

基于蠕变理论与有限元仿真的轨道交通车辆 铝合金冲压件滞后回弹研究

张学广¹ 何广忠¹ 方斌¹ 崔琪¹ 邢丰琪² 王震²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司零部件分公司, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘要 滞后回弹是影响冲压件形状精度的关键因素。针对复杂工况下冲压件滞后回弹的预测与验证问题,提出了一种基于蠕变理论与有限元仿真方法。以轨道交通车辆司机室补强板为例,采用单轴拉伸试验测定了不同应力状态下 5083-O 铝合金材料的蠕变行为,并选用幂函数本构模型进行蠕变参数拟合;采用数值模拟手段分别建立了冲压成形、卸载回弹及滞后回弹的仿真模型,得到了不同阶段的应力演变及形状误差数据;开展了冲压件的成形试验,利用非接触式光学测量设备获取了冲压件静置 2 周后的滞后回弹量,并与理论结果和仿真结果进行对比。结果表明,仿真结果和试验结果中滞后回弹分布趋势一致,最大误差仅为 0.069 mm;冲压件的最大滞后回弹量为 0.32 mm,在实际生产中通过局部手工修磨即可满足焊装要求。

关键词 轨道交通车辆; 铝合金冲压件; 滞后回弹; 蠕变理论; 有限元仿真

中图分类号 U270.4⁺1; O343

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.02.007

Time-dependent Springback of Rail Transit Vehicle Al Stamping Parts Based on Creep Theory and FE Simulation

ZHANG Xueguang, HE Guangzhong, FANG Bin, CUI Qi, XING Fengqi, WANG Zhen

Abstract Time-dependent springback is a critical factor affecting the shape accuracy of stamping parts. Aiming at the time-dependent springback prediction and validation of stamping parts under complex working conditions, a method based on creep theory and FE simulation is proposed. Taking railway vehicle reinforcing plate as the research object, the uniaxial tensile test is conducted to obtain the creep behaviors of AL 5083-O under different stress conditions; then, the power function constitutive model is used to fit the creep parameters; finally, simulation models of stamp forming, instantaneous springback and time-dependent are built respectively by means of numerical simulation. As a result, the stress evolution and shape error

data in different stages are obtained. On this basis, the forming experiment is implemented. and the noncontact optical measuring equipment is used to measure the time-dependent springback in two weeks, the data are compared with simulation and theoretical results, This research shows that the time-dependent springback distribution trend is consistent with the simulation and the experiment, the maximum error between them is only 0.069 mm. The maximum time-dependent springback is 0.32 mm, that could meet the welding requirements with manual grinding in actual production process.

Key words rail transit vehicle; Al stamping parts; time-dependent springback; creep theory; FE simulation

First-author's address Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

轨道交通车辆冲压件的形状精度对于保证产品的寿命与安全具有至关重要的作用。随着轨道交通车辆速度等级的提升,对冲压件的产品质量提出了更高的要求:不仅要求冲压件具有较高的形状精度,也要求其形状精度具有长效的稳定性。

回弹是影响轨道交通车辆冲压件形状精度的主要因素,其形式一般分为两种:成形后由于去除约束导致冲压形状发生突变,称之为瞬时回弹;随着时间推移,冲压件发生缓慢的形状变化,称之为滞后回弹或二次回弹^[1]。现阶段,回弹是金属材料成形过程中不可避免的缺陷。在实际生产过程中,由于滞后回弹量相对较小,工装设计和工艺实施过程一般只考虑瞬时回弹导致的形状偏差,忽略了滞后回弹导致的形状偏差的进一步提升,从而影响了车辆的焊接和装配工序的实施。

