

文章编号: 1003-7837(2004)01-0001-08

粉末冶金温压技术的研究及其应用*

李元元, 肖志瑜, 倪东惠, 张 文, 陈维平

(华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 主要介绍了温压技术的研究概况, 对其关键技术(粉末、润滑剂、温压温度和温压系统)、致密化机理、温压材料、数值模拟及其工业化应用的最新研究进展进行了全面的综述。粉末冶金温压技术绝大部分受到国外严格的专利保护, 因而研究开发出拥有自主知识产权的温压技术, 具有重要的现实意义。并指明在不久的将来, 高性能铁基粉末冶金零件在汽车、机械工业中的应用将不断扩大, 温压粉末冶金零件的潜在市场十分广阔。

关键词: 粉末冶金; 温压技术; 应用

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A

粉末冶金在技术和经济上具有一系列优点, 它不仅是一门材料制造技术, 也是一门材料加工技术, 在国民经济的许多领域有着广泛的应用。近十年来粉末冶金新工艺、新技术层出不穷, 解决了粉末冶金材料的高致密化和高精密化问题, 促进了粉末冶金工业的快速发展。温压作为粉末冶金结构材料高致密化的一种精密成形技术, 是由 Hoeganaes 公司在 1994 年的国际粉末冶金和颗粒材料会议 (PM²TEC 94) 上正式公布的。该工艺最显著的技术优点在于以较低的成本制造高强度、高精度的铁基粉末冶金结构零件, 为零部件在性能和成本之间找到一个理想的结合点, 其问世便引起轰动并获得了很大的商业成功。温压技术现已被认为是二十世纪九十年代以来, 粉末冶金零件高致密化的最重大进展, 也是粉

末冶金领域最具创造性的一项技术进步^[1,2]。

温压技术是在传统粉末冶金工艺的基础上改进而来的。其工艺过程是将混有温压专用润滑剂(和粘结剂)的粉末加热至 130~150℃, 然后在加热到上述温度的模具里压制成形。与传统工艺相比, 温压成形的压坯密度有 0.15~0.3 g/cm³ 的增幅^[3~5], 对于提高粉末冶金制品的性能, 特别是力学性能具有重要作用。温压工艺简单、成本低廉, 制品密度高、性能和质量稳定。表 1 列出了几种粉末冶金工艺的优缺点及成本比较^[6]。Shah 和 Issacs 比较了以温压工艺和传统复压复烧工艺生产齿轮的成本, 分析结果显示, 在零件性能相当的情况下, 采用温压工艺生产的成本比采用复压复烧生产的约低 10%^[7]。

表 1 几种粉末冶金工艺的优缺点及成本比较

Table 1 Virtues and defects and cost comparison on several PM processes

成形工艺	密度/(g·cm ⁻³)	成本系数	工艺特点
传统一次压制, 一次烧结	<7.1	1.0	工序少, 成本低, 精度高, 但制品密度低。
温压一次压制, 一次烧结	7.1~7.5	1.3	制品密度较高, 工序少, 成本较低, 精度高, 生坯的力学性能高。
渗铜	7.0~全致密	1.4	制品密度高, 但工序较多, 组织不均一, 性能相对较差。
传统复压复烧	7.2~7.6	1.5	制品密度较高, 但工序较多, 不适用于制造形状复杂的零件。
粉末锻造	>7.6	2.0	制品密度高, 但成本高, 工序多, 精度低, 不适用于制造形状复杂的零件。

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50135020), 国家“863 计划”项目(2001AA337010)资助。

收稿日期: 2003-06-23

作者简介: 李元元(1958-), 男, 广东梅县人, 教授, 博导, 博士。

温压工艺的出现,使得以经济可行的方法生产高性能粉末冶金零件成为可能,并大大地扩大了粉末冶金零件的应用范围。目前,温压工艺已经成功应用于工业生产,并成功地制造出了各种形状复杂的高密度、高强度粉末冶金零件。

