

[文章编号] 1004- 0609(2000)06- 0765- 09

半固态加工技术及应用^①

罗守靖¹, 田文彤¹, 谢水生², 毛卫民³

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 北京有色金属研究总院 加工中心, 北京 100088;
3. 北京科技大学 铸造研究所, 北京 100083)

[摘要] 金属半固态成形作为 21 世纪一种近净成形新技术, 愈来愈引起人们的广泛关注。为了推动该技术在我国工业中应用, 从理论研究、坯料制备、二次(重熔)加热、成形工艺、国外应用的最新进展及发展趋势等方面进行了分析和讨论, 指出半固态加工技术在我国汽车、电子和军工等领域潜在的应用前景, 并阐明应采取的对策。

[关键词] 半固态加工; 近净成形; 研究及应用

[中图分类号] TG 146. 3

[文献标识码] A

半固态加工是利用金属材料从固态向液态, 或从液态向固态转变过程中, 经历半固态温度区间, 在该温度区间内实现的加工过程。显然, 这里指的是温度参数, 并未涉及材料处于半固态具有何种特性。20 世纪 70 年代初, 美国麻省理工学院 Flemings 教授领导的研究组, 发现处于凝固状态的金属材料经强力搅拌后, 枝晶被打碎, 生成球状晶组织, 具有成形时所需要的优异性能, 即流变性和触变性, 并冠以半固态加工^[1]。这样半固态加工, 不仅是温度函数, 而且是成形性函数。目前相关文献中所涉及的半固态加工, 指的就是后者, 人们一直沿用至今, 本文作者所要讨论的内容, 也在于此。

1 理论研究进展

1.1 枝晶球化机制

半固态坯的组织具有球状晶特征, 以保证在半固态温度下, 材料具有流变性和触变性。

1) 枝晶臂形变机制^[1~3]。凝固中的枝晶受剪切力作用, 发生塑性变形, 枝晶臂弯曲, 直至断裂, 使二次枝晶臂与主干分离。

2) 枝晶臂熔断机制^[4]。由于热流的扰动, 使积聚较多低熔点物质的枝晶臂根部产生局部熔断。

3) 枝晶塑性变形破碎机制^[5]。具有枝晶组织的固态坯产生大的塑性变形, 枝晶破碎后, 经重结晶使晶粒球化。

4) 抑制晶粒呈枝晶状长大机制^[6]。主要是凝

固中的金属处于一种特殊的凝固条件下, 即均匀温度场、均匀成分场, 枝晶生长受抑制, 而生成球状晶。

1.2 半固态金属的流变学行为

半固态金属的流变学性质一般通过采用 Couette^[7], Searle^[8] 同轴圆筒式粘度计测定合金的表观粘度来研究。

1) 变温非稳态流变行为

文献[9]的研究表明, 在连续冷却条件下, 半固态合金的表观粘度随冷却速度的降低和剪切速率的升高而降低; 在剪切速率恒定时, 表观粘度随固相体积分数的增加而增加。

2) 伪塑性行为

文献[9]的研究还发现, 在恒温或恒定固相体积分分数条件下, 连续搅动合金浆液可使其粘度降低并最终达到稳定。在此阶段表观粘度随剪切速率上升而下降, 反之亦真, 并满足 Power 定律:

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$$

式中 η 为表观粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, k 为反映稠密度的常数, n 为幂指数。

该特性称为伪塑性, n 愈小, 伪塑性愈大。

3) 触变行为

触变行为指表观粘度与剪切时间的依赖关系, 表征了半固态浆液的依时行为。当在剪切力作用下, 表观粘度随时间推移连续下降, 静止时表观粘度又随之恢复, 则称该材料具有触变性。

4) 等温动态流变行为

① [收稿日期] 2000- 06- 26; [修订日期] 2000- 07- 20

[作者简介] 罗守靖(1939-), 男, 教授。

半固态合金的稳态流变性能(伪塑性)不适用于实际工况条件。例如压铸充型过程一般只持续0.01~0.2s,属动态流变范畴。文献[10]给出了这方面的实验结果,认为表观粘度随切变速率的增加而增加,属于胀流型,与稳态流变特性(伪塑性)相差甚远。

1.3 半固态塑性变形机制

当固相体积分数较低,且为压铸充填时,仅利用流变学行为对半固态加工进行描述或许可行,但对于高固相体积分数(>60%)或锻造加工,半固态加工仅用流变学行为进行理论描述是远远不够的,对其塑性流动的研究,愈来愈受到人们关注,并取得一定进展。

1) 半固态金属物理模型及变形机制

在固相体积分数较高的情况下,固相晶粒间部分接触且液相充满晶间空间。其固态特性表现为由于晶粒聚集团之间的机械联结,施加于半固态体的宏观应力由固相和液相承担,应力的偏应力部分仅由固相承担,静水压力分别由固相和液相承担,液体承担的压力是由多孔固体骨架的体积变化引起的液体流动的阻力发展而来的^[12, 13]。

半固态变形机制:(1)晶粒接触处的弹塑性变形;(2)固相晶粒间粘结约束的破坏;(3)相对于固相的液相流动阻力;(4)晶粒重新排列的阻力。在变形的早期阶段,前2种机制是主要的,表明初始流动阻力取决于固相晶粒间的粘合力,而不是固相的屈服应力;后2种机制在变形的第2阶段是主要的,它们对流动应力的相对贡献取决于固相体积分数^[12]。

