

面向节能优化的数控钻削参数优化方法研究*

鄢威, 潘媛, 张华, 胡狄

武汉科技大学机械自动化学院, 武汉, 430081

摘要: 钻削参数的选择直接关系到产品钻削加工过程的节能制造。针对零件钻孔工艺加工条件下的参数优化问题, 考虑加工过程机床设备性能和刀具寿命的实际约束条件, 建立了以钻削速度和每转进给量为优化变量, 以最低加工成本和最低加工能耗为优化目标的多目标节能优化模型。引入加权求和法将多目标优化模型转换成单目标优化模型, 并采用自适应粒子群算法 (APSO) 对模型进行优化求解。最后, 以某具体实例的加工过程为例验证了所建模型的有效性, 并对优化结果进行了分析。

关键词: 钻削参数; 节能优化; 多目标; 自适应粒子群

Method Research on Drilling Parameters of NC Machining for Energy Consumption Optimization

Wei YAN, Yuan PAN, Hua ZHANG, Di HU

College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology,
Wuhan, 430081

Abstract: The choice of the drilling parameters directly related to the energy-saving production of the manufacturing process. Aiming at the drilling parameters optimization problem of drilling process of parts, the machine tool property and tool life of manufacturing process are considered, a multi-objective optimization model is established, which takes the drilling speed and feed engagement as the variables, the minimum cost and the energy consumption as the optimizations objectives. The Weighted sum method are introduced to transform it into a single objective optimization model and the adaptive particle swarm optimization algorithm (APSO) is applied to solve it. Finally, an experiment case is performed to verify the effectiveness of the optimization model, and the optimization results are analyzed.

Keywords: drilling parameters; energy consumption optimization; multi-objective; adaptive particle swarm optimization

1 引言

钻削加工作为最常见的机械加工方式之一, 约占加工总量的30%。实际加工过程中, 钻削参数的选择直接关系到产品的加工质量、生产效率、生产

成本等, 合理的参数选择对于提高生产效率, 降低生产成本起着十分重要的作用^[1]。然而, 在企业以往的生产实践中, 往往主要关注的是效率与成本目标。随着国家对节能减排任务关注度的增加以及经济“新常态”背景下

对企业资源能源消耗问题的重视, 产品加工过程的环境影响问题显得越来越重要。如何综合考虑零件加工过程的效率、成本与能耗等问题对工艺参数进行优化选择, 实现在保证零件加工质量, 降低制造成本的同时降低生

* 国家自然科学基金资助项目(51275365), 国家863计划项目(2014AA041504), 武汉科技大学校基金(2015X2049)。

产过程的能耗已成为一项亟待解决的基础科学问题^[2]。目前,国内外学者对钻削参数的合理选择及优化展开了大量的研究,并取得了一定的成果。张新明,邱剑杰,周赞熙等基于模糊数学研究了钻削过程最少加工时间的钻削参数优化选择方法^[3];张喆,李郝林对机床切削过程能耗模型进行了研究,并用该模型进行了不同工艺方案的能耗比较^[4];赵鹏飞,刘婷婷,汪惠芬等以加工成本和效率为优化目标开发了孔加工参数优化系统^[5];张文全,韦文术研究了不锈钢小深孔高速钻削的参数优化方法^[6];张新明,崔振山基于可靠度对钻削参数模糊优化进行了研究^[7]。但以上研究主要围绕以加工过程的成本、效率等为优化目标来选择加工参数展开,少部分开始涉及面向最低能耗的加工参数优化方法,但也仅仅只考虑了加工过程的单目标优化,并未涉及以低成本、低能耗为优化目标的钻削参数优化方法研究。基于此,本文对数控钻削加工过程中的钻削参数节能优化方法进行了研究。充分考虑加工过程的机床设备约束与刀具寿命约束,建立了以低成本、低能耗为优化目标的钻削参数多目标优化模型,运用自适应粒子群算法对多目标优化模型进行了寻优求解,并通过实例对模型的可行性与有效性进行了验证。

2 钻削参数优化模型的建立

2.1 优化变量的确定

数控钻削加工参数主要包括钻削速度、每转进给量与背吃刀量。由于背吃刀量仅由待加工孔的孔径和加工余量确定,本文将其视为已知量,不进行优化。因此,待优化的决策变量设计为钻削速度与每转进给量。

2.2 优化目标函数的建立

本文主要从数控机床一次钻孔加工过程的电能消耗与成本花费两个方面进行优化,优化目标为钻削加工过程的能耗与成本。

2.2.1 钻削过程成本目标函数

钻削加工过程成本目标函数的模型为:

$$C_p = T_m X + T_c \frac{T_m}{T} X + \frac{T_m}{T} C_t + T_o X \quad (1)$$

$$\text{其中: } T_m = \frac{60H}{nf} \quad (2)$$

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D} \quad (3)$$

$$C_p = 0.06 \frac{\pi DHX}{v_c f} + (T_c X + C_t) \frac{60^{\left(\frac{1-1}{m}\right)} \pi HD^{\left(\frac{1-Z_v}{m}\right)} f^{\left(\frac{Y_v-1}{m}\right)} v_c^{\left(\frac{1-1}{m}\right)}}{1000 C_v^{\frac{1}{m}} K_v^{\frac{1}{m}}} + T_o X \quad (4)$$

2.2.2 钻削过程能耗目标函数

数控钻削加工过程的能耗 E_p 主要由钻削加工能耗 E_m 、空载能耗 E_u 、进给系统能耗 E_g 、附加加载荷能耗 E_t 与所有辅助系统能耗 E_a (照明系统、换刀系统等)组成。

钻削加工能耗 E_m 。钻削加工过程能耗 E_m 为钻头在实际钻削工件过程中消耗的电能,其能耗值与钻削加工参数有着密切的关系,其表示如下:

$$E_m = P_m \times T_m \quad (6)$$

$$P_m = \frac{2 \cdot M v_c}{D} \quad (7)$$

$$M = 9.81 C_m D^{X_m} f^{Y_m} K_m \quad (8)$$

式中, P_m 为钻削功率(kw), M 为扭矩(N·m), C_m 、 X_m 、 Y_m 、 K_m 为扭矩计算公式中的相关系数,具体取值可通过查阅切削用量手册得到。

空载能耗 E_u 。钻削加工过程中的空载能耗伴随着整个加工过程,由于钻削过程中刀具的进、退刀时间很短,因此,空载能耗可看作是进行钻削加

$$T = \left(\frac{60 C_v D^2 K_v}{f^2 v_c} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

式中, C_p 为本道工序钻削加工成本(元), X 为单位时间的生产成本(元/min), T_m 为钻削加工时间(s), T_c 为换刀时间(s), T_o 为除换刀外的其他辅助消耗时间(s), C_t 为换刀成本(元), T 为刀具耐用度(s), H 为钻孔深度(mm), f 为每转进给量(mm/r), n 为主轴转速(r/min), v_c 为钻削速度(m/min), D 为钻头直径(mm), C_v 、 Z_v 、 K_v 、 Y_v 、 m 为刀具耐用度相关系数。

将式(2)-(4)带入式(1)得到钻削加工成本目标函数为:

工时的空载能耗。其计算方法如下:

$$E_u = P_u \times T_m \quad (9)$$

式中, P_u 为机床空载功率,其值可近似的看作主轴转速的二次函数^[8],如式(10)所示,

$$P_u = K_1 n^2 + K_2 n + K_3 \quad (10)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 为与主轴转速有关的相关系数,其获取方法可参考文献^[9]。由此确定了机床空载功率与主轴转速之间的函数关系。

附加加载荷能耗 E_t 。机床钻削加工过程伴随着附加加载荷损耗,其附加损耗机理非常复杂,一般认为附加加载荷的损耗能耗与钻削能耗近似成正比^[8]。计算方法如下:

$$E_t = b E_m \quad (11)$$

式中, b 为钻削附加加载荷系数。在工程实际应用过程中,其值常凭经验取0.15~0.25的常数^[2]。

进给系统能耗 E_g 与辅助系统能耗 E_a 。机床进给系统能耗 E_g 仅为主轴转动能耗的1.5%左右,辅助系统能耗 E_a

受钻削参数的影响很小,因此,这两类能耗可被看作常数,用 Q 来表示。

$$Q = E_g + E_a \quad (12)$$

$$E_p = E_m + E_u + E_t + E_g + E_a = 1.177 \times (1+b)(C_m D^{X_m} f^{(Y_m-1)} K_m) + \left[K_1 \left(\frac{1000v_c}{\pi D} \right)^2 + K_2 \frac{1000v_c}{\pi D} + K_3 \right] \times \frac{\pi DH}{1000v_c f} + Q \quad (13)$$

2.3 约束条件的设定

实际生产过程中,钻削参数的选择受到工艺系统性能、零件加工要求条件和加工环境等因素的约束,合理的参数选择必须在满足这些限制的条件下进行。

机床主轴转速约束

$$g_1(v_c, f) = n_{\min} - n \leq 0 \quad (14)$$

$$g_2(v_c, f) = n - n_{\max} \leq 0 \quad (15)$$

式中, n_{\min} 、 n_{\max} 为机床允许的最低与最高转速。

每转进给量约束

$$g_3(v_c, f) = f_{\min} - f \leq 0 \quad (16)$$

$$g_4(v_c, f) = f - f_{\max} \leq 0 \quad (17)$$

式中, f_{\min} 、 f_{\max} 为机床允许的最小与最大进给量。

切削力约束

$$g_5(v_c, f) = C_f D^{X_f} f^{Y_f} K_f - F_{\max} \leq 0 \quad (18)$$

式中, C_f 、 X_f 、 Y_f 、 K_f 为经验系数, F_{\max} 为最大允许切削力。

加工功率约束

$$g_6(v_c, f) = P_m - \eta P_{\max} \leq 0 \quad (19)$$

式中, η 为机床传递效率, P_{\max} 为机床最大允许加工功率。

主轴扭矩约束

$$g_7(v_c, f) = M - M_{\max} \leq 0 \quad (20)$$

式中, M_{\max} 为机床最大允许扭矩。

刀具耐用度约束(刀具寿命)。由于钻削过程中刀具与切屑的剧烈摩

综合上述分析,钻削加工过程的能耗表示如下:

擦,引起刀具磨钝甚至失效,实际生产过程中,刀具的耐用度必须大于刀具最小耐用时间。

$$g_8(v_c, f) = T_b - T \leq 0 \quad (21)$$

式中, T_b 为刀具最小耐用时间。

综上所述,钻削加工过程钻削参数的节能优化问题可用如下数学模型表示:

$$\min F(v_c, f) = (\min C_p, \min E_p)$$

$$s.t. \quad g_i(v_c, f) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8$$

该模型的目标函数模型与约束方程均为非线性方程,针对这类问题,若采用传统的优化算法(如粒子群算法、遗传算法等),不仅计算复杂且计算结果容易陷入局部最优解。为此,本文采用一种改进的自适应粒子群算法来优化这类问题。

3 基于自适应粒子群算法的模型求解

3.1 多目标函数的转化

对于多目标优化问题的求解,往往很难同时实现多个目标都为最优解。为了方便求解,这里引入加权求和法来构建多目标优化函数:

$$F(v_c, f) = \lambda_c \frac{C_p - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} + \lambda_E \frac{E_p - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

$$\text{其中: } \lambda_c + \lambda_E = 1$$

式中, λ_c 、 λ_E 分别表示成本和能耗的加权系数, C_{\min} 、 E_{\min} 分别为成本与能耗的单目标优化的最小值, C_{\max} 、 E_{\max} 分别为成本与能耗的单目标优化

的最大值。

3.2 自适应粒子群算法优化决策

3.2.1 粒子群算法基本原理

粒子群算法是近年来发展起来的一种新的进化算法,相比于传统的优化算法该算法容易实现且不需要被优化对象的梯度信息,是一种被广泛运用于求解约束最优问题的算法。算法首先初始化一定规模的粒子群,当粒子群初始化后,每一个粒子都具有了适应值 P 、速度 V 与位置 X 三方面属性。然后,每个粒子会将其当前的适应值与其经过的历史最好位置的适应值 P_{id} 作比较,并将最好的适应值作为其当前的最好位置和当前的全局最好位置。最后,根据下列式子分别对粒子的速度和位置更新,直至满足设定的终止条件。

$$v_{id}^{(t+1)} = wv_{id}^{(t)} + c_1 r_{1d} [p_{id}^{(t)} - x_{id}^{(t)}] + c_2 r_{2d} [p_{gd}^{(t)} - x_{id}^{(t)}] \quad (22)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (23)$$

式中: w 为惯性权因子, v_{id} 为粒子的速度, $v_{id} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, v_{\max} 为常数,由用户设定; C_1 、 C_2 为学习因子,通常取 $C_1 = C_2 = 2$; r_{1d} 、 r_{2d} 为相互独立的伪随机数,服从[0,1]上的均匀分布; x_{id} 为当前粒子的位置。

3.2.2 粒子群算法改进

在标准粒子群算法中,由于每代例子飞行时间固定,导致产生“振荡”现象,使得算法收敛速度慢、搜索方向启发性弱且易陷入局部极值^[10]。为此,这里引入自适应粒子群算法(APSO),算法惯性权值 w 与粒子的飞行时间可根据全局最优值信息自适应的进行调整,从而减少“振荡”现象的产生。调整公式如下所示:

$$w' = \exp\left(-\frac{F_b'}{F_b'^{t-1}}\right) \quad (24)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \times T_0 \times \left(1 - \frac{k_0 t}{I_{max}}\right) \quad (25)$$

式中, w^t 表示第 t 代粒子的惯性权值, F_b^t 、 F_b^{t-1} 分别表示第 t 代与第 $t-1$ 代的粒子全局最优值。 T_0 为初始飞行时间, k_0 为调整参数, I_{max} 为最大进化代数。APSO算法的优化流程如图1所示。

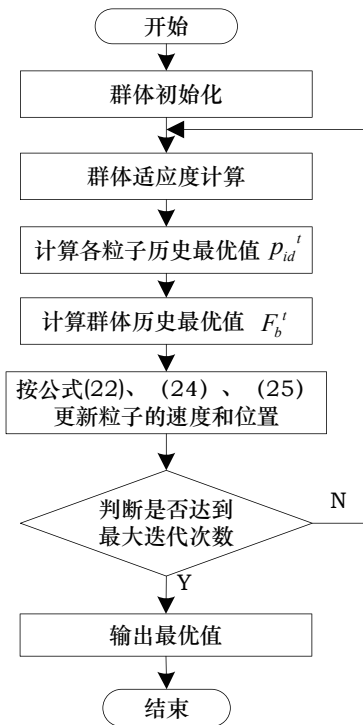


图1 APSO算法流程图

4 优化算例验证

4.1 试验条件

待加工孔加工条件如下: 孔径D为12mm, 孔深H为35mm, 刀具材料为标准高速钢麻花钻。机床相关技术参数、刀具寿命参数、切削力与扭矩计算相关参数以及目标函数相关计算参数分别如表1-4所示。

