

半固态挤压形成高铬铸铁梯度组织材料*

杨 昭 张海峰 王爱民 丁炳哲 胡壮麒
(中国科学院金属研究所沈阳材料科学(联合)国家实验室, 沈阳 110016)

摘 要 通过挤压具有等轴状初晶组织的半固态高铬铸铁, 样品的液相在应力作用下被挤向表面, 凝固后形成了共晶组织沿径向由内向外呈现出体积分数逐步增加的梯度组织, 实验表明挤压温度对挤压后共晶组织分布有明显的影响. 经过挤压提高了样品中心冲击韧性和表面耐磨性.

关键词 半固态金属挤压, 高铬铸铁, 梯度材料

中图法分类号 TG143.9, TG113.25 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2003)02-0164-04

FORMATION OF THE HIGH CHROMIUM WHITE IRON PARTS WITH GRADIENT STRUCTURE VIA SEMI-SOLID METAL EXTRUSION

YANG Zhao, ZHANG Haifeng, WANG Aimin, DING Bingzhe, HU Zhuangqi

Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: ZHANG Haifeng, professor, Tel: (024)23971783, E-mail: hfzhang@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59995440)

Manuscript received 2002-03-18, in revised form 2002-06-04

ABSTRACT The high chromium white iron with equiaxed primary structure was extruded at semisolid state. The liquid phase was squeezed out by pressure. After solidification, the volume percentage of the eutectic structure increases gradually from the center to the perimeter. Test shows that the extrusion temperatures have great effect on the structure of the extruded sample. The compact toughness at the center of the sample and the wear resistance at the perimeter of the sample are improved.

KEY WORDS semi-solid metal extrusion, high chromium white iron, gradient structure

由于高铬铸铁耐磨性能好, 冲击韧性相对较高, 因此被广泛用于制造冷轧辊喷丸机的喷丸叶片^[1,2]. 喷丸机在喷丸时喷丸叶片根部承受了较大的冲击和弯曲应力, 而叶片尖部则承受高速运动铁丸的剪切磨损. 因此叶片常因尖部磨穿而影响喷丸效率, 叶片的长度也受到冲击韧性的限制. 若能研制成一种叶片尖端耐磨性好, 叶片根部冲击韧性高的复合结构高铬铸铁材料将有效提高喷丸机的使用寿命和使用效果. 诸如此类情况, 由于部位受力类型不同而导致失效形式不同的零件还很多. 因此研究具有复合结构的高铬铸铁对高磨损高冲击的产业有重大意义.

半固态铸造技术已被广泛用于生产铝基、镁基合金产品^[3,4]. 但目前还很少用于生产高温铁基合金产品. 文献

[5—9] 报道了半固态合金在压力作用下液态相的重新分布情况. 相关实验表明, 在一定的条件下合金可形成由芯部到表面共晶组织由少到多呈梯度分布的情况. 若利用这一特点加工出叶片尖部共晶成分多, 耐磨性好, 叶片根部共晶相少, 冲击韧性高的喷丸机喷丸叶片将能有效地提高喷丸机的喷丸速度和使用寿命. 同时, 喷丸叶片与定向套是机械连接, 因此叶片的尺寸精度要求高, 普通铸造的叶片需后续处理. 半固态铸造具有铸造精度高, 缺陷少, 可以一次加工成型; 铸造温度低, 模具寿命长等特点^[3,4]. 因此有望在不提高生产成本的前提下制造具有复合结构的高铬铸铁零件. 本文研究了半固态高铬铸铁在不同条件下挤压时液态组织再分配, 以及经过组织改良的高铬铸铁的各种相关力学性能.

1 实验方法

实验采用一种亚共晶高铬铸铁, 名义成分(质量分数, %)为: C 1.9, Cr 15.5, Si 1.12, Ni 2.65, Mo

* 国家自然科学基金资助项目 59995440

收到初稿日期: 2002-03-18, 收到修改稿日期: 2002-06-04

作者简介: 杨 昭, 男, 1974 年生, 博士

0.33, Fe 余量^[10]. 合金的固相线温度和液相线温度分别为 1205 和 1295 ℃. 350 g 高铬铸铁装在一个直径 40 mm 的氧化铝坩埚中. 合金在过热到 1320 ℃后以 0.1 ℃/s 的冷速控温搅拌冷却. 半固态合金由一台三相四极电磁搅拌器搅拌. 搅拌磁场强度为 0.08 T.

