

放电等离子烧结技术*

高 濂

(中国科学院上海硅酸盐研究所高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室 上海 200050)

官本大树

(日本大阪府立产业技术研究所 大阪 590-02 日本)

摘 要

本文介绍了近几年来在日本迅速发展的放电等离子烧结技术,除概要地介绍了这种烧结新技术的原理和特点外,着重介绍了放电等离子烧结技术在制备梯度功能材料和快速烧结细晶粒陶瓷方面的重要应用,其中后者包括了作者最近在日本大阪府立产业技术研究所取得的部分研究成果.

关键词 放电, 等离子, 烧结

1 引言

近几年来,日本的一些研究陶瓷、金属和复合材料的实验室纷纷装备了住友石炭矿业株式会社制造的放电等离子烧结系统(Spark Plasma Sintering System),商品名称为 Dr. Sinter,取得了不少新的研究成果,该系统利用脉冲能、放电脉冲压力和焦耳热产生的瞬时高温场来实现烧结过程,结合最新的软件和硬件技术,已发展成为可用于工业生产的实用装备.由于放电等离子烧结通过放电等离子直接均匀加热,因此具有非常高的热效率和容易得到晶粒均匀的高质量的烧结体,可广泛用于磁性材料、梯度功能材料、纳米陶瓷、纤维增强陶瓷和金属间复合材料等一系列新型材料的烧结,是一项有重要实用意义和广阔前景的烧结新技术.

2 放电等离子烧结 (SPS) 过程的原理和特点

从表1对各种烧结过程的标准分类可知,放电等离子烧结的模压加压烧结过程,除具有热压烧结的特点外,其主要特点是通过瞬时产生的放电等离子使被烧结体内部每个颗粒均匀地自身发热和使颗粒表面活化,因而具有非常高的热效率和可在相当短的时间内使被烧结体达到致密.

2.1 SPS 系统的基本配置

如图1^[1]所示,住友石炭矿业株式会社的SPS系统包括一个垂直单向加压装置和加压显示系统、一个特制的带水冷却的通电装置和特制的直流脉冲烧结电源、一个水冷真空室和真空/空气/氩气气氛控制系统、冷却水控制系统和温度测量系统、位置测量系统和位移及位移速率测量系统、各种内锁安全装置和所有这些装置的中央控制操作面板.

2.2 工作原理

传统的热压烧结主要是由通电产生的焦耳热(I^2R)和加压造成的塑性变形这两个因素来促使烧结过程的进行.而SPS过程除了上述作用外,在压实颗粒样品上施加了由特殊电

* 1996年11月25日收到

源产生的直流脉冲电压，并有效地利用了在粉体颗粒间放电所产生的自发热作用。在压实颗粒样品上施加脉冲电压产生了如图 2^[1] 所示的、在通常热压烧结中没有的各种有利于烧结的现象。