4.2 优化结果与分析

采用Matlab软件进行优化编程, 自适应粒子群算法的参数设置如下: 初始种群为30, 迭代次数 I_{max} 为150, k_0

表1 数控机床规格参数

主轴最低转 (r/min)	主轴最高转 (r/min)	最小进给速度 (mm/r)	最大进给速度 (mm/r)	最大扭矩 (N·m)	最大切削力(N)	最大功率 (kw)	功率有效系数
20	4000	0.1	3.4	28.5	5500	7.5	0.8

表2 刀具寿命参数

C_v	Z_v	K_v	Y_v	m	$T_b(s)$
11.1	0.4	0.87	0.5	0.2	1100

表3 切削力与扭矩计算参数

C_F	X_F	Y_F	K_F	C_m	X_m	Y_m	K_m
61.2	1.0	0.7	0.17	0.0311	2	0.8	1.15

表4 目标函数中的相关参数

C_t (元)	X (元)	T_c (s)	T_0 (s)	b	K_1	K_2	K_3	Q (J)
4	0.05	16	60	0.2	2.10-5	1.243	90.115	1.7115

为0.9, T_0 为0.4。通过寻优迭代得到的算法迭代收敛过程如图2所示, 寻优迭代得到的优化结果如表5所示。

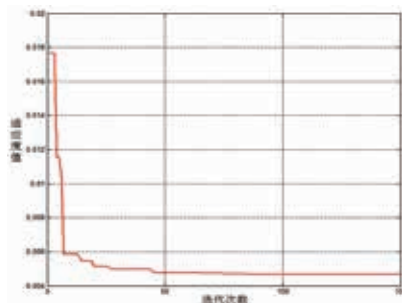


图2 自适应粒子群算法迭代收敛图

对比以低成本为优化目标与以低能耗为优化目标的优化结果可以看出, 钻削速度的改变, 使得钻削加工

过程的加工时间、能耗与成本随之改变。当以低成本、低能耗为优化目标时, 加工成本与能耗均介于上述两者的优化结果之间。由此可知, 钻削加工参数的选择对加工过程的能耗有着重要的影响作用, 而合理的钻削参数选择对于钻削加工过程的节能优化有着一定的指导意义。

5 结论

(1) 建立了以钻削速度和刀具每转进给量为优化变量, 以最低加工成本和最低加工能耗为优化目标, 以机床主轴转速、进给量、钻削力钻削扭矩等为约束的多目标优化模型。

表5 优化结果

优化结果	以低成本为优化目标	以低能耗为优化目标	以低成本、低能耗为优化目标
钻削速度 (m/min)	24.05	27.09	26.18
每转进给量 (mm/r)	0.24	0.24	0.24
加工工时 (s)	13.72	12.17	12.60
加工成本 (元)	0.881	0.918	0.901
加工能耗 (J)	2.078	2.0763	2.0766

(2) 引入线性加权法将多目标优化转换成了单目标优化, 采用自适应粒子群算法对优化模型进行了寻优求解, 并对优化结果进行了分析, 为制造业实施节能生产奠定了一定的理论基础。

(3) 本文主要针对的是一次钻削条件下的钻削参数优化, 而钻削加工过程中的能耗不仅受到加工参数的影响, 同时随着加工环境的改变呈动态变化, 因此, 如何考虑多方面能耗影响因素并开发相应的钻削参数节能优化软件是下一步的研究重点。T

参考文献

- [1] 李聪波, 崔龙国, 刘飞等. 面向高效低碳的数控加工参数多目标优化模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 87-96.
- [2] 实用数控加工技术编委会. 实用数控加工技术[M], 北京: 兵器工业出版社, 1995.

社, 1995.

- [3] 张新明, 邱剑杰, 周赞熙等. 基于模糊数学的钻削加工参数优化选择研究[J]. 工具技术, 2006, 40(7): 27-29.
- [4] 张喆, 李郝林. 机床切削工艺方案能耗定量分析比较的方法[J]. 制造技术与机床, 2013, 26(12): 21-23.
- [5] 赵鹏飞, 刘婷婷, 汪惠芬等. 孔加工切削参数优化系统的研究与开发[J]. 航空精密制造技术, 2012, 59(1): 34-37.
- [6] 张文全, 韦文术. 不锈钢小深孔高速钻削加工参数优化[J]. 煤矿机械, 2011, 32(4): 119-121.
- [7] 张新明, 崔振山. 基于可靠度的钻削参数模糊优化研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 150-153, 170.
- [8] 刘飞, 徐宗俊, 但斌等. 机械加工系统能量特性及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [9] 施金良, 刘飞, 许弟建, 陈国荣. 数控机床

空载运行时节能决策模型及实用方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1344-1346.

- [10] 夏晓华, 刘波, 栾志业等. 基于APSO的非线性预测控制及在pH中和反应中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(1): 24-27.

作者信息

鄢威, (1981-), 男, 博士研究生. 主要研究方向为绿色制造、制造业信息化;

潘媛, (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 绿色制造. E-mail: 1334413723@qq.com;

张华(通信作者), (1964-), 女, 武汉科技大学, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要研究方向为绿色制造、再制造和制造信息化. E-mail: zhanghua403@163.com;

胡狄, (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 绿色制造。

·会员传真·

东方电机研制的埃塞俄比亚吉布3水电站10台机组全部投运

发布时间: 2016-09-19 文章来源: 东方电机有限公司网站

9月9日15时, 东方电机研制的埃塞俄比亚吉布3水电站10号水轮发电机组完成合同规定的5+5天考核试运行, 正式投入商业运行。10号机组的顺利投产发电标志着吉布3水电站10台机组已全部完工并投入商业运行。

吉布3水电站10号水轮发电机组于8月18日11时50分一次启动成功, 随后顺利完成机组各项试验, 试运行期间, 机组各项数据均高于合同以及相关技术规范要求。吉布3项目从2011

年7月厂房第一根接地线的敷设, 到2013年12月右侧岔管群打压试验, 从2014年11月第一台转子成功吊装, 到2015年11月第一台机组投运发电, 再到2016年8月10号机组投运发电, 吉布3项目一步一个脚印, 稳扎稳打在10个月内完成了全部10台机组的投运, 实现了“一月一投”的壮举, 用实际行动履行承诺, 创造了世界水电工程建设史上的新纪录, 项目的成功建设投运得到了项目业主和埃塞俄比亚政府的

赞誉。

吉布3项目共10台混流式水轮发电机组, 总装机容量为1870兆瓦, 为目前埃塞俄比亚投运的最大的水电站项目, 也是非洲特大型发电项目之一, 承担了埃塞俄比亚首都亚的斯亚贝巴90%的电力供应, 当前阶段为确保埃塞俄比亚全国电力供应的唯一电站。吉布3水电站也是东方电气集团海外水电项目已投产发电的单机及总装机容量最大的电站。

拖拉机变速箱加工中有限元仿真技术应用研究

王治军¹, 易良均¹, 赵博¹, 王洪亮²

1. 第一拖拉机股份有限公司工艺材料研究所, 洛阳, 471003

2. 第一拖拉机股份有限公司柴油机公司, 洛阳, 471003

摘要: 本文结合我公司拖拉机产品中出现的变速箱壳体前端面与后端面定位销孔位置尺寸超差, 从而导致变速箱壳体与发动机对接不上的问题, 通过有限元模拟定位销孔加工时的实际装夹情况, 并分析在不同的压紧力矩下, 前后端面定位销孔对应的位移量, 并与实际检测结果进行了对比分析。得出可在不改变夹具形式的情况下, 将操作工压紧力矩控制在 $60\text{N}\cdot\text{M}\sim 80\text{N}\cdot\text{M}$ 之间; 或通过编程的方法, 适当修正销孔的位置来弥补夹紧变形引起的位置误差, 进而提高加工精度的结论。采用这两种方法, 有效的解决我公司该系列产品中存在的问题, 对实际生产具有很好的指导意义。

关键词: 变速箱壳体; 定位销孔; 有限元; 位移量; 夹具; 压紧力矩

The Research on Application of Finite Element Simulation Technology in the Processing of Tractor Gearbox

Zhijun WANG¹, Liangjun YI¹, Bo ZHAO¹, Hongliang WANG²

1. Technology and Material Institute of The First Tractor Ltd., Luo Yang, 471003

2. YTO Diesel Engine CO.LTD, Luo Yang, 471003

Abstract: This paper is based on the question about the position size of the locating pin hole of the front and the rear end face of the transmission case in the medium and small horsepower tractor. What leads to the transmission case and the engine can not be butted. Simulating the actual loading condition during processing through finite element simulation. Analysing the displacement of the locating pin hole under the different pressing moment and comparing the simulation results with the actual testing results. Come to conclusion that we do not need to change the fixture form, we can let the operator control the pressing moment between $60\text{N}\cdot\text{M}\sim 80\text{N}\cdot\text{M}$ or through the programming way to correct the position of the pin hole in order to offset the position error caused by the clamping deformation. And then improve the processing precision. It can solve the problem of the series of products of our company through this two way and is has a very strong practical significance.

Keywords: transmission case; locating pin hole; finite element simulation; displacement; fixture; pressing moment

1 引言

拖拉机传动系统是拖拉机底盘的重要组成部分, 用以将发动机的动力传递给驱动轮, 使拖拉机获得所需要的各种行驶速度和牵引力, 从而实现

拖拉机前进、倒退和停车功能。当下使用较广泛的轮式拖拉机, 通常采用后轮驱动或四轮同时驱动, 后轮驱动的拖拉机传动系通常由变速箱壳体、过渡箱、后箱、动力输出装置(PTO)等部分组成, 四轮驱动拖拉机则是在

后轮驱动拖拉机的基础上增加了分动箱、传动轴和前驱动桥等机构而形成的, 它保留了后轮驱动拖拉机前轮小、后轮大、前轮转向、质心偏后等基本特征^[1]。

变速箱壳体作为拖拉机传动系的

重要组成部分,其前端面直接与柴油发动机相连接,后端面直接与传动系统中的后箱相连接,其作用举足轻重。但我厂的拖拉机产品的变速箱壳体在与发动机对接时出现对接不上的情况,经过检测,发现问题出在变速箱壳体前后端面的定位销孔位置尺寸超差上^[1],前后端面定位销孔位置如图1所示。

由图1可以看出,变速箱壳体前后端面各有两个定位销孔,前端面两定位销孔起到定位发动机的作用,后端面两定位销孔起到定位后箱的作用,因此,此四个定位销孔在拖拉机传动系中的作用尤为重要。针对此四个定位销孔加工后的位置尺寸超差这一情况,本文决定基于有限元仿真分析技术,分析工件的夹紧环节对变速箱壳体前后端面定位销孔加工精度的影响,找出定位销孔加工超差原因,并提出最合理的拧紧力矩和解决方法。

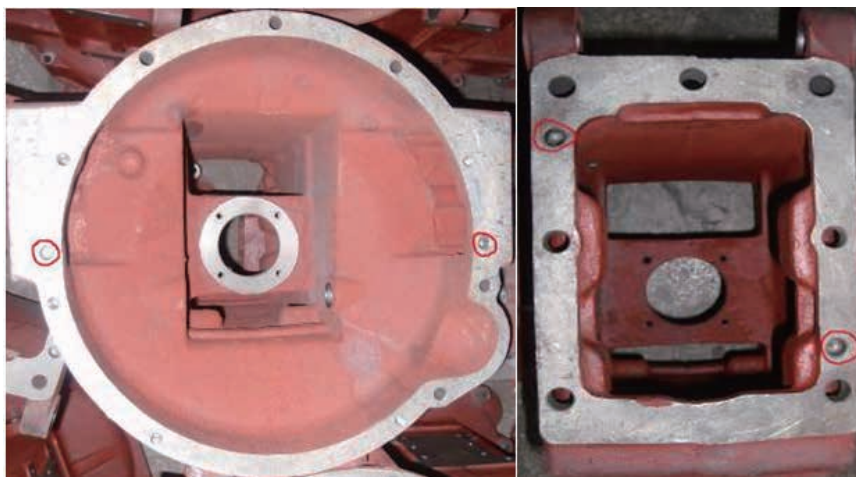
2 变速箱壳体装夹及检测方案

2.1 装夹方案

我公司采用在卧式加工中心上加工该系列产品变速箱壳体的前后端面定位销孔,定位方式采用传统的“一面两销”定位,前后共四个夹紧点,夹具总图如图2所示,夹具实际夹紧位置如图3所示,加工定位销孔时,工件的定位面和定位销孔的位置如图4所示。

2.2 检测方案

试验所用检测工具包括:精度为0.01mm的靠表一个和精度为0.01mm的百分表两个,精度为5级的60~300N·M扭矩扳手一个。变速箱壳体前端面共两个定位销孔,夹紧时的变形量基本一致,在此只对左侧定位销孔进行检测,打表位置如图5中a



(a) 前端定位销孔 (b) 后端定位销孔

图1 前后端面定位销孔

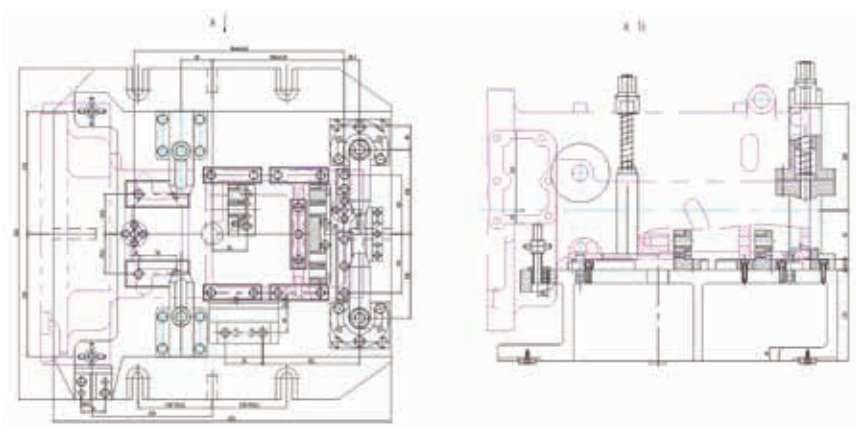


图2 夹具总图

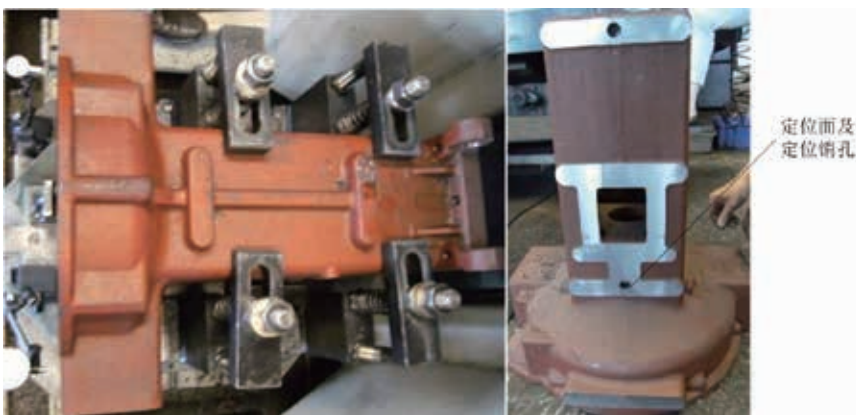


图3 夹具夹紧位置

图4装夹定位面及定位销孔

所示。变速箱壳体后端面共左上侧和右下侧两个定位销孔,但左上侧定位销孔相对位移较右下侧的大,且测量

较方便,因此后端面仅对左上侧定位销孔进行检测,打表位置如图6中a所示。

确定了如图5及图6所示的检测部位后,使用扭矩扳手分别将夹紧力矩调节至不同的数值,观察图中靠表a所检测的定位销孔位移情况并记录其检测结果,以便与后续有限元仿真分析结果进行对比。

