

高强度钢板热成形性预测研究进展

刘文权, 盈亮, 荣海, 胡平

(大连理工大学运载工程与力学学部, 辽宁大连 116024)

摘要:高强度钢板热冲压成形是实现车身轻量化、保证安全性的重要途径,近年来得到汽车和钢铁工业的广泛关注与应用。由于高温工况的引入,高强度钢板的力学行为表现出明显的应变率和温度相关性,为准确评价板料的热成形性带来了挑战。概述了热冲压技术的工艺特点,从热成形极限实验和理论预测两方面展开讨论,介绍了国内外学者的相关研究工作,分析了应变成形极限方法存在的不足,引出了基于损伤力学理论的板材成形性评价方法,分别介绍了连续介质损伤和细观损伤理论在板材成形性方面的若干研究,以及材料损伤参数的识别方法。结合热冲压技术的工艺特点,指出热冲压高强度钢的损伤研究应采用实验、理论及数值仿真相结合的方式,并充分考虑温度、加载速率以及应力状态对损伤演化的影响。本研究可为完善损伤理论在金属板材热冲压中的应用提供借鉴。

关键词:损伤力学;热冲压;高强度钢;热成形性;参数识别

中图分类号:TG306 **文献标志码:**A

Research progress of the prediction method for thermal formability of high strength steel

LIU Wenquan, YING Liang, RONG Hai, HU Ping

(Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Hot stamping of high strength steel is an approach to achieve the lightweight of auto-body and guarantee the security of automobile simultaneously, and it has been widely used in the automobile and steel industry in recent years. Due to the high temperature process, the mechanical behaviors of high strength steel are strongly dependent on the deformation temperature and strain rate, which presents a challenge to evaluate the thermal formability accurately. On the basis of the review of the process characteristics of hot stamping, the experimental and theoretical predicted research on the thermal forming limit diagram (FLD) published by overseas and domestic scholars is analyzed. The deficiencies of FLD are discussed, then the evaluation methods for formability based damage mechanics are introduced, which include the continuum damage mechanics and mesoscopic damage mechanics. The calibration methods for damage parameter are also discussed. Finally, some suggestions are given: to accurately study the damage evolution of high strength steel in hot stamping, the influence of deformation temperature, strain rate and stress state must be fully considered. To achieve this, the method combined experiment, theory and

收稿日期:2017-12-20;修回日期:2018-01-02;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51705065);中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16RC(4)28, DUT17JC38)

第一作者简介:刘文权(1989—),男,天津人,博士,主要从事高强度钢板热冲压成形材料高温成形性方面的研究。

通信作者:盈亮讲师,博士。E-mail:yingliang@dlut.edu.cn

刘文权,盈亮,荣海,等.高强度钢板热成形性预测研究进展[J].河北科技大学学报,2018,39(2):91-98.

LIU Wenquan, YING Liang, RONG Hai, et al. Research progress of the prediction method for thermal formability of high strength steel [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(2): 91-98.

numerical simulation must be adopted based on the technological characteristics of the hot stamping technology. This work can provide a reference for the improvement of damage theory in hot stamping of sheet metal, and the related research results can be used to guide process optimization of actual hot stamping, which can effectively shorten the development cycle of new products.

Keywords: damage mechanics; hot stamping; high strength steel; thermal formability; parameter calibration

轻量化是实现汽车节能减排的重要途径。相较于车身结构件的优化减重,高强度材料的应用将得到更加显著的减重收益,同时也可保证整车的碰撞安全性。高强度钢板具有极高的比强度,价格远低于铝镁等轻质合金,因此,在未来很长一段时间内,高强度钢板都将在汽车轻量化方面得到广泛应用^[1]。

热冲压是将传统金属热处理和冷成形相结合的先进制造技术,可有效解决高强度钢板常温成形回弹大、易破裂、模具磨损严重、压机吨位要求高等问题^[2]。热冲压技术的一般流程如图1所示。首先,将板材加热至 900 °C 以上并进行充分保温,以实现板材微观为均匀的奥氏体组织;然后将红热板料快速转运至水冷模具,进行冲压成形并保压淬火;最后进行切边等后续处理。热成形零部件的抗拉强度可达 1 500 MPa 以上,同时具有回弹小、尺寸精度高等优点^[3-4]。目前,国内外学者针对高强度钢板热冲压的技术特点,在高温材料力学性能,板材与模具间的接触换热、摩擦,成形工艺优化以及板料微观组织相变预测等方面开展了大量研究^[5-11]。

