

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.04.014

高速线材控制冷却喷嘴的阻力特性分析

李隆键, 刘贵川

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘要:利用数值模拟的方法研究了高速线材冷却喷嘴的阻力特性,针对一系列的工况进行了大量数值计算,得到了不同工况下水冷喷嘴的阻力特性数据,揭示了水冷喷嘴在结构尺寸一定的情况下水流量、线材直径和线材速度对水冷喷嘴阻力特性的影响。根据计算出的结果拟合得到了喷嘴的阻力系数计算的的经验关系式。最后根据线材轧制现场采集得到的喷嘴阻力特性数据对经验关系式进行了修正,为高速线材的控制冷却工艺的设计提供了理论依据。

关键词:高速线材;控制冷却;喷嘴;阻力特性;数值模拟

中图分类号: TG335.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)04-088-05

Flow friction analysis of the water-cooled nozzle in the high-speed wire rod rolling process

LI Longjian, LIU Guichuan

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Numerical simulation is performed to investigate the flow friction performance of the water-cooled nozzle used in the high speed rod rolling. A great deal of resistance characteristic data are obtained based on a series of numerical computations of flow process in the water-cool nozzle. The research results reveal the effects of the mass flow rate of the water, the diameter and the speed of the rod on the flow friction. The empirical formula is fitted with those computed resistance coefficients. Finally the formula is revised with the measured data from the actual product line, which will provide a theoretical basis for the design of the control cooling technology in the high-speed wire rod rolling process.

Key words: high-speed wire rod; control cooling; nozzle; flow friction; numerical simulation

中国是世界上高速线材生产量最大的国家。然而我国的大多数高速线材轧制工艺需要从国外引进^[1]。因此高速线材生产工艺的自主开发很有必要。高速线材轧后的控制冷却技术,是影响到线材产品的力学性能及其均匀性的关键工艺,控制冷却技术是未来高速线材技术发展的重要方向^[2]。而在控制冷却系统中,控制冷却装置的阻力特性是供水设备和系统选型的依据。它直接影响着控制装置的冷却能力,进而影响到线材的质量。作为控制冷却

系统的核心部分就是环形渐缩的一个冷却喷嘴,冷却水从其出口高速喷射到线材的表面上,达到冷却效果。目前国外对喷嘴研究比较多的是都集中在喷嘴的结构和雷诺数对水流阻力的影响,Shuja等在2005年研究了不同锥角下,这种类型喷嘴喷射到平板上的流动和传热特性^[3],在2009年研究了不同喷嘴出口速度下,这种类型喷嘴喷射到柱形槽内的流动与传热特性^[4]。并在同年研究了锥形喷嘴和渐缩环形喷嘴结合的喷嘴在不同喷射角度和不同的槽内

收稿日期: 2013-11-17

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAE0382)

作者简介: 李隆键(1966-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事计算流体力学方向研究,(Tel)023-65111867,
(E-mail)longjian@cqu.edu.cn。

深度下,喷嘴喷射到锥形槽内的流动特性和换热特性^[5]。Kang 和 Zarate 实验测量了竖直同心环形通道内流场和温度场的分布,并进行了数值模拟^[6-7]。路广遥等对窄缝环形通道内流动阻力特性进行了实验研究^[8]。但高速线材控制冷却系统中水冷喷嘴在应用中由于线材在高速下对水的拖拽作用,使得线材的速度和直径也影响着整个冷却系统的阻力,而国内外在这方面的研究报道非常少。武汉大学仇雅鸣在研究了国内外测试方法的基础上,设计了一套喷嘴测试系统,来实现对环形穿水冷却喷嘴各主要性能指标的检测^[9]。但是实验测试的方法具有成本高、周期长,分析不够灵活、全面等局限性。文中通过对冷却装置的分析,采用数值模拟方法对其阻力特性进行研究,探讨在喷嘴尺寸一定的情况下,水流速度(水流量)、线材直径和线材速度对冷却喷嘴中水流阻力的影响,最后得出了喷嘴阻力系数计算的的经验关系式。

1 水冷喷嘴的数值分析模型

图1是某高速线材水冷喷嘴的结构图,中间黑色区域为穿过的线材。流体从喷嘴的底部进入喷嘴的环形通道,从收敛的环形缝隙喷出,以与线材成 30° 高速射向线材,起到冷却的作用。控制冷却能够改善线材的组织,使晶粒得到细化。但过冷却会形成马氏体降低线材的质量。因此确定好合适的水压和水量使流水在环缝出口处达到一定的速度冲破蒸汽膜,取得较好的冷却效果,不降低线材的质量。由于线材在轧制各个阶段的直径是不一样的,因此各个阶段的水冷喷嘴的规格也略有不同,文中只针对 $\phi 30/1.5$ 这种规格的水冷喷嘴进行研究。