1 温压关键技术在国内外的研究进展

国外温压技术受到严格的专利保护,目前已经获得几十项美国专利,其保护范围主要在以下两个方面:一是温压粉末(含特殊高温润滑剂的金属粉末);二是温压设备。

1.1 粉末

用于温压的混合粉末不仅在加热、传送及压制过程中都应具有好的压缩性、流动性和始终如一的松装密度,而且制成的零件之间其性能一致性也要求很好。温压所获得的材料密度除与润滑剂有关外,还取决于铁粉的压缩性和混合粉末的配方。特别是,混合粉的配方决定了合金材料的无孔隙密度(PFD)。现有的温压专利粉末有美国 Hoeganaes 公司的 Ancordense™ 预制粉末,瑞典 Hogannas AB 公司的 Densmix 和加拿大 Quebec Metal Powder 公司的 FLOMET WP™ 等^[8-10] 预制粉末。以瑞典的 Densmix 粉末为例,无论在 130℃ 下保温,还是经加热→130℃ 保温→冷却→升温循环作用后,粉末的松装密度、流动性及在 600 MPa 下压制的生坯密度都相当稳定,分别保持在 3.13~3.15 g/cm³, 26.2~26.5 s/50g, 7.29~7.30 g/cm³ 的范围。

国内中南大学在铁粉的部分预合金化技术基础上研究了低成本的温压粉末制造技术^[11]。北京科技大学和鞍钢粉材厂合作,从化学成分、粒度组成、颗粒形貌等指标入手,开发出高质量的适合于温压的高压缩性水雾化铁粉,粉末的碳、氧、氮和夹杂物含量都极低^[12]。华南理工大学结合我国国情,开发了具有自主知识产权、以元素粉末为主体和特殊混制工艺相结合的温压粉末,并在实际应用中获得良好的效果。

1.2 润滑剂及温压工艺

传统工艺中使用的市售润滑剂在粉末升温到 100℃ 时,粉末的流动性便会恶化,甚至不能流动。为了利用升温压制的有利作用,必须采用新型的高温润滑剂,使混合粉末在高温下操作性能最佳化。现有的润滑剂主要有:聚酰胺、聚酰亚胺、聚醚亚胺、聚碳酸酯、聚甲基丙烯酸酯、聚醚、醋酸乙酯、聚氨基甲

酸酯、聚砜、纤维素酯、热塑性酚醛树脂、聚乙烯醇、阿克蜡、甘油等及上述物质间的化合物^[13-17]。通常认为温压温度范围适宜在 130~150℃,作业温度波动控制在 $\pm 2.5^\circ\text{C}$,但也有报道加热到 250℃^[18]。温压温度的确定通常与所加的润滑剂的特性有密切关系,要求所选的润滑剂在温压温度范围内具有最佳的润滑效果,一般将温压温度控制在聚合物润滑剂的玻璃化温度之上 25~85℃^[19] 或熔点之下 5~50℃^[20],此时润滑剂处于粘流态,既有一定的粘结性,也有一定的润滑性,可在粉体表面铺展和流动,有利于进一步改善润滑剂的分布,从而提高润滑的效果。

温压工艺中润滑剂的加入量比传统工艺少,其质量分数一般为 0.6%^[9]。润滑剂的加入方式主要有干混和湿混两种^[21]。据资料^[22]报道,润滑剂的质量分数每降低 0.1%,可使制品密度提高 0.05 g/cm³。此外,温压温度还与压制力和装粉高度有关,文献^[10]报道,压制力越大和装粉高度越高,最佳温压温度越低,如果装粉高度由 0.5 cm 升高到 1.9 cm,最佳温压温度由 150℃ 降低到 93~110℃。

北京科技大学曾对无粘结剂铁粉、含细磷铁粉材料、温压粘结剂玻璃化温度调整等进行了早期试验研究^[23-25];系统地研究了温压压制过程中铁粉特性、压制参数对温压致密化过程的影响^[26-30]。华南理工大学在国家“九五”科技攻关、国家军工等项目的资助下,近几年来对温压技术开展了较广泛深入地研究,在润滑剂优选、温压工艺参数优化、高性能温压材料的制备成形、模壁润滑、致密化机理、温压装置等方面进行了系统研究^[31-42]。

1.3 温压系统

温压系统包括粉末加温输送系统与模具加热装置,它必须提供灵敏而精确的控温,并能容易地附加在现有的粉末冶金设备上压制,以降低投资成本。国际上现有可以产业化的温压设备及其制造厂家,主要有美国 Hoeganaes Corp. 和 Cincinnati Incorp. 公司共同开发的专利 EL-TEMP 温压系统,美国 Hoeganaes Corp. 与美国微波材料技术公司开发的 Micro-Met 温压加热系统,Abbott Furnace Company 生产的 TPP300 型加热系统,Gasbarre Products Inc. 生产的 TOPS 系统,以及由瑞典 Hoeganaes 公司和瑞典 Linde Metal/teknik 公司合作生产的 Linde Metal/teknik 系统^[43-45]。

EL-TEMP 温压系统的特点是粉末体的温度稳定、均一,粉末的输送量与供给量精确。EL-TEMP 温

压系统中的粉末和模具都采用了敏感的闭路控温,减少了热震并防止可能影响粉末体性能的过热现象.容积一定、温度可控的装粉靴与计算机数控(CNC)伺服驱动装置相联,进料由计算机程序控制.此系统传输加热粉末的速率为 $1.2 \sim 9.0 \text{ kg/min}$,温度范围为室温至 163°C .

