

炉前热分析技术定量测评灰铸铁弹性模量

周文武¹, 陈祥^{2,3}, 李言祥^{2,3}

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学材料学院, 北京 100084;

3. 教育部先进成形制造重点实验室, 北京 100084)

摘要: 机床灰铸铁件的弹性模量是一项重要的技术指标, 近年来开始受到机床铸造行业的重视。本文采用基于冷却曲线模式识别技术的液态金属熔体质量测评方法实现灰铸铁弹性模量的炉前定量测评。随着表征曲线相似程度的综合偏差值 Ω 趋近于零, 曲线所对应的灰铸铁的抗拉强度、弹性模量也趋于一致。通过建立基于大量实验结果累积的数据库, 可以实现灰铸铁弹性模量的在线评测。

关键词: 冷却曲线; 热分析; 灰铸铁; 弹性模量; 炉前测评

On-line Quantitative Prediction of the Elasticity Modulus of Gray Cast Iron by Using the Pattern Recognition Method

ZHOU Wen-wu, CHEN Xiang, LI Yan-xiang

(1. Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 3. Key Laboratory for Advanced Materials Processing

Technology (MOE), Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Elasticity modulus of the gray cast iron machine tool castings has been an important technical index, and it has been brought to the great attention in recent years. In this paper, the on-line quantitative predictions of the elasticity modulus of gray cast iron are conducted by using the pattern recognition of cooling curves. It is indicated that the tensile strength difference and the elasticity modulus difference converge to zero when the comprehensive parameter Ω , which expresses the difference between cooling curves, approached to zero. Based on a database established from a large amount of experimental results, the on-line prediction of elasticity modulus of gray cast iron melt may be realized.

Key words: Cooling curve; Thermal analysis; Gray cast iron; Elasticity modulus; On-line Prediction

近年来, 我国的机床产量已位居世界第一, 但机床质量尤其是数控机床的质量仍然与国外先进水平存在一定差距, 这些差距也表现在机床铸件上^[1]。高档数控机床床身一般采用高强度灰铸铁或者球墨铸铁制造, 如 HT250、HT300、HT350 等。机床铸件要求具有高抗拉强度、良好的导轨耐磨性、减振性, 容易加工, 并具有较高的尺寸精度和尺寸稳定性^[2]。其中, 铸铁的弹性模量是影响其刚度和尺寸稳定性的重要力学性能指标。为了提高我国机床产品精度稳定性, 有效地测评、控制铸铁的弹性模量值势在必行。

目前, 热分析技术已成为现代铸造生产炉前快速检测中的一种重要手段, 从对原铁水碳当量 (CE)、C、Si 含量的简单预测, 到对灰铸铁的孕育效果、普通球墨铸铁的球化效果、石墨形态、性能的综合测定, 对有效地控制铸造生产过程及铸件质量有重要的意义^[3-4]。但是, 已有研究工作没有对热分析曲线凝固段与铸铁弹性模量的关系进行考察。弹性模量作为机床铸件的关键技术指标, 列入炉前测评指标, 对评价机床弹性模量具有重要意义。

1 铸铁炉前热分析技术

铸铁熔体炉前热分析技术是现代铸造生产炉前快速检测中一种不可或缺的重要检测手段,从最初对原铁水碳当量的简单测定发展到对处理后铁液熔体状态进行综合测评;研究方法也由最初的特征值方法发展到了通过应用模式识别技术实现热分析曲线智能识别与熔体状态综合评估的阶段^[5]。其中,特征值方法是在大量试验结果的基础上利用线性回归、神经网络等统计方法建立热分析曲线及其一阶、二阶微分曲线上单个或有限多个特征值与特定条件下凝固组织、力学性能的数学模型,以此作为评判依据实现待测铁液凝固组织及性能的预测,评判准确性受试验条件影响大,难以实现铸铁铁液熔体状态综合测评与凝固组织准确预测,具有较大的局限性^[3,6]。