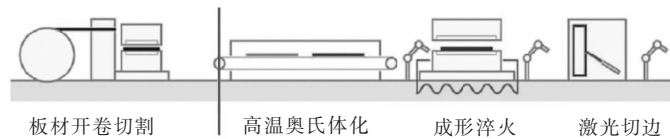


图1 热冲压技术一般流程

Fig.1 General process of hot stamping technology

在金属板料塑性成形过程中,材料内部会伴随着损伤的演化发展,而不合理的成形工艺将造成材料损伤行为的加剧演化,导致板材的开裂破坏^[12]。传统的试错方法是通过不断调整成形工艺、更改模具尺寸等方式,对上述问题予以解决。然而,该方法必将耗费大量的人力、物力,同时延长生产周期。有限元仿真技术的发展使得工程师可以对成形过程进行仿真预测,进而选取适当的准则对板材的成形性进行评价,以优化成形工艺,缩短研发周期。板材的成形极限是指在一定的变形条件下材料所能允许的不发生破裂的最大塑性变形程度。在此概念下提出的成形极限图 FLD(forming limit diagram)^[13-14]被广泛应用于评定板材成形中的集中性失稳和危险点位置的确定,在优化模具设计、控制产品质量等方面发挥了重要的指导作用。

然而,应变成形极限图一般由线性或近似线性路径的胀形实验获得。在实际的成形过程中,板材的变形路径并非线性;进一步的研究表明,应变成形极限具有显著的变形路径相关性,这均给应变成形极限图的应用带来了挑战^[15-16]。同时,热冲压是一个温度连续变化的过程,高强度板材的成形性能不仅受应变大小和路径的影响,而且将强烈依赖于温度、应变率以及成形工艺窗口等多因素的选择。因此,简单地将传统成形极限方法应用于热冲压板材成形性研究是不可取的。本文将对国内外学者在热冲压成形性方面的研究进行综述,包括成形极限理论和实验方法的研究以及损伤理论在板材成形性研究中的应用,以期对热冲压高强度钢板,乃至镁铝合金的成形性研究提供借鉴意义。

1 基于实验的高强度钢板热成形极限研究

常温成形极限可通过曲面法和平面法 2 种方式获得^[17-18],其中以 NAKAZIMA 等^[17]提出的半球形凸模胀形实验应用最为广泛。热成形极限实验研究可为理论的发展提供数据支撑,同时实验结果对热冲压工艺优化具有一定的指导意义。然而,高温工况的引入也为实验的开展带来了若干困难。

材料的高温应力-应变关系是热冲压数值仿真所需的重要数据,同时其流变特性也可作为评价板材成形

性的重要依据。MERKLEIN 等^[7]采用 Gleeble1500 热-力模拟实验机,根据实际热冲压的工艺特点,对 22MnB5 在不同温度和应变率下的热力学性能进行了比较系统的研究,证实温度和应变率对 22MnB5 的力学行为有很大的影响。意大利帕多瓦大学的 TURETTA 等^[19]采用 Gleeble3800 实验机对硼钢 22MnB5 的奥氏体化温度、保温时间以及高温流变行为进行了分析。同时,为研究高温板材的成形性开发了能模拟实际热冲压工艺的成形极限设备。该套设备根据 NAKAZIMA 测试原理,采用加热棒对凸模、凹模以及压边圈进行加热,以实现不同的测试工况;采用感应线圈实现对板材的均匀加热和保温;采用红外热像仪对板材温度进行实时监控;同时,该套设备集成了光学应变采集系统,可对板材在胀形过程中的应变进行采集分析。利用该套设备,BARIANI 等^[20]测取了奥氏体态 22MnB5 在 600 °C 下的成形极限曲线。GEORGIADIS 等^[21]对 22MnB5 薄板(0.50, 0.80, 1.25 mm)的热成形性进行了研究,分析了等温、非等温成形以及厚度变化对板材成形极限的影响。MIN 等^[22]采用电阻炉对板材进行加热保温,进而转运至放有隔热石棉的模具上,近似实现了 800 °C 下 22MnB5 的胀形实验,而极限应变则通过板材断裂处附近椭圆网格的长短轴计算获得。采用同样的方式,LI 等^[23]研究了不同成形温度、板材厚度对成形极限的影响。为保证胀形过程中板材温度的均匀性以及开展更高温度的实验测试,SHI 等^[24]开发了钟罩式加热的成形极限测试装备,并进行了大量实验研究,考虑热冲压板材温度连续变化的特点,首次提出了三维热成形极限曲面 TFLD (Thermal-FLD)的概念,并作为断裂准则引入到自主开发的 KMAS/HF 热冲压成形分析模块,实现了热成形温度区间内板材成形性的评价,如图 2 所示。CUI 等^[25]进一步发展了上述概念,将温度范围扩大到了室温至 800 °C,并应用于实际 B 柱板材的热冲压仿真预测。

