

生产线重组技术

Reconfigurable Technology for Production Line

北京航空制造工程研究所 符刚

[摘要] 生产线重组是在原有设备布局的基础上,根据不同的零件组(生产任务)对生产线进行虚拟重组,并未改变原有资源的物理布局,仅仅在逻辑上建立新的虚拟生产线。生产线重组是以工艺规程模型为基础的,主要包括零件分组规则和生产线建线规则。

关键词: 生产线重组 布局规划 虚拟重组

[ABSTRACT] Reconfiguration for production line is to build a virtual production line according to different part family based on original equipment layout in workshop, and it will not change the physical layout of original resources. Reconfiguration for production line is based on the process planning model and comprises the rule of reclassification for parts and the rule of rebuild for production line.

Keywords: Reconfiguration for production line
Layout scheme Virtual reconfiguration

1 生产线重组技术概述

随着消费需求日趋个性化、多样化,很多制造企业都面临着如何解决多品种变批量生产的问题,特别是军工企业,不仅要满足平时武器装备不断发展和更新换代的要求,还要满足平战转换和快速形成批量生产能力的需要^[1]。

目前,我国很多航空制造企业已经逐步形成了以中小批量、多品种、高质量、短周期和低生产成本为主要特征的生产方式,具体表现为批生产中的变批量、研制品种变化周期短、研制任务与批生产混合等。如果生产车间不能对生产变化做出快速反应,缺少必要的柔性和应变能力,将难以缩短产品的生产周期,提高车间的快速响应能力。通过应用生产线重组技术,通过逻辑重组,在现有车间布局不变的情况下,建立适应新产品的虚拟生产线,使生产过程具有刚性生产线的优势,从而有效提高车间的生产效率,是提高车间响应速度的有效手段。

生产线重组的研究目标主要是利用相似性原理,将零件聚合为零件组,利用同组零件加工的相似性,动态选择可用的、合适的制造资源,减少多品种零件加工中的转换时间,从而提高生产车间的生产效率和柔性,每

条虚拟生产线是一个设备集合,能够实现一个或多个零件组的加工。

生产线重组技术是可重构制造系统(Reconfigurable Manufacturing System, RMS)的子集。重构的内涵比重组更宽泛,重构是指重新构造系统的结构及重新组合系统的功能,可能需要从系统外移入新的构件,或者从系统内移出已有构件,或保持已有系统构件不变,而改变生产作业计划(逻辑重构);而重组是指重新组合,一般只在系统原有构件的基础上进行,不从系统外引入新的构件,也不改变构件的物理位置,只在信息技术的支持下,采用逻辑重构的方式实现。系统重构的另一个分支是系统构件本身的重构,也就是可重构机床的研究,此领域的研究目前还处于初级阶段,尚不具备实施性,可靠性也不能得到有效保证^[2]。

进行生产线重组,实际上就是实现当前生产任务与制造资源的映射。就数控车间而言,生产任务对应零件集合,制造资源对应设备集合,二者的连接桥梁是零件的工艺规程。以零件工艺规程为基础,展开零件工艺相似性分析,根据零件的工艺相似性,实现零件组和设备集合的划分,是进行生产线重组的基本技术途径。

2 基于零件工艺的生产线重组规则

2.1 生产线重组的基本内容与流程

生产线重组是以零件工艺规程模型为基础的,工艺规程模型包括零件、设备和二者的关系(加工工艺)。

系统对新零件的工艺规程完成建模后,将确定是否可以将其归纳到已存在的分组中,如果可以归纳到已经建立的零件组中,并且已经建立了该分组的虚拟生产线,则系统优先选择已经建好的生产线。如果不能将其归纳到已经建好的零件组中,系统会首先建立相应的零件组,并且提取相应的参考信息建立虚拟生产线,如图1所示。

在生产线重组过程中,有2个关键技术,一个是零件分组规则,同一组零件具有工艺相似性,系统推荐同组零件建立共用的虚拟生产线;另一个是生产线建线规则,主要完成从现有设备资源中,针对不同的零件(组),选择优化的设备组合建立虚拟生产线。因为生产线一旦建立并投入生产以后,生产过程会持续一定时间,所

