

[文章编号] 1004-0609(2002)06-1081-06

镍基高温合金真空电磁约束成形与定向凝固^①

傅恒志, 沈 军, 郝启堂, 李双明, 李金山

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

[摘 要] 介绍了高熔点大密度铁、镍基合金的电磁约束成形定向凝固的两种先进技术。在系统研究电磁场与温度场及其耦合作用的基础上, 利用特殊设计的双频双感应器成功地实现了多种截面形状的不锈钢及高温合金的无容器电磁约束成形。借助于特制的磁结晶器获得了电磁软接触的高温合金近终形定向凝固叶片样件。

[关键词] 电磁约束成形; 定向凝固; 高温合金; 叶片

[中图分类号] TG 249

[文献标识码] A

熔体的电磁加工是近年来材料、冶金领域中引起广泛关注的技术, 它可以提供一个高纯净、低污染、短流程的材料制备工艺。迄今, 熔体电磁加工比较典型的方法有电磁连铸(EMC)^[1~3]和电磁悬浮熔铸(MSMP)^[4, 5]。电磁连铸虽然初步实现了非接触的连续铸坯, 在冶金工业中起了划时代的作用, 但目前尚只能用于铝合金圆、方坯锭在大气下的约束成形, 而且熔体在凝固成形过程中温度和组织均难以调节; 而电磁悬浮熔铸仍需要将熔体浇注于铸型中, 类似于常规的精密铸造。

随着高科技及相应产业对先进金属材料的需求日益迫切, 大量的 Ni, Ti, Nb, Zr 及其合金广泛应用于航空、航天、能源、交通及化工等产业。据 NASA 统计^[6], 到本世纪初航空航天未来发动机用材仅 Ni 与 Ti 及其合金即占全部材料用量的 70%。利用电磁加工技术直接由液体成形坯件和构件可能是实现上述要求的重要途径。

高温合金、特种钢及钛、锆合金等先进材料, 具有密度大、熔点高、磁导率与电导率低、活性高、易氧化污染及难变形等特性, 因此, 电磁约束成形必须在真空或保护性气体下进行。由于合金的密度大、电磁参数低, 约束相同高度的此类熔体所需的电磁压力(如高温合金)将是铝的 6.7 倍。而钢及高温合金的导热性只有铝的 1/6, 导热性的差异, 使得钢及高温合金熔体的内外温差增大, 极不利于液体金属的稳定与成形。所以, 迄今为止, 特种钢、高温合金及 Ti, Zr 等合金熔体在真空下的电磁成形, 尚未见报导。

为了实现对高熔点、大密度合金的无(低)污染约束成形, 我们采取了两个途径, 即无接触电磁约

束成形与凝固控制(EMCS)和软接触电磁约束成形与凝固控制(EMSCC), 它们的工艺简图分别示于图 1 及图 2。

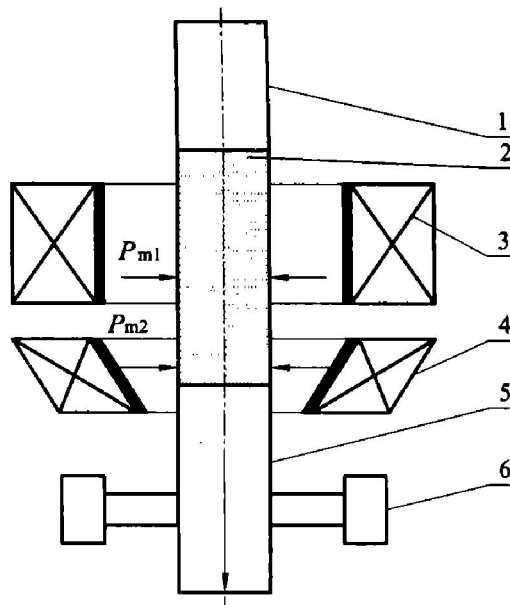


图 1 无接触电磁约束成形与凝固控制(EMCS)

Fig. 1 Sketch of electromagnetic confinement and directional solidification control without any contact(EMCS)

1—Solid metal; 2—Molten metal confined;

3—350 kHz induction inductor;

