

# Altair 材料库中金属板材硬化及失效数据的准备

## Experimental Material Data Preparation for Altair Material Data Base

纪登鹏<sup>1</sup>, Lucy LU<sup>2</sup>, 连昌伟<sup>1</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900; 2. 澳汰尔工程软件(上海)有限公司, 上海 200070)

**摘要:** 本文介绍了宝钢金属板材硬化和失效的试验方法以及试验数据的处理, 并用 Altair Radioss 建立相应模型与试验数据相验证, 得到相应的建立 Radioss 材料卡片以及失效卡片的方法。

**关键词:** 金属板材试验 拟合 材料参数设定

**Abstract:** This paper introduces the hardening and failure testing method of Baosteel sheet metal and experimental data treatment. The Radioss material cards and failure cards were established after validation between testing data and simulation data from corresponding Radioss model.

**Key words:** sheet metal experiment, fitting, material parameter determination

### 1 概述

在有限元模拟中材料卡片是非常重要的, 材料卡片设置正确与否极大的影响整个模拟的准确性。材料卡片中所输入的材料参数又依赖于大量的材料试验, 做哪些相关的试验, 如何做试验, 如何正确处理材料实验数据以及如何校验材料卡片参数都是很大的工作量, 宝钢和 Altair 的材料数据库项目合作, 依靠宝钢可靠而且专业的试验和设备, 并使用 Radioss 模型校验建立的材料卡片, 将材料卡片存放于 Altair 材料数据库中, 可以极大的方便用户在仿真设计中材料卡片的使用。

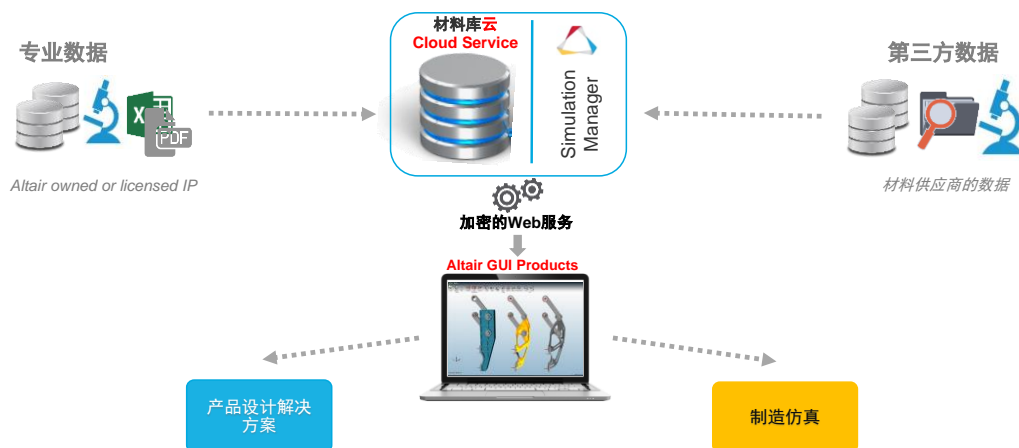


图 1 Altair 材料库简介

## 2 材料硬化曲线

在 Radioss 中用于金属板材的材料模型有很多，常用的是 LAW36 材料卡片[1]。LAW36 材料卡片可以直接输入材料在单向拉伸变形过程中的应力应变曲线，并且可以考虑材料的应变率效应。使用 Radioss 材料卡片，首先需要做一些材料试验，用以确定材料卡片中所需输入的弹性模量、应力应变曲线等材料性能数据，详见下面章节。

### 2.1 宝钢单轴拉伸试验

通过单轴拉伸试验获得的材料的应力应变曲线是碰撞仿真材料卡中的重要输入内容。按实际测试时材料的应变速率，可以把单轴拉伸试验分为准静态拉伸试验及高速拉伸试验。

准静态单轴拉伸试验是获得材料基础力学性能的一种通用方法，常见的材料力学性能，如屈服强度、抗拉强度、延伸率、弹性模量、加工硬化指数  $n$ 、塑性应变比  $r$  及应力应变曲线等皆是由该试验方法直接或间接得到。对于准静态单轴拉伸试验，不同的国家及地区具有多种测试标准，但其原理基本大同小异。一般情况下，可以参照国家标准 GB/T 228.1-2010 [2]中规定的试验方法做准静态单轴拉伸试验。材料的断裂延伸率与测试时材料的初始标距具有相关性，不同初始标距的拉伸试样测出的断裂延伸率不具有比较性。常用的用于薄板拉伸的准静态拉伸试验试样尺寸分为 50 mm 初始标距及 80 mm 初始标距。图 2a 为国家标准中的定标距 50 mm 试样尺寸（P5 试样），图 2b 为定标距 80 mm 试样尺寸（P6 试样）。如有特殊的测试需求，亦可以根据拉伸试样尺寸参数之间的约束要求设计特定的拉伸试样。

