37

### 研究进展

# 铝合金板材热成形-淬火一体化工艺研究进展

### 何祝斌, 凡晓波, 苑世剑

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘要:为解决铝合金室温塑性差和成形后热处理变形的问题,发展起来了一种铝合金板材热成形-淬火一体化新工艺。该工艺是将热处理和热成形在同一工步完成,即固溶后板材快速转移到模具 中成形,然后完成模内淬火,最后通过时效来提高其强度。高温成形可提高板材成形性能,模内淬 火能够保证其强度和尺寸精度。重点介绍了铝合金板材热成形-淬火一体化工艺关键技术及最新 研究进展,总结了铝合金板材热成形-淬火一体化工艺实验研究和数值模拟的研究现状。 关键词:铝合金板材;热成形-淬火一体化;热冲压;成形性能;强化规律 DOI:10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.007 中图分类号:TG244<sup>+</sup>.3 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2014)05-0037-08

#### **Review of Hot Forming-quenching Integrated Process of Aluminum Alloy**

HE Zhu-bin, FAN Xiao-bo, YUAN Shi-jian

(School of Materials Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**ABSTRACT**: In order to improve the formability and avoid thermal distortion of formed part during heat treatment, a novel technology named hot forming–quenching integrated process has been developed for aluminum alloy forming. The technology combines hot forming and quenching together in one operation where the sheet is transferred to the forming mould in a fast manner after solid solution and then intra–mould quenching is performed and the strength is finally improved by aging. It exhibits good formability because forming process is finished mainly at the temperature close to SHT temperature. Die quenching is beneficial to freeze the supersaturated solid solution and reduce thermal distortion so as to improve formability and guarantee the strength and the precise dimension. In this paper, the key technologies and latest developments of hot forming–quenching integrated process were introduced. Experimental and numerical studies on the integrated process were summarized and reviewed. Finally, the further research directions were proposed.

**KEY WORDS**: aluminum alloy sheet; hot forming-quenching integrated process; hot stamping; formability; strengthening

收稿日期:2014-08-10

基金项目:长江学者和创新团队发展计划(IRT1229);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0799);985 青年学者基础科研能力 建设项目(HIT. BRETIII. 201204)

作者简介:何祝斌(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为塑性加工力学与基础理论、内高压成形、热态气压成形和板材热态成形 新工艺。

为应对能源危机,发展先进制造技术以实现结构轻量化,已成为汽车工业、航空航天领域的研究热点。为实现这一目标,一种方式是利用全新的设计理念,优化设计,简化结构,减轻重量;另一种则是使用高比强度的轻质材料,实现材料轻量化,如高强钢以及铝、镁、钛等轻质合金<sup>[1-2]</sup>。然而,轻质合金在室温下的成形性能差、回弹大,利用传统的加工方法很难成形形状复杂的零件,限制了其进一步运用,因此,通常需要采用提高成形温度的方法来改善此类材料的成形性,提高其塑性变形能力<sup>[3-4]</sup>。

然而,热成形过程中,合金内部同时进行着加工 硬化和回复、再结晶软化2个相反的过程,热成形后 零件的强度下降。为此,热成形后常需要对零件进 行热处理,但是在快速淬火过程中,由于零件受热不 均,容易导致零件形状发生变化,影响其形状尺寸精 度。解决该问题的一种方法是将成形过程和热处理 过程相结合,依靠同一套模具实现"成形"和"控性" 的目的,如高强钢板的热冲压技术<sup>[5]</sup>。高强钢热冲 压是将高强度钢板加热到一定温度实现奥氏体化, 然后快速冲压成形,并在冷态的模具内保压实现淬 火,从而得到组织为马氏体、强度达1500 MPa 的超 高强度零件。高温下成形时,钢板的成形性能大幅 度提高,回弹小,在模内淬火可有效避免热畸变。目 前,高强钢热冲压技术已经用于汽车安全部件(如 A 柱、B 柱、保险杠等)的大批量生产。

