高延伸率金属数值颈缩控制策略与失效模型开发

何志高 李婷 黄庆洋 朱瑞蝶 孔庆虎

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518000）

摘要：为解决高延伸率金属数值仿真中提前颈缩导致非线性大变形与断裂仿真精度不足，以及焊点热影响区失效行为预测偏差的问题，基于 Considère 失稳理论提出 SHS & 线性外推颈缩控制策略，通过多应力状态力学试验构建 DC03 母材莫尔-库仑准则(MMC)失效曲面，结合参数反求技术标定焊点热影响区广义增量应力状态相关损伤模型失效参数，并开展整车碰撞仿真验证。结果显示，DC03 材料数值颈缩应变延后 0.103，效率大幅提升；焊点失效仿真平均峰值误差为 3.3%；整车仿真可准确复现母材及焊点热影响区的变形与失效行为。该方案可实现颈缩点智能控制，显著提升整车碰撞仿真精度与结构性能边界预测准确性。

关键词：高延伸率金属 失效模型 硬化模型 HAZ

中图分类号：U465.1+1 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260239

Control Strategy and Failure Model Development of High Elongation Metal Necking Simulation

He Zhigao, Li Ting, Huang Qingyang, Zhu Ruidie, Kong Qinghu

(BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518000)

Abstract: To address the issues of insufficient simulation accuracy for nonlinear large deformation and fracture induced by premature necking in numerical simulations of high-elongation metals, as well as prediction deviations in the failure behavior of the spot weld heat-affected zone, an SHS & linear extrapolation necking control strategy is proposed based on Considère instability theory. The modified Mohr-Coulomb (MMC) failure surface for DC03 base metal is established via mechanical tests under multiple stress states. Combined with parameter inversion technology, the failure parameters of the generalized incremental stress-state-dependent damage model for the spot weld heat-affected zone are calibrated, and verification is conducted through full-vehicle crash simulations. The results show that the numerical necking strain of DC03 material is delayed by 0.103 with a substantial efficiency improvement; the average peak error of spot weld failure simulation reaches 3.3%; the full-vehicle simulation can accurately reproduce the deformation and failure behaviors of both the base metal and the spot weld heat-affected zone. This scheme enables intelligent control of necking points, and significantly improves the accuracy of full-vehicle crash simulation and the prediction precision of structural performance boundaries.

Key words: High elongation metal, Failure model, Hardening criteria, HAZ

1 前言

随着车辆安全法规的日趋严格以及新能源汽车轻量化的需求不断提升，汽车碰撞的工况日益复杂，单位质量所承受的冲击能量显著提升。有限元仿真因其高效、可重复的优势，已经从辅助验证转变为整车结构设计与安全性能评估的决定性手段。仿真材料模型作为有限元仿真技术的基石，其精度直接决定了仿真结果的可靠性。

对于常规钢材而言，目前已有十分成熟的开发方案，采用 Swift、Hockett-Sherby 以及二者的加

作者简介：何志高（1996—），男，工程师，硕士学位，研究方向为材料与结构动态力学行为。

参考文献引用格式：

何志高, 李婷, 黄庆洋, 等. 高延伸率金属数值颈缩控制策略与失效模型开发[J]. 汽车工艺与材料, 2026(10): 23-32.

HE Z G, LI T, HUANG Q Y, et al.Control Strategy and Failure Model Development of High Elongation Metal Necking Simulation[J]. Automobile Technology & Material, 2026(10): 23-32.

权混合模型(Swift-Hockett-Sherby,SHS)即可有效描述常规钢材的硬化行为[1-3]。其中,SHS模型由非饱和型的Swift硬化模型与饱和型的Hockett-Sherby硬化模型通过引入加权因数α($\alpha\in[0,1]$)组合而成,加权因数用于调节2种模型在总硬化响应中的贡献比例,当α取0.2~0.4时,SHS模型可同时准确描述材料颈缩前后的变形行为。但采用上述方法构建高延伸率金属材料本构曲线时,往往会导致构建的本构曲线导数衰减过快。这使得真实应力-应变曲线与其导数的交点(即数值颈缩点)远早于材料真实的物理颈缩点,导致仿真单元在并未达到真实断裂极限时就因力值断崖式下降而表现出"伪失效"。另一方面,白车身是由数以千计的电阻点焊连接而成的复杂薄壳装配体。焊接过程中的瞬态热循环会导致焊点周围产生明显的微观组织演变,形成力学性能极为复杂的热影响区(Heat Affected Zone,HAZ)[4-6]。在整车剧烈碰撞中,车身前围板等关键区域将承受拉伸、剪切、剥离等复杂应力状态的耦合加载。大量试验表明,高延伸率金属的焊点失效往往不发生在焊核内部,而是萌生于热影响区与母材的交界处,表现为典型的纽扣拔出断裂[7]。由于HAZ的物理尺度较小,传统的基于标准拉伸试样的宏观测试手段无法用于获取其材料性能参数。如果仿真模型仅考虑母材失效而忽略HAZ的局部弱化效应,将导致对车身结构撕裂行为的严重误判。

