

TA18 管材三辊冷轧三维有限元模拟

3D Finite Element Simulation of Three-Roller Cold Rolling Process

中国科学院金属研究所 吴圣华 张士宏 程 明
北京航空材料研究院 张旺峰

[摘要] 应用有限元软件 Msc.Marc 对 TA18 管坯三辊冷轧过程进行了三维有限元模拟,获得了三辊冷轧管过程中瞬时变形区接触规律、坯料质点在轧制过程中的运动轨迹、摩擦力和剪应力的周向分布以及金属管坯从进入变形区到出变形区各阶段的变形规律。

关键词: 冷轧 TA18 有限元模拟

[ABSTRACT] The instantaneous contact rules at the deformation zone during three-roller cold rolling process, the motion trace of blank particles during rolling, the circumferential distribution of friction force and shear stress and deformation rules of metal tube at the each stage from going into to out of the deformation zone are obtained by analysis.

Keywords: Cold rolling TA18 Finite element simulation

TA18 合金是一种近 α 型钛合金,名义成分为 Ti-3Al-2.5V。该合金优异的综合性能使其在飞机和发动机液压和燃油等管路系统中得到了广泛应用。但由于 TA18 合金变形抗力较大,加工硬化强烈,易开裂,因此管材加工难度大。目前,国内主要是通过两辊初轧、三辊冷轧的方式生产这种合金管材^[1-3]。

三辊冷轧管(也称 LD 冷轧)是无缝管的一种成形工艺,适合加工塑性较低、尺寸较小的管坯,可以提高产品的机械性能和尺寸精度,并具有设备简单和零件更换容易的优点,因此在航空航天、化学、核能装置等行业管材产品加工中得到了广泛的应用,其材料涉及不锈钢、高温合金、钛合金、锆合金等^[4-7]。

周期式冷轧管工艺具有独特的工艺特点和灵活的生产方式,在生产特大口径、特厚管壁、表面光洁度高以及高强度、低塑性的无缝管等方面占有其他轧管工艺不可替代的地位。因此,70 多年来许多科研工作者一直致力于对周期式轧管变形过程和轧制工艺的研究。早期,前苏联一些专家在管坯的变形能力、工具设计和工艺改进等方面做了许多工作。随后,Yoshida

等^[8]用网格法分析了两辊冷轧管过程中管坯变形的应变、应力等参数。由于试验方法研究管坯的轧制变形较为困难,工作量大,而且所得结果不够准确,且有一定的局限性,为此,Siebel、Neumann^[9]以及 Geleji^[10]等在板材轧制模型的基础上分别建立了两辊冷轧管工艺在变形过程中数学计算的方法。近年来,随着计算方法的不断改进及计算机硬件性能的迅速提高,John Martin^[11]和 Montmitonnet^[12-13]等人尝试用商业软件 Forge 3 对两辊冷轧管工艺进行有限元模拟,得到了一个周期轧制过程中的轧制力曲线、扭矩曲线、应力曲线等分布规律。但由于其有限元模型中管坯的变形区是绘制出来的,因此,其模型在反映冷轧管变形规律上存在着许多局限性。

本课题采用大型有限元软件 Msc.Marc,对 TA18 管材三辊冷轧工艺进行了三维弹塑性有限元模拟。模拟管坯从进入变形区到出变形区的整个轧制过程,分析得到了轧辊与管坯的接触规律、坯料质点的运动轨迹,并且仔细分析了管坯在轧制变形区各阶段的变形规律,对工艺设计和实际生产具有指导意义。

1 有限元模型的建立

1.1 简化和假设

三辊冷轧管成形过程主要的接触边界条件包括套筒与滑道、滑道与轧辊辊径以及轧辊轧槽与管坯之间的接触。如果建立一个完全真实的力学模型就会使计算变得非常复杂,甚至难以正确地模拟成形情况,应进行必要的简化。

(1)模型简化。

由于滑道是固定在套筒上的,其运动状态与套筒的运动状态完全一致,都是由摇杆、大连杆机构的运动所决定的。轧辊的转动则是靠来自滑道的摩擦力的作用来实现的。如果轧辊沿滑道滑动而不滚动,则可能出现管子被拉断或轧辊被卡住的现象,因此,在进行管坯轧制前会调节大、小连杆之间的位置,使轧辊辊径恰好在滑道工作曲面上发生纯滚动,且其滚动速度与大、小连杆之间速度差匹配。而滑道的工作曲面