铝合金由于具有高比强度、刚度和良好的耐腐 蚀性能,已经大量地运用于汽车和航空航天行业。 NASA 和洛克希德-马丁公司联合研制了铝锂合金 整体式箱底,直径为5.2 m,重量减轻25%。但是, 铝合金零件成形时存在室温塑性差和热处理变形的 问题,尤其是对于航空航天领域的大尺寸复杂薄壁 零件,如口框、舱门等。在高强钢热冲压技术的基础 上,英国帝国理工大学的林建国首先提出了针对铝 合金的热处理和热成形相结合的复合工艺,即热成 形-淬火一体化新工艺(solution heat treatment, forming and cold-die quenching, HFQ)<sup>[6]</sup>。其成形 过程是将完全固溶后的铝合金板材快速转移到水冷 模具上,然后快速合模成形,成形完成后保持合模以 完成零件模内淬火,最后进行时效处理以提高其强 度。高温下成形可提高板材成形性能,模内淬火能 够保证其强度和尺寸精度。采用该方法可以有效解 决铝合金材料室温塑性差、热处理时形状畸变的问 题。文中将重点介绍铝合金板材热成形-淬火一体 化工艺关键技术及最新进展,总结铝合金板材热成 形-淬火一体化工艺实验研究和数值模拟研究现 状,并提出后续研究方向。

## 1 热成形-淬火一体化工艺

热成形-淬火一体化工艺的实质是成形与淬火 相结合,涉及到2个科学问题:一个是固溶状态铝合 金板材塑性变形行为;另一个是铝合金高温形变热 处理。图1为传统的热成形-淬火一体化冷模成形 过程示意图,包括固溶处理、热成形+模内淬火和时 效处理3个主要步骤。成形模具均为水冷模具,以 实现成形零件的快速冷却。该工艺具有如下特点: (1)固溶后板坯快速转移到成形模具上完成成形,成 形温度接近于固溶温度,具有良好的成形性能;(2)板 坯在热态下成形,变形抗力和回弹小;(3)水冷模具可 实现成形零件快速淬火,保证其获得过饱和固溶体; (4)成形后零件在模内淬火,热应力对其形状尺寸的 影响小,成形件尺寸精度高;(5)热成形和淬火几乎同 时完成,缩短了工艺流程,提高了生产效率。



图1 传统热成形-淬火一体化工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of hot forming-quenching integrated process

与高强钢热冲压相似,铝合金热成形-淬火一体化工艺的关键技术主要包括以下几个方面。

 加热装置。铝合金板材成形前需要进行固 溶处理,其是一个连续加热过程。为了实现在给定 生产节奏下的连续自动化生产,加热炉必须具备自 动化进料和出料功能,具有足够的加热功率,以实现 在设定时间内铝合金板材的固溶处理,并且还需要 保证出炉以后的铝合金板材具有足够的定位精度。

2)上料装置。固溶后板材需要快速转移到模
 具中进行成形,否则板材温度将大幅下降而影响其

成形性能。设计能够夹持高温铝合金板材的夹持器 和快速机械手至关重要。

3)模具设计。铝合金热成形-淬火一体化成形 模具需要内置冷却水道,以实现零件的模内快速淬 火。冷却水道的设计主要包括冷却水道孔径大小、冷 却水道间距和布置方式、冷却水道中心离模具型面的 距离以及冷却水的流动方式等。冷却水道设计直接 决定着铝合金板材大批量连续生产过程的稳定性。

4)快速压力机。铝合金热成形-淬火一体化成 形过程中,固溶后板材需要快速成形,然后合模冷却, 因此,压力机需要具备快速合模冲压和保压的功能, 要求其同时兼备传统机械压力机和液压机的优点。

与高强钢热冲压不同的是,铝合金具有不同的 热处理强化机制和热变形行为。不同系列的铝合金 板材,具有不同的热处理工艺参数。铝合金材料的 固溶温度与其淬火敏感区间仅相差几十摄氏度,所 以铝合金热成形温度区间相对较窄。而铝合金的热 传导率大,散热速度快,材料的温度容易变化,因此, 铝合金热成形-淬火一体化冷模成形过程中,固溶 后板材的转移和成形需要在很短时间内完成,这就 对成形设备提出了更高要求。本文作者提出,可适 当提高成形模具的温度,以减小板材在成形前的温 度下降。一种方式是采用上下都为热态的模具,如 图 2a 所示,称为热成形-淬火一体化热模成形。但 是,成形模具温度过高又会影响零件的淬火效果,从



