

# 东鞍山贫铁矿石磁选预富集行为

余建文, 韩跃新, 李艳军, 高 鹏

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对东鞍山贫铁矿石( $\text{Fe}$  质量分数 34.60%) 中含有赤铁矿、磁铁矿和少量的菱铁矿, 提出了一种弱磁粗选-高梯度扫选的预富集工艺, 并借助 XRD、铁的化学物相分析及扫描电镜(SEM) 考察了磁场强度和原料磨矿细度对东鞍山铁矿石预富集行为的影响. 结果表明, 在磨矿细度-0.074 mm 占 70% (质量分数)、弱磁粗选磁场强度 120 mT、高梯度扫选 I 磁场强度 300 mT 及高梯度扫选 II 磁场强度 800 mT 的条件下, 可获得  $\text{Fe}$  质量分数 42.67%、回收率 95.45% 的预富集精矿; 磁铁矿富集于弱磁粗选作业中, 赤铁矿和菱铁矿在高梯度扫选作业中得到有效富集, 尾矿中丢失的铁矿物主要为微细粒赤铁矿( $< 10 \mu\text{m}$ ), 由于受到的磁性捕获力弱而无法得到回收.

**关 键 词:** 贫铁矿石; 赤铁矿; 磁铁矿; 磁选; 预富集行为; 磁性捕获力

中图分类号: TD 924.1; TD 951 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)01-0094-05

## Pre-enrichment Behaviors of Low-Grade Donganshan Iron Ore Using Magnetic Separation

YU Jian-wen, HAN Yue-xin, LI Yan-jun, GAO Peng

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HAN Yue-xin, E-mail: dongdafulong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A pre-enrichment process of low-intensity magnetic roughing followed by high-gradient magnetic scavenging was proposed, and the effects of magnetic field intensity and grinding fineness on pre-enrichment behaviors of low-grade ( $w(\text{TFe}) = 34.60\%$ ) Donganshan iron ore simultaneously containing hematite, magnetite and a bit of siderite were studied by XRD, chemical phase analysis of iron, and scanning electron microscope (SEM). The results showed that the optimized grinding fineness of raw ore was 70% passing 0.074 mm, the magnetic field intensity for roughing, scavenging I and II were 120 mT, 300 mT and 800 mT, respectively. Under the optimized conditions, a magnetic pre-concentrate assaying 42.67% iron (mass fraction) with an iron recovery of 95.45% was achieved. The analyses revealed that ferromagnetic magnetite was enriched in low-intensity magnetic concentrate, and weakly magnetic hematite and siderite were recovered successfully by high-gradient magnetic separation. However, some ultra-fine hematite particles ( $< 10 \mu\text{m}$ ) were lost in tailing due to their weak magnetic trapping force.

**Key words:** low-grade iron ore; hematite; magnetite; magnetic separation; pre-enrichment behaviors; magnetic trapping force

预富集通常是指矿石进入磨矿作业之后, 用适宜的选矿方法预先分离出部分尾矿以提高入料矿石品位的选别作业<sup>[1-3]</sup>. 为了提高入料矿石品

位和后续分选效率, 近年国内外研究学者广泛采用预富集工艺, 并开展了相关应用基础研究<sup>[4-6]</sup>. 基于复杂难选铁矿“预富集—悬浮磁化焙烧—磁选”新技术, 本文提出采用磁选方法对东鞍山贫

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51734005, 51674064); 中国博士后科学基金资助项目(2018M631812); 东北大学博士后基金资助项目(20180316).

作者简介: 余建文(1988-), 男, 江西余干人, 东北大学博士后研究人员; 韩跃新(1961-), 男, 内蒙古赤峰人, 东北大学教授, 博士生导师.

铁矿石进行预富集行为研究. 对低品位东鞍山铁矿石进行预富集,一方面可以有效脱除矿泥和部分脉石,降低脉石矿物和矿泥对后续悬浮磁化焙烧作业的影响<sup>[6-8]</sup>;同时获得粒度适宜(−0.5 mm)、质量均匀的预富集精矿,改善物料在悬浮焙烧炉内的流动特性,提高炉内物料的旋风分离效果;另一方面可以提高入炉物料的铁品位,大幅度降低后续悬浮磁化焙烧−磁选作业的处理量,提高生产效率<sup>[9-10]</sup>.