2) 半固态塑性加工力学模型及实验验证

一般来说,采用连续多孔体本构方程来描述固体骨架的变形行为,用达西定律来描述液体流动,将二者相互耦合,构成半固态塑性加工力学模型。当应变速率较低时,在气孔压力梯度的推动下,液体渗出自由表面,产生排液变形;高应变速率下,液体没有足够时间迁移到低压力区,导致气孔压力聚集,产生不排液变形。文献[14, 15]从理论与实验出发,细致分析了金属半固态成形的整个过程,并引用了塑性势对其进行描述,提出金属半固态下拉压变形行为的不对称性理论。采用排液压缩实验、不排液压缩实验及剪切实验验证了其力学模型的正确性。

到目前为止,半固态塑性加工理论的研究还仅仅是初步的,尤其是在晶粒周围存在液相的情况下,对液相作用的数学描述,而在外力作用下,考

虑液相作用下的本构方程,微观机制特征及其演变过程等也有待深入研究。

1.4 半固态金属成形数值模拟

1) 二次加热过程模拟。文献[16]利用通用模拟软件SCEDDY对310不锈钢坯料的二次加热过程进行模拟,并与实验结果进行了比较,保温阶段坯料的温度差值小于10℃。

2) 半固态金属充填过程模拟。鉴于缺乏半固态非稳态流变模型,许多学者假定充填时半固态金属的流动行为与时间无关,即假定半固态金属无触变性。Kang假定半固态金属的粘度在充填时不变,利用简化的Karker和Cell技术对Navier-Stokes方程求解;Alexandrou利用Bingham假塑性流变模型,并采用有限元方法模拟了几种触变过程^[16]。

3) 半固态锻造数值模拟^[6]。采用粘塑性有限元法和Darcy定律模拟半固态材料固相变形和液相流动,对2618, 7075合金半固态单向压缩过程进行了模拟,考察了变形速度、坯料温度和摩擦条件对变形过程的等效应力和等效应变分布的影响。

2 半固态材料的制备及形成机制

2.1 半固态材料制备

半固态材料的制备方法大致有液态法、控制凝固法和固态法3种。

1) 液态法。所谓液态法,是指对正在凝固的液态金属进行机械、电磁或振动处理,使其枝晶破碎,逐步球化成非枝晶组织。其中电磁搅拌连铸已应用于生产。美国的阿卢马克斯(Alumax)工程金属工艺公司采用电磁搅拌大量生产 $d50\sim 152$ mm铝合金棒料,年生产能力达1.6万t;法国Pechiney公司、美国Ormet公司、瑞士Alusuisse-Lonza公司和奥地利ASG公司均可批量供应半固态铝合金锭料^[17~20]。但由于感应电磁力从熔池边到中心呈衰减趋势,要获得大直径坯料较困难,使其应用受到限制。

2) 控制凝固法。利用控制金属液凝固速度,或加入某种添加剂抑制枝晶生成,形成细小非枝晶组织。其中东北大学开发的液相线凝固法^[6]和东南大学开发的添加剂法^[21]较为成功,正逐步向工业生产推广。

3) 固相法。这种方法比较多,主要有塑性变形及重结晶(即SIMA法)^[22]、粉末冶金(如喷射沉积等)和形变热处理等。

2.2 制备机制

半固态坯制备的主要核心是使其初晶球状化、细晶化。这和超塑性组织及其相似, 但超塑性要求晶粒度为 5~ 10 μm , 若大于 10 μm , 则难于实现超塑性。而半固态坯晶粒度范围要求很宽, 一般控制在 < 100 μm 即可。因此, 半固态坯制备与超塑性相比, 方法多、过程简单、容易实现。现在工业生产的挤压棒材, 具有晶粒细小、拉长的特点, 能否选择一种合理的热处理工艺, 使其晶粒细化; 或采用锻造方法, 使拉长晶粒破碎, 经重结晶获得球状的非枝晶组织, 作者认为有成功的可能。

2.3 制备方法的选择原则

制备方法应根据应用需要(包括批量)、简便、可靠和经济原则来选择。

所谓简便是指工艺流程短、容易操作、过程稳定。目前, 电磁搅拌制备方法为众人所接受, 但主要对小直径、A356(或 A357)材料更有效; 而 SIMA 法需要经过大的热挤压变形, 而后再施以小量的冷变形, 再经重结晶, 过程复杂, 适用于小制件; 控制凝固法十分简便, 适用于铝铜、铝镁等系列的高强铝合金。所谓可靠, 指质量稳定。特别指出的是经济性, 更是应用时首选指标。

3 半固态坯料重熔(二次)加热

金属及合金坯料的半固态重熔加热是一个重要过程, 它要求坯料的加热温控精度很高, 即使 1~ 2 K 的误差就可以显著影响坯料的组织和搬运性, 同时成形工艺还要求坯料的重熔加热要具有一定的速度。为了保证坯料的重熔加热精度和加热速度, 生产中大都采用连续式电磁感应加热工艺。电磁感应加热可以保证坯料的加热温控精度, 又可以满足每 30~ 40 s 加热一块坯料的要求; 但是, 电磁感应加热的能源效率很低, 为了克服这一缺点, 可以先将合金坯料送入传统加热炉内加热到一定温度, 再将坯料移入感应加热器中进行最后加热^[18]。