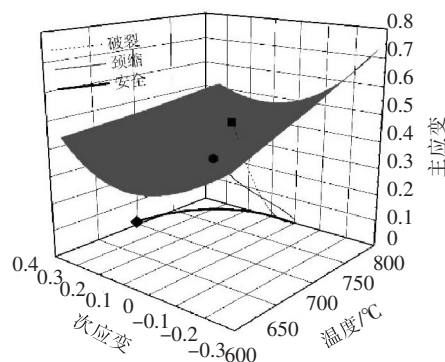


图 2 高强度钢 22MnB5 三维热成形极限 TFLD

Fig.2 Three-dimensional TFLD for 22MnB5 high strength steel

2 基于失稳理论和断裂准则的高强度钢板热成形极限研究

在成形极限理论预测方面,现有研究多采用韧性断裂准则和失稳理论 2 种方式,并结合材料特性和成形工艺进行适当修正。

LI 等^[23]基于 Oh's 韧性断裂准则和 Logan-Hosford 屈服函数对 22MnB5 不同厚度板材在 800 °C 下的成形极限进行了预测并与实验做了对比分析;而在 600 °C 和 700 °C 下,红热板材在胀形过程中出现了奥氏体向铁素体的转变,因此 LI 等采用的理论模型并不能对以上两种温度成形极限进行准确预测。LEE 等^[26]对 Cockcroft 准则进行了修正,使其能考虑应变路径的影响,进而结合改进的高温拉伸实验预测了 22MnB5 在不同温度和应变率下的成形极限图;其中,通过高温拉伸实验仅可获得 FLD 的左半部分,因此,该理论方法对右半部分预测的可靠性仍需进一步验证。MIN 等^[22]基于尖点理论和 Logan-Hosford 屈服函数建立了相应的热成形极限预测方法与实验结果进行了对比分析。研究表明,屈服函数的阶次对 FLD 右半部分影响显著。LI 等^[27]采用 M-K 凹槽模型对 22MnB5 的热成形极限进行了预测,并对比了 N-H 和 M-R 两种硬化法则对预测结果的影响。SHI 等^[28]对比了 4 种韧性断裂准则对 22MnB5 热成形极限预测结果的影响。与 LI 等^[23]的预测结果相似,每一种断裂准则预测的 FLD 均呈现主应变随着次应变增大而减小的趋势。其中,Oh's 准则与实验结果更为接近。

采用断裂准则和传统失稳理论进行的成形极限预测不能考虑材料内部的损伤演化;另一方面,为解决应变成形极限路径相关性而提出的应力成形极限图 FLSD(forming limit stress diagram),其计算过程比较繁琐,而预测结果很大程度上依赖于本构关系的选择。目前,有研究表明,应力成形极限在某些变形状态下也将表现出路径相关性^[29]。