轨道交通车辆制造行业中,滞后回弹效应对冲压件形状精度的影响尤为显著。一方面,轨道交通车辆小批量、订单化的生产特性,以及较慢的生产

节拍设计导致冲压件成形后无法立即流入下游工序;另一方面,轨道交通车辆中较多应用了铝合金等轻量化材料,其滞后回弹行为相较于传统的金属材料更为显著。

关于金属材料的滞后回弹行为,文献[2-5]认为,金属材料变形后,内部具有不稳定的残余应力,且残余应力随时间的推移逐渐释放,并驱动金属材料发生持续性的形变。然而上述研究结果大多是基于标准试样在拉伸、弯曲等简单试验过程中得到的数据,无法适用于分析实际产品件的滞后回弹;尤其是轨道交通车辆车体结构中的大型冲压件,具有设计形状复杂,成形后的残余应力较大且分布不均匀的特性。因此,针对复杂工况下实际产品的滞后回弹,至今仍缺乏有效预测与验证的手段。

本文以轨道交通车辆司机室补强板为例,基于蠕变理论与有限元仿真手段开展冲压件的滞后回弹研究。采用单轴拉伸试验获取了不同应力状态下5083-O铝合金材料的蠕变规律,并采用幂函数本构模型进行蠕变参数拟合;将该模型应用于滞后回弹仿真分析中,得到了冲压件静置2周后的滞后回弹量。开展了补强板的冲压成形试验,采用光学非接触式测量设备进行了试验件滞后回弹量的测定,试验结果和仿真结果基本吻合。本文的研究成果对于铝合金冲压件的形状误差预测与质量改进具有一定的指导意义。

1 铝合金材料的蠕变规律

大量的研究表明,金属材料的力学行为和应力、速度、温度等状态参数密切相关,且具有显著的时间依赖性,具备黏弹性特征^[6]。其中,蠕变理论是金属黏弹性力学理论的重要分支,是指金属材料在一定的预载状态下,随着时间而发生持续性的变形,其表象和滞后回弹行为相似^[7]。本文分别采用参数测量方式进行蠕变规律的测定与参数拟合,并将蠕变模型应用于冲压件滞后回弹有限元仿真分析中。

1.1 蠕变试验

本文研究中,冲压件材质为5083-O铝合金,其基本力学性能参数如表1所示。采用单轴拉伸蠕变试验方法测定5083-O铝合金材料的蠕变规律。试验过程参照GB/T 2039—2012《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》的规定执行。由于材料的蠕变效应和应力状态直接相关,试验中将材料设置为3组

不同的应力状态(σ_p 分别取 50 MPa、150 MPa、250 MPa),用以综合评估其蠕变效应。

表1 5083-O 铝合金材料的力学性能参数表
Tab.1 Mechanical parameters of Al 5083-O aluminum alloy material

$\rho/$ (g/cm^3)	$E/$ GPa	ν	$\sigma_0/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	n
2.73	70.4	0.31	146.7	324.7	0.198

注: ρ 为体积质量; E 为弹性模量; ν 为泊松比; σ_0 为屈服强度; σ_b 为抗拉强度; n 为硬化指数。

采用电子万能试验机在力控制模式下对冲压件进行特定载荷下的蠕变试验。对于原始标距 L_0 为 50 mm 的铝合金棒状拉伸试样,沿轴向施加指定拉力 $F(F = \sigma_p s_0, s_0$ 为试样截面积)。加载完成后,记录2周(1.21×10^7 s)内引伸计的蠕变伸长量 L_c ,并将该变量作为材料的滞后回弹量。不同应力状态下5083-O铝合金材料蠕变 ε_c ($\varepsilon_c = L_c/L_0$) 与时间的对应关系如图1所示。由图1可见,5083-O铝合金材料的蠕变主要集中在初始阶段,随后蠕变率迅速降低;在蠕变初始的8 600 s(2.38 h)内, ε_c 随时间快速增长(蠕变率 $\dot{\varepsilon}_c \geq 2 \times 10^{-7}$ Hz);在之后的 310^6 s(3.46 d)内, ε_c 随时间缓慢增长($\dot{\varepsilon}_c \approx 1 \times 10^{-10}$ Hz);此后蠕变以非常慢的速度持续增长,直至试验结束($\dot{\varepsilon}_c < 1 \times 10^{-13}$ Hz)。此外,随着试样应力状态的提升,蠕变量也随之增加。当试样预载应力为50 MPa、150 MPa、250 MPa时,试样在2周内的蠕变量分别为 6.72×10^{-5} 、 3.14×10^{-4} 、 8.12×10^{-4} 。