则控制轧辊的压下量。因此在建立模型时,忽略套筒、滑道、轧辊辊径之间的运动规律,直接将该轧制过程简化为轧辊对管坯的轧制过程,轧辊的运动规律则从大、小连杆的运动关系以及辊径和轧槽之间的关系计算得来。图1为三辊冷轧管三维有限元模型。

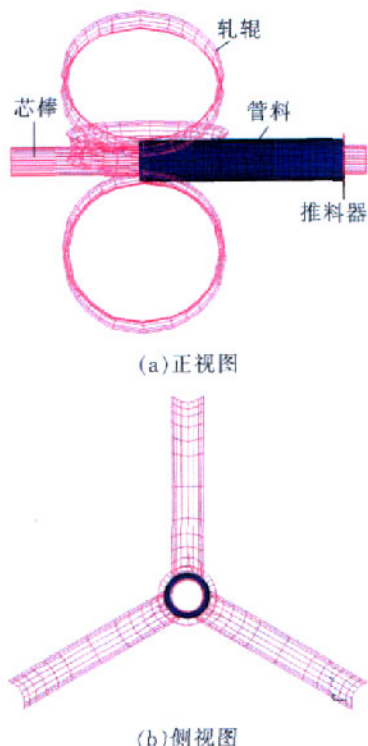


图1 三辊冷轧管三维有限元模型

Fig.1 3D finite element model of three-roller cold rolling process

(2)运动方式的简化。

将轧制过程中的喂料装置简化为一个推料器,在轧辊轧制管坯过程中实现对管料一端的固定,当轧辊运动到后极限位置时又实现对管料的送进和回转。由于在三辊冷轧管过程中,正行程结束后并没有管料的回转送进,在反行程轧制过程中,管坯只发生弹性变形。因此,在建立模型时,忽略轧辊的反行程轧制过程。但为了实现轧制过程的周期连续性,我们直接设定一个时间步,将各轧辊在完成正行程轧制后直接运动到后极限位置,而后推料器旋转送进,如此往复,完成多道次行程的周期轧制。

1.2 模型参数设置

该有限元模拟中所用的初始管料尺寸为 $\phi 9.2\text{mm} \times 1.1\text{mm}$,成品管尺寸为 $\phi 8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$,轧辊、芯棒的几何参数均参考实际工况。轧辊的压下制度则

是根据滑道工作曲线转化而来的。图2是一次正行程轧制过程中的压下量-时间曲线。其他工艺参数如表1所示。

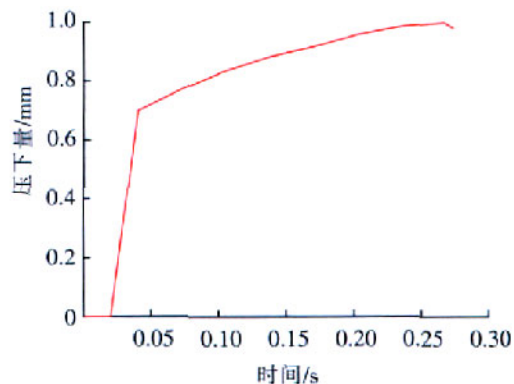


图2 一次正行程轧制过程中轧辊的压下量-时间曲线

Fig.2 Press-time curve of rollers during one forward stroke

表1 三辊冷轧管工艺参数

送进量/ ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	轧辊回转角/ ($^{\circ}$)	机架行程次数/ 次每分	辊径/ mm
2	1.265 3	100	22

计算中采用更新的 Lagrange 算法、Prandtl-Reuss 流动方程以及 Von Mises 屈服准则处理三辊冷轧过程大变形成形问题。选择 8 节点 6 面体等参单元划分有限元网格。轧辊与轧件之间采用反正切摩擦模型,TA18 管坯的室温泊松比为 0.39,密度为 $4.47\text{g}/\text{cm}^3$,退火管材室温的弹性模量为 96.3GPa 。TA18 的材料本构关系可以通过 Gleeble 压缩试验经摩擦鼓肚修正之后得到,其曲线如图3所示。

