

低合金钢深熔 TIG 水冷焊温度场数值模拟

黄逸飞， 罗 震， 王证茗， 冯悦峤
(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 文中采用 ANSYS 有限元软件, 建立 Q345 低合金钢的深熔 TIG 焊接温度场有限元模型, 采用双椭圆热源与圆柱体热源的组合热源形式, 对焊接过程中温度场进行模拟, 得到与试验结果吻合度很高的模拟结果, 验证了有限元模型的正确性. 通过进一步对比研究发现, 采用背部水冷增强散热的处理, 能大大减小熔池体积, 同时使得根部焊道液态金属迅速冷却, 有利于维持熔池区受力平衡, 保证焊接小孔稳定, 基于此提出水冷焊改善工艺的机理.

关键词: 数值模拟; 深熔 TIG; 背面水冷

中图分类号: TG 453.9 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160118002

0 序 言

深熔 TIG 焊接方法, 是通过大电流 (一般大于 300 A), 使得较大的电弧力与金属表面张力平衡, 形成小孔, 实现深熔焊接^[1]. 相比常规 TIG 焊, 深熔 TIG 焊效率高, 焊缝质量好; 对于中厚板件, 深熔 TIG 焊可以实现单面焊双面成形, 焊接过程稳定, 焊缝成形美观, 是一种高效率的新型焊接方法. Jarvis 等人^[2]指出, 液态熔池必须可以被表面张力托住, 这是一个能够实现深熔 TIG 焊必须要满足的条件. 并推出一个根部焊道宽度 w 、板厚 h 、表面张力 γ 和密度 ρ 之间的一个不等式关系. 材料表面张力与密度的比值应大于根部焊道宽度、板厚以及重力加速度的乘积. 根部焊道的宽度 w 会随热导率的增加而增加, 进而容易引起熔池的塌陷. 对于应用广泛的低合金钢以及碳钢, 由于热导率较大, 在深熔 TIG 焊上仍然存在困难.

利用增加背部循环水冷的方法进行深熔 TIG 焊工艺改进, 成功实现了中厚低合金钢板的单面焊双面成形. 文中利用 ANSYS 有限元仿真软件对深熔 TIG 水冷焊进行温度场数值模拟, 不考虑电弧力和熔池流动的影响, 并通过与常规空气环境中的焊接温度场进行对比, 探究背部水冷改善工艺的机理. 发现在焊件背部增加水冷的方法, 使得焊缝下半部分散热加快, 增强了小孔稳定性, 有利于焊缝成形. 经校验, 模拟焊缝与实际焊缝吻合较好.

1 有限元模拟方法

1.1 有限元模型

利用 ANSYS 自带建模系统进行三维实体建模. 实体模型相较于实际的焊接工件, 在尺寸上有所缩小, 以在保证计算精度的前提下缩短计算时间, 设置模型尺寸 100 mm × 100 mm × 8 mm, 考虑到平板对接的对称性, 在宽度方向取试件的一半进行分析. 单元类型选取 solid70 三维热实体八节点六面体单元. 网格划分采用了近焊缝处细密, 设过渡区间到远焊缝出网格稀疏. 图 1 为几何模型, 图 2 为网格划分.

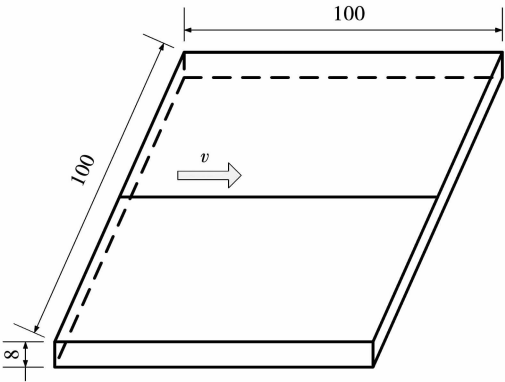


图 1 焊接试样示意图 (mm)
Fig. 1 Dimension of welding block

1.2 热源模型

深熔 TIG 焊方法, 是在传统 TIG 焊基础上, 用大的焊接电流, 结合特殊改进的焊枪使电弧产生足够

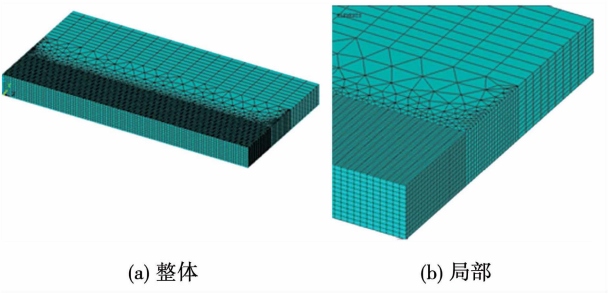


图 2 网格模型示意图
Fig. 2 Diagram of mesh model

的电弧力,使熔池下陷并与液态金属的表面张力平衡形成小孔. 由于深熔 TIG 焊的小孔焊特征明显,传统的 TIG 热源模式不再适用. 胡庆贤^[3]在研究穿孔型等离子焊接过程中,提出了上部分双椭球热源与下部分圆柱体热源的组合热源形式. 据此,文中采用相似的方法定义深熔 TIG 焊的热源形式.

1.2.1 双椭球热源函数

双椭球热源功率密度函数模型如图 3 所示.

