DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.023

金属粉末注射成形过程的计算机模拟理论与应用进展

赵彩艺,徐　磊
(青岛科技大学 材料科学与工程学院,山东 青岛 266042)

摘　要:金属粉末注射成形技术是一种新的材料成形技术,综述了金属粉末注射成形的优缺点以及成形工艺过程。计算机辅助模拟最佳加工艺参数在金属粉末注射成形中也得到了应用,分析了计算机模拟的理论基础、发展与现状,提出了我国发展金属粉末注射成形过程计算机模拟技术的必要性和迫切性。

关键词:金属粉末注射成形;计算机模拟;理论基础与应用;模拟软件

中图分类号:TB331　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0996-05

Theory and Application Progress on Metal Powder Injection Molding Process Computer Simulation

ZHAO Caiyi, XU Lei
(School of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Metal powder injection molding technology was a new materials forming technology. The advantages and disadvantages of metal powder injection molding and forming process were summarized. The computer aided simulation of optimum adding process parameters had also been applied in metal powder injection molding. The theoretical basis, development and current situation of computer simulation were analyzed, and the necessity and urgency of developing computer simulation technology of metal powder injection molding process in China were put forward.

Key words: metal powder injection molding; computer simulation; theoretical foundation and application; simulation software

金属粉末注射成形(MIM)是将现代塑料注射成形技术和粉末冶金技术相结合的一种新型近净成形技术,该技术可以制造几何形状复杂、组织结构均匀和高性能的近净形产品零件,同时制造成本低廉,因此被誉为"当今最为热门的零部件成形技术"。该技术在材料体系上的应用十分广泛,包括普通钢、工具钢、不锈钢、高密度合金材料、硬质合金、复合材料、陶瓷材料等,被广泛应用于航空航天、汽车、医疗、电子、机械、军工以及日用品等领域[1-3]。

与传统冶金技术相比,MIM 能够将复杂的金属零件一次成形,表面质量好,成品率高,提高了材料利用率[4]。但是与塑料注射成形技术相比,喂料密度高、导热系数大、比热容小,所以在充模过程中材料流动性差、容易凝固,从而造成型腔充填不满,损伤模具等问题。因此,MIM 在材料的选择、产品设计、模具设计以及注射成形工艺等方面均需要合理设计[5]。

近几年金属粉末注射成形技术在各个领域也取得了一定的进展,然而由于工艺参数选择不当,在金属粉末注射成形过程中易造成不可挽回的缺陷,最终影响产品的质量。目前,促使金属粉末注射成形技术快速有效的发展的关键是如何合理有效的避免甚至防止这些缺陷的产生,核心是制定合理的注射工艺参数[6-8]。

传统的粉末注射成型工艺过程包括:①将粉末和粘结剂按一定的比例混炼均匀;②倒入注射机成型,得到生坯;③用热分解或者化学方法去除生坯中的粘结剂;④放入真空炉或马弗炉中烧结得到最终产品。其工艺流程图见图 1。

其中注射成形过程是最为重要的一个环节,因为在这一阶段易出现如欠注、内部缩孔、开裂、两相分离、表面塌陷、变形翘曲、分层等在后续工艺中无法消除的缺陷[10]。特别是在这一步骤中所采用的工艺参数,主要是靠实践经验来设置参数,既费时费力,还增加了制造成本。此外,在脱脂或烧结阶段,生坯内释放的残余应力会导致产品变形或开裂。对于

收稿日期:2018-10-18

作者简介:赵彩艺(1992-),女,河北唐山人,硕士生.研究方向:金属材料及表面技术.电话:13061207890,E-mail:eline_0128@163.com