根据加热中坯料的放置形式, 电磁感应加热可分为水平式和垂直式。水平式电磁感应加热其坯料不容易坍塌, 又允许坯料有较高的液相分数和较长的长度, 同时又适用于加热凝固间隔很小的半固态合金坯料, 但设备昂贵, 占据空间大^[18]。垂直式电磁感应加热设备相对便宜一些, 占地空间小, 可以利用转动圆盘实现坯料的连续加热, 但坯料容易坍塌, 坯料的液相分数不能太高, 坯料高径比要小于 2.5^[20, 23]。

除了电磁感应加热方式外, 半固态金属及合金

坯料的重熔加热也可以采用电阻炉或盐浴炉, 加热温度控制精确, 坯料不易坍塌, 但加热时间较长, 显微组织容易粗大, 坯料表皮氧化加重^[23]。

为了实现精确加热金属坯料, 对加热中的坯料进行温度监控尤其重要, AEG 公司开发了能量测量法, Buhler 和 EFU 公司开发了感应圈涡电流法, 另外还可以采用尖针侵入法, 这些方法都可以实现坯料加热的温度监控, 从而使金属及合金的半固态成形过程更加稳定可靠^[18]。

4 半固态成形

4.1 半固态金属的流变成形

金属半固态成形工艺方法主要分为流变成形和触变成形。由于直接获得的半固态金属浆料的保存和输送很不方便, 因而制约了半固态成形技术的发展。目前实际应用的流变成形技术只有一种, 称为射铸(Injection Molding or Thixomolding)技术, 如图 1 所示。

射铸技术只应用于镁合金(ASTM Specifications-AZ91D)的流变压铸, 成形件为汽车、计算机和照相机零件毛坯。射铸成形中包含一个特殊的螺旋推进系统(Extruder), 并配有半固态镁合金加热源; 当小块状的镁合金(由传统的枝晶镁合金锭剪切而成)送入螺旋推进系统后, 镁合金一边被加热, 一边由左向右螺旋剪切推进, 随后被射入模具型腔成形。射铸件的强度、塑性与高压铸件的相当, 但射铸件的气孔率降低约 46%, 耐蚀性更强^[24, 25]。

既然有流变铸造, 也应该有流变锻造。它和液态模锻过程基本一样, 将制备好的半固态浆料, 直接注入模具内, 进行半固态锻造, 如图 2 所示。

虽然金属半固态流变成形技术应用较少, 但是流变成形与触变成形相比, 前者更节约能源、流程更短、设备更简单, 因此流变成形技术仍然是金属半固态成形技术的一个重要发展方向。日本学者最近开发了一种半固态流变成形新工艺^[26], 该工艺的半固态金属浆料是利用电磁搅拌直接在射室中制备, 然后将其挤入模具型腔成形, 生产的 Al-7% Si-0.3% Mg 半固态成形件的性能比液态挤压铸件高, 与半固态金属触变成形件的性能相当。

4.2 半固态金属的触变成形

由于半固态金属及合金坯料的加热、输送很方便, 并易于实现自动化操作, 因此半固态金属触变压铸(Thixodie casting)和触变锻造(Thixoforging)是当今金属半固态成形主要工艺。成形设备主要是

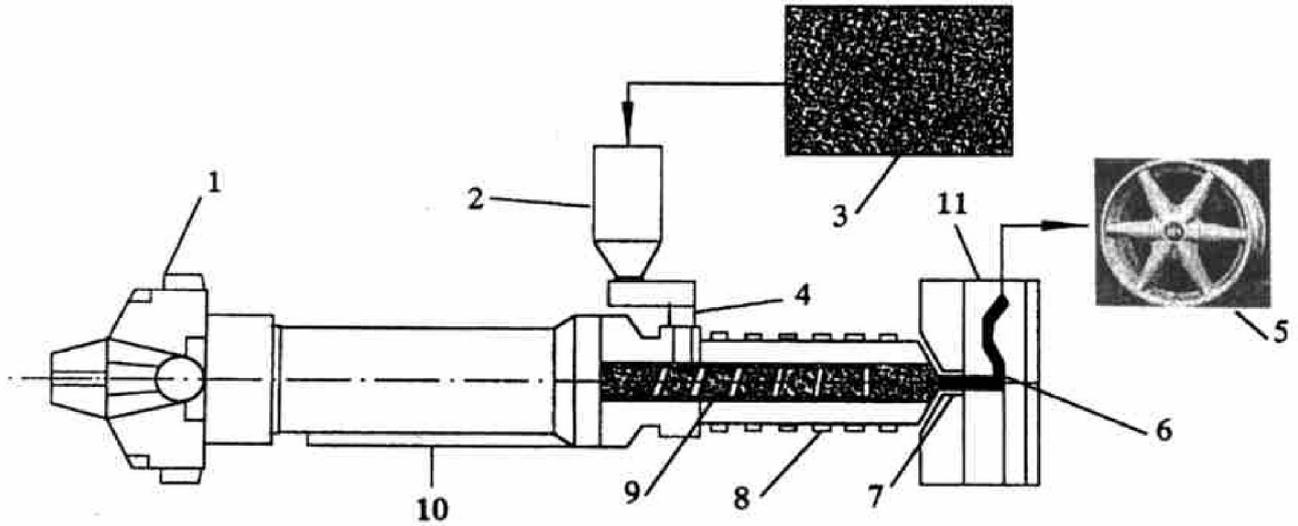


图1 射铸成形示意图^[24]