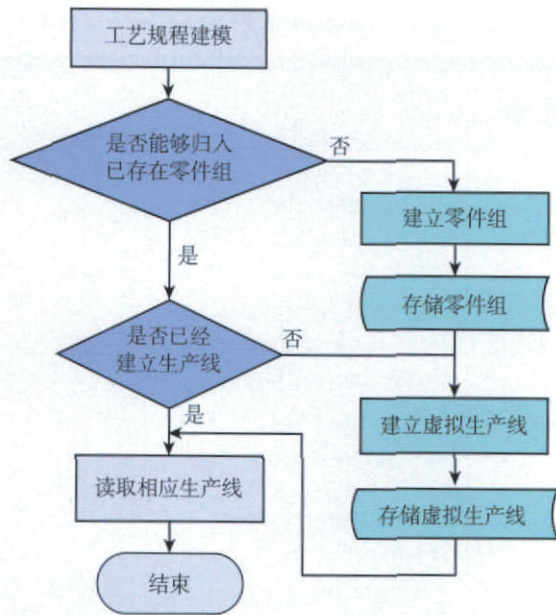


图1 生产线重组基本流程

Fig.1 Basic process of reconfiguration for production line

有正在运行的虚拟生产线中的设备具有一定排它性。

2.2 零件分组规则

目前,对加工零件分组大多依据零件尺寸、材料及加工特征等信息,对零件进行编码,然后依据成组技术思想进行分组。但是,由于加工特征种类多样,难以全面归纳,并且特定加工特征与加工设备匹配情况复杂,有时会出现同一分组的零件所应用的加工设备差别较大的情况^[3]。

本课题结合零件的加工工艺,将零件的加工特性归纳为一个三元组 $W=\{p, r, n\}$,其中 p 为零件类别, r 为工艺路线, n 为加工数量,而工艺路线 r 为一系列推荐设备的序列号,如:

零件1的三元组 $W_1=\{p_1, r_1, n_1\}=\{\text{盘环类零件}, [11-12-3-5-1-2-8-10-13], 300\}$;

零件2的三元组 $W_2=\{p_2, r_2, n_2\}=\{\text{盘环类零件}, [1-2-8-11-12-3-5-4-6-7-9], 200\}$;

在零件分组过程中,系统根据车间产品的实际情况,选出若干典型零件,以它们作为各个零件组的第一个零件,然后根据相似性原理,将其他零件的三元组与典型零件的三元组进行比较,如果2个三元组相似性达到一定水平,则把零件归纳到该典型零件代表的零件组中。进行三元组比较的规则是保证2个三元组的零件类别 p 相同,工艺路线 r 和加工数量 n 的相似性通过加权平均,得到最终的三元组相似性。

假设零件1为典型零件,则零件2的零件类型 p_2 等于零件1的零件类型 p_1 ,零件类型满足同组要求,加

工数量 n 的相似性可以通过 $(1-|n_1-n_2|/n_1) \times 100\%$ 得到,计算难度较大的是工艺路线 r 的相似性。在考虑 r 的相似性时,需要考虑2个方面,一个是2个序列 r_1 和 r_2 相同元素的数量, r_1 包含元素个数为9, r_2 包含元素个数为11,两个序列相同元素个数为7;第二个是两个序列中相同序结构的长度,相同序结构是指在2个序列中,排列顺序完全相同的子序列,在工艺路线 r 中,代表在各个设备间相同的物流路径,在本例中, r_1 与 r_2 的相同序结构为 $[1, 2, 8]$ 和 $[11, 12, 3, 5]$ 。则根据相似性计算公式^[4],2个序列的相似度为54%。通过对所有相关因素的相似度进行加权平均,得到2个零件三元组的相似度,与特定的阈值比较,确定零件2是否可以归纳到零件1所代表的2件分组中,其中,各个相关因素的权值和最终的阈值,用户可以根据车间产品情况灵活设定。

一个零件可以分布在不同的零件分组中,随着实际生产活动的进行,通过对同组零件加工的生产效率的测评,系统可以自动修正零件在各个分组中的相似度,使零件分组起到更准确的指导作用。另外,用户还可以根据成套发货等实际生产情况,人工建立特定的零件组,进行生产线重组和生产投入。