表 1 烧结过程的标准分类
Table 1 Standard classification of sintering

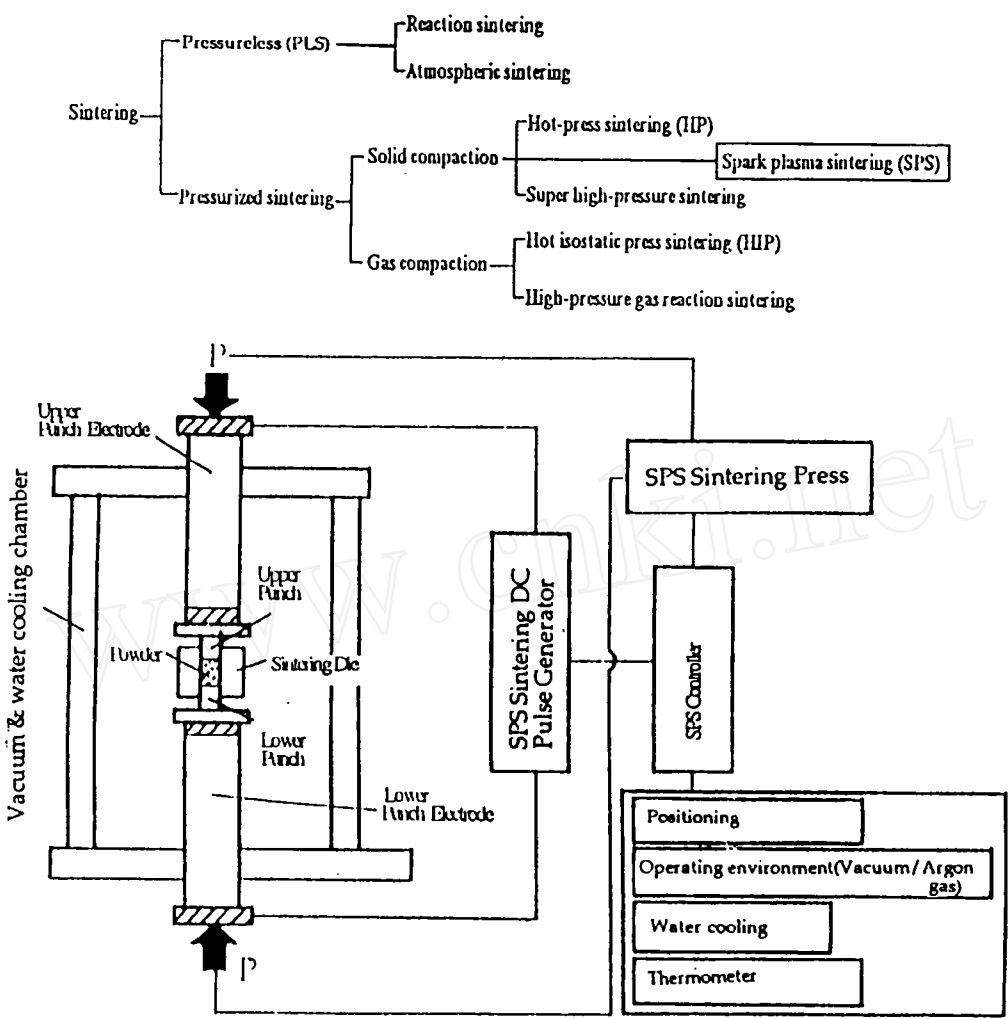


图 1 SPS 系统的构型
Fig.1 Configuration of the SPS system

这里，在 SPS 状态有一个非常重要的作用，在粉体颗粒间高速升温后，晶粒间结合处通过热扩散迅速冷却，施加脉冲电压使所加的能量可在观察烧结过程的同时高精度地加以控制，电场的作用也因离子高速迁移而造成高速扩散。通过重复施加开关电压，放电点(局部高温源)在压实颗粒间移动而布满整个样品，这就使样品均匀地发热和节约能源。能使高能脉冲集中在晶粒结合处是 SPS 过程不同于其它烧结过程的一个主要特点。

SPS 过程中，当在晶粒间的空隙处放电时，会瞬时产生高达几千度至一万度的局部高温，这在晶粒表面引起蒸发和熔化，并在晶粒接触点形成“颈部”，对金属而言，即形成焊

接态。由于热量立即从发热中心传递到晶粒表面和向四周扩散，因此所形成的颈部快速冷却。因颈部的蒸气压低于其它部位，气相物质凝聚在颈部而达成物质的蒸发-凝固传递。与通常的烧结方法相比，SPS 过程中蒸发-凝固的物质传递要强得多，这是 SPS 过程的另一个特点。同时在 SPS 过程中，晶粒表面容易活化，通过表面扩散的物质传递也得到了促进。晶粒受脉冲电流加热和垂直单向压力的作用，体扩散、晶界扩散都得到加强，加速了烧结致密化的进程，因此用比较低的温度和比较短的时间就可以得到高质量的烧结体。