Fig. 1 Schematic diagram of injection molding

1—Rotary drive; 2—Feedstock; 3—Magnesium powder; 4—Providing powder exit; 5—Product;
6—Entrance; 7—Nozzle; 8—Heaters; 9—Reciprocating screw; 10—Shot system; 11—Die clamp

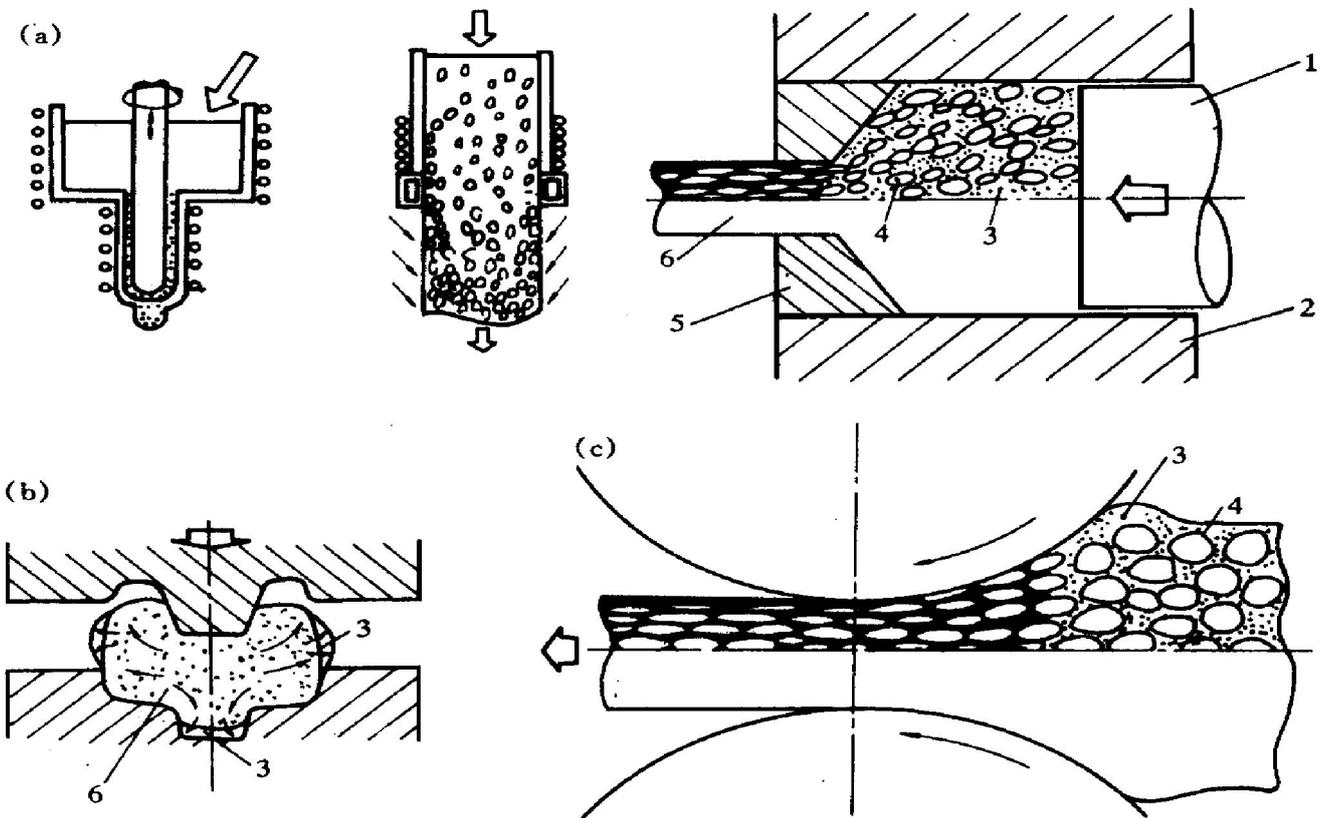


图2 流变锻造成形图

Fig. 2 Schematic diagram of rheoforging

(a)—Extrusion; (b)—Forging; (c)—Rolling

1—Punch; 2—Extrusion cylinder; 3—Liquid; 4—Solid; 5—Female die; 6—Product

压铸机和压力机，并配有机器人，用来搬运坯料和抓取毛坯^[17]。

半固态触变锻造分为半固态挤压、半固态模锻和半固态轧制，如图3所示。很显然，触变锻造有2

个过程，第1过程是半固态坯料在剪切力作用下粘度降低，以较小的能耗完成流动充填；第2个过程是密实过程。前者是成形的需要，后者则是产品质量的需要。触变锻造获得的产品性能较高。