国内外学者为延迟数值颈缩已尝试多种数学手段:例如在SHS硬化曲线后段引入双曲正切(Hyperbolic Tangent,TANH)函数,虽然在一定程度上延后了数值颈缩的发生,但不可避免地带来了材料流变应力在极高应变下的陡增或失真,使材料模型偏离了真实的物理性能。针对焊点失效,广义增量应力状态相关损伤模型(Generalized Incremental Stress State dependent damage Model,GISSMO)凭借应力三轴度(平均应力与等效von Mises应力之比)和罗德角(Lode角,表征第三偏应力不变量的归一化参数,用于描述应力状态在偏平面上的位置)等应力状态变量,在金属断裂预测中表现出较高精度[8],但其材料参数的获取仍依赖宏观试验,缺乏针对HAZ尺度的系统化标定方案。

为解决现有方法在高延伸率下的"伪失效"现象,以及焊点热影响区失效预测的两大不足,本文提出了两项创新。首先,在传统SHS硬化模型的基础上,提出了一种线性外推策略,并建立了相应的数学模型。其次,针对焊点热影响区,利用十字拉伸、剪切拉伸和剥离试验,获取热影响区在不同应力状态下的失效力值,随后通过参数反求,逆向标定热影响区材料模型失效参数。

2 技术路线与研究方法

本研究旨在为高延伸率金属的大变形仿真及焊点断裂预测提供一套全流程解决方案。以典型高延伸率金属DC03为研究对象,提出了一套数值颈缩控制策略与高延伸率金属及其焊点热影响区GISSMO失效模型开发方法,技术路线如图1所示,具体内容如下:

a. 开展DC03单轴拉伸试验,提出了SHS&线性外推控制策略,以期在严格控制流变应力增长的前提下大幅延后数值颈缩点,用于构建DC03本构曲线。

b. 开展多应力状态力学试验,用于构建DC03母材修正莫尔-库仑准则(Modified Mohr-Coulomb,MMC)断裂失效曲面,表征DC03断裂失效行为。

c. 开展DC03焊点力学性能试验,结合参数反求技术,完成焊点热影响区材料失效参数标定。

d. 将DC03母材及其焊点热影响区GISSMO失效模型应用至整车碰撞仿真中,进行失效模型准确性验证。

3 数值仿真颈缩控制策略研究

为解决数值仿真中高延伸率金属易出现的"伪失效"现象,本节首先系统阐述了数值颈缩的机理,随后剖析主流硬化模型在高延伸率下的局限性,进而提出针对数值颈缩的控制策略并建立数学模型及求解策略。

3.1 数值颈缩原理

颈缩现象(necking)是指材料在拉伸过程中,

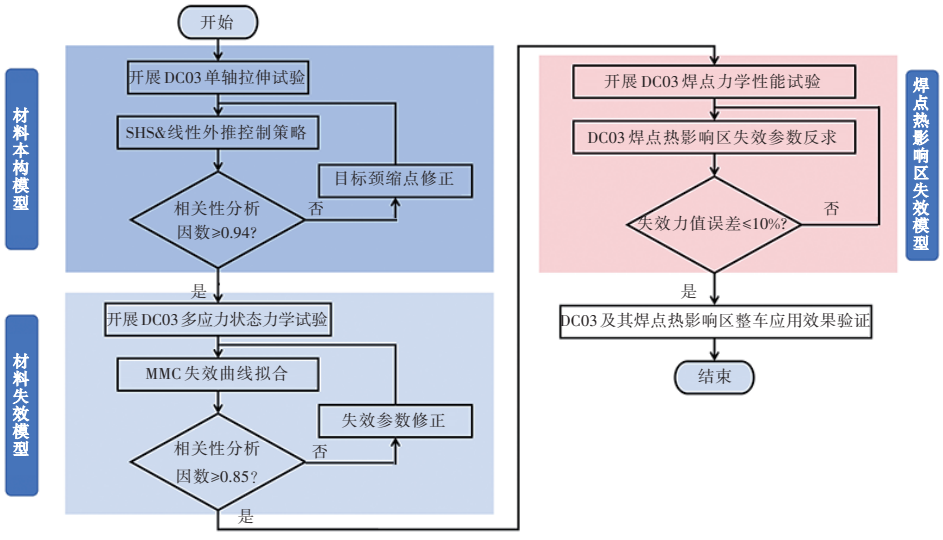


图1　高延伸率金属数值颈缩控制策略与失效模型开发技术路线

试样局部截面突然急剧缩小的物理现象,常见于延展性材料的单轴拉伸试验,与材料内部晶格剪切滑移的宏观表现密切相关[9]。数值颈缩原理则是一种通过数值模拟来预测和分析这种局部截面突然缩减现象的理论基础和计算方法。最经典的数值颈缩原理由 Considère 于 1885 年提出,适用于大多数弹塑性材料[10]。Considère 认为当施加力 F 达到临界失稳值后,试样失去承载能力,试样的力值增量为0,即:

$$\mathrm{d}F = 0 \tag{1}$$

根据材料力学可知,试样的应力状态可由以下公式进行表达:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \tag{2}$$

式中:σ_e 为工程应力,A_0 为初始面积。

$$\varepsilon_e = \frac{L - L_0}{L_0} \tag{3}$$

式中:ε_e 为工程应力,L_0 为初始标距,L 为瞬时长度。

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{4}$$

式中:σ_t 为真实应力,A 为瞬时面积。

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^{L} \frac{\mathrm{d}L}{L} \tag{5}$$