2.3 生产线建线规则

每条虚拟生产线是一个设备集合,能够实现一个或多个零件的加工。为了提高系统的整体性能,划分生产线时,要保证零件在生产线上加工工艺的完整性,同时还需要考虑加工设备的能力、生产均衡等问题。生产线建线的过程,重点就是加工设备选择的过程。加工设备选择的基本思路是根据零件组(加工任务)中所有零件工艺路线信息,得到工艺路线上各设备的“虚拟加工能力”,通过与设备库中实际设备参数匹配,得到能够完成各个零件各个工序加工操作的设备列表。然后结合设备状态、设备加工成本、设备任务情况,物流距离等信息,综合考虑生产线上要完成的所有工序,从对应的设备列表中选择排序最高的一系列设备,完成生产线的建立。

设备“虚拟加工能力”的参数最终选定:数控系统、坐标轴数量、定位精度、工作行程 X、工作行程 Y、工作行程 Z、主轴转速(min)、主轴转速(max)、工作台承载能力等。各个参数取得方式和与设备库的匹配要求见表1。虚拟生产线建立完成以后,存储在生产线数据库中,供调度模块应用。

经过加工设备选择模块的计算,可以得到能够完成各个工序的设备列表,具体排列顺序需要参考各个设备的建线系数,这个建线系数由静态权重 E1 和动态权重 E2 两部分组成。静态权重 E1 反映的是设备档次、加工成本、加工能力等信息;动态权重 E2 反映的是设备的工作负荷等信息。针对静态权重 E1,系统给出了推荐

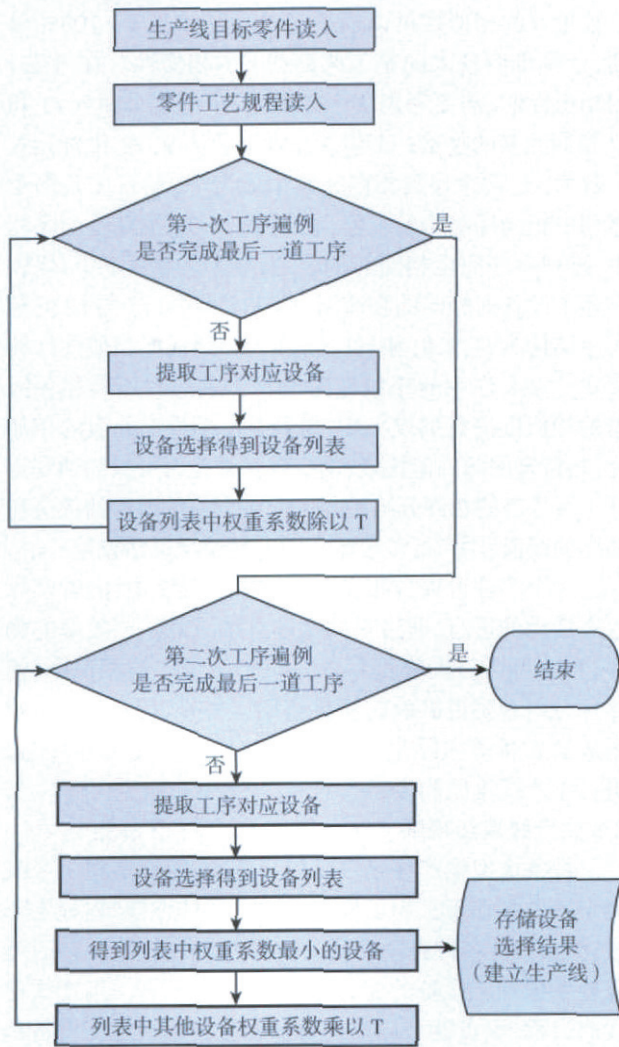


图2 设备选择基本流程
Fig.2 Basic process of selecting equipment

公式如下所示：

$$E_1 = 10^p \times \frac{1}{F} (X + Y + Z) \times R \times N \times \sqrt{W}$$

式中, E_1 为静态权重系数, P 为机库轴数, F 为定位精度, X 为 X 向行程, Y 为 Y 向行程, Z 为 Z 向行程, N 为最大白璧无瑕矩, R 为最大转速, W 为工作台承载力。

静态权重系数 E_1 的值, 用户可以应用该计算公式计算得到, 也可以根据车间设备情况自主设定; 动态权重 E_2 的值, 是系统根据各个设备的任务量自动设定的。综合建线系数 E 越小的设备, 选择的优先度越高。