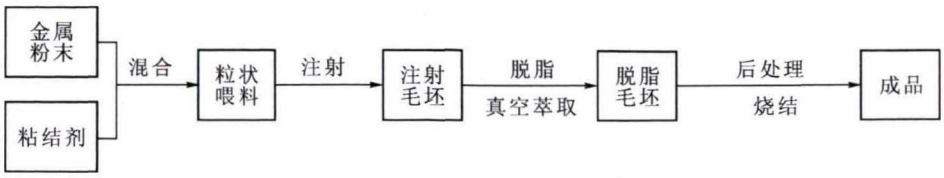

图 1 粉末注射成形工艺流程图
Fig.1 Process flow chart of powder injection molding

模具研发人员来说，如果在产品加工生产之前，能够有效的模拟出注射成形的全过程，对喂料在模腔中的流动情况进行预判，尽早发现问题并修改，而不是在模具完成之后反复试模和修改，这样不仅大大提高了模具的设计水平和一次试模成功率，而且降低了模具返厂修的花费和材料的浪费，有大的经济技术意义[11-13]。

1 金属粉末注射成形计算机模拟的发展与现状

随着计算机技术和计算数学两者的相互结合，计算机模拟软件被应用于很多行业。人们根据注射成形的一些工艺特性也开始研究如何让其与计算机模拟能够更好的结合，通过改变相应的参数来控制成形质量。1960 年，Toor 率先将数值方法应用于模拟充模，对塑料注射成形进行模拟充模，并取得了一定的技术突破。Najmi、Lee[14]、Wang 和 Leonard[15]和其他一些学者[16,17]根据塑料注射成形的经验，尝试使用有限元、有限差分等数值方法对 MIM 喂料熔体的充模流动进行研究分析，建立了考虑凝固层后的一维流动模型，并取得了一定的进展。之后，Najmi 和 Lee 又在二维模拟中应用，图 2 是程序框图。Pandelidis、Zou[18]以及 Najmi、Lee 进行了浇口位置优化的分析。Pandelidis 和 Zou[19,20]还研究分析了工艺参数的优化。Bilovol 等[21]对 MIM 充模流动阶段瞬时温度分布规律进行了统计分析，发现在喂料不同的粘度层之间会产生摩擦热，促使温度上升，更易导致喂料分层，但是如果适当的改进模具设计和优化工艺条件，可以使得温度分布均匀，避免这些缺陷产生。Kwon 等[22,16]将喂料熔体假设为是稳定、非牛顿、不可压缩流体，在充模过程中每一个时间步长都是准稳态的，又在有限元法的基础上采用满足 Babuska-Brezzi 条件（B-B 条件）的全三维多变量有限单元开发了 PIMFLOW 软件，专门用于模拟粉末注射成形充模过程的模拟，但国外对研究成果进行了保密。MIM 计算机模拟程序见图 2。

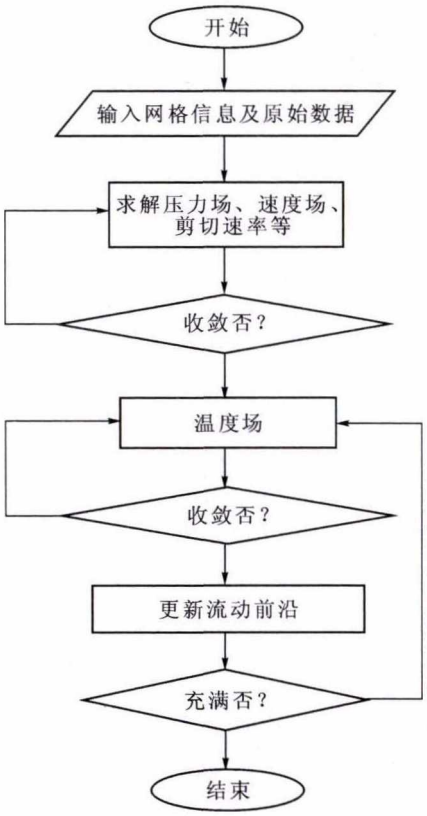

图 2 MIM 计算机模拟程序总框图
Fig.2 General diagram of MIM computer simulation program

在我国对 MIM 计算机模拟方面的研究尚处于起步阶段。从 1995 年开始，曲选辉课题组一直致力于这方面的研究，编制了二维充模流动模拟软件，同时还开发研究了 MIM 模架及标准件参数化设计软件。他们还利用有限元模拟对 MIM 喂料熔体在三维模腔中速度场的分布状态进行了分析研究，该有限元模拟满足 B-B 条件，使模拟更具理论性。曲选辉等人提出了混沌理论[23]，根据这一理论研究了 MIM 过程产生不确定性和其他特性的原因，研究在产品加工中缺陷形成的混沌现象和规律，这对建立 MIM 计算机模拟和缺陷预测有十分显著的作用。毛金英[24]编制出了较为完整的二维矩形充模流动模拟软件，采用有限元 / 有限差分混合法进行模拟分析，可以十分便捷快速的获得网格信息、模腔中的速度场、压力场以及温度场的分布情况。

