

湿型砂力学本质特征曲线的研究

于荡洲

(瓦房店轴承铸造有限责任公司, 辽宁 瓦房店 116300)

摘要:用自制的型砂多项性能测试仪, 获得了型砂抗压、松弛、抗剪和抗拉测试过程中的应力—应变本质特征曲线, 并对它们进行了研究, 在特征曲线上确定了反映型砂本质性能的 8 项性能参数, 考察了膨润土含量和紧实率对型砂本质特征曲线和型砂性能参数的影响。型砂力学本质特征曲线决定于型砂的内部微观组织结构, 反映出型砂的粘弹性和粘塑性等本质性能, 体现出型砂在受力变形过程中的微变形本质特征。

关键词:湿型砂; 特征曲线; 粘弹性; 粘塑性; 微变形

中图分类号: TG221+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8365(2005)11-1024-05

Study on Characteristic Curves of Green Sand

YU Dang-zhou

(Wafangdian Bearing Casting Ltd., Wafangdian 116300, China)

Abstract: During the courses of compression, relaxation, shear and tensile tests, the characteristic curves of green sand were obtained with the self-made molding sand multi-property tester. These characteristic curves were intensively studied, and eight parameters which reflect the essential properties of green sand were defined. The effects of bentonite content and compactibility on the characteristic curves and eight parameters were investigated. It is concluded that the mechanical characteristic curves are determined by the microstructure of green sand, and then reflect the essential properties of green sand such as visco-elasticity, visco-plasticity, and the microdeformation during the loading process.

Key words: Green sand; Characteristic curve; Visco-elasticity; Visco-plasticity; Microdeformation

湿型砂是一种固、液、气 3 相共存的散体介质, 总体性能表现极为复杂。研究湿型砂的本质特征, 为湿型砂性能的检测和控制提供理论依据, 对于现代化铸造生产降低铸件废品率、减少生产成本和提高铸件质量具有重要意义。应力-应变曲线可反映出材料本身的一些重要力学性质, 能够对不同的材料进行比较。对湿型砂的应力-应变特征曲线进行研究, 同样可以揭示出湿型砂的一些本质特性。国内有人对型砂在静态压力作用下和气流冲击作用下, 当有侧限时的应力-应变关系曲线作了研究, 提出用应力-应变曲线作为反映型砂性能的手段^[1,2]。铸型的应力-应变曲线, 在不同的加载速度下是不同的^[3]。对于型砂在剪切应力作用下的应力-应变曲线, 仅 Boenisch 借助于型砂测微器进行了研究^[4,5], 而对于型砂在拉应力作用下的应力-应变本质特征曲线目前尚未见有研究报导。本文用自行研制的型砂性能测试仪^[6,7], 依据型砂微变形理论^[8], 对型砂砂样在抗压、松弛、抗剪、抗拉过程中的应力-应变本质特征曲线分别进行研究。

1 实验装置及实验方法

1.1 型砂性能测试仪简介

图 1 是我们研制的型砂性能测试仪, 此测试仪由砂样加载机械系统和单片机检测系统两部分组成。砂样加载机械系统包括左、右夹头、低转速小功率电机、皮带、蜗杆、蜗轮、螺旋推杆、位移推杆等部件。单片机检测系统包括由压力传感器、位移传感器组成的数据采集系统, 及进行数据处理和控制检测过程的 8098 单片机系统。测试时, 微型小功率电机通过皮带传动, 带动蜗杆蜗轮转动, 蜗轮带有内螺纹孔并联接有螺旋推杆, 蜗轮每转动一周, 螺旋推杆前移一个螺距, 将力经过压力传感器和左夹头施加到砂样上, 从而实现砂样加载; 同时, 由于位移推杆固定在螺旋推杆上, 螺旋推