Micro-Met 温压系统的特点是采用微波加热,加热速度快,粉末体的温度均匀,温度稳定性可控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$.当需要增大供粉能力时,可安装几台 Micro-Met 装置.该系统可通过改变微波功率与粉末输送速率控制微波室中粉末的温度,粉末体经微波加热后被输送到加热的料仓中,再通过加热的软管送到装粉区,进入加热的模具中进行压制.整个系统采用程序闭环控制.

Abbott Furnace Company 生产的 TPP300 型加热系统是电阻加热,其加热能力为 $4.5 \sim 9.0 \text{ kg/min}$,气体流量为 84.96 L/min ,输出功率为 36 kW ,设备预热时间为 20 min ,温度精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$,控制系统为微电脑操作,并装备有触摸式操作屏.这套设备的主要特点是结构简单,占地面积小,设备高 1.93 m 、厚 0.43 m ,移动方便.

Gasharre Products Inc. 生产的 TOPS 系统是适用于普通压机进行温压的轻便装置,它的加热系统由 $5 \sim 7$ 个加热区组成.采用电阻丝加热粉末.送料软管的内壁有特氟龙涂层,可减少粉末的粘附,使粉末流动更加顺畅,送料软管总长为 91.44 mm ,可以和各种类型的送粉靴连接.软管外层裹有电阻丝,使粉末始终保持均匀的温度.

Linde Metal/teknik 系统采用热油加热,它由特殊设计的槽缝热交换器构成,粉末充填入宽 10 mm 的槽缝中.该加热方法适用于粉末输出量较大的情况,一般用于批量大、质量大的零件的生产.缺点是体积大、设备投资高、油压系统复杂和维护费用大.

此外,还有报道采用红外线加热粉末,其加热速度快,控温较容易,但造价较高,适合于预制粉.

华南理工大学已研制出具有自主知识产权的温压设备,该设备由粉末分段加热装置、气动自动送粉装置、模具加热装置、改装的普通压机等部分组成.目前,正对 HGWY-I 型(200 t)和 HGWY-II 型(100 t)进行生产的稳定性试验.

内,铁粉颗粒的屈服强度、加工硬化速率和程度的降低,铁粉颗粒的塑性变形阻力和致密化阻力的降低,都有利于塑性变形过程的充分进行,便于获得较高的生坯密度^[46,47].为此,许多研究人员采取提高铁粉塑性变形能力的措施,诸如降低铁粉中的氧、碳、氮及杂质的含量,以获得最大程度的致密化效果.

Degoix 和 St-Laurent 等人认为^[8,21],加入的聚合物润滑剂可使粉末在温压时处于粘流态,提高了压制过程中粉末颗粒之间的润滑效果,减小了摩擦阻力,压制时粉末颗粒能更好地传递压力,且粉末颗粒充填性更好.这有利于提高密度和降低脱模力.文献^[48,49]简单报道过 Gagne 等人采用扫描电镜、高分辨率探针、二次离子质谱仪对粉末颗粒在室温和 150°C 的压制行为进行微观研究后认为,温压一方面改进了粉末颗粒的重排,促使小粉末填充到大粉末颗粒的间隙中,另一方面还增强了粉末颗粒的塑性变形,从而提高生坯密度;而生坯强度的提高主要是由于温压过程中粉末颗粒上包覆的润滑剂薄膜很薄,大部分润滑剂存在于孔洞中,从而促进了粉末颗粒之间的金属接触和冶金结合作用.

国内果世驹从温压过程与传统压制过程中生坯密度随压制压力变化的曲线基本上是平行走向认为,温压过程中未出现新的致密化机制^[25,28];曹顺华在实验研究中发现,在压制过程中,当压机以恒定的加载速度压制时,粉末压机的压力指针从低压到高压均出现了一系列“平台”的停滞现象.他认为在温压过程中,颗粒重排是温压的主导致密化机制^[50].李元元和张双益等认为,聚合物润滑剂改善了温压成形过程的润滑效果,并明显提高了铁粉的塑性变形程度,从而提高生坯的密度^[33,51].肖志瑜通过对铁粉的动态压制曲线、脱模力曲线、X 射线衍射、显微硬度、摩擦和润滑等进行研究,揭示了温压的致密化机理:在温压初期阶段,粉末的颗粒重排列占主导地位,其对致密化的贡献率明显高于冷压;在后期阶段,温压致密化以塑性变形为主,温度对铁粉塑性变形程度的改善又为粉末颗粒的二次重排起到了协调作用,使铁粉获得最大程度的颗粒填充密度;期间,聚合物润滑剂对温压致密化起了重要的作用,它改善了粉末与模壁、粉末与粉末之间的润滑条件和效果,提高了有效压制压力,促进粉末致密化的顺利进行^[35].