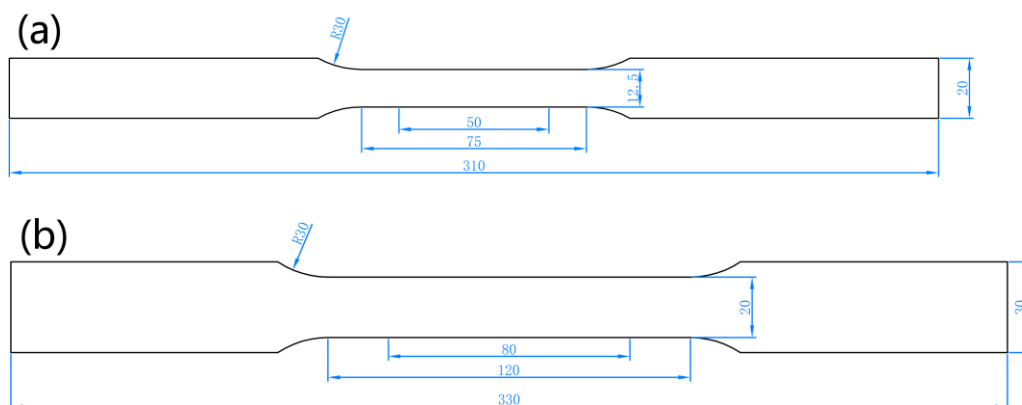


图 2 国家标准中常用的准静态拉伸试样尺寸 (mm): (a) 50 mm 初始标距; (b) 80 mm 初始标距。

宝钢准静态拉伸试验机采用美国 INSTRON 公司生产的 5984 型号的电子万能试验机。试验机采用测力传感器测量载荷信号, 可采用接触式引伸计、视频引伸计及加装的 GOM 光学应变测试系统测量应变。

钢板在制成零件后, 其在服役发生破坏时, 应变速率多数不是准静态, 尤其对于车身零件, 发生破坏时经历高速碰撞。材料在高速变形下, 相比于准静态, 其力学行为表现出一定的差异性。多数材料能表现出明显的应变率效应, 即随着应变速率的提高, 材料的流变应力出现变高的现象。高速拉伸试验可以测试材料在高速变形下的应力应变曲线, 将材料的高速拉伸曲线嵌入到碰撞仿真材料卡中能提高碰撞仿真的精度。做高速拉伸试验, 可以参照国家标准 GB/T 30069.1-2013 [3]。薄板做高速拉伸的试样可以参考图 3。具体的试样尺寸可根据试验机及试验要求做调整。高速拉伸试验的应变速率通常做 1/s、10/s、100/s、200/s 及 500/s (真实应变速率), 如有特殊测试需求, 根据具体测试要求选择测试速率。

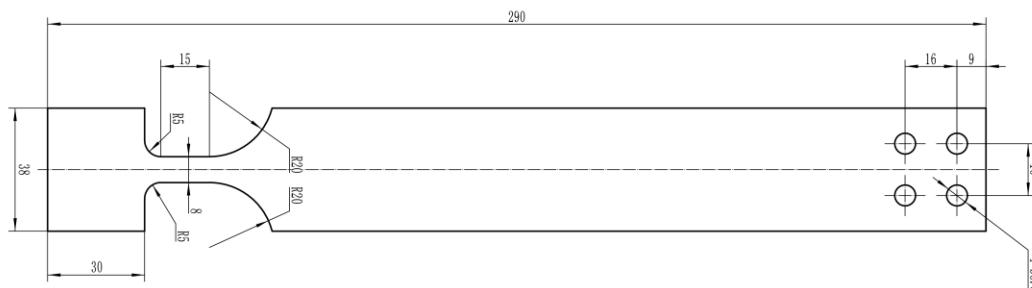


图 3 高速拉伸试验试样尺寸 (mm)

宝钢高速拉伸试验机采用美国 INSTRON 公司生产的 VHS160/100-20 型号高速电液伺服试验机。试验机可以采用压电传感器或者应变片式传感器测量载荷信号, 采用 GOM 光学应变测试系统测量材料在高速变形下的应变。

## 2.2 基于单轴拉伸的 Radioss 材料卡的建立

从上述的材料试验中我们得到的是力和位移的曲线，而 Radioss 卡片中需要输入的是真实应力和真实塑性应变的曲线，所以需要将力和位移的曲线经过下面一系列转换后，得到真实应力和真实应变的曲线：