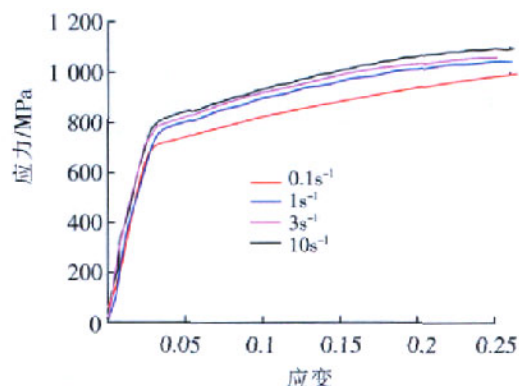


图3 TA18管坯的应力应变关系

Fig.3 Relationship between stress and strain of TA18 tube

2 结果分析和成形规律讨论

2.1 轧制接触区域

图4是轧制变形区中轧辊轧槽与管坯接触的摩擦力矢量分布图。从图4(a)摩擦力矢量分布区域可以很明显地看出:在轧制过程中,轧辊轧槽与管坯的接触区域呈“鱼尾”状。这与理论计算所得的形状类似。只是理论计算是在假定后边界线是平面曲线(即处在机架中心面内)的情况下计算得到的,事实上后边界曲线是一条空间曲线,这在我们的计算结果中得到了验证。由于在瞬时变形区内轧槽工作表面上的各点和金属的不同截面,都按其本身特有的运动规律作着轴向运动,因此,在接触面上,只有一些轧辊上特定的点和金属具有相同的轴向速度,没有滑移,而其他各接触点和金属的轴向速度不同,存在滑移。轧辊和金属具有相同轴向速度而无滑移的点的连线成为中性线。以中性线为界凡

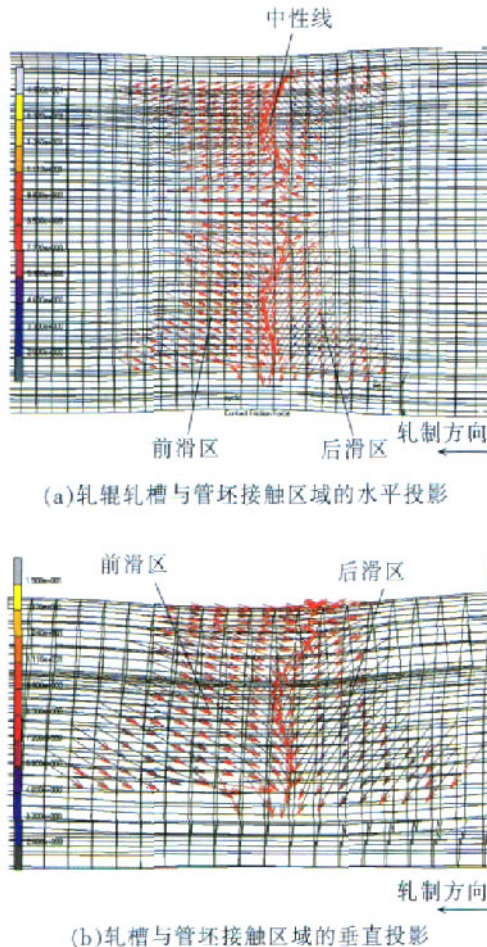


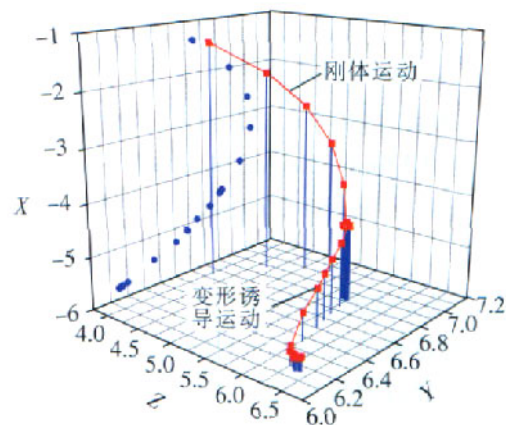
图4 轧制变形区轧槽与管坯接触摩擦力矢量分布图

Fig.4 Vector distribution of contact friction between rolled slot and tube at rolling deformation zone

