

# 轧制差厚板单向拉伸性能研究

张华伟<sup>1,2</sup>, 刘立忠<sup>1,2</sup>, 胡平<sup>\*1,2</sup>, 刘相华<sup>3</sup>

- (1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;  
2. 大连理工大学 运载工程与力学学部 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024;  
3. 东北大学研究院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 分别采用解析、仿真以及试验方法对轧制差厚板(tailor rolled blank, TRB)的单向拉伸性能进行研究. 基于金属塑性变形理论, 推导了轧制差厚板单向拉伸的力学解析模型, 对未退火和已退火的 1.2、2.0 mm 等厚板及 1.2/2.0 mm 轧制差厚板进行单向拉伸试验, 并从金相组织上解释了退火前后轧制差厚板的性能差异. 最后在拉伸试验的基础上, 对未退火和已退火的 1.2/2.0 mm 轧制差厚板进行单向拉伸仿真. 结果表明: 解析模型能够准确地描述轧制差厚板单向拉伸过程中的应力应变状态, 未退火和已退火轧制差厚板单向拉伸试样的缩颈均发生在试样薄侧, 并且退火后的轧制差厚板表现出更好的成形性能. 解析、仿真以及试验结果能够较好地吻合.

**关键词:** 轧制差厚板; 单向拉伸; 退火; 插值

**中图分类号:** TG304 **文献标志码:** A

## 0 引言

德国亚琛工业大学的金属成型研究所于 20 世纪末开始对轧制差厚板(tailor rolled blank, TRB)进行研究<sup>[1]</sup>. 作为生产差厚板的核心技术, 柔性轧制技术能够实现轧辊间隙的实时调整, 进而沿轧制方向轧制出预先定制的变截面形状<sup>[2]</sup>. 设计人员可以根据后续成形工序中钢板各个部位的实际受力以及整个车身的承载情况, 选择优化的板料形状, 极大地提高了设计灵活性并减轻了车重<sup>[3,4]</sup>.

由于差厚板几何、材料的非均一性, 其各部分的材料性能不尽相同, 需要采用单向拉伸试验来评估差厚板的基本力学性能和成形性能<sup>[5]</sup>.

李艳华等讨论了 st16 差厚板厚度比及过渡区长度对其延伸率和过渡区中心移动量的影响<sup>[6]</sup>. 包向军通过单向拉伸试验研究了固溶处理前后 X5CrNi1810 奥氏体不锈钢差厚板的各向异性系数以及弹性模量<sup>[7]</sup>. 本文基于金属塑性变形理论推导轧制差厚板单向拉伸的力学解析模型.

在对 1.2 mm 和 2.0 mm 的等厚板进行单向拉伸试验的基础上, 将有限单元法的思想运用于过渡区的处理, 并通过插值的方法来获取轧制差厚板过渡区的力学性能参数. 对退火前后的 1.2/2.0 mm 轧制差厚板进行单向拉伸仿真及试验, 并从微观金相组织上对拉伸结果进行解释.

## 1 轧制差厚板单向拉伸力学解析模型

图 1 所示为轧制差厚板单向拉伸的力学解析模型, 根据轧制差厚板在单向拉伸过程中的平衡关系  $F_1 = F_2 = F_3$  (其中  $F_3$  为过渡区所受拉伸力) 以及变形过程中各部分宽度相等 ( $B_1 = B_2 = B_3 = B$ ), 并结合幂指型材料本构关系  $\sigma = K\epsilon^n$  可以得到下面的等式:

$$\sigma_1 A_1 = \sigma_2 A_2 = \sigma_3 A_3 \quad (1)$$

$$\sigma_1 t_1 = \sigma_2 t_2 = \sigma_3 t_3 \quad (2)$$

$$K_1 \epsilon_1^{n_1} t_1 = K_2 \epsilon_2^{n_2} t_2 = K_3 \epsilon_3^{n_3} t_3 \quad (3)$$

$$\epsilon_i = \ln \frac{L'_i}{L_i}; i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中： $\sigma$  为应力； $A$  为垂直于拉伸方向的板料截面积； $K$  为强化系数； $\epsilon$  为应变； $n$  为硬化指数； $t$  为板料厚度； $L$  为初始长度； $L'$  为变形后长度。

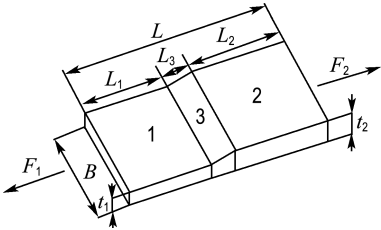


图 1 轧制差厚板单向拉伸力学解析模型  
Fig.1 Mechanical analytic model of TRB for uniaxial tension