3 基于损伤理论的板材成形性研究

3.1 基于连续介质损伤理论的板材成形性研究

金属板材的韧性断裂可归结于材料内部孔洞损伤的形核、长大、聚合。因此,采用损伤理论对材料的成形性进行研究,能对其断裂机理进行更加深入的解析。

在金属板材成形研究领域,相关学者基于连续介质损伤 CDM (continuum damage mechanics) 理论已开展了部分工作^[30-32]。HADDAG 等^[33]采用 CDM 方法描述了板材塑性变形过程中的应变局部化现象,并分别结合 AFS 和 TEODOSIU 硬化模型预测了低碳钢的成形极限。BARIANI 等^[34]基于经典的 LEMAITRE 连续介质损伤模型对热冲压钢 USIBOR1500 的断裂行为进行了研究:采用软件 Forge2008 对近似 570 °C 下 USIBOR1500 钢板的 NAKAZIMA 胀形过程进行数值模拟,其预测的板材断裂位置与实验结果具有较高的一致性。盈亮等^[35]基于 LEMAITRE 连续损伤模型建立了耦合损伤的热弹塑性本构方程,通过热拉伸实验和优化计算,确定了 22MnB5 不同温度、应变率下的损伤参数,并对某车身 B 柱的热冲压过程进行了数值模拟。唐炳涛^[36]推导了考虑有效应力和等效塑性应变对损伤影响的 LEMAITRE 韧性损伤演化方程,建立了耦合连续体损伤理论的 22MnB5 成形极限预测方法。基于连续介质损伤理论,LIN 等^[37]建立了一套新的耦合损伤统一粘塑性本构方程,并将其应用于铝合金 5754 热成形极限的预测研究。参考 LIN 的工作,周靖^[38]和庄蔚敏等^[39]分别针对高强度钢 22MnB5 及铝合金 7075 构建了基于位错密度的耦合损伤统一粘塑性本构方程组,通过数值积分及优化算法对材料的损伤参数进行了确定,并进一步实现了对所研究材料在不同温度及应变率下成形极限的预测。

然而,上述研究仍存在一些共性问题:首先,CDM 损伤本构方程单纯引入标量、矢量或张量进行损伤形式的假设性描述。由于很难准确测定高温成形过程的真实临界损伤因子,现有研究中作为断裂判定依据的临界损伤因子的选取具有很大的随意性,无法证实其真实性;其次,板料变形过程中发生的延性损伤对微观结构的变化十分敏感,无法结合损伤的物理意义表征材料内部微观结构的非线性变化。上述问题使得基于 CDM 理论的板材成形性研究仍需进一步完善。

3.2 基于细观损伤理论的板材成形性研究

细观损伤力学是金属损伤理论的另一个主要研究体系。将细观损伤的概念带入到宏观弹塑性断裂问题的研究中,可全面认识材料损伤演化到宏观微裂纹产生这样一个内在关联的复杂变形过程。

基于有限大基体中包含微孔洞的胞模型,GURSON^[40]于 1977 年首次建立了多孔损伤塑性势模型,后续学者在该模型的基础上进行了大量的研究与应用。原始 GURSON 模型仅考虑了孔洞的长大过程,未包括孔洞形核、孔洞间的相互作用以及孔洞聚合等因素对材料力学性能的影响。针对上述问题,TVERGAARD 和 NEEDLEMAN 及其合作者开展了大量的研究^[41-46]。目前,学者将由 GURSON 提出,经 TVERGAARD 和 NEEDLEMAN 修正的损伤模型称之为 GTN 模型。ABBASI 等^[46]采用 GTN 细观损伤模型成功地开展了 IF 钢激光拼焊板的成形极限预测研究。陈志英^[47]推导了考虑塑性各向异性的 Hill'48-GTN 和 Barlat'89-GTN 细观损伤模型,并将临界孔洞体积分数作为失稳判据应用于 AA5052 铝合金圆杯形拉伸件的成形性预测。HE 等^[48]通过开展铝合金 5052 原位拉伸实验并结合数值仿真,对平面应力状态下考虑各向异性修正 GTN 模型的损伤参数进行了识别;进一步通过对 NAKAZIMA 实验的有限元仿真,建立了铝合金 5052 的应力成形极限图 FLSD。WANG 等^[49]采用幂律硬化法则同时结合 GTN 模型对镁合金的损伤参数进行了识别并应用于镁合金板材的温成形仿真预测。GENEY 等^[50]采用 GTN 模型对两种奥氏体不锈钢在室温和 280 °C 下的断裂行为进行了仿真研究,结果表明:除初始孔洞体积分数外,其他损伤相关参数均与温度有关。TINET 等^[51]通过高温拉伸实验对 AISI303 不锈钢的损伤演化机理进行分析,证实了 GTN 模型中临界孔洞体积分数和失效孔洞体积分数的物理意义。其中,临界孔洞体积分数依赖于变形温度、应力三轴度、外部载荷与轧制方向间的角度。刘文权等^[52-53]分别对高强钢 22MnB5 胀形热成形实验和铝合金 7075-T6 的深冲盒热成形实验进行考虑损伤的仿真研究,验证了 GTN 损伤模型在热成形数值研究中的适用性,但其忽视了应变率对材料损伤演化的影响。此外,国内外学者通过直接对损伤模型本身进行修正或通过添加新损伤变量的方式,对 GURSON 损伤模型不能准确预测低应力三轴度下材料的断裂问题进