# 1 实验材料和实验方法

实验原料为东鞍山贫铁矿石,其化学成分(质量分数,%)为 TFe 34.60, FeO 6.40, SiO<sub>2</sub>

43.34, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.73, CaO 0.55, MgO 0.72, 主要有害元素 P, S 分别为 0.04 和 0.06. 矿石的矿物组成(质量分数,%)如表 1 所示. 矿石中主要回收矿物为赤铁矿和磁铁矿,其质量分数分别为 28.06% 和 12.68%.

针对东鞍山铁矿石中含有铁磁性矿物磁铁矿、弱磁性矿物赤铁矿及其浸染粒度粗细不均等特点,本文提出的具体预富集工艺流程为弱磁粗选—高梯度中磁扫选Ⅰ—高梯度强磁扫选Ⅱ. 其中,弱磁粗选作业主要是为了回收铁磁性的磁铁矿,以消除或减弱其对后续高梯度磁选作业的影响,如磁性夹杂、磁介质堵塞等;高梯度中磁扫选Ⅰ及强磁扫选Ⅱ作业主要是为了回收粗粒及细粒弱磁性赤铁矿和菱铁矿等. 具体工艺流程如图 1 所示.

表 1 矿石中矿物组成及含量(质量分数)								%
Table 1 Mineral compositions and contents of the ore( mass fraction)								
赤铁矿	磁铁矿	褐铁矿	菱铁矿	黄铁矿	石英	绿泥石	透闪石	其他
28.06	12.68	3.94	4.62	0.21	40.3	4.3	2.13	3.76

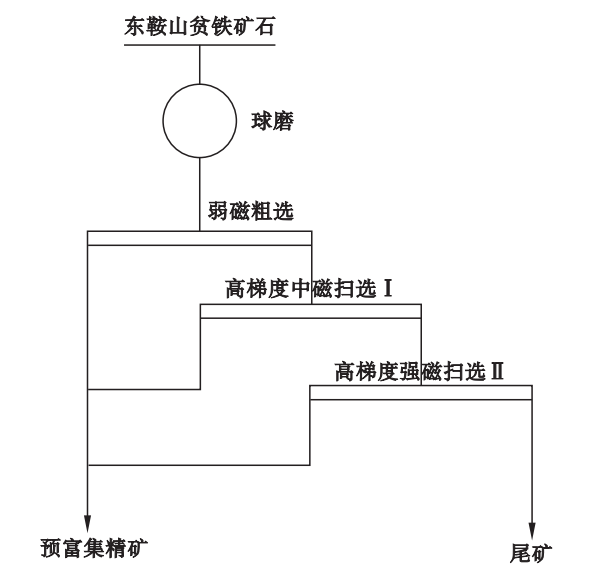


图 1 磁选预富集工艺原则流程图

## 2 结果与讨论

### 2.1 高梯度扫选Ⅰ 磁场强度对矿石预富集的影响

在确定弱磁粗选磁场强度 120 mT、磨矿细度 −0.074 mm 占 60% (质量分数) 的条件下,考察了中磁扫选Ⅰ 磁场强度 200, 250, 300, 350 及 400 mT 对矿石磁选分离效果的影响,实验结果如图 2 所示. 当扫选Ⅰ 磁场强度在 200 ~ 250 mT 之间时,随着磁场强度的增加,预富集精矿铁品位及回收率均升高;继续增加扫选Ⅰ 磁场强度,预富集精矿铁回收率逐渐升高,但品位开始下降. 这可能是由于磁场强度的提高促进了弱磁性粗粒赤铁矿

Fig. 1 Principle process flowsheet of magnetic pre-enrichment

实验过程中所使用的弱磁选机为 RK/CGS − φ400 × 300, 滚筒转速为 25 r/min, 磁场强度为 120 mT; 立环脉动高梯度磁选机为 SLon − 500, 磁介质为 φ2 mm 棒介质, 脉动冲程为 25 mm, 脉动冲次为 150 次/min, 立环转速为 0.5 r/min.

