

某轿车底盘车架弯管弯制过程的起皱缺陷分析与优化

胡 晓, 尹晶晶, 汪创伟, 王飞龙

(攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 针对某轿车底盘车架弯管弯制过程出现的起皱问题, 基于 Autoform 软件 SIGMA 模块分析了材料参数对起皱缺陷的影响, 确定了材料方面对起皱缺陷影响比较敏感的参数, 进而指导材料改进。主要分析了 S355MC 钢酸洗板材料的屈服强度、抗拉强度、 r_{90} 和摩擦因数对起皱缺陷的影响。仿真结果显示: 屈服强度和抗拉强度对弯管起皱缺陷的影响较大, 摩擦因数和 r_{90} 对起皱缺陷几乎没有影响, 降低屈服强度和屈强比对控制起皱缺陷有利。通过加入适量的 Cr 和调整卷取温度等工艺措施, 有效地降低了 S355MC 钢酸洗板材料的屈服强度和屈强比, 平均屈服强度为 374.1 MPa, 平均屈强比在 0.73 以下。通过降低材料的屈服强度和屈强比, 成功地解决了弯管的起皱问题。

关键词: 底盘车架; 酸洗板; 弯管; 起皱; SIGMA 分析

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.017

中图分类号: TG386.43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0112-06

Analysis and optimization on wrinkling defect in bending process for a car chassis frame bending pipe

Hu Xiao, Yin Jingjing, Wang Chuangwei, Wang Feilong

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, PanGang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the wrinkling problem in the bending process of a car chassis frame bending pipe, based on SIGMA module of Autoform software, the influence of material parameters on wrinkling defect was analyzed, and the parameters of material which were sensitive to wrinkling defect were determined, so as to guide the material improvement. The influence of yield strength, tensile strength, r_{90} and friction factor on the wrinkling defect for S355MC steel pickling sheet material was analyzed. The simulation results show that the yield strength and tensile strength have a great influence on the wrinkling defect of bending pipe, while the friction factor and r_{90} have almost no influence on the wrinkling defect. It is beneficial to reduce the yield strength and the yield strength ratio to control the wrinkling defect. By adding an appropriate amount of Cr and adjusting the coiling temperature, the yield strength and the yield strength ratio of S355MC steel pickling sheet material are effectively reduced. The average yield strength is 374.1 MPa, and the average yield strength ratio is below 0.73. By reducing the yield strength and the yield strength ratio of the material, the wrinkling problem of bending pipe is successfully solved.

Key words: chassis frame; pickling sheet; bending pipe; wrinkling; SIGMA analysis

随着市场竞争的加剧, 用户对高性能、低成本钢材的要求越来越高, 因此, 以热轧酸洗板为代表的“以热代冷”趋势迅速发展, 越来越多的轿车底盘车架空心管状结构件采用酸洗板制造, 以满足产品轻量化、强韧化和低耗环保的需求^[1-2]。热轧酸洗板在汽车结构件的制造领域应用广泛, 成功替代了部分冷轧高强度钢和低强度级别钢板。

近些年来, 国内大型钢铁企业均在积极推进热轧酸洗汽车板的应用, 酸洗材料在零件制造过程中也会遇到诸多问题, 在制作底盘车架弯管零件时常常会出现起皱缺陷^[3-5]。弯管起皱的原因主要分为几何因素、工艺因素和材料因素^[6], 对汽车制造企业来说, 结构件的参数和其所用的材质比较固定, 因此, 从几何因素和工艺因素方面来解决起皱问题的限制较多, 例如, 相对管径、弯曲半径等的改变难度较大, 增加管壁厚度虽然能减少起皱缺陷, 但会增加车身重量和制造成本。因此, 在材料厚度、相对管径、弯曲半径等几何因素^[7-9]不能改变且工

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-05-15

作者简介: 胡 晓 (1990-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: hgdiaohu@163.com