热挤压实验是在一台高温挤压机上进行. 挤压机由电阻加热. 升温速率和降温速率分别为 10 和 20 ℃/min. 为了实验方便, 采用圆柱形样品, 直径为 38 mm, 高 40 mm. 模具由一个直径 65 mm 的石墨圆形桶, 上下由两个同直径的石墨压块组成. 油压机提供压力.

压制后样品沿轴切开, 通过初磨, 精磨, 抛光后腐蚀, 径向的组织特征及共晶组织体积分数由金相分析定出. 考虑到样品的组织不均匀性, 本文中冲击韧性实验采用的是 10 mm×10 mm×55 mm V 形缺口冲击试样. 由于磨损实验机难以正确表征材料耐磨性沿径向的变化, 测量了试样沿径向的洛氏硬度值的变化情况来反映耐磨性的变化.

2 实验结果

2.1 组织

图 1a, b 分别为普通铁模铸造组织与半固态锭坯原始组织. 普通铁模铸造组织为树枝晶组织 (图 1a), 而半固态铸造组织为等轴状颗粒组织 (图 1b). 通过改变挤压温度, 液体在挤压后形成了不同的组织. 区别最大之处在于液体在沿径向位置上不同的含量. 图 2 为 1220 ℃ (图 2a, b, c), 1240 ℃ (图 2d, e, f) 和 1250 ℃ (图 2g, h, i) 时挤压形成的梯度组织由中心 (图 2a, d, g) 到过渡区 (图 2b, e, h) 再到表面 (图 2c, f, i) 组织形貌的变化. 图 3 为在各种挤压条件下共晶组织在径向上体积分数的分布状况. 从图 3 看出, 当挤压温度为 1220 ℃度时, 液体体积分数由中心向表面逐渐增加. 当温度升高到 1240 ℃时, 试样的中心有很大一个区域已经完全是奥氏体组织. 组织由奥氏体过渡到共晶组织的区域非常短, 在共晶组织中游离着许多奥氏体颗粒. 当温度增加到 1250 ℃时, 液体的变化又趋向缓和. 但由奥氏体富集的中心到共晶组织富集的表面仍然存在一个非常短的突变过渡带. 挤压速率在 0.01—0.001 s⁻¹ 范围内改变挤压速率对液体分布的影响不大. 在 1220 ℃挤压的样品的组织与其他的组织有所不同. 一是奥氏体组织发生分解, 初晶组织都分解成了珠光体组织. 二是 Cr₇C₃ 的形貌发生了改变, Cr₇C₃ 颗粒变粗, 沿珠光体晶粒之间的晶界分布.

2.2 冲击韧性

实验表明, 采用夏比冲击实验的重复性较好, 数据较集中. 表 1 列出了各种挤压条件下获得的样品心部的冲击韧性值与铁模浇注的铸态组织冲击韧性的比较, 实验表明, 经过挤压的试样心部的冲击韧性值有明显的提高. 铁模铸造组织的冲击韧性为 2.5 J/cm², 而经挤压后的样品心部组织均超过 3.7 J/cm², 有 50% 的提高, 表明组织改变对冲击韧性有较好的改善作用.

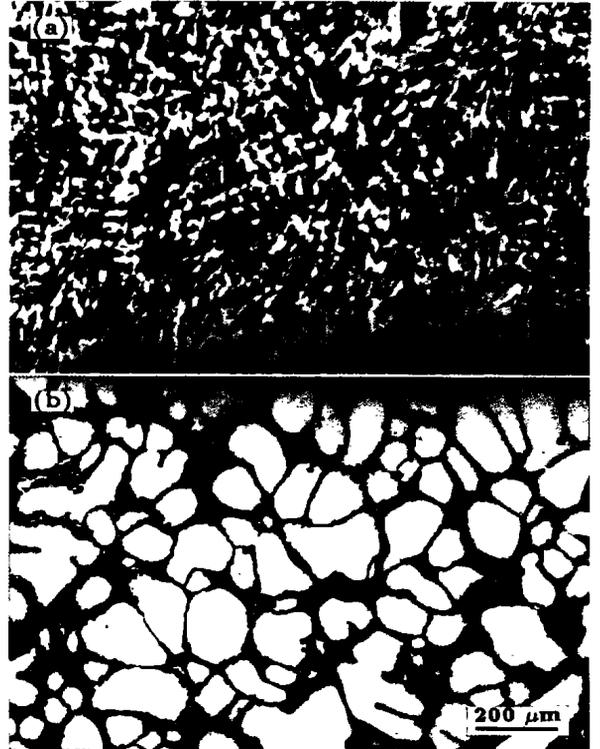


图 1 铁模铸造和电磁搅拌铸造的原始组织

Fig.1 The microstructure of the metal die casting (a) and the original microstructure of the magneto hydrodynamic stirring casting (b)