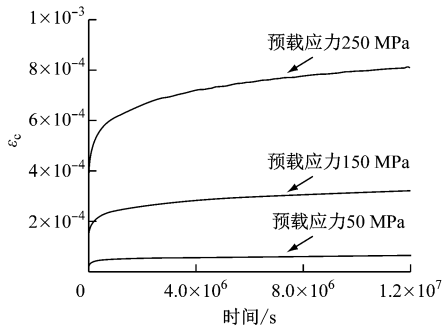


图1 5083-O 铝合金材料不同应力状态下的蠕变曲线
Fig.1 Creep curves of 5083-O aluminum alloy material under various stress conditions

综上可知,材料的内部应力是蠕变的主要驱动力,一方面,随着内应力的增加,材料蠕变驱动力增加,规定时间段内的蠕变也随之增加;另一方面,随

着蠕变过程的推移,材料内应力逐渐释放,蠕变的驱动力逐渐降低,蠕变也趋于平稳。

1.2 蠕变参数拟合

从图 1 可以看出,材料的蠕变随着时间的增长呈现明显的幂函数特征。因此,采用幂函数型蠕变本构模型进行蠕变参数拟合。 $\dot{\varepsilon}_c$ 可以表述为 σ_p 和时间 t 的函数:

$$\dot{\varepsilon}_c = A \sigma_p^n t^m \quad (1)$$

式中:

A 、 n 、 m ——材料参数。

对式(1)进行积分,可以得到蠕变与应力状态和时间的函数关系:

$$\varepsilon_c = \int_0^t \dot{\varepsilon}_c dt = \frac{A}{1+m} \sigma_p^n t^{m+1} \quad (2)$$

将图 1 中的曲线代入式(2)中进行拟合,得到 $m = -0.888$, $n = 2.27$, $A = 3.48 \times 10^{-11}$ 。则 5083-O 铝合金材料在不同应力状态下的滞后回弹随时间的演化规律可以表述为:

$$\varepsilon_c = 3.11 \times e^{-10} \times \sigma_p^{2.27} t^{0.112} \quad (3)$$

则由蠕变导致的滞后回弹 s_{dep} 可以表述为:

$$s_{\text{dep}} = L_c = \varepsilon_c L_0 \quad (4)$$

2 轨道交通车辆铝合金冲压件的滞后回弹仿真分析

2.1 研究对象

本文以某型轨道交通列车司机室补强板作为研究对象,其几何尺寸如图 2 所示。冲压件的制造工艺流程为下料—冲压成形—切边—整形。冲压现场为节拍制作业,冲压件的制造周期约为 0.6 h。激光切边和手工局部整形导致的形状变化可以忽略不计。整个工序完成后,对冲压件进行靠模检测,形状精度达标后冲压件流入下游焊装工序。焊装工序要求冲压件的形状误差控制在 1 mm 以内。滞后回弹导致的形状误差主要存在于冲压和焊装工序之间。

由于补强板拉延成形后应力状态复杂,且回弹过程中涉及应力场的动态演化,无法根据式(4)直接进行滞后回弹量的理论计算。本文将蠕变理论和有限元仿真手段相结合,获取成形后的补强板在指定时间段内由于滞后回弹导致的形状误差量。