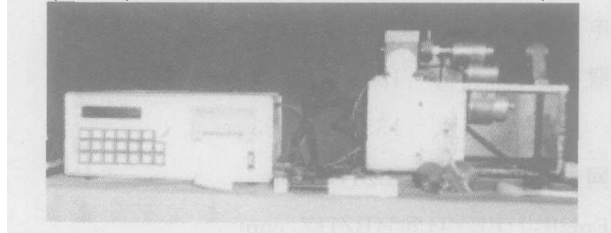


图 1 铸造型砂多项性能测试仪

Fig. 1 Molding sand multi-property tester

收稿日期: 2005-07-13; 修订日期: 2005-10-02

作者简介: 于荡洲(1970-) , 辽宁大连人, 工程师, 从事技术管理工作。

杆前进带动位移推杆平稳移动位移传感器触头。由压力传感器和位移传感器分别对砂样的应力、应变状态进行监测,所采集的模拟量信号经放大处理后送入 8098 单片机系统进行数据处理。

1.2 应力-应变曲线测试方法

将标准砂样放置在左夹头和右夹头中间,通过 8098 单片机系统操作面板上的键盘,按下相应功能键,由 8098 程序软件控制分别对四个砂样进行抗压、松弛、抗剪、抗拉测试,并打印出各测试过程的应力-时间、应变-时间、应力-应变本质特征曲线。抗压、松弛、抗剪测试采用 $\phi 50 \times 50$ mm 标准砂样和相应标准砂样夹头,利用 500 N 压力传感器采集应力信号;抗拉测试采用标准“”字形砂样和砂样夹持装置,并需要将 500 N 压力传感器更换为 50 N 压力传感器,以提高测试精度。

1.3 型砂制备和砂样制取

实验用型砂由小型轱辘混砂机混制,原砂采用内蒙古大林标准砂 ZGS90-21Q-30,粘土采用辽宁黑山钙基膨润土粉。具体混砂工艺为:原砂 + 粘土粉 干混 2 min 加入适量的水 湿混 12 min 出砂。出轱辘的型砂用网孔为 0.25 英寸的筛网过筛松散均匀后,装入密封塑料袋中存放回性 12 h 以上。砂样制取时,将回性过的型砂再用筛网过筛,并调整紧实率到要求数值。

2 实验结果及分析

2.1 砂样抗压过程的应力-应变特征曲线分析

实验得到的砂样抗压测试过程的应力-应变曲线见图 2。根据型砂的流变模型^[9]和砂样的变形特征,将曲线分成 3 个阶段(见图 2a 中曲线 1):

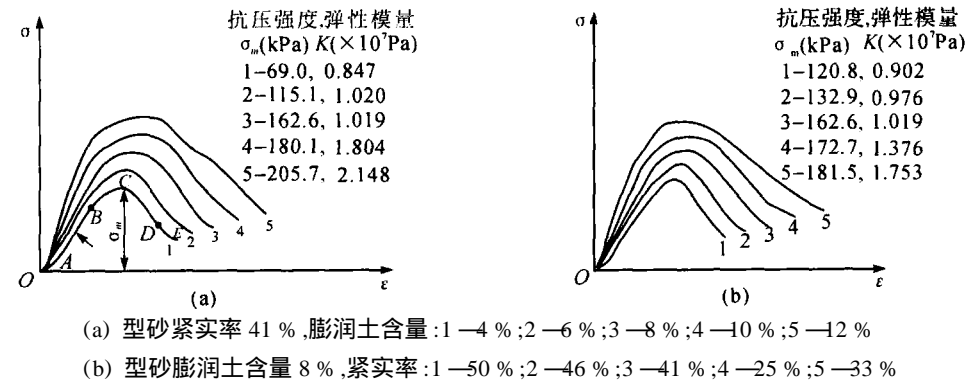


图 2 抗压测试过程砂样的应力-应变特征曲线
Fig. 2 Stress-strain characteristic curves of standard sand specimen in compression tests