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta L}{L_0}; \quad \sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon_{tr} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}); \quad \varepsilon_{tr}^p = \varepsilon_{tr} - \frac{\sigma_{tr}}{E}; \quad \sigma_{tr} = \sigma_{eng} \exp(\varepsilon_{tr})$$

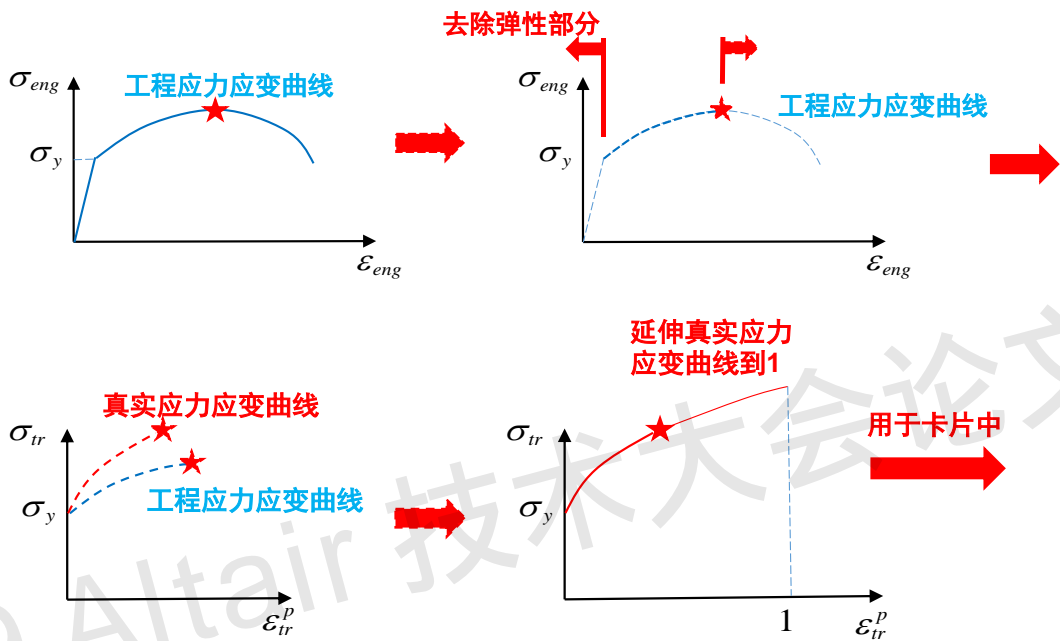


图 4 单轴拉伸试验数据处理步骤

由于需要输入的是真实塑性应变，所以需要去除弹性部分。颈缩点（最大应力）后面的部分材料变形不再均匀及应力状态发生改变，在准备用于 LAW36 卡片的硬化曲线时同样需要去除。

其次由于试验数据点通常是很多的（上千甚至上万个数据点），数据点之间并不绝对满足单调递增，并且材料在颈缩后仍能维持变形，并不立马发生失效，所以通常需要使用一些材料的应力应变本构模型（比如 Johnson-Cook, Swift-Voce 模型等）对原始的试验数据进行拟合并推至真应变 1，形成少于 100 个数据点（通常 50 个数据点左右）的应力应变曲线。拟合后的曲线通常是光滑的单调递增的曲线，可以很好的应用到 LAW36 卡片中。将上下振荡的试验数据直接输入 LAW36 卡片中，Radioss 将会报错。高速拉伸试验数据也需要作如上同样的数据处理。这些数据的处理可以使用编制的脚本（比如 Compose 脚本），方便而快速地从试验数据输入到形成卡片。