基于特征值方法的局限性,清华大学提出了一种全新的铁水熔体质量表征和测评方法^[7-9]:固定凝固条件下任何影响铁水熔体质量的因素都会反映在热分析冷却曲线上,特别是其凝固段,因此一定形状凝固段的冷却曲线对应一定熔体质量的铁水,可以通过识别冷却曲线凝固段整体形状辨别不同熔体质量的铁水,达到综合测评的目的。基于上述思想,以数据库的形式代替传统的线性回归或非线性逼近的方法建立冷却曲线与表征凝固组织指标间的关系;通过冷却曲线模式识别结合数据库的方法实现铁水熔体质量的综合测评;以数据库中与被测铁水冷却曲线最相近冷却曲线所对应的质量指标表征被测铁水熔体质量。在此基础上实现了球墨铸铁铁水球化效果、灰铸铁铁水孕育效果、蠕墨铸铁蠕化率以及铝硅合金细化和变质处理效果的快速测评^[3,4,10,11]。根据模式识别原理定义的用于比较热分析曲线凝固段差别、实现热分析曲线智能识别的综合偏差判据 Ω 如下式所示:

$$\Omega = |\sum \Delta T_i| / n + S \quad (1)$$

式中, n 是采样点数, ΔT_i 、 S 按以下公式求出:

$$\Delta T_i = T_{1i} - T_{2i} \quad (2)$$

$$S = [\sum (\Delta T_i - \Delta T)^2 / (n-1)]^{1/2} \quad (3)$$

$$\Delta T = (\sum \Delta T_i) / n \quad (4)$$

其中, T_{1i} 与 T_{2i} 是 i 时刻两条热分析曲线凝固段上 T_1 和 T_2 上对应的温度值, n 是采样点数。

综合偏差判据 Ω 是有量纲的参数,单位为 $^{\circ}\text{C}$,它综合考虑了曲线的位置和形状的差异,其值越小,表示两条曲线越相似。当综合偏差判据 Ω 趋于零时,热分析试样的凝固组织的差别也向零趋于收敛。

但是,已有研究工作没有对热分析曲线凝固段与灰铸铁弹性模量的关系进行考察。为了进一步完善与确证热分析曲线表征与评估灰铸铁铁液熔体状态的方法,积累与铁液熔体状态评估数据库中的数据,提高工业现场灰铸铁弹性模量评估准确性,本文在工业现场对原有的研究进行必要的重复验证的基础上,进一步考察热分析曲线凝固段与弹性模量的关系,实现灰铸铁铁液熔体状态的综合评估,尤其是灰铸铁弹性模量的炉前测评。

2 实验方法及结果

2.1 灰铸铁熔炼及熔体处理工艺

灰铸铁采用中频感应电炉熔炼,采用随流孕育的方法,孕育剂为 FeSi75,浇注时同时浇出光谱仪所用成分试块、检测力学性能用的圆棒试样以及显微组织分析试样。

2.2 金相分析

在试样热电偶丝测温点位置附近对试样进行切割,对试样表面进行粗磨、精磨、抛光,然后采用 Zeiss Axio Scope A1 金相显微镜对试样的金相组织进行观察和拍照,采用计算机图像采集分析系统,对灰铁试样进行组织分析。

2.3 性能检测的方法

拉伸试验在 MTS New 810 型万能材料试验机上进行, 试样尺寸为 $\phi 10 \times 110$ mm, 测量材料的抗拉强度。

2.4 热分析

采用天津汇丰 $\phi 30 \times 50$ mm 的圆形样杯进行热分析曲线采集, 热电偶测温点位于试样的中心。热分析曲线采集使用北京上润中仪科技有限公司开发的无纸记录仪, 采样频率 2Hz。用测温点附近的金相分析结果来表征热分析试样凝固组织形态。