4—50 kHz electromagnetic confining induction;

5—Sample confined; 6—Cooling medium

1 物理模型与实验研究

1.1 双电源双频无接触电磁约束成形

实验采用双电源双频双感应器的方案, 如图 1

① [基金项目] 国家自然科学基金重大资助项目(No. 54459990); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000067202-2)

[收稿日期] 2002-04-01; [修订日期] 2002-04-22

[作者简介] 傅恒志(1927-), 男, 教授, 中国工程院院士。

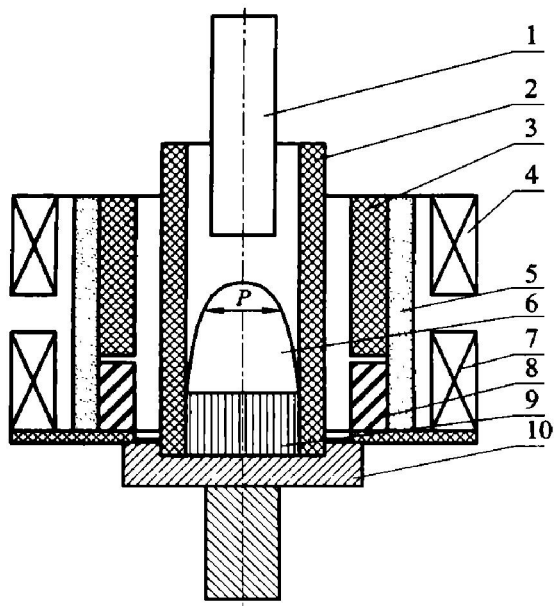


图 2 软接触电磁约束成形与凝固控制 (EMSCC)

Fig. 2 Sketch of electromagnetic soft-contact confinement and solidified control (EMSCC)

- 1—Solid metal; 2—Magnetic mold; 3—insulated plate;
4—Upper inductor; 5—Heat preservation layer;
6—Molten metal confined; 7—Lower inductor;
8—Susceptor; 9—Shaped metal; 10—Copper tray

所示。在系统测定和分析双频双感应器多种组合电磁场分布特性的基础上,建立了双频双感应器液态金属的电磁压力与相应磁场产生的热量的关系式^[7]。如对近矩形样件的表达式为方程(1)和(2):

$$p(d) = \frac{\mu}{4} (H_1 \cdot H_1^* + H_1 \cdot H_2^* + H_2 \cdot H_1^* + H_2 \cdot H_2^*)$$

$$= \frac{\mu H_{01}^2}{4} \frac{\text{ch}(2x/\delta_1) + \cos(2x/\delta_1)}{\text{ch}(d_2/\delta_1) + \cos(d_2/\delta_1)} +$$

$$\frac{\mu H_{02}^2}{4} \frac{\text{ch}(2x/\delta_2) + \cos(2x/\delta_2)}{\text{ch}(d_2/\delta_2) + \cos(d_2/\delta_2)} +$$

$$\sum_i (H) \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$Q = \frac{E_{i1}^2 \sqrt{\rho\mu}}{32 \pi^3 a_1^2 l_{i1}^2 \sqrt{f_1^3}} + \frac{E_{i2}^2 \sqrt{\rho\mu}}{32 \pi^3 a_2^2 l_{i2}^2 \sqrt{f_2^3}} \quad (2)$$

式中 μ , δ , d_2 , f , H , a 分别为熔体的磁导率、集肤深度、熔体厚度、电流频率、磁场强度、线圈与负载间隙。

其电磁压力的分布见图 3 所示。在无接触电磁约束成形给定实验条件下,必须考虑试样中感生涡流所产生的热量与在熔体中产生的电磁压力的匹配,称之为热力比 $(Q/p_m)^{[8]}$ 。没有适当的热力比,将会出现熔体温度过高,静压力超过电磁压力而导致塌漏,或电磁压力过大,使熔体局部缩变,不能成形等问题。双频双感应器所建立的热力比方程如下:

$$HL = \frac{\text{sh} \frac{a}{\delta} - \sin \frac{a}{\delta}}{\int_0^{\frac{a}{\delta}} (\text{ch}^2 t - \cos^2 t)^{\frac{1}{2}} dt} \frac{4}{a} \sqrt{\frac{\pi}{\mu_Y}} \quad (\text{单频率}) \quad (3)$$