2 温压致密化机理的研究

通常认为,在温压成形温度($130 \sim 150^\circ\text{C}$)范围

3 温压材料的研究

采用温压技术可获得高密度、高性能的铁基粉

未冶金材料已在粉末冶金行业达成共识.表2列出了国外著名公司和华南理工大学采用温压技术生产的几种典型的铁基粉末冶金材料的性能.

表2 几种典型温压铁基粉末冶金材料的性能^[52-54]

Table 2 Properties of several typical warm compaction iron-base PM materials

单位名称	材料 ¹⁾	压制压力 /MPa	密度/(g·cm ⁻³)		烧结温度 t/℃	$\sigma_b^{2)}$ /MPa	$\delta^{2)}$ /%	烧结条件
			生坯	烧坯				
N. America Hoeganaes	Ancorsteel 85HP + 2% Ni + 0.4% C	690	—	7.44	1120	636 (1306)	2.8 (1.3)	
	Distaloy 4800A + 0.5% C	690	—	7.32	1120	785 (1348)	2.4 (1.6)	30 min 75N ₂ /25H ₂
	Ancorsteel 41AB + 4% Ni + 0.5% C	690	—	7.28	1290	977	1.9	
Hoeganaes AB	Astaloy CrM + 0.6% C	700	7.16	7.13	1120	931	0.3	30 min 75N ₂ /25H ₂
	Astaloy CrM + 0.4% C	700	7.20	7.19	1120	872	1.6	
	Distaloy AE + 0.3% C	800	—	7.40	1120	750	—	30 min 吸热气氮
华南理工大学	HGF1	650	7.34	7.27	1250	770 (1170)	2.0 (1.5)	
	HGFF1 ³⁾	600	—	7.66	1280	815	2.0	分解氨气氮
	HGFF2 ³⁾	600	—	7.70	1280	515	—	

注: 1) 国外材料均为预合金粉,成分用质量分数表示, Ancorsteel 85HP 含 4.0% Ni; Ancorsteel 41AB 含 0.85% Mo, 1% Ni, 0.9% Mn, 0.75% Cr, 0.5% C; Distaloy 4800A 含 0.55% Mo, 4% Ni, 1.5% Cu; Astaloy CrM 含 0.5% Mo, 3% Cr; Distaloy AE 含 0.5% Mo, 4% Ni, 1.5% Cu.

2) 括号内的数据为热处理后的数据;

3) 为含硬质颗粒的钢铁基粉末冶金复合材料;

最近有报道指出, Hoeganaes AB 公司通过温压成形并经一次烧结, 获得了烧结态强度达 1299 MPa 的含 Cr 铁基粉末冶金材料^[55]. 这一研究成果显示出温压铁基粉末冶金材料的高性能仍大有潜力可挖掘.

4 温压技术的计算机模拟

近年来, 粉末冶金技术的发展虽然相当迅猛, 但相对于其它与之竞争的生产工艺, 如压铸和锻造等, 在计算机模拟方面则显得相对落后, 特别是在温压方面, 研究还没有全面展开. 近期, 德国 Fraunhofer 研究所在测定和收集粉末温压材料数据的基础上, 用有限元方法模拟温压过程, 推算出压坯的密度及应力^[56,57]. 目前, 华南理工大学正在温压成形数值模

拟技术方面进行初步研究.

5 流动温压工艺

德国 Fraunhofer 研究所最近开发出了一种被称为流动温压工艺 (Warm Flow Compaction) 的粉末冶金新技术^[58]. 它可称为温压成形技术的最新进展. 该技术以温压工艺为基础, 并结合了金属注射成形技术的优点, 通过加入适量的微细粉末和加大润滑剂的含量大大提高了混合粉末的流动性、填充能力和成形性, 从而可以制造带有与压制方向垂直的凹槽、孔和螺纹孔等形状复杂的零件, 而不需要其后的二次机加工. 流动温压工艺既克服了传统粉末冶金技术在成形复杂几何外形方面的不足, 又避免了金属注射成形技术的高成本, 是一项极有发展潜力的新

技术.

