

高强铝合金热冲压成形技术 研究进展*

王义林, 刘 勇, 耿会程, 张宜生

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

[摘要] 为了解决高强铝合金板料冷成形时塑性差、容易出现破裂及回弹大、影响尺寸精度的问题, 发展起来了一种高强铝合金固溶-热冲压-淬火-时效一体化新工艺。该工艺将热成形与热处理有机地结合在一起, 将固溶后的热板料快速转移到模具中成形, 并立即完成模内淬火, 最后通过时效处理来提高其强度。首先总结了高强铝合金热冲压成形技术的最新研究进展, 重点介绍了铝合金热冲压成形工艺试验方面的研究成果, 详细说明了铝合金热成形时影响成形性能的因素和实现固溶时效强化的工艺方法, 最后从摩擦机理和界面传热的角度总结了铝合金热冲压模具技术方面的研究进展。

关键词: 高强铝合金; 热冲压成形; 固溶时效强化; 热成形-淬火; 摩擦机理; 界面传热交换

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.022



王义林

副教授, 长期从事数字化模具设计制造技术、智能制造技术、高性能金属板料成形技术及装备制造、先进塑性成形技术的研究。发表论文 50 余篇, 主编著作 2 本, 获得软件著作权 4 项。

随着中国汽车工业的持续发展以及汽车保有量的不断增加, 能耗和排放的压力日益增大, 节能减排刻不容缓。为此中国政府制订了政策法规, 要求 2020 年我国生产的乘用车平均燃料消耗量要降至 5L/100km。日趋严格的排放标准对汽车制造商提出了更高的要求, 也给汽车轻量化提供了发展机遇。研究显示, 燃油汽车整车重量减轻 10%, 燃油效率可提高 6%~8%, 并且减少排放 4%^[1-3], 因此汽车轻量化是节能减排最直接最有效的措施。车身重量占整车重量的 40% 左右, 车身轻量化对于整车的轻量化起着举足轻重的作用^[4]。能源以及环境问题使新能源汽车有了很大的发展空间, 中国政府已经开始研究制定禁售燃

油车的时间表, 大力发展电动汽车。对电动汽车而言, 由于受动力电池重量、电池续航里程的制约, 对车身的轻量化设计需求更加迫切^[5]。因此, 汽车轻量化技术已经成为汽车生产厂家提高竞争能力的关键之一, 也是汽车创新工程的技术发展方向。

车身轻量化技术主要包括结构的轻量化设计、轻量化材料的使用以及先进的成形工艺应用^[6-8]。由于汽车车身结构多为薄壁构件, 加上零件刚度的限制, 除通过集成设计使部件零件化外, 仅通过零件的结构优化难以取得明显的轻量化效果, 而采用高强重比的轻质材料则展示了轻量化的良好发展前景。铝合金具有密度小、比强度高、抗冲击性能好和耐蚀

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1564203); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2018ZX04023001)。

性高等优点,且有合适的性价比,因此,铝合金已成为车身轻量化重要材料^[9-10],并且铝合金还能回收再利用,降低了成本。图1所示为按照比强度排列的各种金属材料的轻量化潜力^[11],其中7000系铝合金与目前最成功的热成形钢相比也具有突出的轻量化优势。2017年推出的凯迪拉克CT6为目前实现国产的最高级别豪华轿车,车身材料融合11种不同的轻量化材料,其中铝材占比超过57%,借助多项宇航级车身工艺,全面提升车身的强度、性能及效能,令坚固与轻盈兼得。

近年来,我国连续立项支持高性能汽车铝合金板材研究开发工作,促进了国产汽车铝合金板材质量和性能的提升^[12]。目前,5000系和6000系铝合金在汽车上已有较多应用,但更高强度的7000系铝合金板料在实际应用中存在较大困难。高强金属板料普遍存在常温成形困难、易出现裂纹以及回弹大等问题,近年发展了许多成形技术,最具发展前途的是结合冲压成形与热处理工艺的热冲压成形技术^[13-14]。本文将重点介绍铝合金热冲压成形工艺及模具的关键技术及最新进展,总结铝合金热冲压成形的工艺试验研究和模具技术研究的成果,并提出工业化应用现状及其后续的研究方向。

铝合金热冲压成形技术研究现状

根据合金状态和热处理特点,可将铝合金分为不可热处理强化铝合金和可热处理强化铝合金两类。不可热处理强化铝合金通常采用加工硬化的方法来提高其强度。对于可热处理强化的铝合金,如Al-Cu(2系)、Al-Mg-Si(6系)、Al-Zn-Mg(7系),通常采用时效强化、沉淀强化等方法来提高其强度。目前,高强度、高韧性的铝合金经T6热处理后屈服强度可达500MPa以上。

对于可热处理强化的铝合金,通常采用固溶-淬火-时效实现微观组织的精确调控和性能优化^[15-17]。固溶处理和淬火的目的是获得空位和溶质原子均过饱和的固溶体,为强化相的析出提供载体;时效处理的实质是过饱和固溶体的脱溶分解过程,析出与基体共格的具有纳米尺度的强化相。固溶体过饱和程度越大,脱溶驱动力越大,沉淀析出越充分,强化效果越显著。高强度、高韧性的铝合金经T6热处理后的屈服强度可达500MPa以上^[18-21]。如图2^[22-24]所示,根据固溶、淬火和时效与热成形的配合,铝合金的热冲压主要有4种不同的工艺路线。

其中,以英国帝国理工学院的

林建国等开发的第3种方法,即成形-淬火(Hot Forming and Cold-die Quenching, HFQ)一体化技术受到的关注最多,也是本文中介绍的热冲压成形技术。HFQ工艺是非等温成形过程,且冲压成形与淬火同步实现。其工艺过程如图3^[25]所示,成形时,先将板材加热到固溶温度并保温一段时间,然后将板料迅速移入通过水冷等方式保持室温的冷模具中,在短时间内成形、淬火并保压。这样的工艺过程可以保证铝合金板材的微观组织在淬火时迅速成为过饱和固溶体状态,降低材料硬度,降低板材冲压成形时的流动应力、提高板材的成形性,削弱了冲压成形回弹,并且降低了所需设备的吨位。对成形淬火后从模具中取出的铝合金零件进行后续人工时效,可以显著提高成形零件的强度。

热冲压成形解决了高强金属板料的成形性和回弹问题,通过模具的设计优化可以成形复杂件,最适合于大规模的工业化生产^[14]。但是热冲压工艺会严重降低铝合金的材料性能,因此,如何使铝合金板材的冲压性能与材料性能兼顾,从而获得广泛应用,国内外都一直在进行探索研究。

关于铝合金热成形的研究主要集中在热成形性能、工艺方法、强化机制、数值模拟及工艺参数对最终性能的影响等方面。Fan等^[22-23]研究了热处理条件、模具冷热状态对铝合金板材热冲压成形件强度的影响规律,并利用SEM和TEM方法解释了其强化机理。Zhou等^[26]采用数值模拟和试验研究了6111铝合金车门防撞梁的减薄、破裂和回弹等缺陷,表明润滑可以避免成形缺陷的产生。傅垒等^[27]研究了铝合金热冲压成形质量影响因素。Mohamed等^[28]测试了6082在不同固溶温度下的高温力学性能,还对6082铝合金板材胀形试验进行了有限元分析,预测了板材在不同成形速度下的断裂模式。