3 检测结果

3.1 螺栓预紧力的计算

在确定了螺栓公称直径的情况下,螺栓的轴向预紧力正比于拧紧力矩的大小,其比例系数就是拧紧力矩系数,其关系式为。因此得出螺栓预紧力与拧紧力矩之间的关系式为:

$$F = \frac{T}{k_{td}} \quad (1)$$

式中: F—螺栓预紧力; T—螺母拧紧扭矩; k_{td} —拧紧力矩系数; d—螺栓公称直径。

由于压板的夹紧螺母在压板的夹紧点和支撑点的中间位置,因此压紧点的压紧力大约是螺栓预紧力的1/2。根据上述公式(1),分别计算出不同扭矩值下施加于相应夹紧点处的零件受力大小,计算结果如表1所示。现场操作工在通常情况下是使用250mm的扭矩扳手来预紧夹具螺母的,通过对其预紧力进行检测,可得拧紧扭矩为90N·M左右。

3.2 检测结果

在表1所示的不同拧紧力矩下,分别用图5及图6中的靠表a检测变速器壳体前后端面定位销孔的上下位移量即变形量,分两次测量,测量结果如表2所示。

4 变速器壳体有限元仿真分析

4.1 有限元模型的建立

欲对拖拉机变速器壳体夹紧环节

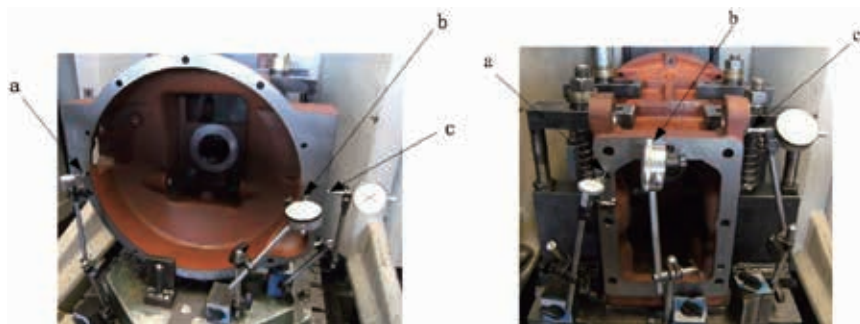


图5 前端面打表位置

图6 后端面打表位置

表1 相应扭矩下的拧紧力

序号	压板螺母拧紧扭矩 T (N·M)	摩擦表面氧化状态下的 拧紧力矩系数 k_t	螺栓公称直 径d (mm)	螺栓预紧力 F (N)	压板夹紧力 (N)
1	60			12500.00	6250.00
2	80			16666.67	8333.33
3	90			18750	9375
4	100			20833.33	10416.67
5	120	0.2	24	25000.00	12500.00
6	140			29166.67	14583.33
7	160			33333.33	16666.67
8	180			37500.00	18750.00

表2 定位销孔位移检测结果

序号	扭矩 (N·M)	检测结果			
		前端面		后端面	
		第一次	第二次	第一次	第二次
1	60	0.05	0.033	0.008	0.005
2	80	0.055	0.048	0.025	0.018
3	100	0.055	0.048	0.042	0.042
4	120	0.06	0.05	0.05	0.055
5	140	0.062	0.059	0.056	0.062
6	160	0.066	0.063	0.061	0.067
7	180	0.072	0.07	0.065	0.072

进行有限元仿真分析,首先需要在NX中建立其相对应的准确三维数学模型;其次,再对该模型进行三维网格划分^[9],由于最主要的目的是模拟前后端面四个定位销孔的位移变形量,因此,需细化四个定位销孔处的网格,如图7所示;最后,按照实际夹具支撑和压紧方式对变速器壳体进行约束,并模拟

实际压板的压紧情况^[4],如图8所示。

4.2 不同拧紧扭矩下的对比分析

在图8所示变速器壳体有限元模型的基础上,分别取表1所示拧紧螺母的不同拧紧力矩,对变速器壳体前后端面定位销孔的位移量情况进行有限元仿真分析,分析结果如图9所示。

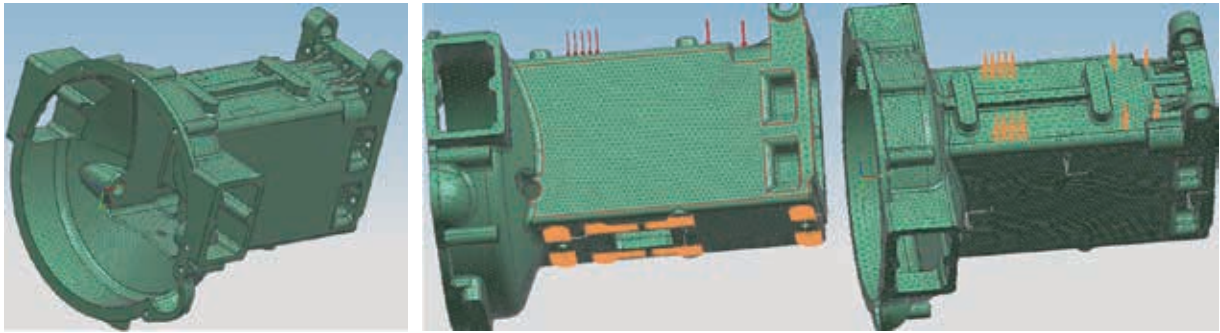
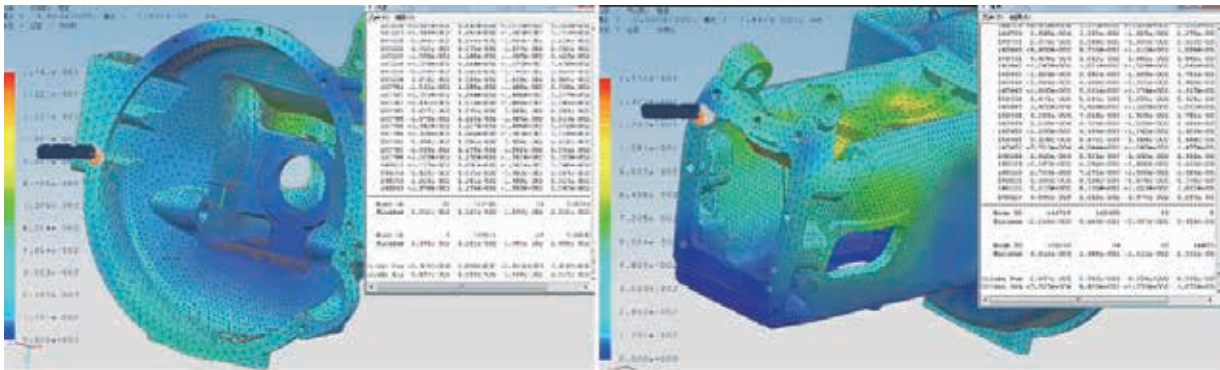