 決模

 热成形
 模内淬火
 时效处理

b 冷热复合模成形

图 2 改进的热成形-淬火一体化工艺示意图

固溶处理

Fig. 2 Schematic diagrams of improved hot forming-quenching integrated process

而影响最终的析出强化效果,因此,成形模具的温度 不能太高。另一种方式是仅提高下模具的温度,上 模仍为冷态,如图 2b 所示,称为热成形-淬火一体 化冷热复合模成形。此方法利用热态的下模具来减 小成形前板材温度的下降。成形完成后,成形件随 冷态的上模具一起上移并完成冷却,以保证其淬火 效果和尺寸精度。

### 2 可热处理强化铝合金板材

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 2 类。不可热处理强化铝合金,在加热过程中其固溶 体成分不随温度变化而变化,如纯铝、Al-Mn、Al-Mg、Al-Si系合金。此类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)、Al-Li 新型合 金,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,如铝锂合金、超 高强铝合金等,经T6热处理后屈服强度可达500 MPa 以上<sup>[7-8]</sup>。铝合金热处理主要包括固溶处理和 时效处理2个过程。固溶处理的目的是获得过饱和 固溶体,为强化相析出提供载体;时效处理的目的则 是使处于不稳定状态的过饱和固溶体脱溶,让强化 相弥散析出。弥散析出的第二相可阻碍位错运动, 起到强化作用。固溶体过饱和度越大,脱溶驱动力 越大,弥散析出越充分,强化效果越大。固溶加热后 必须快速冷却,以抑制合金在慢冷时出现的次生相 析出,避免因过饱和度下降而影响时效强化效果。 材料在不同冷却速度下淬火,相析出情况不同,固溶 体过饱和度不同,反映出不同的淬火敏感性。铝合 金普遍存在淬火敏感温度区间。在敏感温度区间 内,必须保证足够的冷却速度,以防止粗大平衡相在 淬火过程中析出。在低温和高温区,冷却速度要求 可相对较小。

中南大学的刘胜胆等人<sup>[9]</sup>,通过测定时间-温 度-硬度曲线并采用透射电镜研究了 7055 铝合金 的淬火敏感性。7055 铝合金的淬火敏感温度区间 为 235~415℃,其过饱和固溶体在 355℃保温时会 快速分解。尹志民等人<sup>[10]</sup>测定了 6082 铝合金的淬 火敏感温度区间为 300~420℃,350℃时快速分 解。刘露露等人<sup>[11]</sup>利用分级淬火方法测试了 6061 铝合金 TTP 曲线,其鼻尖温度约为 340 ℃,淬火敏 感温度区间为 220~455 ℃,在此温度区间以 16.2 ℃/s 冷却速率淬火时,合金的硬度能达到最大值的 95%以上。

# 3 热成形-淬火一体化工艺实验研究

### 3.1 成形性能

热成形-淬火一体化成形过程中,板材是在充 分固溶状态(在固溶温度下保温一定时间)下成形, 不同种类铝合金成形性能相差较大。根据固溶态成 形性能大小,可热处理强化铝合金分为固溶态硬脆 性和非硬脆性两类。英国帝国理工的 Wang<sup>[12]</sup>和 Mohamed<sup>[13]</sup>通过 Gleeble 3800 分别测试了 2024 和 6082 铝合金板材在不同固溶温度下的高温力学性 能,如图 3 所示。由图 3 可看出,2024 铝合金板材 延伸率随着温度升高先增大后减小,450 ℃时塑性 最好;在其理想固溶温度(493 ℃)下塑性明显变差, 而 6082 铝合金板材在理想固溶温度下(525 ℃)塑





Fig. 3 True stress-strain curves at different solution temperatures

性最好。固溶态硬脆性材料塑性降低的原因是:基 体中颗粒物熔点低,当加热温度过高时,会先行熔 化,熔化相会导致晶界强度降低,从而使材料塑性降 低。因此,对于固溶态非硬脆性材料可直接用于热 成形-淬火一体化成形。而对于固溶态硬脆性材 料, 应采取一定措施后再进行一体化成形, 如分级固 溶、固溶水淬后二次加热到一定温度进行成形等。 分级固溶的思路是:在高温下固溶使难熔相溶入基 体,提高固溶体的饱和度,从而保证热处理强化效 果:高温固溶后降温至一定温度,在保证不破坏饱和 固溶体的前提下,使熔化相消失,降低其对塑性的负 面作用,从而提高固溶态硬脆性材料的成形性能。 目前,对铝合金板材热成形-淬火一体化成形性能 方面的研究仍处于实验阶段,工艺研究较少。美国 福特公司的 Harrison 等人<sup>[14]</sup>利用 7075 高强铝合金 板材,成功地成形了 B 柱样件。