行了若干研究^[54-58]。综上,细观损伤模型通过引入现象学参数考虑了材料孔洞演化对本构关系的影响,且具有与材料变形历史、应力状态相关的特点,使得 GTN 类损伤模型在板材成形仿真中的应用具有很大潜力。因此,全面开展热-力耦合条件下考虑细观损伤的板材热冲压成形性能预测研究将是一个重要的发展方向。

3.3 材料损伤识别研究进展

损伤参数的准确识别是板材成形性仿真可靠性的重要保障,而针对考虑损伤影响的高强度钢板热冲压研究来讲,其准确性还依赖于对温度、应变率影响下材料内部损伤的合理描述。

损伤参数识别的主要方法为代表性体积单元法、显微观测法和参数反分析法。SIRINAKORN 等^[59]采用代表性体积单元的方法,考虑了晶界的影响,确定了双相(DP)钢的损伤参数。HE 等^[48]基于显微法确定了铝合金 5052-O1 的损伤参数。YAN 等^[60]利用显微图像的方法确定了某硅钢薄板的损伤特征参数并对冷轧硅钢薄板的边裂问题进行了仿真研究。上述研究需开展材料的单向拉伸实验并结合显微观测,然而热-力耦合的高温拉伸实验工况复杂,材料的微观结构也会随着温度的改变而发生变化。因此,上述以机理分析和显微观测为基础的参数识别方法难以满足热成形过程的损伤参数识别需求。另一方面,通过显微观测直接获得的孔洞体积分数与损伤模型中的参数值存在一定差异^[47,61]。目前,依靠参数反分析方法可以很好地解决多目标约束条件下宏、微观耦合本构关系中损伤参数的求解问题。在应用与实验相同的边值和初值条件下,损伤参数可以通过优化技术使得物理量的计算值和真实值(实验值)差值的某一范数最小加以确定。孙彩凤等^[62]基于幂指数材料硬化模型和二阶响应面法,利用硬化参数建立误差评价函数,实现了 DP780 钢的损伤参数测定。ABBASSI 等^[63]采用 3 层 ANN 结构和反向传播算法确定了 304 不锈钢的 GTN 损伤参数,随后进行了椭圆和埃里克森杯突实验的有限元分析,仿真与实验结果具有高度的一致性。TANG 等^[32]基于最小二乘原理构建目标函数,用以评价实验与仿真结果间的差别,进一步采用遗传算法对模型参数进行优化以获取最小的目标函数值,得到了修正的 LEMAITRE 损伤模型参数。刘文权等^[52]根据中心复合实验设计进行高温单向拉伸的数值模拟,进而构建响应曲面模型并采用遗传算法对参数进行求解,获得了热成形高强度钢的细观损伤特征参数。可见,针对不同的问题而采用对应的反分析方法来获取材料损伤参数是可取的。因此,通过构建适当的目标函数,结合数值反算、金相显微观察及合适的优化策略,综合测定各损伤特征参数并描述其演化过程,是开展热成形高温损伤演化机理研究的重要桥梁和途径。

