21 世纪的材料成形加工技术 *

Material Processing Technology in the 21st Century

清华大学　中国工程院院士　　柳百成

[摘要]　论述了材料成形加工技术的作用及地位,介绍了快速产品与工艺开发系统、新一代制造工艺与装备、模拟与仿真 3 项关键先进制造技术,指出轻量化、精确化、高效化将是未来材料成形加工技术的重要发展方向。

关键词:先进制造技术　材料成形加工　精确成形加工　模拟仿真　并行工程　绿色制造

[ABSTRACT]　The function and position of material processing technology are expounded. Three key advanced manufacturing technologies, such as rapid product and manufacturing process development system, new generation manufacturing technology and toolings and simulation are introduced. It is pointed out that light weight, high precision and high efficiency will be an important development direction of material forming technology in the future.

Keywords: Advanced manufacturing technology　Material processing　Net shape process　Modeling and simulation　Concurrent engineering　Green manufacturing

1　材料成形加工技术的作用及地位

中国已是制造大国,仅次于美、日、德,居世界第 4 位[1]。中国虽是制造大国,但与工业发达国家相比,仍有很大差距,表现在:(1) 制造业的劳动生产率低,不到美国的 5 %;(2) 技术含量低,以 CAD 为例,仍停留在绘图功能上;(3) 重要关键产品基本上没有自主创新开发能力。

材料成形加工行业是制造业的重要组成部分,材料成形加工技术是汽车、电力、石化、造船及机械等支柱产业的基础制造技术,新一代材料加工技术也是先进制造技术的重要内容[2]。铸造、锻造及焊接等材料加工技术是国民经济可持续发展的主体技术。据统计,全世界 75 %的钢材经塑性加工成形,45 %的金属结构用焊接得以成形。又如我国铸件年产量已超过 1 400万t,是世界铸件生产第一大国。汽车结构中 65 %以上仍由钢材、铝合金、铸铁等材料通过铸造、锻压、焊接等加工方法成形。

但是,我国的材料成形加工技术与工业发达国家相比仍有很大差距。举例说,重大工程的关键铸锻件如长江三峡水轮机的第一个叶轮仍从国外进口;航空工业发动机及其他重要的动力机械的核心成形制造技术尚有待突破。因此,在振兴我国制造业的同时,要加强和重视材料成形加工制造技术的发展。

高速发展的工业技术要求加工制造的产品精密化、轻量化、集成化;国际竞争更加激烈的市场要求产品性能高、成本低、周期短;日益恶化的环境要求材料加工原料与能源消耗低、污染少。为了生产高精度、高质量、高效率的产品,材料正由单一的传统型向复合型、多功能型发展;材料成形加工制造技术逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。因此,面对市场经济、参与全球竞争,必须十分重视先进制造技术及成形加工技术的技术进步。

2　材料成形加工技术的发展趋势

美国在"新一代制造计划(Next Generation Manufacturing)"中指出未来的制造模式将是:批量小、质量高、成本低、交货期短、生产柔性、环境友好[2,3]。未来的制造企业将是:以人、技术和经营三要素组成,而以人为本。未来的制造企业要掌握十大关键技术,其中包括快速产品与工艺开发系统、新一代制造工艺及装备、模拟与仿真 3 项关键技术,如图 1 所示。其中下一代制造工艺包括精确成形加工制造或称净成形加工工艺(Net Shape Process)。净成形加工工艺要求材料成形加工制造向更轻、更薄、更精、更强、更韧、成本低、周期短、质量高的方向发展。

轻量化、精确化、高效化将是未来材料成形加工技术的重要发展方向。以汽车制造为例,美国新一代汽车研究计划(Partnership of Next Generation Vehicle)的目标是在 2003 年汽车重量减轻 10 %,汽车每 100 km 油耗要减少到 3 L,并减少 10 %的污染。为了达到这一目标,要求整车重量减轻 40 %～50 %,其中车体和

* 本研究得到国家自然科学重大基金(No. 59990470 - 3) 及国家科技部重点基础研究项目(No. G200067208 - 3)资助。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

