

不同底材对亚微米亚共晶白口铸铁组织和力学性能的影响

Effect of Different Substrates on Microstructures and Mechanical Properties of Submicron Hypoeutectic White Cast Iron

喇培清, 李正宁, 胡苏磊, 李翠玲, 魏玉鹏, 卢学峰, 魏福安
(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 兰州 730050)
LA Pei-qing, LI Zheng-ning, HU Su-lei, LI Cui-ling,
WEI Yu-peng, LU Xue-feng, WEI Fu-an
(State Key Laboratory of New Nonferrous Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要: 通过铝热反应法分别在铜底材和玻璃底材上制备了亚微米亚共晶铸铁。利用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪及电子探针对于亚共晶铸铁的组织及成分进行了研究。测试了亚共晶铸铁的硬度、压缩性能和拉伸性能。结果表明:该方法制备的亚共晶铸铁是由渗碳体以及珠光体组成,铜底材和玻璃底材亚共晶铸铁的平均珠光体层间距分别为 220nm 和 165nm。铜底材和玻璃底材亚共晶白口铁的维氏硬度分别为 564HV 和 552HV,抗压强度分别为 2429MPa 和 2224MPa,抗拉强度分别为 391MPa 和 383MPa,伸长率分别为 2% 和 3%。

关键词: 亚微米晶;亚共晶铸铁;不同底材;力学性能;组织;铝热反应

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.10.007

中图分类号: TG143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)10-0034-06

Abstract: A white cast iron with submicron microstructure was prepared by an aluminothermic reaction casting on copper substrate and glass substrate. Microstructures and composition of the cast iron were investigated by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), and electron probe micro-analyzer (EPMA). The hardness, compressive properties and tensile properties of the cast iron were also tested. The results show that the cast iron consists of pearlite and cementite phases. The average lamellar spacing of the pearlite phase on copper substrate and glass substrate is 220nm and 165nm respectively. Hardness of the cast iron is 564HV and 552HV, compressive strength is 2429MPa and 2224MPa, tensile strength is 391MPa and 383MPa, total elongation is 2% and 3% respectively.

Key words: submicron; hypoeutectic cast iron; different substrate; mechanical property; microstructure; aluminothermic reaction

铸铁是一种常用的工程材料,其在工业上的应用至今已有 100 多年的历史。其中白口铸铁因为具有很好的耐磨性成为一种非常重要的耐磨材料^[1,2]。当普通白口铸铁中不加入其他合金元素时,其显微组织是由片状渗碳体和珠光体所组成。由于渗碳体的硬度相当高,使得白口铸铁具有很高的硬度,铸件的硬度一般可在 500HV 以上。具有一定的耐磨性,价格低廉,是一种传统的抗磨、耐磨材料。但其显微组织中渗碳体呈网状分布,导致铸件的脆性大,容易断裂,并且基体

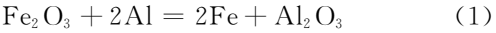
硬度不高,不能在承受冲击载荷的地方使用,使其适用范围受到限制^[3-6]。因此,一些提高此类材料强度的同时提高其室温塑性的研究显得极为重要,在铸铁中加入高价合金元素是一种常用的方法,但由于这些合金元素本身价格昂贵,使其大规模工业化生产和应用受到了极大的限制。

晶粒细化是发展低成本、高性能和高耐磨性无高价合金元素添加的白口铸铁一条切实可行的路线。晶粒细化可使白口铸铁材料的本征脆性得到改善。所制

备的亚微米晶白口铸铁具有较高强度的同时,其延展性也明显改善^[7-15]。本研究通过铝热反应法制备了含碳量为 3.5%(质量分数,下同)的亚微米晶亚共晶铸铁材料,研究了不同底材对铝热法制备的亚共晶铸铁组织和力学性能的影响。