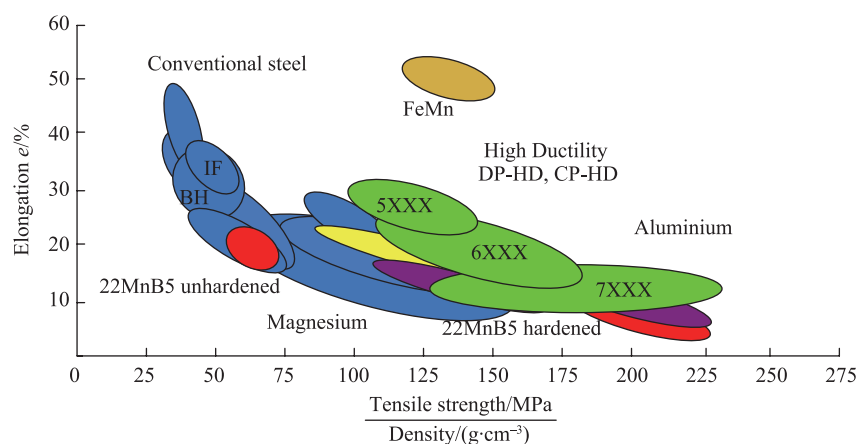


图1 各类金属材料的轻量化设计潜力

Fig.1 Lightweight design potential of metallic materials

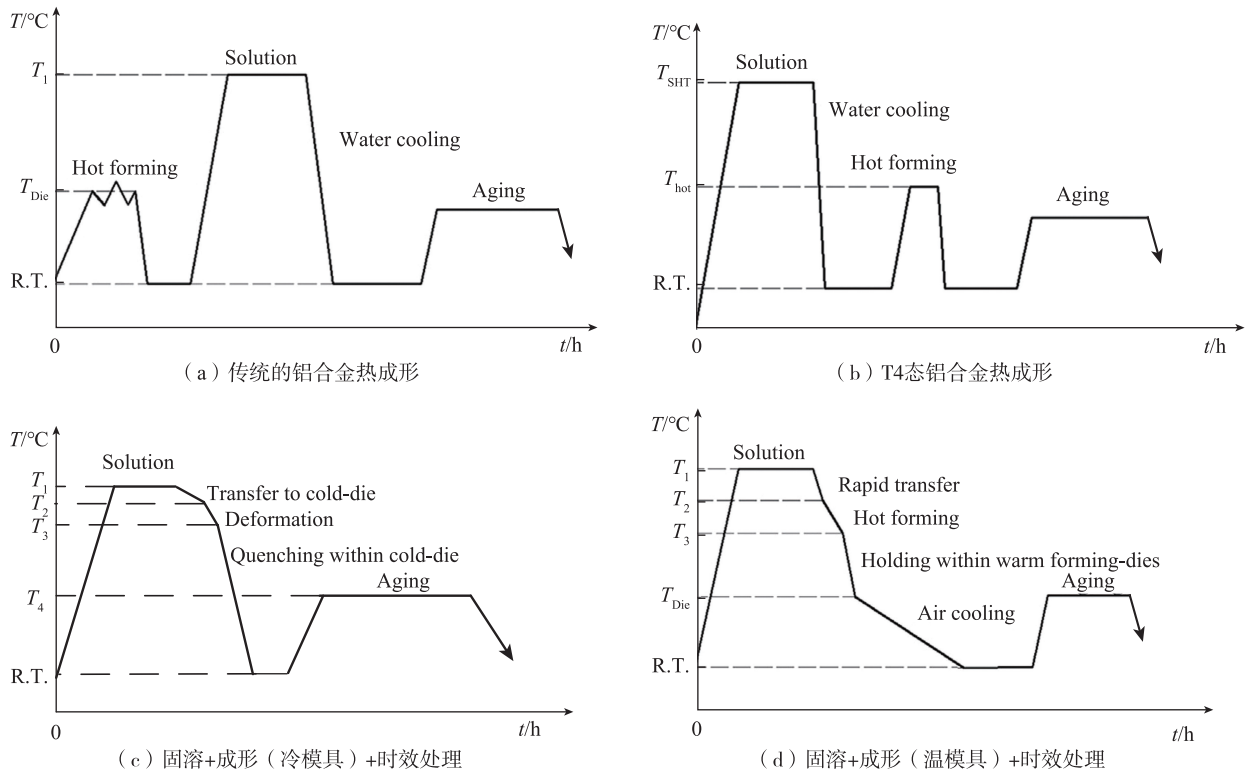


图2 典型的铝合金热冲压方法

Fig.2 Typical categories of hot stamping for aluminum alloys

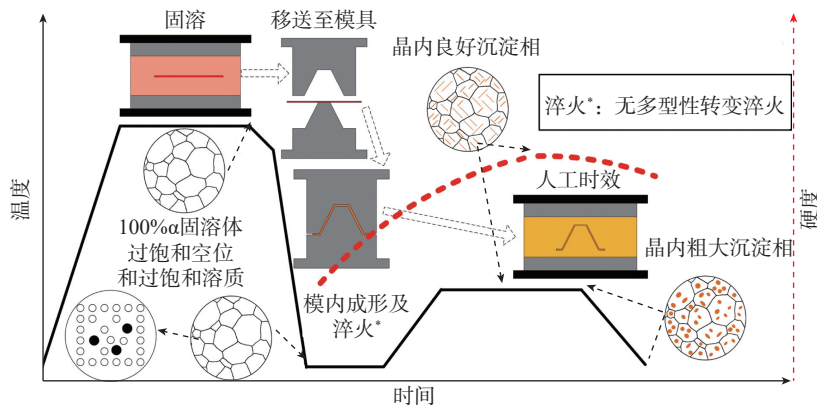


图3 可热处理强化铝合金热冲压成形工艺及组织演变

Fig.3 Typical technological process and the microstructure evolution during hot stamping of heat-treatable aluminum alloy sheet

Xiao 等^[29] 采用数值模拟和试验方法研究了 7075 铝合金热冲压的成形性, 结果表明: 降低成形温度和增加应变速度均能提升成形性, 摩擦对破裂位置起主要作用。Song 等^[30] 采用数值模拟的方法研究了伺服压力机的运动曲线对 7075 铝合金热冲压

成形性的影响。Ying 等^[31] 研究了 7075-T6 铝合金在热冲压中的接触热阻。这些研究结果充分证明了高强铝合金热冲压工艺的可行性。

Hall 等^[32] 指出, 铝合金的组织成分、初始成形温度和淬火工艺、与温度和应变率相关的加工硬化等

参数都会影响最终的成形件质量。Behrens 等^[33] 采用 7022 及 7075 铝合金研究影响成形性及零件性能的因素, 指出温度是影响铝合金热成形性的重要因素, 淬火冷却速率对最终性能也有影响。Degner 等^[34] 研究成形温度和应变速率对热力行为的影响, 并且获得了淬火冷却时接触压力与界面热交换系数的关系, 结果显示, 随着压力的增加热交换系数也相应增加。本课题组研究了热冲压成形 B 柱过程中的润滑对 6061 和 7075 铝合金成形性的影响, 解释了铝合金热冲压过程中侧壁破裂的原因, 发现不充分的润滑行为可能导致破裂和表面划伤的出现, 而足够的润滑将保证热成形具有良好的成形性^[25,35]。这些研究为高强铝合金热成形工艺的工业化应用奠定了基础。但是, 铝合金板材热冲压方面的研究仍处于工艺试验阶段, 工业化生产研究仍较少。

铝合金热冲压成形工艺 试验研究

1 成形性能

铝合金热冲压时的成形性能主要受变形速度、摩擦和温度的影响。温度主要影响铝合金的流动应力和板料同模具之间的摩擦；变形速度也会影响材料的流动应力；而摩擦主要影响材料的流动性和零件的表面质量。事实上，成形性能是上述因素综合影响的结果。

本课题组系统地研究了 6061 铝合金高温下的流动应力^[25]，如图 4 所示。结果显示，温度一定时高应变速率下具有较高的流变应力。在整个拉伸变形过程中，加工硬化和动态回复同时影响着流变应力。在较低的变形温度和较高的应变速率下，材料的加工硬化行为占主导地位；而在较高的变形温度和较低的应变速率下，材料的动态回复占主导地位；除此之外，应变速率对加工硬化的影响更显著。在稳定阶段，加工硬化和动态回复达到了平衡状态，此时流变应力保持常量或者有极低的增长水平。同时，本课题组测量的 7075 铝合金高温流动应力，如图 5 所示。结果显示 7075 铝合金的高温流变曲线和 6061 表现类似。

试验结果表明铝合金在高温下的流动应力较低，意味着其能承受的拉应力水平较低。虽然高温下可以减少成形抗力，却不利于抵抗破裂。同时注意到高应变速率下铝合金表现出明显的加工硬化现象，能有效避免应力集中，减少破裂，这意味着较大的变形速度有利于避免破裂，而较低的温度可以增加材料的承载能力，也可以提升成形性。Lu 等^[36]的研究得到类似结论，认为降低成形温度和增加应变速度均能提升成形性。Wang 等^[14]认为温度对成形性的影响较大，但是温度不宜过高；模具速度因为会影响板料的变形速度和温