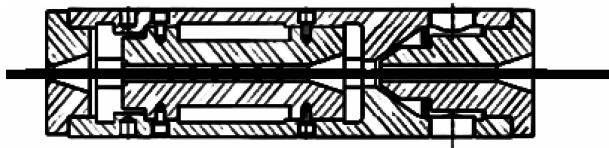


图1 水冷喷嘴结构图

水在冷却喷嘴中的流动非常复杂,因此国内外对喷嘴阻力特性的研究一般都采用实验测试的方法来进行。喷嘴的阻力,绝大部分是在收敛的环形缝隙段,而在这一段,水是单相流动,因此可以采用数值模拟的方法来进行研究,可以用一些线材生产中现场采集的一些数据来修正数值模拟计算得到的结果。

在三维笛卡尔坐标系中,以张量形式表示的描述流体流动特性的连续性方程、动量方程分别如下:

连续方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i}. \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_T \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]. \quad (3)$$

由于流道内流速较高,流体盛紊流区。此外,由于流道内流体转弯以及流道截面变化较大,对于这种存在大的流体应变率的情况,流道内的湍流宜采用 RNG k- ϵ 双方程湍流模型处理。

湍动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + \mu_t S^2 - \rho \epsilon. \quad (4)$$

湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R, \quad (5)$$

其中有效粘度 μ_{eff} 可由 $\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{mol}} \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu_{\text{mol}}} \frac{k}{\epsilon}} \right]^2$ 得到。方程(4)和(5)中的系数 α_k 和 α_ϵ 分别为 k 方程、 ϵ 方程的有效 Prandtl 数的倒数。

冷却水箱流场的几何模型完全按照实际流道几何结构建立,如图2所示。然后利用 gambit 软件对其进行网格划分。为了最大限度地减少数值误差,同时也为了控制计算区域网格划分单元数,加快数值计算的收敛速度,在网络划分时尽量完全使用六面体单元网格。在进行计算区域离散的时候,采用

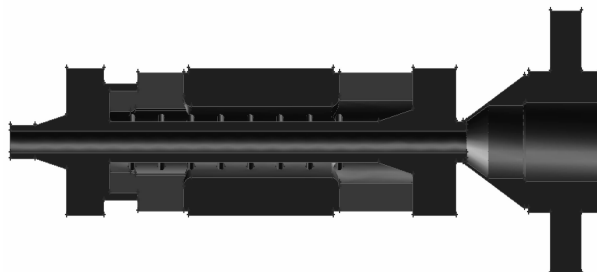


图2 水冷喷嘴流体空间剖面图

了容积拆分的方法,将整个计算区域分离成若干块。网格建模时,在壁面区域施加边界层网格,以保证湍流模型及壁面函数法的适用性。此外,在喷嘴环缝区域,由于流速较高,速度梯度较大,该区域必须采用很细的网格才能精确解析流场信息。经网格无关性检验,模型的总网格数为 220 万左右即可消除网格密度的影响。

对于冷却水箱内湍流流动的三维控制微分方程,采用 Baliga & Patankar 提出的控制容积有限元法(control volume based finite element method, CVFEM)进行求解,控制方程的对流项采用 Rhie 和 Chow 提出的二阶上风格式进行离散,扩散项采用线形插值多项式进行计算。速度和压力耦合采用 SIMPLE 算法处理。

模型入口采用速度进口边界条件,指定入口边界流速、密度以及黏度等物性参数。模型出口为出流边界。在迭代计算过程中,壁面网格密度进行自适应调整。即根据计算结果调整壁面附近网格密度,使得壁面 $y^+ \approx 30 \sim 200$ 范围。由于流速较高,湍流强度大,需要对迭代计算过程采用欠松弛技术进行适当松弛。项目中速度欠松弛因子可取到 0.4~0.5,湍流动能和湍流耗散率的欠松弛因子取为 0.5,并采用 SIMPLE 算法求解。

根据对具体工况的调试,每个工况一般需要迭代 5 000~6 000 次左右方能达到给定的收敛准则。

2 计算结果

2.1 计算工况

为了能够全面掌握 $\Phi 30/1.5$ 规格水冷喷嘴的阻力特性,依次考察冷却水流量(喷嘴入口水流速度)、线材速度、线材直径等对阻力特性的影响,喷嘴入口速度分别设为 2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6 m/s,线材直径依次为 14、16、18、20、22 mm,在各个直径下的线材速度见表 1。