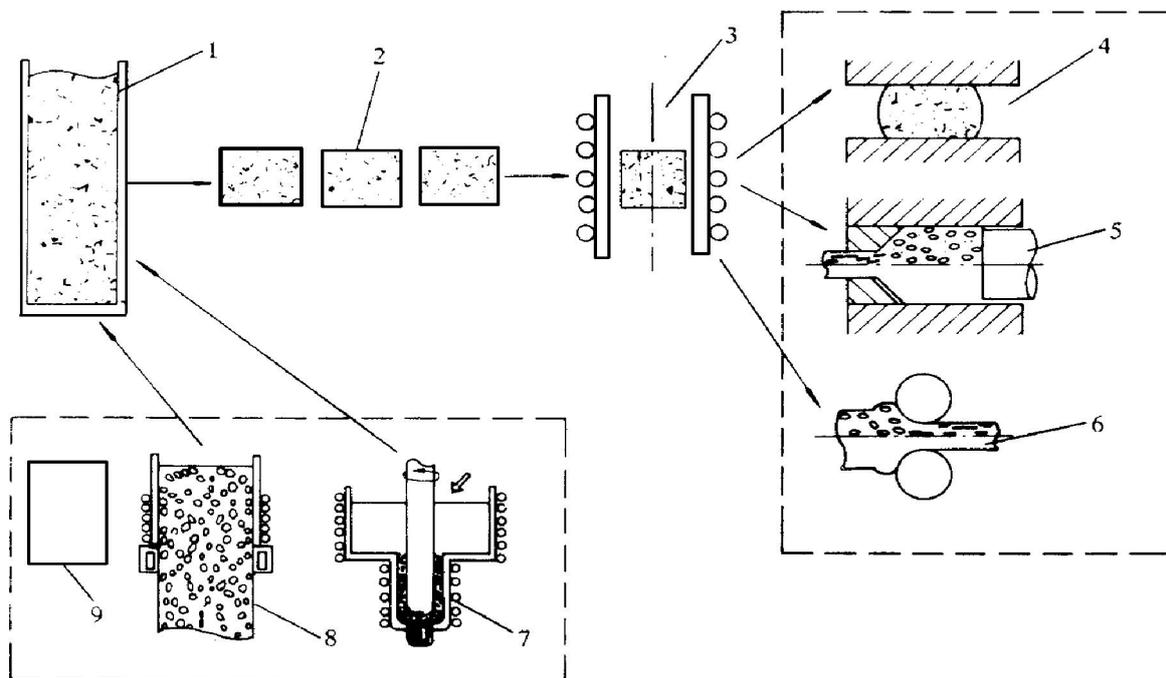


图 3 半固态触变成形

Fig. 3 Schematic diagram of semi-solid thixoforming

1—Solidification; 2—Billet; 3—Heating; 4—Forging; 5—Extrusion; 6—Rolling;
7—Mechanical stirring; 8—Electromagnetic stirring; 9—SIMA method

目前, 对触变锻造研究不多, 而对触变压铸研究较多, 主要集中在 A356 和 A357 合金上。表 1 列出了 2 种材料半固态压铸件与永久型铸件的力学性能比较。可见, 2 种铸件强度指标相当, 但半固态压铸件的塑性指标远远高于永久型铸件。

表 1 A356 和 A357 合金成形件的力学性能比较

Table 1 Comparison of mechanical properties of forming parts made of A356 or A357 alloys

Alloy	Process	Thermal treatment	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	HB
A356 (Al7Si0.3Mg)	SSM	A ₅ cast	110	220	14	60
	SSM	T6	240	320	12	105
	PM	T6	186	262	5	80
A357 (Al7Si0.6Mg)	SSM	A ₅ cast	115	220	7	75
	SSM	T6	260	330	9	115
	PM	T6	296	359	5	100

SSM—Semi-solid forming parts; PM—Permanent castings

5 研究和应用现状

半固态金属成形技术源于美国。目前, 美国的半固态金属成形技术处于全球领先地位。1994 年和 1996 年, 阿卢马克斯公司分别建成了 2 座半固态铝合金成形汽车零件生产厂。阿卢马克斯公司生产的半固态模锻铝合金汽车制动总泵体, 机加工量只占铸件质量的 13%, 同样的金属型铸件的加工量

则占铸件质量的 40%, 除此之外, 机加工后的半固态成形的汽车制动总泵体最终零件比机加工后金属型铸造零件轻 13% 左右。1997 年, 上述 2 个半固态铝合金成形工厂的年生产能力达到 5 000 万件。HMM 公司(Hot Metal Molding)为通用汽车公司生产汽车零件(A356 材料经 T6 热处理), 达到日产 5 000 件生产规模, 并计划将产量提高 4 倍。1995 年, Thixomat 公司的子公司 Lindberg 公司利用 Thixomolding 工艺, 为某些汽车公司生产了 50 余万件的半固态镁合金铸件, 使用了约 100 t 的原料。另外, EPCO Division, HPM Corporation, Italtipresse of America, Prince Machine Corporation 等公司已经能够生产半固态铝合金触变成形的专用设备, 并通过实时控制, 使整个压铸过程处于动态监控之中, 改善了压铸件性能, 降低了压铸件废品率, 且可使普通压铸机用于半固态金属成形, 扩大了普通压铸机的使用范围^[17, 19, 27~31]。

欧洲各国对金属半固态成形技术作了大量的研究和开发, 目前约有 40 家公司从事半固态金属及合金零件毛坯的生产, 这一趋势仍在增加。意大利的 Stampal SPA 公司利用半固态铝合金, 为 Alfa Romeo Spider Sports Car 公司生产的后悬挂架的左右支撑件毛坯重达 7 kg, 而且形状非常复杂^[18, 31]; 意大利的 MM 公司(Magneti Marelli)为汽车公司生产半固态金属成形的 Fuel Injection Rail 零件, 日产

2500件,并计划在2000年达到日产>7500件^[32]。德国的EFU等公司也正在积极研究此项技术^[33]。瑞士的Bubler公司已经生产出铝合金半固态触变成形的专用SC型压铸机(实时压射控制和单一压射缸)和铝合金半固态坯料的专用加热设备^[34]。