4 结 语

金属板材成形极限是冲压领域国内外学者关注的热点问题,对成形性的准确评价可最大限度发挥材料的使用价值。随着实验手段、理论研究以及计算机辅助技术的发展,若干成形极限预测方法被提出。对于高强度钢板热冲压技术来讲,材料的成形性不仅取决于变形状态,而且强烈依赖于成形温度、应变率以及成形工艺的选择。上述因素给基于应变的成形极限图的应用带来了挑战。尽管有学者对高强度钢板在不同温度下的成形极限进行了实验及理论预测研究,但其仍不完全符合热冲压板料温度连续变化的特点;另一方面,应变路径相关性的短板也限制了应变成形极限图的应用范围。金属板材的韧性断裂可归因于材料内部孔洞损伤的演化,这为板材的成形性研究提供了思路。针对热冲压技术的工艺特点,在今后的研究中,可结合先进的实验观测手段对材料在不同温度(恒温、变温)、不同应力状态和不同加载速率等工况下的微观缺陷进行观测,分析损伤演化规律,进而实现对损伤理论模型的完善。通过建立精确的有限元模型,并开发耦合损伤的本构积分算法,实现对热冲压板材成形性的有效预测。上述工作可为实际热冲压工艺的优化提供指导并促进损伤理论在新材料、新工艺中的发展。

参考文献/References:

- [1] 张强,刘家鹏,邱肖盼,等. 预合金化处理对 22MnB5 热成型钢镀层组织成分的影响[J]. 河北科技大学学报,2017, 38(3): 291-297.
ZHANG Qiang, LIU Jiapeng, QIU Xiaopan, et al. Influence of pre-alloying process on microstructure and components of 22MnB5 hot stamping steel coating[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2017, 38(3): 291-297.

- [2] HU Ping, YING Liang, HE Bin. Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body[M]. Singapore: Springer, 2017.
- [3] KARBASIAN H, TEKKAYA A E. A review on hot stamping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2103-2118.
- [4] 胡平,马宁. 高强度钢板热成形技术及力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(3): 310-334.
HU Ping, MA Ning. Development of hot forming technology for ultra high strength steel and its mechanical problem[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(3): 310-334.
- [5] MERKLEIN M, LECHLER J, GEIGER M. Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 229-232.
- [6] GEIGER M, MERKLEIN M, LECHLER J. Determination of tribological conditions within hot stamping[J]. Production Engineering, 2008, 2(3): 269-276.
- [7] MERKLEIN M, LECHLER J. Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1/2/3): 452-455.
- [8] GHIOTTI A, BRUSCHI S, BORSETTO F. Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1694-1700.
- [9] HU Ping, HE Bin, YING Liang. Numerical investigation on cooling performance of hot stamping tool with various channel designs[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 338-351.
- [10] 马宁,胡平,闫康康,等. 高强度硼钢热成形技术研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 68-72.
MA Ning, HU Ping, YAN Kangkang, et al. Research on boron steel for hot forming and its application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 68-72.
- [11] LI N, SUN C Y, GUO N, et al. Experimental investigation of boron steel at hot stamping conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 228: 2-10.
- [12] LIN J, LIU Y, DEAN T A. A review on damage mechanisms, models and calibration methods under various deformation conditions[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 14(4): 299-319.
- [13] KEELER S P, BACKOFEN W A. Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches[J]. Asm Trans Q, 1963, 56(1): 25-48.
- [14] GOODWIN G M. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop[R].[S.l.]:SAE, 1968.
- [15] KLEEMOLA H J, PELKKIKANGAS M T. Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel, copper and brass[J]. Sheet Metal Ind, 1977, 63(6): 591-596.
- [16] GRAF A, HOSFORD W. The influence of strain-path changes on forming limit diagrams of Al 6111 T4[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1994, 36(10): 897-910.
- [17] NAKAZIMA K, KIKUMA T, HASUKA K. Study on the Formability of Steel Sheets[R].[S.l.]: Yawata, 1968.
- [18] MARCINIAK Z, KUCZYNSKI K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1967, 9(9): 609-620.
- [19] TURETTA A, BRUSCHI S, GHIOTTI A. Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1/2/3): 396-400.
- [20] BARIANI P F, BRUSCHI S, GHIOTTI A, et al. Testing formability in the hot stamping of HSS[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 265-268.
- [21] GEORGIADIS G, TEKKAYA A E, WEIGERT P, et al. Formability analysis of thin press hardening steel sheets under isothermal and non-isothermal conditions[J]. International Journal of Material Forming, 2017, 10(3): 405-419.
- [22] MIN J, LIN J, LI J, et al. Investigation on hot forming limits of high strength steel 22MnB5[J]. Computational Materials Science, 2010, 49(2): 326-332.
- [23] LI F F, FU M W, LIN J P, et al. Experimental and theoretical study on the hot forming limit of 22MnB5 steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1): 297-306.
- [24] SHI D Y, YING L, HU P, et al. Experimental and numerical determination of thermal forming limit diagrams (TFLD) of high strength steel 22MnB5[C]//AIP Conference Proceedings.[S.l.]:[s.n.], 2013:406-413.
- [25] CUI J J, SUN G Y, XU J R, et al. A method to evaluate the formability of high-strength steel in hot stamping[J]. Materials & Design, 2015, 77: 95-109.
- [26] LEE R S, LIN Y K, CHIEN T W. Experimental and theoretical studies on formability of 22MnB5 at elevated temperatures by Gleeble simulator[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 1682-1688.
- [27] LI H Z, WU X, LI G Y. Prediction of forming limit diagrams for 22MnB5 in hot stamping process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(8): 2131-2140.