1 实验

用于制备白口铸铁的原料,为粉末状,其组分为纯度大于 99%的 Fe₂O₃,Al,石墨粉,Si,余量为 Fe。Fe₂O₃ 粉与 Al 粉按反应式(1)进行称量后,加入占生成纯铁总量 40%的铁粉,在反应物料为 220g 的条件下制备硅含量为 2%,含碳量为 3.5%的亚共晶白口铸铁。反应物料在行星式球磨机中球磨混合 8h,所用磨球为 Al₂O₃ 球,球料比为 1:2,球磨速率为 150r/min,反应物料成型压力 40MPa,铜底材厚度为 13mm,玻璃底材厚度为 10mm,引燃温度 270℃左右。铜模具、铜底材及玻璃底材使用前均用酒精清洗。将压实后的反应物料置于铜底材或玻璃底材之上,薄片状的引燃剂放置于反应物料上部以引发反应,将放置有反应物料的铜模具放入反应容器中进行反应。



室温下用氩气吹扫反应容器以排除其中的空气,当容器温度升至 200℃时再次排气,然后通入 5MPa 的氩气继续升高容器温度,当容器内温度达到 270℃左右时,引燃剂燃烧并释放出大量的热,从而引发反应物料间的反应。反应的燃烧波将从反应物料顶端迅速蔓延至其底部,在燃烧波通过的区域反应物将转变成产物,产物在反应自身释放的热量作用下被熔化,处于过热状态。反应在几秒内完成,生成的产物在氩气保护下随炉冷却至室温。室温下将产物取出,所得亚共晶铸铁表面有一层灰色 Al₂O₃,可手工除去。按照上述方法分别在铜底材和玻璃底材上制备了亚共晶白口铸铁样品。

用 TAS-990F 原子吸收光谱仪,MeF3 金相显微镜,EPMA-1600 型电子探针,D8X 射线衍射仪以及 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜分析了不同碳含量白口铸铁样品的成分分析、相组成、组织形貌。在 HBRVU-187.5 型布洛维光学硬度计上测定硬度。压缩和拉伸试样用电火花切割机加工而成,压缩试样为 φ5mm×5mm 的圆柱,拉伸试样尺寸如图 1 所示,厚度为 2mm,在室温下进行压缩和拉伸实验。实验在 AT10t 试验机上进行,采用压头速率为 0.2mm/min 的位移加载。

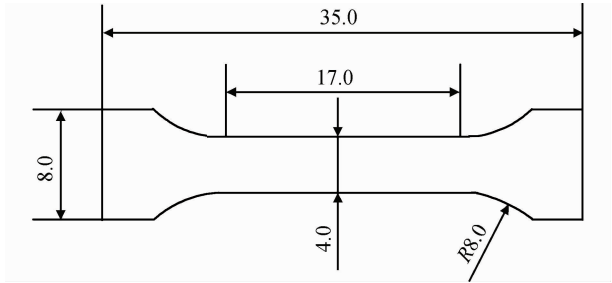


图 1 拉伸试样尺寸图(mm)
Fig. 1 The size of tensile specimens(mm)

2 结果与讨论

2.1 成分分析

对所制备的亚共晶铸铁中碳、硅元素进行原子吸收光谱分析,结果显示制备的铸铁材料中碳、硅元素的含量分别为 2.95%和 1.4%。由于在实验过程中元素有所损失,制备的铸铁材料中碳、硅元素的质量分数有所下降,但碳含量为 2.95%的铸铁材料仍在亚共晶铸铁范围内,所制备的铸铁材料是亚共晶成分。

2.2 组织分析

图 2 为铝热反应法制备的亚共晶铸铁的 X 射线衍射分析。经过标定可以看出材料基体相为铁素体,并且 X 射线衍射图中出现了明显的渗碳体的衍射峰,这是因为铸铁材料的渗碳体含量较高,因此出现了渗碳体的衍射峰。图 3 为铝热反应法制备亚共晶铸铁的金相组织照片。其中图 3(a)为铜底材制备的亚共晶铸铁材料的金相照片。图 3(b)为玻璃底材制备的材料金相照片。由图 3(a),(b)可以看出,材料的金相组织均由黑色部分和白色部分组成。此外还存在少量的颗粒状物质。