2.3 硬度与耐磨性

由于梯度材料的组织不均匀, 难以用合理的实验来表征材料在径向上的耐磨性改变, 因此采用与耐磨性相关的洛氏硬度值 (HRC) 反映试样在梯度方向上的耐磨性的变化. 从图 4 中可以看出试样从中心到表面硬度逐渐增大, 其中最小值约为 20, 而在表面附近洛氏硬度值达到了 40 左右. 平均硬度约为 36, 较铁模铸造的铸态值稍低.

3 讨论

3.1 梯度组织的形成

如图 2, 3 所示, 在挤压后, 液体的分布状况随温度升高并不是简单地变化. 在 1220 ℃时液体从中心到表面较缓和地增加, 没有明显的突变区. 而温度上升到 1240 ℃时, 试样中心有很大一个区域都为奥氏体组织. 由奥氏体向共晶组织过渡的区域很小, 仅为 2—3 mm. 而当温度进一步增大到 1250 ℃时, 试样中心仍然是一个奥氏体区域, 但在这个区域中分布着少量的共晶组织.

作者认为奥氏体初晶在二次加热和挤压过程中的形貌是导致这一结果的主要原因. 当温度较低时, 仅共晶组织发生融化, 奥氏体的形状没有改变, 依然是等轴状树枝晶. 奥氏体初晶之间相互接触, 在挤压时试样变形时通过晶粒变形来完成的. 晶粒之间的相对滑动较少. 因此晶粒之间还存在较大空隙, 有相当一部分枝晶间的液体在挤压