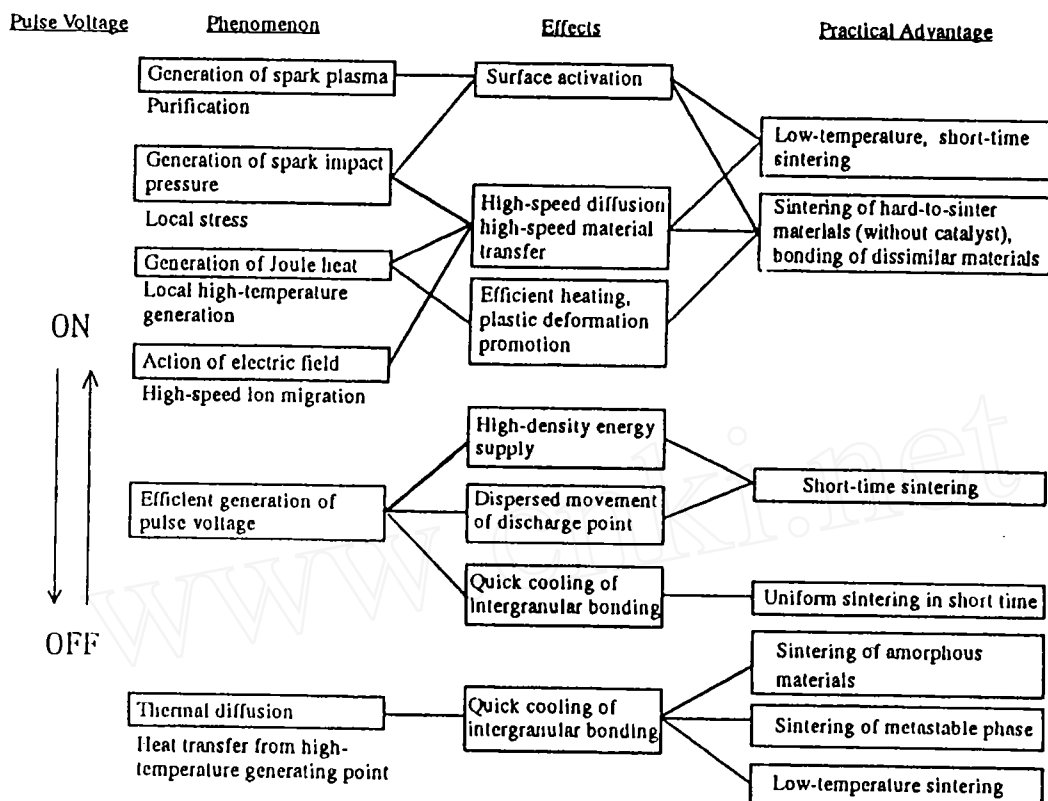


图 2 施加直流开关脉冲电压的作用
Fig.2 Effect of ON-OFF DC pulse energizing

SPS 系统可用于短时间、低温、高压 (500~1000MPa) 烧结，也可用于低压 (20~30 MPa)、高温 (1000~2000°C) 烧结，因此可广泛地用于金属、陶瓷和各种复合材料的烧结，包括一些用通常方法难以烧结的材料，例如表面容易生成硬的氧化层的金属钛和金属铝用 SPS 可以在短时间内烧结到 99~100% 致密。

3 放电等离子烧结的应用

由于具有上述其它烧结方法所没有的特点，SPS 系统已被成功地应用于梯度功能材料 (FGM)、金属基复合材料 (MMC)、纤维增强复合材料 (FRC)、多孔材料和高致密度、细晶粒陶瓷等各种新材料的制备，同时在硬质合金的烧结、多层金属粉末的同步焊接 (bonding)、陶瓷粉末和金属粉末的焊接以及固体-粉末-固体的焊接等方面也已有广泛的应用。