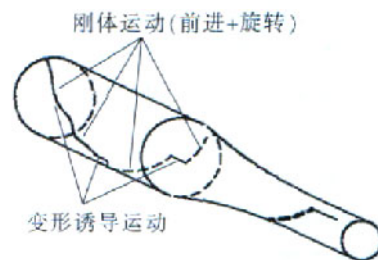
金属轴向流动速度大于轧辊轴向速度者属前滑,反之属后滑。从图中右下角箭头所标示的轧制方向与各处的接触摩擦力的矢量方向可以很容易地看出轧制瞬时变形区的前滑区、后滑区以及中性线。而且从轧槽脊部到轧槽侧壁处,中性线先向前而后向后,这主要是因为轧槽截面各处的轧制半径不同,从脊部到侧壁处,轧制半径逐渐增大。因此,轧槽向前移动的速度也就越大,中性线也就向前移动,但由于在轧槽侧壁处轧辊对金属管坯的压下量最大,因此,该处金属轴向流动的速度也就最大,由此导致了中性线的后移。

2.2 轧制过程中坯料运动轨迹

图5(a)是一道次正行程轧制坯料上一质点的运动轨迹。图中,左侧散点曲线是运动轨迹曲线在X-Y平面(也即管坯横截面)上的投影。可以看出:在一道次轧制过程中,坯料上金属的运动主要由2部分组成,一是图中刚体回转送进引起的圆弧段。另一部分是由轧槽压下造成金属变形引起的运动。而在两个轨迹的交接处集中了许多点,这主要是因为刚体回转送进后轧槽未与参考金属质点接触前,金属将不发生流动。同理,当轧槽离开参考金属较远时,轧槽对远处金属压下造成的变形不足以波及该处,以致于在图5(a)



(a)一道次正行程轧制坯料上一质点的运动轨迹



(b)金属在轧制过程中的运动轨迹示意图

图5 坯料质点运动轨迹

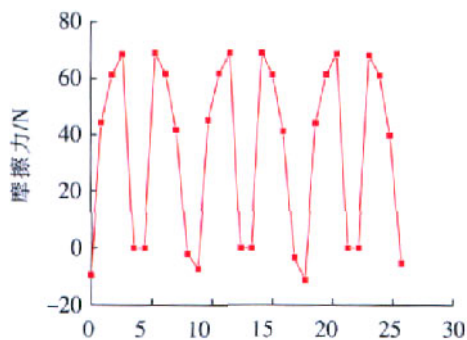
Fig.5 Motion trace of blank particles

一道次轨迹线的末端也集中了许多点。图 5(b)是金属质点从进入变形区到出变形区的运动轨迹示意图。从图中可以看到,金属质点从进入变形区到出变形区经过多次旋转送进、压下。如果将这些轨迹点都投影到横截面圆周上,可以很清楚的看出,金属质点几乎经历了圆周上的每一个位置,这也使管坯在经历了多道次的轧制后管坯各处变形更加均匀。

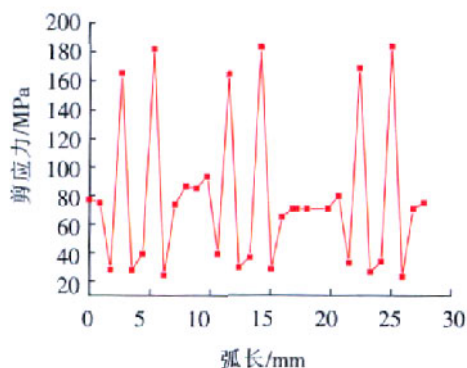
2.3 摩擦力和剪应力分布

Girard^[4]等在研究冷轧 Zircaloy-4 合金管坯损坏原因过程中发现 σ_{rz} 是产生管坯损坏的主要原因。因此,研究轧制过程中剪切变形规律对于指导实际生产有重要意义。

图 6 是三辊冷轧管过程中周向摩擦力和剪应力分布,如果将与轧辊接触的部分对应的扇形区域称为压下区,将与辊缝对应的扇形区域称为辊缝区,则从图 6(a)中可知,摩擦力主要集中在与轧槽侧壁接触的部位。而在辊缝处和轧槽轧制等效半径处摩擦力为零。这是由于在辊缝处轧槽未与管坯接触,而在轧槽轧制半径处的金属流动速度与轧槽速度相同,没



