

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.019

梗签悬浮分离腔体内颗粒相运动的数值模拟研究

顾宗幸¹, 李浙昆^{1*}, 蔡培良², 王胜枝², 郑新虎¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500;
2. 红云红河烟草(集团)有限责任公司曲靖卷烟厂, 云南曲靖 655001)

摘要:为了进一步降低烟梗中的含丝率,课题组根据烟丝和烟梗的密度不同,设计了悬浮分离腔体结构。首先利用流体力学中的相关公式求解出通入悬浮分离腔体内的气压范围;再利用 FLUENT 软件对腔体内部的气流速度及轨迹进行模拟仿真,对比得到 0.22 MPa 下的负压可以达到相对理想的分离效果;最后采用离散相模型和 Euler-Lagrange 多相流求解的方法,在 FLUENT 软件中对悬浮分离腔体内烟梗的颗粒相运动进行数值模拟仿真,得到烟丝颗粒与烟梗颗粒在腔体中的捕捉率。分离后的烟梗中的含丝率由原先的 10%~20% 降低到 3.85%~8.53%,进一步提高了烟丝利用率。

关键词:卷烟机械;悬浮分离腔;颗粒;离散相模型;Euler-Lagrange 多相流法;分离效率;FLUENT 软件

中图分类号:TH128 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0091-05

Numerical Simulation of Particle Phase Movement in Suspension Separation Cavity

GU Zongxing¹, LI Zhekun^{1*}, CAI Peiliang², WANG Shengzhi², ZHENG Xinhui¹

(1. Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China;
2. Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd. Qujing Cigarette Factory, Qujing, Yunnan 655001, China)

Abstract: In order to further reduce the silk content in tobacco stem, the suspension separation chamber structure was designed according to the different density of tobacco and tobacco stem. Firstly, relevant formulas in fluid mechanics were used to solve the air pressure range into the suspension separation cavity, then FLUENT software was used to simulate the air flow velocity and trajectory in the cavity, and the relative ideal separation effect was obtained when the negative pressure of air pressure was at 0.22 MPa after comparison; finally, the discrete phase model and the Euler-Lagrange multiphase flow method were used to simulate the particle phase motion of the stem suspension chamber in FLUENT software, and the capture rate of tobacco particles and stem particles in the cavity were obtained. The silk content of separated tobacco stems decreases from 10%~20% to 3.85%~8.53%, which further improves the utilization of tobacco.

Keywords: cigarette machinery; suspension separation chamber; granule; discrete phase model; Euler-Lagrange multiphase flow method; separation efficiency; FLUENT software

在烟草行业中梗丝分离的效率对烟丝的利用率尤为重要,梗签剔除不干净会出现烟支刺破以及浪费烟丝的现象^[1]。目前国内外各个烟草企业都对分离装置进行了或多或少的研究:湖北中烟工业有限责任公司^[2]、广东中烟工业有限责任公司^[3]和上海的新平科

工业技术有限公司^[4]等都申请了梗丝分离系统的专利;刘澜波等^[5]把 PROTOS70 卷接机组二次分离系统中的风选室改为“之”字形结构,并在风选室垂直上方加装梗签打散机构,将烟丝、梗签和结团状烟丝等打散,实现梗、丝的彻底分离;柏世绣等^[6]将 ZJ17 卷接机

收稿日期:2018-11-12;修回日期:2019-02-14

基金项目:云南中烟工业有限责任公司科技项目:真空、悬浮、螺旋和风分系统的研究与开发(2017GY05)。

第一作者简介:顾宗幸(1993),男,山东费县人,硕士研究生,主要研究方向为数字化设计与制造。E-mail:771758722@qq.com

组的风分室由直通结构改为上部倾斜下部竖直的结构,并增加导弧板,使通入风分室中的气流通道变为“S”形,实现不同的气流速度的形成,从而有利于梗、丝分离。这些方法虽然都取得了不错的分离效果,但时常还会在梗签中夹杂着大量的烟丝。为了进一步降低梗中含丝率,课题组设计出一种长方体型的悬浮分离腔体,利用 ANSYS Workbench14.0 软件中的 FLUENT 模块对气流、梗签及烟丝颗粒进行模拟,可以得到他们在悬浮腔体内部的运动轨迹。研究烟梗及烟丝的运动规律,通过对不同固体颗粒的捕捉,可以得到该风分气压下梗丝分离的效率。这项研究可为梗丝分离装置的研制提供一定的参考。