(1) 粘弹性变形阶段——曲线 OB 段

在这一阶段中,标准砂样发生粘弹性变形,而砂样的粘塑性体不发生变形。从图 2 看出,曲线 OB 段起始部分 OA 段并不是直线,这说明砂样的粘弹性变形在此阶段发生的是滞弹性变形,即变形虽然也服从虎克定律,但在加载的瞬时并不是直线关系,而是要经过一段时间后才能达到虎克定律所对应的线性关系。这表明:砂样在加载的最初阶段,由于粘土膜的流变特性,粘土膜受压开始变形,导致了湿型砂弹性模量并不是一个定值,而是在不断变化,这与文献^[10]中结论一致。当压实到一定程度,粘土膜的变形由于弹性应变能积蓄到一定程度而受到阻滞,此时,弹性模量在一定时间内保持不变,在 — 曲线上表现为应力与应变成线性关系,直至砂样发生粘塑性变形。此阶段的滞弹性变形与湿型砂的粘性密切相关。从图 2a 中看出,随着粘土含量的增加,要达到虎克定律线性关系所需要的时间越长,这是由于粘土含量越多,砂粒之间的粘土膜越厚,湿型砂的粘性特征表现愈明显。反之,湿型砂

粘土含量越少,砂样越倾向于在加载的瞬时即发生服从虎克定律线性关系的弹性变形,在 — 曲线上表现为从加载一开始应力与应变就成直线关系。从图 2b 可以看出,由于紧实率影响砂粒之间粘土膜的流变性能,因而也影响着滞弹性变形达到符合虎克定律对应的直线关系所需要的时间长短。

此阶段的粘弹性变形主要是粘土膜开尔文体的弹性变形,因为此时砂粒在粘土膜的包覆下,并没有互相直接接触,加之应力较小,砂粒的弹性变形不起作用。

线段 AB 的斜率定义为砂样的弹性模量 K ,它体现出湿型砂砂粒间粘土膜的粘弹性性能,是湿型砂的一个重要物理常数。

(2) 粘塑性变形阶段——曲线 BD 段

在这一阶段,随着应力的增加,砂样的粘塑性体开始发生粘塑性变形,应力和应变不再呈线性关系。在应力作用下,粘土浆开始从砂粒间隙挤出,使砂样产生微小的不可逆变形。随着应力的进一步增大,当应力超过砂样所能承受的极限应力值——抗压强度 σ_m 时,

粘土膜逐渐发生畸变,砂样内部的砂粒相互间产生微小的滑移,导致应力逐渐下降。

在此阶段,湿型砂仍有一定的弹性变形,一方面是随着粘土膜的渐渐变薄,砂粒互相接近,砂粒将产生一定的弹性变形,另一方面是变化的粘土膜在应力作用下仍有微量的弹性变形,但是这些弹性变形与粘土膜粘塑性变形相比要小得多,它们将被粘土膜的塑性变形所掩盖,因而在此阶段结束时卸载,湿型砂发生的是不可逆塑性变形,而不再产生回弹行为。

(3) 破裂阶段——曲线 DE 段

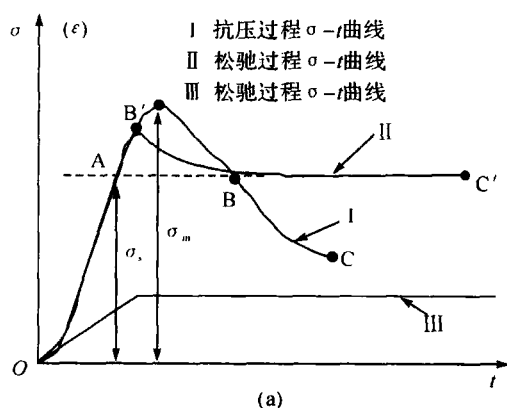
在这一阶段中,湿型砂砂粒之间的粘土膜受到剪切力作用,粘土膜逐渐被剪切破坏,砂粒间产生更大的滑移,并沿滑移线产生裂纹,至此,砂样破裂。