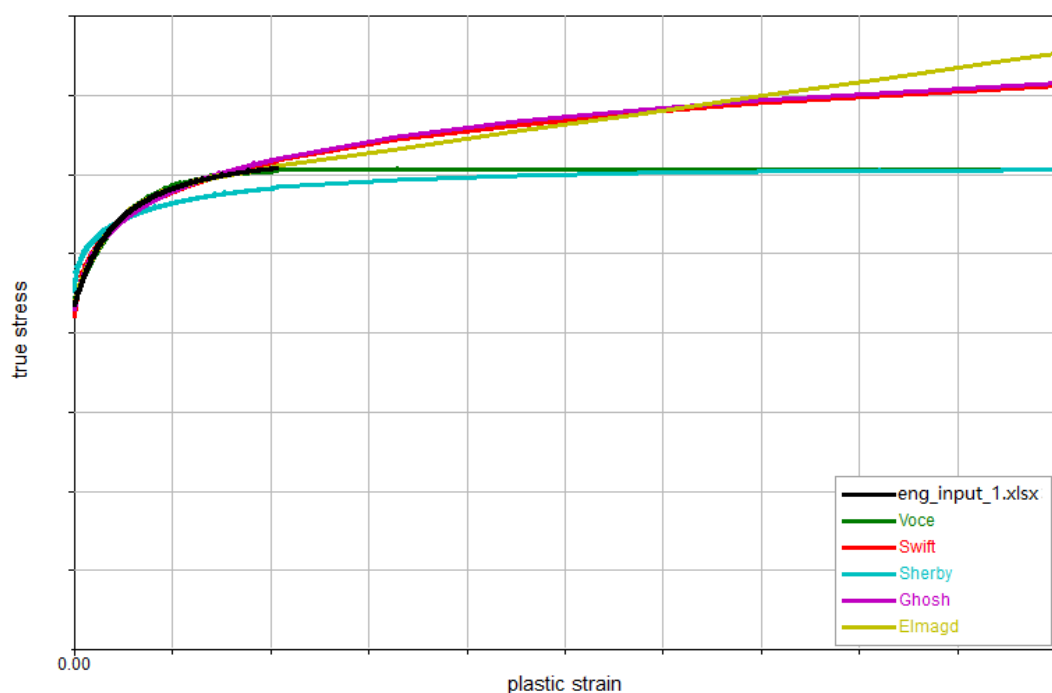


图 5 使用 Compose 脚本对实验曲线用不同材料模型拟合

经过这一系列的试验数据处理得到的真实应力和真实塑性应变曲线就可以直接输入 LAW36 中相应的参数中。接下来就需要建立相应的有限元模型，通过比对模拟数据与试验数据，对材料卡片的参数进行校验。这样可以保证最终形成的卡片的可靠性，更能真实准确反应材料实际的力学性能，并且这样的材料卡片可以直接用于不同的有限元分析模型（比如整车模型）中。有限元模型中除了卡片，其他因素比如单元属性等也会影响最终模拟结果，使用常用的单元模型和单元属性配合材料卡片进行的校验对最终在整车上的应用是非常有必要的。

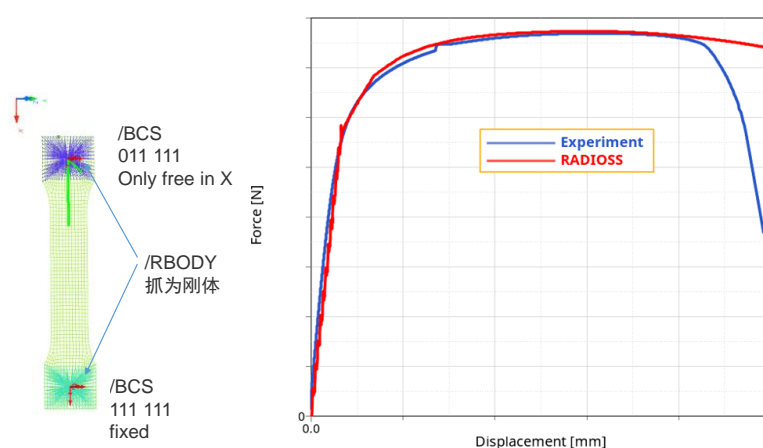


图 6 RadioSS 单轴拉伸试验模型以及试验结果与模拟结果的对比

如上图所示，最终将试验得到的力和位移的曲线和 RadioSS 结果相比较，由于在这个模型中不考虑失效，所以仅比对颈缩点之前的部分，可以看到 RadioSS 结果对标试验数据

非常好。这样的 LAW36 材料卡片就已经建立好了，可以放入 Altair 材料库中供用户使用。如果 Radioss 结果对标试验数据不好，则需要从新审视试验数据处理是否恰当，是否选择合适的拟合模型，或者试验数据本身是否有误，进而修改输入的曲线，直到 Radioss 结果对标试验数据非常好之后的材料卡片才可以放入 Altair 材料库中。

### 3 材料失效

在 Radioss 中用于金属板材的材料失效模型也有很多，这里推荐常用的是 /FAIL/BIQUAD 的材料失效模型，需要输入单轴压缩失效应变、纯剪切失效应变、单轴拉伸失效应变、平面应变拉伸失效应变及双轴拉伸失效应变即可。