总体而言，对金属粉末计算机模拟方面的研究，基础理论知识相对空缺，国内外的发展都不尽理想，因此对 MIM 基础理论的研究和软件的开发极其重要。

2 金属粉末注射成形计算机模拟的理论分析

2.1 熔体充模流动机理分析

由于金属粉末注射成形是从塑料注射成形上发展起来的,因此其喂料充模过程和热塑性塑料的充模过程基本相似,但如前面所讲它们两者的一些物理特性存在较大的差异,故其充模过程也存在一定的差异。想要对 MIM 充模过程的完全掌握,必须要对其充模流动规律和机理进行深一步的研究,才能实现对产生的缺陷及其产生位置的预估,也能够得到喂料熔体在模腔中的流动情况以及产生的压力场、速度场和温度场的解,从而为优化工艺参数和模具设计提供依据。

如图 3 所示,在金属粉末注射成形充模的过程中,高温下的喂料熔体首先要进入冷模具的浇注系统,然后才能以泉状涌进模腔。在此过程中,熔体的前沿会与冷空气接触,形成具有较高黏度的前沿膜,从而熔体的流动受到影响,将会交替出现以下两个过程:一是形成的前沿膜会阻碍熔体直线前进,造成熔体流向模腔壁,同时熔体接触到模腔壁快速凝结,使得黏度增大,流速急剧下降,且有可能形成冷凝层;二是中心热核即使冲破前沿膜的束缚而后又会形成新的前沿膜。这种材料交替着向前同时又向外的流动时一种合成流动,向外流动的熔体会在与模壁接触时受冷凝固成表皮,向前流动的熔体继续向前流动形成新的熔芯,后面再进入模具的熔体则沿着已附有冷凝层的流道流动,形成一种“喷涌”流动[25]。

经过对喂料熔体在模腔中流动过程的描述,可知道模具温度、注射压力和注射速率对坯件质量有着重要的影响,选择不正确会引起如前所述的缺陷。通过模拟金属粉末注射过程,对流体的流动状态进行预判,从而设定最佳工艺参数,改进模具结构,达到减少废品率和节约成本的目的。

2.2 熔体充模流变学原理

近十几年来,金属粉末注射成形计算机模拟得到越来越多人的重视,出现了很多以数学模型为基础的计算机模拟,主要有 3 种:连续介质模型、颗粒模型、两相流模型。后两种计算较为复杂,现大多数采用连续介质模型[26]。

连续介质模型就是将喂料看成介质均匀的熔体,描述其运动就是研究各个质点(无穷分割获的各个小部分)的物理参数及其变化情况。一般有两种方法描述:一种是研究流体质点与时间关系的拉格朗日法,另一种是研究各个空间点上的流体在运动过程中物理参量的改变的欧拉法。拉格朗日描述的比较直观,但喂料是均匀介质,所以不需要弄清楚它的运动轨迹。只要知道各个质点的流体状态和固定时刻的变化就行了。因此,选择用欧拉描述较方便,也就是在模腔中面上划分空间固定的网格[27]。由于人们往往从宏观上评估喂料熔体充填模腔的流动,可以视其为均匀的连续介质。其中雷诺系数小,可视为层流,在这一过程中遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。根据流体力学原理,选择欧拉法,空间中的任意一点都可采用以下方程求解[28]:

(1)连续性方程(质量守恒方程)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \nu)=0 \tag{1}$$

其中,ρ 为喂料密度,t 为时间,ν 表示速度矢量。

(2)运动方程

$$\frac{\partial(\rho \nu_i)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \nu_i \nu)=\rho\left(\frac{\partial \nu_i}{\partial t}+\nu_i \cdot \mathrm{grad}\nu_i\right) \tag{2}$$