在车体焊接工序中,冲压件形状精度不足会严重制约定位精度及焊缝可达性。因此,本文进行补强板滞后回弹分析及形状误差测定,重点考察补

强板和外蒙皮、窗框、横向补板、插接板等冲压件焊缝中心位置(见图 2 中 A、B、C、D、E)的形状精度。

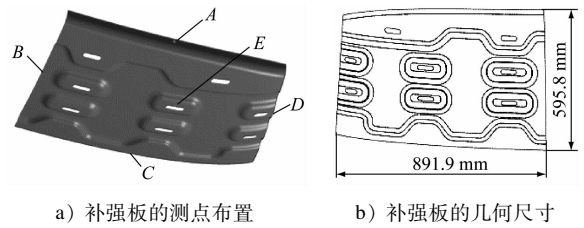


图 2 补强板的几何尺寸及测点布置

Fig. 2 Geometric dimension of reinforcing plate and measurement positions

2.2 补强板滞后回弹仿真模拟

采用有限元仿真软件 Abaqus 进行补强板滞后回弹模拟。详细流程如下:

步骤 1:考虑到冲压成形为典型的非线性、大变形动力学问题,采用动力显示算法(Explicit)进行补强板冲压成形分析。建模过程中采用壳单元对模具和板料进行简化,并采用 4 节点四边形单元 S4R 进行板料网格划分。考虑到冲压件的原始尺寸,建模中设定网格尺寸为 5 mm。仿真过程中模具和板料之间采用面接触方式,摩擦因数设定为 0.08,选用弹塑性本构模型描述补强板冲压成形的应力演化行为。

步骤 2:采用隐式算法(Standard)进行卸载回弹分析,并对导入冲压成形后的冲压件,进行局部节点约束,以获取卸载后冲压件的几何轮廓与应力数据。

步骤 3:采用黏弹性算法(Viscoelastic Algorithm)对冲压件静置 2 周后的滞后回弹进行分析。材料的本构关系设置为蠕变模型,其参数参照本文 1.2 节进行定义。建模过程中黏性分析步总时长为 1.21×10^7 s(等效时长为 2 周)。

冲压件的滞后回弹和内部应力状态密切相关,不同的仿真模型采用预定义场技术进行不同工序间冲压件应力场的传递,同时采用增强的沙漏控制技术保证计算的收敛性。

2.3 仿真结果分析

补强板冲压成形后的应力分布如图 3 所示。由图 3 可以看出,冲压件成形过程中其中心凹坑位置受到双向拉伸作用,使得材料流动困难,最大应力达到 311.9 MPa,局部应力梯度大于 5.9 MPa/mm,由此可见,冲压件内部的应力集中效应显著。

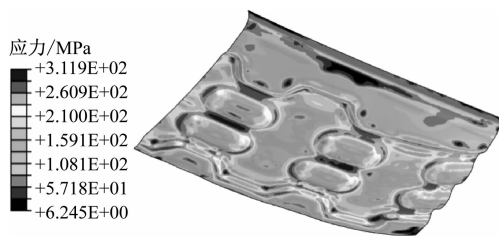


图3 补强板冲压成形后的应力分布

Fig. 3 Stress distribution of reinforcing plate after stamping

补强板卸载回弹后的应力分布如图4所示。由图4可以看出,去除模具约束后,冲压件内部发生了明显的应力释放;除凹坑边缘以外,其余部分的应力均下降至材料屈服应力以下;冲压件内部以残余的弹性应力为主,整体应力分布趋于均匀。

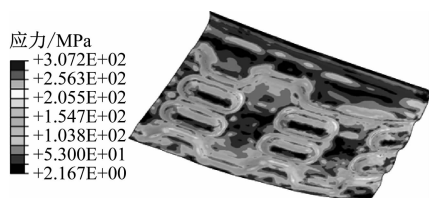


图4 补强板卸载回弹后的应力分布

Fig. 4 Stress distribution of reinforcing plate after instantaneous springback

补强板滞后回弹后的应力分布如图5所示。由图5可以看出,冲压件静置2周后,其应力分布相较于卸载后差别不显著。这是由于卸载回弹后冲压件以残余的弹性应力为主,难以克服塑性变形并进一步驱动滞后回弹行为。