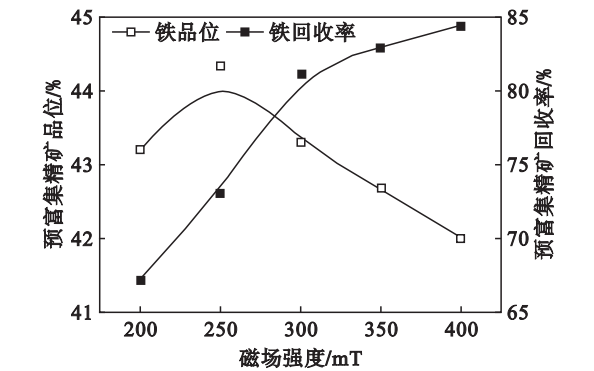


图 2 高梯度扫选Ⅰ 磁场强度对矿石预富集效果的影响  
Fig. 2 Effect of magnetic field intensity for high-gradient magnetic scavenging I on pre-enrichment of ore

的回收,铁品位及回收率均有所提升;但当磁场强度进一步升高时,一些粗粒赤铁矿-石英贫连生体也能得到有效回收,相应地降低了精矿铁品位. 综合考虑,选择适宜的高梯度扫选Ⅱ磁场强度为 300 mT.

2.2 高梯度扫选Ⅱ磁场强度对矿石预富集的影响

在确定高梯度扫选Ⅰ磁场强度为 300 mT 的条件下,考察了高梯度扫选Ⅱ磁场强度 500,600,700,800 及 900 mT 对矿石磁选分离效果的影响,实验结果如图 3 所示. 随着高梯度扫选Ⅱ磁场强度的增加,预富集精矿的铁品位呈线性降低,回收率则呈线性增加. 这可能是由于随着扫选Ⅱ磁场强度的增加,强化了微细粒赤铁矿、菱铁矿等弱磁性铁矿物的回收,但磁性矿物颗粒之间的磁性夹杂现象明显,石英等非磁性脉石矿物进入精矿的含量增多,故铁回收率逐渐增加而品位逐渐降低. 预富集的目的是在保证铁回收率的条件下,应尽可能地提高后续入炉物料的铁品位. 因此,确定适宜的高梯度扫选Ⅱ磁场强度为 800 mT.

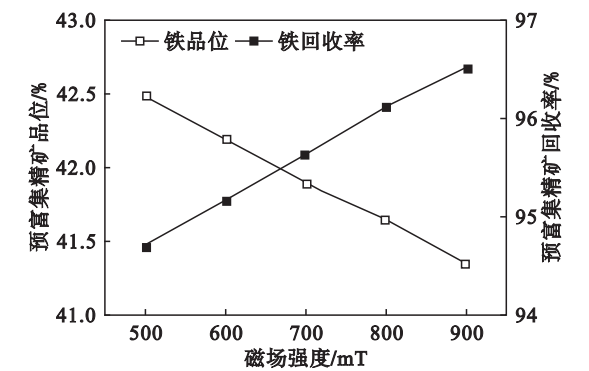


图 3 高梯度扫选Ⅱ磁场强度对矿石预富集效果的影响  
Fig. 3 Effect of magnetic field intensity for high-gradient magnetic scavenging Ⅱ on pre-enrichment of ore

2.3 磨矿细度对矿石预富集的影响

在确定高梯度扫选Ⅰ磁场强度 300 mT、扫选Ⅱ磁场强度 800 mT 的条件下,考察了原料磨矿细度对矿石磁选分离效果的影响,实验结果如图 4 所示. 随着磨矿细度 -0.074 mm 粒级质量分数由 50% 增加至 70% 时,预富集精矿铁品位迅速升高,回收率则急剧下降;进一步提高矿石磨矿细度,精矿铁品位逐渐增加,回收率缓慢降低. 这可能是由于原料粒度越细,有用铁矿物的单体解离度越高,预富集精矿铁品位越高;但原料粒度过细,一些微细粒赤铁矿、菱铁矿等弱磁性铁矿物受到的磁性捕获力不足,容易损失在尾矿中,造成铁回收率下降;此外,原料粒度过细容易造成磨矿过程能耗的增加. 因此,确定适宜的磨矿细度为

-0.074 mm 粒级质量分数为 70%,此时尾矿铁品位只有 6.94%,抛尾率达 23.94%.