艺参数调整无效的情况下，从材料参数的改进着手成为解决起皱缺陷的关键突破口。

材料的性能参数比较复杂，主要有屈服强度、抗拉强度、伸长率、 n 值（加工硬化指数）、 r 值（塑性应变比）等，而且这些参数本身也是相互影响的，如果通过冶金成分、工艺调整来生产不同性能指标的钢板去调试参数，将会耗费大量的时间周期，难以保证项目的正常实施。随着 CAE 技术的发展，汽车钣金制造领域的数值模拟技术得到了广泛的应用^[10]，Autoform 作为汽车行业应用比较广泛的一款 CAE 分析软件，其设有 SIGMA 模块，可以综合分析影响零件起皱缺陷的诸多因素，能快速找出零件产生起皱缺陷的主要因素及影响规律，进而有针对性地制定材料的改进措施，及时解决现场的实际问题。

1 起皱缺陷敏感参数分析

1.1 起皱缺陷表述

某轿车底盘车架前梁采用 S355MC 钢酸洗板材料，在焊接为薄壁圆管后进行数控弯曲，在弯管

内圆角部位出现起皱缺陷（图 1），导致成形质量不达标。现场实施了调整加工速度、夹紧块的夹紧力、润滑等工艺措施，但改善效果不大，依然出现严重的起皱缺陷。

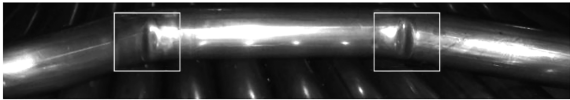


图 1 弯管内圆角位置的起皱缺陷
Fig. 1 Wrinkling defects at fillet position of bending pipe

1.2 有限元模型建立

本文基于 Autoform 软件，根据现场生产工艺参数建立了 S355MC 钢焊管数控绕弯成形过程的三维有限元模型（图 2），焊管外径为 $\Phi 55\text{ mm}$ ，厚度为 3 mm ，该模型由管材、弯曲模、压块、夹块、防皱块和芯棒等组成，建模过程中参考了 Fang J 等^[11]的研究。仿真材料参数见表 1，根据大生产数据统计和问题卷料的性能检测结果，选取材料力学性能均值偏差的数据作为典型值，将其输入 Autoform 软件开展弯管弯制过程的模拟仿真。

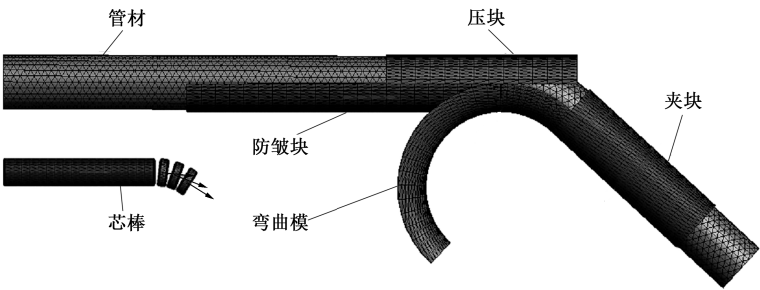


图 2 数控绕弯成形过程有限元仿真模型
Fig. 2 Finite element simulation model of NC bending process

表 1 仿真用材料参数
Table 1 Material parameters for simulation

参数	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 $A/\%$	n 值	r 值		
					r_0	r_{45}	r_{90}
数值	389.0	483.3	17	0.16	0.60	1.15	0.80

仿真结果见图 3，弯管内圆角出现起皱缺陷，起皱区域在成形极限图中的应变路径也呈现起皱缺陷，与现场出现的起皱问题一致。Autoform 软件对起皱准则^[12]的基本定义如式（1）所示：

$$\varepsilon_{wc} = \max \left[- \left(\varepsilon_2 + \frac{R}{1+R} \varepsilon_1 \right), 0 \right] \quad (1)$$

式中： ε_{wc} 为起皱指标； R 为材料平均各向异性指数； ε_1 与 ε_2 分别为主应变和次应变。

根据塑性理论，起皱准则的基本定义为次应变偏离单向拉伸线的距离，如图 4a 所示。然而，在实际成形过程中一般存在非线性应变路径（图 4b），Autoform 软件对起皱准则进行了修正，如式（2）所示：

$$\varepsilon_{wc, total} = \varepsilon_{wc} - \min \left[\left(- \varepsilon_2 - \frac{R}{1+R} \varepsilon_1 \right) \right] = \varepsilon_{wc} + \varepsilon_{wc, history} \quad (2)$$