$$HL = \frac{4}{a} \sqrt{\frac{\pi}{\mu_Y}} \times$$

$$[(\text{sh} \frac{a}{\delta_1} - \sin \frac{a}{\delta_1})(\text{ch} \frac{a}{\delta_2} + \cos \frac{a}{\delta_2}) \sqrt{f_1} +$$

$$(\text{sh} \frac{a}{\delta_2} - \sin \frac{a}{\delta_2})(\text{ch} \frac{a}{\delta_1} + \cos \frac{a}{\delta_1}) \sqrt{f_2} (\frac{B_{z2}}{B_{z1}})^2] /$$

$$[(\text{ch} \frac{a}{\delta_2} + \cos \frac{a}{\delta_2}) \int_0^{\frac{a}{\delta_1}} (\text{ch}^2 q - \cos^2 q)^{\frac{1}{2}} dq +$$

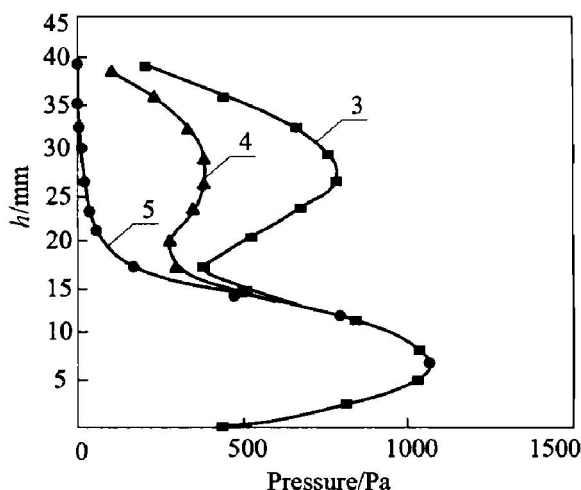
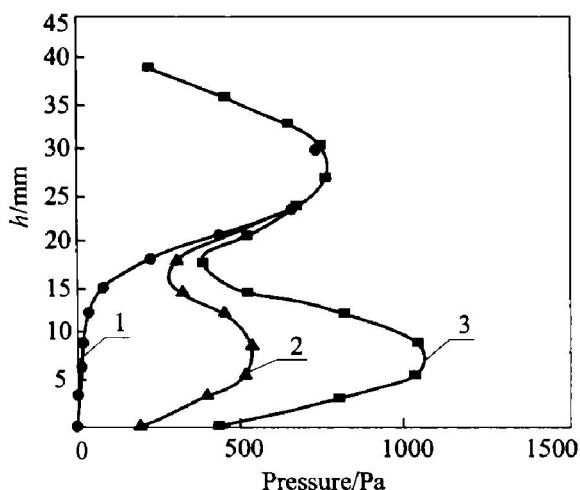


图 3 双频双感应器电磁压力的分布特征

Fig. 3 Electromagnetic pressure distribution in dual frequencies as function of height of dual inductors

- 1— $I_1 = 1000 \text{ A}$, $I_2 = 0 \text{ A}$; 2— $I_1 = 1000 \text{ A}$, $I_2 = 500 \text{ A}$; 3— $I_1 = 1000 \text{ A}$, $I_2 = 1000 \text{ A}$;
4— $I_1 = 500 \text{ A}$, $I_2 = 1000 \text{ A}$; 5— $I_1 = 0 \text{ A}$, $I_2 = 1000 \text{ A}$;

$$\left(\operatorname{ch} \frac{a}{\delta_1} + \cos \frac{a}{\delta_1}\right) \int_0^{a/\delta_2} (\operatorname{ch}^2 q - \cos^2 q)^{\frac{1}{2}} dq \left(\frac{B_{z2}}{B_{z1}}\right)^2 \Big] \quad (\text{双频率}) \quad (4)$$

式中 μ , γ , δ , a , f , B 分别为熔体的磁导率、电导率、集肤深度、熔体厚度、电流频率、及磁感应强度。图 4 所示是频率及磁感应强度对热力比的影响。