成功.目前,温压工艺已经成功应用于工业生产,并成功制造出了各种形状复杂的高密度、高强度粉末冶金零件.表 3 列出了国(境)外温压成形技术的典型应用及其特性^[2,44,49,59~65].

6 温压成形技术的典型应用

温压工艺自其问世之日起就获得了很大的商业

表 3 温压成形技术的典型应用及其特性

Table 3 Typical application of warm compaction forming technology and its property

典型零件	技术优势及性能	备注	参考文献
汽车传动转矩变换器 涡轮毂	提高强度,密度 7.25 g/cm ³ 以上,拉伸强度为 807 MPa,硬度为 HRC17,在扭矩为 1210 N·m 时可承受 100 万次以上循环	质量 1.2 kg;获 1997 年美国 MPIF 年度零件设计比赛大奖	[59,60]
温压-烧结连杆	提高疲劳强度,密度为 7.4 g/cm ³ ,烧结态抗拉强度 1050 MPa,屈服强度 560 MPa,抗压屈服点 750 MPa,对称循环拉压疲劳强度为 320 MPa(r=1),其波动仅为 10 MPa	质量 350 ~ 600 g,获 2000 年 EPMA(欧洲粉末冶金协会)的粉末冶金创新一等奖	[61,62]
汽车传动齿轮、油泵齿轮、凸轮、链轮、同步器毂、转向涡轮、螺旋齿轮、电动工具伞齿轮	提高强度或疲劳强度,密度 7.03 ~ 7.40 g/cm ³ ,拉伸强度为 758 ~ 970 MPa,疲劳强度 350 ~ 450 MPa	质量 100 ~ 1000 g	[2,63 ~ 65]
磁性材料零件,如变压器铁芯、电动机硅钢片的替代品等	提高密度,密度 7.25 ~ 7.57 g/cm ³ ,显著改进了磁性能		[44,49]

北京科技大学在“九五”科技攻关项目的支持下,与武钢粉末公司合作开发出了高密度粉末冶金磁性材料零件,所研制的 Fe-P 软磁零件的密度达 7.41g/cm³,磁性能 $H_c = 84.4 \text{ A/m}$, $U_{\max} = 5850$, $B_{\max} = 1.50 \text{ T}$ ^[66].

华南理工大学在国家“九五”科技攻关、国家军工等项目的资助下,研制出具有特殊用途的发动机机油泵斜齿轮和气门导筒零件.温压斜齿轮的基本参数为:法向模数 $m_n = 5.5$,齿数 $z = 10$,压力角 $\alpha_n = 25^\circ$,螺旋角 $\beta = 8.1^\circ$,齿宽 $B = 32 \text{ mm}$.采用模壁润滑温压,零件密度达 7.25 g/cm³;壁厚为 2 mm 的薄壁气门导筒零件是选用两种不同成分的高含量陶瓷颗粒增强的铁基粉末冶金复合材料粉末两次布粉后温压成形,有效地克服了气门导筒零件成形过程中裂纹的产生,并保证了零件烧结后达到 98% 的相对密度,使气门导筒既有高的强度又有高的耐磨性.

至今为止,国内引进温压成形技术的粉末冶金零件生产厂家主要有宁波金鸡粉末冶金集团公司和扬州的保来得工业有限公司,这两家公司都是从国外引进生产线与购买专用温压粉末进行电动工具齿轮的生产.广东华合金材料实业有限公司依托华南理工大学的技术支持,采用华南理工大学研制开发的温压设备、温压粉末及其工艺生产高密度、高性

能的温压粉末冶金零件,并取得了明显的经济和社会效益.

7 温压技术的展望

高密度、高强度和高精度的粉末冶金结构零件是粉末冶金工业的发展方向和重点.目前,从整体上说,我国粉末冶金工业的基础仍较薄弱,行业整体技术水平仍较低、工艺装备仍较落后,与国外先进技术水平相比存在较大差距.温压技术的基础研究有待深入,温压工艺的潜力还有待大力挖掘.在我国,深入研究和大力发展温压工艺这种高性能、低成本的粉末冶金生产技术,对提高我国粉末冶金产品的档次和技术水平,赶超世界先进制造水平具有重要的现实意义.

目前,华南理工大学、中南大学和北京科技大学在 2002 年国家“十五”、“863 计划”项目及国家自然科学基金重点项目的支持下,正对不锈钢和金属基复合材料的温压成形、模壁润滑温压、100℃ 以下的低温温压工艺、温压成形过程的致密化机理、数值模拟、智能化温压成形设备等方面进行全方位的研究,有望在近 2 ~ 3 年内在温压技术研究方面取得更大的进展.