图 4 7075 铝合金板材 B 柱热冲压件 Fig. 4 B-pillar stamped by 7075 aluminum alloy sheet

#### 3.2 强化规律

热成形-淬火一体化冷模成形过程中,充分固 溶是最终成形件强化的基础,时效析出是最终成形 件强化的实质。凡晓波等人<sup>[15]</sup>研究了热处理条件、 模具冷热状态对铝合金板材热成形-淬火一体化成 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。图 5 给出了 6A02 铝合金板材热 成形-淬火一体化冷模成形时,不同固溶和时效条 件下成形件强度的变化规律。由图 5a 可看出,在相 同的固溶温度下,随固溶时间(≤50 min)的延长,成 形件强度逐渐提高。520 ℃×5 min 固溶处理后,由 于固溶时间较短,第二相中溶质元素来不及溶入基 体,固溶体饱和度低,发生较多的是回复、再结晶导 致的软化过程,所以经人工时效后其强度未增加,反 而相对原始板材明显降低。随着固溶时间的延长, 520 ℃×50 min 固溶处理后,溶质元素已开始大量溶 入基体内,固溶体达到饱和状态。经过人工时效后, 第二相大量析出,呈现出明显的析出强化现象,成形 件屈服强度和抗拉强度分别达到 253.6 MPa 和 315.6 MPa。由图 5b 可知,经人工时效后成形件的 强度大幅度提高。



Fig. 5 Effect of heat treatment on strength

图 6 给出了 2A12 铝合金板材不同模具冷热状态条件下,热成形-淬火一体化成形件强度的变化规律<sup>[16-17]</sup>。热成形-淬火一体化热模成形过程中, 当模具温度超过 200 ℃时,成形件抗拉强度随温度 升高而减小。当热模温度为 350 ℃时,成形件抗拉 强度降低至 358.2 MPa,相比于冷模成形下降了 25%。这是由于随着模具温度的升高,成形件在模



Fig. 6 Effect of hot die temperature on strength

具内淬火时冷却速度降低,存在部分次生相析出,影 响了其过饱和度,导致强化相在时效时粗大析出,影 响了最终的强化效果,如图7所示。冷热复合模成 形过程中,成形件抗拉强度随着下热模温度升高而 升高。当下热模温度为450℃时,抗拉强度为469.2 MPa,与冷模成形件和板材T4热处理强度相当,具 有良好的强化效果。可以得出:热成形-淬火一体 化热模成形过程中,在保证足够强化效果前提下,热 模温度可以提高到250℃,来降低板材温度下降;而 冷热复合模成形过程中,下热模温度可进一步提高 至450℃。



图 7 不同模具温度条件下成形件析出相形貌及分布规律 Fig. 7 Distribution of precipitation at different hot die temperatures

# 4 热成形-淬火一体化工艺数值模拟

通过数值模拟的方法能够多尺度、全场地反映 出成形过程中主要参数的变化。Bergman 和 Oldenburg<sup>[18]</sup>应用 LS-Dyna 中的热壳单元和机械单元相 耦合,成功模拟了热冲压过程,并很好地解决了接触 热稳定性和热收敛问题。Tekkaya 等人<sup>[19]</sup>提出用 Pamstamp 2G 和 Marc 2005 分别对应力场和热场进 行模拟,在每步计算之后进行结果传递以实现耦合 计算,能比传统计算方法节省 20% 的时间。铝合金 热冲压相关的数值模拟进行得较少。帝国理工的 Mohamed<sup>[13]</sup>利用 Fortran 写入材料模型,在 Abaqus 平台上对 6082 铝合金板材胀形试验进行了有限元 分析,有效地预测了板材在不同成形速度下的断裂 形式。Ford 公司的 Harrison 等人<sup>[20]</sup>利用根据等温 压缩试验数据建立的热力耦合模型,对7075 铝合金 板材热冲压过程进行了数值模拟;但是,对整个成形 过程进行全场多尺度的数值模拟工作还未展开。