式中:ε_t 为真实应力。

引入体积不变假设 $A\cdot L = A_0\cdot L_0$,即:

$$A\cdot \mathrm{d}L + L\cdot \mathrm{d}A = 0 \tag{6}$$

整理式(1)~式(6),可得:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_t}{\mathrm{d}\varepsilon_t} = \sigma_t \tag{7}$$

由上式可得,数值颈缩点为真实应力应变曲线与其导数的交点(图2)。由此可见,材料的数值颈缩行为,由构建真实应力-应变曲线的硬化模型决定。

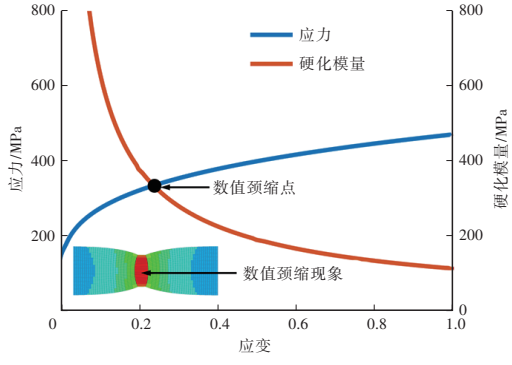


图2　数值颈缩点及数值颈缩现象

3.2　主流硬化模型

由 3.1 节可知,在有限元计算中,数值颈缩点由材料模型中的真实应力-应变曲线决定。由于拉伸试样在颈缩变形阶段,试件横截面积急剧变化,此时试件的应力状态由单向应力状态转变为三向应力状态,导致真实应力-应变曲线在抗拉强度之后的数据段无法表征材料在单向应力状态的硬化行为。因此,需要根据硬化模型对真实应力-应变曲线进行理论外推。主流的硬化模型有 Swift、Hockett-Sherby 以及二者的加权混合模型 Swift-Hockett-Sherby(SHS 准则)[1-3]。

Swift 硬化模型是一种非饱和性模型,其应力

随应变持续增长，理论公式为：

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \tag{8}$$

式中：ε_0 为屈服应变，ε_p 为塑性应变，K、n 为加工硬化因数。

Hockett-Sherby 是一种饱和性的硬化模型，外推应力最终趋于渐近线，其理论公式为：

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i)e^{-a\varepsilon_p^q} \tag{9}$$

式中：σ_{sat} 为饱和应力，σ_i 为初始屈服应力，ε_p 为塑性应变，a、q 为材料常数。

由于单一模型存在局限性，工程上通常引入权重因数 α，构建 Swift-Hockett-Sherby(SHS)加权混合硬化模型，其理论公式为：

$$\sigma = (1-\alpha)K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n + \alpha[\sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i)e^{-a\varepsilon_p^q}] \tag{10}$$

对于常规金属材料而言，单轴拉伸情况下颈缩点对应的工程应变一般不超过 0.3，通过选用上述 3 类硬化模型对颈缩点后的塑性硬化进行外推后即可准确描述材料的非线性变形行为。但对于高延伸率金属材料而言，例如延伸率普遍大于 40% 的 DC 系列材料，利用上述 SHS 混合硬化模型对其本构曲线进行硬化外推的效果如图 3 所示。

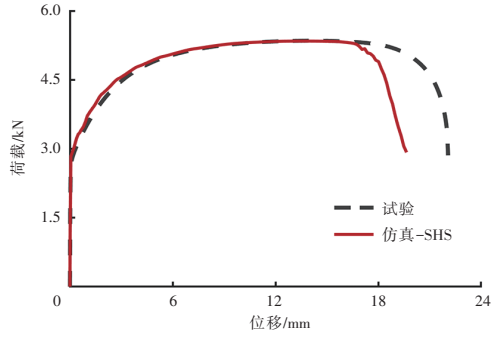


图 3 高延伸率金属 SHS 硬化模型仿真与试验对比

由图 3 可知，SHS 硬化模型所构建的数值颈缩点相较于实际的物理颈缩点偏早，仿真力值在数值颈缩发生后迅速下降，与试验现象严重不符。由此可知，当前主流硬化模型在用于高延伸率材料的硬化外推中存在显著不足，易导致数值颈缩提前，出现伪失效。

3.3 高延伸率金属材料仿真颈缩控制策略

由 3.2 节可知，主流硬化模型在用于高延伸率金属材料的硬化外推中存在显著不足，对材料的失效行为存在严重误判。解决这一问题的关键在于如何延后数值颈缩点，即延后真实应力-应变曲线与其导数的交点。工业中常采用双曲正切（Hyperbolic Tangent，TANH）函数对 SHS 外推后的本构曲线后段进行修正来延后数值颈缩点。修正公式如下：

$$\sigma_Y = \sigma_t\left[1 - \tanh\left(\frac{\varepsilon_p}{v}\right)\right] \tag{11}$$