据美国 Hoeganaes 公司预测,汽车中采用粉末冶金零部件的总量将达到 48.5 kg/辆,铝基 P/M 零部件 8.5 kg/辆,铁基 P/M 零部件 40 kg/辆,其中温压零部件为 25 kg/辆.根据我国汽车行业“十五”发展目标,到 2005 年,我国汽车生产量将达到 320 万辆,其中轿车为 110 万辆.采用温压技术开发出高密度、高强度和高精度的粉末冶金结构零件,将可带动汽车、摩托车、电动工具、机床、家电、办公设备等行业零件制造技术的发展,市场前景非常广阔.

参考文献:

- [1] Capus J, Pickering S, Weaver A. Hoeganaes offers higher density at lower cost[J]. Metal Powder Report, 1994, 49(7, 8):22-24.
- [2] Rutz H G, Hanejko F G. High Density Processing of High Performance Ferrous Materials[J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 1995, 31(1):9-17.
- [3] Rutz H, Hanejko F, Luk S. Warm Compaction Offers High Density at low Cost[J]. Metal Powder Report, 1994, 49(9):40.
- [4] Rutz H, Hanejko F. High Density Processing of High Performance Ferrous Materials [A]. Advances in Powder Metallurgy & particulate Materials: Vol 5 [C]. Princeton (NJ):MPIF, 1995.117-133.
- [5] Engstroem U, Johansson B, Rutz H, et al. High Density PM Materials for Future Applications[J]. PM, 1994, (1):57-64.
- [6] Hoeganaes Corporation. Iron and steel powder and ferrous sintered materials [DB/OL]. <http://www.hoeganaes.com/home.htm>, 2000-05.
- [7] Shah M N, Isaacs J A. P/M Processing of Gear Components: Case Studies of Economic Competitiveness [A]. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials: Vol 10 [C]. Princeton (NJ): MPIF, 2000. 10-19.
- [8] St-Laurent S, Changnon F. 为温压工艺设计的混合粉[J]. 粉末冶金技术, 1998, 16(1):40-51.
- [9] Engstrom U, Johansson B, Jacobsom O. 温压粉末冶金材料的性能与公差[J]. 粉末冶金工业, 1997, 7(2):10-15.
- [10] Anon. Warm compaction moves into production[J]. Metal Powder Report, 1996, 51(7,8):38.
- [11] 曹顺华, 易建宏. 温压粉末的设计[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(96):532.
- [12] 果世驹. 粉末冶金温压技术的进展[J]. 粉末冶金工业, 2003, 13(2):5-6.
- [13] Oliver C, Clisby S. Method of Making an Iron/Polymer Powder Composition [P]. US patent: 5321060, 1993-10-15.
- [14] Luk S. Metal Powder Compositions Containing Binding Agents for Elevated Temperature Compaction [P]. US patent: 5429792, 1995-07-04.
- [15] Luk S. Iron-based Powder Compositions Containing Green Strength Enhancing Lubricants [P]. US patent: 5624631, 1997-02-20.
- [16] Semel F J, Luk S. Method for Preparing Binder-Treated Metallurgical Powders Containing an Organic Lubricant [P]. US patent: 5256185, 1993-12-05.
- [17] Capus J. Warm Compaction Attracts Scientific Interest [J]. Metal Powder Report, 1996, 51(10):12.
- [18] Weaver A. QMP Looks at High Density Products [J]. Metal Powder Report, 1994, 49(7,8):23.
- [19] Oliver C, Clisby S. Method of Making and Iron/Polymer Powder Composition [P]. US patent: 5225459, 1993-05-11.
- [20] Engstroem H, Johansson B. Metal Powder Composition for Warm Compaction and Method for Products [P]. US patent: 5744433, 1998-07-15.
- [21] Degoix C N, Griffo A, German R M. Effect of Lubrication Mode and Compaction Temperature on the Properties of Fe-Ni-Cu-Mo-C [J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 1998, 34(2):29-33.
- [22] 亓家钟. 铁基材料高密度温压工艺 [J]. 粉末冶金工业, 1996, 6(2):14-18.
- [23] 果世驹, 林涛, 李明怡. 粉末烧结钢温压粘结剂玻璃化温度调整的预测方程 [J]. 粉末冶金技术, 1997, 15(2):85-88.
- [24] 果世驹, 林涛, 李明怡. 无粘结剂铁粉的温压工艺研究 [J]. 粉末冶金工业, 1996, 6(6):5-9.
- [25] 果世驹, 林涛, 魏延平, 等. 细磷铁粉的制备及其对铁粉温压行为的影响 [J]. 粉末冶金技术, 1997, 15(1):14-17.
- [26] 果世驹, 林涛. 温压压力强化因子及压制方程的唯象分析 [J]. 粉末冶金技术, 1998, 16(3):165-168.
- [27] 果世驹, 林涛. 侧压系数及压坯高径比对温压有效性的影响 [J]. 粉末冶金工业, 1998, 8(4):7-10.
- [28] 林涛, 果世驹, 李明怡, 等. 温压过程致密化机制探讨 [J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(2):131-133.
- [29] 李明怡, 果世驹, 林涛, 等. 铁粉特性对温压生坯密度的影响 [J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(3):172-177.
- [30] 李明怡, 果世驹, 康志君, 等. 不同类型金属粉末的温压行为 [J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(4):261-264.
- [31] 张双益, 李元元. 温压工艺中聚合物添加剂的加入方式 [J]. 金属成形工艺, 1999, 17(3):21-22.
- [32] 项品峰, 李元元, 龙雁, 等. 聚合物加入方式对粉末冶金温压成形的影响 [J]. 机械工程材料, 2001, 25(3):23-25.
- [33] 李元元, 项品峰, 徐铮, 等. 温压技术中的致密化机制