1 梗丝分离气压求解及算法与模型建立

悬浮分离腔体模型如图 1 所示。分离原理:原机产生的梗签混合物由进入通道进入到悬浮分离腔内,在腔体内通入一定压力的气体,根据烟梗和烟丝密度不同所产生不同的自由沉降速度进行分离。当烟梗颗粒的自由沉降速度大于气流的上升速度时烟梗就会向下运动,最终从下通道流出;当烟丝颗粒的自由沉降速度小于气流的上升速度时烟丝就会随着气流做上升运动,最终从上通道和空气一同流出。

悬浮腔式分离梗签时,由于梗签及烟丝体积都很小,故可把它们看作一个个的固体小颗粒,运用离散的方法进行研究,即把流场中所存在的梗签和烟丝颗粒看成是一个个离散颗粒的集合。要想进行颗粒相运动的模拟仿真首先要求出通入腔体中气压的大小。

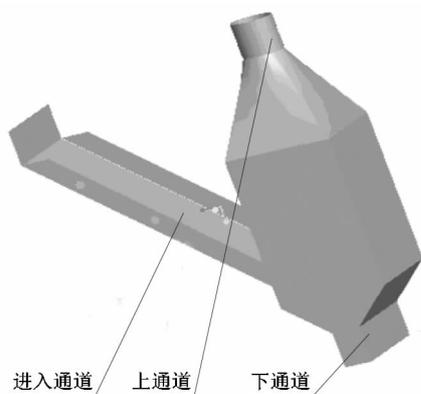


图 1 悬浮分离腔体

Figure 1 Suspension separation chamber

1.1 梗丝分离气压求解

根据分离原理,要想梗签分离就需满足:气流速度大于烟丝悬浮速度同时小于梗签悬浮速度。由于烟丝及梗签都是不规则颗粒,查阅文献[7]得到不规则颗粒物体的悬浮速度求解公式为:

$$v_0 = 3.62 \sqrt{\frac{d_m(\rho_p - \rho)}{C\rho K_s}} \quad (1)$$

式中: d_m 为颗粒当量直径,m; ρ_p 为固体颗粒密度, kg/m^3 ; ρ 为流体介质密度, kg/m^3 ; C 为摩擦阻力因数; K_s 为形状系数。

本研究基于某品牌香烟,得知烟丝密度为 $164.5 \text{ kg}/\text{m}^3$;梗签密度为 $383.6 \text{ kg}/\text{m}^3$;梗签及烟丝当量直径分别取 $0.10 \sim 0.57 \text{ mm}$ 和 $2.0 \sim 4.5 \text{ mm}$;流体密度为 $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$; C 取 0.44 ; K_s 取 1 。经公式(1)计算后可求得烟丝及梗签的悬浮速度分别为 $0.61 \sim 1.47 \text{ m}/\text{s}$ 和 $4.18 \sim 6.30 \text{ m}/\text{s}$,那么气流速度的取值范围应该为 $1.47 \sim 4.18 \text{ m}/\text{s}$ 。继而根据流体力学的相应公式可求出通往腔体内的负压范围为 $0.179 \sim 0.225 \text{ MPa}$ 。

1.2 求解算法

目前,模拟多相流求解问题的方法主要分为 2 类:以多相流模型 (multiphase models) 为代表的 Euler-Euler 方法和以 DPM 模型 (discrete phase model) 为代表的 Euler-Lagrange 方法。Euler-Euler 方法主要用于固定的空间点上的流体状态的数值模拟^[8-9],如 VOF 模型、Mixture 模型和 Euler 模型等。此类模型将颗粒相拟流体化,并近似处理为性质均一的连续介质,气相、颗粒相可相互渗透,两相均采用 Euler 方法描述。Euler-Lagrange 方法主要用于旋风除尘、气力输送等领域的数值模拟^[10-11],如 DPM 模型、DEM (discrete element method) 模型等。同时 Euler-Euler 方法所研究的是离散在流域空间上的点,而 Euler-Lagrange 方法把单个粒子作为研究对象,并且 Euler-Lagrange 方法对于粒子轨道方程的求解是在粒子相的拉格朗日模式下进行的^[12]。故课题组采用 Lagrange 方法对流场中每个颗粒的位置和动力学参数分别进行追踪,以求解颗粒流的运动,进一步探讨腔体的分离效率。