从图 2 还可以看出,对于不同膨润土含量和紧实率的湿型砂,砂样抗压过程的应力—应变特征曲线不同。在同一紧实率下,型砂抗压强度和弹性模

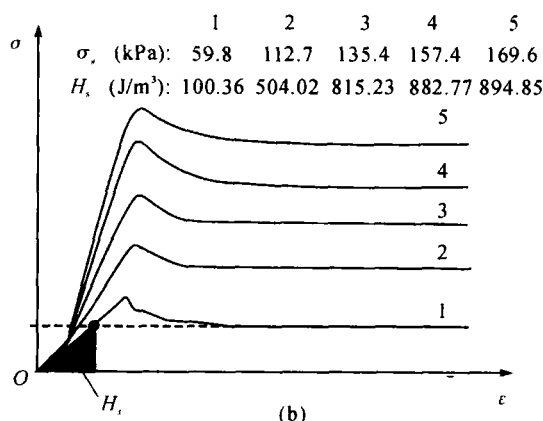
量均随着膨润土含量的增加而增大(见图 2a);而在相同膨润土含量条件下,型砂抗压强度和弹性模量均随着紧实率减小先增大后减小,在紧实率 33 % 时达到极大值,见图 2b。这说明砂样抗压过程的应力—应变曲线反映出型砂组成成分和力学性能的不同。

2.2 砂样松弛过程的特征曲线分析

松弛测试是将标准砂样进行加载,在加载过程中,由 8098 程序软件控制,当砂样所受应力值临近抗压强度值之前任一位置,切断电机电源,停止加载,保持位移传感器的位置不变,使砂样在定应变下发生松弛,直至应力趋于定值,并称此定值为塑变临界值,它是湿型砂在外力作用下发生粘塑性变形的临界点。图 3 为实验得到的砂样松弛测试过程的特征曲线。根据砂样松弛的变形特征,将砂样松弛过程的应力—时间曲线(见图 3a 曲线)也分为 3 个阶段:



(a) 型砂膨润土含量 10 %, 紧实率 33 %, 测得的抗压强度 σ_m 为 196.6 kPa, 塑变临界值 σ_s 为 157.4 kPa



(b) 型砂紧实率 33 %, 膨润土含量: 1—4 %; 2—6 %; 3—8 %; 4—10 %; 5—12 %

图 3 砂样松弛测试过程的特征曲线

Fig. 3 Characteristic curves of sand specimen in relaxation tests

(1) 粘弹性变阶段——曲线 OA 段

(2) 粘塑性变形阶段——曲线 AB 段

AB 段与抗压测试 $\sigma-\epsilon$ 曲线上 AB 段的前一部分重合, 主要发生粘塑性变形。B 点是抗压测试 $\sigma-\epsilon$ 曲线上 A 点和抗压强度值 σ_m 之间的任意一点, 松弛测试时, 在 B 点电机停机, 砂样开始松弛。

(3) 松弛阶段——曲线 BC 段

砂样的松弛是由湿型砂粘塑性体即粘土膜宾汉体的松弛而引起的。图 3a 中抗压测试 $\sigma-\epsilon$ 曲线上的 A 点、B 点分别是松弛曲线 BC 的水平段的反向延长线与抗压过程 $\sigma-\epsilon$ 曲线的两个交点, A 点对应的应力值即为塑变临界值 σ_s 。

在砂样松弛过程的 $\sigma-t$ 上, 曲线 OA 段与水平横

坐标轴所包围的面积称之为回弹势能 H_s (见图 3 (b)), 它是表征湿型砂发生回弹的能力和砂型发生回弹的倾向的指标。回弹势能的含义为粘土膜发生弹性变形所吸收的应变能, 它反映出湿型砂的回弹性能, 可作为湿型砂回弹性能的检测指标^[11]。