表 1 各个直径下对应的线材速度 m/s

线材速度	直径				
	$\Phi 14$	$\Phi 16$	$\Phi 18$	$\Phi 20$	$\Phi 22$
w_1	24.56	18.80	14.88	12.00	9.92
w_2	30.70	23.50	18.60	15.00	12.40
w_3	36.84	28.20	22.32	18.00	14.88

2.2 计算结果与分析

喷射冷却水箱的流动特性是由喷嘴段和导槽段综合作用的结果,但由前面的分析知水冷喷嘴的压降主要发生在喷嘴段,因此喷嘴段的阻力特性基本决定了整个水冷喷嘴的阻力特性。因此在统计水冷喷嘴阻力时,只统计喷嘴段的阻力,最后由线材轧制现场实测数据来修正最后得到的阻力。

根据流体力学的基本理论,喷嘴内的流动阻力可以表示为以下形式:

$$\Delta p = f \cdot \frac{1}{2} \rho u^2, \quad (6)$$

式中: ρ 为冷却水的密度,取定性温度 30°C , $\rho \approx 998 \text{ kg/m}^3$; u 为冷却水的特征速度,取为环缝中部的流体速度, m/s; f 为阻力系数。

以下分别讨论各个因素对水冷喷嘴阻力和阻力系数的影响。

2.2.1 冷却水流量对阻力的影响

冷却水流量(入口水流速度)对喷射冷却水箱的阻力特性有显著的影响。图 3 和图 4 列出了线材直径为 22 mm 的时候,线材速度一定时,水冷喷嘴前段的阻力在不同入口水流速度下的变化规律。

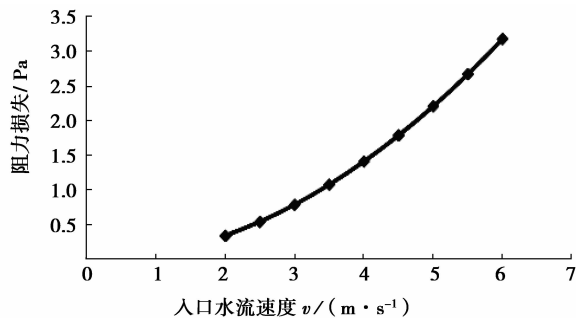


图 3 喷嘴段阻力随入口水流速度的变化

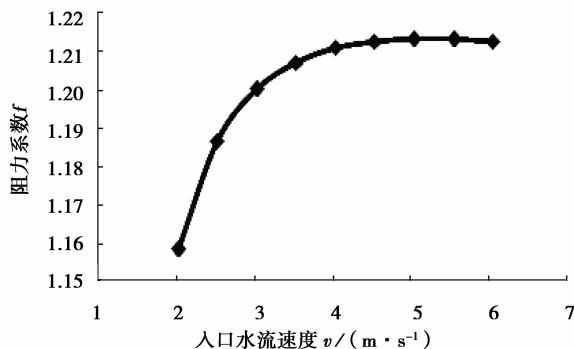


图 4 喷嘴段阻力系数随入口水流速度的变化

由图 3 和图 4 可知,喷射冷却水箱阻力损失随入口水流速度的增加而显著增加。而阻力系数在

水流速较小时随流速快速增加,但随着水流速度增大,阻力系数上升的趋势减缓,并接近自模化区。在其他线材直径的情况下喷嘴段的阻力规律与此类似。

2.2.2 线材速度对阻力的影响

图 5、图 6 列出了线材直径为 22 mm,水箱入口水流速度分别为 2.5、4、5 m/s,线材速度依次为 9.92、12.4、14.88 m/s 情况下水箱阻力的计算结果。