1.3 颗粒轨迹方程建立

在整个气相流场中,固体颗粒的运动属性很大程度上会受到来自该气相流场中的气流速度的影响,这样就会使得固体颗粒原有的运动发生改变,包括速度的大小及方向。因此固体颗粒的随机轨迹模型或固体颗粒的云模型就可以应用于求解离散相中的固体颗粒与湍流流体之间的相互作用的问题^[13]。

固体颗粒在流场中运动时,它们之间会发生很多相互作用,如气流与腔体、气流与颗粒、颗粒与腔体和颗粒与颗粒之间的碰撞。固体颗粒之间发生碰撞之后的转动速度、平动速度等物理量需要通过动量守恒方程、角动量守恒方程等来进行计算确定。关于颗粒间

的相互碰撞,主要是模拟离散相颗粒与颗粒之间、颗粒与壁面之间的壁撞作用,目前主要用硬球模型^[14]和软球模型^[15]。软球模型中,颗粒碰撞后产生微小形变,并依据变形量计算颗粒间的弹性、塑性和摩擦作用。硬球模型认为固体颗粒之间的碰撞属于弹性碰撞,即碰撞之后原颗粒的形状不会发生任何变化。因此硬球模型的整个碰撞过程完全遵守动量守恒定律,当固体颗粒相对于气相流场中体积分数不太大的时候可以用硬球模型来进行模拟。在采用软球模型求解颗粒间碰撞问题时,固体颗粒的外部形状、发生碰撞之前固体颗粒的线速度以及壁面的材料都会影响到固体颗粒与壁面发生碰撞后的结果。

基于上述原因根据动量方程建立了如下的固体颗粒的瞬态动量方程:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}; \quad (2)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = F_D(v - v_p) + \frac{g_y(\rho_p - \rho)}{\rho_p}; \quad (3)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = F_D(w - w_p) + \frac{g_z(\rho_p - \rho)}{\rho_p}. \quad (4)$$

式中: u, v 和 w 为气体在 x, y 和 z 方向上的速度分量, m/s ; u_p, v_p 和 w_p 为颗粒在 x, y 和 z 方向上的速度分

量, m/s ; F_D 为颗粒曳力, N ; g_x, g_y 和 g_z 为 x, y 和 z 方向上的重力加速度, m/s^2 。

对上述方程进行积分就得到了离散相的轨迹方程:

$$\frac{dx}{dt} = u_p, \frac{dy}{dt} = v_p, \frac{dz}{dt} = w_p. \quad (5)$$

2 数值模拟及其结果分析

基于 ANSYS 中的 FLUENT 模块进行模拟仿真。

2.1 不同气压下流场的分析

上文已经计算出负压的范围为 $0.179 \sim 0.225$ MPa, 为了能够寻找出较优的气压值, 取 3 组不同大小的负压: $0.18, 0.20, 0.22$ MPa, 其腔体内部气流的速度及轨迹如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 气压在 0.18 和 0.20 MPa 时, 悬浮腔体内部整个气流速度及轨迹图比较相似, 气流速度较大的区域主要集中在左侧入口壁面处的上方, 整个悬浮腔体内的气流速度分布不是很均匀。气压在 0.22 MPa 时, 左侧进风口壁面处的气流速度比较小, 整个腔体中的气流速度分布相对比较均匀, 在贴近悬浮腔体壁面处的速度比较低, 远离壁面部分的气流速度比较大。