图 3b 反映出膨润土含量对松弛过程 $\sigma-t$ 特征曲线及塑变临界值、回弹势能的影响。图中可见, 随着膨润土含量的增加, 型砂的塑变临界值和回弹势能均增大。同样, 型砂紧实率不同, 松弛过程 $\sigma-t$ 特征曲线和塑变临界值、回弹势能也不相同。

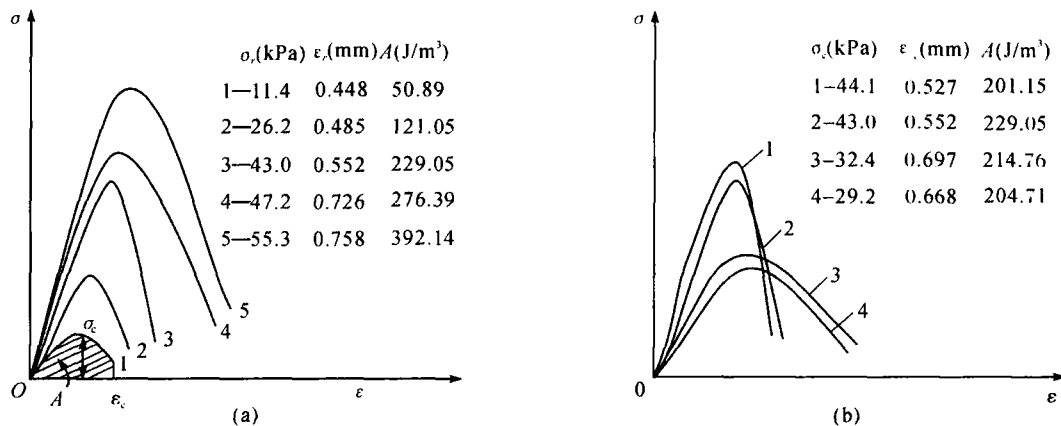
2.3 砂样抗剪过程的应力-应变特征曲线分析

实验获得的砂样抗剪过程的本质特征曲线见图 4。从图可以看出, 湿型砂抗剪过程的 $\sigma-\epsilon$ 曲线类似

于抛物线型,但并非二次抛物线,经过大量实验数据的实际计算,也证明了这一点。砂样剪切变形的过程分析如下:加载一开始,型砂在剪切应力的作用下,砂粒粘土膜直接受到剪切作用而发生微小变形,这一变形只与砂粒之间粘土膜的粘结力有关,而不受型砂的流变特性影响,因此砂样抗剪 — 曲线在初始阶段不像抗压测试 — 曲线那样出现滞弹性变形现象,对于不同粘土含量和紧实率的砂样,其抗剪 — 曲线在初始阶段的形状均相似。随着剪切应力的进一步增大,砂粒之间的内摩擦力也在不断增大,同时还需要进一步克服型砂颗粒之间的附着力和内聚力,以及颗粒与颗粒互相楔入而产生的啮合力,直至剪切应力超过砂样的极限剪切应力值——抗剪强度 σ_c ,砂粒沿剪切面开始滑移,应力逐渐减小,抗剪 — 曲线下滑,最终砂样出现细小裂纹而被剪切破坏。可见,湿型砂的剪切过

程可以分成两个阶段:在低应力阶段,粘结力对剪切的影响较大,是粘结阻力为主的剪切阶段;在高应力阶段,是以摩擦力和啮合力为主的阶段,但是这两个阶段之间的界限很难划分。

砂样在剪切破坏过程中产生的总的变形量称为剪切变形极限 ϵ_c ,它主要决定于型砂粘土膜的塑性和粘土膜的粘结力,反映出砂型承受塑性变形的能力。抗剪过程 — 曲线与水平横坐标轴所包围的面积定义为韧性指数 A (见图4(a)),它是反映型砂砂粒间粘土膜的粘结力、粘塑性和粘弹性性能等的一项综合性能指标,其含义是砂样抵抗外力破坏所需要的能量。图4a和图4b分别反映出膨润土含量和紧实率对型砂抗剪测试 — 特征曲线及对抗剪强度、剪切变形极限、韧性指数等型砂性能参数的影响。