式中：σ_Y 为真实应力，v 为修正系数。

采用 TANH 函数虽可在一定程度上延后数值颈缩点，但随数值颈缩点延后，单元流变应力会显著升高，逐步偏离材料真实力学性能。基于上述问题，本文提出 SHS 与线性外推控制策略，可在流变应力小幅增长的前提下，大幅延后数值颈缩点。假设颈缩发生前，材料真实硬化演化轨迹可由连续且至少二阶可导的非线性函数描述，记为 $\sigma_t = f(\varepsilon_t)$；为简化数学表达，引入代换：自变量 x 表征真实应变 ε_t，因变量 y 表征真实应力 σ_t，硬化模型抽象为映射关系 $y=f(x)$。设由 Considère 失稳理论确定的临界颈缩点应变为 x_n，该点在应力-应变空间内的坐标即为已知目标锚点 (x_n,y_n)。线性外推策略的核心目标：确定最优应变外推起点 x_0（满足 $x_0 \leqslant x_n$），使该点引出的切线精确穿过目标颈缩点 (x_n,y_n)。为满足这一目标，需满足 2 个条件，一是为保证线性外推段与原曲线平滑连续，外推直线在衔接点 $(x_0,f(x_0))$ 处的斜率必须等于原硬化函数在该点的导数 $f'(x_0)$，同时为匹配颈缩点力学状态，假定切线斜率等效为颈缩应力 y_n。二是该外推切线在欧几里得空间中必须精确相交于 (x_n,y_n)。根据上述条件可将上述理论整理为如下数学模型：

$$(1 - x_n + x_0)f'(x_0) - f(x_0) = 0 \tag{12}$$

考虑到现代工程材料的硬化函数 $f(x)$ 往往融合了指数项、幂律项甚至双曲函数，上述方程通常不存在封闭形式的解析解。为实现算法的普适性与高效性，构造残差目标函数 $g(x)$：

$$g(x) = (1 - x_n + x)f'(x) - f(x) \tag{13}$$

采用牛顿迭代法[11]对 $g(x)$ 进行求根，可得出此线性外推初始应变的非线性迭代方程为：

$$x_{k+1}=x_k-\frac{(1-x_n+x_k)f'(x_k)-f(x_k)}{(1-x_n+x_k)f''(x_k)} \quad (14)$$

根据上述迭代方程,通过优化迭代即可获取最优应变外推起始点x_0,从而实现本构曲线线性外推。

分别采用SHS硬化模型、SHS&TANH策略和SHS&线性外推策略对DC03本构曲线进行硬化外推,外推结果如图4所示。SHS硬化模型、SHS&TANH策略和SHS&线性外推策略数值颈缩应变分别为0.165,0.203、0.268。在保证同等流变应力增长条件下,SHS&TANH策略数值颈缩应变延后0.038,SHS&线性外推策略数值颈缩应变延后0.103,效率提升171%,SHS&线性外推策略具有明显的先进性。

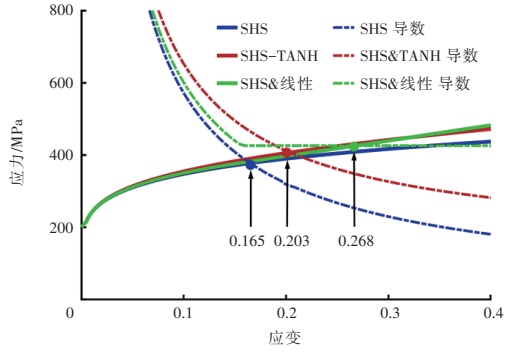


图4　不同硬化外推方法颈缩应变对比

4　高延伸率金属焊点失效模型开发

在第3节中,提出了适用于高延伸率金属硬化外推的SHS&线性外推策略,本节将在第3节的基础上开展多应力状态力学试验和焊点力学性能试验,用于开发DC03及其焊点热影响区GISSMO失效模型。

4.1　母材GISSMO失效模型开发

4.1.1　材料本构开发

采用万能拉伸试验机对DC03材料进行静态拉伸试验,采用SHS&线性外推策略对DC03真实应力应变曲线进行硬化外推,并利用LS-DYNA中的*MAT_24号材料模型进仿真验算[12]。由图5可知,SHS&线性外推策略可有效解决高延伸率金属仿真中,试件变形后期,试样力值迅速衰减、力值异常下降问题。仿真对标Cora系数为0.971,满足开发精度要求。

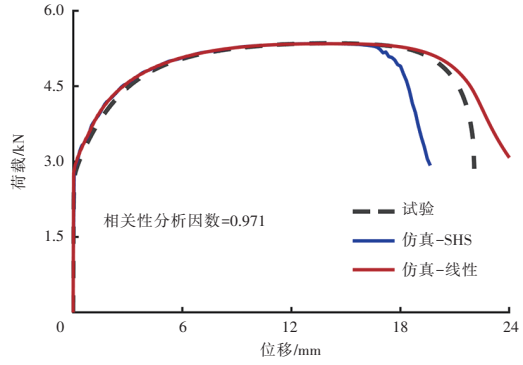


图5　DC03单轴拉伸力-位移曲线

4.1.2　母材GISSMO失效模型开发

广义增量应力状态相关损伤模型(Generalized Incremental Stress State dependent damage Model,GISSMO)是戴姆勒与DYNAmore联合开发的唯象非线性损伤累积模型[8]。在该理论框架内,材料变形过程中的损伤行为由损伤累积变量D表征,损伤累积增量按下式计算:

$$\Delta D=\frac{n}{\varepsilon_{\text{fail}}(\eta)}\cdot D^{\left(1-\frac{1}{n}\right)}\cdot\Delta\varepsilon \quad (15)$$