对非圆形截面形状的电磁场特性, 由于其横截面各处曲率的不同, 其电磁压力分布迥异于圆形截面, 是曲率半径的函数。对扁椭圆截面, 双频电磁场力的平衡方程为^[7]

$$\frac{B_1(h_B R_B)^2 + B_2(h_B R_B)^2}{2\mu} = Qh_B - \frac{\phi}{R_B} \quad (R_B \geq 7\delta_2) \quad (5)$$

$$\frac{B_1^2}{2\mu} + \frac{B_2^2}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ber}^2 m_2 + \operatorname{bei}^2 m_2}\right) = Qh - \frac{\phi}{R} \quad (7\delta_1 \leq R < 7\delta_2) \quad (6)$$

$$\frac{B_1^2}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ber}^2 m_1 + \operatorname{bei}^2 m_1}\right) + \frac{B_2^2}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ber}^2 m_2 + \operatorname{bei}^2 m_2}\right) = Qh_A - \frac{\phi}{R_A} \quad (R_A < 7\delta_1) \quad (7)$$

依照所建立的平衡方程, 计算得到的三维电磁成形 40 mm 液柱高度扁椭圆形所需电磁力的大小, 示于图 5(a)。类似地, 弯月面形状电磁约束成形电磁压力的分布示于图 5(b)。

为了控制凝固组织, 探索定向凝固与约束成形

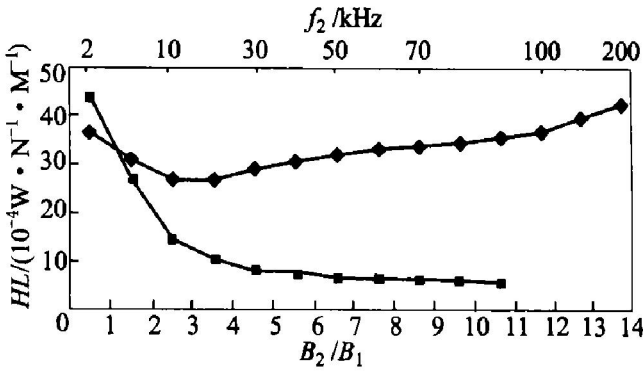


图 4 频率及磁感应强度对热力比的影响

Fig. 4 Effect of frequency and ratio of magnetic flux density on ratio of heat and force(Q/p_m)

1— $a=4\text{ mm}$, $f_1=300\text{ kHz}$, $B_1=0.04\text{ T}$, $B_2=0.04\text{ T}$,

$\mu\sigma=5.03\text{ H}\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$;

2— $a=4\text{ mm}$, $f_1=300\text{ kHz}$, $f_2=10\text{ kHz}$,

$\mu\sigma=5.03\text{ H}\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

的结合, 实验测定了液固界面温度梯度随试样温度的变化, 结果如图 6 所示。由测试结果可知, 下液固界面在熔体温度达 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 温度梯度最大, 接近 400 K/cm , 大约是 HRS 定向凝固法的 5~8 倍。

在系统试验研究与理论分析的基础上, 成功地实现了多种截面形状的无接触电磁约束成形。图 7(a) 和(b) 是铝、高温合金及不锈钢弯月面、椭圆及近矩形的熔体无接触电磁成形的样件。其定向凝固