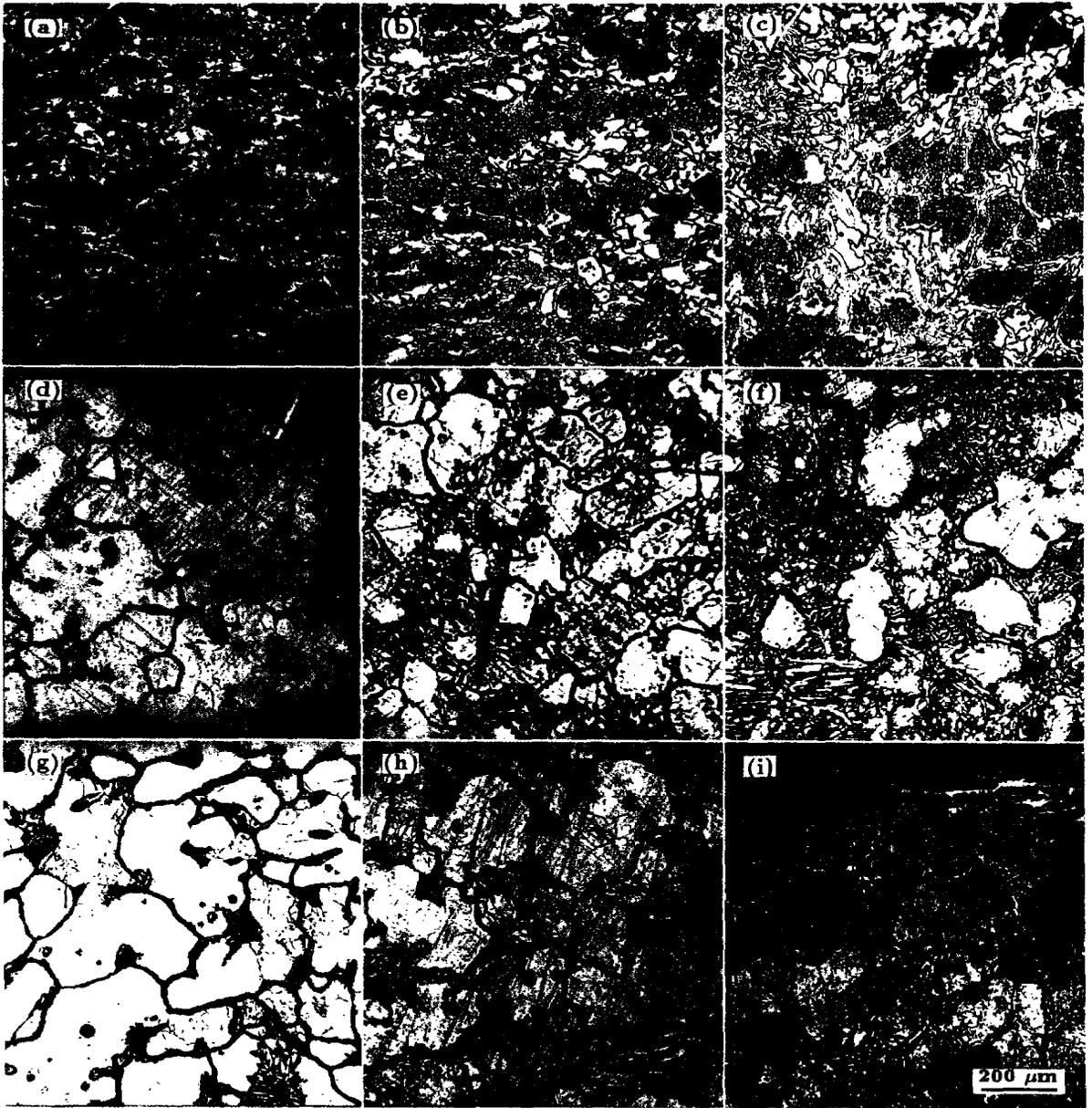


图2 在不同温度下挤压的样品不同部位的金相组织

Fig.2 Microstructures of different parts, the samples extruded at 1220 °C (a, b, c), 1240 °C (d, e, f) and 1250 °C (g, h, i) (a, d, g) center part (b, e, h) transition part (c, f, i) edge part

过程中留在了试样中心. 在后来的凝固过程中由于冷速较慢碳化物变粗大. 这种较大的共晶组织的形成机理应与离异共晶的形成机理有些类似. 当温度升高时, 奥氏体初晶发生部分融化. 变形是通过晶粒相互之间滑动来实现的. 挤压以后, 虽然有部分残余液体留在试样心部, 但由于其量很少, 并且残余液体成分已经偏离共晶成分. 因此凝固以后共晶组织很少. 同时由于奥氏体初晶之间的相互联系还很强, 在挤压过程中奥氏体初晶仍集中在中心, 液体则被挤到表面, 形成共晶组织区域. 奥氏体区域和共晶组织的过渡区很短. 当温度进一步增大时, 奥氏体初晶组织熟化, 变圆. 初晶之间的相互联系变小, 液体体积分数增加.

变形是由固体和液体协同完成的. 因此留在试样心形部的液体较多. 当凝固时, 虽有部分液体变为奥氏体组织, 但仍有部分共晶组织留下来.

实验表明液体在半固态组织中流动的驱动力是样品中各部位存在静水压差导致的^[8,9]. 由于实验条件限制, 实验中采用的是圆柱形样品. 若要获得叶片状零件, 则只需控制锭坯的受力状况, 使样品在挤压过程中耐冲击部分所受静水压大, 液体在静水压作用下流向静水压小的部分从而形成梯度材料, 如反挤压、模锻等.

3.2 力学性能

如表 1 所示, 虽然半固态处理的试样是在实验室较粗

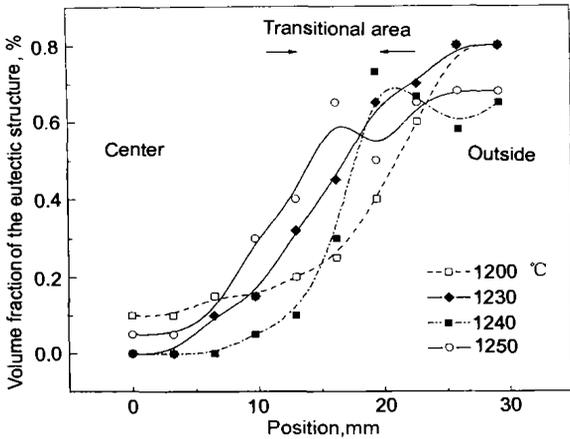


图 3 不同温度下以 0.01 s^{-1} 速率挤压获得的共晶组织体积分数沿径向的变化情况

Fig.3 The variation of the percentage of the eutectic structure along the radial direction of the sample deformed at 0.01 s^{-1} at different temperatures

表 1 各种条件下获得的样品的冲击韧性

Table 1 Impact toughness α_k of the sample obtained under different conditions

Condition	(J/cm ²)	
	Sample No.1	Sample No.2
Metal model die-casting	2.5	2.5
0.01 s^{-1} , 1220 °C	3.5	3.6
0.01 s^{-1} , 1230 °C	3.7	3.7
0.001 s^{-1} , 1240 °C	3.6	3.5
0.01 s^{-1} , 1240 °C	4.4	3.7
0.01 s^{-1} , 1250 °C	3.8	3.3