在设备排序过程中, 还需要考虑多个工序选择的设备交叉的问题, 如果选择尽可能少的设备集合, 会出现所有加工过程全部集中在极少数功能强大的设备上; 如果选择尽可能多的设备, 则失去了设备选择的实际意义。所以在建立生产线的过程中, 系统引入了已选设备的微调参数 T , 通过用已选设备的权重系数除以或乘以

表1 “虚拟生产能力”参考信息

参数名称	“虚拟加工能力”中参数得到方式	匹配要求
数控系统 (DCS1)	工艺规程中得到推荐的设备型号, 根据设备型号在设备库中得到相应的数控系统 (DCS2)。	DCS1=DCS2
坐标轴数量 (PN1)	工艺规程中得到推荐的设备型号, 根据设备型号在设备库中得到相应的坐标轴数量 (PN2)。	PN1>PN2
定位精度 (LP1)	工艺规程中得到推荐的设备型号, 根据设备型号在设备库中得到相应的定位精度 (LP2)。	LP1<LP2
扭矩 (NJ1)	工艺规程中得到推荐的设备型号, 根据设备型号在设备库中得到相应的扭矩 (NJ2)。	NJ1>NJ2
工作行程 X (XX1)	工艺规程中确定的毛坯长度 (XX2); 如果工艺规程中没有确定毛坯长度, 则根据推荐的设备型号, 在设备库中得到相应的工作行程 X (XX2)。	XX1>XX2
工作行程 Y (YY1)	工艺规程中确定的毛坯宽度 (YY2); 如果工艺规程中没有确定毛坯长度, 则根据推荐的设备型号, 在设备库中得到相应的工作行程 Y (YY2)。	YY1>YY2
工作行程 Z (ZZ1)	工艺规程中确定的毛坯高度 (ZZ2); 如果工艺规程中没有确定毛坯长度, 则根据推荐的设备型号, 在设备库中得到相应的工作行程 Z (ZZ2)。	ZZ1>ZZ2
主轴转速 (min) (PSMIN1)	工艺规程中确定的主轴转速 (PS2); 如果工艺规程中没有确定主轴转速, 则根据推荐的设备型号, 在设备库中得到相应的主轴转速 (min) (PSMIN2)。	PSMIN1<PS2<PSMAX2 或者 PSMIN1<PSMIN2&&PSMAX1>PSMAX2
主轴转速 (max) (PSMAX1)	工艺规程中确定的主轴转速 (PS2); 如果工艺规程中没有确定主轴转速, 则根据推荐的设备型号, 在设备库中得到相应的主轴转速 (max) (PSMAX2)。	PSMIN1<PS2<PSMAX2 或者 PSMIN1<PSMIN2&&PSMAX1>PSMAX2
工作台承载能力 (CC1)	工艺规程中确定的毛坯重量 (CC2); 如果工艺规程中没有确定毛坯重量, 则根据推荐的设备型号, 在设备库中得到相应的工作台承载能力 (CC2)。	CC1>CC2

T ,来影响已选设备的权重系数,进而影响设备的最终选择。已选设备的微调参数 T 越大,生产线上设备数量越少,但设备匹配程度会降低;参数越小,生产线上设备数量越多,设备匹配程度越好。

为了尽可能消除设备在工艺路线上出现的先后次序不同对建线结果的影响,系统将进行2次设备选择计算,也可以通过多次迭代,得到更优结果。第一次是预选择过程,系统将逐个计算能够完成各个工序的设备列表,把进入设备列表的所有设备的权重系数除以已选设备微调参数 T ,在各个工序计算过程中多次进入列表的设备,进行多次除法操作;第二次是建线过程,系统将从第一个零件的第一道工序开始进行遍历操作,计算出能成该工序的设备列表,取得权重系数最小的一台设备作为推荐设备,然后把列表中其余设备的权重系数乘以 T ,依次类推直到完成所有零件所有工序的推荐设备选择,如果存在权重系数相同的情况,则通过比较与前一设备的距离,选择距离较近的设备,也就是选择物流距离相对较短的设备,最终完成零件生产线重组,如图2所示。

设备建线权重系数 E 和已选设备的微调 T 对建线结果产生非常大的影响,可以由用户自主设定,同时系统可以参考虚拟生产线生产效率的测评结果,逐步对2个参数进行自主学习和逐步修正。例如,系统自动逐步加大经过确认的虚拟生产线中的设备的权重系数,来降低这些设备在其他虚拟生产线中选中的几率,通过车间建线过程的不断微调,最终优化各个设备的权重系数。