日本对金属半固态成形的研究和生产相对落后于欧美,但也从事了大量的研究和开发工作。最具代表性的研究机构是流变技术公司(RHEO-TECHNOLOGY LTD)。该公司是20世纪80年代后期由基础技术研究促进中心和钢铁、有色及重工业等17家民间公司出资组建的,开展了半固态金属成形的原材料制备、表观粘度和成形技术等基础研究^[23]。目前日本的一些公司已经转入半固态金属成形件的产品生产,如Speed Star Wheel公司1994年开始利用半固态金属成形技术生产铝合金轮毂(重约5kg);Takata公司利用Thixomolding技术生产镁合金照相机和MD壳;MG Precision公司利用Thixomolding技术生产镁合金微机机壳^[23, 35]。

6 半固态技术潜在应用前景分析

6.1 轻量化趋势

世界汽车工业正向着轻量、高速、安全、低成本和绿色方向发展^[36]。为此,汽车轻量化已成为发展的必然。增加塑料、铝合金和镁合金使用比例,以达到轻量化目的成为一种发展趋势。特别是象装甲车之类的军工产品,也在向轻量化目标迈进。为了实现这一目标,轻合金加工技术必须有较大进步,以满足在轻量化的前提下,保证产品的使用性能,即采用的加工工艺,不仅要成形容易,而且要保证材料性能充分发挥。半固态加工可以达到轻量

化要求。表2列出了采用半固态加工的铝合金汽车零件和铸铁零件的质量比较。

当前,用半固态加工技术生产的汽车零件包括刹车制动筒、转向系统零件、摇臂、发动机活塞、轮毂、传动系统零件、燃油系统零件和汽车空调零件等。这些零件已应用于Ford, Chrysler, Volvo, BMW, Fiat和Audi等欧美名牌轿车上。

图4是利用半固态加工方法成形的汽车空调器的主要零件—涡型轮。该零件工作在高速重载下,有时工作温度高达150℃。零件选用的材料为ALTHIX86S半固态铝合金,采用 $d76.2\text{ mm}$ (3 in)的坯锭压铸成形。图5是意大利Stampal公司生产的汽车转向节,此零件若采用铸铁制造,质量为3kg;而采用半固态加工的铝合金,质量仅为1.4kg,质量减轻114%。图6是该公司生产的汽车悬挂支架。

采用半固态金属加工工艺,虽然电磁搅拌生产铸锭提高了成本,并且还要增加专用设备加热铸坯,但是由于材料消耗大幅度降低,并且减少了机加工量,因而可以弥补铸锭成本的提高。而且,大批量生产铸锭,铸锭的成本不会提高很多。此外,半固态加工生产效率的提高也在一定程度上降低了单位成本。因此,半固态加工在经济性方面有相当强的市场竞争力。

6.2 军用产品商业化

军用产品中很多制件的生产,或沿用老工艺,多年未作改进,或一直采用简单落后工艺,例如兵器工业秦川机械厂的铜盂生产一直采用热挤工艺,不仅工艺繁琐,污染环境,而且工人劳动条件差、劳动强度大;航天工业总公司699厂的波导弯头,采用机械加工一直至今,国外使用精密铸造,

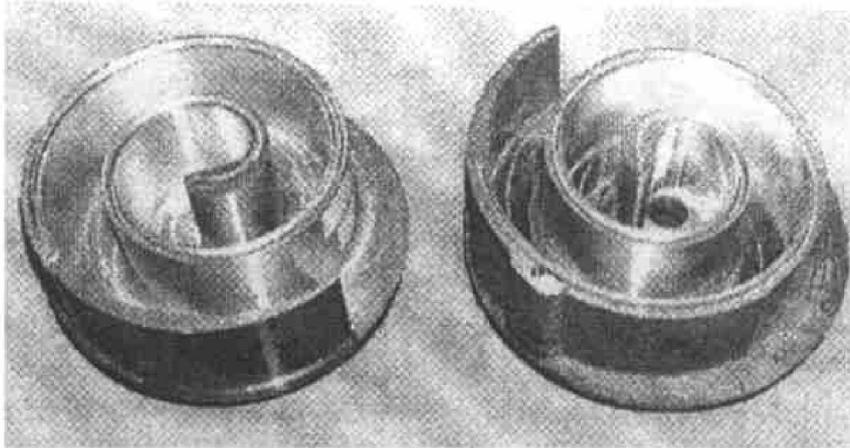


图4 半固态加工的汽车空调器零件—涡型轮

Fig. 4 Automobile air-condition part—volute wheel of semi-solid forming

表 2 已用于汽车前悬挂系统的半固态成形零件与原铸铁零件质量比较^[37]

Table 2 Mass comparison of semi-solid forming parts with previous cast iron parts used in automobile front suspending system

Parts	Mass of cast iron parts/kg	Mass of semi solid aluminum parts/kg	Mass reduction	
			/kg	/%
Upper control arm: front	0.737 10	0.255 15	0.481 95	65
Upper control arm: back	0.793 80	0.311 85	0.481 95	61
Cantilever	1.842 75	0.707 85	1.134 00	62
Driving control level	2.097 90	1.105 65	0.992 25	47
Sustentation	0.198 45	0.113 40	0.085 05	43
Suspending bracket	0.311 85	0.141 75	0.170 10	55
Absorber bracket	0.198 45	0.141 75	0.056 70	29
Driving control bracket	0.368 55	0.283 50	0.085 05	23
Knuckle	6.955 75	3.883 95	3.061 80	44