图7 三维网格的划分

(a) 实际定位支撑方式

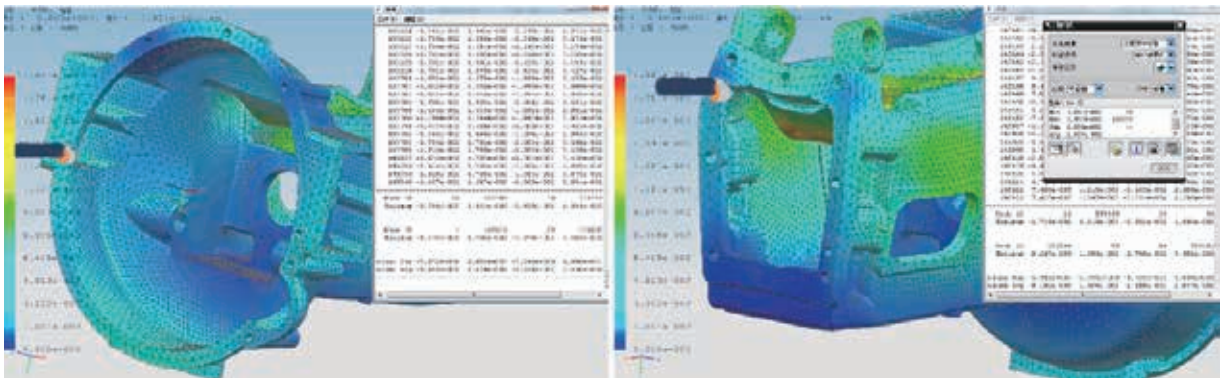
(b) 夹紧力的模拟

图8 箱体实际装夹情况



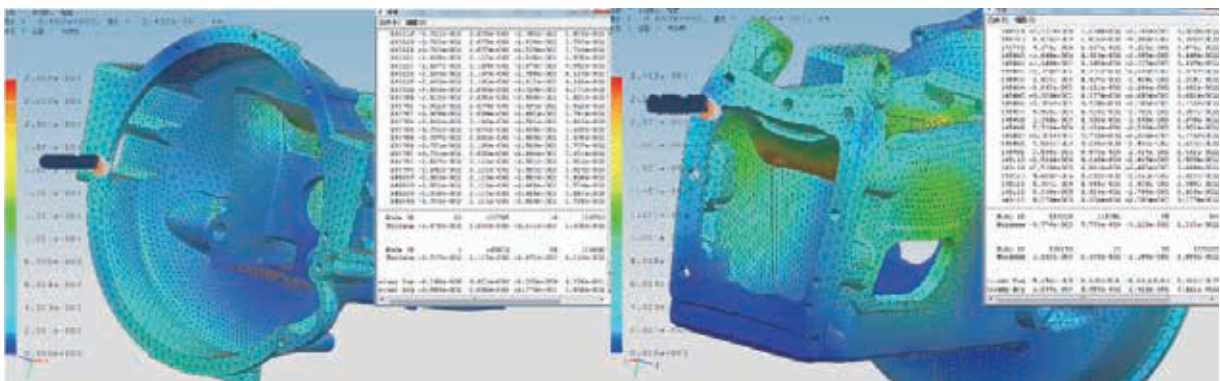
(a) 60N·M前端面

(b) 60N·M后端面



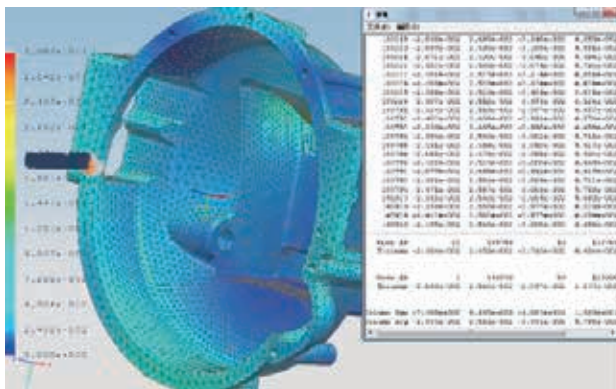
(c) 80N·M前端面

(d) 80N·M后端面

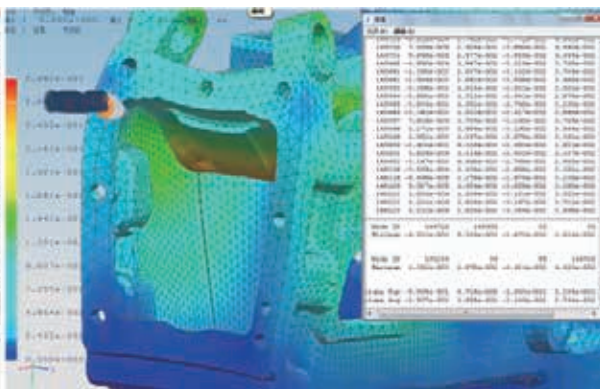


(e) 100N·M前端面

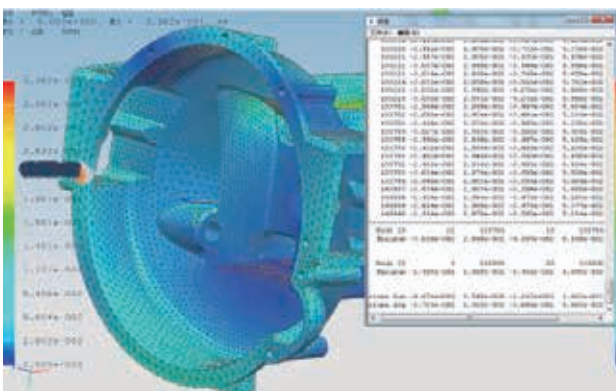
(f) 100N·M后端面



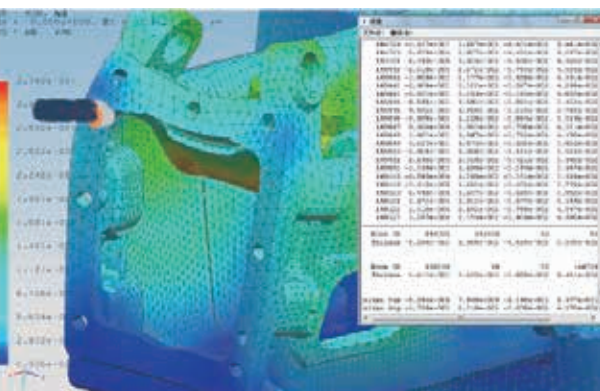
(g) 120N·M前端面



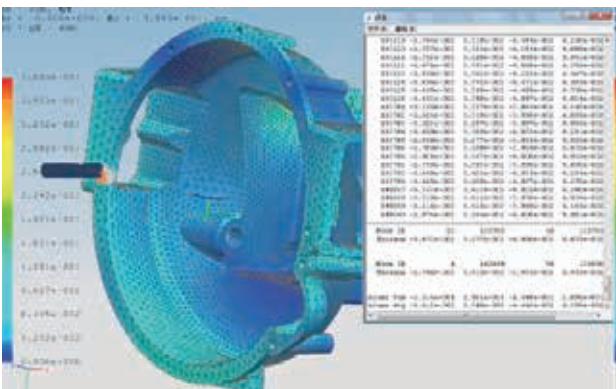
(h) 120N·M后端面



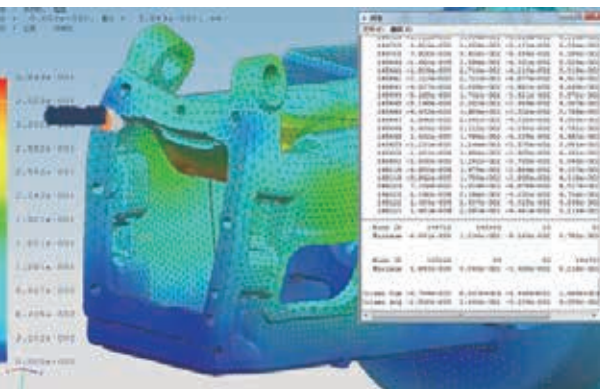
(i) 140N·M前端面



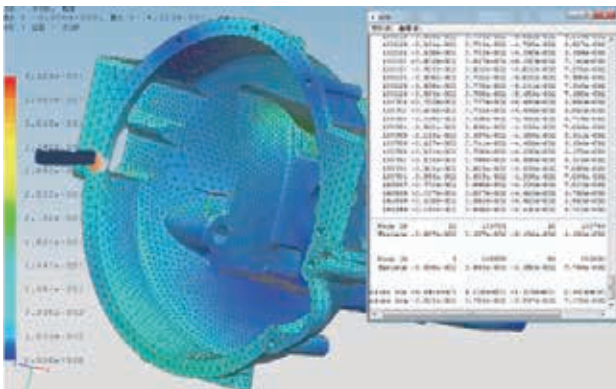
(j) 140N·M后端面



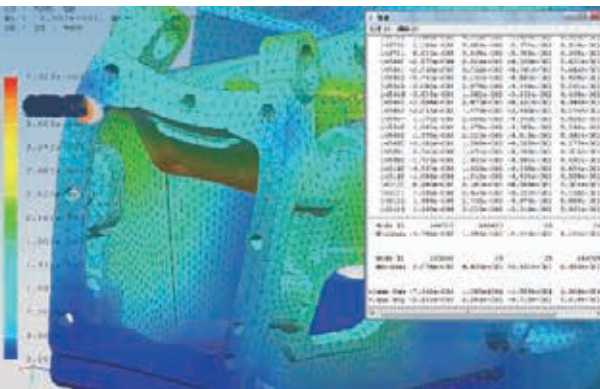
(k) 160N·M前端面



(L) 160N·M后端面



(m) 180N·M前端面



(n) 180N·M后端面

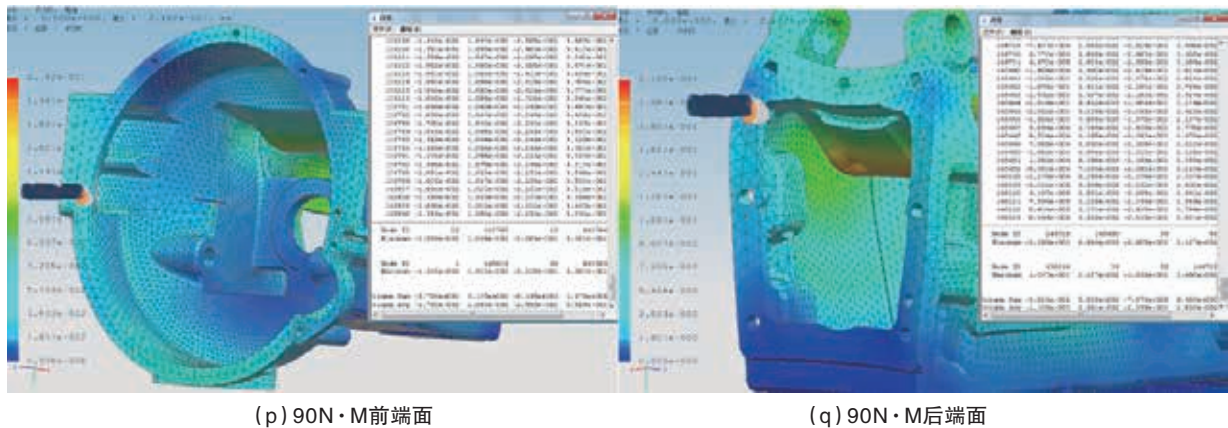


图9 不同扭矩下的有限元分析结果

(1) 由图9(a)、(b)分析结果可知,当取拧紧扭矩为60N·M时,变速箱壳体最大位移0.1441mm,前端面左上侧销孔位移0.02393mm,后端面左上侧销孔位移0.01879mm。

(2) 由图9(c)、(d)分析结果可知,当取拧紧扭矩为80N·M时,变速箱壳体最大位移0.1921mm,前端面左上侧销孔位移0.0319mm,后端面左上侧销孔位移0.02537mm。

(3) 由图9(e)、(f)分析结果可知,当取拧紧扭矩为100N·M时,变速箱壳体最大位移0.2402mm,前端面左上侧销孔位移0.03988mm,后端面左

上侧销孔位移0.03122mm。

(4) 由图9(g)、(h)分析结果可知,当取拧紧扭矩为120N·M时,变速箱壳体最大位移0.2882mm,前端面左上侧销孔位移0.04758mm,后端面左上侧销孔位移0.03746mm。

(5) 由图9(i)、(j)分析结果可知,当取拧紧扭矩为140N·M时,变速箱壳体最大位移0.3362mm,前端面左上侧销孔位移0.05583mm,后端面左上侧销孔位移0.0437mm。

(6) 由图9(k)、(L)分析结果可知,当取拧紧扭矩为160N·M时,变速箱壳体最大位移0.3843mm,前端面左

上侧销孔位移0.0638mm,后端面左上侧销孔位移0.04995mm。

(7) 由图9(m)、(n)分析结果可知,当取拧紧扭矩为180N·M时,变速箱壳体最大位移0.4323mm,前端面左上侧销孔位移0.07178mm,后端面左上侧销孔位移0.05619mm。

(8) 由图9(p)、(q)分析结果可知,当取拧紧扭矩为90N·M时,变速箱壳体最大位移0.2882mm,前端面左上侧销孔位移0.04758mm,后端面左上侧销孔位移0.03746mm。因为经过实际测量发现,操作工用扳手夹紧零件的力矩在80N·M~90N·M之间,所以在此分析90N·M夹紧变形。

表3 有限元仿真分析结果

序号	扭矩(N·M)	仿真分析数据	
		前端面	后端面
1	60	0.024	0.019
2	80	0.032	0.025
3	100	0.040	0.031
4	120	0.048	0.037
5	140	0.056	0.044
6	160	0.064	0.050
7	180	0.072	0.056
8	90	0.036	0.028

4.3 结果统计

现将4.2节中8种不同的拧紧力矩下定位销孔位移量的模拟分析结果进行统计,如表3所示。

5 实测数据与仿真数据对比

为了使检测结果及仿真结果更为直观,现将表2所示的实际检测结果与表3所示的有限元仿真分析结果进行对比分析,并求解出实测数据与仿真分析数据之间的差值,将其共同表达在一个表格中,如表4所示。

表4 实测数据与模拟数据对比分析

序号	扭矩 (N·M)	实测数据				模拟数据		实测数据与模拟数据差值			
		前端面		后端面		前端面	后端面	前端面		后端面	
		第一次	第二次	第一次	第二次			第一次	第二次	第一次	第二次
1	60	0.050	0.033	0.008	0.005	0.024	0.019	0.026	0.009	-0.011	-0.014
2	80	0.055	0.048	0.025	0.018	0.032	0.025	0.023	0.016	0.000	-0.007
3	100	0.055	0.048	0.042	0.042	0.040	0.031	0.015	0.008	0.011	0.011
4	120	0.060	0.050	0.050	0.055	0.048	0.037	0.012	0.002	0.013	0.018
5	140	0.062	0.059	0.056	0.062	0.056	0.044	0.006	0.003	0.012	0.018
6	160	0.066	0.063	0.061	0.067	0.064	0.050	0.002	-0.001	0.011	0.017
7	180	0.072	0.070	0.065	0.072	0.072	0.056	0.000	-0.002	0.009	0.016
8	90					0.036	0.028				

通过表4可以看出,有限元仿真分析结果与实际检测结果之间的差值极小,且总体趋势趋于一致,可以看出有限元仿真分析基本能够反映出实际情况。由前述可知,通常情况下,操作工使用扭矩扳手压紧零件的力矩在 $80\text{N}\cdot\text{M}\sim 90\text{N}\cdot\text{M}$ 之间。通过有限元模拟分析 $90\text{N}\cdot\text{M}$ 时定位销孔的夹紧变形量可得,该夹紧力使变速箱壳体前端面左侧定位销孔产生了 0.036mm 的位移,使后端面左侧定位销孔产生了 0.028mm 的位移,再结合表4可以看出,应适当减小该扭矩。可以将操作工平时的压紧力矩控制在 $60\text{N}\cdot\text{M}\sim 80\text{N}\cdot\text{M}$ 之间,在不改变现有夹具的情况下,便可有效减少夹紧力对工件变形的影响,进而减少加工时对定位销孔实际位置的影响;也可通过编程的方法,在所编制的NC程序中适当修正定位销孔的位置来弥补夹紧变形引起的位置误差,从而起到提高加工精度的作用,确保其加工尺寸

$\pm 0.05\text{mm}$ 的要求。

6 结论

综合上述分析,可得出以下结论:

(1)从实际检测数据与有限元仿真分析数据的对比可以看出,两者的总体趋势较一致,并且差值相对稳定,有限元分析结果与实际情况一致性很强。

(2)在实际生产中,根据有限元仿真分析的结果,在并未改变当前夹具的情况下,操作工适当降低了拧紧力矩的大小,很好地将定位销孔的位置误差控制在在了所要求的范围内,解决了该系列产品变速箱壳体前端面无法与发动机对接上的问题,解决了实际问题。

(3)通过CAD/CAE系统,不但实现了有限元仿真分析技术在公司工艺设计环节中的应用,而且能够更加直观地发现产品在工艺设计中存在的问题,同时克服了现有工艺设计和夹

具设计主要依靠个人经验分析其有效性的缺点,提升了公司在这一领域技术与其他先进制造业之间的技术适应能力。**T**

参考文献

- [1] 尤伟诚.拖拉机变速器壳体零件的工艺分析[J].机电信息,2010,(18):36-37.
- [2] 吴凤翔.变速器壳体加工工艺分析[J].汽车工艺与材料,2008,(1):52-55.
- [3] 庄宿涛,孟晓军.基于UG的HVD主动轴有限元分析[J].煤矿机械,2012,33(2):97-99.
- [4] 王远,潘震,石琴.差速器壳体装配强度有限元分析[J].合肥工业大学学报,2007,30(3):361-363.

作者信息

王治军,第一拖拉机股份有限公司工艺材料研究所,高级工程师,河南省洛阳市建设路154号,471004,bbcp2006@163.com,18623799120,长期从事科技研发工作。

弯管工艺分析以及弯管模具的设计、改进

杨丕丰

一汽解放公司长春特种车分公司, 吉林省长春市, 130102

摘要: 为了提高弯管工艺技术水平、设计合理的弯管模具, 本文首先从弯管的成型原理以及容易造成的质量缺陷进行介绍, 其次针对弯管过程中的质量缺陷, 从弯管的工艺角度进行了分析, 并提出了弯管时的解决措施, 最后以实例对弯管模具的设计、改进进行了总结, 为弯管模具的设计提出了宝贵的经验。

关键词: 弯管模具; 防皱; 芯棒

Pipe Bending Process Analysis, Mould Design and Improvement

Pifeng YANG

Faw liberation changchun special vehicle company,
Changchun city of jilin province, 130102

Abstract: In order to improve the level of pipe bending technique and design reasonable pipe bending mould, this article first introduce the forming principle of pipe bending and quality defects, from the perspective of pipe bending process, then analyse the quality defects in the process of the pipe bending and put forward liberation measures, in the end, design and improvement of pipe bending mould are summarized and put forward the valuable experience to the design of pipe bending mould.

Keywords: pipe bending mould; anti-wrinkle

1 引言

弯管工艺技术广泛应用于锅炉及压力容器行业、中央空调制造业、汽车工业、航空航天工业、船舶制造业等多种行业, 弯管质量的好坏, 将直接影响到这些行业产品的结构合理性、安全性、可靠性等, 尤其对于汽车工业, 2012年国家对于整车尾气的排放要求实行国四标准, 就是在排气管的后段加装了选择催化还原后处理装置, 因此管子的走向、两端法兰以及尿素喷嘴的焊接、管子的表面质量都将影响

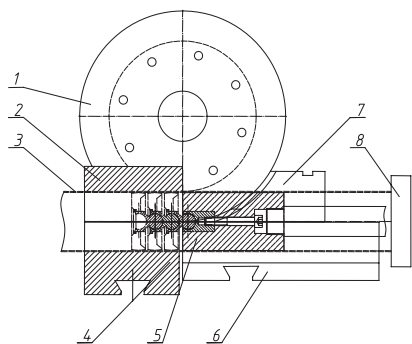
尾气的排放质量和噪音要求, 进而影响整车的质量, 因此为了弯制出高质量的管件, 就应该掌握弯管的工艺以及模具的设计、制造。

2 弯管的成型原理以及容易造成质量缺陷

图1表示的是有芯弯管的成型原理: 在数控弯管机上, 将管料套在芯棒上, 芯棒采用了芯棒杆和万向关节的柔性结构, 使之在弯管的过程中能够随弯自由转动, 防止管料在弯制的过程变扁, 用8料夹模夹紧管端并且使

管端靠严挡块, 这时管料的起弯部位正好位于轮模的中心线上, 然后将管料换模到轮模的圆弧槽内, 夹模和拼块表面加工有倒勾方向的防滑槽, 并夹紧管料防止管料在弯管的过程中滑动, 影响管料的弯制精度, 夹模通过燕尾键安装在可以围绕轮模中心旋转的弯管臂上, 当弯管臂按照设定好的角度旋转时, 管料就会随着弯管臂旋转一定的角度, 缠绕在轮模上, 实现弯管, 在管料与轮模的相切点附近, 其弯曲外侧装有导模, 在弯制的过程中起到导向助推的作用, 而弯曲内侧装有

防皱板，在弯制的过程中起到防止管子起皱变扁的作用。



1.轮模 2.拼块 3.管料 4.夹模 5.芯棒 6.导模 7.防皱板 8.料夹模

图1 弯管成型原理图

从以上弯管的原理我们可以知道由于管料空心横断面的形状特点，弯管时不仅容易引起横截面形状发生变化，而且也会使壁厚发生变化。因此，在弯曲时需要解决的工艺难点、产品的缺陷形式和防止措施、弯曲用模具以及设备等方面，非常值得研究。