糙的环境下获得的，但梯度组织比铁模铸造的铸造组织各部分的力学性能均有了较好的改善。因此可以认为半固态挤压对合金的性能改变起到了很好的作用。从冲击韧性上讲，马永庆等的实验显示 ZTG15 的 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 无缺口冲击韧性值为 6.6 J/cm^2 ，如果有缺口的冲击韧性值能与无缺口冲击韧性值呈对应的比例关系，这意味着经处理后的试样的无缺口冲击韧性值可达到 10 J/cm^2 ，这对于工程应用来说是有价值的。同时由于实验条件的限制，在铸造过程中晶粒较粗，试样二次加热，冷却都很慢，奥氏体晶粒和碳化物进一步变粗，使力学性能都有所降低，若能改善加工条件，细化组织，冲击韧性可以得到更加可观的改善。

抛丸机抛丸时，磨损量与铁丸运动速度的呈正比。叶片根部的耐磨性要求不高，而叶片尖端耐磨性要求很高。从图 4 中看，试样外部共晶组织的平均洛氏硬度为 41 左右。硬度值和耐磨性较铁模铸造的原始组织的 36 有明显的提高。而中心部位的硬度值和耐磨性则降低为 24。这说明通过改变组织能够较好地提高抛丸机叶片的性能。若结合热处理，试样耐磨性可以进一步提高。

4 结论

(1) 通过对半固态高铬铸铁进行挤压，获得了共晶组织沿径向方向上呈梯度分布的具有复合性质的高铬铸铁材料。

(2) 温度对改变共晶组织的分布有很重要的影响。

(3) 具有复合组织的高铬铸铁具有中心冲击韧性高，从中心到表面耐磨性逐步提高的特点。通过改进模具，可以制备出尖端耐磨，根部耐冲击的具有复合结构的抛丸机叶片。

参考文献

- [1] Tabrett C P, Sare I R, Ghomashchi M R. *Int Mater Rev*, 1996; 41; 59
- [2] Chen J J, Yu Z S, Xu G K, Qing S S, Huang X J, He T Z. *Alloy High Chromium White Irons and Their Applications*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1999: 230 (陈瑾瑜, 于自生, 许光奎, 卿上胜, 黄兴建, 贺同正. 合金高铬铸铁及其应用, 北京: 冶金工业出版社, 1999: 230)
- [3] Flemings M C. *Metall Trans*, 1991; 22A: 957
- [4] Kirkwood D H. *Int Mater Rev*, 1994; 39: 173
- [5] Charreyron P O, Flemings M C. *Metall Trans*, 1984; 15B: 173
- [6] Kang C G, Jung H K. *Metall Mater Trans*, 2001; 32B: 119
- [7] Kang C G, Jung H K. *Metall Mater Trans*, 2001; 32B: 129
- [8] Lalli L A. *Metall Trans*, 1985; 16A: 1393
- [9] Basner T, Pehlke R, Sachdev A. *Metall Mater Trans*, 2000; 31A: 57
- [10] Ma Y Q, Yu Z W, Zhang Z P, Xu X L, Shi Y Q. *Cast*, 1997; 5: 16 (马永庆, 于志伟, 张占平, 许晓磊, 史雅琴. 铸造, 1997; 5: 16)

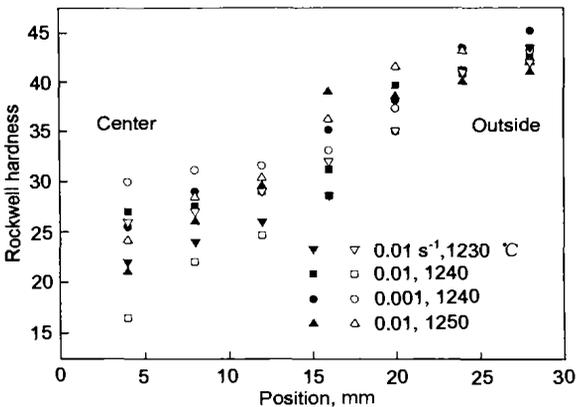


图 4 各种条件下挤压获得的样品沿径向的洛氏硬度值的变化情况

Fig.4 The Rockwell hardness distribution along the radial direction of the sample obtained at different extruded conditions