2 单向拉伸试验

2.1 试验准备

本文所用材料牌号为 SPHC,其化学成分:C, 0.083%;Si,0.041%;Mn,0.316%;S,0.012%;P, 0.017%.在变厚度的 SPHC 板上沿轧制方向切取 1.2/2.0 mm 差厚板、1.2 mm 薄板及 2.0 mm 厚板的拉伸试样,并将其中部分试样进行退火,拉伸试样的尺寸如图 2 所示.试验采用 WDW-3100 型微机控制电子式万能试验机测试板料的力学性能。

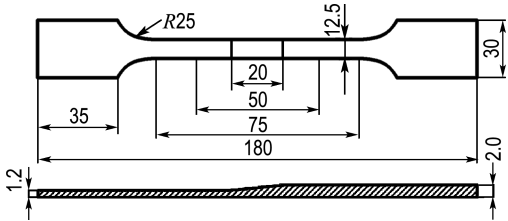


图 2 轧制差厚板单向拉伸试样尺寸(单位:mm)  
Fig.2 Dimension of TRB specimen for uniaxial tension (unit:mm)

2.2 单向拉伸试验结果

通过单向拉伸试验得到的未退火和已退火等厚板的性能参数如表 1 和 2 所示。

由表 1 和 2 可以看出：退火后薄板和厚板的屈服强度  $\sigma_s$  以及抗拉强度  $\sigma_b$  均减小,而弹性模量  $E$ 、硬化指数  $n$ 、厚向异性系数  $r$  均有所增大,这对于获得良好的冲压性能是有利的。

分别将表 1 和 2 中试验所得未退火与已退火板料的相关力学性能参数代入式(4),可得到式(5)和(6)：

$$\epsilon_{1,un} = 1.392(\epsilon_{2,un})^{0.917} \tag{5}$$

$$\epsilon_{1,an} = 1.550(\epsilon_{2,an})^{0.923} \tag{6}$$

式中：下标 un 代表未退火,an 代表已退火；1 代表薄侧,2 代表厚侧。

由式(5)和(6)可知,对于未退火和已退火的轧制差厚板拉伸试样,薄侧的应变均大于厚侧,变形将会集中于薄侧进行,这将导致薄侧更早发生破裂。

表 1 未退火板料的性能参数  
Tab.1 Properties of unannealed blanks

| <i>t</i> /mm | <i>E</i> /GPa | $\sigma_s$ /MPa | $\sigma_b$ /MPa | <i>n</i> | <i>r</i> | <i>K</i> /MPa | $\delta$ /% |
|--------------|---------------|-----------------|-----------------|----------|----------|---------------|-------------|
| 1.2          | 179           | 209.6           | 300.9           | 0.24     | 1.56     | 533.9         | 35.2        |
| 2.0          | 195           | 209.4           | 271.7           | 0.22     | 1.09     | 459.8         | 38.2        |

表 2 已退火板料的性能参数  
Tab.2 Properties of annealed blanks

| <i>t</i> /mm | <i>E</i> /GPa | $\sigma_s$ /MPa | $\sigma_b$ /MPa | <i>n</i> | <i>r</i> | <i>K</i> /MPa | $\delta$ /% |
|--------------|---------------|-----------------|-----------------|----------|----------|---------------|-------------|
| 1.2          | 186           | 170.7           | 237.5           | 0.27     | 1.98     | 443.0         | 42.5        |
| 2.0          | 196           | 179.5           | 264.9           | 0.24     | 1.50     | 472.5         | 45.2        |

试验后未退火与已退火轧制差厚板试样如图 3 所示.可以看出,退火后的板料与退火前相比延伸率有了一定的提高,缩颈失效均是发生在轧制差厚板的薄侧,这也符合前面讨论式(5)和(6)的讨论。

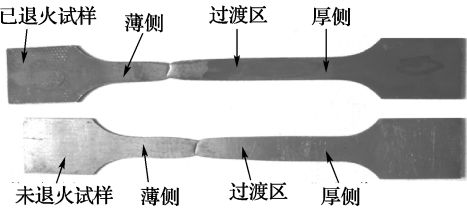


图 3 试验后未退火与已退火轧制差厚板试样对比  
Fig.3 Comparison between unannealed and annealed TRB specimen after experiment

2.3 单向拉伸试验结果的微观解释

沿轧制方向切取未退火和已退火的轧制差厚板金相试样,依次经过镶嵌、粗磨、精磨、抛光,最后用 4% 硝酸酒精浸蚀.在金相显微镜下观察到的显微组织如图 4 所示。

由图 4 可以看出,对于未退火的轧制差厚板而言,1.2 mm 薄侧由于经过轧制,块状铁素体晶粒沿轧制方向被拉长,部分组织呈纤维状,晶粒大小不均匀,因而轧制差厚板的强度增大、塑性降低。