式中:n为损伤累计指数,$\Delta\varepsilon$为等效塑性应变增量,$\varepsilon_{\text{fail}}(\eta)$为失效曲线。

当损伤累积至1,即D=1时,有限元软件判定单元失效并执行单元删除操作。失效曲线可采用修正莫尔-库仑准则(修正后的经典脆性断裂准则)构建[13]。MMC断裂准则同样属于唯象断裂模型,通过权重方程计算塑性应变演化过程中的损伤累积,用以描述材料变形过程的损伤行为,MMC方程表达式如下:

$$\varepsilon_{\text{f}}=\left\{\frac{A}{C_2}\left[C_3+\frac{\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}}\left(1-C_3\right)\sec\left(\frac{\pi}{6}\bar{\theta}\right)-1\right]\right\}\times$$
$$\left\{\sqrt{\frac{1+C_1^2}{3}}\cos\left(\frac{\pi}{6}\bar{\theta}\right)+C_1\left(\eta+\frac{1}{3}\sin\left(\frac{\pi}{6}\bar{\theta}\right)\right)\right\}^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

式中:ε_{f}为断裂应变,$\bar{\theta}$为罗德角参数,η为应力三轴度,A、m为Swift硬化模型参数,C_1、C_2、C_3为模型拟合常数。

通过设计中心孔、$R5$、$R20$、纯剪、拉剪和穿孔6种不同应力状态下的材料力学试验,进行MMC失效曲线构建。根据试验结果所构建的MMC失效曲线和各工况的仿真对标结果分别如

图 6、图 7 所示。由图 7 可知，采用主流 SHS 硬化模型对 DC03 进行失效模型开发时，各工况试样失效位移均与试验存在较大误差，严重偏离物理实际。而在采用 SHS&线性外推策略对 DC03 进行失效模型开发时，中心孔、*R*5、*R*20、纯剪、拉剪和穿孔对标精度分别 0.924、0.876、0.928、0.955、0.951、0.966，平均精度为 0.933，满足精度开发要求。

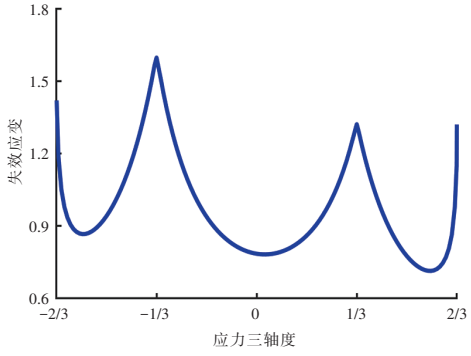
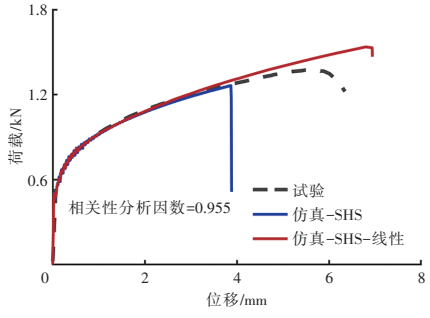
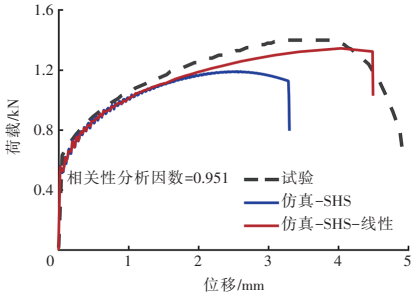


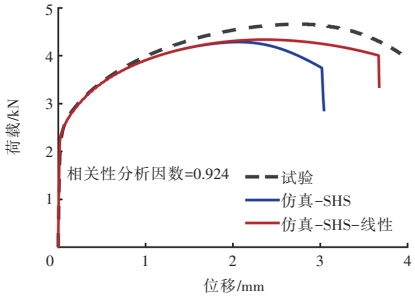
图 6 DC03 MMC 失效曲线



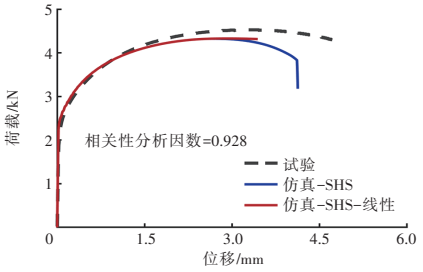
(a)纯剪



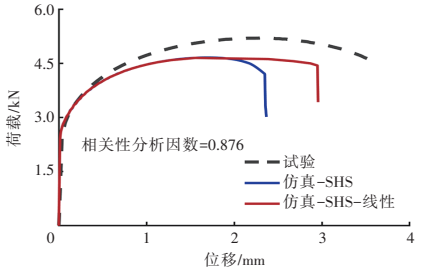
(b)拉剪



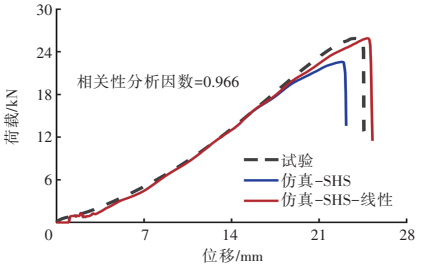
(c)中心孔



(d)*R*20 缺口



(e)*R*5 缺口



(f)穿孔

图 7 DC03 各工况对标结果

针对不同网格尺寸模型，在单元产生相同变形量的前提下，由应变定义可知：小尺寸网格单元的应变大于大尺寸网格单元，造成大网格模型失效晚于小网格模型。为消除网格尺寸效应对失效行为预测结果的干扰，需实施网格正则化处理。整车碰撞仿真常用单元尺寸为 6 mm，因此本文选取 0.5 mm、1 mm、6.25 mm、12.5 mm 系列网格尺寸对材料卡片开展网格尺寸效应修正，修正结果如图 8 所示。各网格尺寸下材料失效行为趋于一致，网格尺寸效应得到有效消除。