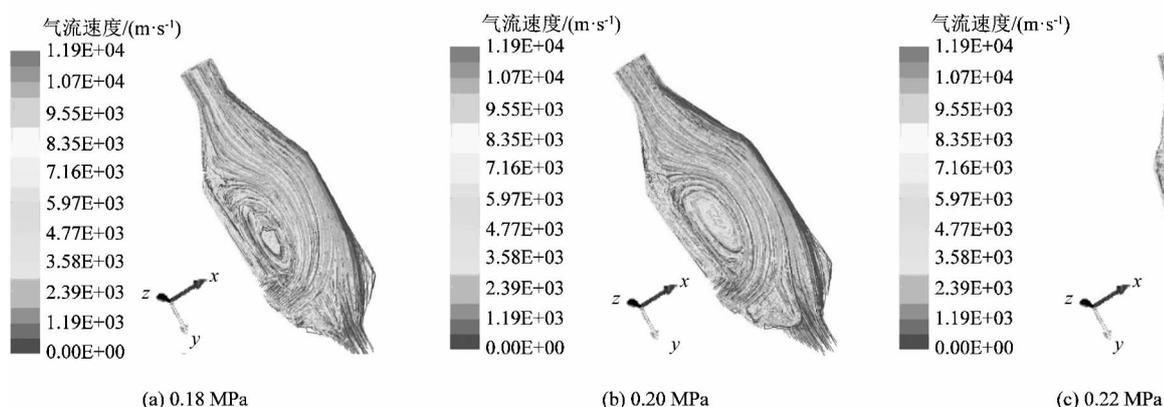


图 2 不同气压下的气流速度及轨迹

Figure 2 Airflow velocity and trajectory at different pressures

对于梗丝混合物的分离,在保证分离效率的前提下需要尽量减少通入气压所带来的碎丝率。通过上述分析可以看出当通入负压为 0.18 和 0.20 MPa 时贴近左侧壁面处的气流速度较大,当气流通入时,会加大梗丝混合物与左侧壁面的碰撞力度,使得碎丝率相对提高;而当通入负压为 0.22 MPa 时碎丝情况得到了缓解,此时悬浮腔体内部气流速度分布相对均匀,可以达到相对理想的分离效果。

2.2 腔内颗粒轨迹研究

在 FLUENT 模块中选择面射流源,在入口平面处将颗粒群均匀地射入悬浮分离腔体内。设定如下边界条件:模拟烟丝颗粒运动轨迹时,把上通道顶部圆形平面设为捕集面,左侧梗丝混合物的进入通道矩形平面设为反射面,下通道底部矩形面设为逃逸面;模拟梗签颗粒运动轨迹时,将底面下通道底部矩形面设为捕集面,左侧梗丝混合物进入通道矩形平面设为反射面,上

通道顶部圆形平面设为逃逸面。

首先在悬浮分离腔体的梗丝混合物入口处放置不同数量的烟丝或烟梗颗粒。然后运行 FLUENT 仿真模块,得到烟丝和烟梗颗粒在悬浮腔体内的运动轨迹如图 3~4 所示。

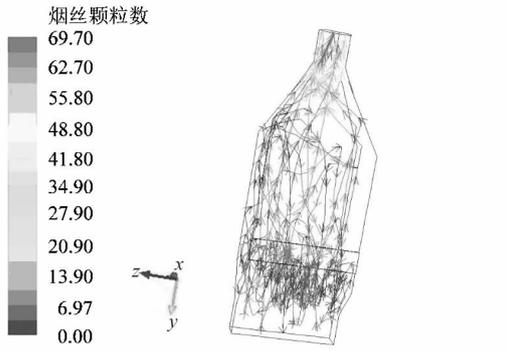


图 3 烟丝颗粒轨迹

Figure 3 Tobacco particle track

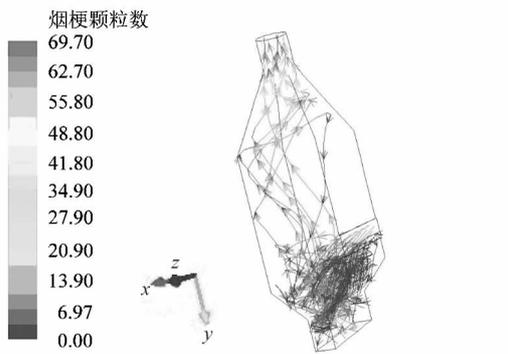


图 4 烟梗颗粒轨迹

Figure 4 Tobacco stem particle trajectory

从图 3 可以看出烟丝颗粒经过悬浮分离腔体分离后,绝大多数烟丝向上运动达到分离,而只有少数烟丝向下运动。从图 4 可以看出烟梗颗粒经过悬浮分离腔体分离后,多数烟梗颗粒向下运动,只有极少数会向上运动。