由图 4 还可以看出,退火后轧制差厚板的薄、厚两侧基本上都是大小均匀的等轴晶粒和饼形晶粒,轧制差厚板的强度下降,塑性增强,有个别的大晶粒产生,说明晶粒已经开始长大,晶粒的饼形度增大,这是获得良好成形性能的必要条件。

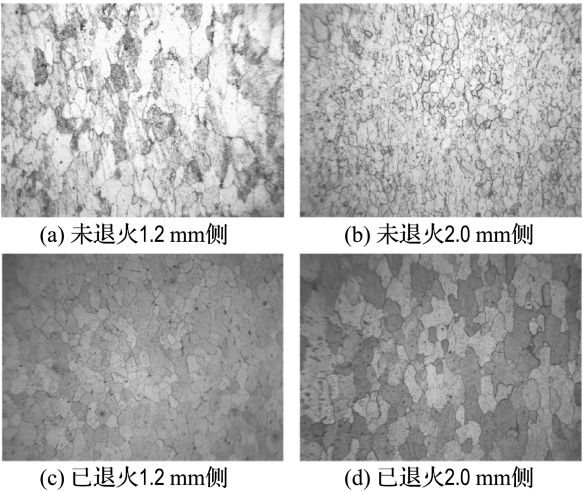


图 4 未退火与已退火轧制差厚板的金相组织对比  
Fig. 4 Comparison of metallurgical structures between unannealed and annealed TRBs

3 轧制差厚板单向拉伸仿真

3.1 轧制差厚板厚度过渡区处理

对于轧制差厚板的厚度过渡区,可以将其离散为有限个相互结合的等厚板,然后再将等厚板组合起来进行整个过渡区的求解计算.因此,通过对表 1 和 2 中的数据进行插值便可以获得轧制差厚板过渡区的力学性能参数,图 5 为 1.2/2.0 mm 轧制差厚板单向拉伸仿真有限元模型.



图 5 轧制差厚板单向拉伸仿真有限元模型  
Fig. 5 Finite element model of TRB uniaxial tension simulation

3.2 仿真结果

未退火和已退火的 1.2/2.0 mm 轧制差厚板单向拉伸试样在不同拉伸阶段时的等效应变分布如图 6 和 7 所示.由图可知,未退火与已退火轧制差厚板单向拉伸试样的变形均主要集中在薄侧进行,直至缩颈失效.在相同位移的情况下,经过退火的试样有更小的等效应变值,因而能够获得更大的延伸率.上述仿真结果与前面对式(5)、(6)的讨论是一致的,与试验结果也是相吻合的.而且经与试验相比较,仿真模拟的缩颈失效部位也是非常准确的.

图 8 为轧制差厚板拉伸试验与仿真的位移-荷载曲线对比.由图可以看出,已退火轧制差厚板

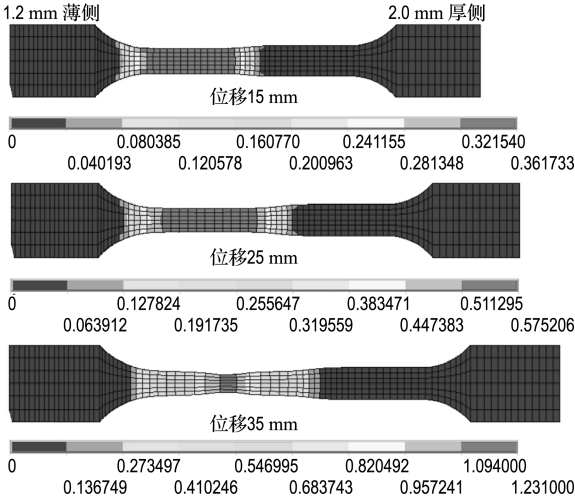


图 6 未退火轧制差厚板试样拉伸过程中等效应变分布  
Fig. 6 Equivalent strain distribution of unannealed TRB specimen during tension

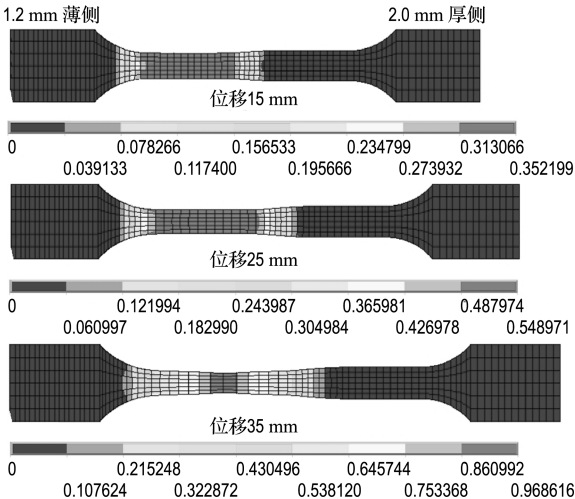


图 7 已退火轧制差厚板试样拉伸过程中等效应变分布  
Fig. 7 Equivalent strain distribution of annealed TRB specimen during tension