图 4 为铝热反应法制备的亚共晶铸铁的电子探针照片,从图中可以看出材料中存在碳元素的不均匀分布,富碳区域就是渗碳体相,贫碳区域就是珠光体相。因此在金相图中,黑色部分为珠光体,而白色部分相应为渗碳体。由图 4 还可以看出,金相图中的黑色颗粒状物质主要是由 Al,S,O 等元素构成的夹杂,材料基体均由 Fe 元素组成。

图 5 为不同底材制备的亚共晶铸铁的扫描电镜照片(SEM)。其中图 5(a)为铜底材制备亚共晶铸铁材料的 SEM 照片,从图 5(a)可以清晰地看见整齐片状组织,在观察过程中还发现了一小部分的粒状珠光体,但含量很少,在 5%左右。对 SEM 照片进行统计,计算得到铝热法铜底材制备的亚共晶铸铁的珠光体平均片层间距大约为 220nm。图 5(b)为玻璃底材制备亚共晶铸铁材料的 SEM 照片。从图 5(b)可以看到小

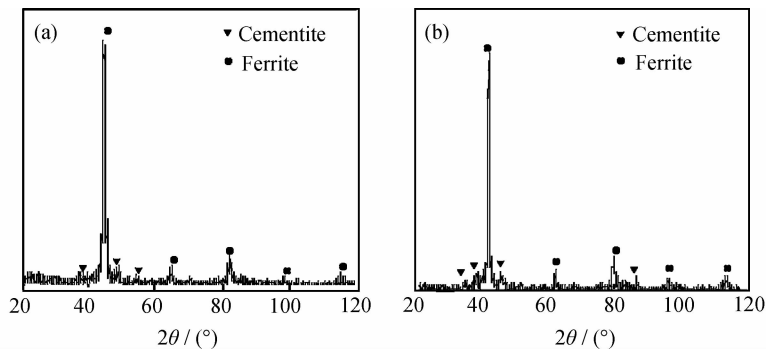


图 2 不同底材亚共晶铸铁材料的 XRD 图 (a)铜底材;(b)玻璃底材

Fig. 2 XRD patterns of the hypoeutectic cast iron materials prepared by different substrates
(a)copper substrate;(b)glass substrate

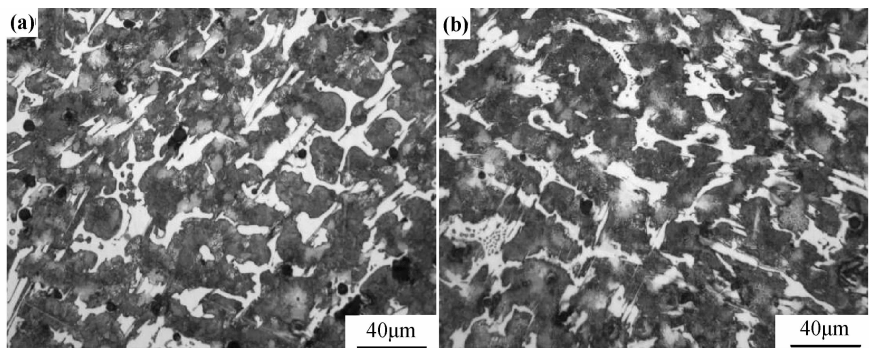


图 3 不同底材亚共晶铸铁材料的金相组织照片 (a)铜底材;(b)玻璃底材

Fig. 3 OM images of the hypoeutectic cast iron materials prepared by different substrates
(a)copper substrate;(b)glass substrate