对于灰铸铁, 初晶奥氏体析出温度 TAL (Temperature of primary austenite solidification in hypoeutectic and eutectic irons) 和共晶凝固结束温度 TEE (Temperature of the end of eutectic solidification) 之间的凝固段表征了凝固过程, 是热分析曲线的“有效段”。从理论上来说, 寻取 TAL 的方法是对冷却曲线求一阶微分, 找到微分曲线上的零点, 再返回冷却曲线上找到对应的温度, 即 TAL。从获得的微分曲线上选取局部最小值, 找到对应的冷却曲线上的温度值, 就是共晶凝固结束温度 TEE 点^[4]。如图 1 所示, 灰铸铁热分析曲线及其微分曲线。

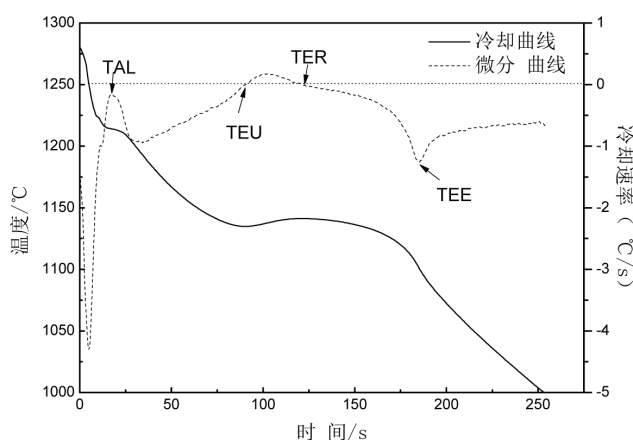
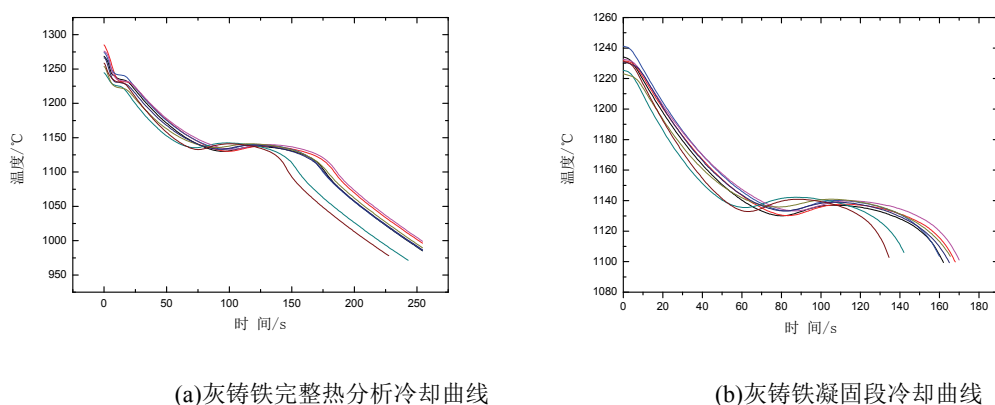


图 1 常见的灰铸铁热分析曲线及其微分曲线

Fig.1 Typical cooling curve and the differential curve of gray cast iron

根据文献^[4]中的方法进行凝固段提取, 得到图 2 所示的热分析冷却曲线凝固段。



(a) 灰铸铁完整热分析冷却曲线

(b) 灰铸铁凝固段冷却曲线

图 2 灰铁数据整理后凝固段曲线

Fig.2 Cooling curves and effective solidification segments cooling curves of gray cast iron

2.5 灰铸铁弹性模量的测量

灰铸铁的弹性模量是影响其刚度和尺寸稳定性的重要力学性能指标, 它是保证铸件尺寸精度及尺寸稳定性, 减少变形的一项重要技术指标。为了保证我国数控机床精度的可靠性、精度保持稳定性以及在国际市场的竞争能力, 有效地检测铸铁的弹性模量 E 值势在必行。