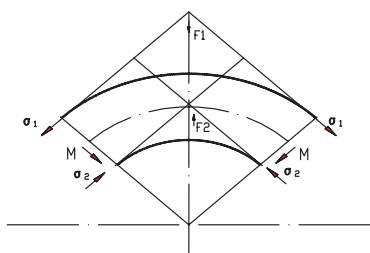


图2

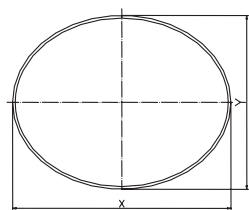


图3

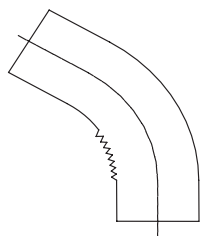


图4

我们知道，在纯弯曲的情况下，外径为 d ，壁厚为 s 的管子受外力矩 M 的作用而弯曲时，弯曲变形区的外侧材料受到切向拉伸应力 σ_1 的作用而伸长，从而使外侧管壁减薄；内侧材料则受到切向压应力的 σ_2 作用而缩短，从而使内侧管壁增厚（见图2）。由于位于弯曲变形区最外侧和最内侧的材料所受的切向应力最大，故其管壁的厚度变化也最大。因此，外侧管壁会过量减薄，当变形程度过大时，最外侧管壁会产生裂纹，最内侧管壁会出现失稳而起皱（见图4）。同时，由于弯曲内、外侧管壁上切向应力在法向的合力（外侧切向拉应力的合力 F_1 向下，内侧切向压应力的合力 F_2 向上）的作用，使弯曲变形区的圆管横截面在法向受压而产生畸变，即法向直径减小，横向直径增大，从而成为近似椭圆形（见图3）。变形程度越大，则畸变现象越严重。另外，由于从拉应力过渡到压应力的弹性阶段的存在，卸载时外层纤维因弹性恢复而缩短，内层纤维因弹性恢复而伸长，结果使工件弯曲的曲率和角度发生显著变化，与模具的形状和设计要求的形状不一致，造成弯曲回弹现象，降低了弯曲件的工艺精度。

从上述工艺分析可知，常见的弯管缺陷主要有以下几种形式：圆弧处变扁严重（椭圆形）、圆弧外侧管壁减薄量过大、圆弧外侧材料拉薄、弯裂、圆弧内侧起皱及弯曲回弹等。弯管缺陷的存在对弯制管件的质量会产生很大的负面影响。管壁厚度变薄，必然降低管件承受内压的能力，影响其使用性能；弯曲管材断面形状的畸变，一方面可能引起横截面积减小，从而增大流体流动的阻力，增加噪音，另一方面也

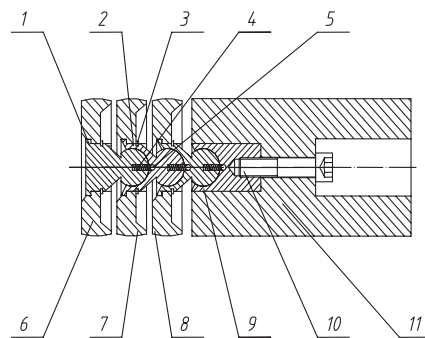
影响管件在结构中的使用功能；管材内壁起皱不但会削弱管子强度，而且容易造成流动介质速度不均，产生涡流和弯曲部位积聚污垢，影响弯制管件的正常使用，特别是装有尿素喷嘴的排气管产品，更是容易产生堵塞，严重影响尾气排放性能；回弹现象必然使管材的弯曲角度小于预定角度，从而降低弯曲工艺精度。因此，应在弯管之前采取对应措施防止上述缺陷的产生，以获得理想的管件，保证产品的各项性能指标和外观质量。

3 针对质量缺陷采取的解决措施

在通常情况下，对于前面提到的几种常见缺陷，可以有针对性地采取下列措施。

3.1 管料圆弧外侧严重变扁

对于圆弧外侧变扁严重的管件，在进行弯管时，应选择合适的心棒，可采用由多节珠子通过万向球节连接组装而成的万向球节式柔性心棒，如下图所示：



1.首球节 2.中球节 3.卡簧 4.弹簧
5.钢球 6.首珠子 7.中珠子 8.尾珠子
9.尾球节 10.拉紧螺杆 11.芯棒

图5 芯棒结构图

珠子通过球节与芯棒连接，并用卡簧卡紧，首珠子、中珠子、尾珠子、芯棒外径依次递增，相邻外径相差在

0.4-0.5mm,而芯棒外径比管料内径小0.8-1mm,通过这样的设计,既能够保证弯管时有足够的支撑,又能减小弯管阻力;为了克服重力影响而造成珠子下垂,有利于上料,采用了弹簧与钢球定位支撑结构,中球节利用线切割直接加工出相配合的凹凸结构,保证成对使用,配合严密;为了保证弯管时珠子旋转灵活,有足够的旋转角度,将珠子右侧干涉部分去除,使用中根据弯管的角度来选择球节的个数,并通过匹配珠子宽度与球节的节距,就能够弯制出高质量的产品。

3.2 管料圆弧外侧减薄

小半径弯管时圆弧外侧减薄是弯曲的工艺特点决定的,是不可避免的,同时弯管时管料尾端有外甩的趋势,为了避免减薄量过大和管尾外甩,常用的有效方法是使用侧面带有导向助推装置的弯管机,通过导向助推来抵消管料弯制时的部分阻力,改善管料横截面上的应力分布状态,使中性层外移,从而达到减少管料外侧管壁减薄量的目的。

3.3 管料圆弧外侧弯裂

对于管料圆弧外侧弯裂的情况,首先检查导模的压力是否过大,并调整使其压力适当,使导模在弯管过程中与弯管臂同步运动,最后应保证芯棒与管料内壁之间有适当的间隙,一般保证间隙为0.5mm左右,并保证良好的润滑,可以选择质量较好的油基拉延油,以减少弯管阻力以及管料内壁与芯棒的摩擦力。

3.4 管料圆弧内侧起皱

对于圆弧内侧起皱,应根据起皱位置采取对应措施。若是前切点起皱,应向前调整芯棒位置,以达到弯管时对管料的合理支撑;若是后切点起皱,

应加装防皱板,使防皱板安装位置正确,并将导模压力调整至适当;若圆弧内侧全是皱纹,则说明所使用的芯棒直径过小,使得芯棒与管壁之间的间隙过大,或者就是导模压紧力过小,不能使管料在弯曲过程中很好地与轮模及防皱板贴合,因此,应更换芯棒,并调整导模使压紧力适当。

3.5 管料弯曲回弹

对于弯曲回弹现象,现阶段主要采用补偿法来加以控制。补偿法是通过综合分析弯曲回弹的影响因素,根据弯曲时的各种条件和回弹趋势,预先估算回弹量的大小,先采取试弯的方法,根据机床设定值与实际值的差值来修改机床补偿值来实现。

由以上工艺分析以及形成的质量缺陷可知,芯棒、防皱板、导模等弯管模具的合理设计将直接影响弯管的质量,下面就一具体产品介绍一下弯管模具的设计、制造及改进,供从业者借鉴参考。

4 实例分析弯管模具的设计及改进

如图所示,1203816-51B进气管后段-消声器是解放自卸车CA4250P66K24T1E4的进气管后段,材料为06Cr19Ni10,外径 $\Phi 120\text{mm}$ 壁厚2mm,弯曲半径R内150mm,共有3个直线段,2个曲线段,如下图所示:

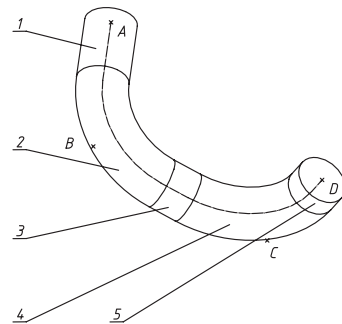


图6 产品图

零件坐标值

序号	X	Y	Z	R内
A	0	0	0	
B	-260	0	0	150
C	-260	460	0	150
D	-223	512	-332	

图7 零件坐标值

本公司采用台湾和和机械有限公司生产的SB-130X6BX3S-SR,卧式数控弯管机,设备简图如图8:

该设备主要特点:

本设备为CNC全自动三维数控弯管机,即通过电脑设定后自动弯曲、自动送料、自动倾转角度。最大适用不锈钢管材(弯曲半径1.5D)为 $\Phi 127\text{X}3\text{t}$,能装三层模具、有助推功能,有六轴采用伺服数值控制驱动的:即送料Y、倾转角度C以及小车水平移动轴X1和芯棒水平移动轴X2是分别通过各自伺服电机和伺服驱动器控制驱动的;弯管轴B及导模辅推由比例伺服阀控制驱动。



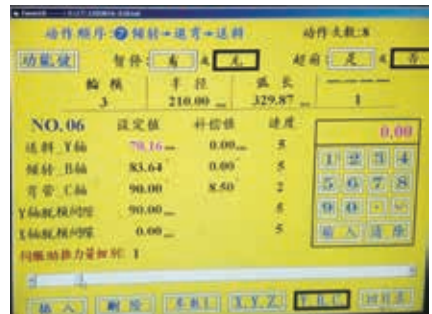
图8 数控弯管机



图9 坐标图



图10 动作顺序图

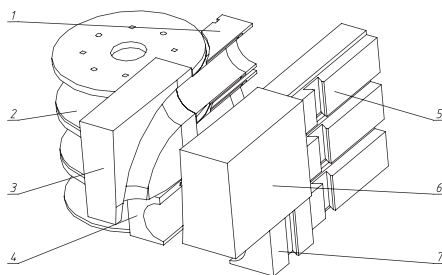


该产品的弯管的过程：
首先将该产品的坐标点输入弯管机的自带软件里面，图形如图9所示。

将管子坐标值X、Y、Z转换成Y、B、C后的数值如图10所示。

然后再设置好导模干涉位置和轮模干涉位置，并将弯管臂归零，主夹模张开，导模归零并张开，将送料小车移动到送料位置，将管料穿入芯棒且使管端靠产料夹模的挡块，并将料夹模夹紧，将料头与直线拼块对齐后，开始弯制第一个弯，考虑到弯管回弹角度大约1度，所以弯角设置为91度，弯制第一个弯后退弯，再将送料小车前进70.16mm，倾转83.64度，换模到第三层，弯制第二个弯，弯角为82.25度，弯制第二个弯后退弯。

从以上的工艺过程可知，弯制第一个弯时，因为直线段长50mm，所以要将此端加长到220mm，保证有足够的夹紧力，然后夹紧直线段进行弯管；弯第二个弯时，由于直线段特别短，只有70.16mm，无法用直的拼块和夹模来夹紧，只能用包含弯2和直线段3的立体模具来夹紧；另外管径120mm，壁厚2mm，弯曲半径210mm，弯管时有较大难度，弯管时容易出现起皱、失圆、拉裂等缺陷。综合以上分析，设计的弯管模具如图11所示。



1.防皱板 2.轮模 3.立体拼块 4.直线拼块
5.导模 6.立体夹模 7.直线夹模

图11 1203816-51B弯管模具组成图

模具共分为三层，第一层采用直的拼块4和夹模7，用来弯制第一个弯2，第二层为过渡层；第三层采用立体拼块3和立体夹模6，用来弯制第二个弯4，为防止弯制第二个弯时，送料小车进入导模干涉区，发生小车与导模碰撞，将直线段5加长到200mm左右，弯管后再去掉料尾，直线拼块、直线夹模、导模比较简单，在这里不再赘述，重点分析立体拼块、立体夹模、防皱板、轮模、芯棒的设计及改进。

4.1 立体夹模模具设计

因为该产品第一个弯曲平面和第二个弯曲平面夹角为83.64度，弯制第一个弯后，料夹模不松开，一次装夹，直接逆时针倾转83.64度，但是对于立体拼块来说，这时管子的分型面不再是垂直的，而是有6.36度斜角，如果我们将立体拼块和立体夹模的接触面做成垂直的，必然会造成模具有倒钩的

情况，影响管子的正常装夹，所以分型面的选择至关重要，笔者首先利用软件PROE三维建模，并对弯管时的状态进行模拟，通过模拟可知，弯第二弯时立体拼块和立体夹模的夹紧面要与产品的分型面一致，借鉴铸模、冲压模的分型方法，利用PROE软件的模具型腔模块，使得弯管时夹紧方向与pull direction方向重合，并采用侧面影相曲线形成裙边曲面的方法来建立分型面，为了提高夹紧力，拼块和夹模分型面预留3mm的夹紧空间，保证夹紧时有足够的夹紧力，再利用CAM软件POWERMILL形成数控程序、加工中心一次装夹加工圆弧槽和斜面的方法来实现，加工时先测量好轮模拼块安装面到圆弧槽底的尺寸，再以立体拼块的底面为基准，建立坐标系来加工，这样既能保证拼块圆弧槽底与轮模的圆弧槽底平齐、夹紧管子时不会发生错层、导致管子被夹出比较尖锐的痕迹，也能够保证有足够的夹紧力，使得弯管时不会打滑，起皱。

因为立体拼块和立体夹模的直线段很小，只有70.16mm，为了保证弯管时防止管子和模具打滑，要求立体拼块和立体夹模做出足够长的防滑槽，加工时可采用卧式镗床或者卧式加工中心手动找中心点的方法，加工出足够长的防滑槽，而且防滑槽的方向

要和管子打滑的方向相反，才能起到防滑的作用，同时为了生产中，调整拼块与夹模方便快捷，提高调试模具效率，分别在拼块与夹模分型面上加工有方型键槽，加工图形及模具图形如图12和图13所示。

4.2 防皱板设计

根据弯管的原理，在管子内侧材料受到挤压，容易形成折皱，防皱板的作用正是为了防止形成折皱，原来设计的防皱板如图14所示。

原来设计的防皱板材料为45号钢，不调质，且为整体形式，关键部位R210圆弧面的加工也是采用

CAD软件PROE建模、CAM软件POWERMILL形成数控程序、加工中心铣削的方法，我公司在制造防皱板的时候，由于加工中心加工时坐标原点的设置误差会造成 $\phi 120$ 圆柱面和R210的圆弧面相交的地方特别薄，容易形成弹刀、过切，而防皱板起作用的地方恰恰是过切的地方，这样在弯管的时候起不到防皱的作用，管子容易形成折皱，而且材质为45号钢，较脆，容易掉渣，渣子贴在管子表面弯管时形成凹坑，有效部位磨损后就得整体更换防皱板，成本较高。

改进后的防皱板如图15、图16所示。

由上图可知，改进后的防皱板采用分体式，由防皱板支架和防皱板组成，支架材质为45号钢，防皱板材质为铝青铜，防皱板磨损后，更换即可，而不需要更换防皱板支架，减少了模具成本，又缩短了调整时间，同时将防皱板与轮模的贴合面减小，防皱板接触，而防皱板支架不接触，这样更有利于防皱板与轮模的贴合，不会造成防皱板的悬空，引起折皱等质量缺陷；同时防皱板设计长度不能大于产品倒数第一个直线段与料夹模的夹持长度之差，这样才能保证弯制最后一个弯时送料小车不会进入轮模干涉区。