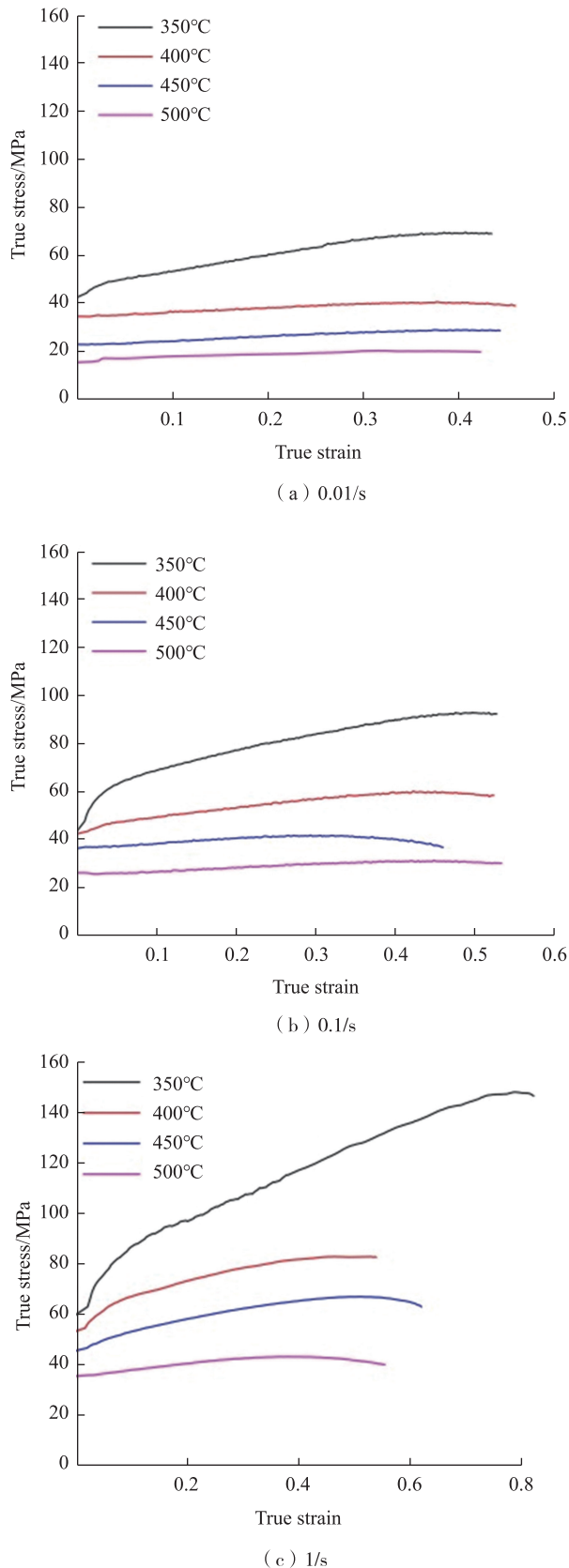


图4 6061铝合金不同温度和应变速率下的流动应力

Fig.4 True stress-strain curves of 6061-T6 at different strain rates and temperatures

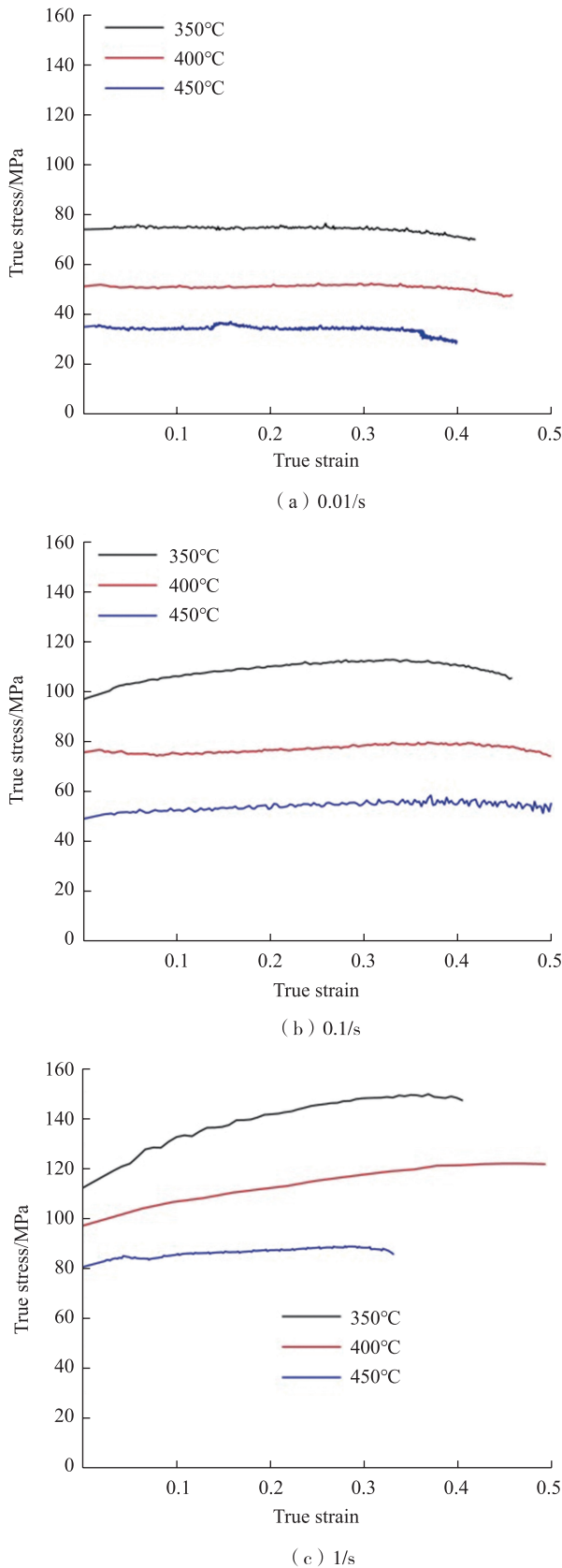


图5 7075铝合金不同温度和应变速率下的流动应力

Fig.5 True stress-strain curves of 7075-T6 at different strain rates and temperatures

度,从而影响板料的流动应力,需要对模具速度进行优化。该团队研究结果^[27]表明,较高的模具速度会增加材料的延伸率,提升成形性,但成形速度不宜太高。

摩擦的存在会造成材料流动困难从而降低材料的成形性,较高温度下摩擦更加剧烈,对材料流动阻碍加大,大大降低成形性,因此铝合金热冲压时需要增加润滑。如图6所示^[25],在热冲压过程中,由于板料不同区域与模具的接触状况存在差异,热板料的冷却过程是不均匀的。冲压时热板料首先和模具的圆角接触,造成板料上与之接触的区域温度下降,从而变形抗力增加。而侧壁部分区域由于模具间隙的原因并没有和模具接触或者接触面积小,因此该区域的温度相对较高,最大的流变应力则较小,即区域承载能力较低。在拉深阶段,法兰区域的材料被拉伸至侧壁区域。由于模具圆角处摩擦力的存在,材料的流动受到了阻碍。拉伸力和摩擦力的综合作用使得具有较小承载能力的侧壁发生破裂。但是润滑存在时,摩擦力变小,破裂风险大大降低。图7为本课题组在伺服热成形生产线上试制的某汽车B柱的7075热冲压零件的尺寸及机械性能检测结果^[35],零件厚度为1.5~1.57mm,抗拉强度范围为557~578MPa,延伸率约为6.7%~10.1%。

综上所述,铝合金热冲压时应选择相对较高的成形速度,以及适当低的成形温度,并采用一定的润滑措施才可以得到无破裂的零件。

2 固溶时效强化机理

铝合金热冲压工艺过程包括固溶处理、热冲压+模内淬火和时效处理3个主要步骤。在固溶阶段,合金被加热到等于或者高于固溶温度并保温一段时间,使合金中沉淀相全部或者最大限度地溶入到基体中;然后用快于沉淀相从基体中析出的速

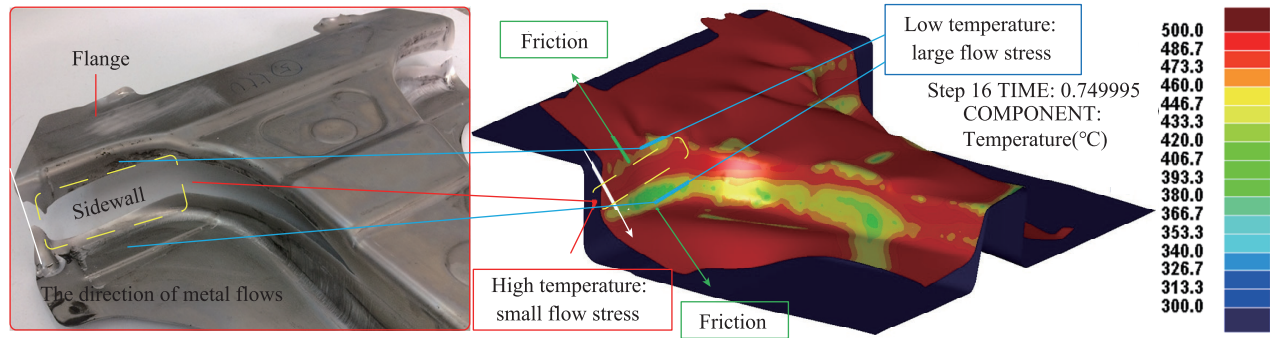


图6 数值模拟中热板料的拉深阶段和最终零件破裂位置对比 (绿色箭头表示摩擦力方向, 白色箭头表示金属流动方向)
Fig.6 Crack mechanism diagram in hot stamping without lubrication (The green arrows represent friction directions and the white arrows represent the directions of metal flows)