3 生产线重组与可视化软件

生产线重组与可视化软件主要针对车间加工任务和生产设备,实现了车间设备布局可视化建模、设备状态监视、生产线重组分析。

“车间设备布局可视化建模”以车间设备列表为基础。对设备进行拖拽放置,来反应设备的相对位置关系;调整设备图片的大小,来反应设备尺寸的不同。系统模型见图3和系统界面见图4。

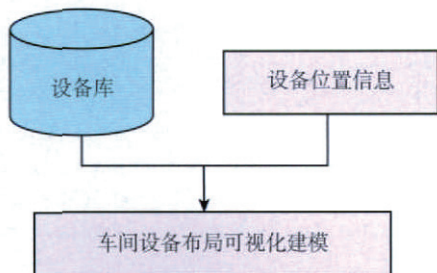


图3 车间设备布局可视化建模系统模型
Fig.3 System model of visualization modeling of equipment layout in workshop

“设备状态监视”主要实时监视车间设备状态,主要包括设备开机、关机以及故障等信息。系统模型和系统界面分别如图5、图6所示:其中绿框表示设备正常运转,蓝框表示设备关机,红色表示设备出现故障。

“生产线重组分析”是依据零件组(生产任务)、相应的工艺信息及设备库信息等,完成生产线的重组,并且以可视化的形式,进行重组条件的设置和重组结果的显示,系统模型和系统界面分别如图7、8所示。



图4 车间设备布局可视化建模系统界面
Fig.4 System interface of visualization modeling of equipment layout in workshop

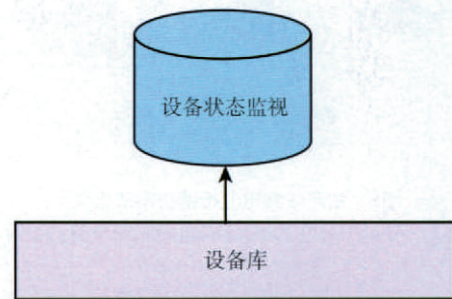


图5 设备状态监视系统模型
Fig.5 Monitoring system model of equipment status

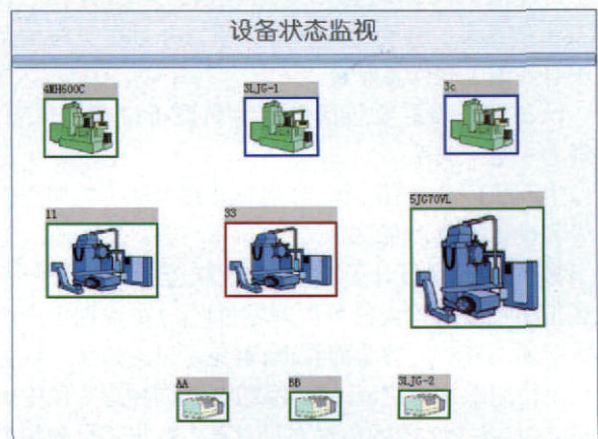


图6 设备状态监视系统界面
Fig.6 Monitoring system interface of equipment status

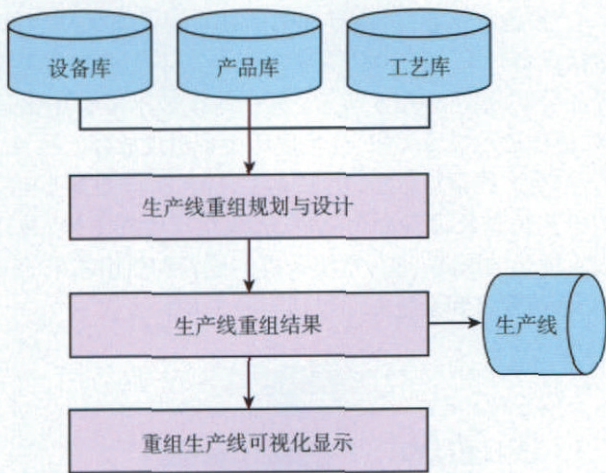


图7 生产线重组分析系统模型
Fig.7 Analysis system model of reconfiguration for production line