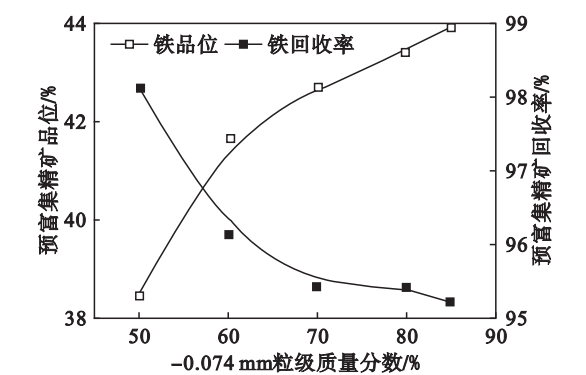


图 4 磨矿细度对矿石预富集效果的影响  
Fig. 4 Effect of grinding fineness on pre-enrichment of ore

2.4 矿石中铁矿物的预富集行为规律

为探明东鞍山铁矿石中赤铁矿、磁铁矿和菱铁矿等有用铁矿物在弱磁粗选-高梯度扫选工艺中的预富集行为规律,对工艺过程中不同阶段产品如弱磁粗选精矿、高梯度扫选Ⅰ精矿、扫选Ⅱ精矿及尾矿进行了 XRD 及铁的化学物相分析,结果如图 5 及表 2 所示.

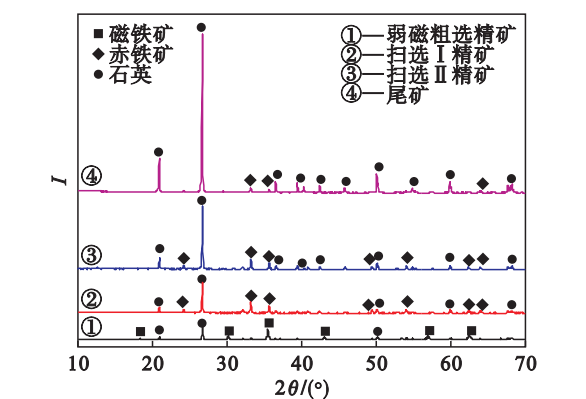


图 5 预富集不同阶段产品的 X 射线衍射图谱  
Fig. 5 XRD pattern of products for pre-enrichment process

结合图 5 与表 2 可知,弱磁粗选精矿中铁主要赋存于磁铁矿(89.05%)中,说明在弱磁选作业中得到有效回收的为磁铁矿;高梯度扫选Ⅰ及扫选Ⅱ精矿中铁主要赋存于赤铁矿中,其分布率分别为 90.49% 和 90.95%,其次以菱铁矿的形式存在(分布率分别为 6.21% 和 7.20%),说明在高梯度扫选过程中得到有效富集的铁矿物为赤铁矿和菱铁矿;尾矿中的铁主要以赤铁矿(78.39%)的形式存在,表明尾矿中丢失的铁矿物主要为赤铁矿.

图 6 为预富集不同阶段产品的扫描电镜图像. 由图 6a 可知,粗粒或细粒磁铁矿由于磁性强

表 2 预富集不同阶段产品中铁的化学物相分析

Table 2 Chemical phases of iron for products of pre-enrichment process

%

产品	铁的含量	Fe 的分布					全 铁
		磁铁矿中铁	赤铁矿中铁	菱铁矿中铁	硫化铁中铁	硅酸铁中铁	
弱磁选精矿	质量分数	47.49	3.53	1.51	0.51	0.29	53.33
	占比	89.05	6.62	2.83	0.96	0.54	100
扫选 I 精矿	质量分数	1.10	37.28	2.56	0.16	0.10	41.20
	占比	2.67	90.49	6.21	0.39	0.24	100
扫选 II 精矿	质量分数	0.29	29.54	2.34	0.21	0.10	32.48
	占比	0.89	90.95	7.20	0.65	0.31	100
尾矿	质量分数	0.05	5.44	0.67	0.49	0.29	6.94
	占比	0.72	78.39	9.65	7.06	4.18	100