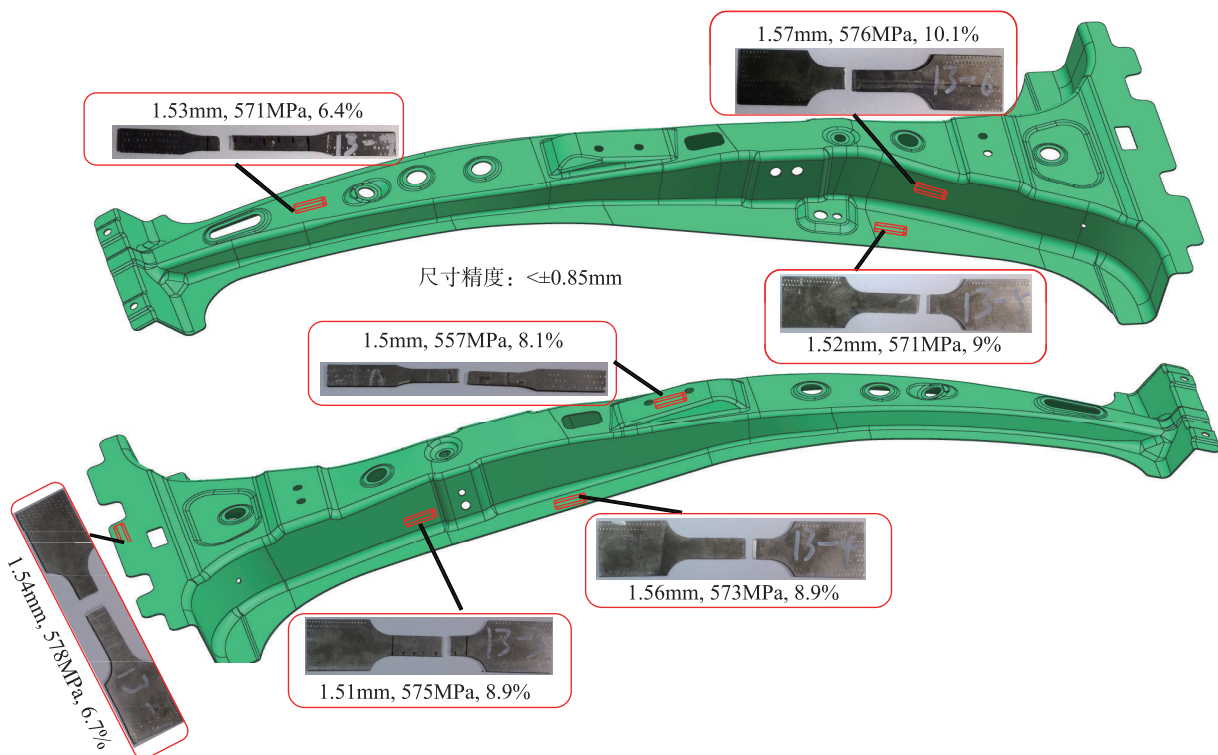


图7 热冲压成形-强化-时效后的检测结果
Fig.7 Testing results of the formed part after hot stamping and age-hardening process

度冷却,把基体中高温状态下的过饱和空位和过饱和溶质原子的状态“冷冻”起来,即淬火;最后将上述过饱和和固溶体在一定温度下时效处理,获得良好的沉淀相而提升合金的强度。

通过分析传统铝合金热冲压工艺过程,发现固溶时间普遍在半个小时左右,而时效时间更长,一般都要数小时。然而,现代的热成形生产线的热冲压节奏很快(约20s),使得冲

压周期与固溶时间、时效时间严重不匹配,难以保持生产流程的连续性。因此近年来研究方向主要集中在寻找适合热冲压的固溶和时效工艺,以满足热冲压工业化需求。

Scharifi 等^[37]研究了固溶温度、固溶时间以及人工时效温度和时间对热成形件最终性能的影响规律,发现6082和7075铝合金各有最佳的固溶温度,低于推荐温度将导致性能

下降,高于推荐温度也不会提高强度,反而有可能降低延伸率。他们试验了固溶时间从0s到1800s,发现固溶时间的增加并没有显著提高零件强度,其原因在于T4态6082和T6态7075板料在加热升温过程中合金元素已经开始溶解和扩散,当加热到固溶温度不久,最大饱和度的固溶体即已获得。上述研究证明了缩短固溶时间的可行性。

由于铝合金板料对热辐射的吸收率比较低,导致加热到固溶温度花费时间较长,造成整个固溶时间也较长。李勇等^[38]使用气垫炉对6016铝合金汽车板进行固溶处理,结果发现在550℃下固溶5min即可使可溶第二相溶解,在此基础上增加固溶时间对材料的力学性能基本没有影响。Xu等^[39]使用脉冲电流加热固溶7075合金,发现脉冲电流可以使7075铝合金中第二相快速溶入基体,其主要原因是脉冲电流降低了能障,并且降低了扩散激活能从而增加了扩散系数。Maeno等^[40]采用导电加热和辐射炉加热对2024和6061铝合金板料进行固溶处理,发现导电加热大约需要3s即可大致完成固溶处理,而辐射炉加热则需要30~420s(不同温度)才可完成。Shao等^[41]研究了使用火焰加热铝合金板料进行固溶处理的可行性,表明火焰加热的速度高于10℃/s,但是板料温度均匀性还需改善。本课题组开发了在板料上喷涂BN润滑剂,同时提升固溶加热速度和冲压成形性的方法,使得6061铝合金的加热炉固溶处理时间由10min缩短至5min,如图8所示^[42]。Zhang等^[43]研究了接触加热固溶工艺,表明7075铝合金板料接触加热固溶只需要大约40s,相比于传统固溶工艺,接触加热固溶、时效之后形成的沉淀相颗粒数量更多但更细小,如图9^[43]所示,因此时效后强度更高。

由此可见,采用新式加热工艺提升加热速度或者额外增加除热能之外的激励是减少固溶时间的有效方法。但是现在的方法或多或少存在一些缺陷,需要进一步改善。

铝合金固溶后需要尽快淬火,防止粗大相在慢速冷却中析出或者降低过饱和度,从而在后期时效后无法达到需要的性能。热冲压中铝合金在模具内完成淬火,现有研究中模具淬火后再进行合适时效工艺,均可

以达到符合要求的力学性能。Omer等^[44]研究显示7000系铝合金热冲压中最小淬火速度为27℃/s,但是冷却速度较大会造成较大的残余应力,因此应该选择合适的淬火冷却速度。这主要涉及到淬火敏感性的问题,此方面国内外均有一定研究,此处不再赘述。

经固溶处理、热冲压成形-淬火冷却的铝合金零件一般需要通过人工时效来提升强度。高强铝合金板热冲压成形-冷却工步的时间少于20s,但目前时效处理花费数小时。成形与时效工序时间上的巨大差别,使得成形-时效无法同步进行,因此需要大规模、高能耗的连续热处理炉,导致大规模生产成本高。由此可见,在保证铝合金原始强韧性的同时,研究快速时效强化方法成为了铝合金热冲压工艺的当务之急。

目前大多数研究采用单级时效工艺,可以获得高强度,但用时过长。Li等^[45]对6082采用双级时效,使时效时间缩短了90%,但仍然需要20min;本课题组^[46]以6061-T6铝合金为对象开展了短时效研究,设计了不同的时效工艺(图10),研究时效温度和时间对零件最终性能的影响,发现时效温度对零件性能有重大影响,提高时效温度有利于时效强化。在200℃时效温度保温20min可以获得超过原始T6态的材料硬度(图11)。

Xu等^[47]在7075铝合金中添加重量百分数为0.4%的Ag,使得7075的时效时间由24h减少到12h,减少了50%的时间。湛利华等^[48]采用电脉冲时效方法处理7075铝合金,发现电脉冲可促进时效析出,析出相尺寸小但弥散度更高,提升了材

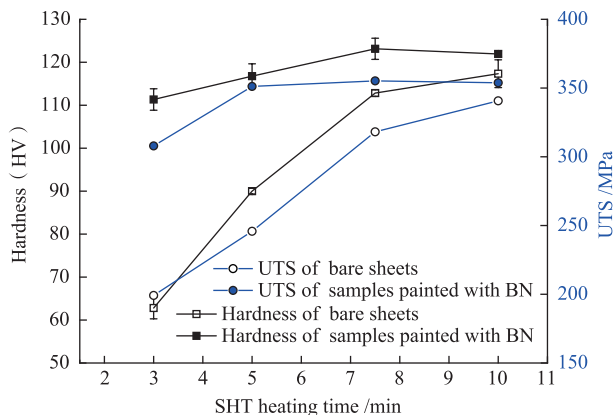


图8 6061铝合金喷涂BN对固溶时间和性能影响

Fig.8 Mechanical properties of 6061 samples (sprayed with/without BN) after aging under different solution time