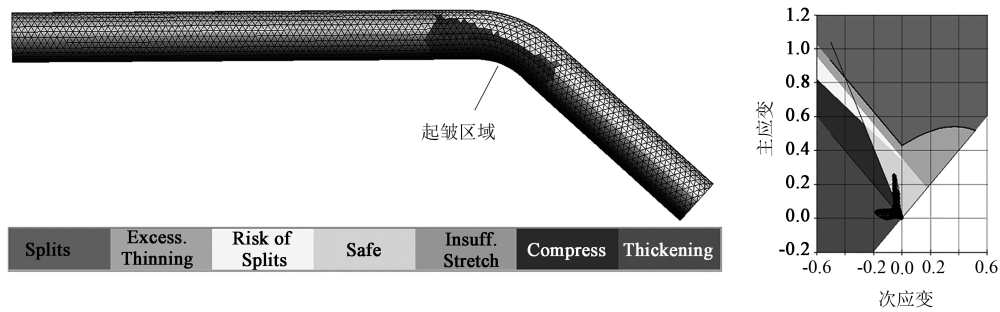


图 3 弯管弯制过程仿真结果

Fig. 3 Simulation results of bending process for pipe

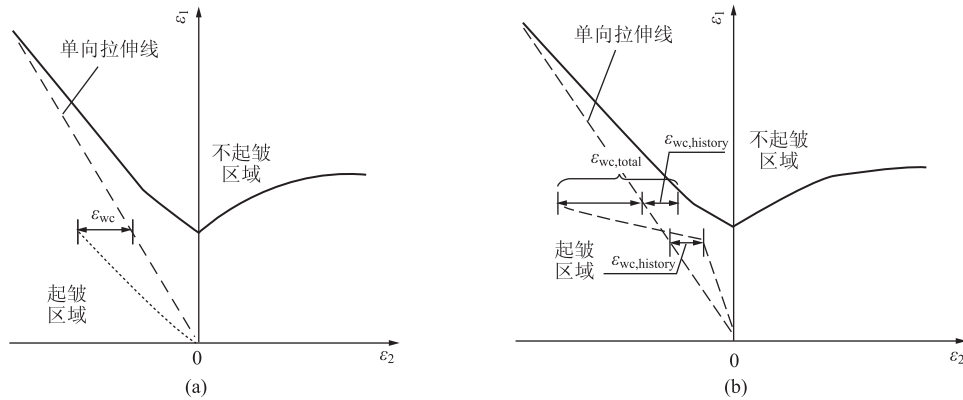


图 4 起皱准则 1 (a) 和起皱准则 2 (b)

Fig. 4 Wrinkling criterion 1 (a) and wrinkling criterion 2 (b)

式中: $\varepsilon_{wc,hist}$ 为非线性应变路径效应产生的起皱指标; $\varepsilon_{wc,total}$ 为叠加非线性应变路径效应的总的起皱指标。

对于有些区域, 比如凸模外边界的反凹圆角处, Autoform 还考虑了板料即时圆角半径 R_{sheet} 与初始板料厚度 T 的比值 (R_{sheet}/T) 对起皱缺陷的影响, 若 R_{sheet}/T 小于 5, 则认为不会产生起皱缺陷, 所以 Autoform 对起皱准则再一次修正, 如式 (3) 和式 (4) 所示, ρ_{eq} 与 R_{sheet} 的关系如图 5 所示。

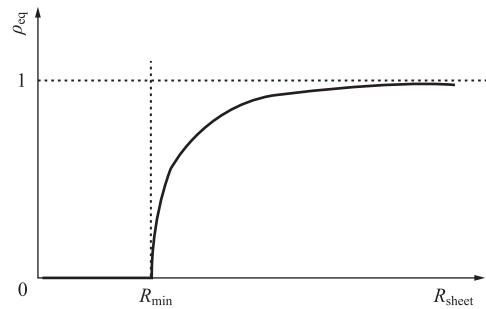
$$\varepsilon_{wc,total} = \rho_{eq} \left\{ \varepsilon_{wc} - \min \left[\left(-\varepsilon_2 - \frac{R}{1+R} \varepsilon_1 \right) \right] \right\} \quad (3)$$