均能在弱磁(120 mT)粗选作业中得到有效的富集;扫选 I 精矿颗粒的平均尺寸明显大于扫选 II 精矿颗粒(见图 6b 和图 6c),说明粗粒赤铁矿主要富集于高梯度中磁(300 mT)扫选 I 作业中,细粒赤铁矿(平均粒度约 20~40 μm)在高梯度强磁(800 mT)扫选 II 作业中能够得到有效的富集;如

图 6d 所示,尾矿中损失的铁矿物主要为微细粒(< 10 μm)赤铁矿,这部分赤铁矿由于粒度细、受到的磁性捕收力弱无法被磁极吸引而丢失于尾矿中。此外,粗选和扫选精矿中均含有一定量的石英,这可能是由于磁性或机械夹杂现象引起的。

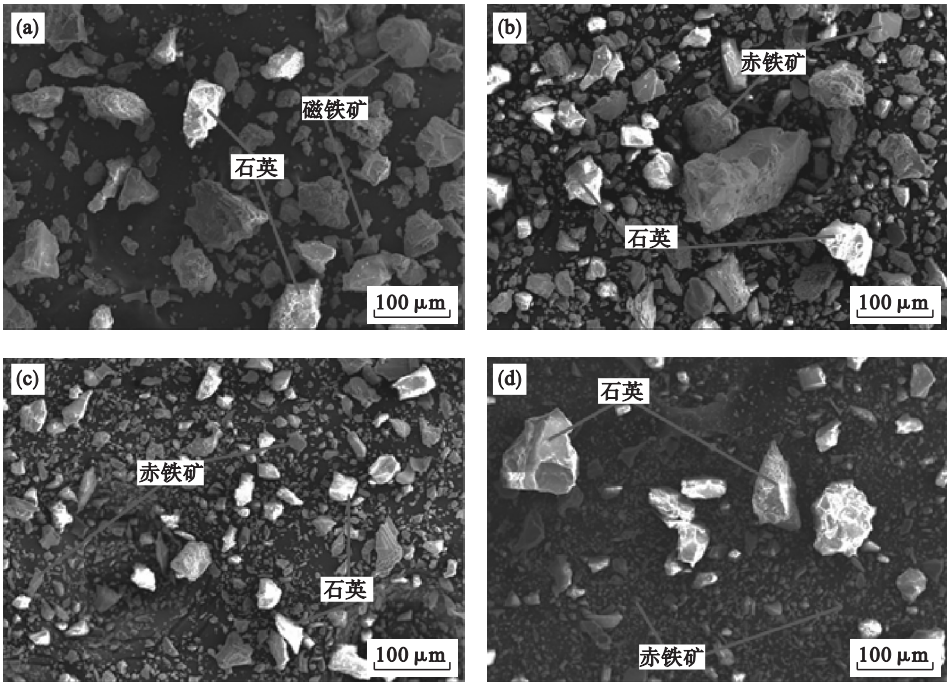


图 6 预富集不同阶段产品的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of products for pre-enrichment process

(a)—弱磁粗选精矿; (b)—扫选 I 精矿; (c)—扫选 II 精矿; (d)—尾矿。

### 3 结 论

1) 针对东鞍山贫铁矿石中同时含有铁磁性矿物磁铁矿、弱磁性矿物赤铁矿及其浸染粒度粗细不均等特点,提出了弱磁粗选—高梯度中磁扫选 I—高梯度强磁扫选 II 预富集工艺流程。在原

料磨矿细度 -0.074 mm 粒级质量分数 70%、弱磁粗选磁场强度 120 mT、高梯度扫选 I 磁场强度 300 mT 及高梯度扫选 II 磁场强度 800 mT 的条件下,可获得预富集精矿 Fe 质量分数 42.67%,回收率 95.45% 的优异指标。同时,尾矿铁品位只有 6.94%,抛尾率达 23.94%。

2) 矿石中的磁铁矿富集在弱磁粗选作业中,



粗粒赤铁矿和菱铁矿主要在高梯度中磁扫选Ⅰ中得到回收,高梯度强磁扫选Ⅱ作业强化了细粒赤铁矿和菱铁矿的回收,但部分微细粒赤铁矿( $< 10\text{ }\mu\text{m}$ )由于受到的磁性捕获力弱无法被磁极吸引而损失于尾矿中.