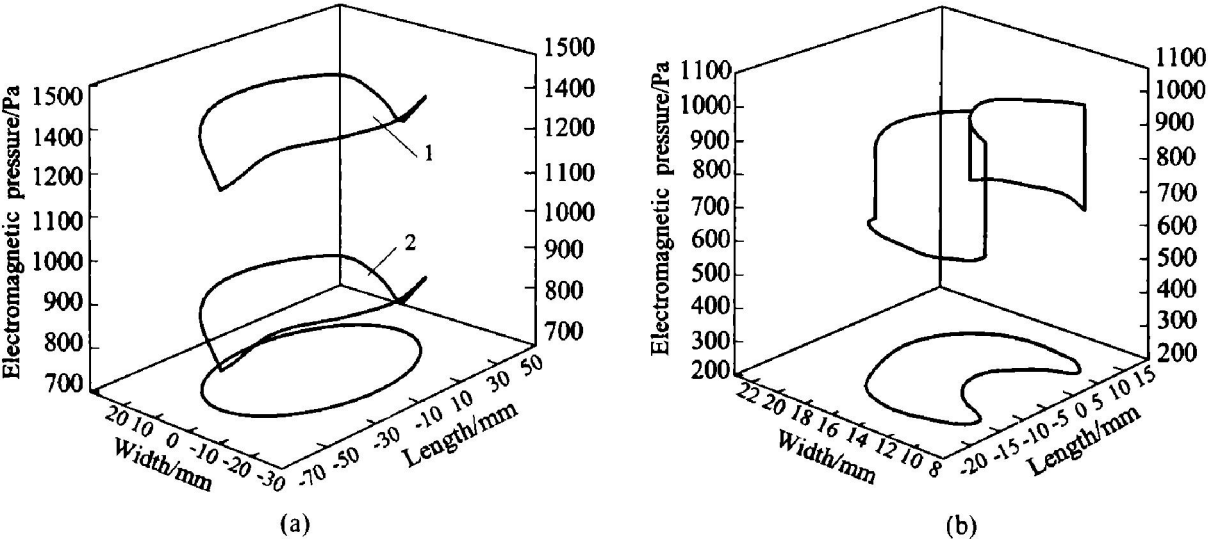


图 5 扁椭圆(a)和弯月截面(b)形状液柱电磁压力分布图

Fig. 5 Computed electromagnetic pressure for electromagnetic confining of elliptical(a) and crescent moon(b) cross section shapes

1—Electromagnetic pressure demanded by confining 60 mm height of aluminum melt;
2—Electromagnetic pressure demanded by confining 40 mm height of aluminum melt.

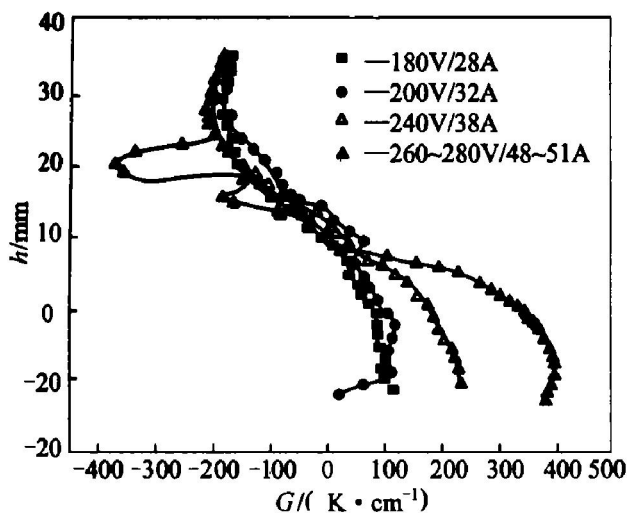


图 6 无接触电磁成形过程中试样中心沿轴向的温度梯度分布特征

Fig. 6 Temperature gradient distribution in center of test sample under electromagnetic containerless confinement process

组织如图 7(c) 所示。试样周界由于洛仑兹切向分力的搅拌作用, 定向效果次于试样中心部位。

1.2 双电源双频软接触电磁成形

为了实现复杂截面形状构件的熔体电磁成形, 我们将无接触电磁约束成形与电磁悬浮熔铸 (MSMP) 相结合, 发展出双电源双频软接触电磁成

形技术, 其原理如图 2 所示。所确定的成形与凝固工艺的特点是^[9]: 利用上、下两个感应线圈, 上者对母合金料棒加热熔化, 下者使液态金属过热并实现软接触约束成形。合金的熔化、成形与凝固均在磁结晶器中进行。结晶器与感应线圈之间是保温耐热材料与磁屏蔽发热体组成的炉衬。通过调节上、下感应器的位置与功率可使熔体最高温度的位置对应于发热体的上端, 在下感应器的中部, 与产生最大电磁压力的位置相吻合, 熔体在磁压力的作用下呈半悬浮状态。成形试验过程中熔体与结晶器的接触时间为 3~4 min, 从而大大减轻了污染。我们在不同的给定磁结晶器及感应线圈的组合下, 系统地研究了磁结晶器材料、发热体高度与位置对磁结晶器内磁感应强度的影响及电源电压、感应器匝数、高度、发热体位置对熔体悬浮驼峰弯月面高度的作用。