- [J].材料科学与工程,2001,19(1):39.
- [34] 肖志瑜,李元元,邱诚.温压工艺及其关键技术[J].机械工程材料,2001,25(1):16-21.
- [35] 肖志瑜.高性能温压粉末冶金材料的制备、成形及其应用[D].广州:华南理工大学,2002.
- [36] Li Yuanyuan, Xiao Zhiyu, Ngai Tungwai Leo, *et al.* Warm compacted NbC particulate reinforced iron-base composite (I)[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002,12(4):659-663.
- [37] Li Yuanyuan, Xiao Zhiyu, Ngai Tungwai Leo, *et al.* Warm compacted NbC particulate reinforced iron-base composite (II)[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002,12(4):664-668.
- [38] Xiao Zhiyu, Li Yuanyuan, Ngai Tungwai Leo, *et al.* Warm Compaction Behavior of Iron-based Powder Lubricated by Different Kinds of Graphite[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(5):1181-1184.
- [39] Li Yuanyuan, Ngai Tungwai Leo, Xiao Zhiyu, *et al.* Study on mechanical properties of warm compacted iron-base materials [J]. Journal of Central South University of Technology, 2002, 9(3): 154-158.
- [40] Li Yuanyuan, Ngai Tungwai Leo, Zhang Datong, *et al.* Effect of die wall lubrication on warm compaction powder metallurgy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129 (1-3): 354-358.
- [41] Ngai Tungwai Leo, Chen Weiping, Xiao Zhiyu, *et al.* Die wall lubricated warm compaction of iron-based powder metallurgy material [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(6): 1095-1098.
- [42] Ngai Tungwai Leo, Chen Weiping, Xiao Zhiyu, *et al.* Warm compaction of Al_2O_3 particulate reinforced powder metallurgy iron-base composite [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(5): 886-889.
- [43] Robert F. Additional applications of Cincinnati EL-TEMPTM systems [A]. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials: Vol 2 [C]. Princeton (NJ): MPIF, 1995. 2-3.
- [44] Weaver A. Press Makers Signal Faith in Warm Compaction [J]. Metal Powder Report, 1994, 49(7,8):24.
- [45] 李元元,徐铮,倪东惠.产业化温压设备中的加热系统[J].粉末冶金工业,2000,10(6):14-18.
- [46] Bocchini G F. Warm compaction of metal powders: why it works, why it requires a sophisticated engineering approach [J]. Powder Metallurgy, 1999, 42(2):171-180.
- [47] Rutz H G, Murphy T F, Cimino T M. The effect of microstructure on fatigue properties of high density ferrous P/M materials [A]. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials: Vol 5 [C]. Princeton (NJ): MPIF, 1994. 135-155.
- [48] Capus J. PM²TEC '97, Chicago [J]. Powder Metallurgy, 1997, 40(3):181-185.
- [49] Capus J. Warm Compacted Turbine Hub Leads New PM Thrust [J]. Metal Powder Report, 1997, 61(9):19.
- [50] 曹顺华,易建宏,奉东文,等.温压致密化机理及其在温压粉末设计中的应用[J].粉末冶金材料科学与工程, 2001, 6(3):199.
- [51] 张双益,李元元,徐铮,等.温压技术及其致密化机制的研究进展[J].材料科学与工程,1999,17(4):96.
- [52] Rutz H G, Hanejko F G, Luk S H. Warm compaction offers high density at low cost [J]. Metal Powder Report, 1994, 49 (9): 40-47.
- [53] Hanejko F, Rawlings A, Causton R. Opportunities for Conversion of Powertrain Parts from Cast Irons to PM [J]. Metal Powder Report, 2000, 55(5):38.
- [54] Hanejko F G, Ellis G W. Iron and steel powder and ferrous sintered materials [M]. Cinnaminson (NJ): Hoeganaes Corporation, 1994. 89-92.
- [55] Lindberg C, Johansson B, Maroli B. Mechanical Properties of Warm Compacted Astaloy CrM [A]. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials: Vol 6 [C]. Princeton (NJ): MPIF, 2000. 81.
- [56] Koller R, Massinger J. Finite-Element Simulation of Warm Compaction Process [A]. 1998 Powder Metallurgy World Congress and Exhibition [C]. Granada (Spain): European Powder Metallurgy, 1998. 55.
- [57] Shivanath R, Jones P K, Lawcock R. On the synergies of high temperature sintering and alloy development for high endurance P/M powder train components [J]. Advances in powder metallurgy and particulate materials, 1996, 4(13): 427.
- [58] Veltl G, Oppert A, Petzoldt F. Warm Flow Compaction Fosters More Complex PM Parts [J]. Metal Powder Report, 2001, 56(2): 26.
- [59] Anon. Warm Compaction Moves into Production [J]. Metal Powder Report, 1996, (7,8): 38.
- [60] Pickering S. Warm Compacted Turbine Hub Earns Top Ferrous Prize from MPIF [J]. Metal Powder Report, 1997, (7,8):12.
- [61] Lothar Albano-Mvler. 新千年初的欧洲粉末冶金[J].粉末冶金工业,2001,(2):7-13.
- [62] Peter J, Keith B G, Roger L. Densification strategies for high endurance P/M components [J]. Powder Metallurgy International, 1997, 33(2):37-44.
- [63] Weaver A. JPMA Awards Highlight PM's Innovative Strengths [J]. Metal Powder Report, 2000, 55(3):10.
- [64] 藤木章,前川幸广,马浏丰等.直喷汽油(DIG)汽车发动机无声链条系统用温压-高温烧结粉末冶金链轮的开发