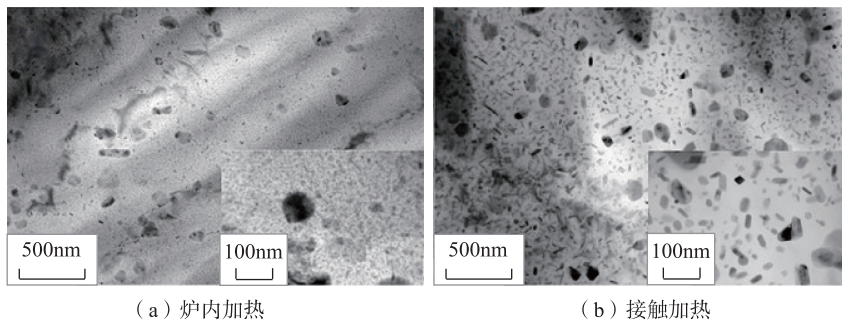


图9 固溶处理、时效后7075铝合金沉淀相TEM图

Fig.9 TEM micrographs of 7075 aluminum alloy after solution treatment and artificial aging

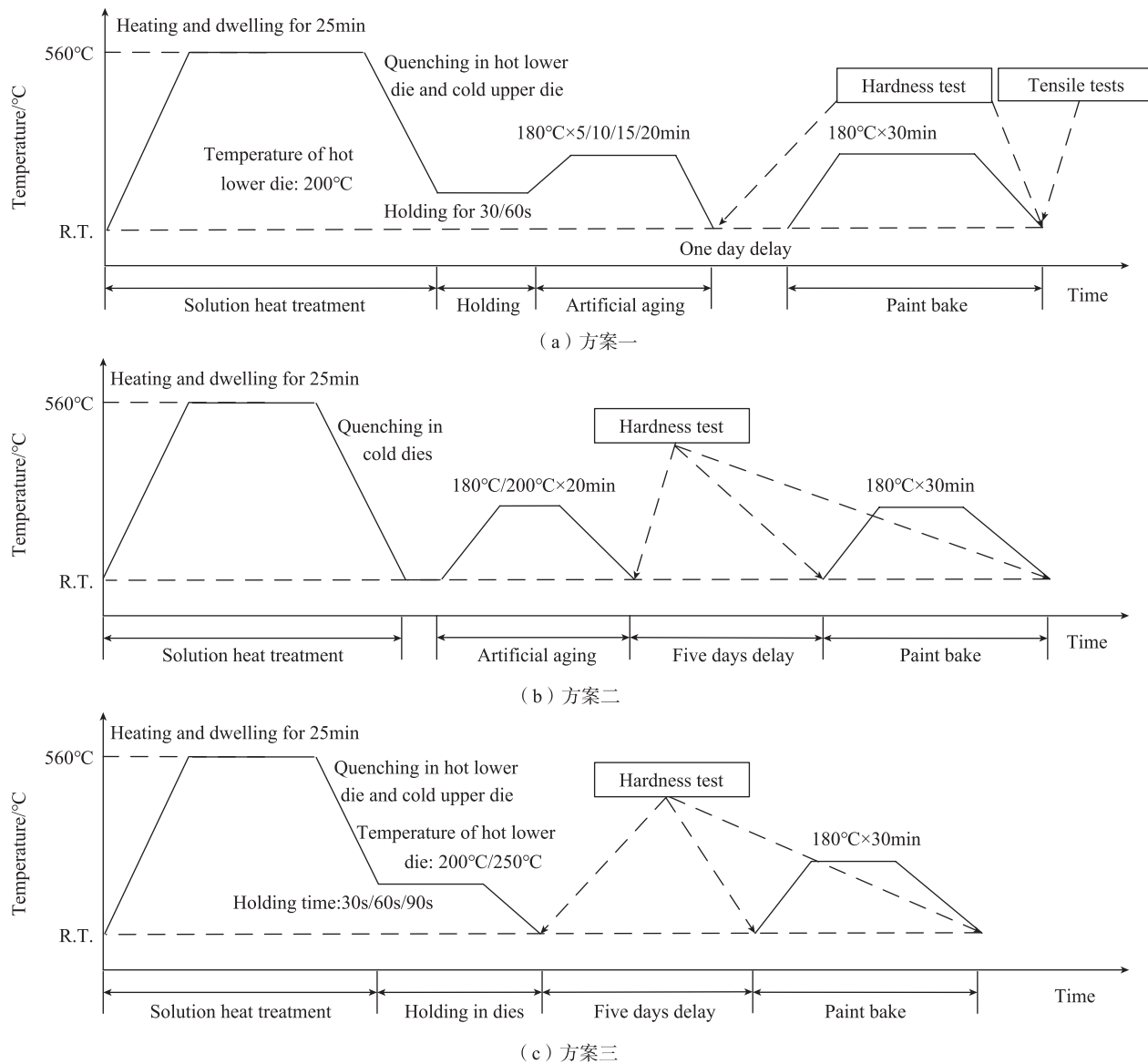


图10 铝合金热成形工艺及烘烤硬化工艺相结合的试验方案

Fig.10 Designed procedures for the combination of hot stamping process and bake hardening process of aluminum alloys

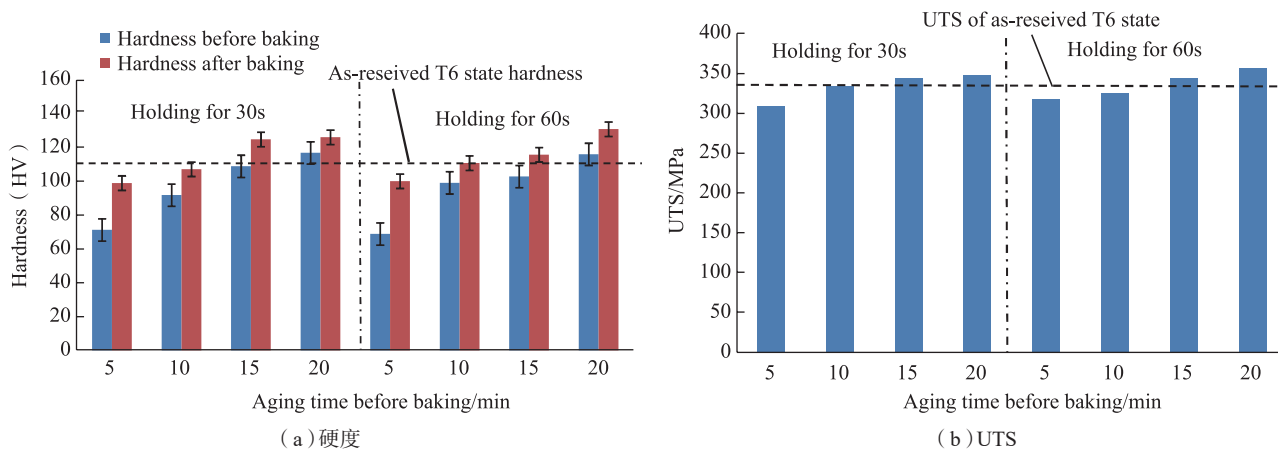


图11 6061铝合金经热冲压-淬火后不同时间时效与最终性能的关系

Fig.11 Mechanical properties of specimens aged immediately with different time after stamping and quenching in cold-hot dies under different holding time

料的强韧性。Omer 等^[44]将 7075 铝合金进行 120℃ × 3h+177℃ × 0.5h 时效后获得接近 T6 态强度,大大缩短了时效时间。

铝合金热冲压成形模具技术研究

1 摩擦行为

摩擦是影响板料冲压成形性的重要因素之一,另外,获得精确的摩

擦系数有助于提高数值模拟的精度,为工艺制定和缺陷预防提供参考。表 1 总结了部分研究人员采用传统的摩擦试验机测试的铝合金热成形过程中的摩擦系数,可以看出,高温下的摩擦系数很大,即使在室温条件下摩擦系数也达到 0.4~0.7。

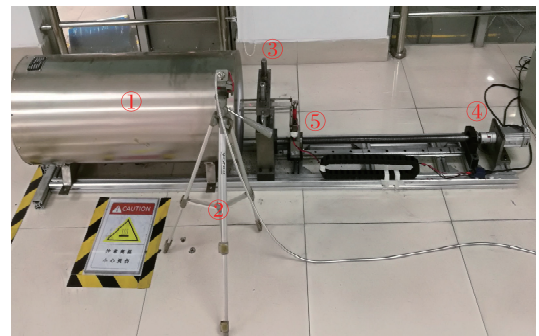
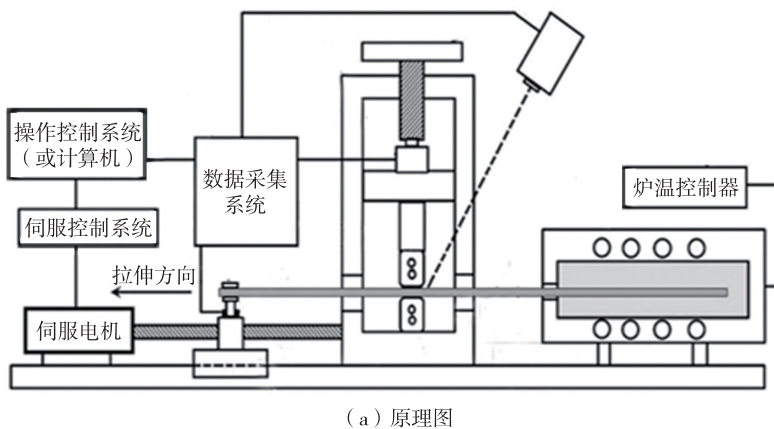
由于通用摩擦试验机不能反映铝合金热冲压过程中的模具与板料接触情况,导致测量的铝合金高温