参考文献:

[1] Lu D, Wang Y, Jiang T, et al. Study on pre-concentration efficiency of wolframite from tungsten ore using gravity and magnetic separations [J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2016, 52(2): 718 – 728.

[2] 边颖, 张一敏, 包申旭, 等. 含钒石煤选矿预富集技术[J]. 金属矿山, 2013(9): 94 – 99.  
(Bian Ying, Zhang Yi-min, Bao Shen-xu, et al. Vanadium pre-concentration technology from vanadium-bearing stone coal mine[J]. *Metal Mine*, 2013(9): 94 – 99.)

[3] 孙小俊, 曾祥龙, 李建华, 等. 基于磁选预富集的湖北枣阳金红石矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2016(1): 93 – 96.  
(Sun Xiao-jun, Zeng Xiang-long, Li Jian-hua, et al. Rutile ore pre-concentration tests based on magnetic processing in Zaoyang Hubei[J]. *Metal Mine*, 2016(1): 93 – 96.)

[4] 王成行, 胡真, 邱显扬, 等. 强磁选预富集氟碳铈型稀土矿的可行性[J]. 稀土, 2016, 37(3): 56 – 62.  
(Wang Cheng-hang, Hu Zhen, Qiu Xian-yang, et al. Practicability research on pre-concentration process by HIMS

for bastnaesite type rare earth ore[J]. *Chinese Rare Earths*, 2016, 37(3): 56 – 62.)

[5] Quast K, Skinner W, Addai-Mensah J. Physical separations as potential techniques for preconcentration of nickel laterites [C]//Chemeca 2016: Chemical Engineering—Regeneration, Recovery and Reinvention. Melbourne, 2016: 77 – 88.

[6] Quast K, Addai-Mensah J, Skinner W. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. part 5: effect of mineralogy[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 110: 31 – 39.

[7] Srivastava J P, Pathak P N. Pre-concentration: a necessary step for upgrading tungsten ore[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 60(1): 1 – 8.

[8] Quast K, Connor J N, Skinner W, et al. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. part 2: laboratory experiments[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 269 – 278.

[9] Quast K, Otsuki A, Fornasiero D, et al. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. part 3: flotation testing [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 279 – 286.

[10] Quast K, Connor J N, Skinner W, et al. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. part 1: literature review [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 261 – 268.

(上接第 93 页)

[5] 唐永伟. 汽车发动机冷却风扇气动性能和声学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
(Tang Yong-wei. Study on aerodynamic performance and aero-acoustic performance of engine cooling fan [D]. Changchun: Jilin University, 2007.)

[6] Pogorelov A, Meinke M, Schroder W. Effects of tip-gap width on the flow field in an axial fan [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, 61: 466 – 481.

[7] 王天宇, 王霄, 刘会霞, 等. 发动机冷却风扇性能的优化设计研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 744 – 749.  
(Wang Tian-yu, Wang Xiao, Liu Hui-xia, et al. Performance optimization of engine cooling fan [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(6): 744 – 749.)

[8] Karim A, Mehravaran M, Lizotte B, et al. Computational aero-acoustics simulation of automotive radiator fan noise [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(4): 1743 – 1749.

[9] Thorat A A, Kulkarni M, Berg A, et al. CFD investigation of airflow through fan and cooler system of an off road vehicle [C]//The 8th SAEINDIA International Mobility Conference & Exposition and Commercial Vehicle Engineering Congress 2013 (SIMCOMVEC). Chennai, 2013: 1 – 9.

[10] Martini H, Gullberg P, Lofdahl L. Comparative studies between CFD and wind tunnel measurements of cooling performance and external aerodynamics for a heavy truck [J]. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2014, 7(2): 640 – 652.

[11] Tao X, Wagner J R. An engine thermal management system design for military ground vehicle-simultaneous fan, pump and valve control[J]. *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 2016, 9(1): 243 – 254.

[12] Hansen M O L. 风力机空气动力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
(Hansen M O L. Aerodynamics of wind turbines [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.)