灰铸铁因石墨组织的存在,使其在很小的应力下就会发生塑性变形,其应力应变曲线无明显直线段和屈服点,常规静态拉伸无法准确测量灰铸铁的弹性模量。近 20 年来,我国大部分机床铸件企业对于机床铸件材料的弹性模量未做过测定,是很大的缺失^[1]。

采用美国 Magnaflux Quasar Systems 公司生产的超声共振谱仪 (Resonant Ultrasound Spectrometer) 测量灰铸铁的弹性模量。超声共振谱仪的工作原理如下:材料的共振频率取决于材料的形状,密度以及弹性模量。RUSpec 测量样品材料在几乎无应力状态下的超声共振频率,并与理论计算得到的共振频率进行迭代,最终匹配分析并计算出弹性模量。当材料匀质,样品形状规则该方案精度可达 0.01%。该技术的测量结果反映了样品整体的力学特性,避免了常规方法得到的是某点或某个方向的结果。

根据超声共振谱仪的试样要求,试样尺寸为 20mm×16mm×12mm,试样经机械加工获得表面光洁 (Ra=1.6) 的长方体试样。表 1 为利用超声共振谱仪测量的热分析试样的弹性模量及其对应的化学成分。

表 1 热分析试样的化学成分及弹性模量测量结果

Table1 Chemical compositions and elasticity modulus of the specimens

炉次	化学成分(%)						力学性能		
	C	Si	Mn	P	S	CE	抗拉强度/MPa	硬度/HBW	弹性模量/GPa
1	3.00	1.77	0.94	0.053	0.076	3.55	370	222	145.3
2	3.03	1.77	0.96	0.049	0.079	3.58	324	207	141.0
3	3.06	1.75	0.83	0.052	0.064	3.60	347	211	139.9
4	3.11	1.71	0.90	0.052	0.084	3.64	345	214	138.0
5	3.14	1.44	1.03	0.051	0.073	3.59	345	209	142.1
6	3.19	1.48	1.11	0.054	0.086	3.65	338	188	133.0
7	3.24	1.66	0.86	0.053	0.089	3.75	289	195	133.0
8	3.27	1.67	0.77	0.053	0.089	3.79	285	193	131.9
9	3.32	1.72	0.86	0.057	0.071	3.85	281	201	132.6
10	3.37	1.75	0.84	0.052	0.099	3.91	284	212	134.7

3 灰铸铁弹性模量炉前预测

3.1 综合偏差值与弹性模量差值相关性分析

从获得的熔体冷却曲线上截取凝固段作为有效曲线,与曲线所代表试样的化学成分以及力学性能组成数据库,分别计算数据库中任意两条曲线的综合偏差值 Ω 以及曲线所对应的试样的化学成分以及力学性能的差值。

由公式(1)-(4)计算得出热分析曲线凝固段的综合偏差值 Ω ,分析综合偏差值 Ω 与热分析试样碳当量差值 ΔCE 的关系如图 3 所示。

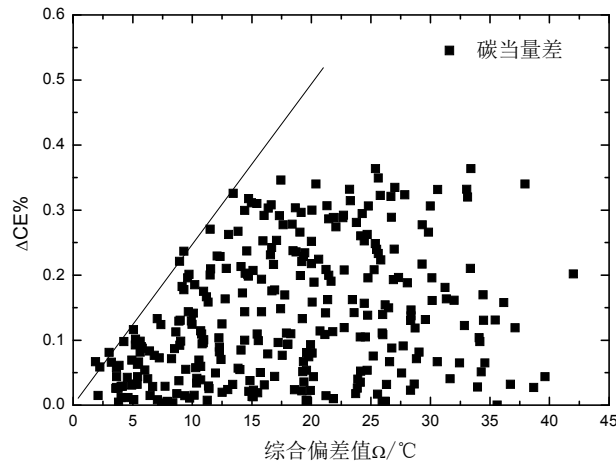
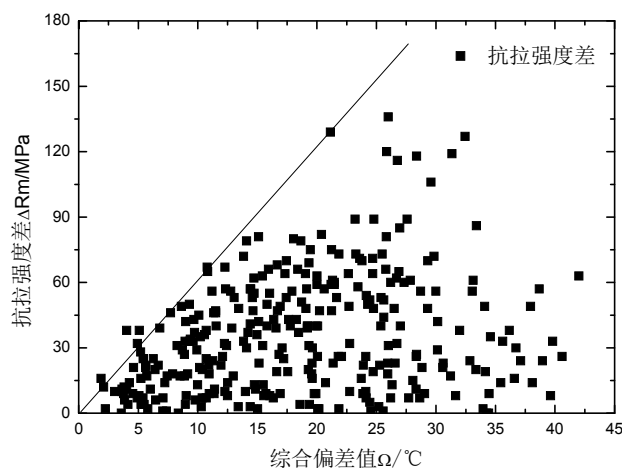
图3 综合偏差值 Ω 与热分析试样碳当量差值之间的关系Fig.3 The cooling curve difference (Ω) vs. the difference in carbon equivalent (ΔCE)