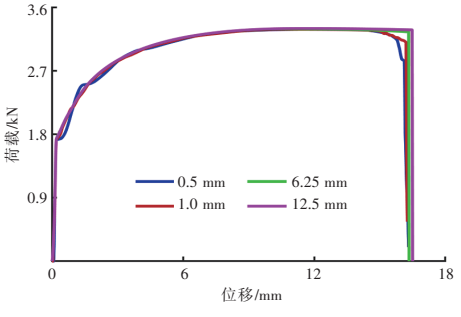


图 8 网格尺寸效应修正

4.2　热影响区GISSMO失效模型开发

4.2.1　焊点力学试验

整车结构中的高延伸率金属构件多采用电阻点焊方式实现结构连接[14]。典型点焊接头由母材、热影响区及焊核3部分组成(图9)。在整车碰撞载荷作用下,该焊接接头承受拉伸、剪切、剥离等复杂应力状态耦合加载,失效行为复杂多样。

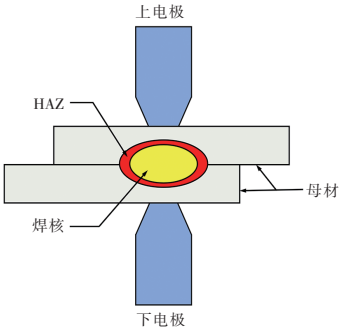
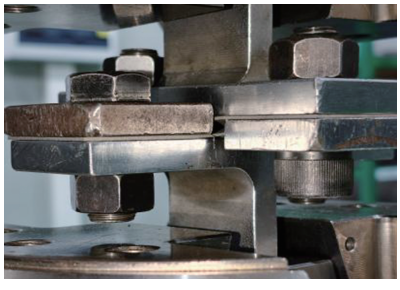


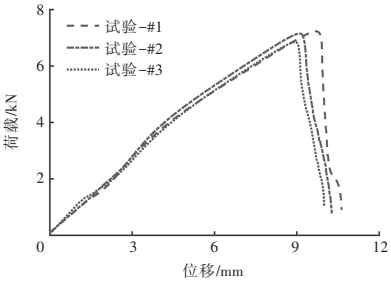
图9　焊接结构

为获取DC03焊点在不同应力状态下的力学性能,对DC03点焊接头开展十字拉伸、剪切拉伸和剥离3类试验,试验结果如表1与图10所示。十字拉伸、剪切拉伸、剥离试验失效力平均值分别为7.07 kN、8.34 kN、1.26 kN;试验标准差依次为±0.21、±0.3、±0.2,试验数据一致性良好,结果可靠性较高。

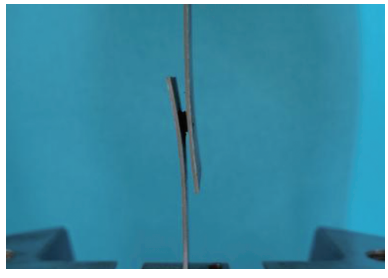
表1　焊点力学性能试验数据统计表

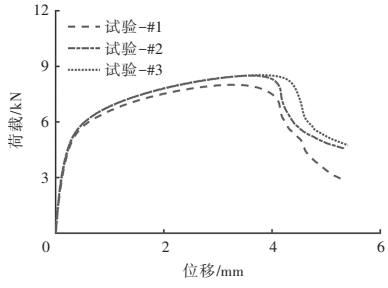
试验名称	失效力值/kN	平均值/kN	标准差
十字拉伸	7.23 7.14 6.84	7.07	±0.21
剪切拉伸	8.00 8.50 8.53	8.34	±0.3
剥离	1.06 1.26 1.46	1.26	±0.2



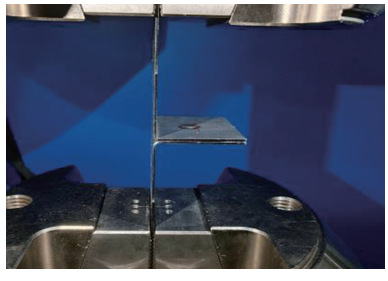


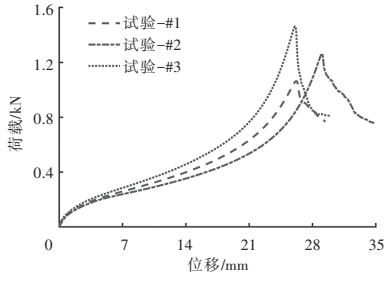
(a)十字拉伸





(b)剪切拉伸





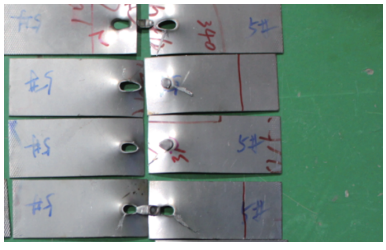
(c)剥离

图10　DC03焊点力学性能试验

十字拉伸、剪切拉伸和剥离试验中焊点的失效类型如图11所示。由图11可知,失效均发生在焊核周边的HAZ或母材中,焊核被完整地保留在单侧板材上,并在另一侧板材上撕扯出一个孔洞,表现为典型的纽扣拔出失效类型,属于典型的韧性失效。