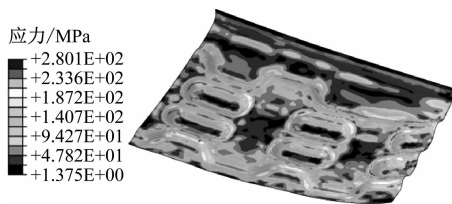


图5 补强板滞后回弹后的应力分布

Fig. 5 Stress distribution of reinforcing plate after time-dependent springback

从仿真结果中提取考察点位置的应力数值,并计算得到滞后回弹过程的应力释放量,如图6所示。由图6可以看出,受冲压件几何特征与冲压工艺影响,成形后中心部位E点的应力高于边缘部位;在卸载回弹过程中,应力瞬时自由释放,中心E点等高应力部位的应力释放更为显著,导致卸载后的应力水平低于边缘部位;滞后回弹仅由较小的残余应力驱动,且受到临近单元约束作用。由于边缘部位

的材料约束作用不显著,应力释放量普遍大于中心E处。

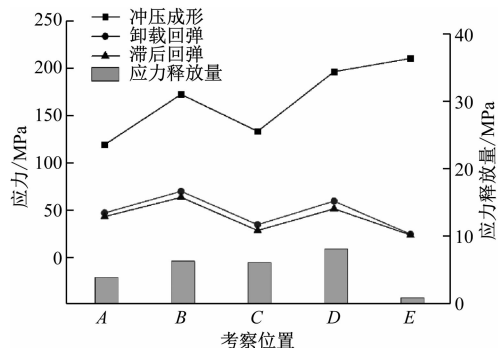


图6 补强板不同考察位置的应力对比

Fig. 6 Stress comparison of reinforcing plate at different inspection locations

3 试验验证

采用液压机进行冲压成形试验。利用 Creaform 300 型非接触式测量设备分别获取冲压件卸载后和静置2周后的点云数据。以卸载回弹后的点云数据为参考基准,对二者进行轮廓匹配,并输出偏离情况。图7反映了补强板静置2周后由滞后回弹效应导致的形状误差。则冲压件的形状误差 D_{err} 和 s_{dep} 之间的关系可以表述为:

$$D_{err} = s_{dep} \quad (5)$$

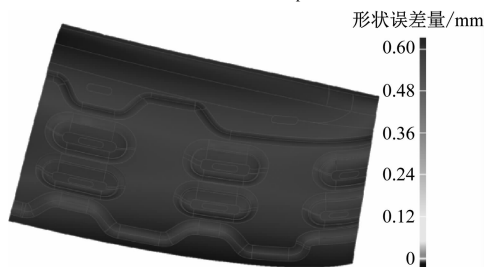


图7 补强板静置2周后的形状误差分布

Fig. 7 Shape error distribution of reinforcing plate after 2 weeks standing

考虑到补强板考察位置A点和B、C、D、E点不在同一个成形面内,在进行滞后回弹分析时,以A点作为基准。在有限元模型中对A点进行固定约束,并获取B、C、D、E点由滞后回弹导致的位移量。

从图7中提取补强板考察位置的滞后回弹量,并与仿真结果以及式(4)的计算结果进行对比。如图8所示,冲压件形状误差的计算结果、仿真结果及试验结果存在一定偏离。这是由于,计算结果单纯以卸载回弹后的应力状态作为依据,未考虑滞后回

弹过程中应力释放及动态平衡导致的驱动力的改变;其次,计算结果更适宜反映冲压件单一考察位置点由于滞后回弹引发的自由变形程度,而冲压件为三维空间结构,单一位置的形状改变会受到临近部位的约束;仿真和试验结果均采用以 A 点作为基准,而计算结果则无法反映基准位置对实际结果的影响,从而导致仿真结果、试验结果及计算结果中滞后回弹分布趋势不同。试验结果和仿真结果吻合性较好,但试验结果中的滞后回弹量大于仿真结果。试验过程中料件搬运等人工过程会导致额外的应力释放,从而加剧冲压件的形变。仿真结果和试验结果中考察点滞后回弹量的最大偏差为 0.069 mm,验证了蠕变理论与有限元仿真手段在滞后回弹预测方面的适用性与准确性。此外,由于冲压件冲压过程中整体塑性变形较为充分,冲压件静置 2 周后由滞后回弹引发的最大形状偏差仅为 0.32 mm,在实际生产中通过局部手工修磨手段即可满足焊装工序的实施要求。