- [28] SHI D Y, HU P, YING L. Comparative study of ductile fracture prediction of 22MnB5 steel in hot stamping process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 84(5/6/7/8): 895-906.
- [29] YOSHIDA K, KUWABARA T. Effect of strain hardening behavior on forming limit stresses of steel tube subjected to nonproportional loading paths[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(7): 1260-1284.
- [30] BONORA N, MILELLA P P. Constitutive modeling for ductile metals behavior incorporating strain rate, temperature and damage mechanics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1):53-64.
- [31] HU P, SHI D Y, YING L, et al. The finite element analysis of ductile damage during hot stamping of 22MnB5 steel[J]. *Materials and Design*, 2015, 69:141-152.
- [32] TANG B T, BRUSCHI S, GHIOTTI A, et al. An improved damage evolution model to predict fracture of steel sheet at elevated temperature[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 228: 76-87.
- [33] HADDAG B, ABED-MERAIM F, BALAN T. Strain localization analysis using a large deformation anisotropic elastic-plastic model coupled with damage[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(10): 1970-1996.
- [34] BARIANI P F, BRUSCHI S, GHIOTTI A. Advances in predicting damage evolution and fracture occurrence in metal forming operations [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(4): 495-500.
- [35] 盈亮,史栋勇,胡平,等. 基于连续介质损伤力学的高强度钢板热成形性数值预测[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(4): 36-44.
YING Liang, SHI Dongyong, HU Ping, et al. Numerical prediction of the formability during hot forming of high strength steel based on continuum damage mechanics[J].*Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(4):36-44.
- [36] 唐炳涛. 基于连续体损伤理论的硼钢高温成形极限确定法[J]. *力学学报*, 2016, 48(1): 146-153.
TANG Bingtao. Prediction of forming limit of boron steel at elevated temperature based on CDM theory[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(1): 146-153.
- [37] LIN J G, MOHAMED M, BALINT D, et al. The development of continuum damage mechanics-based theories for predicting forming limit diagrams for hot stamping applications[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2014, 23(5): 684-701.
- [38] 周靖. 硼钢热冲压热模拟实验与损伤演化建模仿真研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
ZHOU Jing. Study on Hot Stamping and Damage Evolution of Boron Steel by Thermal Simulating Experiment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [39] 庄蔚敏,曹德闯,叶辉. 基于连续介质损伤力学预测 7075 铝合金热冲压成形极限图[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(2): 409-414.
ZHUANG Weimin, CAO Dechuang, YE Hui. Prediction of FLD for AA7075 under hot stamping based on continuum damage mechanics [J].*Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(2): 409-414.
- [40] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth(Part I: Yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 1977, 99(1): 2-15.
- [41] CHU C C, NEEDLEMAN A. Void nucleation effects in biaxially stretched sheets[J]. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 1980, 102(3): 249-256.
- [42] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. An analysis of the temperature and rate dependence of Charpy V-notch energies for a high nitrogen steel[J]. *International Journal of Fracture*, 1988, 37(3): 197-215.
- [43] NEEDLEMAN A, TVERGAARD V. An analysis of dynamic, ductile crack growth in a double edge cracked specimen[J]. *International Journal of Fracture*, 1991, 49(1): 41-67.
- [44] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. *Acta Metallurgica*, 1984, 32(1): 157-169.
- [45] TVERGAARD V. Interaction of very small voids with larger voids[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1998, 35(30): 3989-4000.
- [46] ABBASI M, BAGHERI B, KETABCHI M, et al. Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 53(1): 368-376.
- [47] 陈志英. 冲压成形中破裂和回弹的细观损伤力学分析[D].上海:上海交通大学,2009.
CHEN Zhiying. Research on Fracture and Springback in Sheet Metal Forming Based on Mesoscopic Damage Mechanics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [48] HE M, LI F G, WANG Z G. Forming limit stress diagram prediction of aluminum alloy 5052 based on GTN model parameters determined by in situ tensile test[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(3): 378-386.
- [49] WANG R Z, CHEN Z H, LI Y J, et al. Failure analysis of AZ31 magnesium alloy sheets based on the extended GTN damage model[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2013, 20(12): 1198-1207.
- [50] GENEY C, DEGALLAIX-MOREUIL S, DESPLANQUES Y, et al. Study of ductile fracture of austenitic stainless steels by local approach[C]//ECF12. Sheffield:[s.n.], 1998:14-18.
- [51] TINET H, KLÖCKER H, LE COZE J. Damage analysis during hot deformation of a resulfurised stainless steel[J]. *Acta materialia*,