(a)十字拉伸



(b)剪切拉伸



(c)剥离

图 11　焊点失效形式

4.2.2　热影响区 GISSMO 失效模型开发

有限元仿真模型中，焊点建模依据真实的物理结构进行简化建模，建模方式如图 12 所示，焊核采用六面体单元建模，由于在试验中未见焊核失效，因此焊核材料模型选用*MAT_100 材料模型。在焊核外圈环状分布一圈热影响区，母材及焊点热影响区材料均采用*MAT_24&GISSMO 材料模型。

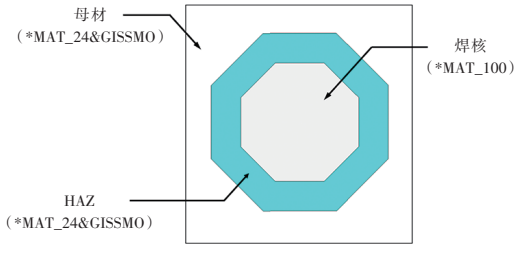
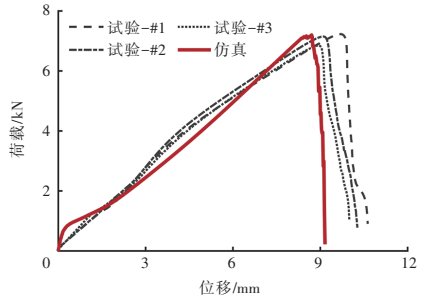
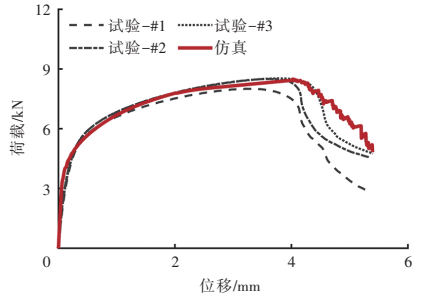


图 12　焊点建模方式

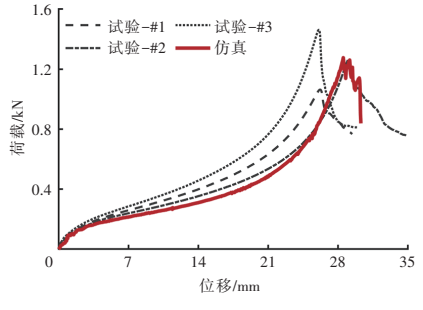
焊接过程中热影响区发生显著的金相组织相变，其力学性能与母材存在明显差异，因此需要独立构建热影响区的失效模型。但由于热影响区尺寸狭小，无法采取常规的 GISSMO 材料模型开发方法对其进行失效参数标定。因此，以 DC03 母材材料模型参数为优化基准，以十字拉伸、剪切拉伸和剥离试验数据为优化目标，利用参数反求法逆向标定热影响区材料模型参数。标定结果如图 13 所示。十字拉伸、剪切拉伸和剥离试验仿真失效力值分别为 7.2 kN、8.49 kN、1.28 kN，各工况试验与仿真失效峰值误差分别为 6.5%、1.8%、1.6%。平均峰值误差为 3.3%，满足精度开发要求。



(a)十字拉伸



(b)剪切拉伸



(c)剥离

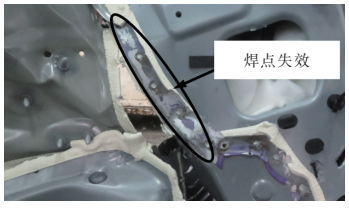
图 13　焊点仿真试验对标

5　焊点失效模型的整车碰撞安全应用

第 4 节完成 DC03 母材及其焊点热影响区广义增量应力状态相关损伤模型(GISSMO)的构建。为进一步验证该材料失效模型的预测精度及其在整车碰撞模型中的应用效果，本节将 DC03 母材及其焊点热影响区 GISSMO 失效模型嵌入整车碰撞仿真，开展失效模型的准确性与鲁棒性验证。

5.1　正面25%偏置碰撞工况

基于某车型正面25%偏置碰撞工况(Small Overlap Barrier,SOB)开展模型验证。如图14a所示,某纯电动车型正面25%偏置碰撞实车试验中,下A柱发生断裂,前围板与下A柱搭接区域焊点出现大面积失效。嵌入DC03母材及其焊点热影响区GISSMO失效模型的整车仿真结果如图14b所示,仿真可复现下A柱断裂、前围板褶皱大变形以及焊点大面积失效特征,精准复现前围板与下A柱搭接位置焊点的撕裂失效现象。