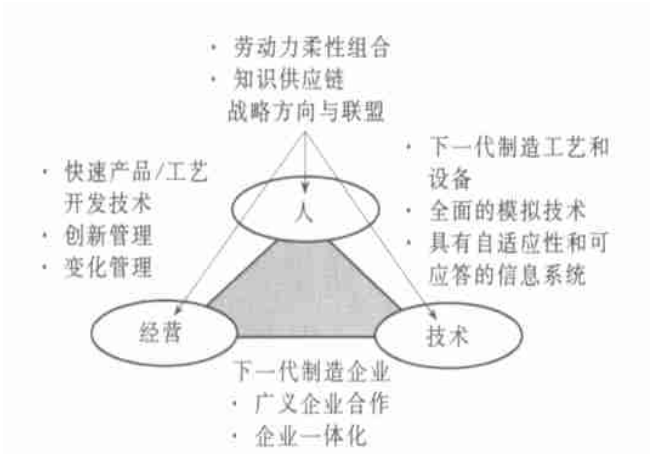


图 1　美国"新一代制造计划"中提出的十大关键技术

Fig. 1　Ten key technologies in American "New Generation Manufacturing Project"

车架的重量要求减轻 50 %,动力及传动系统减轻 10 %。例如,美国福特汽车公司新车型中使用的状况就反映了这种变化,见图 2。从图 2 可以看出,新一代汽车中黑色金属用量将大幅度减少,而铝及镁合金用量将显著增加,铝合金将从 129 kg 增加到 333 kg,镁合金将从 5 kg 增加到 39 kg。

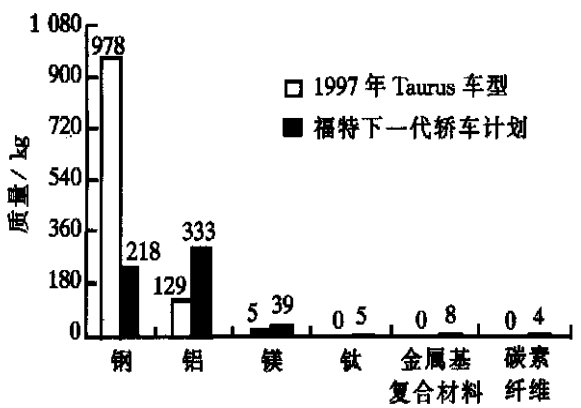


图 2　福特新一代汽车使用的主要材料

Fig. 2　Main material used in new generation automobile in Ford Company

近年来,随着汽车工业和电子工业的迅速发展,对通过降低产品的自重以降低能源消耗和减少污染(包括汽车尾气和废旧塑料)提出了更迫切的要求,而轻量化的绿色环保材料将作为人们的首选。镁合金就是被世界各国材料界看好的最具有开发和发展前途的金属材料。

镁合金产品具有以下优势:(1)轻量化,密度 $\rho \approx 1.8\ g/cm^3$,是钢铁的 1/4,铝的 2/3,与塑料相近。(2)比强度高,刚性好,优于钢和铝。(3)具有极佳的防震性,耐冲击,耐磨性良好。(4)具有优良的热传导性,可改善电子产品散热性能。(5)是非磁性金属,抗电磁波干扰能力强,电磁屏蔽性好。(6)加工成形性能好,成品外观美丽,质感佳,无可燃性(相对于塑料)。(7)材料回收率高,符合环保法。(8)尺寸稳定,收缩率小,不易因环境温度变化而改变(相对于塑料)。

镁合金压铸件广泛应用于交通工具(如汽车、摩托车及飞机零件等)、信息(如手机、数码相机及手提电脑壳体等)及小型家电(如摄像机、照相机和其他电子产品外壳)等行业。同时,压铸镁合金产品在国防建设等领域也有十分广阔的应用前景。

3　新一代的材料成形加工技术

制造技术可分为加工制造和成形制造(以液态铸造成形、固态塑性成形及连接成形等为代表)技术,其中成形制造不仅赋予零件以形状,而且决定了零件的组织结构与性能。

3.1　精确成形加工技术

近年来出现了很多新的精确成形加工制造技术。在汽车工业中 Cosworth 铸造(采用锆砂砂芯组合并用电磁泵控制浇铸,如图 3 所示)、消失模铸造及压力铸造已成为新一代汽车薄壁、高质量铝合金缸体铸件的 3 种主要精确铸造成形方法[3~6]。许多国家预测消失模铸造将成为"明天的铸造新技术"。另外,用定向凝固熔模铸造生产的高温合金单晶体燃汽轮机叶片也是精确成形铸造技术在航空航天工业中应用的杰出体现,如图 4 所示。