图3所示结果表明,热分析曲线凝固段是灰铸铁碳当量的可靠表征,当热分析曲线凝固段综合偏差 Ω 值趋于0时,热分析曲线趋于重合,铁液的碳当量趋于一致。

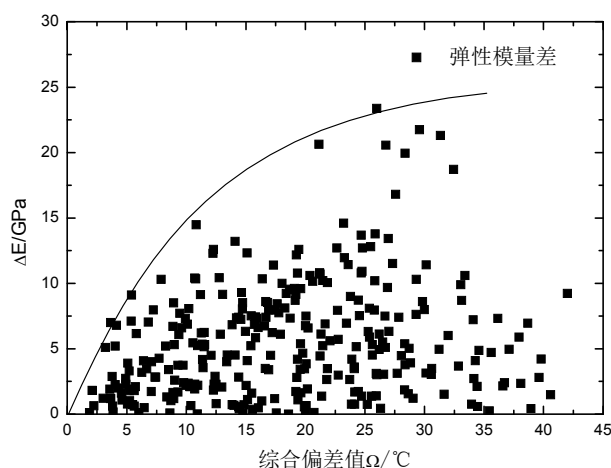
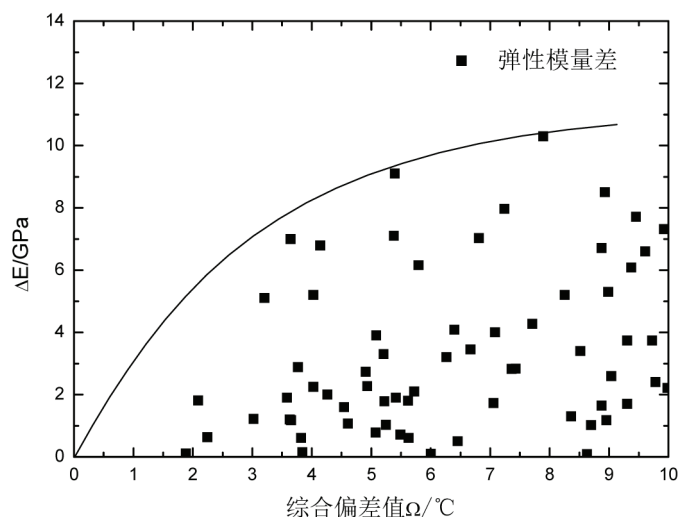
综合偏差值 Ω 与热分析试样抗拉强度差值的关系如图4所示。

图4 综合偏差值 Ω 与热分析试样抗拉强度差值之间的关系Fig.4 The cooling curve difference (Ω) vs. the difference in tensile strength (ΔRm)

共晶凝固阶段的冷却曲线在一定程度上与灰铸铁的抗拉强度存在着相互联系,从图4可以看出虽然综合偏差值 Ω 与抗拉强度差没有一一对应的关系,但是从包络线的轨迹可以看出,当 Ω 趋近于0时,抗拉强度的差也向0收敛。