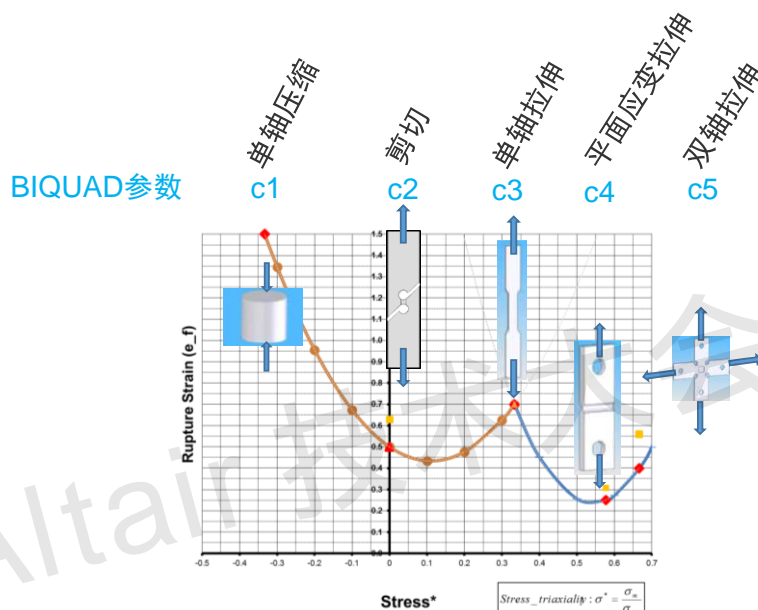


图 7 Radioss 失效模型 BIQUAD 所需试验的种类

如果仅有单轴拉伸失效应变那么也可以参照 Radioss 内置已有的金属材料的失效应变曲线进行相应的估计。下面章节主要介绍宝钢的材料失效试验和使用 Radioss 模型对材料失效参数的校验。

#### 3.1 宝钢材料失效试验

Radioss 碰撞材料卡的材料失效模型使用了一种简化的基于应变的，考虑材料线性损伤累积的失效准则。该模型使用了两个抛物线函数来描述材料的失效应变，如上图 7 所示，这两个抛物线函数可以使用用户输入的失效应变拟合得到的曲线计算出来。用户输入的失效应变可以多达 5 种，分别是单轴压缩失效应变、纯剪切失效应变、单轴拉伸失效应变、平面应变拉伸失效应变及双轴拉伸失效应变。不同的应变模式具有不同的应力三轴度，构成了抛物线函数曲线上点的横坐标。对于薄板而言，由于厚度较薄，单轴压缩过程中，材料极易发生屈曲，因而单轴压缩失效应变很难获取。纯剪切失效应变、单轴拉伸失效应变、平面应变拉伸失效应变、双轴拉伸失效应变较易获取。

单轴拉伸试验在 2.1 节已有介绍，通过加装的 GOM 光学应变测试系统，可以获得较为准确的材料单轴拉伸失效应变。

纯剪切试验及平面应变拉伸试验可以在电子万能试验机上进行，试验方法亦可参考准静态单轴拉伸试验。与准静态单轴拉伸试验不同的是，纯剪切试验及平面应变拉伸试验的试样尺寸需要分别设计。纯剪切试验的试样尺寸可以参考图 8 [4]。平面应变拉伸试验的试样尺寸可以参考图 9。

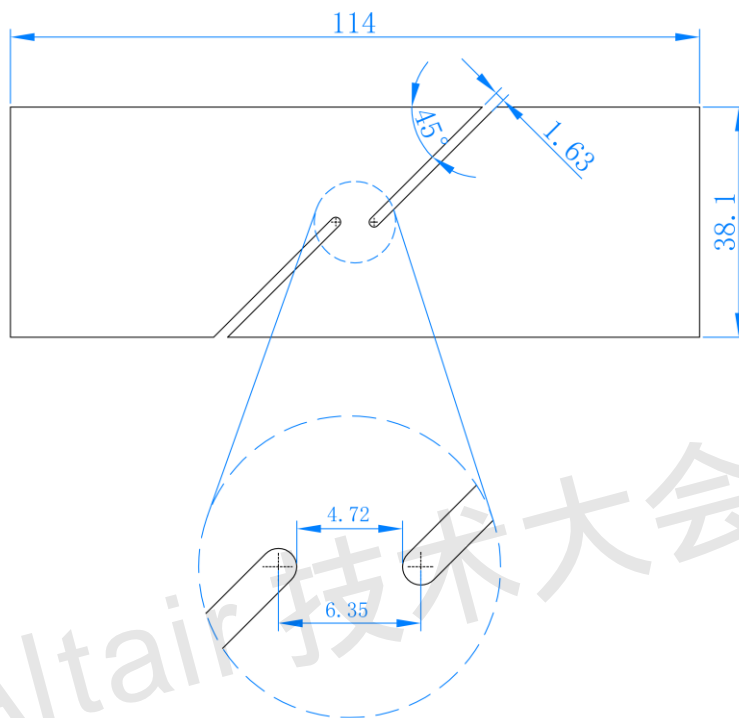


图 8 ASTM B831 标准中薄板纯剪切试验试样尺寸 (mm)