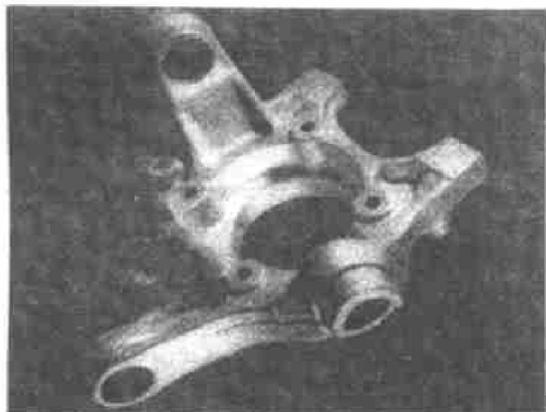


图 5 汽车转向节

Fig. 5 Knuckle of automobile



图 6 汽车悬挂支架

Fig. 6 Suspending bracket of automobile

国内也作过研究,但未成功。另外航空工业总公司新征机械厂生产的镁合金机轮,采用大吨位模锻生产,虽也做过液态模锻研究,但也未成功。而采用半固态成形,可使成形变得容易,成本也大幅度降

低。尤其对于复杂形状、力学性能要求高的制品,半固态成形应是首选工艺。

军用产品过去为适应战争的需要,提出“质量第一”,保证使用性能,并未考虑经济效益。而当今,在军用产品商品化,或军转民,军民结合的新形势下,经济效益被提到日程上。因此产品的制造技术受到特别关注。半固态成形技术虽然获得国家“八六三”项目支持,但必须扩展,向各行各业应用转移,使其在制造业发展中占有一席之地。

6.3 发展中一些问题

为了提高我国汽车、电子仪器等在国际市场上的竞争能力,应该推动半固态金属成形技术的应用。为此,参考国外经验,应注意解决以下几个问题。

1) 加强金属半固态成形的技术基础和开发研究。金属半固态成形在工业国家发展到今天的水平,完全依赖于他们的技术创新和研究成果开发。这些研究和开发既得到了政府基金的支持,更得到了企业的大力支持,所以我国政府基金应该进一步加大金属半固态成形的技术基础和开发研究的投入力度,有识企业也应该早日加入这一行列,成为金属半固态成形技术开发和应用的主力军。

2) 在半固态金属成形技术应用中,价格始终是一个最重要的影响因素,其中半固态金属坯料的价格对应用影响最大,因此我国更应该重视这一问题,开发具有自己知识产权的半固态金属坯料制备技术,降低坯料的生产成本。为了进一步降低半固态金属成形件的生产成本,应该提高生产效率,尽可能进行近净成形,降低机械加工量。

3) 扩大金属半固态成形应用的范围,不能仅看到汽车行业,电子行业也是一个潜在的大市场,如为了提高刚性和电磁屏蔽性,半固态镁合金触变成形电子仪器外壳等配件将在 21 世纪流行起来^[25]。只有扩大了应用市场份额,半固态金属成形件的价格才会下降。但扩大市场不能一哄而起,半固态金属应该成形重要零件,不能成形一般工艺就能制作的零件。

4) 在半固态金属成形技术应用中,还应该开发更多种类的适合半固态成形的合金,如新型合金 C355(AlSi6CuMg) 可以通过 T5 处理,降低热处理成本,该合金经 T5 处理后的力学性能等于或超过了经 T6 处理的 A356 合金的性能;新型 A390(AlSi17Cu4Mg) 合金可以制作耐磨汽车制动总泵壳、螺旋压缩机件等零件^[20]。

7 结束语

近十年来,半固态加工技术在欧美国家及日本发展很快,潜在市场很大。关于合金及复合材料的半固态加工国际学术会议每2年举办一次,迄今为止已举办了5届,分别在法国、美国、日本、英国和美国举行。第六届半固态加工的国际学术会议于2000年9月27~29日在意大利都灵召开。半固态加工技术的研究和发展在世界范围内受到越来越多的重视。

需要说明的是,半固态加工技术的发展将远远超出目前工业应用所局限的范围。尽管半固态金属加工在经济和技术方面还有一定的局限性,但随着汽车、通讯、航空航天等行业的蓬勃发展,半固态金属加工技术在21世纪将具有越来越重要的地位。

[REFERENCES]