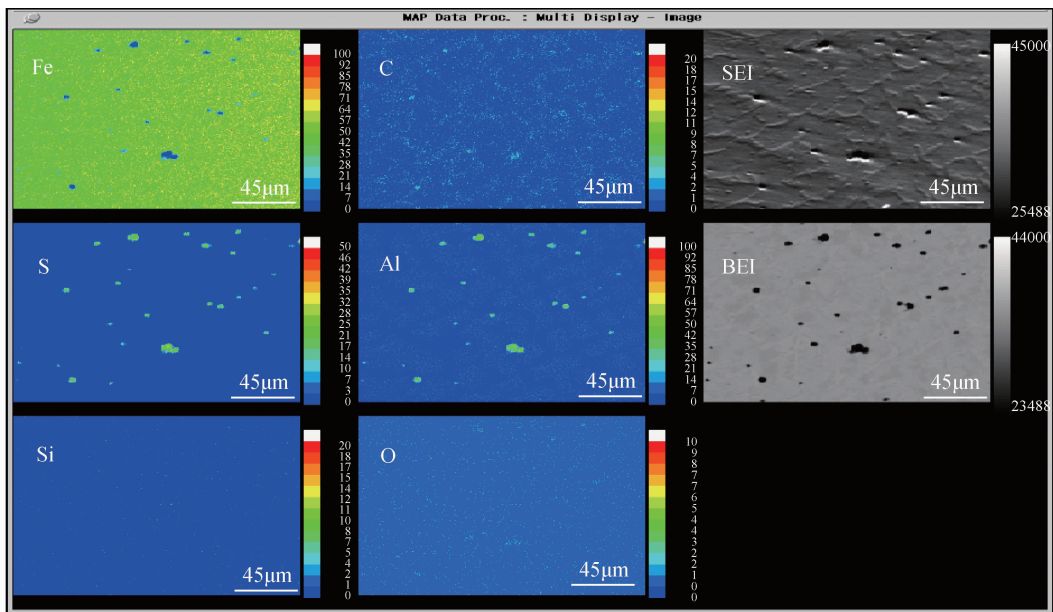


图 4 亚共晶铸铁材料的 EPMA

Fig. 4 EPMA of the hypoeutectic cast iron materials

部分粒状珠光体的存在,但是含量很少,主要以片状珠光体的形态居多。可以看出,玻璃底材制备亚共晶铸

铁的片间距整体小于铜底材制备的材料。由图 5(b)可看出,珠光体片间距大小不均,差别较大,这是因为

珠光体组织一部分是由先共晶奥氏体转变得来,另一部分由共晶奥氏体转变而来,此外,形核的先后顺序不一样也会导致片间距的大小不均匀,差别较大。对珠光体片间距进行统计得到的平均片间距为大约 165nm。

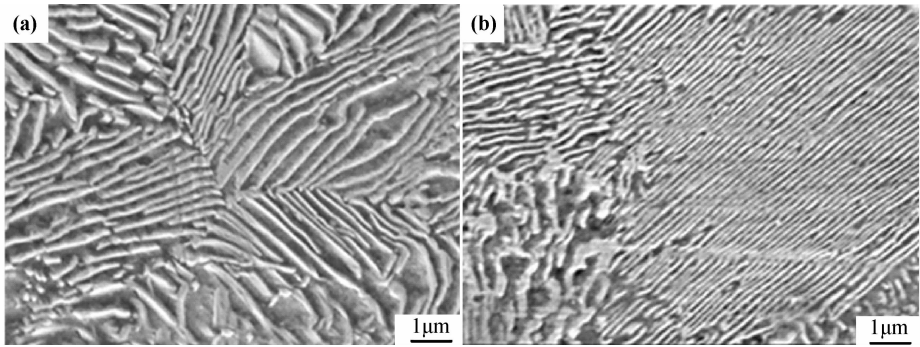


图 5 不同底材亚共晶铸铁材料的 SEM 照片 (a)铜底材;(b)玻璃底材
Fig. 5 SEM images of the hypoeutectic cast iron materials prepared by different substrates
(a)copper substrate;(b)glass substrate

2.3 力学性能

对不同底材上制备的亚共晶铸铁进行了维氏硬度测试,铜底材和玻璃底材亚共晶白口铁的维氏硬度分别为 564HV 和 552HV,其中铜底材制备的亚共晶铸铁具有较高的硬度。图 6 为不同底材制备的亚共晶白

口铸铁在室温下的力学性能曲线,其中图 6(a)压缩应力-应变曲线。铜底材亚共晶白口铁的压缩流变应力高于玻璃底材亚共晶白口铁的流变应力。铜底材亚共晶白口铁的抗压强度为 2429MPa,玻璃底材亚共晶白口铁的抗压强度为 2224MPa。