热成形-淬火一体化成形过程是温度场、应力 场以及微观组织变化相互作用的过程,如图8所示。 固溶后板材与空气、板材与模具、模具与冷却水流之 间同时发生着热辐射、热传导和热对流过程,同时变 形过程中产生的变形功及摩擦功都将影响板材的温 度场。而温度变化后,材料的变形流动行为也随之 变化。温度和变形又同时决定着最终成形零件的微 观组织状态、力学性能。因此,热成形-淬火一体化 过程的模拟涉及复杂的热-力-组织耦合,其中温度 和变形是关键。



图 8 温度-成形-组织相互作用示意图

Fig. 8 Interaction between thermal, mechanical and microstructural field

### 4.1 温度场

合适的温度场模型直接决定了热成形-淬火一体化成形过程有限元模拟的准确性。成形过程中, 包含3类典型的传热过程:热辐射、热传导和热对 流。整个成形过程中,影响热交换系数的主要参数 是板材温度、接触压力和模具冷却能力。加拿大的 Caron等人<sup>[21]</sup>通过实验方法,测量了硼钢板不同合 模压力和模具温度分布条件下板材与模具之间的热 交换系数,并进行了逆热传导分析。Karbasian 等 人<sup>[22]</sup>研究了接触压力对热传导的影响程度,发现接 触面积越大,热传导热量越多。林建平等人<sup>[23]</sup>运用 传热学基本原理,提出了高强钢热冲压过程中,不同 变形阶段钢板温度随时间变化的解析模型,并对其 进行了实验验证。铝合金一体化成形时板材的温度 相对高强钢而言较低,对其在成形温度区间的热量 交换尚未建立模型并进行测试。

#### 4.2 材料模型

金属高温变形的本构关系描述了变形过程中应

力随应变、变形温度和应变速率的变化规律,可抽象 地表述如下:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \tag{1}$$

式中: $\varepsilon$  为应变; $\varepsilon$  为应变速率(s<sup>-1</sup>);T 为变形 温度(K)。Johnson-Cook 方程<sup>[24]</sup>同时考虑了温度、 应变速率和应变量等因素对材料变形过程中流动应 力的影响,具体表达式为:

 $\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + m \ln \left( \dot{\varepsilon} / \varepsilon_0 \right) \right] (1 - T^{*M})$  (2)

式中: $\sigma$  为流动应力(MPa);A 为屈服强度 (MPa);B 为幂指前系数;n 为加工硬化指数;m 为 应变速率敏感指数;M 为温度敏感系数; $T^*$  为相对 温度: $T^* = (T-T_r)/(T_m - T_r), T_r$  为室温(K), $T_m$  为 熔点温度(K)。Rosserd 方程<sup>[25]</sup>同时考虑了应变硬 化和应变速率硬化对流动应力的影响.表达式为:

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \tag{3}$$

通常情况下,材料在常温下的 m 值很小,即可 简化为常规应变硬化材料的幂指函数,而在高温下 变形时 n 值相对很小。实际变形过程中,为同时体 现应变硬化和软化这 2 种效应,考虑温度的影响,可 写成下列表达式:

$$\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(Q/RT) \tag{4}$$

式中:Q为变形激活能(J/mol);R为气体常数 (8.314 J/mol)。为同时考虑应变量对流动应力的 影响,上海交通大学张先宏<sup>[26]</sup>在 Rosserd 方程基础 上引入了软化因子 exp(bT+sɛ),表达式为:

$$\boldsymbol{\sigma} = K \boldsymbol{\varepsilon}^n \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^m \exp(bT + s\boldsymbol{\varepsilon}) \tag{5}$$

式中:b,s分别为温度软化系数和应变软化系数。林建国等人<sup>[27-28]</sup>考虑了热变形过程中位错密度对流变应力的影响,建立了耦合位错密度的铝合金流变应力本构模型。

# 5 结论与展望

热成形-淬火一体化工艺能够同时解决铝合金 室温塑性差和成形后热处理变形的问题,是一种适 用于大型复杂薄壁零件的先进成形技术。目前,该 工艺尚处于初步研究阶段,以后的工作可从以下几 方面进行。