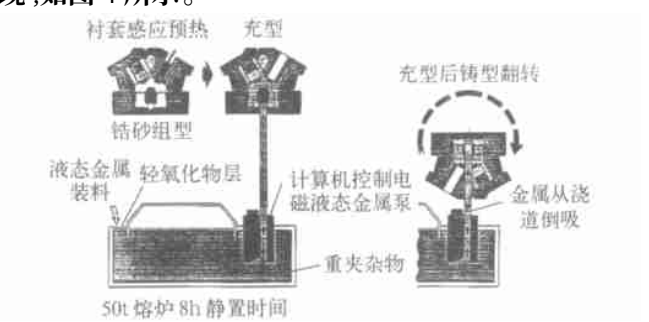


图 3　福特用 Cosworth 法铸造铝合金缸体

Fig. 3　Al alloy cylinder block cast by using Cosworth method in Ford Company

在轿车工业中还有很多材料精确成形新工艺,如用精确锻造成形技术生产凸轮轴等零件、液压胀形技术、半固态成形及三维挤压法等。摩擦压力焊新技术近来也备受人们关注。

以挤压铸造(Squeeze Casting)及半固态铸造(Se-

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.



图 4　熔模铸造等轴晶、柱状晶及单晶体叶片

Fig. 4　Equiaxed crystal , directional crystal and single crystal blades manufactured by investment casting

mi-solid Casting)为代表的精确成形技术由于熔体在压力下充型、凝固,从而使零件具有好的表面及内部质量。半固态铸造是一种生产结构复杂、近净成形、高品质铸件的材料半固态加工技术[7,8]。图 5 为半固态铸造铝合金零件在汽车上的应用。其区别于压力铸造和锻压的主要特征是:材料处于半固态时在较高压力(约 200 MPa)下充型和凝固。材料在压力作用下凝固可形成细小的球状晶粒组织。半固态铸造技术最早在 20 世纪 70 年代由美国麻省理工学院凝固实验室研究开发,并在 20 世纪 90 年代中期因汽车的轻量化得到了快速发展。



图 5　半固态铸造铝合金零件在汽车上的应用

Fig. 5　Application of semi-solid casting Al alloy part in automobile

3.2　快速及自由成形加工技术

随着全球化及市场的激烈竞争,加快产品开发速度已成为竞争的重要手段之一。制造业要满足日益变化的用户需求,制造技术必须具有较强的灵活性,能够以小批量甚至单件生产迎合市场。快速原型制造技术(Rapid Prototyping)就是在这样的社会背景下产生的。快速原型制造技术以离散/堆积原理为基础和特征,将零件的电子模型(CAD 模型)按一定方式离散成为可加工的离散面、离散线和离散点,尔后采用多种手段将这些离散的面、线和点堆积形成零件的整体形状。有人因该技术高度的柔性而称之为"自由成形制造(Free Forming)"。近年来,快速原型制造已发展为快速模具制造(Rapid Tooling)及快速制造(Rapid Manufacturing),这些技术能大大缩短产品的设计开发周期,解决单件或小批零件的制造问题。图 6 所示是快速制造中使用的铸造砂型。