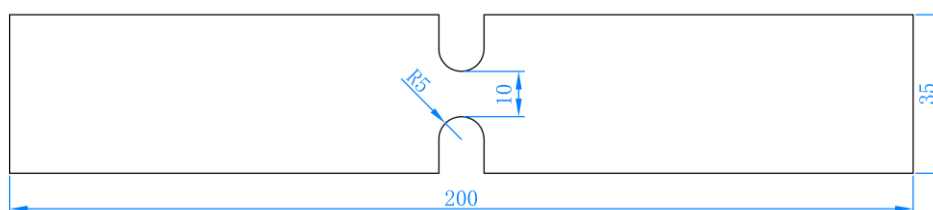


图 9 R5 缺口平面应变拉伸试样尺寸 (mm)

宝钢通过板材的穿孔试验获得材料的双轴拉伸失效应变。将 180 mm 直径的圆片试样放置于凸模与凹模之间，然后用直径 25 mm 的半球形凸头模具顶圆片试样，直至板材发生破裂，使用 GOM 光学应变测试系统可以测量出板材的双轴拉伸失效应变。穿孔试验是在宝钢的成型试验机上进行的。宝钢的成型试验机采用美国 MTS 公司生产的 MTS 866.72S 型号试验机。该试验机采用力传感器采集载荷信号，通过加装的 GOM 光学应变测试系统测量变形全过程的应变。



### 3.2 基于材料失效数据的 Radioss 失效卡的建立

从上述的材料试验中我们得到的是力和位移的曲线，从这些曲线中提取失效时的真实塑性应变，如前面章节所述将位移转换为真实塑性应变。对于纯剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸试验中得到的失效应变可以输入相应的 **BIQUAD** 参数中。而双轴拉伸的实验是通过穿孔试验得到的，所以得到的冲头的力和位移的曲线中的位移不可以直接转换为真实塑性应变后应用，失效卡片 **BIQUAD** 中需要输入的 **c5** 参数是金属板材的真实塑性应变。这个可以通过 **GOM** 光学应变测试系统读取或者通过建立相应的 **Radioss** 模型校验，使得有限元模型和穿孔试验在相同力下失效。

首先将纯剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸试验中得到的失效应变后输入 **BIQUAD** 失效卡片中相应的 **c2**, **c3**, **c4** 参数中，对于空缺的 **c1** 和 **c5** 可以使用 **Radioss** 内置类似材料参数用于估计。

<i>M-Flag</i>	Roughly Corresponds to Material	<i>c3</i> (Default)	<i>r1</i>	<i>r2</i>	<i>r4</i>	<i>r5</i>
1	Mild steel	0.60	3.5	1.6	0.6	1.5
2	HSS steel	0.50	4.3	1.4	0.6	1.6
3	UHSS steel	0.12	5.2	3.1	0.8	3.5
4	Aluminum AA5182	0.30	5.0	1.0	0.4	0.8
5	Aluminum AA6082-T6	0.17	7.8	3.5	0.6	2.8
6	Plastic PA6GF30	0.10	3.6	0.6	0.5	0.6
7	Plastic PP T40	0.11	10.0	2.7	0.6	0.7
99	Self-defined values (optional line)	0.30	Optional input	Optional input	Optional input	Optional input

图 10 Radioss 的 BIQUAD 失效卡片中内置材料失效参数

然后用 **Radioss** 建立相应的纯剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸模型，校验 **c2**, **c3**, **c4** 参数，使得在同一位移位置处材料发生失效。

