覆盖情况等界面的介观结构高度相关, 两者的相互作用对摩擦磨损演化的研究还未引起足够重视。

随着国内热成形产线的铺开以及各大主机厂对热成形件的大批量需求, 粘结磨损和工件拉毛日趋显著。模具的表面处理和润滑剂的配合使用, 可能是减缓磨损的有效手段。与之结合的表面形貌和表层介观结构的多种表征分析是实现摩擦行为定性分析、定量建模的手段, 也是摩擦学研究从宏观观测走向介观认知的过程。

参考文献:

- [1] Billur E, Berglund G, Gustafsson T. History and Future Outlook of Hot Stamping [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2019.

- [2] Berglund G. The history of hardening of boron steel in northern Sweden [A]. The 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel [C]. Sweden, 2008.
- [3] Mori K. Hot stamping of ultra-high strength steel parts [J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2017, 58 (673): 125-129.
- [4] Karbasian H, Tekkaya A E. A review on hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (15): 2103-2118.
- [5] Mori K, Bariani P F, Behrens B A, et al. Hot stamping of ultra-high strength steel parts [J]. CIRP Annals, 2017, 66 (2): 755-777.
- [6] Suehiro M, Maki J, Kusumi K, et al. Properties of aluminized steels for hot-forming [A]. International Body Engineering Conference & Exposition [C]. USA, 2003.
- [7] Bariani P F, Bruschi S, Ghiotti A, et al. Hot stamping of AA5083 aluminium alloy sheets [J]. CIRP Annals, 2013, 62 (1): 251-254.
- [8] Miller W S, Zhuang L, Bottema J, et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry [J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 280 (1): 37-49.
- [9] 董学锋. 车身材料与车身轻量化 [J]. 汽车工艺与材料, 2017, (7): 1-18.
Dong X F. Body material and body lightweight [J]. Automobile Technology & Material, 2017, (7): 1-18.
- [10] 王帅, 孙洋. 新能源汽车轻量化技术路线和应用策略 [J]. 汽车实用技术, 2019, (10): 38-40, 57.
Wang S, Sun Y. New energy vehicle lightweight technology route and application strategy [J]. Automobile Applied Technology, 2019, (10): 38-40, 57.
- [11] Garrett R P, Lin J, Dean T A. Solution heat treatment and cold die quenching in forming AA 6xxx sheet components: Feasibility study [J]. Advanced Materials Research, 2005, 6-8: 673-680.
- [12] Harrison N R, Luckey S G. Hot stamping of a b-pillar outer from high strength aluminum sheet AA7075 [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2014, 7 (3): 567-573.
- [13] Vergne C, Boher C, Gras R, et al. Influence of oxides on friction in hot rolling: Experimental investigations and tribological modelling [J]. Wear, 2006, 260 (9-10): 957-975.
- [14] Mozgovoy S, Hardell J, Deng L, et al. Tribological behavior of tool steel under press hardening conditions using simulative tests [J]. Journal of Tribology, 2017, 140: 1-14.
- [15] Hernandez S, Hardell J, Courbon C, et al. High temperature friction and wear mechanism map for tool steel and boron steel tribo-pair [J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 2014, 8 (2): 74-84.
- [16] Mozgovoy S, Hardell J, Prakash B. High temperature friction and wear performance of PVD coatings under press hardening contact conditions [J]. Advances in Tribology, 2019, (1): 1-15.
- [17] Hardell J, Prakash B. High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel [J]. Tribology International, 2008, 41 (7): 663-671.
- [18] Yanagida A, Azushima A. Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58 (1): 247-250.
- [19] 王伟, 孔俊超, 顾伟, 等. 温成形摩擦界面粉末润滑层宏观特性的试验研究 [J]. 摩擦学学报, 2016, 36 (2): 233-239.
Wang W, Kong J C, Gu W, et al. Experimental study on macro and micro characteristics of powder lubricant layer in frictional warm interface [J]. Tribology, 2016, 36 (2): 233-239.
- [20] 张伟, 张毅, 吕晶晶. B1500HS 硼钢 800 °C 冲压界面粉末润滑特性研究 [J]. 制造技术与机床, 2019, (9): 106-110.
Zhang W, Zhang Y, Chang J J. Investigation about power lubrication characteristics on the interface during 800 °C stamping of steel B1500HS [J]. Test and Quality, 2019, (9): 106-110.
- [21] Ghiotti A, Bruschi S, Medea F. Wear onset in hot stamping of aluminium alloys sheets [J]. Wear, 2017, 376-377: 484-495.
- [22] Dessain C, Hein P, Wilsius J E L, et al. Experimental investigation of friction and wear in hot stamping of Usibor 1500P [A]. Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel [C]. Kassel, 2008.
- [23] Decrozant-Triquenaux J, Pelcastre L, Courbon C, et al. Tribological behaviour of PVD coated tool steels in hot forming of aluminium alloys [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel [C]. Lulea, 2019.
- [24] Decrozant-Triquenaux J, Pelcastre L, Courbon C, et al. Effect of surface engineered tool steel and lubrication on aluminium transfer at high temperature [J]. Wear, 2021, 477: 203879.
- [25] Mozgovoy S, Hardell J, Deng L, et al. Effect of temperature on friction and wear of prehardened tool steel during sliding against 22MnB5 steel [J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 2014, 8 (2): 65-73.
- [26] 白植雄, 左鹏鹏, 计杰, 等. 两种热作模具钢的高温摩擦磨损性能 [J]. 工程科学学报, 2019, 41 (7): 906-913.
Bai Z X, Zuo P P, Ji J, et al. High temperature friction and wear properties of two hot work die steels [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41 (7): 906-913.
- [27] 王义林, 刘勇, 耿会程, 等. 高强铝合金热冲压成形技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019, (16): 22-35.
Wang Y L, Liu Y, Geng H C, et al. Research progress of hot stamping technology for high strength aluminum alloys [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, (16): 22-25.
- [28] 江福椿, 高凯翔, 王武荣. 用于模拟热冲压成形过程的数显式高温摩擦磨损试验机的研制 [J]. 上海金属, 2019, 14 (2): 99-104.
Jiang F C, Gao K X, Wang W R. Development of a digital high-temperature friction and wear tester for simulating hot-stamping process [J]. Shanghai Metals, 2019, 14 (2): 99-104.
- [29] 高凯翔, 王武荣, 韦习成, 等. 22MnB5 硼钢裸板热成形中的高温摩擦 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (9): 1136-