图12 防滑槽加工图

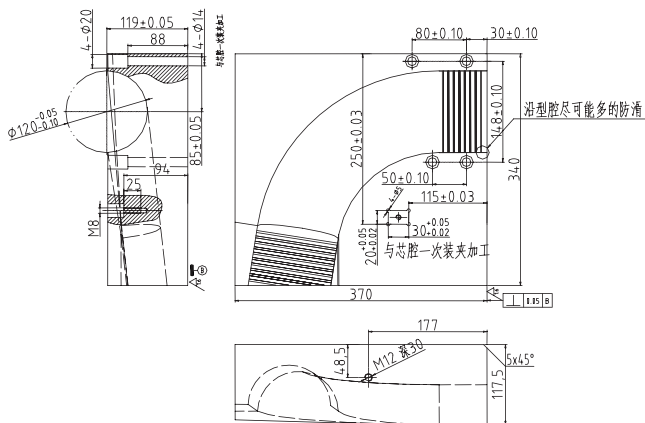


图13 立体拼块设计图

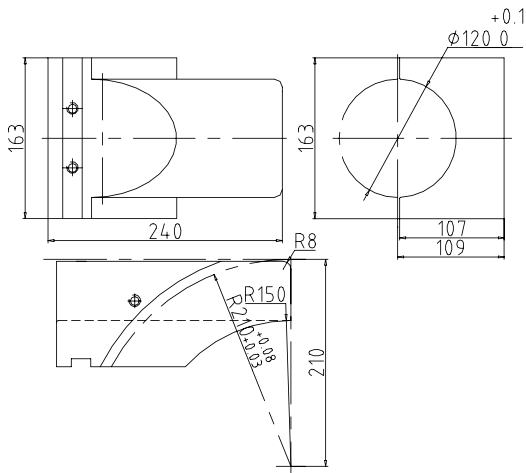


图14 改进前防皱板

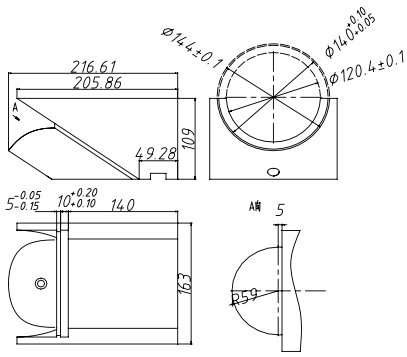


图15 改进后防皱板图

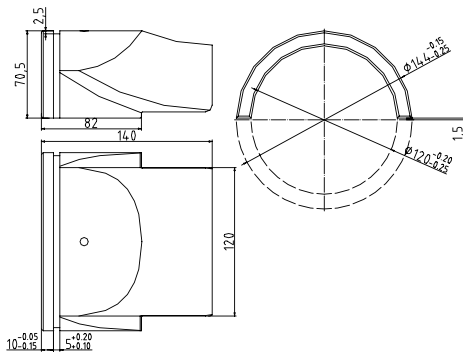


图16 改进后防皱板支架

4.3 芯棒组件的改进设计

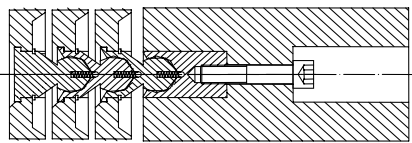


图17 改进前结构

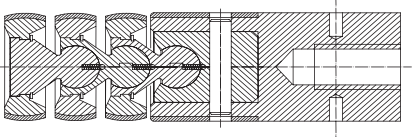


图18 改进后结构

改进前结构如图17所示，当采用改进前的芯棒结构时，由于芯棒杆材质为45号钢，弯管过程中很容易在外圆处形成积屑瘤，而积屑瘤硬度非常高，这样会把管子内壁拉出很深的沟痕，导致管子被拉断，此外弯管阻力特别大，非常容易打滑，为了避免这些缺陷需要操作者频繁的剔除积屑瘤，造成生产效率低小，分析原因，原来改进前的结构是设备厂家采用了台湾的设计标准，借鉴了直径为80毫米以下

08AL管的设计经验，而我公司目前的产品都是直径为120毫米、100毫米和83毫米的304不锈钢材质，弯管时阻力大、材料粘性强，而且球节厚度过窄、两侧支撑强度不够，弯管时珠子容易卷边，造成珠子互相挤压，增大了弯管阻力，此外螺杆紧固结构在弯管时螺杆容易拉断。

改进后的结构如图18所示，改进后结构更改为插销锁紧结构，并将球节宽度由原来28毫米加宽到38毫米，两侧空腔在能够躲开弯管时球节互相挤压干涉的前提下尽量减小倾斜角，加大支撑强度，重新匹配了珠子宽度与球节节距，设计好新结构后，并用PROE进行了弯管模拟，确定球节弯管时活

动自如、强度可靠后，又针对采用H62材质的球节、芯棒，制造成本高的问题，采用了45钢表面焊铜的“金镶玉”结构，降低了制造成本，提高了芯棒组件的寿命。

4.4 其它弯管模具的设计

4.4.1 导模的设计

导模的关键参数是导模的长度要大于产品的最大弯曲弧长，同时必须小于倒数第一个圆弧和倒数第一个直线段的长度之和与料夹模的夹持长度之差，这样才能保证弯制最后一个弯的时候，送料小车不会进入导模干涉区。不会造成送料小车与导模碰撞，在实际生产中为了减小料尾长度，节约成本，可以适当的减小20mm左右导模长度。

4.4.2 轮模的设计及制造

轮模设计图如图19，加工时一定要键槽与定位孔一次装夹，加工中心加工保证键槽宽度公差，这样装配时才能顺利装配，并且弯管时不会因为键槽宽而发生轮模随转，此外轮模宽度 170 ± 0.05 要采取两面磨削加工保证，这样才能保证两层模具甚至三层模具每层的拼块和夹模都能对齐，不会发生错层的现象。

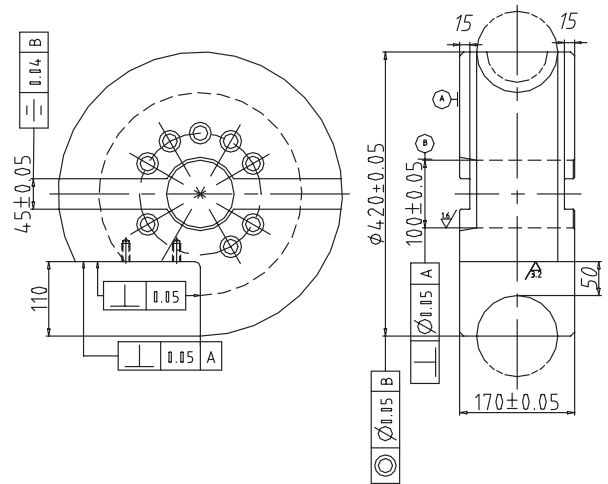


图19 轮模图

(下转42页)

钢框架联接件锻造工艺数值模拟*

张桂尚¹, 雷卫宁^{1,2}, 朱福先^{1,2}, 丁立红^{1,2}

1. 江苏理工学院 机械工程学院, 江苏常州, 213001

2. 江苏省高性能材料绿色成形技术与装备重点实验室, 江苏常州, 213001

摘要: 针对建筑用钢框架联接件在材料使用和成形制造工艺方面的苛刻要求, 对选取的A572 Gr50钢的高温应力-应变曲线进行实测, 建立钢框架联接件模锻成形的有限元模型。借助数值模拟软件DEFORM-3D对锻件成形过程进行热力耦合模拟, 获得锻件精确成形的变化规律, 分析可能产生的缺陷; 研究该锻件成形过程的模具载荷变化, 对锻件终锻模具的等效应力和温度进行分析, 预测出模具在锻造生产中可能产生的开裂缺陷。依据模拟结果, 对钢框架联接件进行生产试制, 验证了模拟的准确性和工艺的可行性。

关键词: 建筑用钢框架联接件; 锻造; 热力耦合模拟; 生产试制

Numerical Simulation of Forging Process for Steel Frame Connecting Piece

Guishang ZHANG¹, Weining LEI^{1,2}, Fuxian ZHU^{1,2}, Lihong DING^{1,2}

1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu, 213001

2. Jiangsu Province Key Laboratory for Technology and Equipment of High-performance Materials Green Forming, Changzhou Jiangsu, 213001

Abstract: As the harsh demands of material utilization and manufacturing processes for steel frame connecting piece on building, high temperature stress-strain curves of the selected A572 Gr50 steel were measured, and the finite element model for the forging process of steel frame connecting piece was established. The thermal-mechanical coupling process was simulated by using the simulation software DEFORM-3D, the change law of precision forging process was obtained, and the possible defects were analyzed; The die load change of the forging forming process was researched, the equivalent stress and temperature of final forging dies were analyzed, predicting the possible cracking defects in the production of forging. Based on simulation results, the trial production of steel frame connecting pieces were conducted, the experimental results verified the accuracy of the simulation and the feasibility of the process.

Keywords: steel frame connecting piece on building; forging; coupled thermo-mechanical simulation; trial production

1 引言

钢框架结构建筑作为一种绿色建筑形式, 在工业和民用建筑中, 尤其

在高层建筑上得到了广泛的应用, 逐渐成为主流的建筑工艺, 是未来建筑的一个发展方向^[1,2]。钢框架联接件固定钢结构中的梁柱, 是整个框架结构

是否安全可靠的关键结构件。图1为国外某型钢框架联接件的示意图, 其长318mm, 宽310mm, 主要由多个对称的阶梯斜内孔、两侧的配合斜边、背

* 资助信息: 江苏省高性能材料绿色成形技术与装备重点实验室开放基金

部的斜形配合槽及表面的细长键槽四部分组成,且沿其分模面上部和背部的表面呈 2° 夹角,是典型的表面结构较多且分布凹凸变化的饼块类零件。钢框架联接件工作时承受较大的动载荷,表面和侧面的不规律冲击和拉压应力,对产品的强度和韧性提出了更高的要求。因此,研究钢框架联接件成形工艺,提高产品成形质量,制造优质钢框架联接件是国内外钢框架结构建筑应用和发展的重要保证。

由于钢框架联接件表面结构复杂,其上斜内孔较深且成形困难,生产加工余量大,材料利用率和生产效率较低,产品生产主要采用模锻成形工艺。在传统锻造加工中,采用经验法和试错法进行工艺分析与验证,既浪费材料和增加成本,又耗费时间和降低生产效率^[3],因此采用数值模拟技术对锻造成形过程进行模拟计算,分析锻件成形变化规律,以达到预测锻件成形质量,防止成形缺陷产生,为实际生产提供可靠的成形工艺依据^[4-8]。根据国外某型钢框架联接件的结构特征,借助数值模拟软件DEFORM-3D对其模锻成形工艺进行三维热力耦合模拟,分析锻件成形规律,预测成形缺陷,并对模具承载和失效情况进行分析。

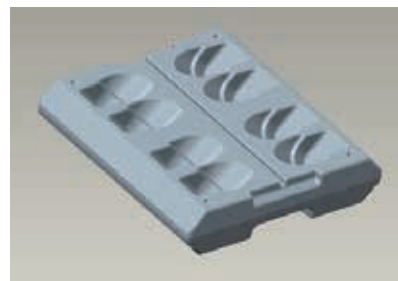
2 模拟方案的制定

2.1 锻造加工工艺方案的确定

根据国外某型钢框架联接件锻造成形分析,锻压设备选取5T模锻锤,一火次成形,毛坯材料选取ASTM A572 Gr50钢,始锻毛坯温度为 1200°C ,终锻模具初始温度为 300°C ,采用的锻造工艺过程为:坯料→加热→锻粗→压扁→终锻。该锻件在成形



(a) 钢框架结构



(b) 钢框架联接件

图1 钢框架联接件的示意图

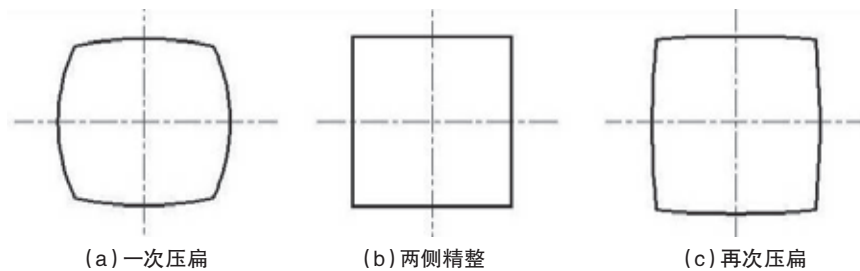


图2 压扁-精整工步图

过程中,为使坯料在终锻模膛中定位和分布合理,降低后期成形缺陷几率的产生,在压扁过程中增加毛坯精整工步,消除连续压扁造成的坯料长度和宽度方向的鼓形料边,即一次压扁后立起进行两侧边精整后,再进行压扁,其压扁-精整工步过程如图2所示。

2.2 材料参数的测定

在材料高温塑性变形过程中,温度和应变速率作为材料塑性和变形抗力的关键影响因素^[9-11],对精确模拟钢框架联接件锻造成形过程具有重要作用。钢框架联接件的材料选为美标钢材ASTM A572 Gr50,其主要化学成分如表1所示。本文借助Gleeble3500热模拟试验机对该材料进行热模拟压缩实验,整理实验数据,建立ASTM A572 Gr50钢的高温单道次压缩变形真应力-真应变曲线。

试验材料为ASTM A572 Gr50钢,试样尺寸为 $\Phi 8\text{mm} \times 12\text{mm}$,在热模拟试验机上进行单道次压缩试验。在

试验过程中,试样以 $20^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度加热到 1200°C ,保温180s后,再以 $10^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度冷却到要求的温度,保温60s后进行压缩变形,变形过程中保持温度不变,分别取为 1000°C , 1050°C , 1100°C , 1150°C , 1200°C 。根据变形速率分别为 0.005s^{-1} , 0.5s^{-1} 将试验分为两组,分别进行不同变形温度下的压缩变形。此外,变形量取为70%,压缩过程是在真空气氛下进行,试样两端加放钼片,以减少摩擦对变形的影响。图3中(a)和(b)分别为 0.005s^{-1} 和 0.5s^{-1} 两种应变速率下不同变形参数的真应力-应变曲线,并分别从曲线中提取6个点的应力应变数据,在DEFORM-3D中建立该材料的高温力学性能曲线,如图4所示。

由图3所示的两种应变速率下不同变形参数的真应力-应变曲线可知,在同一应变速率下,当变形温度不断升高时,变形抗力会不断下降。在应变速率为 0.005s^{-1} 时,变形抗力的显著下降,可以表现为试样容易发生动

态再结晶；而应变速率降低为0.5s⁻¹时，变形抗力下降趋势减小，试样发生动态再结晶变得逐渐困难。当变形温度一定时，随着应变速率的增大，变形抗力逐渐增大，也使得发生动态再结晶变得困难。因此，研究ASTM A572 Gr50材料的热变形规律，可以准确模拟和控制材料的热加工工艺，从而提高材料的组织与性能，为后续实际工艺模拟和生产提供基础。

表1 A572 Gr50钢材的化学成分

成分	C	Mn	P	S	Si	V
含量 (%)	0.20	1.30	0.013	0.008	0.36	0.06

2.3 有限元模型及其参数设定

如图5所示，运用Creo2.0软件对钢框架联接件的锻件毛坯、上模和下模进行三维造型，将三维模型格式转化后导入DEFORM-3D软件进行锻件成形过程模拟分析。锻件的初始毛坯温度和模具温度与实际一致，分别为1200℃和300℃，毛坯定为塑性体，模具定为刚性体。有限元模型材料由上述实际测定获得，材料成形采用刚粘塑性流动模型，锻件与模具之间选用剪切摩擦模型：