其中,ν_i 表示速度分量。

(3)能量守恒方程

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\mathrm{div}(\nu T)=\mathrm{div}\left(\frac{k}{\rho c_p}+\mathrm{grad}T\right)+\frac{S_T}{\rho c_p} \tag{3}$$

其中,T、c_p 表示温度和比热容,S_T 表示热源,包含单位体积内热源或由于辐射或其他物理或化学原因的热量贡献和耗散函数。

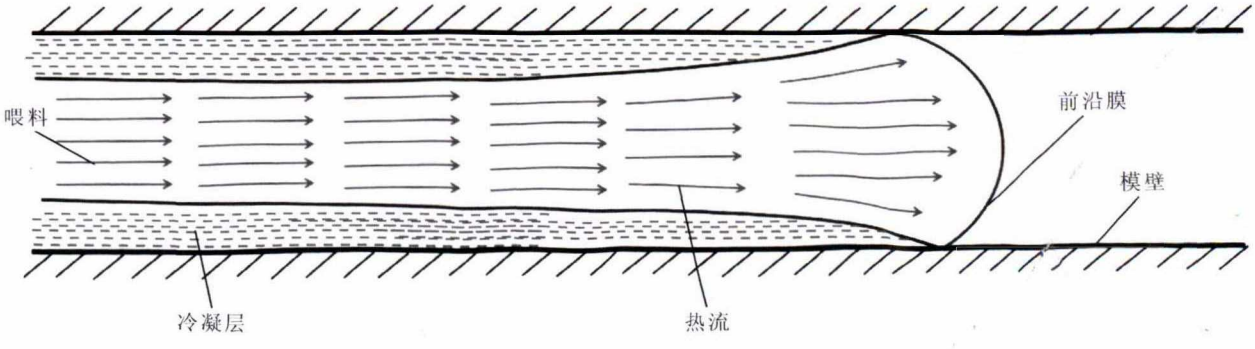

图 3 喂料充模过程中的“喷泉”流动
Fig.3 ‘Fountain flow’ during the process of feeding and filling mold cavity

熔体流动仅靠上述三个守恒方程，加上初始和边界条件仍得不到确定解，还必需考虑应力张量和变形速度张量之间的关系，找出本构方程，用于补足所需方程。MIM 喂料充模的关键是粘性流动，故其具有特定的流变性能。MIM 喂料在常温状态下是呈粘弹性的，但在高温状态下则表现为粘性。与纯粘结剂相比，MIM 喂料的流变行为因为粉末的影响而复杂的多，要充分考虑粉末体积百分比、粉末特性以及温度、压力、剪切速率的影响。German 综合考虑了上述影响因素，给出了黏度模型：

$$\eta=\eta_0 A(1-\phi/\phi_m)^{-n} \quad (4)$$

其中，η 表示喂料黏度，η_0 表示纯粘结剂黏度，ϕ 为粉末实际装载量，ϕ_m 为粉末最大装载量，n 为常数，A 为随颗粒粒径及剪切速率变化的指数常数。

由于压力和热膨胀系数在 MIM 喂料熔体充模流动过程中的影响相对较小，可将公式写成：

$$\eta=m_0\exp(T_a/T)\gamma^{n-1} \quad (5)$$

其中，m_0、T_a 为材料常数，n 为剪切稀化指数，$0<n<1$，（决定流体类型 $n=1$ 时，为牛顿流体；$0<n<1$ 时，为假塑性流体；$n>1$ 时，为胀塑性流体）。

从上述方程可以看出，要进行三维模拟计算相当的复杂，实际应用中，人们往往要进行简化，由于浇注系统是轴对称的故可以简化为一维流动，模腔形状是对称即可以简化为二维的。还要进行一定的假设，惯性力和质量力由于影响小可以忽略不计，同时在流动过程中喂料的凝固放热和潜热也可以忽略，还要把流动看作是充分发展的，将充模流动看作是广义的“Hele-Show”流动[29]。