其中,

$$\rho_{eq} = 1 - \min \left(1, \left(\frac{R_{min}}{R_{sheet}} \right)^2 \right) \quad (4)$$

式中: R_{min} 为最小半径, 即 5 倍的初始板料厚度; R_{sheet} 为板料的即时圆角半径 (该数值在成形过程中是变化的); ρ_{eq} 为修正系数。

根据 Autoform 软件起皱准则对 S355MC 钢弯管过程的起皱缺陷进行评价 (图 6), 对于弯管内圆角单侧接触弯曲模区域, 若软件给出推荐的判断值是 0.02 以上, 则有起皱的可能。仿真结果显示, 弯管

图 5 ρ_{eq} 与 R_{sheet} 的关系Fig. 5 Relationship between ρ_{eq} and R_{sheet}

内圆角起皱指标的最大值达到 0.053372, 表明实际可能发生严重的起皱缺陷。

1.3 材料敏感参数分析

针对 S355MC 钢酸洗材料弯管的起皱缺陷, 基于 Autoform 软件 SIGMA 分析模块, 设置可能影响起皱缺陷的材料参数: 屈服强度 R_m 、抗拉强度 R_{eL} 、90°方向的 r_{90} 和摩擦因数, 根据大生产性能数据设置不同变量的波动范围, 屈服强度的波动范围为 340 ~ 467 MPa, 抗拉强度的波动范围为 480 ~ 569 MPa, r_{90} 的波动范围为 0.64 ~ 0.96, 摩擦因数



图 6 起皱准则评价结果

Fig. 6 Evaluation result of wrinkling criterion

的波动范围为 0.135~0.165（一般默认摩擦因数为 0.150，波动范围按±10%设置）。其中，屈服强度与抗拉强度存在依赖关系，软件设置 Dependent 关联，其他参数为独立变量。

图 7 显示了材料参数对弯管过程产生起皱缺陷的影响程度。Autoform 软件会对仿真分析结果的正确性进行评判，由 SIGMA 的分析结果显示，起皱位置的 Controlled（受控值）为 95.44%，基本接近 100%，表明此处起皱缺陷的影响因素参数设置比较全面，模拟仿真的数量足够，因此，仿真结果是正确、可信的。由图 7 可见，屈服强度对弯管起皱缺陷的影响比例约占 77%，抗拉强度对弯管起皱缺陷的影响比例约占 14%，摩擦因数和 r_{90} 对起皱缺陷几乎没有影响。可以得知，控制弯管的起皱缺陷主要应从屈服强度入手，其次为抗拉强度。

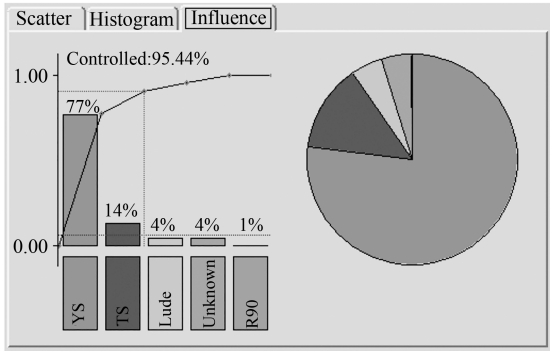
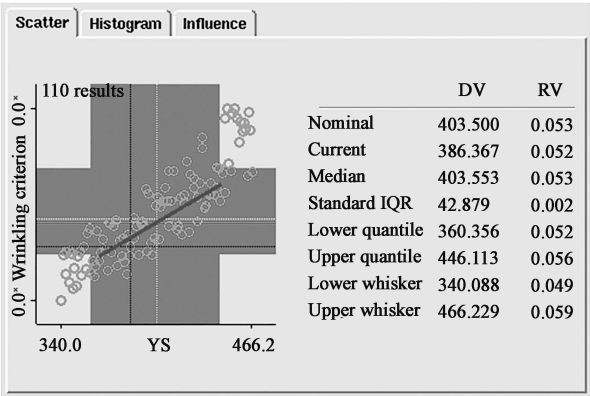