2004, 52(13): 3825-3842.

- [52] 刘文权, 盈亮, 王丹彤, 等. 热冲压成形过程细观损伤演化机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 31-39.
LIU Wenquan, YING Liang, WANG Dantong, et al. Investigation of mesoscopic damage evolution mechanism of high strength steel in hot stamping process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 31-39.
- [53] 盈亮, 刘文权, 王丹彤, 等. 7075-T6 铝合金温成形损伤演化实验与仿真[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1383-1390.
YING Liang, LIU Wenquan, WANG Dantong, et al. Experimental and simulation of damage evolution behavior for 7075-T6 aluminum alloy in warm forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1383-1390.
- [54] XUE L. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(11): 3343-3366.
- [55] NAHSHON K, HUTCHINSON J W. Modification of the Gurson model for shear failure[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2008, 27(1): 1-17.
- [56] ZHOU J, GAO X S, SOBOTKA J C, et al. On the extension of the Gurson-type porous plasticity models for prediction of ductile fracture under shear-dominated conditions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(18): 3273-3291.
- [57] JIANG W, LI Y Z, SU J. Modified GTN model for a broad range of stress states and application to ductile fracture[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2016, 57: 132-148.
- [58] MALCHER L, PIRES F M A, Sá J M A C D. An extended GTN model for ductile fracture under high and low stress triaxiality[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 54(2): 193-228.
- [59] SIRINAKORN T, WONGWISES S, UTHAISANGSUK V. A study of local deformation and damage of dual phase steel[J]. Materials & Design, 2014, 64(2): 729-742.
- [60] YAN Y X, SUN Q, CHEN J J, et al. The initiation and propagation of edge cracks of silicon steel during tandem cold rolling process based on the Gurson-Tvergaard-Needleman damage model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(4): 598-605.
- [61] CHHIBBER R, ARORA N, GUPTA S R, et al. Estimation of Gurson material parameters in bimetallic weldments for the nuclear reactor heat transport piping system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(12): 2331-2349.
- [62] 孙彩凤, 李迪, 赵连星, 等. 基于幂指数硬化模型的细观损伤参数标定方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 7-10.
SUN Caifeng, LI Di, ZHAO Lianxing, et al. Parameter calibration method for mesoscopic damage based on power exponent hardening model[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 37(2): 7-10.
- [63] ABBASSI F, BELHADJ T, MISTOU S, et al. Parameter identification of a mechanical ductile damage using artificial neural networks in sheet metal forming[J]. Materials & Design, 2013, 45: 605-615.