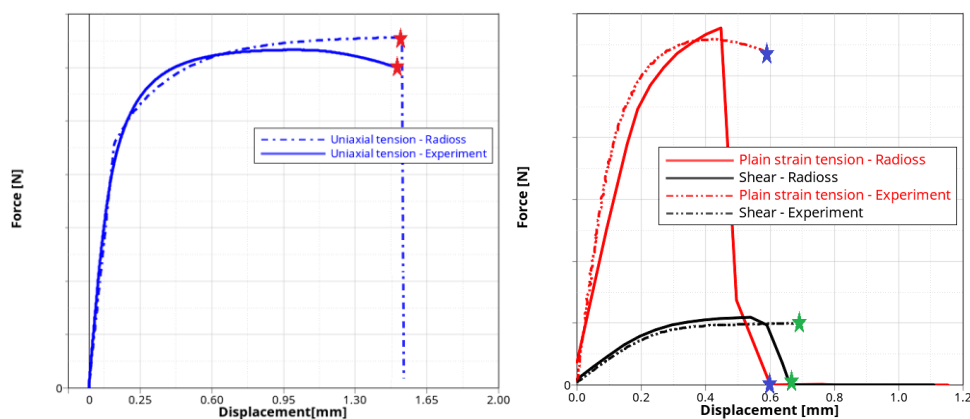


图 11 失效试验结果和 Radioss 模型失效结果的比对

这里使用有限元模型校验 **c2**, **c3**, **c4** 参数，是非常必须的，这里 **c2**, **c3**, **c4** 参数是



纯剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸应力状态下失效应变，但是在实际试验中往往比较难控制材料总是处于单一的应力状态下失效，比如纯剪切试验中，载荷开始阶段从应力三轴度从 0 变化到 0.146，也就是材料并非在完全纯剪切（应力三轴度为 0）的应力状态下失效的，如果把剪切试验数据直接用到 BIQUAD 失效卡片中的 c2 参数中并不完全正确。这种情况下，通过试验和有限元模型的校验并调整 c2 参数是非常必要的。

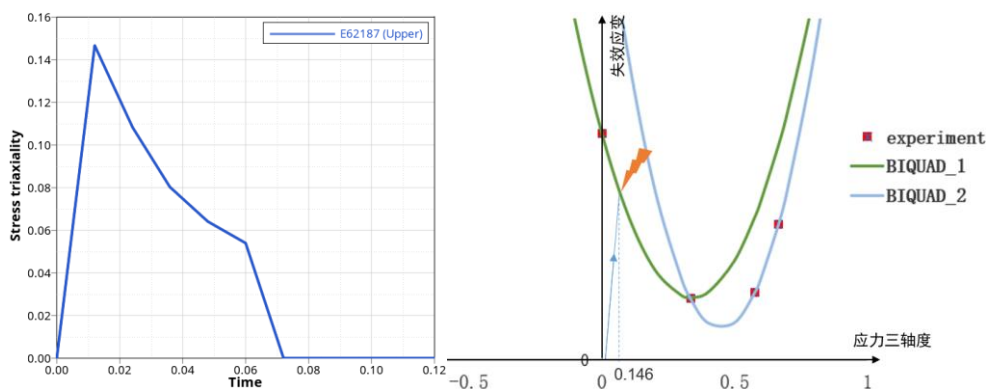


图 12 纯剪切试验过程中应力三轴度的变化以及实际失效时的应力状态（应力三轴度）

随后建立穿孔试验相应的有限元模型，使用上面得到的校验后的 c2, c3, c4 参数，通过校验穿孔试验，使得有限元模型中和穿孔试验在相同力下失效，这样得到相应的 c5 参数。

通过上面所述纯剪切失效试验、单轴拉伸失效试验、平面应变拉伸失效试验、双轴拉伸失效试验而确定的 c2, c3, c4 和 c5 参数，以及使用 Radioss 相应材料类别的内置 c1 参数，材料失效卡片 BIQUAD 就准备好了。但是由于通常材料的失效应变与单元的大小也有关系，需要对所有模型使用不同的单元大小再次计算，使得不同单元大小模型能同一时刻失效。这样形成的 BIQUAD 失效卡片适用于用户不同模型中的不同单元大小。

如下图平面应变为例使用单元大小为 1 mm, 2 mm, 4 mm。设置 BIQUAD 卡片中的参考单元大小  $EI_{ref} = 1$  mm，那么卡片中 c2, c3, c4 和 c5 参数是通过单元大小为 1 mm 的模型与实际试验数据校验得到的，而其他单元尺寸的失效参数通过曲线  $fct\_IDel$ （如图 12）对失效应变作相应的折减。

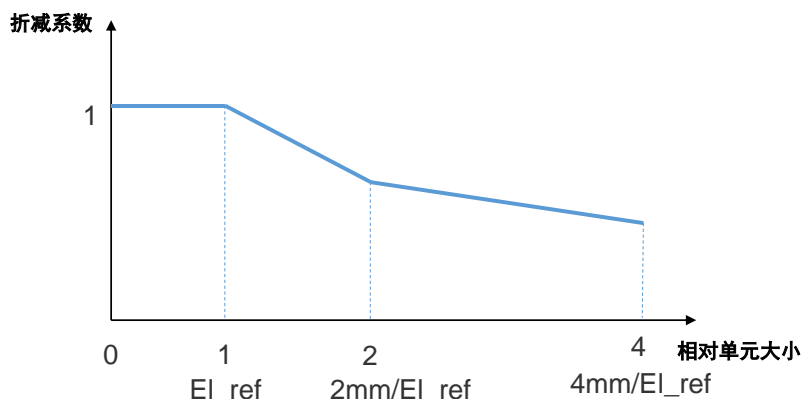


图 12 通过折减系数曲线描述不同单元大小时的实际失效

上面的折减系数曲线是需要调节系数直到所有模型中的失效时刻一致，如下图所示不同单元尺寸的模型都在  $\text{time} = 0.06 \text{ s}$  开始失效（应力降为 0）。