- [1] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metall Trans, 1991, 22B(6): 269- 293.
- [2] Kirkwood D H. Semisolid metal processing [J]. Inter Mater Reviews, 1994, 39(5): 173- 189.
- [3] Jabrane S, Clement B and Ajersch F. Evolution of primary particle morphology during rheoprocessing of Al-5.2% Si alloy [A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. USA, Massachusetts, 1992. 223- 236.
- [4] Flemings M C. (GUAN Yur-long tr.). Solidification Process(凝固过程) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981.
- [5] Gabathuler J P, Barras D, Krahenbuhl Y, et al. Evaluation of various processes for the production of billets with thixotropic properties [A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. USA, Massachusetts, 1992. 33- 46.
- [6] LIU Dan(刘丹). 铝合金液相线铸造制浆及半固态加工工艺及理论研究 [D]. Shenyang: Northeastern University, 1999.
- [7] Nickodemus G H, Wang C M, Tims M L, et al. Rheology of materials for semisolid metalworking applications [A]. Proc of the 5th Int Conf on Semisolid Processing of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998. 29- 34.
- [8] Quak C J and Kool W H. Properties of semisolid aluminum matrix composites [J]. Mater Sci Eng, 1994, 183A: 247- 252.
- [9] Hsuan Peng and Kuo K Wang. Steady-state and transient rheological behavior of a semisolid tin-lead alloy in simple shear flow [A]. Proc of the 4th Int Conf on SSP of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 1- 9.
- [10] Kapranos P, Kirkwood D H, Barkhudarov M R, et al. Modeling of structural breakdown during rapid compression of Semisolid alloy slugs [A]. Proc of the 5th Int Conf on semisolid Processing of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998. 11- 20.
- [11] LUO Shourjing(罗守靖) and TIAN Weirong(田文彤). 半固态金属塑性加工力学的研究进展 [J]. J of Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报), 2000, 5.
- [12] Tzimas F and Zavaliangos A. Mechanical behavior of alloys with equiaxed microstructure in the semisolid state at high solid content [J]. Acta Mater, 1999, 47(2): 517- 528.
- [13] Kumar P and Martin C L. Constitutive modeling and characterization of the flow behavior of semisolid metal alloy slurries —1 [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(11): 3595- 3602.
- [14] Nguyen T G. Theoretical and experimental study of the isothermal mechanical behavior of alloys in the semisolid state [J]. Int J Plast, 1994, 10: 693- 699.
- [15] SUN Jiaruan(孙家宽). SiC_p/2024 复合材料半固态变形力学行为及机制 [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.
- [16] Kirkwood D H. The numerical modeling of heating, melting and slurry flow for semisolid processing of alloys [A]. Proc of the 5th Int Conf on SSP of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998. 33- 40.
- [17] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metall Trans, 1991, 22A(5): 957- 981.
- [18] Sahm P R. SSM in Europe [A]. Proc of the 5th Conf On SSP of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998. 41- 49.
- [19] Midson S P. The commercial status of semisolid casting in the USA [A]. The 4th Int Conf on SSP of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 251- 255.
- [20] Garat M, Blais S, Pluchon C, et al. Aluminium semisolid processing: from the billet to the finished part [A]. Proc of the 5th Int Conf on SSP of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998.
- [21] ZHU Mingfang(朱鸣芳) and SU Huaqin(苏华钦). 半固态金属成形技术工业应用现状与展望 [J]. China Mechanical Engineering(中国机械工程), 1995, 6(4): 24- 26.
- [22] Young K P, Kyonka C P and Courtois J A. Fine Grained Metal Composition [P]. US Patent, 4415374, 1983.

- [23] Eisen P. Introduction of SSM cast safety critical components for automotive applications [A]. Proc of the 5th Int on SSP of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998. 9– 16.
- [24] Frederick P S, Bradley N L and Erickson S C. Injection molding magnesium alloys [J]. Advanced Mater & Process, 1988, 134(4): 53– 58.
- [25] Shibata R. SSM activities in Japan [A]. Proc of the 5th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Compositions [C]. Colorado, 1998. 51– 56.
- [26] Shibata R, Kaneuchi T, Soda T, et al. New semi-liquid metal casting process [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 296– 300.
- [27] Curt Kyonka. Status of semi solid metalworking at alumax [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 256 – 259.
- [28] Decker R F, Carnahan R D, Ralph Vining, et al. Progress in Thixomolding [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 221– 224.
- [29] Asquith B M. The use of process monitoring to minimize scrap in the die casting process [A]. The 19th International die casting congress and exposition [C]. UAS, Minnesota, 1997. T97– 063.
- [30] Venkatasamy V, Brevick J, Mobley C, et al. Die cavity sensors for monitoring die casting process [A]. The 19th International die casting congress and exposition [C]. UAS, Minnesota, 1997. T97– 061.
- [31] Clauser G L, Ravaioli A, Ciselli F, et al. Advancing the Frontier of Aluminium Technology: The Multilink Project [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 234 – 238.
- [32] Moschini R. Mass production of fuel rails by pressure die casting in the semi-liquid state [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 248– 250.
- [33] Witulski T, Winkelmann A and Hirt G. Thixoforming of aluminium components for lightweight structures [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 242 – 247.
- [34] Young K P. Recent advances in semi-solid metal(SSM) cast aluminium and magnesium components [A]. The 4th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions [C]. England, 1996. 229– 233.
- [35] Gangye Ren. Research and development of semi-solidification process [J]. Steel Iron Field(钢铁界), (in Japanese), 1994, 44(12): 44– 50.
- [36] ZHAO Hong(赵 鸿). 铝在汽车上的应用 [J]. Process and Material of Automobile(汽车工艺与材料), 1997(1): 19.
- [37] XIE Shu-sheng(谢水生) and HUANG Sheng-hong(黄声宏). Technology and Application of Semi-solid Forming(半固态金属加工技术及其应用) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 135.

Technology and applications of semi-solid forming

LUO Shou-jing¹, TIAN Wen-tong¹, XIE Shu-sheng², MAO Wei-min³

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, P. R. China;

2. Processing Centre, Beijing General Research Institute of Nonferrous Metal,

Beijing 100088, P. R. China;

3. Casting Research Institute, University of Science and Technology Beijing,

Beijing 100083, P. R. China)

[Abstract] Semi-solid metal forming as a new near-net shape technology in 21 century generally attracts people's attention. In order to promote its application in our country, the technology is analyzed and discussed from theoretical research, billet making, reheating, forming process, the newest development and trend of overseas application. Potential application prospect is pointed out about semi-solid forming technology in automobile, electron and army industry. It is also clarified which countermeasure should be taken.

[Key words] semi-solid forming; near-net shape; research and application

(编辑 杨 兵)