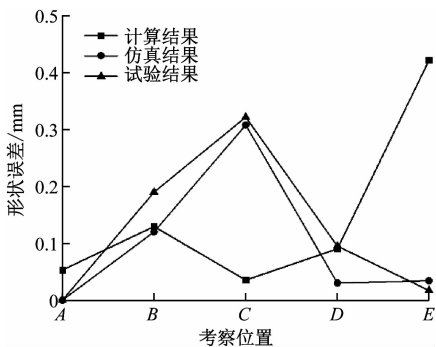


图8 不同考察点处的补强板形状误差对比

Fig. 8 Shape error comparison of reinforcing plate at different inspection locations

4 结论

1) 采用单轴拉伸试验方法测定了不同应力状态下 5083-O 铝合金材料的蠕变行为。结果表明,蠕变主要集中在成形后 2.38 h 内,且与冲压件应力状态成正比。

2) 采用幂函数本构模型进行了蠕变参数拟合,将该本构模型应用于有限元仿真模型中,获取了补

强板在冲压成形、卸载回弹和滞后回弹等阶段中应力随时间的演化情况。

3) 开展了司机室补强板的成形试验,采用光学测量设备获取了冲压件静置 2 周后的滞后回弹数据,并与计算结果和仿真结果进行对比。结果表明,仿真结果和试验结果相吻合,偏差控制在 0.069 mm 以内。

参考文献

- [1] 刘芳芳. 金属板材变形滞后回弹的试验研究及有限元分析[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
LIU Fangfang. Experimental study and finite element analysis on time-dependent springback of metal sheets under deforming[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [2] MA J, HA T, BLINDHEIM J, et al. Exploring the influence of pre/post-aging on springback in Al-Mg-Si alloy tube bending[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47:774.
- [3] 付泽, 鄂大辛. DP600 弯曲变形滞后回弹试验及有限元探究[J]. 精密成形工程, 2016(1): 59.
FU Ze, E Daxin. Time-dependent springback tests and the finite element exploration of DP600 after bending[J]. Journal of Nets-hap Forming Engineering, 2016(1): 59.
- [4] HAMA T, SAKAI T, FUJISAKI Y, et al. Time-dependent spring-back of a commercially pure titanium sheet[J]. Procedia Engineering, 2017(1): 1877.
- [5] 刘贺, 鄂大辛. 1Cr18 Ni9Ti 不锈钢管滞后回弹的黏弹塑性建模和有限元模拟[J]. 精密成形工程, 2015(6): 65.
LIU He, E Daxin. Modeling and finite-element simulation of time-dependent springback of 1Cr18 Ni9Ti stainless steel tubes based on elasto-viscoplasticity [J]. Journal of Netshap Forming Engineering, 2015(6): 65.
- [6] 胥福顺, 张劲, 邓运来, 等. 预拉伸对 2124 铝合金蠕变时效性同步的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017(1): 1.
XU Fushun, ZHANG Jin, DENG Yunlai, et al. Effect of pre-stretching on synchronization of shape and property in creep age forming of 2124 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2017(1): 1.
- [7] 尹旭妮, 湛利华, 赵俊. 2219 铝合金稳态蠕变本构方程的建立[J]. 中国有色金属学报, 2014(9): 2250.
YIN Xuni, ZHAN Lihua, ZHAO Jun. Establishment of steady creep constitutive equation of 2219 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014(9): 2250.

(收稿日期:2021-08-25)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821