$\tau_f = mk = m\bar{\sigma} / \sqrt{3}$ ，摩擦因子为0.3。其他参数如表2所示。

3 模拟结果分析

3.1 钢框架联接件的终锻成规律及成形形变化缺陷分析

如图6所示为钢框架联接件终锻成形金属流动过程，图7为其终锻成形结束时的温度场、应变场和应力场分布图。从图6中可知，在终锻成形过程

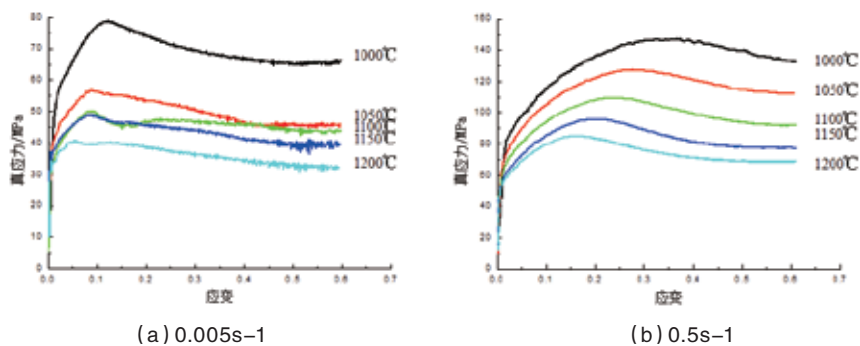


图3 不同变形参数的真应力-应变曲线

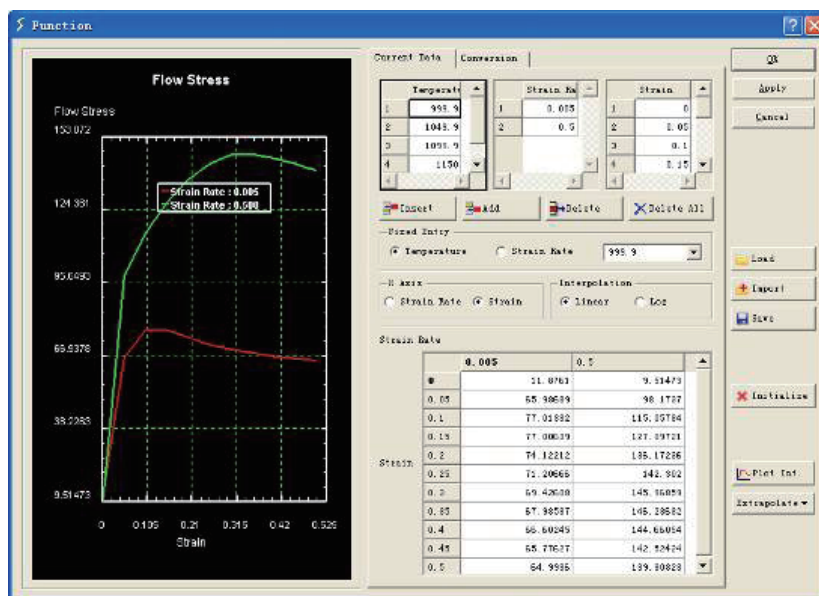


图4 A572 Gr50的高温力学性能曲线

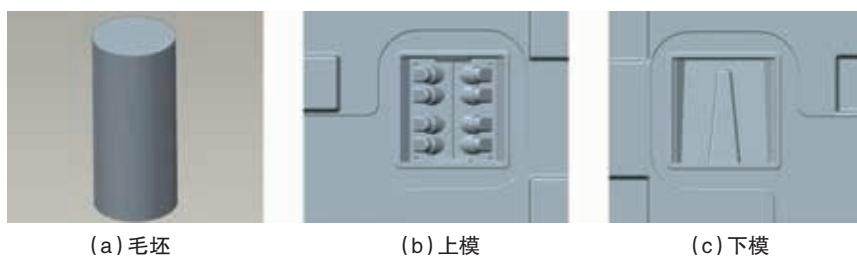


图5 毛坯和模具的三维造型

表2 其他模拟参数的设定

上模速度/ (mm·sec ⁻¹)	压下步长/ (mm/步)	网格划分数/ 个	传热系数/ (N·s ⁻¹ ·mm ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	环境温度/ ℃
7000	0.5	120000	11	20

中,上模开始下压时,上模八个凸起部位与坯料接触,成形八个斜内孔,下模模膛中的凸台与坯料接触,成形配合键槽;如图6(b)所示,上模继续下压时,坯料主要以挤压方式逐渐成形斜内孔和配合键槽,在锻件长度和宽度方向两端开始形成飞边,而锻件四角及四角斜孔仍未充填完全,此处锻件成形最困难;如图6(c)所示,上模下压进入后期成形阶段,锻件四角两侧金属出现回流,且同时向角部流动,金属流动出现交错紊乱,容易出现折叠现象(图中I~IV处所示),这些都是由于制坯材料分配不合理导致初始坯料形状变化造成的。

由图7(a)所示,锻件终锻成形结束的四角斜内孔附近边缘处和中部细长键槽处的局部温度较高,且分布不均匀,容易产生温度应力,导致折叠裂纹等缺陷;又如图7(b)和7(c)所示,在锻件终锻成形结束时,锻件等效应变分布不均匀,锻件飞边处、斜内孔内部边缘处以及中间键槽内的局部等效应变较大,该部位的等效应力较大,局部变形不均匀,会由于局部金属流动较慢或流动紊乱的原因造成四角斜内孔边缘折叠的缺陷。

3.2 模具载荷分析

如图8所示为钢框架联接件终锻成形过程中的模具在Z方向上的载荷-行程曲线。在锻件成形初始阶段,上模八个凸起部位与坯料接触,充填八个斜内孔,下模模膛中的凸台与坯料接触,充填配合键槽。该阶段金属流动主要以轴向挤压为主,金属在型腔内的流动自由面积较大,所受阻力很小,载荷较小且平稳增加;随着上模压下量增加,载荷变化速率有较大增加,这是由于中部斜内孔和配合键槽

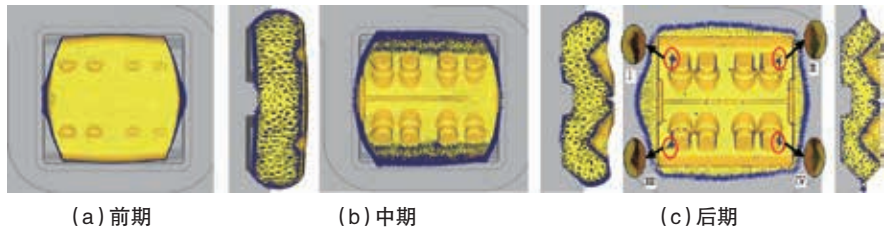


图6 终锻成形金属流动过程

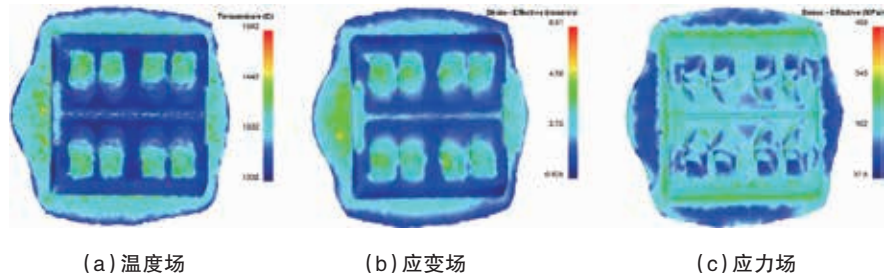


图7 终锻成形结束时的温度场、应变场和应力场分布图

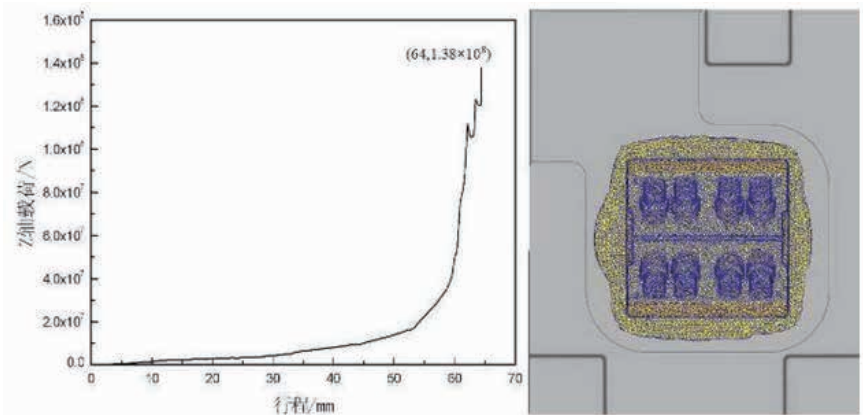


图8 上模载荷-行程曲线

基本充填完成,金属逐渐变为以径向流动为主,金属流动的自由表面积在减小,阻力增大,载荷增加较大;在锻件成形后期的靠模阶段,主要是充填最难成形的锻件四角及部分圆角,金属在模具型腔的流动空间较小,金属压入量减少,阻力较大,载荷急剧上升,最大载荷达到了1.383108N,模具受到较大的冲击载荷,容易使模具产生缺陷,影响模具寿命。

3.3 模具应力和温度分析

模具应力和温度分析可以有效预测模具的失效形式,为提高模具寿命

提供依据。如下图9为终锻成形结束时模具的等效应力分布图,可知上、下模具等效应力受加载力的作用相互对应,主要分布在终锻模膛内部,上模最大等效应力达到1860MPa,下模最大等效应力达到2020MPa,但下模应力整体分布相对均匀。因此,图中出现局部较大等效应力主要位于上模,应力较大部位处包括:对应于锻件八个斜内孔外边缘附近的模具型腔圆角和沟槽附近,以及对应锻件中部键槽两端的模具型腔凸起边缘处(如图中P1、P2、P3和P4点附近处)。这主要是由于模具型腔的

圆角、沟槽和凸起处的金属流动阻力较大,故等效应力值较大,且上模的模膛凹凸复杂,各部位金属充填不一致,八个斜内孔先充型完好,而附近边缘其他部位仍在充填,造成等效应力值存在差异,这样容易造成局部区域的应力集中现象。图10为终锻模具温度分布图,上模对应锻件八个斜内孔的凸起区域的局部温度较高,温升相对于其他部位较快,同时终锻模具又承受局部应力集中和热疲劳的作用,极易发生模具开裂失效的危险。

因此,在锻造生产中应尽量快速锻打,提高打击效率,避免造成模具温升过大,使其强度下降;同时要合理摆放始锻毛坯的位置,防止产生附加力矩,导致模具破坏。

4 实际生产验证与分析

4.1 生产试制条件

生产试制选用圆柱形热轧钢坯,毛坯材料为ASTM A572 Gr50,毛坯尺寸为 $\Phi 150\text{mm} \times 338\text{mm}$,毛坯由中频电炉加热到 1200°C ,模具温度为 250°C ,生产设备为5t模锻锤生产线,根据已制定的锻造工艺进行生产。

4.2 生产结果分析

依据模拟结果,借助上述钢框架

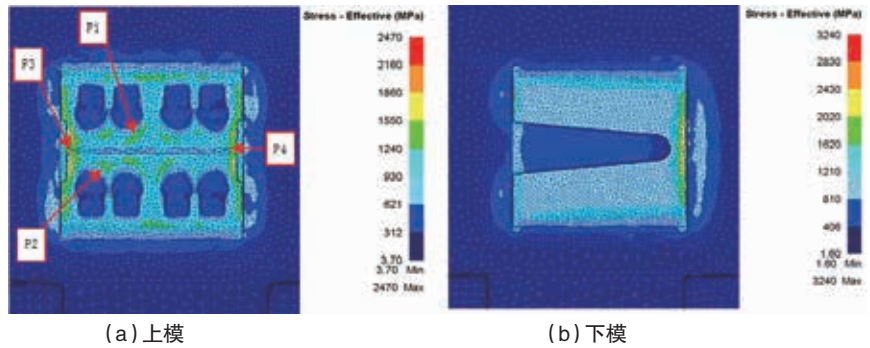


图9 终锻模具等效应力分布图

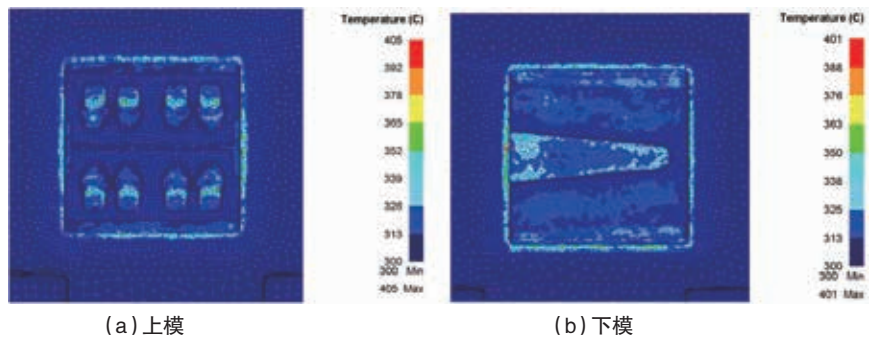


图10 终锻模具温度分布图

联接件锻造工艺进行生产,如图11所示为试制出的锻件和锻打后的模具。由图11(a)和(b)中锻件形状观察可知,锻件成形较为完好,偶尔会在四角斜内孔附近边缘处出现折叠缺陷;图11(c)中显示了多次锻打后的模具也出现了斜内孔对应边缘附近的开裂失效,与模拟结果基本一致。

又如表3为锻件多件试制生产的

统计分析表,对获得的锻件进行产品出厂合格率检验和单副模具锻打数量统计,可知锻件在成形质量较好的基础上,缺陷出现几率较小,产品出厂合格率较高,达到了87.6%,符合钢框架联接件生产和质量的要求;同时单副模具的锻打数量较高,模具失效率较低,模具使用寿命合理,有效验证了钢框架联接件模锻工艺的可行性。



图11 试制出的锻件和锻打后的模具

5 结论

(1) 对钢框架联接件成形工艺模拟方案进行分析,测定出所选钢材 ASTM A572 Gr50钢的高温塑性变形规律,为准确模拟和后续生产提供基础。

(2) 借助DEFORM-3D软件对钢框架联接件成形过程进行模拟,获得了终锻结束时的温度场、应变场和应力场分布情况。可知终锻成形后期的四角斜内孔附近边缘处金属流动交错紊乱,局部温度较高,变形不均匀,易产生折叠的缺陷。

(3) 钢框架联接件成形过程中模具承受的最大载荷为1.383108N,对应斜内孔外边缘附近的上模型腔圆角及沟槽附近的局部等效应力较大,局部温度较高,易发生模具开裂失效。因此,锻造生产中应提高打击效率和合理摆放始锻毛坯的位置,提高模具寿命。

(4) 实际生产试制与模拟结果基本一致,锻件成形较为完好,折叠缺陷出现几率较小,符合产品生产和质量的要求;模具失效率低,模具寿命合

理。该研究有效验证了钢框架联接件模锻工艺的可行性。7

参考文献

- [1] 史启超. 钢框架结构的研究及优化设计[J]. 房地产导刊, 2015 (9) :96.
- [2] 赵熙元, 但泽义, 张榆元. 建筑设计资料集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] 张哈, 郑志镇, 李建军, 等. 高筋薄腹板类锻件三维预成形设计及优化[J]. 锻压技术, 2014, 39 (2) :12-16.
- [4] Hartly P, Pillinger I. Numerical simulation of forging process[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2006, 195: 6676-6690.
- [5] 李振红, 黄英娜, 陈聪, 等. 基于DEFORM的轮毂法兰盘锻造工艺优化设计[J]. 热加工工艺, 2015, 44 (21) :111-116.
- [6] 赵鹏展, 魏良庆. 异形齿盘热锻成形工艺数值模拟与优化设计[J]. 锻压技术, 2016, 41 (1) :146-149.
- [7] Zadshakoyan M, Abdi Sobbouhi E, Jafarzadeh H. Investigation of precision forging process of spur gears: numerical analysis and experiments[J].