 1)揭示固溶状态铝合金板材高温成形极限及 变形机理。铝合金板材是在完全固溶后进行成形, 固溶状态铝合金板材塑性变形机理非常复杂,涉及

43

到晶界滑动和位错滑移。固溶后的板材在高温下变 形时的断裂机理发生显著变化,这直接决定了板材 的成形极限。

2)探索铝合金高温变形对时效强化的影响规
 律,包括变形程度和变形速度。

 建立以温度、应变、应变速率、固溶体饱和度 以及微观组织为基础的高温本构方程,为数值模拟 提供材料模型。

建立温度场、应力场和微观组织之间的多场
 耦合模型,能够准确地预测成形件应力分布和力学
 性能。

#### 参考文献:

- DURSUN T, SOUTIS C. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys [J]. Materials and Design, 2014,56:862–871.
- [2] 苑世剑,何祝斌,刘钢. 轻合金热态液力成形技术[J]. 锻压技术,2005,30(6):75—80.
  YUAN Shi-jian, HE Zhu-bin, LIU Gang. Warm Hydrof Orming Process of Light Weight Alloys[J]. Forging and Stamping Technology,2005,30(6):75—80.
- [3] TOROS S, OZTURK F, KACAR I. Review of Warm Forming of Aluminum - magnesium Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207(1):1—12.
- [4] MAHABUNPHACHAI S, KOC M. Investigations on Forming of Aluminum 5052 and 6061 Sheet Alloys at Warm Temperatures [J]. Materials and Design, 2010, 31:2422-2434.
- [5] KARBASIAN H, TEKKAYA A. A Review on Hot Stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010,210(15):2103-2118.
- [6] LIN J, DEAN T, GARRETT R. A Process in Forming High Strength and Complex-shaped Al-alloy Sheet Components [P]. British Patent: WO2008059242,2008.
- [7] 王喜琴,张贵一,王业伟.2195 铝锂合金热处理工艺研究[J].上海航天,2014,31:53—55.
  WANG Xi-qin, ZHANG Gui-yi, WANG Ye-wei. Heat Treatment Process of 2195 Aluminum-lithium Alloy[J].

Aerospace Shanghai, 2014, 31:53—55.

[8] AHMADI S, ARABI H, SHOKUHFAR A. Formation Mechanisms of Precipitates in an Al - Cu - Li - Zr Alloy and Their Effects on Strength and Electrical Resistance of the Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 484 (1):90-94.

[9] 刘胜胆,张新明,黄振宝.7055 铝合金的淬火敏感性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(5): 846-849.

LIU Sheng-dan,ZHANG Xin-ming,HUANG Zhen-bao. Quenching Sensitivity of 7055 Aluminum Alloy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2006,37(5):846—849.

- [10] 王岗,尹志明,越凯,等. 6082 铝合金的 TTT 曲线及其 研究[J]. 材料科学与工艺,2011,19(4):84—88.
  WANG Gang, YIN Zhi-ming, YUE Kai, et al. TTT Curves of 6082 Aluminum Alloy and Its Application [J]. Materials Science and Technology,2011,19(4):84—88.
- [12] 刘露露,潘学著,高萌,等. 6061 铝合金 TTP 曲线的研究[J]. 金属热处理,2012,37(4):20-23.
   LIU Lu-lu, PAN Xue-zhu, GAO Meng, et al. TTP Curves of 6061 Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2012,37(4):20-23.
- [12] 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.
- [13] MOHAMED M, FOSTER A, LIN J, et al. Investigation of Deformation and Failure Features in Hot Stamping of AA6082:Experimentation and Modeling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 27-38.
- HARRISON N, LUCKEY S. Hot stamping of a B-pillar outer from High Strength Aluminum Sheet AA7075 [J].
   SAE International Journal of Material Manufacture, 2014, 7(3):567-573.
- [15] FAN Xiao-bo, HE Zhu-bin, YUAN Shi-jian, et al. Experimental Investigation on Hot Forming-quenching Integrated Process of 6A02 Aluminum Alloy Sheet[J]. Materials Science and Engineering A,2013,573:154-160.
- [16] FAN Xiao-bo, HE Zhu-bin, YUAN Shi-jian, 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.
- [17] YUAN Shi-jian, FAN Xiao-bo, HE Zhu-bin. Hot Forming-quenching Integrated Process with Cold-hot Dies for 2A12 Aluminum Alloy Sheet [J]. Procedia Engineering, 2014, accepted.
- [18] BERGMAN G, OLDENBURG M. A Finite Element Model for Thermo-mechanical Analysis of Sheet-metal Forming

2014年09月

[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(9):1167—1186.