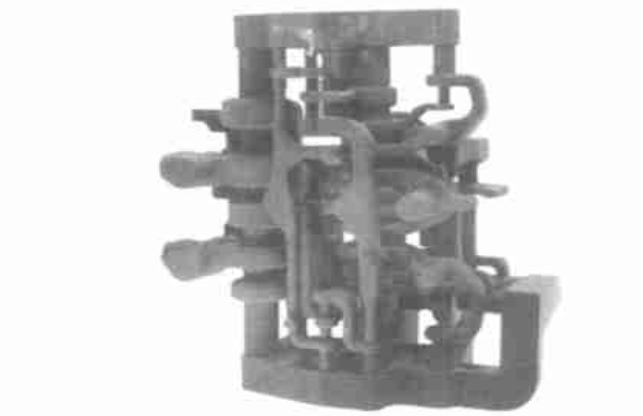


图 6　快速制造铸造砂芯

Fig. 6　Rapid manufacturing of casting sand core

激光加工技术有多种多样,包括电子元件的精密微焊接、汽车和船舶制造中的焊接、坯料制造中的切割、雕刻与成形等[9],其中激光加工自由成形制造技术也是重要的发展动向。

4　材料加工制造过程的模拟和仿真

随着计算机技术的发展,计算材料科学已成为一门新兴的交叉学科,是除实验和理论外解决材料科学中实际问题的第 3 个重要研究方法。它可以比理论和实验做得更深刻、更全面、更细致,可以进行一些理论和实验暂时还做不到的研究。因此,基于知识的材料成形工艺模拟仿真是材料科学与制造科学的前沿领域和研究热点[2,3,10~12]。根据美国科学研究院工程技术委员会的测算,模拟仿真可提高产品质量 5～15 倍,增加材料出品率 25 %,降低工程技术成本 13 %～30 %,降低人工成本 5 %～20 %,提高投入设备利用率

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

30 %～60 %,缩短产品设计和试制周期 30 %～60 %等。

经过 30 多年的不断发展,铸造及锻造宏观模拟在工程应用中已是一项十分成熟的技术,已有很多商品化软件(如 MAGMA,PROCAST,DEFORM)和中国的铸造之星(FT - STAR)等,并在生产中取得显著的经济及社会效益。例如,长江三峡水轮机的第 1 个叶轮是从加拿大进口的,价值为 960 万美元,而在我国重型制造企业的共同努力下,长江三峡水轮机叶轮的重 62 t 的不锈钢叶片,已由德阳中国二重集团铸造厂于 2001 年首次试制成功,其铸造工艺方案采用了先进的计算机模拟仿真技术,经反复模拟得到了最优化的铸造工艺方案。由国务院三峡办、中国机械工业联合会共同主持召开的鉴定委员会专家组认为:"该叶片技术资料齐全,采用了计算机优化等先进技术,符合有关标准要求,达到国际同行业先进水平。"

目前,模拟仿真技术已能用在压力铸造、熔模铸造等精确成形加工工艺中(图 7),而焊接过程的模拟仿真研究也取得了可喜的进展。

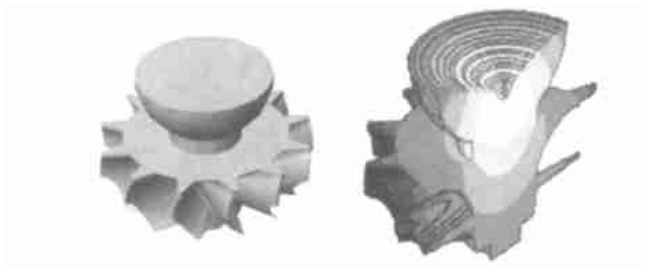


图 7　金属间化合物涡轮熔模铸造凝固过程模拟

Fig. 7　Solidification simulation for investment casting of intermetallic compound turbine

高性能、高保真、高效率、多学科及多尺度是模拟仿真技术的努力目标,而微观组织模拟(从 mm、μm 到 nm 尺度)则是近年来研究的新热点课题。通过计算机模拟,可深入研究材料的结构、组成及其各物理化学过程中宏观、微观变化机制,并由材料成分、结构及制备参数的最佳组合进行材料设计。计算材料科学的研究范围包括从埃量级的量子力学计算到连续介质层次的有限元或有限差分模型分析,此范围可分为 4 个层次:纳米级、微观、介观及宏观层次。在国外,多尺度模拟已在汽车及航天工业中得到应用。

铸件凝固过程的微观组织模拟以晶粒尺度从凝固热力学与结晶动力学两方面研究材料的组织和性能。20 世纪 90 年代铸造微观模拟开始由试验研究向实际应用发展,国内的研究虽处于起步阶段[12～18],但在用相场法研究铝合金枝晶生长[12]、用 Cellular Automaton 法研究铝合金组织演变[13,14](图 8)和汽车球墨铸铁件微观组织与性能预测[15～18]等方面均已取得重要进展。锻造过程的三维晶粒度预测也有进展。