Advanced Materials Research, 2011, 341 (1) :265-270.

- [8] 高峰, 林军. 高功率密度发动机连杆热模锻工艺模拟与优化[J]. 精密成形工程, 2015, 7 (4) :66-70.
- [9] 王建锋, 邓深, 饶江平, 等. 钛微合金化Q345E钢的试验研究[J]. 钢铁钎钛, 2010, 31 (2) :20-25.
- [10] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metall, 1996 (14) :1136-1138.
- [11] Hee Y, Kim A, Soon H, et al. High temperature deformation behavior and microstructural evolution of Ti-47Al-2Cr-4Nb intermetallic alloys[J]. Scripta Materialia, 1998, 38 (10) :1517-1523.

作者信息

1. 作者简介: 张桂尚, 江苏理工学院, 通讯地址: 江苏省常州市中吴大道1801号, 邮编: 213001, 电话: 15061952150, 电子邮箱: zhangguishang1@163.com
2. 通信作者: 雷卫宁, 江苏理工学院, 博士, 教授, 通讯地址: 江苏省常州市中吴大道1801号, 邮编: 213001, 电话: 0519-86953061, 13961416717, 电子邮箱: leiweining@jsut.edu.cn

(上接36页)

5 结束语

弯管模具的设计重点在于防止干涉和避免打滑、折皱等质量缺陷,防止干涉方面能够熟悉弯管机的各种工作模式及动作非常重要,要根据弯管机的动作情况设计和调整弯管模具、编制合理的弯管程序,避免成型质量缺

陷的方法是要保证管料有足够的夹持长度、设计合理的防皱板、导模尺寸,并选择合理的润滑方式。

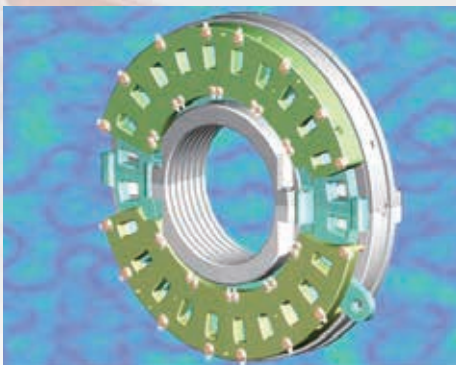
以上只是目前我公司生产中已经取得的实际经验及研究成果,无余量弯管、零弯曲半径弯管以及焊接法兰后弯管等弯管行业的先进技术还有待我们进一步去研究。7

参考文献

- [1] 蒋怡等. 钣金冲压工艺手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [2] 章燕谟. 锅炉制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [3] 梁炳文等. 实用钣金冲压工艺图集[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

汽轮机旋转隔板制造工艺技术

高参数大功率汽轮机旋转隔板具有独特的结构特点,既具有普通隔板将热能转化为动能的功能,又具有阀门调节流量的性能,充分简化了汽轮机的总体布置和整体结构,提高机组的安全性,降低整个工程的成本。自主的汽轮机旋转隔板制造工艺技术有效地降低了整台机组的制造成本。通过高参数大功率汽轮机旋转隔板制造工艺技术的分析及自润滑喷涂技术的研究,针对其独特的结构特点:外径大,厚度薄,材料切除率高,结构复杂,端面硬质高等特点,制定出合理的工艺流程,设计、制造专用的工夹具,全面解决高参数大功率汽轮机旋转隔板工艺关键技术难点,确定高参数大功率汽轮机旋转隔板工艺技术要求及方法,确定喷涂材料及工艺参数,在隔板基体表面局部喷涂一层耐高温的新颖自润滑合金,减少摩擦付之间的磨损,以便在450℃高温的干摩擦条件下长期使用,提高了使用寿命,满足了机



组的特殊要求。该制造工艺技术推广应用前景广泛,已有众多发电厂使用了这种结构的汽轮机旋转隔板,取得的成果具有重大的社会效益和经济效益。

该制造工艺技术实施过程中制定的工艺流程,开发设计的专用工装设备都具有较高的技术含量。将汽轮机旋转隔板工艺技术成果用以实际生产,可以改善汽轮机机组的热能转化,对提高机组运行效率,节约能源有重大的现实意义,同时还可获得由可靠性、有效性的提高所带来的潜在收

益。该制造工艺科技成果总体技术达到了国内外领先水平。

该制造工艺方法已获国家发明专利授权——《一种汽轮机旋转隔板及其加工工艺》。专利授权号:200910198733.X。并于2014年11月被评为中国专利优秀奖。**T**

主要完成单位:上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂

主要完成人:蔡振铭,周辉峰,刘毅,沈永根,张鹤,殷槐金,李广磊

(上接18页)

(7)针对全新架构电动汽车结构的不同特点,研究并建立电动汽车整车及车身轻量化的评价方法;

(8)通过梳理碳纤维复合材料、铝合金、镁合金和超高强度钢材料的静动态性能数据,制订相关零部件结构设计、成形和性能评价与异种材料连接的技术标准,并建立电动汽车轻量化共性基础数据库。

项目取得的轻量化材料静动态性

能分析、典型零部件成形与异种材料连接等关键共性技术成果,以及全新构架电动汽车结构-材料-性能一体化设计关键技术成果,将能够增补国内空白,改变我国当前电动汽车的开发理念;建立的电动汽车轻量化数据库和技术标准,将服务于全行业电动汽车产品的研发;建立的电动汽车轻量化评价体系,能够用于电动汽车轻量化水平的评价;形成的电动汽车轻

量化技术研究报告,将为政府和企业的科学决策提供有力支撑;突破的电动汽车轻量化共性关键技术将首先在本项目参与单位的目标车型上获得应用,之后也将在这些企业的其他电动汽车上推广应用,并通过参与项目的高校和科研单位在行业中进一步扩散应用,从而将能够实现创新效率的最大化。**T**

AP1000核电蒸汽发生器研制

“AP1000核电蒸汽发生器研制”

项目属于技术开发成果，是核动力工程技术中的核能发电工程学科。该项目与国家“十三五”规划和《中国制造2025》计划一致，也是中国核电产业发展的重要布点之一。蒸汽发生器在核蒸汽供应系统中是最为关键的设备之一，其功能是将反应堆载热剂所产生的热量传递给二回路，使二回路侧工作介质水产生一定压力的蒸汽并经汽水分离器、干燥器干燥后供常规岛汽轮机工作，同时，起着将带放射性的一回路系统与不带放射性的二回路系统阻隔的作用，其产生的干燥蒸汽品质直接影响电站的功率与效率。

AP1000蒸汽发生器采用“非能动”技术及模块化设计，是当今最安全、最先进核电堆型，较之二代、二代加核电产品有着更高的安全性和更长的使用年限，是应对核电事故的一项实际举措。当今世界AP1000首个反应堆设在中国。

上海电气核电设备有限公司（简称上核）于2008年9月，正式与国核工程公司签订海阳2号机组2台AP1000蒸汽发生器的供货合同。该蒸汽发生器是由美国西屋设计，是中国制造企业第一次完全依靠自身力量完成制造交付的三代AP1000核电蒸汽发生器，也是上海电气承接的首台三代AP1000核电蒸汽发生器。项目主要研制要求如下：

- (1) 掌握三代AP1000百万千瓦级蒸汽发生器关键制造技术；
- (2) 建立完整的适用于三代



AP1000百万千瓦级蒸汽发生器制造的技术规范；

(3) 形成三代AP1000百万千瓦级蒸汽发生器标准化的制造工艺流程；

(4) 完成三代AP1000百万千瓦级蒸汽发生器设备制造。

项目承接后，上核充分消化设计要求，在以往蒸汽发生器的制造经验基础上，依靠自身的人员、技术和装备，通过科研立项、专题攻关、工艺试验、技术创新，完全掌握了一整套AP1000蒸汽发生器的制造技术，在汽水分离器的制造、支撑板加工、抗振条的制造、深孔加工、排污管加工、支撑板装配、内套筒激光对中、管束及抗振条装配、液压胀接、管板堆焊、隔板疏水孔的制造、隔板的装配及焊接、隔板补板焊接、涡流检测、磁性法铁素体测量、拔脱力检测、上部环缝局部热处理、下部环缝局部热处理、电解抛光和泵壳的装配及焊接等技术领域进行了23项技术创新，形成11项专利技术：发明专利授权5项，实用新型专利授权5项，PCT专利申请1项。

项目制造质量水平高。其中，关键焊缝焊接一次合格率均达到99%以上，管板深孔钻等关键机加工合格率在99%以上，零部件装配精度高于设计要求。该研制项目于2015年3月25日正式交付山东海阳核电站。

从经济效益看，2013年至2015年共生产4台套产品，新增产值112200万元，新增利润8797万元，平均毛利率8%，2015年实现产值25501万元，利润2747万元，平均毛利率11%。

AP1000核电蒸汽发生器的成功研制提升了我国核电蒸汽发生器的制造能力，标志着我国核电设备的制造技术水平又迈上了一个新台阶，为后续三代百万千瓦级核电蒸汽发生器批量化、标准化制造奠定了基础，相关技术也可应用于其他核电工程项目。7

主要完成单位：上海电气核电设备有限公司
 主要完成人：唐伟宝，陆冬青，张茂龙，许遵言，夏炎鑫，江才林，袁亚兰，吴新华，李双燕，徐超，季龙华，陆连萍，李晓冬，刘来魁，苏明星

关于举办2016中国智能装备高峰论坛的通知

各会员单位、相关单位：

2016是“十三五”规划开局之年，也是实施“中国制造2025”强国战略的关键之年。宁波作为“中国制造2025”首个试点示范城市，为全面对接“中国制造2025”战略规划，研讨智能装备产业发展前沿及应用技术成果，发展区域智能装备产业，提升装备制造水平，中国机械制造工艺协会联合机械科学研究总院、中国智能制造产业技术创新战略联盟、宁波象保合作区等单位和组织举办“2016中国智能装备高峰论坛”。本次论坛秉承“智能、绿色、创新”理念，邀请业内知名专家、学者和企业界代表共同交流智能装备产业发展的前沿动态，以及各种新理念、新方法、新技术，促进智能装备制造技术、标准、产品和服务协同发展。活动详情如下：

一、组织机构

1. 主办单位：宁波市人民政府
机械科学研究总院
中国航天科工集团公司
中国机械制造工艺协会
2. 承办单位：中国智能制造产业技术创新战略联盟
宁波市经济和信息化委员会
宁波象保合作区管理委员会
3. 协办单位：机械装备工业节能减排产业技术创新战略联盟
中国机械制造工艺协会绿色制造分会
中央企业青年科技工作者协会
机械科学研究总院海西分院
宁波市智能制造协会
宁波市模具行业协会

二、活动时间：2016年10月19-21日。

三、活动地点：宁波富邦大酒店（宁波市海曙区马园路455号）。

四、活动规模及人员

参会人员主要为从事制造业科研、生产企事业单位管理和技术人员，以及政府部门相关人员等，约150-200人。

五、会议主要内容及议程

拟邀请业内知名专家针对智能制造、绿色制造、3D打印技术与发展、企业转型升级等方面进行专题报告，同时组织企业参观。

时间	活动内容		
19日	注册报到（宁波富邦大酒店）		
20日	上午	07:30-09:00	注册报到（宁波富邦大酒店）
		09:00-12:00	大会报告
	下午	13:30-15:30	大会报告
		16:00-17:30	中国智能制造产业技术创新战略联盟理事会
21日	上午	08:30-12:00	企业参观
	下午	返程	

六、注册参会及后勤

本次会议不收取会议费，住宿、差旅费均自理。

凡有意参加本次活动者，请于10月15日前将回执以传真、电子邮件或短信的形式反馈至会务组。

七、联系方式

联系电话：

010-88301012, 13522100784（田媛，中国机械制造工艺协会）

010-88301804, 15210564290（朱政，中国智能制造产业技术创新战略联盟）

0574-89510050, 15088416420（滕海波，宁波象保合作区）

传真：010-88301523

邮箱：cammt_bjb@163.com

地址：北京市海淀区首体南路2号院1213房间，邮编100044

附件：1. 论坛回执（可从www.cammt.org.cn下载）

关于征集中国机械制造工艺协会 标准工作委员会委员的通知

各有关单位：

为落实国家标准化工作改革精神，加快推进我国机电产品制造工艺标准化工作，增加机电产品制造工艺标准有效供给，提升标准对制造业发展的支撑和保障作用，中国机械制造工艺协会决定成立中国机械制造工艺协会标准工作委员。根据工作安排，现在开始委员征集工作，具体事项通知如下：

一、征集范围

中国机械制造工艺协会标准工作委员会主要负责机械制造工艺相关团体标准的制修订工作，负责组织、协调参与相关领域国际、国家、行业标准化工作。委员征集范围为中国机械制造工艺协会会员单位及有关单位人选。

二、委员条件

1. 从事机械制造工艺方面科研、生产、应用、检验、服务等方面的专业技术人员，具有较高的理论水平、扎实的专业知识和丰富的实践经验；
2. 具有副高级（含副高级）以上专业技术职称，或具有与相应专业技术职称对应的职务；
3. 熟悉并热心从事标准化工作，遵守委员会章程，认真履行委员职责和义务，积极参加委员会组织的各项活动，具有较好的文字功底和外语水平；
4. 所在工作单位同意并推荐。来自社会和民间的专业技术人员可由行业协会或相应社会团体推荐。

三、申报程序及要求

1. 委员候选人填写中国机械制造工艺协会标准工作委员会委员登记表（见附件），经所在单位审查并加盖单位公章（法人资格章，申请人工作单位与推荐盖章单位需一致）；
2. 2016年10月25日前，将委员登记表纸质材料一式四份（贴本人近期正面免冠二寸彩色照片，另附同底照片2张）邮寄至中国机械制造工艺协会，同时将电子文档发送至cammt_standard@163.com；
3. 中国机械制造工艺协会将对委员候选人资格进行评议，遴选确定中国机械制造工艺协会标准工作委员会委员名单。

四、联系方式

地 址：北京市海淀区首体南路2号（100044）

联系人：田媛 李海斌

电 话：010-88301012/1704

邮 箱：cammt_standard@163.com

附 件：中国机械制造工艺协会标准工作委员会委员登记表（可从www.cammt.org.cn“通知文件”栏目下载）

2016年9月26日