(a) 摩擦力分布



(b) 剪应力分布

图 6 摩擦力和剪应力周向分布曲线

Fig.6 Circumferential distribution of friction and shear stress

有相对滑动。因此,在这些部位摩擦力也为零。从图 6(b)周向剪切应力的分布曲线中可知,冷轧过程中剪应力主要集中在轧槽侧壁接触的部位和轧槽脊部,这与摩擦力的分布规律一致。从这个结果中可以看出,剪应力可能主要是由摩擦力引起的。因此,可以在轧制过程通过改善摩擦的方式来减小剪应力的产生,防止由于剪应力引起的缺陷。

2.4 管坯在变形区各阶段的变形规律

三辊冷轧是一个复杂的轧制过程,管坯从进入变形区到出变形区先后经过减径、逐次减壁以及定径各阶段。为了清楚地理解金属管坯从进入变形区到出变形区的变形规律,我们分析讨论了一个截面经过 3 个典型位置时截面形状变化:一个位置是管料与轧槽接触但未与芯棒接触,也即减径区;二是管料与芯棒接触的瞬时区域,也即初始减壁区;三是管坯刚出变形区。

(1) 减径区变形规律。

图 7 是待研究截面在减径过程中遭到轧辊压下时所形成的截面形状。从截面形状的变化可以看出,轧辊轧槽侧壁处金属内表面与芯棒之间的间隙最小,而在轧槽脊部处金属与芯棒间隙稍大些,在辊缝处金属与芯棒之间的间隙最大。这主要是因为轧辊的侧壁轧槽首先与管坯接触造成较大的径向压下,随着压下量的增大,轧槽与管坯的接触面积逐渐增大并逐步向脊部处推移。这就造成了轧槽对金属管坯的压下量沿着轧槽截面轮廓呈梯度变化,其与芯棒之间间隙也就自然呈梯度变化。对于在辊缝处的金属坯料由于没有与轧槽任何部位接触,因而轧槽不会对其产生直接的压下作用,反而由于与其邻近位置处(轧槽侧壁处)减径量最大造成一部分金属向约束较小的辊缝处流动,形成了如图所示的凸耳。

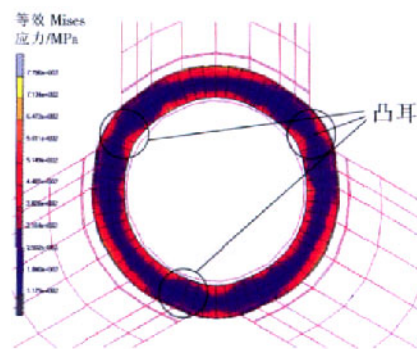


图 7 减径区截面形状

Fig.7 Shape of cross-section at diameter reducing position

(2)初始减壁区变形规律。

图8(a)是该截面经减径轧制后回转72.5°、送进2mm后待研究截面在未受到轧槽压下前的截面形状,从中可以看出,前一行程压下所形成的凸耳经回转送进后已经到了轧槽脊部附近,但并不在轧槽正中处。图8(b)是经初期大压下减壁后得到的管坯截面形状。从图中可以看到,管坯内表面均与芯棒完全接触。前一行程中所形成的凸耳在本次轧制过程中已经完全被轧平。在侧壁处管坯壁厚明显偏小,而在辊缝处的壁厚最大,形成一个很明显的凸耳,而且这个凸耳的高度比减径时期形成的凸耳大的多。这主要是因为大减壁过程中,与轧槽接触的金属遭到轧槽的压下,壁厚减薄,压下的金属除了发生轴向流动而使管坯轴向延伸外,还有一部分金属向约束较弱的辊缝处流动使得金属堆积挤压,并对外流动形成凸耳。单位长度上金属所受到的压下量越大,金属向辊缝处流动的量越多,凸耳的高度就越大。而凸耳的形成对轧制出壁厚均匀,性能优良的管材不利,尤其是当单位长度上