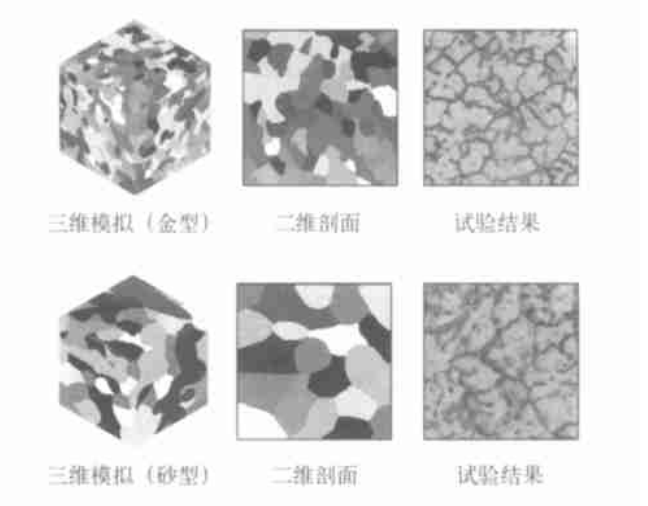


图 8　用三维修正 Cellular Automaton 模型模拟金属型及砂型铸造铝合金的微观组织

Fig. 8　Simulation of the microstructure of Al alloy cast by metal mould and sand mould by using 3D modified Cellular Automaton model

5　快速产品/工艺开发系统、并行工程及绿色制造

我国制造业的主要问题之一是缺乏创新产品的开发能力,因而缺乏国际市场竞争能力。

传统产品开发的特点:一是照猫画虎,知识老化,缺乏创新;二是周期长,返工多,成本高。例如,美国空军研究所从 1981～1991 年研发武器共发布图纸 20 000张,但共有 90 000 张图纸进行了更改,平均每张图纸改动了 4.5 次,多花费了 16 亿美元[19]。

现代的产品开发系统的特点是:(1)采用现代设计理论与方法;(2)进行全生命周期设计;(3)设计全过程采用信息技术;(4)加快采用新材料、新工艺;(5)产品开发周期短,返工少,成本低,努力做到一次成功;(6)产品有创新,在国际市场上有竞争能力。

图 9 为传统零部件开发与虚拟零部件开发的比较。

应该指出,产品设计及制造开发系统是以设计与制造过程的建模(Modeling)为核心内容的[20]。在产品零部件的设计过程中同时要进行影响产品及零部件性能的成形制造过程的建模及仿真,它不仅可以提供产品零部件的可制造性评估,而且可以提供产品零部件的性能预测。1992 年,美国先进金属材料加工工程

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

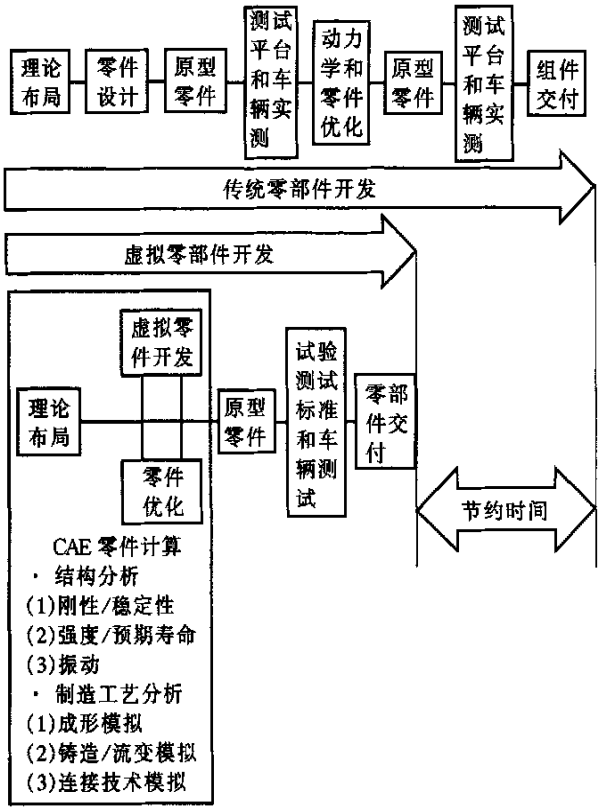


图 9　传统零部件开发与虚拟零部件开发

Fig. 9　Comparison of traditional component development with virtual one

研究中心提出了产品设计/制造(工艺)集成系统[4],如图 10 所示。2001 年,美国又提出了集成制造技术建议(Integrated Manufacturing Technology Initiative)和"可靠制造的建模与仿真(Modeling and Simulation for Affordable Manufacturing)"新构思[19,21],对产品设计制造等全生命周期过程全部进行了模拟仿真。