利用软接触电磁约束成形定向凝固技术, 制备出了不同尺寸的高温合金叶片模拟样件, 如图 8 所示。比较电磁软接触成形与无接触约束成形, 虽然由于与磁结晶器的局部接触, 不能完全避免熔体与耐火材料的作用, 但由于熔体的半悬浮状态使接触面积和接触时间大幅度减少, 从而有效地减低了污染。同时利用软接触的特点, 进一步可以发展成为一种精确成形各种复杂截面形状, 甚至空心、带凹槽、变截面构件的先进制备技术。

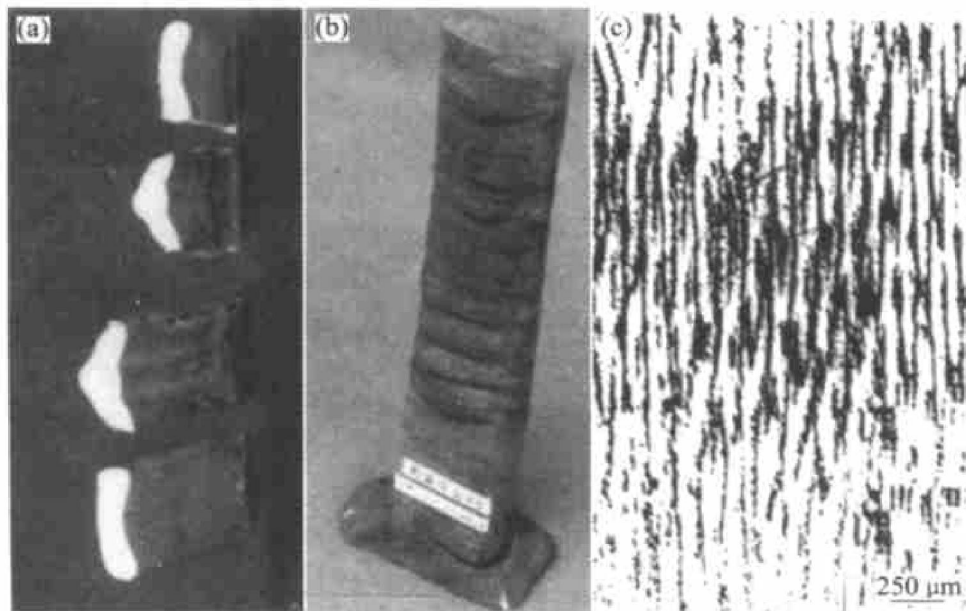


图 7 铝、高温合金和不锈钢无接触电磁成形样件(a)和(b)及其凝固组织(c)

Fig. 7 Electromagnetic containerless confinement test pieces of aluminum, superalloy and stainless steel (a), (b) and their solidified structure (c)