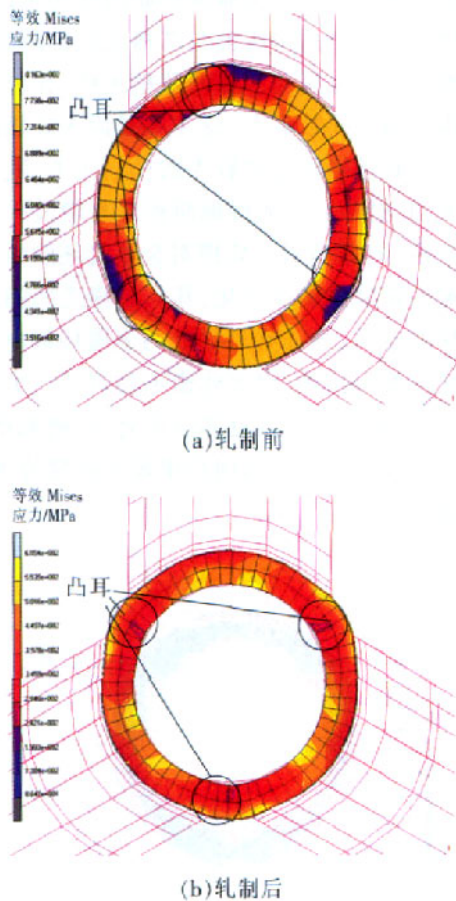


图8 初始减壁区截面形状的变化

Fig.8 Change of cross-section at the beginning of wall-thickness reducing zone

金属压下量过大时,辊缝处会形成很高的凸耳,在下一行程旋转送进后受到轧槽压下时容易产生轧折而使管坯报废。

(3)刚出变形区时变形规律。

图9是管坯经过多次回转送进轧制后待研究截面刚出变形区时的截面形状。从图中可以看到截面在变形区完成多次回转送进轧制后,其形状基本为圆形,没有明显的凸耳存在,管坯各处的壁厚均匀。

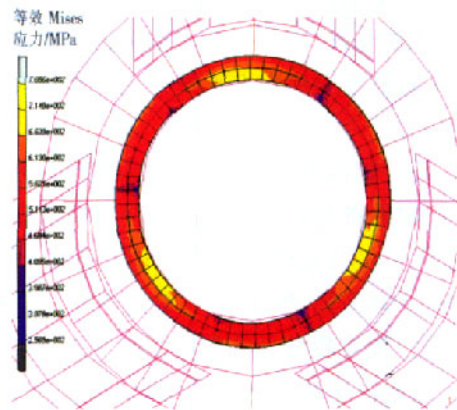


图9 刚出变形区时截面形状

Fig.9 Shape of cross-section after leaving the deformation zone

3 结论

(1)通过模拟分析得出:三辊冷轧管过程中瞬时接触区域的形状呈“鱼尾状”,并给出了前滑区、后滑区以及中性线在管坯周向的分布特点,即从轧槽脊部到辊缝处中性线先向前而后向后偏移,而且轧辊与管坯的接触面积逐渐增大。

(2)通过提取轧制过程中一节点的径向、周向以及轴向上的位移,得到了轧制过程中坯料上一点的运动轨迹,掌握轧制过程中坯料的运动规律,可用于合理控制轧管表面精度和光洁度。

(3)对比分析了冷轧过程中摩擦力和剪切应力的周向分布,得出了轧制过程中剪应力 σ_{rz} 的产生主要是由管坯与轧槽的摩擦引起的。

(4)仔细分析了待研究截面经过轧制变形区各阶段的截面形状变化规律,这对于实际生产以及工艺优化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] 孙晓林,石军.工业纯钛管的生产试制.特钢技术,1996(2):39-41. (下转第88页)

交互指定待加工的零件和毛坯模型、分层深度、加工精度要求和排序原则等,其余的包括加工区域设置、加工顺序安排、加工刀具及切削用量选取等设计工作均可由系统自动完成,从而大大简化设计过程,明显减少交互工作量,显著提高设计效率。图7(c)为(a)零件在快速数控编程系统中生成的数控加工程序,粗加工采用 $\phi 50$ 的刀具加工左边的14个槽及外轮廓,右半部分则采用 $\phi 20$ 的刀具加工,并采用 $\phi 16$ 和 $\phi 12$ 的刀具进行精加工,满足实际加工要求。