2.3 腔体内分离效率的研究

在悬浮分离腔体的入口处加入 50~500 个烟丝颗粒,分 10 组加入,第 1 组加入 50 个,以后每组比前一组递增 50 个,直到最后一组加入 500 个为止,然后进行多次仿真模拟。通过查看每组在腔体上通道出口处收集到的烟丝量,计算出烟丝颗粒的捕捉效率,数值如表 1 所示。对烟梗颗粒也进行多次仿真模拟,操作方法同烟丝颗粒,只是在腔体下通道出口处收集烟梗的量,烟梗颗粒捕捉效率如表 2 所示。

表 1 烟丝颗粒的捕捉情况

Table 1 Capture of tobacco particles

组号	加入颗粒数	捕捉颗粒数	逃逸颗粒数	捕捉效率/%
1	50	32	18	64.00
2	100	63	37	63.00
3	150	95	55	63.33
4	200	129	71	64.50
5	250	162	88	64.80
6	300	196	104	65.33
7	350	223	127	63.71
8	400	263	137	65.75
9	450	284	166	63.11
10	500	326	174	65.20

表 2 烟梗颗粒的捕捉情况

Table 2 Capture of tobacco stem particles

组号	加入颗粒数	捕捉颗粒数	逃逸颗粒数	捕捉效率/%
1	50	48	2	96.00
2	100	96	4	96.00
3	150	143	7	95.33
4	200	191	9	95.50
5	250	236	14	94.40
6	300	283	17	94.33
7	350	330	20	94.28
8	400	376	24	94.00
9	450	420	30	93.33
10	500	461	49	92.20

由表 1 和表 2 可分别计算出烟丝及烟梗颗粒的平均捕捉效率分别为 64.27% 和 94.54%。随着颗粒数目的增加烟梗颗粒的捕捉效率有所下降,但其捕捉效率下降幅度小,一直保持在 90% 以上,这说明大部分梗签都能被分离出来。烟丝比烟梗体积小、质量轻,使得烟丝的捕捉效率并没有烟梗的捕捉效率那么高,这说明在悬浮腔内进行分离时,还会存在一定量的烟丝没被分离出来,落入烟梗的流出通道。

当然在实际的工作分离过程中,烟梗及烟丝的数量不可能只有这么少,但通过模拟不同数量的颗粒,每组变化的幅度都不是很大,模拟结果是可信的。有了烟丝及烟梗的捕捉效率就可以计算出分离出来的烟梗中的含丝率,某烟厂原始的梗丝混合物中含丝率为 10%~20%,下面分别取不同颗粒数量的梗丝混合物,分别对分离出的烟梗中的含丝率进行求解,其结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出分离出的烟梗中的含丝率明显下降,烟丝的利用率进一步提升,这便可以为企业带来更高的利益。

表3 分离后梗签中的含丝率
Table 3 Separation of silk content in stems

序号	总颗粒数	烟丝颗粒数	烟梗颗粒数	落入下通道 烟丝颗粒数	落入下通道 烟梗颗粒数	落入下通道 总颗粒数	含丝率/%
1	100	10~20	90~80	3~7	85~76	88~83	3.41~8.43
2	500	50~100	450~400	17~35	426~378	443~413	3.83~8.43
3	1 500	150~300	1 350~1 200	53~107	1 276~1 135	1 329~1 242	3.98~8.61
4	2 000	200~400	1 800~1 600	71~142	1 702~1 513	1 773~1 655	4.00~8.58
5	2 500	250~500	2 250~2 000	89~178	2 127~1 891	2 216~2 069	4.02~8.60

3 结语

应用 FLUENT 计算流体动力学(CFD)软件以梗签悬浮腔为研究对象,对梗签及烟丝颗粒进行模拟仿真,得出如下结论:

1) 在通入负压为 0.179~0.225 MPa 的范围内,得出负压为 0.22 MPa 时可以达到相对理想的分离效果。

2) 在 0.22 MPa 的气压下对烟丝、梗签颗粒运动分别进行数值模拟仿真,得出它们各自的运动轨迹图。绝大多数烟丝和烟梗流向正确,可达到一定程度的梗丝分离。

3) 通过模拟在悬浮腔口处放置不同数量的颗粒来研究烟丝和梗签在悬浮腔体中的捕捉效率,进一步分析计算可以看出负压为 0.22 MPa 的情况下,经过悬浮腔体的分离后,分离出的梗签中的含丝率大约为 3.85%~8.53%,使原先的梗丝混合物中的烟丝得到了进一步的利用,提高了整体的烟梗分离效率。