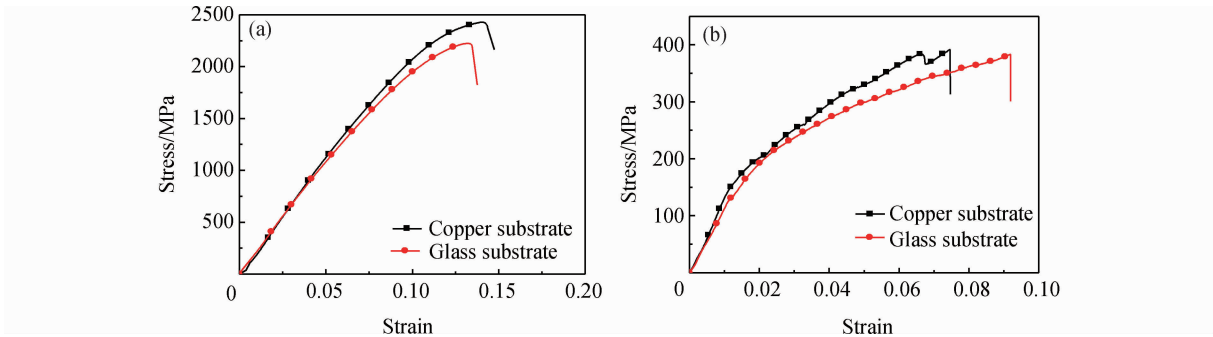


图 6 亚共晶铸铁的力学性能 (a)压缩应力-应变曲线图;(b)拉伸应力-应变曲线图
Fig. 6 Mechanical properties of the hypoeutectic cast iron
(a)compressive stress-strain curves;(b)tensile stress-strain curves

图 6(b)为不同底材所制备的亚共晶白口铸铁在室温下的拉伸应力-应变曲线。铜底材亚共晶白口铁的拉伸应力应变曲线高于玻璃底材亚共晶白口铁的。铜底材亚共晶白口铁的抗拉强度为 391MPa,玻璃底材亚共晶白口铁的抗拉强度为 383MPa,玻璃底材亚共晶白口铁的抗拉强度低于铜底材的。铜底材亚共晶白口铁的伸长率为 2%,玻璃底材亚共晶白口铁的伸长率为 3%,玻璃底材亚共晶白口铁的伸长率较高。图 7 中的(a),(b)分别为铜底材和玻璃底材亚共晶白口铁的断口形貌,从图中可以看出,铜底材和玻璃底材的亚共晶白口铁的组织比较致密,没有明显缺陷。其断口形貌有解理断裂,也有塑性断裂的断面。纳米亚

共晶白口铁的抗压和拉伸强度与有合金元素添加的含约 4%镍元素的 Ni-Hard2 铸铁相当,但塑性远优于 Ni-Hard2。因此,通过纳米化可以实现铸铁的力学性能达到或超过有合金元素添加的白口铸铁。

2.4 讨论

由于铝热反应过程中熔体过热度高,净化效果好,使奥氏体在凝固过程中形核率很高,得到了细小的奥氏体晶粒,使得单位体积内的界面积极明显增加,在后续奥氏体向珠光体转变时珠光体形核位置多,形核率高,因此得到的珠光体片层间距比铸态组织要细小很多,处于纳米级^[16]。冷却速率也是影响片间距大小的一个主要因素,熔体处于较低环境温度的高导热底材上