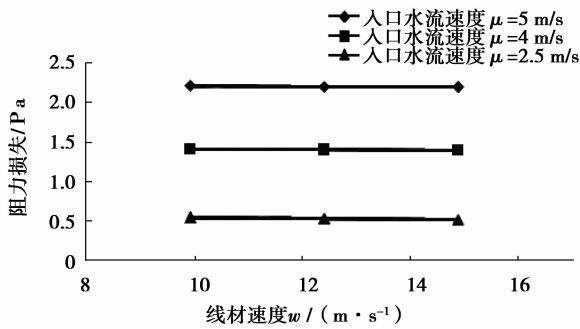


图 5 喷嘴段阻力随线材速度变化

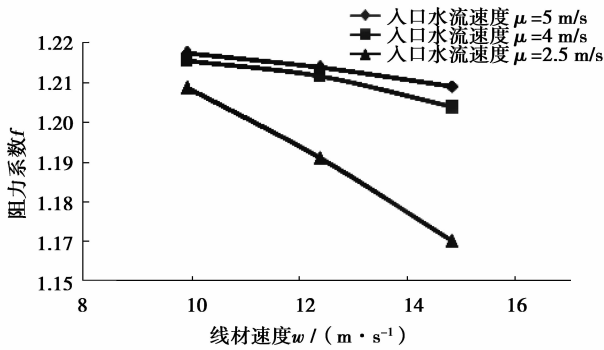


图 6 喷嘴段的阻力系数随线材速度变化

由图 5 和图 6 可知,在水箱入口水流量一定的情况下,水箱阻力随线材速度增大阻力损失略微降低。这说明线材的高速运动对水流有拖曳作用,部分增加了水的压头,减小了水箱的阻力损失。入口水流速度越小,线材速度对阻力系数的影响就越明显。其他直径下,该规律类似。

2.2.3 线材直径对阻力的影响

为了能够充分了解线材直径对喷嘴阻力的影响,分别对喷嘴中穿过直径为 $\Phi 22$ 、 $\Phi 20$ 、 $\Phi 18$ 、 $\Phi 16$ 、 $\Phi 14$ 共 5 种类型的线材进行了计算,计算结果如图 7 和图 8。

从图 7 和图 8 中可知,随着线材直径的增加,喷嘴的阻力略微降低,说明了线材直径的增加,增大了线材对水流的拖曳作用,降低了水流在水冷喷嘴中的阻力。

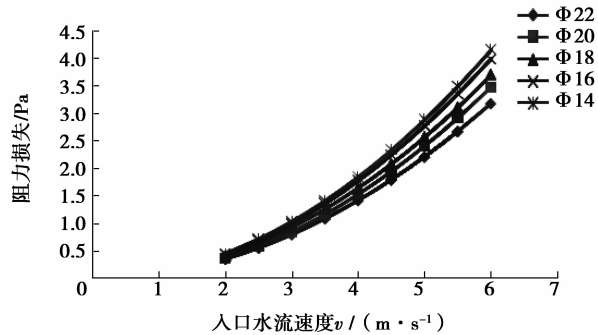


图 7 喷嘴段阻力随线材直径的变化

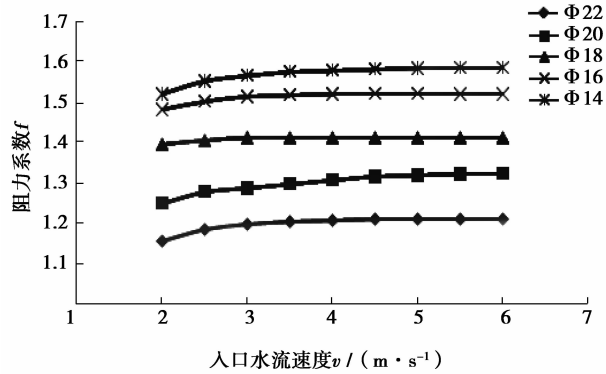


图 8 喷嘴段阻力系数随线材直径的变化

2.3 水冷喷嘴阻力计算经验公式的拟合和修正

由流体力学理论可以知道,平直圆管内的流动,阻力系数 f 是雷诺数的函数:

$$f = F(Re). \quad (7)$$

但喷嘴的阻力系数变化规律不仅仅像式(7)这么简单。如前面所分析,喷嘴的阻力不仅受 Re 数影响,而且还与线材直径(d)和线材速度(w)有关。有鉴于此,将在式(7)的基础上加上线材直径和线材速度的影响,即:

$$f = F\left(Re, \frac{u}{w}, \frac{d}{\varphi}\right), \quad (8)$$

式中 φ 为喷嘴孔径尺寸。最后对全部工况的数值计算结果进行汇总,并将得到的数据进行了多元拟合线性回归,得到了 $\Phi 30.0/1.5$ 规格下水冷喷嘴的喷嘴段阻力特性计算的的经验关系式为

$$f = 1.24976 Re^{-0.009315} \left(\frac{u}{w}\right)^{0.0037878} \left(\frac{d}{\varphi}\right)^{-0.660992}. \quad (9)$$

该拟合公式的相关性非常好,根据该拟合公式计算得到的喷嘴段阻力系数与统计的汇总结果的偏差不超过 $\pm 3.5\%$ 。

为了获得实际生产现场冷却水箱的阻力特性数据,对某钢厂高速线材生产现场性进行的实测。现场测试分别针对规格 $\Phi 8$ 的线材和 $\Phi 10$ 线材,在通