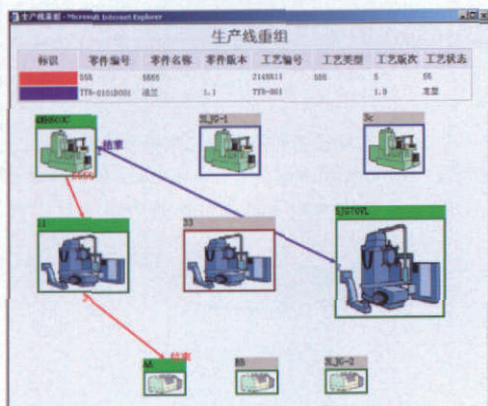


图8 生产线重组分析模块系统模型
Fig.8 Analysis system interface of reconfiguration for production line

该模块涉及到的数据表主要分为3类：工艺信息表、设备信息表和生产线信息表。

工艺信息表主要包括工艺规程信息表、工序信息表和工步信息表。分别为一对多关系。并且在工序信息表中有外键关联设备库表。

设备信息表主要包括设备库和设备位置信息表。两者为一对一关系。

生产线信息表有一张，分别有外键关联工艺规程信息表和设备库表，如图9所示。

另外，系统还设计了“快速响应制造运行控制平台”使虚拟生产线管理人员可以对零件(组)在虚拟生产线的加工环节进行全面管理，避免了以虚拟生产线为生产单位组织生产过程时，产品组在不同物理工段中进行移动时，各个工段的负责人只对其在各自工段的加工过程负责，生产责任存在割裂，无人对产品组的生产全过程负责的现象。

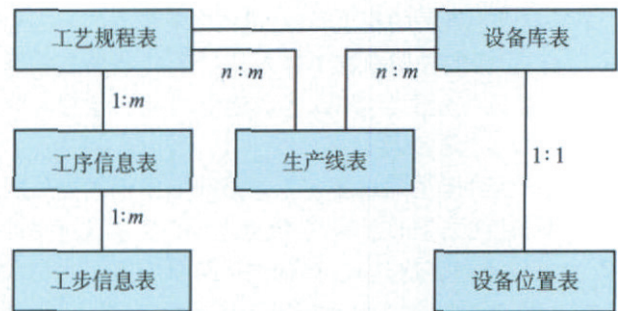


图9 应用系统数据模型
Fig.9 Data Model of application system

4 结束语

需要进一步研究生产线重组与可视化软件与制造系统仿真软件和生产效率测评软件的深度集成，来对生产线重组结果进行运行前的预测和运行后的效率测评。生产线重组的研究成果，对于新的生产线规划、建立和分析，也具有非常重要的参考价值。

参考文献

- [1] 梁福军, 宁汝新. “可重构制造系统中基于相似性理论的虚拟制造单元生成方法” 计算机集成制造系统. 2004, 10 (11):1370-1376.
- [2] 王国新, 宁汝新, 王爱民, 等. 可重构制造系统集成设计框架研究. 计算机集成制造系统. 2007, 13 (8):1481-1489.
- [3] 赵宏林, 盛伯浩, 张文河, 等. 快速重组制造系统中的组态原理及其实现. 工业工程与管理. 2001 (2):1-4.
- [4] 周美立. 相似性科学. 北京: 科学出版社, 2004.

(责编 依然)

(上接第79页)

- [6] 徐兆瑜. 晶须的研究和应用新进展. 化工技术与开发, 2005, 34 (2):11-17.
- [7] Nait-Ali B, Haberko K, Vesteghem H, et al. Thermal conductivity of highly porous zirconia. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26: 3567-3574.
- [8] Dean-MO Liu. Influence of porosity and pore size on the compressive strength of porous hydroxyapatite ceramic. Ceramics International, 1998, 23: 135-139.
- [9] Rambo C R, Cao J, Sieber H. Preparation and properties of highly porous, biomorphic YSZ ceramics. Materials Chemistry and Physics, 2004, 87: 345-352.
- [10] Nait-Ali B, Haberko K, Vesteghem H, et al. Preparation and thermal conductivity characterisation of highly porous ceramics comparison between experimental results, analytical calculations and numerical simulations. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27: 1345-1350.
- [11] Deng Zhenyan, Ferreira J M F, Tanaka Y, et al. Microstructure and thermal conductivity of porous ZrO₂ ceramics. Acta Materialia, 2007, 55: 3663-3669.

(责编 良辰)