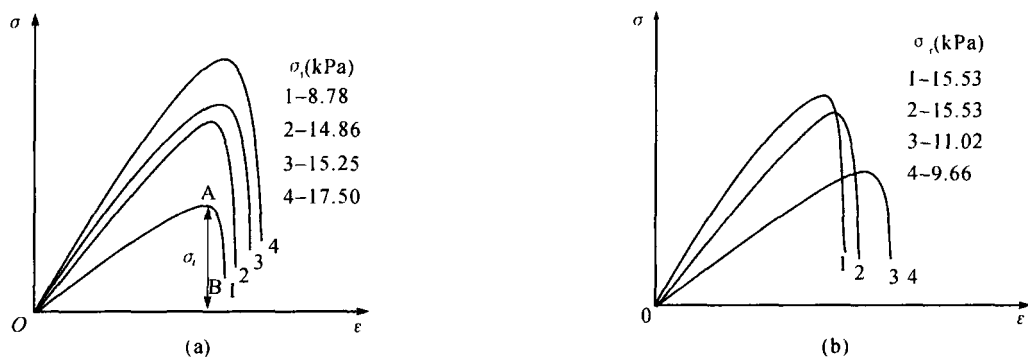


(a) 型砂紧实率 41%, 膨润土含量: 1—4%; 2—6%; 3—8%; 4—10%; 5—12%

(b) 型砂膨润土含量 8%, 紧实率: 1—33%; 2—41%; 3—50%; 4—55%

图4 抗剪测试过程砂样的应力-应变特征曲线

Fig. 4 Stress-strain characteristic curves of sand specimen in shear tests



(a) 型砂紧实率 41%, 膨润土含量: 1—6%; 2—8%; 3—10%; 4—12%

(b) 型砂膨润土含量 8%, 紧实率: 1—33%; 2—41%; 3—46%; 4—50%

图5 抗拉测试过程砂样的应力-应变特征曲线

Fig. 5 Stress-strain characteristic curves of sand specimen in tensile tests

2.4 砂样抗拉过程的应力-应变特征曲线分析

图5所示为实验获得的砂样抗拉测试过程的本质特征曲线。按照变形特征,这些曲线均可以分成2个阶段:

(1) 粘土膜粘塑性变形阶段——曲线OA段

A点为抗拉——曲线上应力的峰值点,A点的应力值即为抗拉强度 σ_t 。在这一阶段中,砂样在拉应力的作用下,砂粒之间的粘土膜逐渐变窄变长,发生不可逆的粘塑性变形,直至粘土膜达到抵抗拉伸变形的内聚强度最高限,即砂样所受应力达到抗拉强度极限值 σ_t ,便进入破裂阶段。

(2) 破裂阶段——曲线AB段

在此阶段,由于砂样所受拉应力已超过粘土膜的内聚强度极限值或粘土膜与砂粒的附聚强度极限值,因此粘土膜被拉断或者粘土膜与砂粒脱离,此时砂样所受应力急剧减小,迅速发生破坏。这一阶段所经历的时间极短,在——曲线上表现出来AB段非常陡。这说明,一旦砂型所受应力超过其抗拉强度值,便会发生迅速破坏。