过冷却水箱时,2种轧材的直径依次为 15.36 mm 和 15.67 mm,线材速度依次为 15.2 m/s 和 16.3 m/s。每种规格线材通过 2 个水箱的冷却,每个水箱的冷却水量和水压不同,如表 2 和表 3 所示。现场实测记录下每个水箱的水压和水量,并取 10 次测试结果的平均值。实测的阻力与经验关系式计算结果对比如表 2、表 3 所示。

表 2 轧制 $\Phi 8$ 线材中实测数据与经验公式计算结果

入口水流速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	阻力经验公式计算 结果 $\Delta P/Pa$	实测结果 $\Delta P/Pa$
2.305 6	0.603 510 9	0.3
3.071 7	1.069 523 2	0.5

表 3 轧制 $\Phi 10$ 线材中实测数据与经验公式计算结果

入口水流速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	阻力经验公式计算 结果 $\Delta P/Pa$	实测结果 $\Delta P/Pa$
2.330 7	0.608 439 2	0.3
3.113 9	1.084 265 0	0.5

从对比结果可以看出,模拟的数据与实测的数据之间的差距还是挺大的,这是因为没有考虑到喷嘴后半段的阻力,由于线材的拖拽作用,压力有所回升,阻力有所下降。但每种规格线材在不同冷却水量下阻力实测值与经验公式计算结果的相对偏差几乎相同,这说明拟合得到的经验公式反映了各个因素的影响趋势和规律。对不同的工况,都可以用一个修正因子来修正拟合得到的阻力计算经验关系式。现将喷嘴的阻力经验计算公式进行修正,即:

$$\Delta p = \epsilon \cdot f \cdot \frac{1}{2} \rho u^2, \quad (10)$$

其中, ϵ 为修正因子, $\epsilon=0.479\ 798\ 741$ 。修正后的经验公式计算结果与实测结果比较符合,平均相对误差不超过 $\pm 3.22\%$ 。

3 结 论

1)通过数值模拟的方法,模拟了水在水冷喷嘴中的流动情况,揭示了水流量、线材速度、线材直径各个因素对水冷喷嘴阻力特性的影响规律,并利用数值计算结果回归得到了具体的阻力系数计算经验关系式。

2)通过不同工况下实测的喷嘴阻力性能数据与经验关系式的比较,得到的喷嘴阻力计算经验关系式的修正系数。修正后的喷嘴阻力计算经验关系式

可用于工程实际,为高速线材的控制冷却工艺的设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 张云鹏. 我国高速线材生产的现状及新技术的应用[J]. 包钢科技, 2008, 34(2): 4-6.
ZHANG Yunpeng. Actualities of high-speed wire rod mill production and the new technology application in our country [J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2008, 34(2): 4-6.
- [2] 曹树卫. 高速线材生产中的控轧控冷[J]. 金属制品, 2005, 31(5): 26-27.
CAO Shuwei. Controlled rolling and controlled cooling in high-speed wire production [J]. Steel Wire Products, 2005, 31(5): 26-27.
- [3] Shuja S Z, Yilbas B S, Budair M O. Influence of conical and annular nozzle geometric configurations on flow and heat transfer characteristics due to flow impingement onto a flat plate [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2005, 48(9): 917-939.
- [4] Shuja S Z, Yibas B S, Khan S A. Flow emerging from annular-conical nozzle combinations and impinging onto a cylindrical cavity [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(5): 975-984.
- [5] Shuja S Z, Yibas B S, Khan S A. Flow impinging onto a conical cavity: a conical and annular nozzle combination [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(11): 2583-2593.
- [6] Zarate J A, Roy R P, Laporta A. Isothermal and heated turbulent upflow in a vertical annular channel-Part II. Numerical simulations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6): 1185-1199.
- [7] Kang S, Patil B, Zarate J A, et al. Isothermal and heated turbulent up flow in a vertical annular channel - Part I. Experimental measurements [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6): 1171-1184.
- [8] 路广遥, 孙中宁, 王经, 等. 窄缝环形通道内流动阻力特性的实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(3): 28-31.
LU Guangyao, SUN Zhongning, WANG Jing, et al. Experimental investigation on the single-phase flow friction in narrow annulus [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(3): 28-31.
- [9] 仇雅鸣, 瞿小冀, 唐子谋, 等. 穿水冷却喷嘴测试系统的设计[J]. 中国测试, 2009, 35(3): 125-128.
QIU Yaming, QU Xiaoji, TANG Zimou, et al. Design on testing system for nozzle in passing water cooler [J]. China Measurement & Testing Technology, 2009, 35(3): 125-128.