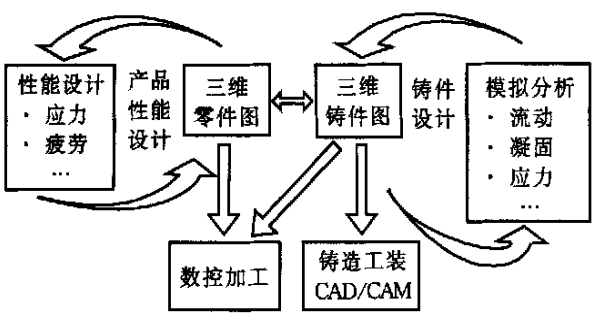


图 10　产品设计/工艺集成系统

Fig. 10　Integrated product and process design system

波音公司采用的现代产品开发系统将新产品研制周期从 8 年缩短到 5 年,工程返工量减少了 50 %[22]。日本丰田汽车公司在研制 2002 年嘉美新车型时缩短了研发周期 10 个月,减少了试验样车数量 65 %。美国底特律柴油机公司研发 1 台 V6 型柴油机的研发周期只用了 7.5 个月。美国汽车工业希望汽车的研发周期缩短为 15～25 个月,而 20 世纪 90 年代汽车的研发周期为 5 年[23]。

美国在展望 2010 年的制造业前景时,进一步把"精确成形工艺"发展为"无废弃物成形加工技术(Waste-Free Process)"[24]。所谓"无废弃物加工"的新一代制造技术是指加工过程中不产生废弃物;或产生的废弃物能被整个制造过程中作为原料而利用,并在下一个流程中不再产生废弃物。由于无废物加工减少了废料、污染和能量消耗,并对环境有利,从而成为今后推广的重要绿色制造技术。日本铸造工厂最近提出了 3R 的环境保护新概念,即:减少废弃物(Reduce)、重用(Reuse)及回用(Recycling)。

参 考 文 献

1　朱高峰主编. 全球化时代的中国制造. 北京:社会科学文献出版社, 2003

2　柳百成, 荆　涛主编. 铸造工程的模拟仿真及质量控制. 北京:机械工业出版社, 2001

3　Kramer B M. The NGM project: a key element on the government manufacturing infrastructure strategy. USA: NSF, 1996

4　柳百成,李敏贤,吴俊郊,等. 成形制造(第五章). 国家自然科学资金优先资助领域战略研究报告 ——先进制造技术基础. 北京:高等教育出版社,1998. 144～182

5　柳百成. 新一代精确铸造成形过程的物理冶金学基础及数学物理建模. 中国机械工程,2000,11(1,2): 67

6　樊自田,黄乃瑜,董选普. 从 Cosworth Process 新工艺看现代铸造生产的绿色集约化特点及其发展趋势. 铸造技术, 1999(5): 37～39

7　Ghomashchi M R, Vikhrov A. Squeeze casting: an overview. J Mater Processing Tech, 2000, 101: 1～9

8　Pan X F, Zhang H F, Wang A M, et al. Trend and development of semi-solid metal processing. J Mater Sci Tech, 2000, 16: 453～60

9　范品忠. 激光材料加工技术的发展方向. 激光与光电子学进展, 2001(11): 46～48

10　Liu B C, Shen H F, Li W Z. Progress in numerical simulation of solidification process of shaped casting. J Mater Sci Tech, 1995, 11: 313～322

11　Xiong S M, Liu B C. Study on numerical simulation of mold-filling and solidification processes of shaped casting. Chinese J

(下转第 69 页)

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

选择好系统后,要根据需求和工艺信息系统软件进行系统的详细设计,包括工艺工作过程的组织、系统数据模型的建立、数据的组织、基础数据的整理、用户的定义、系统的集成设计、已有数据的转换设计、软硬件方案的实施、系统需求的分阶段实施方法和项目的进度计划。

(5)系统的客户化。

系统的客户化是指在工艺信息化软件平台上根据企业需求情况进行系统的配置开发,形成完整的开发文档,并根据文档实现系统的实施和系统的维护。准备和实施结束以后,进行系统的引入,包括系统的安装、基础数据输入、系统管理员培训、用户培训系统的试运行和系统交付。