3.1 梯度功能材料

金属基氧化物梯度功能复合材料是一类既具有金属的强度和韧性，又具有特别高的耐

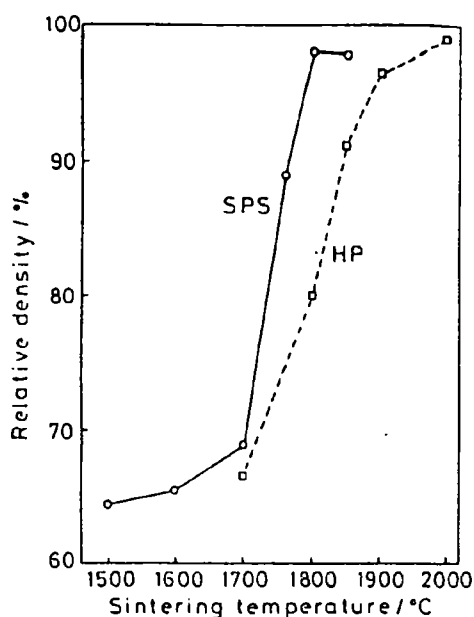


图 4 碳化硅 SPS 和 HP 烧结曲线

Fig.4 Sintering curves of silicon carbide by SPS and HP

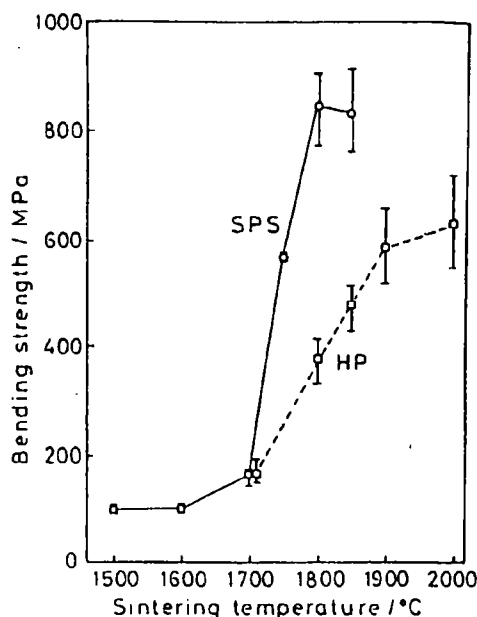


图 5 碳化硅烧结温度与强度的关系

Fig.5 Effect of sintering temperature on bending strength by SPS and HP

参 考 文 献

- 1 Tokita M. *J. Society. Powder Technology Japan*, 1993, 30: 790.
- 2 Omori M, Sakai H, Hirai T, *et al.* In: Ilschner B & Cherradi N, ed. *Proceedings of 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials*. Lausanne, Switzerland, 1994. 71.
- 3 Omori M, Sakai H, Okubo A, Hirai T. In: Ilschner B & Cherradi N, ed. *Proceedings of 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials*. Lausanne, Switzerland, 1994. 65.
- 4 Omori M, Sakai H, Okubo A, Hirai T. In: Ilschner B & Cherradi N, *Proceedings of 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials*. Lausanne, Switzerland, 1994. 667.
- 5 Tamari N, Tanaka T, Tanaka K, Kondoh I. *J. Ceram. Soc. Jap.*, 1995, 103: 740.
- 6 Nishimura T, Mitomo M, Hirotsuru H, Kawahara M. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1995, 14: 1046.

Spark Plasma Sintering Technology

GAO Lian

(State Key Lab on High Performance Ceramics and Superfine Microstructure Studies, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200050 China)

MIYAMOTO Hiroki

(Technology Research Institute of Osaka Prefecture Osaka 590-02 Japan)

Abstract

The SPS (Spark Plasma Sintering) process is a new materials synthesis processing technology recently developed by Sumitomo Coal Mining Co., Ltd., Japan. This paper describes the principles and features of the SPS process, including the basic configuration of the Sumitomo's SPS system, as well as the SPS process applications particularly in the synthesis of the functionally gradient materials and the high-density, fine-grains sintered ceramics including partly authors' recent research results.

Key words spark, plasma, sintering