灰铸铁的弹性模量 E 主要与石墨形态和数量有关^[12],凝固阶段冷却曲线与凝固组织相互联系,从而与弹性模量有相关关系。综合偏差值 Ω 与热分析试样弹性模量差值的关系如图5所示。

图6为综合偏差值小于10℃时,综合偏差值 Ω 与热分析试样弹性模量差值 ΔE 之间的关系。从图6可以看出,当 $\Omega < 3^\circ\text{C}$ 时,弹性模量差 ΔE 在5GPa以内。因此,在评判灰铁时,只要从数据库中识别出与待测曲线最相似的曲线,并且求得的 $\Omega < 3^\circ\text{C}$,则数据库曲线的弹性模量可以作为待测曲线弹性模量的参照,且预测精度 $< 5\text{GPa}$ 。

图 5 综合偏差值 Ω 与热分析试样弹性模量差值之间的关系Fig.5 The cooling curve difference (Ω) vs. the difference in elasticity modulus (ΔE)图 6 综合偏差值 Ω 与热分析试样弹性模量差值之间的关系Fig.6 The cooling curve difference (Ω) vs. the difference in elasticity modulus (ΔE)

3.2 灰铸铁弹性模量测评实例

表 2 为国内某大型机床厂所述铸造分厂的工业现场采集灰铸铁的化学成分及力学性能。图 7 是工业现场采集的两条相似的热分析曲线及其凝固段，其凝固段综合偏差 $\Omega=2.2^{\circ}\text{C}$ ，对应热分析试样的凝固组织如图 8 所示。

表 2 热分析试样化学成分及力学性能

Table2 Chemical compositions and mechanical properties corresponding to two cooling curves

编号	C	Si	Mn	P	S	CE	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
1	3.01	1.79	0.95	0.048	0.077	3.56	336	139.2
2	3.09	1.70	0.89	0.054	0.082	3.61	334	139.8
3	3.48	2.03	0.72	0.061	0.068	4.11	218	119.3

由图 8 和表 2 可见，当灰铸铁铁液热分析曲线凝固段的综合偏差判据 Ω 足够小时，其熔体状态差别很小，不仅化学成分、热分析试样凝固组织石墨形态趋于一致，弹性模量也趋于一致。

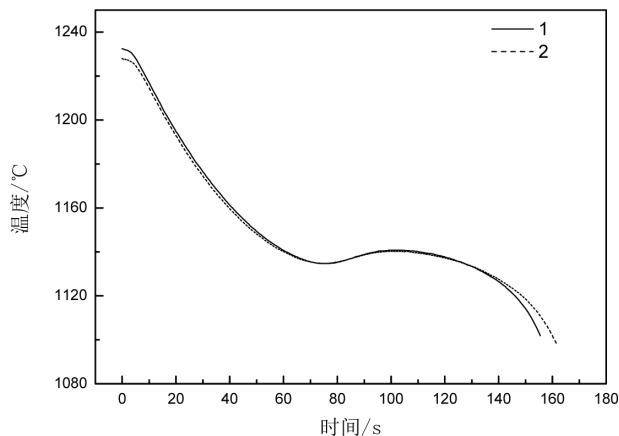
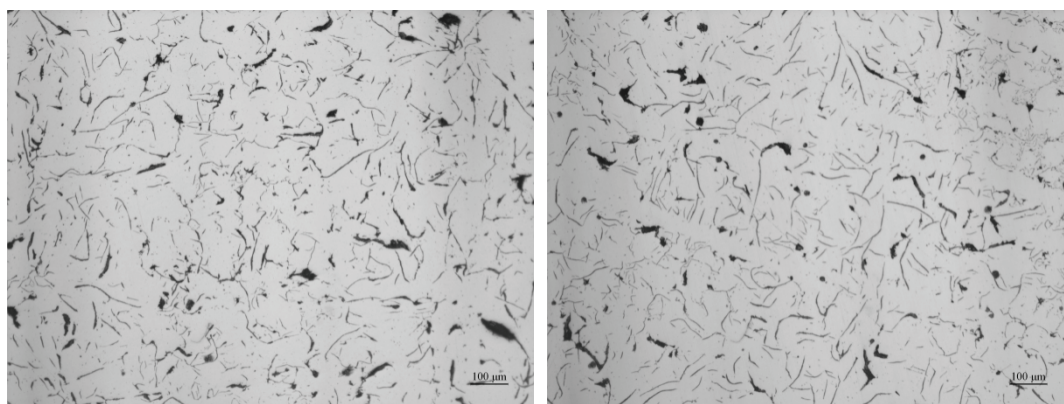
图 7 综合偏差值 $\Omega=2.2^{\circ}\text{C}$ 的热分析曲线凝固段