图5a和图5b分别反映出膨润土含量和紧实率对型砂抗拉测试——特征曲线及对抗拉强度值的影响。从图5a可以看出,随着膨润土含量的增加,型砂抗拉测试——特征曲线和抗拉强度值均升高。这是由于随着膨润土含量的增加,砂粒间粘土膜的厚度增加,粘结桥变长变宽,粘结桥粘结面积增大,从而使砂粒间粘土膜的内聚强度和附着强度都增加。从图5b可以看出,紧实率为33%的型砂其抗拉测试——特征曲线和抗拉强度值相对较高,说明此种型砂的水分较适宜,此时型砂膨润土颗粒吸水膨胀,充分润湿,使型砂粘土膜的内聚强度和附着强度都达到较佳值。若紧实率高于33%时,由于含水量较多,有一部分水分子已不受膨润土颗粒的静电吸引而成为自由水,砂粒间过多的自由水将削弱粘结剂的粘结能力,从而使粘土膜的内聚强度和附着强度都降低,因而图5b中其他紧实率的型砂其抗拉测试——特征曲线和抗拉强度值相对较低。

由此可见,型砂抗拉测试——特征曲线和抗拉强度值主要取决于粘土膜的内聚强度和附着强度,而且,由于抗拉测试对型砂施加的是拉应力,砂粒间粘土膜中的死土颗粒、粉尘等杂质只能减小其抗拉强度值,因此抗拉测试最能真实地反映出型砂的内聚强度和附着强度,从而检测到真实的型砂强度性能。在铸造生产实践中,应以抗拉强度值作为湿型砂强度性能的日常检测参数。

3 结论

(1) 基于材料力学和型砂微变形理论,由型砂抗压、松弛、抗剪、抗拉测试过程所获得的力学本质特征曲线确定了检测湿型砂本质性能的八项性能参数,它们分别是抗压强度 σ_m ,弹性模量 K ,塑变临界值 σ_s ,回弹势能 H_s ,抗剪强度 σ_c ,剪切变形极限 σ_{cs} ,韧性指数 A ,抗拉强度 σ_t ,从特征曲线上反映出这八项型砂性能参数的确切的物理含义。膨润土含量和紧实率对湿型砂的这8项性能参数有较大影响。随着膨润土含量的增加,这8项型砂性能参数均增大。

(2) 型砂力学本质特征曲线反映出型砂在受力变形过程中的微变形本质特征,它们与型砂粘土膜的粘弹性、粘塑性性能密切相关,是型砂粘性、弹性、塑性等本质性能的综合体现。膨润土含量和紧实率对型砂本质特征曲线有直接影响。经过进一步定量研究的应力-应变特征曲线能反映出型砂组成成分和力学性能的不同。根据型砂本质特征曲线的形状和在特征曲线上所确定的八项性能参数值的大小,可以判断出型砂配方和混砂工艺的优劣。型砂力学本质特征曲线可以作为湿型砂性能检测的手段之一。

参考文献

- [1] 谢滨,吴浚郊,陈浩. 型砂某些基本力学性能的研究[J]. 中国铸机, 1992(4): 6-10.
- [2] 吴浚郊,谢滨. 型砂动态本构关系的研究[J]. 中国铸机, 1994(1): 53-55.
- [3] 虞和洵. 加载速度对压实紧砂过程的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 1996(3): 46-49.
- [4] Boenisch D. New Concepts of Green Sand Technology[J]. Foundry Management & Technology, 1988(2): 21-27.
- [5] Boenisch D. New Concepts of Green Sand Technology[J]. Foundry Management & Technology, 1988(3): 38-46.
- [6] 谢祖锡. 铸造型砂多项机械性能测试方法及实施该方法的系统[P]. 中国专利 ZL93115765. X.
- [7] 向青春. 智能化铸造型砂多项性能测试仪的开发研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学硕士学位论文, 1997.
- [8] 谢祖锡,李荣德,陈士梁. 型砂性能检测的新探索[J]. 机械工程学报, 1998(3): 85-89.
- [9] 陈士梁. 型砂流变模型的探讨[J]. 铸造设备研究, 1982(2): 85-96.
- [10] 1968(3): 45-53.
- [11] 向青春,谢祖锡,李荣德,等. 型砂回弹性能测定与回弹机理初探[J]. 中国铸造装备与技术, 1999(6): 14-17.