- 1142.
- Gao K X, Wang W R, Wei X C, et al. High-temperature friction of uncoated 22MnB5 boron steel in hot stamping [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53 (9): 1136-1142.
- [30] Tian X W, Zhang Y S, Wang Z, et al. Design of a tribo-simulator for the high strength steel friction and wear investigation in hot stamping [J]. Advanced Materials Research, 2011, 421: 147-150.
- [31] Yanagida A, Kurihara T, Azushima A. Development of tribo-simulator for hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (3): 456-460.
- [32] Deng L, Mozgovoy S, Hardell J, et al. Development of a tribological test programme based on press hardening simulations [J]. Tribology Letters, 2017, 65 (2): 43-54.
- [33] Heide E V D, Schipper D J. Galling initiation due to frictional heating [J]. Wear, 2003, 254 (11): 1127-1133.
- [34] Patrik Karlsson, Pavel Krakhmalev, Anders Gård, et al. Influence of work material proof stress and tool steel microstructure on galling initiation and critical contact pressure [J]. Tribology International, 2013, 60: 104-110.
- [35] 蒋斌, 吴晓春. 热冲模零件摩擦磨损行为研究 [J]. 模具工业, 2019, 45 (12): 1-6.
- Jiang B, Wu X C. Research on friction and wear behavior of hot stamping die part [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (12): 1-6.
- [36] 聂昕, 肖兵兵, 申丹凤, 等. 考虑变形热和摩擦热效应的热力耦合冲压研究 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (16): 2005-2015.
- Nie X, Xiao B B, Shen F D, et al. Research on thermal-mechanical stamping forming considering deformation heat and friction heat effects [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (16): 2005-2015.
- [37] 苏友煌, 王军辉, 冯怡爽, 等. 汽车内覆盖件无油冲压的数值模拟及工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (5): 42-50.
- Su Y H, Wang J H, Feng Y S, et al. Numerical simulation and process optimization of dry stamping for automotive interior cover parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (5): 42-50.
- [38] 张波, 徐志丹, 黄红端, 等. 高强度钢冲压过程凹模圆角摩擦功数值分析 [J]. 模具工业, 2019, 45 (8): 6-9.
- Zhang B, Xu Z D, Huang H D, et al. Numerical analysis on friction work of concave die fillet during stamping high strength steel [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (8): 6-9.
- [39] Hu Y, Wang L, Politis D J, et al. Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behaviour during sliding wear [J]. Tribology International, 2016, 110: 370-377.
- [40] Pelcastre L. High Temperature Galling: Influencing Parameters and Mechanisms [D]. Sweden: Lulea University of Technology, 2013.
- [41] Deng L, Mozgovoy S, Hardell J, et al. Numerical study of contact conditions in press hardening for tool wear simulation [J]. International Journal of Material Forming, 2017, 10 (5): 717-727.
- [42] Deng L, Pelcastre L, Hardell J, et al. Numerical investigation of galling in a press hardening experiment with AlSi-coated workpieces [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 85-96.
- [43] 温诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理 [M]. 第 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- Wen S Z, Huang P, Tian Y, et al. Principles of Tribology [M], The Fifth Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [44] Beek A V. Advanced Engineering Design: Lifetime Performance and Reliability [M]. Netherlands: TU Delft, 2006.
- [45] Enblom R, Berg M. Proposed procedure and trial simulation of rail profile evolution due to uniform wear [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222 (1): 15-25.
- [46] Lee R, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140: 43-48.
- [47] Greenwood J A, Williamson J B P P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1966, 295 (1442): 300-319.
- [48] 吴涛, 吴兵, 温泽峰, 等. 基于不同微观固体接触模型的轮轨表面变形特性分析 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (22): 134-142.
- Wu T, Wu B, Wen Z F, et al. Analysis of the wheel/rail surfaces deformation characteristics based on different micro-contact models [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (22): 134-142.
- [49] Chang W, Etsion I, Bogy D. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 1987, 109 (2): 257-263.
- [50] Zhao Y, Maietta D M, Chang L. An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow [J]. Journal of Tribology, 1999, 122 (1): 86-93.
- [51] Westeneng J. Modelling of Contact and Friction in Deep Drawing Processes [D]. Enschede: University of Twente, 2001.
- [52] Hol J, Meinders V T, de Rooij M B, et al. Multi-scale friction modeling for sheet metal forming: The boundary lubrication regime [J]. Tribology International, 2015, 81: 112-128.
- [53] Hol J, Meinders V T, Geijselaers H J M, et al. Multi-scale friction modeling for sheet metal forming: The mixed lubrication regime [J]. Tribology International, 2015, 85: 10-25.
- [54] Venema J, Hazrati J, Matthews D, et al. A multi-scale friction model for hot stamping [A]. Proceeding of 7th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS² [C]. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2019.
- [55] Sigvant M, Pilthammar J, Hol J, et al. Friction in sheet metal forming: Influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 29: 512-519.