摩擦系数和实际值相差较大。为此需要研发新的摩擦试验机以契合热冲压的摩擦工况。本课题组研发的金属板料高温摩擦试验机如图 12 所示,采用该摩擦试验机测量了 7075 铝合金不同温度下的干摩擦系数,室温下,7075 铝合金的摩擦系数为 0.21 ± 0.01 ; 250℃ 的摩擦系数为 0.63 ± 0.13 ; 温度高于 250℃ 的摩擦系数大约为 0.94~1.47,可以发现随

表 1 部分研究人员测试的铝合金热成形中的摩擦系数

Table 1 Friction coefficients in hot forming of aluminum alloys tested in different literatures

测试设备类型	作者及参考文献	摩擦副	润滑条件	温度 /℃	摩擦系数
Ball-on-disc	Wang et al. ^[49]	H-11 模具钢 /AA7475	干摩擦	25	0.40~0.70
				300	0.60~1.10
				400	0.65~1.30
				450	1.10~1.60
Block-on-disc	Pellizzari ^[50]	PVD TiAlN 钢 /AA6082		250~350	0.75~1.00
		PVD CrN 钢 /AA6082		250~350	0.50~1.00
		CVD TiC+TiN 钢 /AA6082		250~350	0.70~0.80
Block-on-cylinder	Björk et al. ^[51]	H13 模具钢 /AA6063		室温至 620	1.00~1.50
Bending under tension	Gali et al. ^[52]	P20 钢 /AA 5083		室温至 450	0.5~1.5
Ball-on-disc	Wang et al. ^[53]	H-11 模具钢 /AA7475		350	1.4~1.6
				400	1.4~1.9
				450	1.4~1.75
				450	1.1~1.6
Ball-on-disc	Pujante et al. ^[54]	AA2017/H-11 模具钢		30	0.5~1
				150	0.5~1.5
				350	0.55~1.25



注: ①为加热炉; ②为红外测温仪; ③为压头; ④为交流电机; ⑤为滚珠丝杠。

(b) 实物图

图12 高温摩擦试验机的设计原理图和实物图

Fig.12 Schematic and the actual testing setup diagram of the high-temperature tribometer

着温度的升高,摩擦系数不断增大。

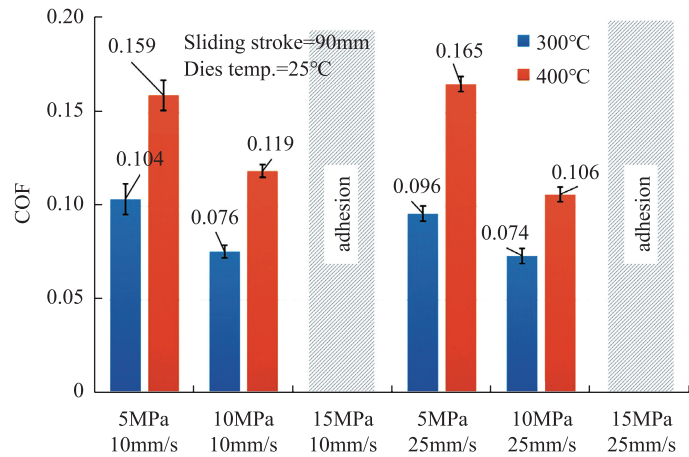
为了减轻铝合金热成形过程中的摩擦,采用高温润滑剂是一种实用的方法,比如石墨、二硫化钼和氮化硼等润滑剂。Ghiotti 等^[55]测量了两种润滑剂的摩擦系数(图 13),可见采用润滑时摩擦系数大大减小。除了借助润滑剂之外,对模具表面进行处理使其具有自润滑功能也引起了相关研究人员的兴趣。

由此可见,干摩擦情况下铝合金在较高温度下会和模具发生强烈的粘滞摩擦,摩擦系数甚至超过 1.0,不仅使得材料在成形时容易被拉裂,也会使得成形零件表面存在大量的拉毛缺陷。使用润滑剂后,摩擦系数降低,甚至会低于 0.1,非常有利于成形,但是需要额外的清理工作;而在模具表面增加涂层则可以减少润滑剂的使用或者不使用润滑剂。

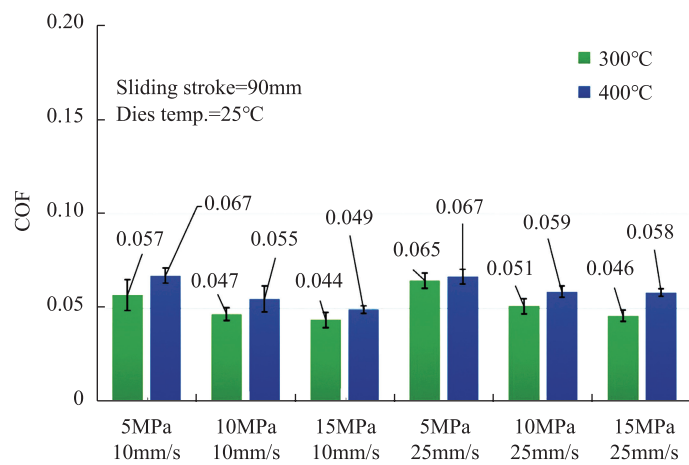
2 热交换系数

在成形和淬火阶段,板料和模具之间的热交换能力决定着成形过程中的冷却速度以及最终的力学性能,通常用界面传热系数(Interfacial heat transfer coefficient, IHTC)来表达。界面传热系数也是热力耦合数值模拟过程一个很重要的热力参数。由于铝合金热冲压中通常需要使用润滑剂,因此需要考虑润滑剂对界面传热系数的影响。Liu 等^[56]采用自制设备实际测温 and 有限元模拟相结合的方式,计算了不同压强、粗糙度以及有无润滑剂情况下的界面传热系数,结果显示接触压强相同时,使用润滑剂的 IHTC 要比干摩擦下的 IHTC 大(图 14),但是他们测量的接触压强范围较小。

Ying 等^[57]使用 Beck 法计算了 7075-T6 铝合金在热冲压中 IHTC,其中涉及压强(范围较大)、表面粗糙度和润滑剂对 IHTC 的影响,如图 15 所示。还对使用润滑剂和干摩擦条件下的 IHTC 随温度的变化进行了对比,图 16 所示。



(a) Pulve D18A



(b) Bonderite L-GP Aquadag

图 13 铝合金热冲压成形两种润滑剂的摩擦系数

Fig.13 Friction coefficient measured during hot stamping of aluminum alloys sheets

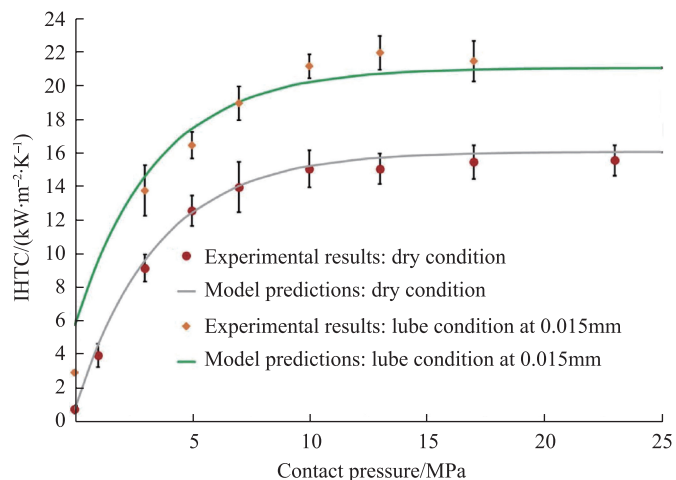
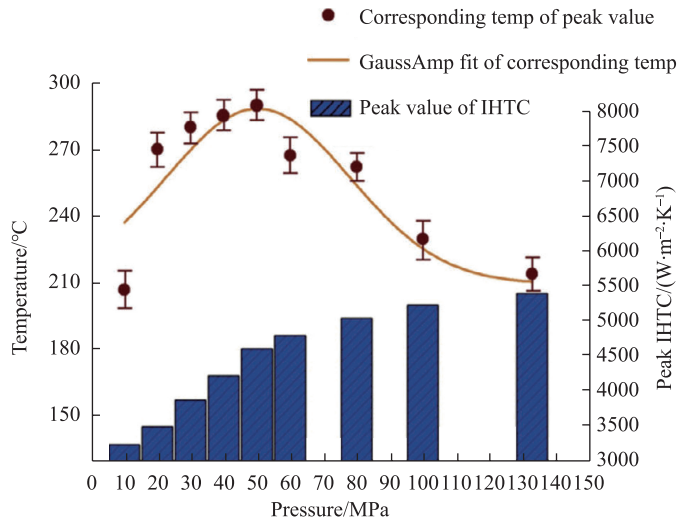
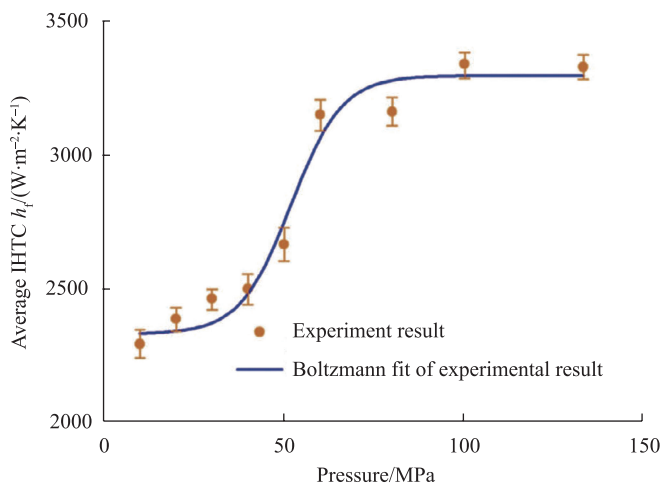