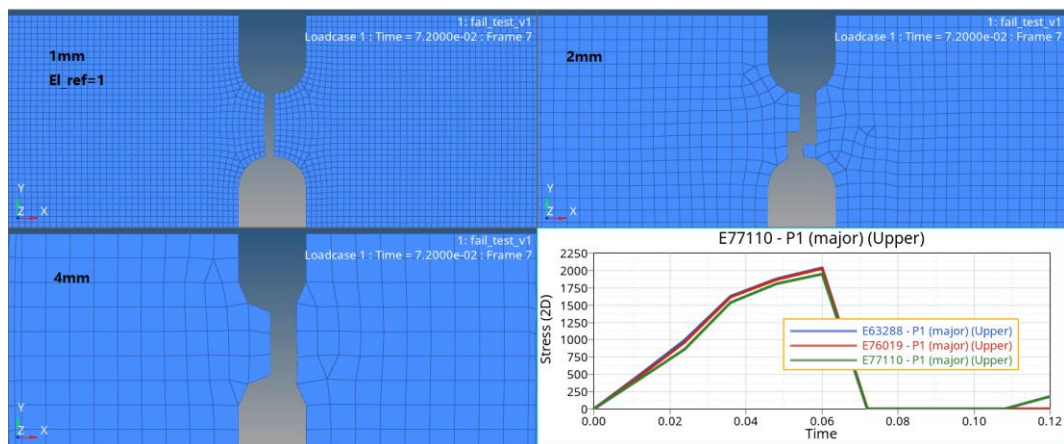
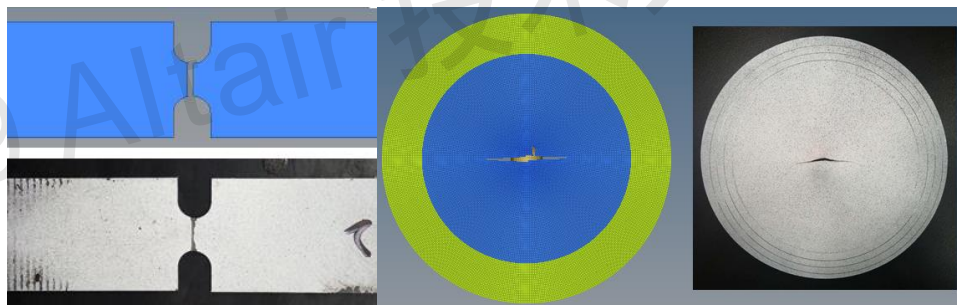


图 13 通过折减系数曲线控制不同单元大小的模型同一时刻失效

最后还需要在最小单元的模型中与实际试验比对失效的位置和形状。比如下图所示平面应变拉伸失效和双轴拉伸失效的位置与形状，试验结果和 **Radioss** 结果一致。这样进一步对形成的材料失效卡片有一个校验。

图 14 平面应变拉伸失效和双轴拉伸失效的位置与形状，试验结果和 **Radioss** 结果比对

如上所述，通过试验和 **Radioss** 相应模型的校验，最终得到的 **BIQUAD** 材料失效卡片可以放入 **Altair** 材料库中供用户使用。如果 **Radioss** 结果对标试验数据不好，类似上面 **LAW36** 需要从新审视试验数据处理，卡片中其他控制参数选择等，直到对标试验数据非常好以后的材料失效卡片才可以放入 **Altair** 材料库中。如果条件允许还可以作其他应力状态（比如各种拉剪等）的材料失效试验用于校验 **BIQUAD** 中利用两条抛物线拟合的失效面是否在其他应力状态下的失效也可以准确描述。

### 3 分析与结论

以上就是宝钢如何通过对金属板材一系列的试验以及建立相应 **Radioss** 模型校验后形

成的 Radioss LAW36 的材料卡片和/FAIL/BIQUAD 的材料失效卡片，这些卡片中的数据由于基于完备的试验和模拟验证从而有较高的可靠性，可以直接用于结构模拟或整车模型，从而为客户节省了产品研发的周期和成本。

并且 Altair 材料库提供了不同搜索方式（从应用出发，从力学指标出发等等）的材料快速搜索的方案。宝钢与 Altair 材料库项目的合作，使得用户可以轻松调用宝钢的金属材料的材料卡片以及失效卡片。

## 4 参考文献

[1] Radioss Manual v2019

[2] GB/T 228.1——2010 金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法[S].

[3] GB/T 30069.1——2013 金属材料 高应变速率拉伸试验 第 1 部分：弹性杆型系统[S].

[4] ASTM B831-14 Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products [S].

2019 Altair 技术大会论文集