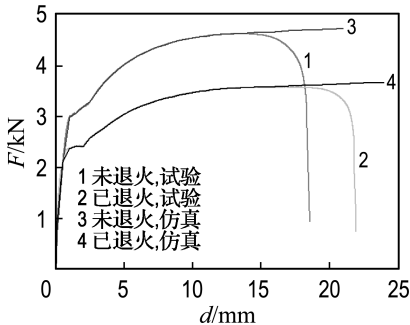


图 8 轧制差厚板拉伸试验与仿真的位移-荷载曲线  
Fig. 8 Displacement and load curve of TRB tension test and simulation

获得了更大的延伸率, 仿真计算出的位移-荷载曲线与试验实测曲线在缩颈出现之前均是非常吻合的, 然而仿真发生缩颈的时间要远远晚于试验, 原因在于试验过程中材料会在缩颈出现的部位很快发生断裂, 而仿真所用的应力应变曲线是通过对试验数据的插值而得到的, 缩颈后的应力应变曲线则是采用了外插值的方法获得。

## 4 结 论

(1) 解析模型能够准确地描述轧制差厚板单向拉伸过程中的应力应变状态。

(2) 退火前后, 轧制差厚板单向拉伸试样的缩颈均发生在试样薄侧, 并且经过退火的轧制差厚板表现出更好的延展性以及成形性能。

(3) 轧制差厚板单向拉伸结果能够通过金相组织分析来进行合理解释, 解析公式、仿真以及试验结果三者有着较好的一致性。

## 参考文献:

- [1] Krux R, Homberg W, Kleiner M. Properties of large-scale structure workpieces in high-pressure sheet metal forming of tailor rolled blanks [J]. *Steel Research International*, 2005, **76**(12):890-896.
- [2] Kopp R, Wiedner C, Meyer A. Flexibly rolled sheet

- metal and its use in sheet metal forming [J]. *Advanced Materials Research*, 2005, **6-8**:81-92.
- [3] LIU Xiang-hua. Prospects for variable gauge rolling: technology, theory and application [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2011, **18**(1): 1-7.
- [4] Kopp R, Wiedner C, Meyer A. Flexible rolling for load-adapted blanks [J]. *International Sheet Metal Review*, 2005(4):20-24.
- [5] 薛松, 周杰, 何应强. 差厚拼焊板成形性的单向拉伸试验[J]. 锻压技术, 2011, **36**(2):30-33.  
XUE Song, ZHOU Jie, HE Ying-qiang. Formability tensile test of different gauge tailor-welded blanks [J]. *Forming & Stamping Technology*, 2011, **36**(2): 30-33. (in Chinese)
- [6] 李艳华, 杜继涛, 费宏斌. 影响 TRB 单向拉伸的几何参数研究[J]. 现代制造工程, 2010(3):83-85, 107.  
LI Yan-hua, DU Ji-tao, FEI Hong-bin. Research of geometric parameters related to TRB uniaxial tension test [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010(3):83-85, 107. (in Chinese)
- [7] 包向军. 变截面薄板弯曲成形回弹的实验研究和数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.  
BAO Xiang-jun. Experimental investigation and numerical simulation of springback in tailor rolled blanks bending [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003. (in Chinese)

# Research on uniaxial tension performance of tailor rolled blank

ZHANG Hua-wei<sup>1,2</sup>, LIU Li-zhong<sup>1,2</sup>, HU Ping<sup>\*1,2</sup>, LIU Xiang-hua<sup>3</sup>

- ( 1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. School of Automotive Engineering, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
3. Research Institute of Science and Technology, Northeastern University, Shenyang 110819, China )

**Abstract:** Uniaxial tension performance of tailor rolled blank (TRB) is studied by means of analytical, simulated and experimental methods, respectively. The analytic model of TRB for uniaxial tension is derived from theory of metal plastic deformation. Uniaxial tension experiments on unannealed and annealed 1.2 mm and 2.0 mm uniform blanks as well as 1.2/2.0 mm TRB are carried out, and the difference in the performance of TRB before and after annealing is explained by metallurgical structure. Then, uniaxial tension processes of unannealed and annealed 1.2/2.0 mm TRBs are simulated on the basis of uniaxial tension experiments. The experimental results indicate that the stress-strain state of TRB during uniaxial tension can be accurately represented by the analytic model. The necking of unannealed and annealed TRB specimens for uniaxial tension both happens at the thinner sides, and the annealed TRB shows better formability. The conclusions drawn by analytical model, simulation and experiment show good agreement.

**Key words:** tailor rolled blank (TRB); uniaxial tension; annealing; interpolation