参考文献:

[1] 龚道平. ZJ17 卷接机组供丝系统设计参数分析及改进[J]. 烟草科技, 2014(10):24-27.
 [2] 湖北中烟工业有限责任公司. 一种二次梗丝分离箱:2012456386.5[P]. 2012-10-03.
 [3] 广东中烟工业有限责任公司. 烟叶切丝机除尘系统中的烟丝分离方法及烟丝分离装置:200910213676.8[P]. 2010-06-09.
 [4] 上海新平科工业技术有限公司. PROTOS 机组梗丝分离装置:

201220287825.7[P]. 2012-06-18.
 [5] 刘澜波,韩艳军,陈恩,等. PROTOS70 卷接机组烟梗打散型漂浮室的设计[J]. 烟草科技,2016,49(5):91.
 [6] 柏世绣,付保,张东甫. ZJ17 卷接机组二次风选漂浮室的改进[J]. 烟草科技,2012(8):28.
 [7] 吕于剑,曹文仲,吴若琼,等. 不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试[J]. 化学工程,1997,25(7):42.
 [8] SINCLAIR J L, JACKSON R. Gas-particle flow in a vertical pipe with particle-particle interactions[J]. AIChE Journal, 1989, 35(9):1473-1486.
 [9] BRANDANI S, ZHANG Kai. A new model for the prediction of the behaviour of fluidized beds[J]. Powder Technology, 2006, 163(1/2):80-87.
 [10] 王子云,付祥钊,全庆贵. 旋风除尘器的气固两相流的数值模拟与分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2007, 28(4):53-56.
 [11] TSUJI Y, TANAKA T, ISHIDA T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe[J]. Powder Technology, 1992, 71(3):239-250.
 [12] 钟骏徽,李意民,吴倩. 对旋轴流式通风机电固耦合振动分析[J]. 矿山机械, 2011, 39(1):41-46.
 [13] ZHANG Pengwei, XIAO Jun, SHEN Laihong. Numerical simulation of biomass gasification Using Fluent [J]. Biomass Chemical Engineering, 2012, 46(2):3-9.
 [14] LUN C K K, SAVAGE S, JEFFREY D J, et al. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 140:223-256.
 [15] GIDASPOW D, ETTEHADIEH B. Fluidization in two-dimensional beds with a jet Hydrodynamic modeling [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1983, 22(2):193-201.

(上接第 90 页)

PLC 模块实现对铝水浇铸过程中各运动自由度的顺序动作控制;

3) 完成首套样机的试制,经 72 h 不间断的试运行生产,工作性能趋于稳定。

参考文献:

[1] 王凯,耿昕,姚云宾. 关于压铸铝合金材料加工问题的分析[J]. 现代制造技术与装备, 2014(6):49-51.
 [2] 杜国涛,张雷. 压铸铝合金加工质量的控制[J]. 科技创业家, 2013(5):76-77.
 [3] 葛文权,吴祖亮,管振明. 提高压铸铝合金机械加工性能的研究

[J]. 科技传播, 2016, 8(1):57-58.
 [4] 黄彩江,曹志成,刘洋. 高强度压铸铝合金及其热处理的研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(8):89.
 [5] 王晓梅,程晓宇. 压铸铝合金工艺与性能研究[J]. 铸造工艺, 2012, 33(4):499.
 [6] 宋东生,谭晓明. 航空铸铝合金防护体系抗腐蚀性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(25):6181-6183.
 [7] 李晓燕,乔松珊. 基于数理统计的铸铝合金材料试样疲劳寿命分析[J]. 许昌学院学报, 2013, 32(5):18.
 [8] 金梅. 一种双冒口活塞浇铸工艺[J]. 内燃机与配件, 2012(6):30.
 [9] 何素荣. 砂型低压铸造大型铝铸件[J]. 铸造技术, 1996, 17(4):21.