- [19] TEKKAYA A, KARBASIAN H, HOMBERG W, et al. Thermo-mechanical Coupled Simulation of Hot Stamping Components for Process Design[J]. Computer Aided Engineering, 2007, 1(1):85–89.
- [20] HARRISON N, LUCKEY S. Hot Stamping of a B-Pillar Outer from High Strength Aluminum Sheet AA7075 [J]. SAE International Journal of Material Manufacture, 2014, 7(3):567-573.
- [21] CARON E, DAUN K, WELLS M. Experimental Heat Transfer Coefficient Measurements during Hot Forming Die Quenching of Boron Steel at High Temperatures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 71:396—404.
- [22] KARBASIAN H, KLIMMEK C, BROSIUS A, et al. Identification of Thermo – mechanical Interaction during Hot Stamping by Means of Design of Experiments for Numerical Process Design[C]//In:Numisheet, Interlaken, Switzerland, 2008, 575—579.
- [23] 林建平,孙国华,朱巧红,等. 超高强度钢板热成形板 料温度的解析模型研究[J]. 锻压技术,2009,34(1): 20-23.

LIN Jian-ping, SUN Guo-hua, ZHU Qiao-hong. Research on Analytical Model of Blank Temperature Prediction for Hot Stamping of Ultra High Strength Steels [J]. Forging and Stamping Technology, 2009, 34(1):20-23.

#### (上接第30页)

WANG Cheng-fang. An Experimental Investigation on Springback and Expansion of Pipes after Cold Bend[J]. Shipbulding of China, 1993(2):71-82.

[13] 刘志. 缠绕式弯管机上的管路的弯曲回弹与伸长规律 [J]. 金属成形工艺,2002,21(5):83—84.

. بلان بلان بلان بلان بلان بلان بلان

LIU Zhi. Springback and Expansion of Tube in Rotary Draw Bending [J]. Metal Forming Technology, 2002, 21 (5):83—84.

- [14] SONG Fei-fei, YANG He, LI Heng, et al. Springback Prediction of Thick – Walled High – Strength Titanium Tube Bending [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26 (5):1336—1345.
- [15] LI Heng, YANG He, SONG Fei-fei, et al. Springback Characterization and Behaviors of High-Strength Ti-3Al -2.5V Tube in Cold Rotary Draw Bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 202(9):1973—

- [24] JOHNSON G, COOK W. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains High Strain Rates and High Temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. La Hague, Netherlands, 1983:541-547.
- [25] XING H, WANG C, ZHANG K, et al. Recent Development in the Mechanics of Superplasticity and Its Applications
   [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1):196-202.
- [26] 张先宏. 镁合金热变形过程试验研究和数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,2003:26-28.
  ZHANG Xian-hong. Experimental and Numerical Study of Magnesium Alloy during Hot - working Process [D].
  Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2003:26-28.
- [27] 傅垒,王宝雨,林建国,等. 耦合位错密度的 6111 铝合 金热变形本构模型[J]. 北京科技大学学报,2013,35 (10):1333—1339.
  FU Lei, WANG Bao-yu, LIN Jian-guo, et al. Constitutive Model Coupled with Dislocation Density for Hot Deformation of 6111 Aluminum Alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(10):1333— 1339.
- [28] FAKIR O, WANG L, BALINT D, et al. Experimental and Numerical Studies of the Solution Heat Treatment, Forming, and In-die Quenching (HFQ) Process on AA5754 [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, online.

1987.

- [16] LI Heng, YANG He, SONG Fei-fei, et al. Springback Nonlinearity of High-strength Titanium Alloy Tube upon Mandrel Bending [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(3):429-438.
- [17] 王艳. TA18 高强钛管数控弯曲回弹规律的数值模拟研究[D]. 西安:西北工业大学,2011.
  WANG Yan. Numerical Simulation Study on Springback of High Strength TA18 Tube NC Bending [D]. Xi' an: Northwestern Polytechnical University,2011.
- [18] LOU Hua-zhou, STELSON Kim A. Three-Dimensional Tube Geometry Control for Rotary Draw Tube Bending, Part 2: Statistical Tube Tolerance Analysis and Adaptive Bend Correction [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123:266-271.

44