Fig.7 Two thermal analysis curves with comprehensive difference of 2.2



(a) 1#热分析曲线对应金相组织

(b) 2#热分析曲线对应金相组织

图 8 1#和 2#曲线对应灰铸铁凝固组织石墨形态

Fig.8 Optical micrographs of the gray cast iron corresponding to cooling curves No.1 and 2

考察待测热分析曲线与已有数据库中的标准曲线明显不同，综合偏差值较大的情况。图 9 是在工业现场采集的综合偏差 $\Omega=21.7^{\circ}\text{C}$ 的热分析曲线凝固段，其对应的热分析试样凝固组织如图 10 所示，化学成分及机械性能见表 2 中 1#、3#所示。

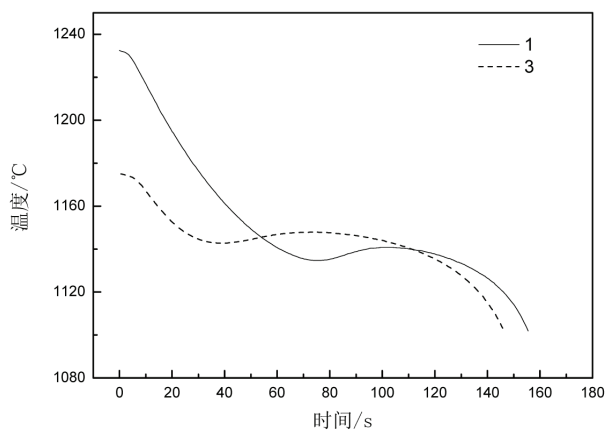
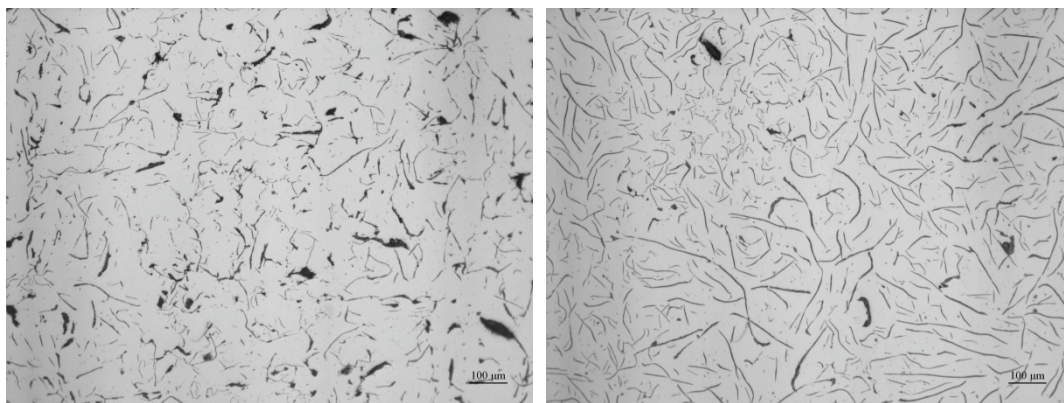
图 9 综合偏差值 $\Omega=21.7^{\circ}\text{C}$ 的热分析曲线凝固段