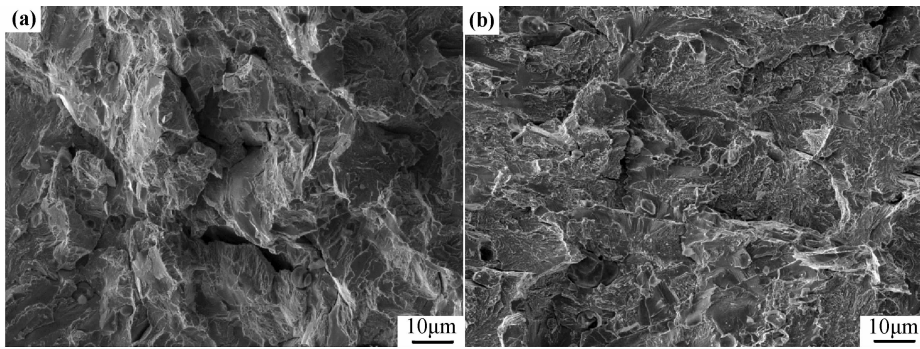


图 7 不同底材亚共晶铸铁的断口形貌 (a)铜底材;(b)玻璃底材

Fig. 7 Fracture morphology of the hypoeutectic cast iron prepared by different substrates (a)copper substrate;(b)glass substrate

时,熔体冷却凝固较快,快的冷却速度使熔体在结晶过程中晶核的生长时间受到限制,从而在凝固结束时获得较为细小的珠光体片间距。片层间距的降低导致相界面的增加,而相界面对变形起着重要的阻碍作用,从而使得合金抵抗变形的能力增加,即片层间距的降低是纳米亚共晶白口铸铁显微硬度提高的主要原因^[17,18]。

参考之前的温度场模拟^[17],由于铜底材在降温初期冷却速率很快,因此可以得到比玻璃底材细小的奥氏体晶粒,对获得片层间距更细小的珠光体晶粒有利,但由于在 800℃ 以下的降温过程中玻璃底材的冷却速率为 5.385℃/s,大于铜底材的冷却速率 2.825℃/s,更有利于在 A3 转变过程中以及随后的冷却过程中获得片层间距细小的珠光体晶粒,在这两者的综合作用下,最终得到玻璃底材制备的亚共晶铸铁珠光体片层间距小于铜底材的。

玻璃底材亚共晶白口铁的珠光体层间距较小,对于片层珠光体组织,珠光体片层表现出一定程度的塑性变形能力,并随片层间距的减小变形能力增强。对于细片层组织,应变分布比较均匀,变形范围比较广泛,断裂方式表现出延性断裂特征,从而具有良好的拉伸性能,伸长率较高。而铜底材所得的亚共晶白口铁珠光体层间距较大,在粗珠光体中,应变分布很不均匀,变形主要集中在强烈剪切变形带中进行,裂纹形核主要是渗碳体片层沿剪切变形带开裂的结果,断裂方式表现出脆性断裂特征,伸长率较低。珠光体以铁素体和渗碳体片层交替的形势发展,相互平行增长的相邻铁素体和渗碳体片层构成珠光体团。铜底材亚共晶白口铁中珠光体团相对较小,而珠光体团直径减小,则单位体积内片层排列方向增多,使局部产生大量的塑性变形引起应力集中的可能性减小,因而强度得到提高,所以在力学实验中铜底材亚共晶白口铁呈现出较好的抗拉强度和抗压强度。

3 结论

(1)用铝热反应法在不同底材条件下制备的亚共晶铸铁均为亚微米晶,其相组成为珠光体和渗碳体。

(2)由于 800℃ 以下的降温过程中玻璃底材的冷却速率大于铜底材的,导致玻璃底材制备的亚共晶铸铁平均珠光体层间距为 165nm,大于铜底材的 220nm。

(3)不同底材条件下制备的亚共晶铸铁珠光体层间距的不同会影响其力学性能,铜底材和玻璃底材亚共晶白口铁的维氏硬度分别为 564HV 和 552HV,抗压强度分别为 2429MPa 和 2224MPa,抗拉强度分别为 391MPa 和 383MPa,伸长率分别为 2% 和 3%。亚微米亚共晶铸铁的力学性能与 Ni-Hard2 相当。