3　当前各种流动模拟软件

从 20 世纪 80 年代起，注射成形 CAE 技术不仅仅存在于实验室中，已经实际应用到生产中。目前，Moldflow 软件已经被广泛应用于注塑行业，并且技术已经相对成熟，取得了一定的成绩。PIMsolver 是粉末注射成型的专业商业软件，可以预测缺陷及其位置，节约了大量的时间和成本[30]。在金属注射成形计算机模拟方面，韩国的 MIMFLOW 软件具有先进技术，可以建立多种优化工艺条件来指导设计。此外还有德国 IKV 研究所的 CAD-MOULD、美国 SDRC 公司的 I-DEAS 软件，以及美国 GRAFTEK 公司的注射模设计制造软件包。

不只专业的 CAE 软件可以用来研究注射充模模拟，一些用来计算热学和流体力学的软件也可以实现。例如 PHOENICS 可以进行稳态、非稳态流、多相流的从零到三维的模拟，但真正应用到注射成形的模拟还需要进一步探索。有限元分析软件 ANSYS 收购的 FLUENT 是目前国际上流行的可用的、功能最强大的计算流体动力学（CFD）软件工具，能够让人更深入更快速地优化自己的产品性能。FLUENT 内含经充分验证过的物理建模功能，能为广泛的 CFD 和多物理场应用提供快速、精确的结果，其可以模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动，例如流速模拟、湍流模拟等等。国内进行注射成形模拟工作较晚，但经过坚持不懈的研究和对国外经验的吸取已取得不错的成绩。

4　结语与展望

金属粉末注射成形技术由于其优点显著被广泛应用于各个行业，却受成本高昂、生产周期长等缺点的桎梏，金属粉末注射成形计算机模拟有助于解决这一难题。虽然对 MIM 计算机模拟的研究已有较大进步，但技术还不够成熟。相较于塑料注射成形，金属粉末注射成形因为粘结剂中加入了金属粉末其流变行为变得复杂得多，难度也较大。国外已开发出多种模拟软件，取得较大成就，对外公开的软件价格昂贵。相对而言我国的研究成果要落后很多，所以为了使我国 MIM 工业的生产得到更好的发展，增加国际竞争力，必须开发自己的 MIM 模拟软件。

参考文献：

[1] 张驰，杨长辉，陈元芳.金属(陶瓷)粉末注射成形技术及应用[J]. 现代制造工程，2003(10)：55.

[2] 张驰，胡建军，程大堂.箱形件金属粉末注射成形技术(MIM)研究及应用[J]. 现代制造工程，2004(1)：51.

[3] 印红羽. 粉末冶金模具设计手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[4] 黄诗君，张宏超，章争荣，等. 金属粉末注射成形工艺[J]. 现代塑料加工应用，2005，17(6)：58-60.

[5] 敖晖.金属粉末注射成形充模流动计算机模拟[D]. 长沙：中南大学，2002.

[6] German R M. Scientific status of metal powder injection molding [J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2000, 36 (3): 31-36.

[7] German R M, Bose A. Injection molding of metals and ceramics [M]. Design Engineering & Styling, 1998.

[8] Angermann H H, Biest O V D. Binder removal in powder injection molding[J]. Reviews in Particulate Materials, 1995, 3(4), 35-70.

[9] 代兵，胡红军，张驰，等. 粉末注射成形计算机模拟技术及其应用[J]. 材料导报，2006，20(9)：77-79.

[10] 杨秀芝. 金属粉末注射成形过程的计算机模拟与工艺参数优化[D]. 武汉：武汉理工大学，2004.

[11] 祝宝军，曲选辉，陶颖，等. YG8 硬质合金的粉末注射成形技术[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2002，7(3)：247-252.

[12] 梁叔全，黄伯云.粉末注射成形流变学[J]. 长沙：中南大学出版

社, 2000.

[13] 史安娜, 王晓方. 盒形塑料浇口位置的选择[J]. 模具工业, 2000 (4): 31.

[14] Najmi L A, Lee D. Modeling of mold filling process for powder injection molding[J]. Polymer Engineering & Science, 1991, 31(15), 1137-1148.

[15] Wang C M, Leonard R L, et al. A finite-difference computing model for 3-D simulation of the powder injection molding process[M]. In: Powder Injection Molding Symposium-1992, San Francisco, 1992: 435.