- [J].粉末冶金技术,2003,21(2):86-91.
- [65] Gay D. Slot heater your short-cut to warm compacting[J]. Powder Metallurgy, 1996, 39(1): 13-17.
- [66] 果世驹.粉末冶金温压技术的进展[J].粉末冶金工业, 2003, 13(2): 5-6.

Research and application into warm compaction technology

LI Yuan-yuan, XIAO Zhi-yu, Tungwai Leo Ngai, ZHANG Wen, CHEN Wei-ping

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper gives a briefing on the research progress in warm compaction technology. Densification mechanism, warm compact materials, numerical modeling, industrial applications, and the key techniques in warm compaction such as powders, lubricants, warm compaction temperature and warm compaction system are overviewed. The paper points out that the history of warm compaction research and development in China is only a few years old and most of the warm compaction techniques are protected by foreign patents, therefore, to develop our own patents of warm compaction technique is important for our powder metallurgy industry. In the near future, applications of high performance iron-base powder metallurgy parts in automobile and mechanical industries will be widen, the potential markets in the warm compacted powder metallurgy parts are very attractive.

Key words: powder metallurgy; warm compaction technology; application



GL 和 TGL 型螺旋选矿机、溜槽

广州有色金属研究院选矿所设备中心生产的 GL 和 TGL 型螺旋选矿机、溜槽是一种新型高效重选设备,广泛应用于各类矿山.其特点如下:

- * 分选断面形状为复合立方抛物线;
- * 每圈螺距是变化的,且螺距与直径之比值大;
- * 设备结构合理,处理能力大、选别指标高;
- * 采用玻璃钢材料,一次整体成型,重量轻;
- * 螺旋槽面复合有耐磨层,耐磨性能好,寿命长;
- * 螺旋面不需加水,分带清晰,操作方便.

地址:广州市天河区长兴街广州有色金属研究院选矿所

邮编:510651 网址: <http://www.gzrnm.com>

电话:020-37239066、61086392、37239220、37239221 传真:020-37238535