(6)系统的应用。

完成系统的交付后,系统进入正式的运行。由于工艺信息化软件与管理工作紧密相关,所以在应用中可能要进行配置的更改。随着信息化水平的提高,要进一步扩充功能,因此需要对工艺信息化软件进行长期的支持维护,才能确保投资的效益,并保证系统能始终充分发挥效益。

企业工艺信息化软件的实施和应用过程见图1。

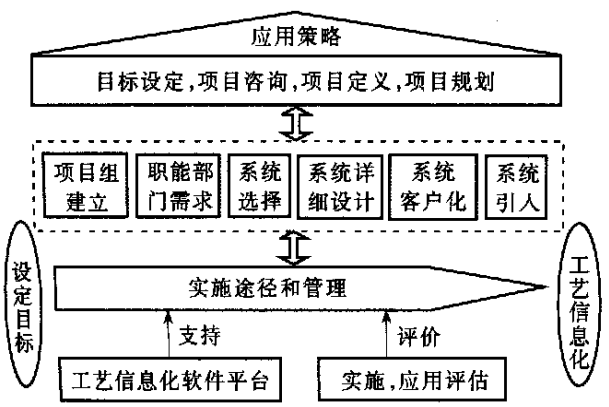


图1 工艺信息化软件的实施和应用过程

Fig. 1 Implementation and application procedure of process informatization software

4 结束语

企业工艺信息化软件的实施与应用是一个系统工程,必须得到企业管理层的重视,按照总体规划、分步实施的原则进行,它是决定企业信息系统集成和企业信息化建设成败的重要子系统。由于不同的的工艺都有自己的特点,都有其工艺的个性化需求,因此在工艺信息化中要根据实施前期的明确、全面的开发需求,进行必要的二次开发,才能真正适合企业的实际应用。

参 考 文 献

1 张振明,黄乃康,桓永兴,等. 面向产品的CAPP方法论及其智能化概念体系. 中国机械工程,2000,11(7):760～762

2 杨海成. 制造业信息化工程总体实施方案. 航空制造技术,2002(7):17～22

3 张振明,许建新,贾晓亮,等. CAPP的应用与发展. 计算机辅助设计与制造,2002(6):3～5

4 陈宗舜. 关于CAPP发展方向的探讨. 成组技术与生产现代化,2000(2):10～12

(责编 文 洵)

(上接第21页)

Mech Engr, 1999, 12(1): 4～10

12 Zhang Guangyue, Jing Tao, Liu Baicheng, et al. Numerical simulation of microstructure of aluminum alloy casting using macro-micro coupled method. Proceedings of the ASME IMECE, New Orleans, USA, 2002

13 Xu Q Y, Liu B C. Modeling of as-cast microstructure of Al alloy with a modified cellular automaton method. MATER TRANS, 2001, 42(11): 2316～2321

14 许庆彦,冯伟明,柳百成,等. 铝合金枝晶生长的数值模拟研究. 金属学报,2002,38(8):799～803

15 Liu Baicheng. Progress in solidification modeling of cast iron in China. International J of Cast Metals Research, 1999, 11(5): 259～266

16 赵海东,柳百成. 球墨铸铁微观组织的数值模拟. 机械工程学报,2000(2):76～80

17 Zhao Haidong, Liu Baicheng. Modeling of stable and metastable eutectic transformation of spheroidal graphite iron casting. ISIJ International, 2001, 41(9): 986～991

18 赵海东,柳百成. 球墨铸铁白口转变的数值模拟. 金属学报,2001(10):1107～1111

19 Poindexter J. Modeling & simulation for affordable manufacturing technology roadmap workshop. www.imti21.org, 2002

20 Haldenwanger H G, Stich A. Casting simulation as an innovation in the motor vehicle development process. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes - IX, 2000, 44～51

21 Integrated Manufacturing Technology Initiative. www.imti21.org, 2002

22 Negishi T. Innovative vehicle development process using digital engineering at Toyota. 2002

23 National Research Council. Modeling and simulation in manufacturing and defense acquisition: pathway to success. USA: The National Academy Press, 2002

24 National Research Council. Visionary manufacturing challenges for 2010. USA: National Academy Press, 1998

(责编 君 扬)

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.