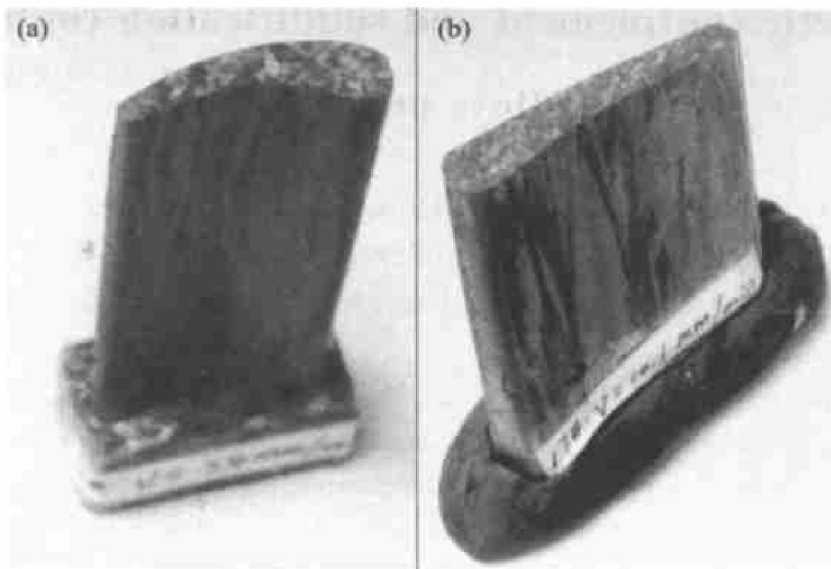


图8 高温合金软接触电磁成形近叶片样件

Fig. 8 Near-net blade test pieces of superalloy shaped by electromagnetic soft-contact confinement

2 结语

液态金属电磁约束成形定向凝固技术的探索和建立,为先进材料成形加工技术的发展开辟了一个崭新的领域,对于诸如钛合金、高温合金、难熔金属、高合金钢、各类金属间化合物以及其它难加工成形先进材料的制备具有特别重要的意义。我们希望这一具有广阔前景,而又难度极大的探索性研究进一步发展成为具有实用价值的成熟技术。

[REFERENCES]

- [1] Getselev Z N. Casting in an electromagnetic field[J]. J Met, 1971, 23(10): 38 - 43.
- [2] Vives Ch, Ricou R. Experimental study of continuous casting of aluminum alloys[J]. Metall Trans B, 1985, 16B: 377 - 382.
- [3] Li B Q, Evans J W, Cook D P. An improved mathematical model for electromagnetic casters and testing by a physical model[J]. Metall Trans B, 1991, 21B: 121 - 125.
- [4] Bhamidipati J R, Kaddah N E. Calculation of electromagnetic field and melt shape in the magnetic suspension melting process[A]. Szeley J, Evans J W, Blazek K, et al. Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy[C]. Warrendale, PA: TMS, 1991. 69 - 72. [5] Kaddah N E, Bhamidipati J R. Mathematical modeling of induction melting systems-application to the magnetic suspension melting process[A]. Piwonka T S. Modeling of casting, Welding and Advanced Solidification Process VI[C]. Warrendale, PA: TMS, 1993. 350.
- [6] Buhl H. Advanced Aerospace Materials[M]. German: Springer-Verlag, 1992.
- [7] 李双明. 金属熔体双频电磁成形过程研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1999.
LI Shuang-ming. Study on dual frequency electromagnetic shaping of liquid metal process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999.
- [8] 沈 军. 液态金属电磁成形的理论计算和数值模拟[R]. 西安交通大学博士后出站报告, 2000.
SHEN Jun. Theoretical calculation and numerical simulation of electromagnetic confinement of liquid Metal[R]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.
- [9] 李双明, 张丰收, 郝启堂, 等. 高温合金电磁软接触近净成形定向凝固研究[J]. 材料科学与工艺, 2001, 2(9): 185 - 188.
LI S M, ZHANG F S, HAO Q T, et al. Electromagnetic soft-contact confinement and directional solidification of near-net shape castings of superalloys[J]. Materials Science and Technology, 2001, 2(9): 185 - 188.

Electromagnetic confinement and solidification control of Ni-base superalloys under vacuum

FU Heng-zhi, SHEN Jun, HAO Qi-tang, LI Shuang-ming, LI Jin-shan
(State Key Laboratory of Solidification Processing,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] Two advanced technologies of electromagnetic confinement to process the Fe- and Ni-base alloys for castings and ingots with shaped cross section were introduced. Based on systematically investigation on the distribution behavior of magnetic and temperature field and their coupling effect, the containerless electromagnetic shaping of stainless steel and superalloy test samples were successfully realized by means of an specially designed vacuum apparatus with dual induction coils and dual frequencies and by using of a tailor-made crystallizer, the near-shape superalloy turbine blade castings with directionally solidified microstructure by electromagnetic soft-contact confinement technology were also obtained. The dynamic stability and profile behavior of melt and temperature gradient during electromagnetic confinement were presented, the results by quasi-3D calculation simulating the electromagnetic shaping process in consistent with experiments were also given.

[Key words] electromagnetic confinement; directional solidification; superalloys; turbine blade

(编辑 袁赛前)