[16] Kwon T H, Hwang C J, Rhee J H. Numerical simulation of powder injection molding filling process for Three-Dimensional complicated cavity geometries [M]. Advances in Powder Metallurgy &Particulate Materials-1996, MPIF, Washington D.C., 1996: 19-79.

[17] Najmi L A, Lee D. Simulation of mold filling for powder injection molding process[M]. Advances in Powder Metallurgy, MPIF, APMI, Pittsburgh, 1990: 299.

[18] Pandelidis I, Zou Q. Optimization of injection molding design. Part I: Gate location optimization[J]. Polymer Engineering & Science, 1990, 30(15), 873-882.

[19] Najimi L, Lee D. Application of mold filling simulation to powder injection molding[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1994, 30(2), 231-240.

[20] Pandelidis I, Zou Q. Optimization of injection molding design[J]. Part II: Molding conditions optimization J. Polymer Engineering & Science, 1990, 30(15), 883-892.

[21] Bilovol V V, Kowalski L, Duszczyk J. Modelling of transient temperature fields during filling stage of powder injection moulding [J]. Powder Metallurgy, 2000, 43(3), 228-232.

[22] Kwon T H, Ahn S Y. Slip characterization of powder/binder mixtures and its significance in the filling process analysis of powder injection molding[J]. Powder Technology, 1995, 85(1), 45-55.

[23] 曲选辉, 温宏宇, 敖晖, 等. 粉末注射成形过程计算机模拟研究[J]. 材料工程, 2001(6): 33-36.

[24] 毛金英. 粉末注射成形充模过程中凝固层形成规律的计算与分析[J]. 粉末冶金技术, 1997, 17(1): 14.

[25] 卓海宇, 高建祥, 曲选辉. 金属粉末注射成形充模过程数学模型研究[J]. 新技术新工艺, 2007(6): 87-90.

[26] 蒋忠兵, 李笃信, 李昆. 金属粉末注射成形充模流动过程模拟的数学模型探讨[J]. 硬质合金, 2009, 26(1): 15-19.

[27] 高建祥, 卓海宇, 高泽平, 等. 金属粉末注射成形过程计算机模拟技术的现状及发展[J]. 硬质合金, 2006, 23(1): 47-51.

[28] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.

[29] 李茂, 周孑民, 梁叔全. 粉末注射成型充填过程数值模拟[J]. 矿冶工程, 2006(6): 77-80.

[30] Hwang C J, Kwon T H. Finite Element Analysis of PIM Filling Process with Slip Characterization of Powder-Binder Mixtures[J]. Powder & Powder Metallurgy, 1999, 46(8): 837-843.

均衡凝固技术资料邮购

国家科技成果重点推广计划项目 编号:I-1-5-3
西安理工大学均衡凝固技术科研成果汇编

铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例

《铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例》是西安理工大学均衡凝固技术科研成果的汇编,被列为国家科技成果重点推广计划项目,编号 I-1-5-3。汇编共分 6 章:第一章 铸铁件均衡凝固与有限补缩。第二章 铸铁件冒口补缩设计。第三章 浇注系统当冒口补缩设计方法。第四章 浇注系统大孔出流理论与设计。第五章 铸钢 白口铸铁 铝钢合金铸件的均衡凝固工艺。第六章 铸件充填与补缩工艺定量设计实例。可用于铸件浇注系统,冒口补缩系统的定量设计,包括浇口、冒口的位置、大小、个数,冷铁的放置。也可用于对已有铸件浇口、冒口设计的定量评估,及对已产生的铸造缺陷的分析与防治。浇口、冒口的开设要防止几何热节、接触热节、流动热节的重合;在冒口颈处放冷铁消除冒口根缩孔、缩松缺陷;控制浇口截面比实现垂直分型等压等流量设计等技术,通过生产实例给予展现,可供生产应用参考。汇编邮购价 160 元。

联系地址:710048 西安市金花南路 5 号 西安理工大学 608 信箱

联 系 人:李巧凤 13991824906 QQ:53985132 E-mail:53985132@qq.com
李亚敏:15829361158 QQ:412008096 E-mail:412008096@qq.com
技术咨询:魏 兵 13609155628