(a)整车试验

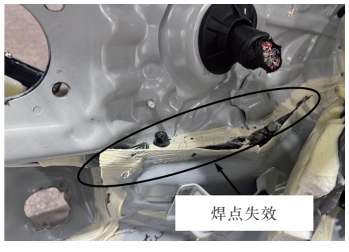


(b)整车仿真

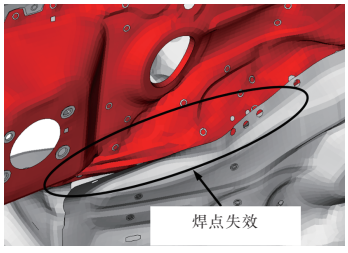
图14　SOB仿真试验对比

5.2　正面50%重叠移动可变形壁障碰撞工况

某混动车型正面50%重叠移动可变形壁障碰撞(Moving Progressive Deformable Barrier,MPDB)实车试验结果如图15a所示,前围板与歇脚板搭接区域同样出现大面积焊点失效。采用DC03母材及其焊点热影响区GISSMO失效模型得到的仿真结果如图15b所示;碰撞冲击载荷作用下,前围板与歇脚板搭接处焊点发生崩裂,搭接区域形成开口变形,仿真失效特征与试验现象基本吻合。



(a)整车试验



(b)整车仿真

图15　MPDB仿真试验对比

通过SOB、MPDB 2种整车碰撞工况的仿真与试验对标可知,本文构建的DC03母材及其焊点热影响区GISSMO失效模型能够准确表征DC03母材及其焊点的变形与失效行为,验证了该失效模型具备良好的预测准确性与鲁棒性。

6　结束语

针对高延伸金属数值颈缩策略和失效模型开发从数值颈缩原理、本构曲线硬化外推策略、母材及其焊点热影响区GISSMO失效模型开发到整车应用进行了研究,结论如下:

a. 对于DC03材料而言,在保证同等流变应力增长条件下,SHS&TANH策略数值颈缩应变延后0.038,SHS&线性外推策略数值颈缩应变延后0.103,效率提升171%,SHS&线性外推策略具有明显的先进性。

b. DC03焊点十字拉伸、剪切拉伸和剥离试验的失效平均力值分别为7.07 kN、8.34 kN、1.26 kN。仿真失效力值分别为7.2 kN、8.49 kN、1.28 kN。各工况试验与仿真失效峰值误差分别为6.5%、1.8%和1.6%。平均峰值误差为3.3%,实现了焊点失效行为高保真仿真复现。

c. 本文开发的DC03母材和DC03焊点热影响区GISSMO失效模型可准确复现整车碰撞中DC03母材及其焊点热影响区的变形和失效行为。

综上所述,本研究建立了一套面向高延伸率金属的数值颈缩控制、母材及其焊点热影响区失效模型开发的完整技术方案。该技术路线具备良好的普适性与可扩展性,可为高延伸率金属材料在整车碰撞仿真领域的工程应用提供理论支撑。

参考文献:

[1] KLEEMOLA H J,NIEMINEN M A.On the Strain-Hardening Parameters of Metals[J]. Metallurgical Transactions,

1974, 5(8): 1863-1866.

[2] DZIALLACH S, BLECK W, BLUMBACH M, et al. Sheet Metal Testing and Flow Curve Determination under Multiaxial Conditions[J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(11): 987-994.

[3] 董伊康, 齐建军, 孙力, 等. 车用钢板材料硬化模型的适用性[J]. 机械工程材料, 2020, 44(10): 81-86.

[4] ZHANG H, WEI A, QIU X,et al. Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Dissimilar Thickness DP780/DP600 Dual-Phase Steel Joints[J]. Materials and Design, 2014, 54: 443-449.

[5] ZHANG H Q, QIU X M, BAI Y, et al. Resistance Spot Welding Macro Characteristics of the Dissimilar Thickness Dual Phase Steels[J]. Materials & Design, 2014, 63 (21): 151-158.

[6] ZHANG H Q,QIU X M,XING F, et al.Failure Analysis of Dissimilar Thickness Resistance Spot Welded Joints in Dual-Phase Steels During Tensile Shear Test[J]. Materials & Design, 2014, 55:366-372.

[7] 万顺生, 郭静, 王文涛. 飞行器雷达天线罩透波性能研究与测试[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S1): 57-61.

[8] EFFELSBERG J,ANDRé HAUFE, FEUCHT M, et al.On Parameter Identification for the GISSMO Damage Model[C]// 11th LS-DYNA Forum. 2012.

[9] GAO S, XIAO Y, LIU J, et al. Polymer-Like Double Necking Deformation in An FeCoCrV Medium Entropy Alloy[J]. Materials Research Letters, 2025, 13(7): 709-718.

[10] CLIVE R C. Materials Science and Engineering : an IntroDuction[M]. John Wiley & Sons, 1985.

[11] 柳辉. 解非线性方程的牛顿迭代法及其应用[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007(8): 95-98.

[12] 何涛. ANSYS LS-DYNA 10.0非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[13] BAI Y l, TOMASZ W. Application of Extended Mohr-Coulomb Criterion to Ductile Fracture[J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(1): 1-20.

[14] 周孟龙. 国内外焊接设备的发展及其展望[J]. 焊接技术, 2005(6): 1-8.

AT&M