Fig.9 Two thermal analysis curves with comprehensive difference of 21.7



(a) 1#热分析曲线对应金相组织

(b) 3#热分析曲线对应金相组织

图 10 1#和 3#曲线对应灰铸铁凝固组织石墨形态

Fig.10 Optical micrographs of the gray cast iron corresponding to cooling curves No. 1 and 3

由图 10 和表 2 可见, 综合偏差值较大时, 其凝固组织及弹性模量等力学性能可能有较大偏差。当待测评曲线与已有标准数据库中标准曲线最小综合偏差值仍然较大时, 测评得到的弹性模量可能存在较大偏差。若该曲线信息可靠, 得到该曲线信息及对应各项性能加入标准数据库, 则进一步提高弹性模量等性能炉前测评的准确性。

综上所述, 热分析曲线凝固段是灰铸铁熔体状态可靠表征, 通过这种方法对灰铸铁的弹性模量进行炉前测评是可行的。

4 结论

(1) 采用超声共振谱仪测量灰铸铁弹性模量, 将弹性模量列入炉前测评指标, 对提高机床弹性模量具有重要意义。

(2) 基于冷却曲线模式识别技术的液态金属熔体质量测评方法的热分析曲线凝固段是灰铸铁熔体状态的可靠表征, 当灰铸铁液热分析曲线凝固段的综合偏差判据 Ω 足够小时, 不仅温度、化学成分、热分析试样凝固组织石墨形态趋于一致, 抗拉强度, 弹性模量也趋于一致。

(3) 当 $\Omega < 3^\circ\text{C}$, 则数据库曲线的弹性模量可以作为待测曲线弹性模量的参照, 且预测精度 $< 5\text{GPa}$ 。

参考文献:

- [1] 马敬仲, 袁亚娟. 由若干企业的调查数据看我国机床铸件质量及其发展方向[J]. 现代铸铁, 2010, 04: 15-23.
- [2] 马敬仲. 抓住关键技术提高机床铸件质量[J]. 铸造, 2011, 07: 666-672+675.
- [3] 黎振华. 厚大断面球墨铸铁件凝固过程热模拟与石墨畸变预测研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [4] 徐雪蓉. 热分析曲线智能识别与铁液质量评估 [D]. 北京: 清华大学, 2001.
- [5] 陈祥, 李言祥. 数字化热分析铸铁熔体质量表征与测评技术[J]. 现代铸铁, 2011, 06: 75-81.
- [6] 李言祥, 王强, 徐雪蓉. 液态金属质量的表征与测评技术进展[J]. 材料导报, 2002, (8): 1-4.
- [7] 李言祥, 胡晓. 冷却曲线人工智能识别与新一代铸造合金熔体质量评估技术[J]. 铸造, 1999, 48(7): 5-7.
- [8] Y.X. Li, X. Hu, X.R. Xu, Pattern recognition of thermal analysis cooling curves and quality evaluation of melt cast alloys, Journal of Materials Science & Technology. 2001, 17(1): 73-74.
- [9] Q. Wang, Y.X. Li, X.C. Li. Grain Refinement of Al-7Si Alloys and the Efficiency Assessment by Recognition of Cooling Curves. Metallurgical and Materials Transactions: A. 2003, 34A(5): 1175-1182.
- [10] 耿慧远. 亚共晶铝硅合金熔体非平衡状态冷却曲线表征法及其应用[D]. 北京: 清华大学机械工程系, 2005.
- [11] Li YX., Xu XR, Wang Q, et al. Evaluating melt iron features by computer aided recognition of thermal analysis cooling

curves. International Journal of Cast Metals Research. 2003, 16(1-3): 41-45.

[12] 钟雪友,薛庆国,姜春梅. 灰铸铁弹性模量的影响因素[J]. 铸造,1990,01:10-13