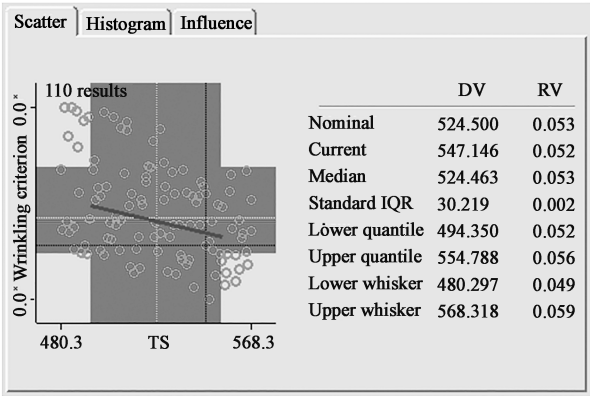
图 7 不同参数对起皱缺陷的影响

Fig. 7 Effect of different parameters on wrinkling defect

图 8 为屈服强度和抗拉强度分别对弯管起皱缺陷的影响规律图，纵坐标为起皱准则，其数值越大，起皱趋势越严重，其中，DV 为变量（屈服强度或抗拉强度）的取值，RV 为起皱指标，其他参数均为 SIGMA 分析的常规取值（从上到下分别为标准计算值、当前值、中值、标准差、下分位点、上分位点、下界限、上界限）。由图 8a 可知，屈服强度对起皱缺陷的影响呈正相关，即屈服强度越低，越不易起皱；由图 8b 可知，抗拉强度对起皱缺陷的影响呈负相关，即抗拉强度越高，越不易起皱。屈服强度和抗拉强度相互影响，在实际材料优化过程中可考虑降低屈强比，达到降低屈服强度同时提升抗拉强度的目的。



(a)



(b)

图 8 屈服强度 (a) 和抗拉强度 (b) 对起皱缺陷的影响

Fig. 8 Effects of yield strength (a) and tensile strength (b) on wrinkling defect

从材料的塑性力学角度分析可知，起皱缺陷是由于板料厚度方向受压而产生的，对于弯管过程，弯管内侧受切向压应力，切向压应力越大，越容易发生起皱缺陷。屈服强度为材料发生塑性变形的初始应力，屈服强度越低，弯管内侧越早发生塑性变

形，弯管内侧产生的变形抗力越小，切向产生的压应力越小，有利于改善起皱缺陷。屈强比越小，意味着在同等屈服强度下，抗拉强度越高，材料变形的硬化效果越好，弯管内侧材料越容易发生均匀变形，对控制起皱缺陷有利。

2 材料性能改进

2.1 材料改进思路

基于上述研究,降低屈服强度和屈强比对控制起皱缺陷有利,材料的屈服强度和屈强比通常通过成分和工艺来控制。

在成分控制方面,Cr是唯一能够降低屈服强度的元素,相关研究^[13]表明,每1%质量的Cr可以使钢板的屈服强度降低约30 MPa。另外,Cr是中等碳化物形成元素,在所有碳化物中,铬碳化物是最细小的,可均匀分布在钢基体中,使组织细化而均匀,确保钢材具有良好的塑韧性。所以,成分优化思路为:采用适量的Cr,以降低钢的屈服强度和屈强比。

在工艺控制方面,主要通过合理调节卷取温度等措施来调节微观组织进而实现降低屈强比的目的。

2.2 材料改进结果

通过成分优化和工艺调整,工业化生产了181卷S355MC钢酸洗汽车板,厚度均为3.0 mm。开展力学性能统计分析,其极大值、极小值以及均值等的统计结果见表2,力学性能满足技术要求,控制稳定,屈强比均 ≤ 0.80 ,均值在0.73以下。

表2 力学性能统计结果

Table 2 Statistical results of mechanical properties

参数	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	屈强比
极小值	355	495	28.5	0.71
极大值	402	534	40.5	0.75
均值	374.1	513.3	34.6	0.73
技术要求	≥ 355	430~550	≥ 23	

材料改进前后性能参数的均值对比结果见表3,改进后的S355MC钢材料的性能优良,具有更低的屈服强度和屈强比。

表3 材料改进前后性能对比

Table 3 Performance comparison before and after material improvement

参数	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	屈强比
改进后	374.1	513.3	34.6	0.73
改进前	409.0	461.0	38.0	0.89