4 结论

飞机整体壁板作为现代飞机结构中重要而复杂的一类零件,数控程序编制的效率和时间是影响其加工效率和质量的一个关键因素。为此本文研究了飞机整体壁板智能数控编程方法。其特点是将专家系统等智能技术引入到现有的CAM系统中,减少了对编程人员经验的依赖,提高了系统的智能化和自动化。但完全智能化也是难以实现的,因而开发过程中结合实用化,为用户提供了交互修改功能。根据系统结构、算法及实例验证,得出如下结论:

(1)广义槽加工单元分层识别解决了数控程序编制中自动获取加工区域的问题;

(2)在切削数据库及知识库的支持下能够完成刀具自动选取;

(3)能够自动安排工序工步顺序。

本课题就数控智能编程相关技术作了一定的探索,但仍有大量工作有待于进一步研究,包括:

- (1)进一步研究切削变参数优化选取方法;
- (2)研究和建立工步优化排序算法;
- (3)进退刀下刀点自动确定。

参 考 文 献

[1] 范玉青. 航空宇航制造工程:飞行器制造技术. 重庆:重庆出版社,2001.

[2] Balic J, Korosec M. Intelligent tool path generation for milling of free surfaces using neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42 (10): 1 171-1 179.

[3] Lian Ding, Yong Yue. Novel ANN-based feature recognition incorporating design by features. *Computers in Industry*, 2004, 55(2): 197-222.

[4] Rahmani K, Arezoo B.A hybrid hint-based and graph-based framework for recognition of interacting milling features. *Computers in Industry*, 2006, 58(4): 304-312.

[5] Yao Zhiyang, Satyandra K, Gupta, et al. A Geometric algorithm for finding the largest milling cutter. *Journal of Manufacturing Processes*, 2001, 3(1): 1-16.

[6] Liu Zhenkai, Wang Lihui. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning. *Computers in Industry*, 2007, 58(4): 295-303.

[7] 潘双夏,冯培恩,周生祥. 加工特征排序及NC代码映射. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, 12(2): 90-95.

(责编 微凉)

~~~~~

(上接第82页)

[2] 谢群良,汪建林. 工艺对Ti-3Al-2.5V钛合金无缝管的表面和性能的影响. *上海钢研*, 2002(2): 9-14.

[3] 杨英丽,张树启,张鹏省. Ti-3Al-2.5V合金的热稳定性研究. *钛工业进展*, 2000(5): 33-35.

[4] 李连诗,韩观昌,邢维基. 钢管变形原理. 北京:冶金工业出版社,1989.

[5] 李耀群. 周期式冷轧管机的发展. *钢管*, 2002, 31(4): 1-8.

[6] 张国平,朱旭. 我国两辊式冷轧管的发展回顾与展望. *有色金属加工*, 1997, 143(5): 1-5.

[7] 杜厚益编译. 新型周期式冷轧管机. *钢管*, 1998, 27(4): 61-62.

[8] Yoshida H, Matsui T, Otani T, et al. Experimental investigation of the cold pilgering of tubes. *Annals CIRP*, 1975, 24: 191-197.

[9] Siebel E, Neumann F W. Das Kaltpilgern von Rohren-versuchergebnis und Untersuchungen über dem Walzvorgang. *Stahl und Eisen*, 1954, 74(3): 139-145.

[10] Geleji A. Die Berechnung der Kräfte und des Leistungsbedarfs beim Kaltpilgern von Rohren. *Acta Technical Budapest*. 1955, 11: 461-478.

[11] Martin J. Methods, models, and assumptions used in finite element simulation of a pilger metal forming process. *Computer Technology and Applications*, 2003, 458: 109-119.

[12] Mulot S, Hacquin A, Montmitonnet P, et al. A fully 3D finite element simulation of cold pilgering. *Journal of Material Processing Technology*. 1996, 60: 505-512.

[13] Lodej B, Niang K, Montmitonnet P, et al. Aubin. Accelerated 3D FEM computation of the mechanical history of the metal deformation in cold pilgering of tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 177: 188-191.

[14] Girard E, Guillen R, Weisbecker P, et al. Effect of plastic shearing on damage and texture on Zircaloy-4 cladding tubes: experimental and numerical study. *Journal of Nuclear Materials*. 2001, 294: 330-338.

(责编 金卯 晓霏)