图 14 在干摩擦与润滑剂条件下 IHTC 随接触压力的变化

Fig.14 IHTC evolutions with contact pressure using cast iron tools under dry and lubricated conditions



(a) 峰值 IHTC



(b) 平均 IHTC

图15 在干摩擦条件下压强对IHTC的影响

Fig.15 Effect of IHTC under different contact pressures at dry condition

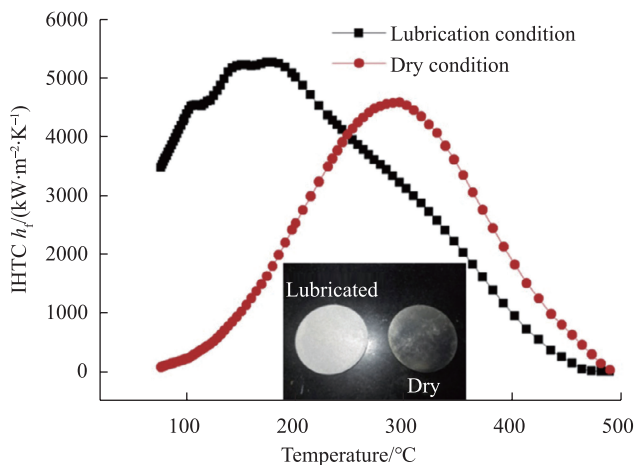


图16 在干摩擦和润滑条件下的界面传热系数随温度的变化

Fig.16 Comparison of instantaneous IHTC in the lubricated condition and dry condition

结论与展望

2015年10月, AP&T成功交付了全球第一条基于HFQ技术的铝板热成形生产线,目前HFQ技术的专利拥有者英国帝国理工学院也成立了公司,从事铝合金热成形技术的推广与应用工作。AP&T首席技术官Christian博士认为这种新技术具备相当大的潜力,“用铝热成形替代目前使用钢或压铸铝制造的车身结构件来大幅度降低重量,可使得汽车车身结构重量减少一半”。华中科技大学从2016年开始高强铝合金热冲压工艺及装备的研究,利用现有的高强钢热成形生产线,采用7075高强铝合金成功试制出了汽车B柱,零件性能达到原始材料的级别。

为了推广使用铝合金热冲压成形技术,使之在汽车轻量化的进程中发挥重要作用,真正使该项技术从实验室研究走向工业应用,在以下几个方面还需要进一步研究:

(1) 现有铝合金热冲压技术中冲压节奏与固溶时间、时效时间严重不匹配,难于保持生产的同步性,影响生产效率。因此,研究新的加热方法缩短固溶时间,研究新型高强铝合金材料,改善时效过程,以及采用多级时效方法缩短时效时间,都是值得研究的方向。

(2) 在热冲压过程中,材料的组织演变将影响其应力-应变特性以及结构件的最终性能,迄今为止,尚缺乏对高强铝合金热冲压过程中多种组织变量变化的定量描述和组织性能调控的系统研究。只有在明确材料初始状态、固溶过程、热成形及淬火冷却过程及时效过程对力学性能和服役性能的影响规律后,才能对热冲压工艺和热处理工艺进行优化,实现“精确控性”的目的。

(3) 由于在热冲压过程中,板料形状的不断变化引起板料与模具的接触点不断变化,从而引起板料温度

场的变化,并由此引起的不均匀应变和摩擦是引起开裂的主要原因。由于高温下铝合金板料的硬度较模具要低很多,铝合金板料很容易脱落使颗粒附着到模具表面,从而划伤成形件表面,此质量缺陷(拉毛)将严重影响铝合金热成形结构件的抗疲劳特性。冲压过程中处理该问题时(如涂抹润滑剂)也会影响生产流程控制。因此,需要系统研究热成形过程中导致成形缺陷产生的影响因素及其机理,建立有效的成形缺陷控制方法,使得生产流程的控制更为精确。

参考文献

- [1] JOSEPH C, BENEDY K. Light metals in automotive applications[J]. *Light Metal Age*, 2000, 10: 34-35.
- [2] 钟奇,施毅,刘博. 铝合金在汽车轻量化中的应用[J]. *新材料产业*, 2015(2): 23-27.
- ZHONG Qi, SHI Yi, LIU Bo. Application of aluminum alloys in automobile lightweight[J]. *Advanced Materials Industry*, 2015(2): 23-27.
- [3] 杨合,李落星,王渠东,等. 轻合金成形领域科学技术发展研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(12): 31-42.
- YANG He, LI Luoxing, WANG Qudong, et al. Research on the development of advanced forming for lightweight alloy materials area[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(12): 31-42.
- [4] 龙江启,兰凤崇,陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(6): 27-35.
- LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(6): 27-35.
- [5] 周成军,沈嵘枫,周新年,等. 电动汽车车身结构轻量化研究进展[J]. *林业机械与木工设备*, 2012, 40(11): 14-18.
- ZHOU Chengjun, SHEN Rongfeng, ZHOU Xinnian, et al. Research progress on electric vehicle body structural lightweight[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2012, 40(11): 14-18.
- [6] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 280(1): 37-49.
- [7] MA M T, YI H L, LU H Z, et al. On the automobile lightweight[J]. *Engineering Sciences*, 2012, 10(2): 71-77.
- [8] LÜDKE B, PFESTORF M. Functional design of a "lightweight body in white"- how to determine body in white materials according to structural requirements[C]//*Proceedings of Niobium Microalloyed Sheet Steels for Automotive Applications (The Minerals, Metals & Materials Society)*. Brasilia, 2006.
- [9] 马鸣图,游江海,路洪洲. 汽车轻量化以及铝合金汽车板的应用[J]. *新材料产业*, 2009(9): 34-37.
- MA Mingtu, YOU Jianghai, LU Hongzhou. Automotive lightweight and the application of aluminum alloy automotive panels[J]. *Advanced Materials Industry*, 2009(9): 34-37.
- [10] 庄华晔,张义和,应善强. 轿车车身结构特性及其对材料性能要求[J]. *汽车工艺与材料*, 2011(2): 45-50.
- ZHUANG Huaye, ZHANG Yihe, YING Shanqiang. Requirement of car body structural characteristic on material performance[J]. *Automobile Technology & Material*, 2011(2): 45-50.
- [11] SCHLOSSER J, SCHNEIDER R, RIMKUS W, et al. Materials and simulation modelling of a crash-beam performance—a comparison study showing the potential for weight saving using warm-formed ultra-high strength aluminium alloys[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 896(1): 012091.
- [12] 李勇,王昭东,马鸣图,等. 高品质铝合金汽车板预处理气垫炉技术[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(1): 14-22.
- LI Yong, WANG Zhaodong, MA Mingtu, et al. Review and prospect of the air cushion furnace technology for aluminium alloy automotive sheet pre-treatment[J]. *Engineering Science*, 2014, 16(1): 14-22.
- [13] KO D C, KO D H, KIM J H, et al. Development of a partition panel of an Al6061 sheet metal part for the improvement of formability and mechanical properties by hot forming quenching[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(2): 1-15.
- [14] WANG L, STRANGWOOD M, BALINT D, et al. Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(6): 2648-2656.
- [15] CHEN Y, DING H, CAI Z H, et al. Effect of initial base metal temper on microstructure and mechanical properties of friction stir processed Al-7B04 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 650: 396-403.
- [16] 刘星兴,唐建国,张新明,等. 双级淬火对车身板用6016铝合金烤漆硬化效应的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(5): 1186-1193.
- LIU Xingxing, TANG Jianguo, ZHANG Xinming, et al. Influence of interrupted quenching on paint-bake response of AA6016 Al alloy sheet[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(5): 1186-1193.
- [17] 田妮,赵刚,左良,等. 汽车车身用Al-Mg-Si-Cu合金薄板应变强化行为的研究[J]. *金属学报*, 2010, 46(5): 613-617.
- TIAN Ni, ZHAO Gang, ZUO Liang, et al. Study on the strain hardening behavior of Al-Mg-Si-Cu alloy sheet for automotive body[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(5): 613-617.
- [18] FOSTER A, DEAN T A, LIN J G. Process for forming aluminium alloy sheet components: EP20090785115[P]. 2009-09-16.
- [19] 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.
- [20] 周国伟,李大永,彭颖红. 7075-T6高强度铝合金温热条件下的拉深成形性能[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(9): 1482-1486.
- ZHOU Guowei, LI Dayong, PENG

Yinghong. Deep drawability of 7075-T6 high strength aluminum alloy at warm condition[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(9): 1482–1486.