2.3 应用情况

通过成分控制和工艺调整对S355MC钢材料参数进行了优化,改进后的材料在用户现场进行试制,

无前期出现的起皱缺陷,通过连续半年的生产跟踪,生产质量稳定,证明材料的改进方向正确,成功解决了弯管的起皱问题(图9)。目前已批量应用于某合资品牌轿车底盘B类安全结构件(图10),并且可以向同平台其他车型的同类零件推广应用。

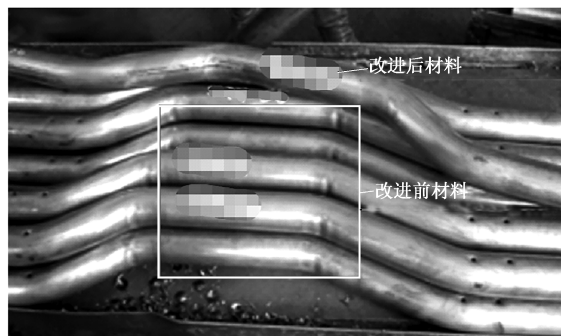


图9 材料改进前后制造的弯管件对比

Fig. 9 Comparison of bending pipes made before and after improvement of materials

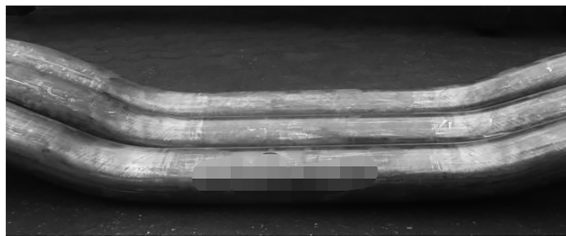


图10 采用改进后的S355MC钢酸洗板制造的B类安全结构件

Fig. 10 Class B safety structural parts manufactured by improved S355MC steel pickling sheet

3 结论

(1) 造成弯管起皱的因素有几何因素、工艺因素和材料参数,在几何因素不能改变和工艺参数调整无效的情况下,调整材料参数是解决弯管起皱缺陷的有效措施。

(2) 基于Autoform软件SIGMA模块分析材料参数对弯管起皱缺陷的敏感性,分析结果表明,屈服强度和抗拉强度对起皱缺陷的影响较大,在实际材料改进过程中降低屈服强度和屈强比对控制起皱缺陷有利。

(3) 通过加入适量的Cr和调整卷取温度的工艺措施,成功地降低了材料的屈服强度和屈强比,平均屈服强度为374.1 MPa,平均屈强比在0.73以下,成功地解决了弯管的起皱问题。

参考文献:

- [1] Hartl C. Research and advances in fundamentals and industrial ap-

- plications of hydroforming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167 (2/3): 383-392.
- [2] Manabe K I, Amino M. Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydro-forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123: 285-291.
- [3] 韩兆建. 金属薄壁管材充液弯曲工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- Han Z J. Research on Liquid-filled Bending Process of Metal Thin-walled Pipes [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [4] 车移, 詹红, 屈俊岑, 等. 基于全量流动理论的管材弯曲过程失稳分析研究 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (3): 112-117.
- Che Y, Zhan H, Qu J C, et al. Analysis on instability in tube bending process based on total theory of plasticity [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (3): 112-117.
- [5] 曹国富. 弯管异常起皱的成因分析 [J]. 焊管, 2012, 35 (11): 40-44.
- Cao G F. Analysis on reasons caused by bend abnormal wrinkle [J]. Welded Pipe and Tube, 2012, 35 (11): 40-44.
- [6] 戴莉, 方军, 程璐, 等. 材料参数对高强不锈钢管数控绕弯成形失稳起皱的影响 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (1): 91-95.
- Dai L, Fang J, Cheng L, et al. Effects of material parameters on wrinkling of high-strength stainless steel tube in numerical control rotary draw bending [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (1): 91-95.
- [7] 林艳, 杨合, 李恒, 等. 薄壁管数控弯曲过程中失稳起皱的主要因素 [J]. 航空学报, 2003, (5): 456-461.
- Lin Y, Yang H, Li H, et al. Influences of forming parameters on wrinkling in NC thin-walled tube bending [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, (5): 456-461.
- [8] 方军. 21-6-9 高强不锈钢管数控绕弯成形规律研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- Fang J. Study on Forming Rules of 21-6-9 High-strength Stainless Steel Tubes in NC Rotary Draw Bending Process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [9] 李恒. 薄壁管数控弯曲成形过程失稳起皱及成形极限的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- Li H. Research on Wrinkling and Forming Limit of NC Bending Process of Thin-walled Tube [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [10] 张博凡, 王增强. Autoform Sigma 模块在汽车后盖内板模具调试中的应用 [J]. 模具工业, 2014, 40 (7): 40-42.
- Zhang B F, Wang Z Q. Application of Autoform Sigma in the try-out of die for automotive decklid inner plate [J]. Die & Mould Industry, 2014, 40 (7): 40-42.
- [11] Fang J, Lu S Q, Wang K L, et al. Three-dimensional finite element model of high strength 21-6-9 stainless steel tube in rotary draw bending and its application [J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2015, 22 (2): 142-151.
- [12] 涂小文. AutoForm 原理技巧与战例实用手册 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2013.
- Tu X W. Practical Manual of AutoForm Principles, Skills and Examples [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2013.
- [13] 雍岐龙, 马鸣图, 吴宝铭. 微合金钢——物理和力学冶金 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- Yong Q L, Ma M T, Wu B R. Microalloyed Steel—Physical and Mechanical Metallurgy [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.