参考文献

- [1] 周慧琳,于汇泳,孙玉福. 碳对耐磨白口铸铁组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011,40(13):50—51.
ZHOU H L, YU H Y, SUN Y F. Effect of C on microstructure and properties of wear resistant white cast iron[J]. Hot Working Technology, 2011,40(13):50—51.
- [2] 黄钧声. 我国高铬抗磨白口铸铁磨片材料的发展[J]. 现代铸铁, 2007, 27(1):81—84.
HUANG J S. Development of high-Cr abrasion-resistant white cast iron used as material of grinding plate in China[J]. Modern Cast Iron, 2007, 27(1):81—84.
- [3] 张伯明. 铸造手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2011. 76—90.
ZHANG Bo-ming. Casting Handbook[M]. Beijing:China Machine Press, 2011. 76—90.
- [4] CHEN X, LI Y X. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron[J]. Materials Science and Engineering A, 2010,528:770—775.
- [5] 李茂林. 我国金属耐磨材料的发展和应用[J]. 铸造, 2002, 51(9):525—529.
LI M L. Development and application of wear resistant metal materials in China[J]. Foundry, 2002, 51(9):525—529.

- [6] CHEN X, LI Y X, ZHANG H M. Microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron with about 4 wt% chromium[J]. J Mater Sci, 2011, 46:957—963.
- [7] 薛群基, 喇培清. 燃烧合成熔化制备块体纳米结构材料和金属间化合物基复合材料及其摩擦学性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 129—137.
- XUE Q J, LA P Q. Combustion synthesized bulk nanocrystalline materials and intermetallic matrix composites and their tribological properties[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 129—137.
- [8] KUMAR K, SWYGENHOVEN H V, SURESH S. Mechanical behavior of non-crystalline metals and alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5743—5774.
- [9] 卢柯, 周飞. 纳米晶体材料的研究现状[J]. 金属学报, 1997, 33(1): 99—106.
- LU K, ZHOU F. Research situation of non-crystalline materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1): 99—106.
- [10] 王鸿鼎, 喇培清, 师婷, 等. 块体纳米晶/微米晶复相金属材料研究现状及发展趋势[J]. 材料工程, 2012, (12): 11—15.
- WANG H D, LA P Q, SHI T, et al. Research status and development trend of bulk nano/micro-crystalline composite metallic materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (12): 11—15.
- [11] LIAN J S, VALIEV R Z, BAUDELET B. On the enhanced grain growth in ultrafine grained metals[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(11): 4165—4170.
- [12] SIEGEL R W. Mechanical properties of nanophase materials[J]. Materials Science Forum, 1997, 235—238: 851—860.
- [13] TONGJAI C K, HEATHER A M, CHRISTOPHER A S. Design of stable nanocrystalline alloys[J]. Science, 2012, 337: 951—954.
- [14] SEGAL V M, FERRASSE S, ALFORD F. Tensile testing of ultra fine grained metals[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 422: 321—326.
- [15] ZHU Y T, LIAO X Z. Nanostructured metals retaining ductility[J]. Nature Materials, 2004, (3): 351—352.
- [16] LA P Q, WEI F A, HU S L, et al. White cast iron with a nanoeutectic microstructure and high tensile strength and considerable ductility prepared by an aluminothermic reaction casting[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 561: 317—320.
- [17] 喇培清, 吕蕊娇. 铝热反应制备纳米晶 Fe_3Al 过程中熔体冷却的温度场模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(3): 13—17.
- LA P Q, LU R J. Temperature field simulation of melts in aluminothermic reaction for preparation of nanocrystalline Fe_3Al block[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(3): 13—17.
- [18] 王宏伟, 朱冬冬, 邹鹤鸣, 等. 高压凝固对 Ti-48Al 合金片层组织及其力学性能影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(1): 41—44.
- WANG H W, ZHU D D, ZOU C M, et al. Effect of high pressure on the lamellar spacing and mechanical properties of Ti-48Al alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(1): 41—44.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104622)

收稿日期: 2013-03-25; 修订日期: 2013-11-10

通讯作者: 喇培清(1971—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事纳米材料、金属间化合物、陶瓷等方面的研究, 联系地址: 兰州市七里河区兰工坪路 287 号兰州理工大学材料学院(730050), E-mail: pqla@lut.cn