[21] 王辉, 高霖, 陈明和, 等. T6 态 7075 铝合金的温拉深成形研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(2): 232–235.

WANG Hui, GAO Lin, CHEN Minghe, et al. Deep drawing of A7075 with T6 temper at elevated temperature[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(2): 232–235.

[22] FAN X B, HE Z B, YUAN S J, et al. Investigation on strengthening of 6A02 aluminum alloy sheet in hot forming-quenching integrated process with warm forming-dies[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 587: 221–227.

[23] 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.

[24] FAKIR O E, WANG L L, BALINT D, et al. Numerical study of the solution heat treatment, forming, and in-die quenching (HFQ) process on AA5754[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 87: 39–48.

[25] 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.

[26] ZHOU J, WANG B Y, LIN J G, et al. Forming defects in aluminum alloy hot stamping of side-door impact beam[J]. Transaction Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(11): 3611–3620.

[27] 傅垒, 王宝雨, 孟庆磊, 等. 铝合金热冲压成形质量影响因素 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 936–941.

FU Lei, WANG Baoyu, MENG Qinglei, et al. Factors affecting quality in hot stamping of aluminum alloy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 936–941.

[28] MOHAMED M S, FOSTER A D,

LIN J G, et al. Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modelling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 27–38.

[29] XIAO W C, WANG B Y, ZHENG K L. An experimental and numerical investigation on the formability of AA7075 sheet in hot stamping condition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9–12): 3299–3309.

[30] SONG Y L, DAI D G, GENG P, et al. Formability of aluminum alloy thin-walled cylinder parts by servo hot stamping[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 741–746.

[31] YING L, GAO T H, DAI M H, et al. Investigation of interfacial heat transfer mechanism for 7075-T6 aluminum alloy in HFQ hot forming process[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 266–282.

[32] HALL R, FOSTER A, PRATURLON A H. Hot forming and quenching pilot process development for lowcost and low environmental impact manufacturing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 896(1): 012088.

[33] BEHRENS B A, NÜRNBERGER F, BONK C, et al. Influences on the formability and mechanical properties of 7000-aluminum alloys in hot and warm forming[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 896(1): 012004.

[34] DEGNER J, HORN A, MERKLEIN M. Experimental study on the warm forming and quenching behavior for hot stamping of high-strength aluminum alloys[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 896(1): 012055.

[35] LIU Y, ZHU Z J, WANG Z J, et al. Formability and lubrication of a B-pillar in hot stamping with 6061 and 7075 aluminum alloy sheets[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 723–728.

[36] LU J, SONG Y L, HUA L, et al. Thermal deformation behavior and processing maps of 7075 aluminum alloy sheet based on isothermal uniaxial tensile tests[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 856–869.

[37] SCHARIFI E, KUHNHENN D, ADEMAJ A, et al. An experimental

investigation of hot forming effects on mechanical properties of high-strength aluminum alloys AA6082 and AA7075[C]// Proceedings of 6th Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel (CHS2). Lulea, 2017: 683–690.

[38] 李勇, 安小雪, 王昭东. 6016 铝合金汽车板的气垫炉式固溶工艺 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(S1): 144–151.

LI Yong, AN Xiaoxue, WANG Zhaodong. Solid solution treatment process like in air-cushion furnace of 6016 aluminum alloy auto body sheet[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(S1): 144–151.

[39] XU X F, ZHAO Y G, WANG X D, et al. Effect of rapid solid-solution induced by electropulsing on the microstructure and mechanical properties in 7075 Al alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 654: 278–281.

[40] MAENO T, MORI K, YACHI Y. Hot stamping of high-strength aluminium alloy aircraft parts using quick heating[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 269–272.

[41] SHAO Z T, JIANG J, LIN J G. Feasibility study on direct flame impingement heating applied for the solution heat treatment, forming and cold die quenching technique[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 398–404.

[42] LIU Y, WU C Y, WANG L, et al. Investigation on fast solution and aging of 6061 aluminum alloy sheet in hot stamping processes and its negative natural aging effect[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Advanced High Strength Steel and Press Hardening (ICHSU 2018). Hefei, 2018.

[43] ZHANG Z Q, YU J H, HE D Y. Influence of contact solid-solution treatment on microstructures and mechanical properties of 7075 aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2019, 743: 500–503.

[44] OMER K, ABOLHASANI A, KIM S, et al. Process parameters for hot stamping of AA7075 and D-7xxx to achieve high performance aged products[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257:

170–179.

[45] LI N, ZHENG J H, ZHANG C, et al. Investigation on fast and energy-efficient heat treatments of AA6082 in HFQ processes for automotive applications[C]//Proceedings of International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2015). Glasgow, 2015.

[46] LIU Y, ZHU Z J, WANG Z J, et al. Investigation on short time aging of Al-Mg-Si alloy sheet under hot stamping conditions[C]//Proceedings of 6th Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel (CHS2). Lulea, 2017.

[47] XU X F, ZHAO Y G, WANG X D, et al. The rapid age strengthening induced by Ag additions in 7075 aluminum alloy[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, 648: 367–370.

[48] 湛利华, 贾树峰, 张姣. 电脉冲时效对 7075 铝合金组织和性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(3): 600–605.

ZHAN Lihua, JIA Shufeng, ZHANG Jiao. Influence of electrical impulse aging on microstructure and mechanical properties

of 7075 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(3): 600–605.

[49] WANG L, HE Y, ZHOU J, et al. Effect of temperature on the frictional behaviour of an aluminium alloy sliding against steel during ball-on-disc tests[J]. *Tribology International*, 2010, 43(1–2): 299–306.

[50] PELLIZZARI M. High temperature wear and friction behaviour of nitrided, PVD-duplex and CVD coated tool steel against 6082 Al alloy[J]. *Wear*, 2011, 271(9–10): 2089–2099.

[51] BJÖRK T, BERGSTR M J, HOGMARK S. Tribological simulation of aluminium hot extrusion[J]. *Wear*, 1999, 224(2): 216–225.

[52] GALI O A, RIAHI A R, ALPAS A T. The tribological behaviour of AA5083 alloy plastically deformed at warm forming temperatures[J]. *Wear*, 2013, 302(1–2): 1257–1267.

[53] WANG L L, ZHOU J, DUSZCZYK J, et al. Identification of a friction model for

the bearing channel of hot aluminium extrusion dies by using ball-on-disc tests[J]. *Tribology International*, 2012, 50: 66–75.

[54] PUJANTE J, PELCASTRE L, VILASECA M, et al. Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures[J]. *Wear*, 2013, 308(1–2): 193–198.

[55] GHIOTTI A, BRUSCHI S, MEDIA F. Wear onset in hot stamping of aluminium alloys sheets[J]. *Wear*, 2017, 376–377: 484–495.

[56] LIU X C, JI K, FAKIR O E, et al. Determination of the interfacial heat transfer coefficient for a hot aluminium stamping process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 158–170.

[57] YING L, GAO T H, DAI M H, et al. Investigation of interfacial heat transfer mechanism for 7075-T6 aluminum alloy in HFQ hot forming process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118: 266–282.

通讯作者: 王义林, E-mail: wangyilin@hust.edu.cn。

Research Progresses of Hot Stamping Technology for High Strength Aluminum Alloy Sheet

WANG Yilin, LIU Yong, GENG Huicheng, ZHANG Yisheng

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problems of cracking caused by poor plasticity and large spring-back affecting dimensional precision during cold stamping of high aluminum alloy sheet, a novel technology named hot forming and quenching integrated process has been developed. The technology combined hot forming and quenching together in one operation where the sheet is rapidly transferred to the forming die after solution treatment and then in-die quenching is performed and the strength is finally improved by aging treatment. In this paper, firstly latest developments in hot stamping process for aluminum alloy sheet are summarized, and then some research achievements of hot stamping process experiments are introduced, which formability of hot stamping and solid solution aging strengthening are described in details. At last some progresses about the hot stamping die technology are presented from the view of the friction mechanism and interfacial heat transfer.

Keywords: High strength aluminum alloy; Hot stamping; Solid solution & aging strengthening; Hot stamping–cold-die quenching; Friction mechanism; Interfacial heat transfer

(责编 李丹)