AFDEX

INTELLIGENT METAL FORMING SIMULATOR

智能化金属成形模拟软件

◆**易用**: 简单、友好, 且在不断优化的操作界面, 大量的学习向导以及应用实例, 使工程师不但上手轻松, 更不会在使用中气馁, AFDEX 可以帮助您轻松分析锻造工艺。

◆**准确**: 超过 500 个实际生产应用案例, 包含复杂的冷温热多工位锻造、闭塞锻造、径向锻造、辊锻、辗环等几乎所有锻造成形工艺的模拟。AFDEX 的准确性和能力, 已经在全球百余家制造企业的生产中得到了验证。

◆**各种结果同时展示**: AFDEX 的后处理平台, 可以在运算的同时, 实时显示各种结果: 变形形状、节点的速度、应变、应变率、应力、金属流线、某点流动、边界节点应力、界面应力、温度分布、损伤、磨损、体积变化、载荷等。

◆**自动分析多工步工艺, 轻松进行模具分析**: AFDEX 可以自动对多工位的锻造工艺进行模拟, 无需用户的干预。模具分析与优化是工程师的重要工作, 在 AFDEX 中, 您只需要点击两下鼠标, 即可以对模具进行模拟分析, 结果实时展示给用户。

◆**丰富的材料库与设备模型**: AFDEX 中提供了丰富的开放式材料数据库, 包括美日德标的各种黑色金属、轻合金以及模具钢等两百余种材料数据。用户也可根据自己的需要定制材料库。另外, AFDEX 集成了实际生产中常用的设备模型, 包括液压机、机械压力机、螺旋

压力机、锻锤等。可以满足用户各种成形条件下模拟的需要。

◆**适合多种人群使用**: AFDEX 不强迫锻造工程师了解软件执行的相关理论和有限元方法, 在 AFDEX 的开发理念中, 即使是新手也能轻松的学习和使用它。同时 AFDEX 提供了多国语言界面的支持。

◆**卓越的成本效益**: AFDEX 更了解中国, 专为中国用户而制定的低成本运作政策, 显著降低了用户的采购及使用成本, 具有卓越的成本效益。

◆**我们能够提供的不仅是软件**: AFDEX 一直坚持的开发商与服务商一体化, 可以提供更好的本土化服务与定制服务。中韩技术团队, 为您提供终身的维护服务。在软件之外, 我们更可以为您提供工艺技术开发与制造服务, 协助您进行工艺开发、优化设计、学术研究、装备与生产线建设。

BRIMET 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司

地址: 北京市海淀区学清路 18 号 2 层 邮编: 100083

电话: 010-82415037, 82415024 传真: 010-62943911

E-mail: info@afdex.com.cn, afdexcn@gmail.com

HTTP://WWW.AFDEX.COM.CN

(以上数据和资料由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司提供)