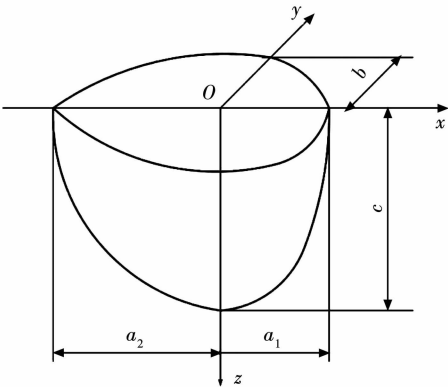


图 3 双椭球热源模型示意图
Fig. 3 Schematic sketch of double ellipsoid heat source distribution

热源函数如下,即

$$q_1(x,y,z) = q_m e^{\frac{3x^2}{a_1^2}} e^{\frac{3y^2}{b^2}} e^{\frac{3z^2}{c^2}} \tag{1}$$

$$q_2(x,y,z) = q_m e^{\frac{3x^2}{a_2^2}} e^{\frac{3y^2}{b^2}} e^{\frac{3z^2}{c^2}} \tag{2}$$

式中: x,y,z 为相对热源中心的坐标; a_1,a_2,b,c 为特征参数,与实际焊缝形状相关; q_m 为双椭球热源加热斑点中心最大热流密度,且有

$$q_m = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi\sqrt{\pi}a_1bc} = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi\sqrt{\pi}a_2bc} \tag{3}$$

式中: Q 为热源功率; f_1,f_2 为分配系数,且有

$$f_1 + f_2 = 2 \tag{4}$$

可取

$$f_1 = \frac{2a_1}{a_1 + a_2}, f_2 = \frac{2a_2}{a_1 + a_2} \tag{5}$$

1.2.2 圆柱体热源函数

均匀分布高斯柱体热源模型设定柱体热源的径向热流呈高斯分布,而在柱体的深度方向上均匀分布,热源为一个内嵌的圆柱体. 热源函数如下,即

$$q(r,z) = q_m D(z) \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \tag{6}$$

式中: r_0 为加热半径; $D(z)$ 为峰值递增函数.

$$D(z) = \frac{mz + r_0}{r_0} \tag{7}$$

式中: m 为调节系数.

$$q_m = \frac{6Q}{\pi r_0 h (mz + 2r_0)} \tag{8}$$

式中: h 为热源作用深度.

1.2.3 组合热源

焊接过程总的热输入为

$$Q = \eta UI \tag{9}$$

式中: η 为热源效率; U 为焊接电压; I 为焊接电流.

将总的输入功率按一定的比例分配,各组合部分热源功率占总热源功率的比例系数,称为功率分配系数,用 χ_i 来表示,则各组合部分热源的能量为 $Q_i = \chi_i Q$,此时总功率等于各组合部分热源的功率总和.

1.3 材料物理性能、边界条件及热源加载

焊接材料为 Q345 低合金钢,相关材料参数由文献[4] 给出,高温缺乏部分采用插值法、外推法获得. 对于金属熔点以上的熔池部分,用增大导热系数的方法近似模拟^[5-6].

文中模拟温度场的边界条件主要分为两种,水冷条件和非水冷条件. 对于非水冷条件,其边界条件主要是与空气的对流换热以及热辐射,将热辐射转换为对流换热的强度,简化模拟过程^[7].

对于背部水冷,焊接局部高温使得水气化,属于沸腾传热中欠热沸腾的情况. 欠热沸腾影响因素众多,研究人员对其研究局限在圆管换热,提出了一系列经验公式,但误差较大^[8]. 文中的平板换热问题,考虑到问题的复杂性,采用极限的方法粗略估计对流换热系数,即分别求出不考虑相变时的对流换热系数以及饱和沸腾时的对流换热系数. 为简化计算,将焊接非均匀的加热过程等价转换为均匀加热,保持总功率不变.

不考虑相变时的对流换热系数,有如下准则计算式,即

$$Nu = (0.037Re^{0.8} - 871)Pr^{1/3} \tag{10}$$

式中: Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数.

努赛尔准则,即

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \tag{11}$$

式中: h 为对流换热系数; λ 为热导率; l 为特性尺寸;计算中板面温度取板平均温度,水流速度取 1.5 m/s,水的热物理常数参考文献[9]. 计算可得不考虑相变时的对流换热系数 $h \approx 5\,855\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

对于水的饱和沸腾有米海耶夫推荐式,即

$$h = C_1 \Delta T^{2.33} p^{0.5} \tag{12}$$

式中: $C_1 = 0.122\text{ W}/(\text{mN}^{0.5} \cdot \text{K}^{3.33})$; ΔT 为过热度; p 为沸腾绝对压力.

计算得到饱和沸腾换热系数 $h \approx 34\,300\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. 所以,实际对流换热系数应介于 5 855 与 34 300 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 之间,实际焊接过程中沸腾现象不剧烈,取对流换热系数 $h = 15\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

施加的热载荷为体积载荷. 分两个部分,上半部分为双椭球热源载荷,作用高度为 H ,下半部分为峰值递增的圆柱体热源载荷,作用高度为 h .

2 模型验证

试验验证温度场模拟的正确性. 焊接工艺参数见表 1.

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

焊件尺寸 (长×宽×高)/mm	焊接电压 U/V	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
100×100×8	15	480	240

模拟中,双椭球热源特征参数 $a_1 = 5\text{ mm}$, $a_2 = 9\text{ mm}$, $b = 10\text{ mm}$, $c = 3\text{ mm}$; 柱体热源参数 $r_0 = 1.4\text{ mm}$;组合热源功率分配系数双椭球 $\chi_1 = 0.2$. 模拟得到焊缝截面图,如图 4 所示. 其中灰色部分为模拟熔池区,红色部分为模拟母材区,二者界面温度 1 495 $^\circ\text{C}$. 采用熔池边界准则进行校验,图中模拟焊缝熔宽为 13.6 mm,背部焊道的宽度为 3.0 mm. 从熔宽到熔合线走势,与实际焊缝都吻合,验证模型的正确性.

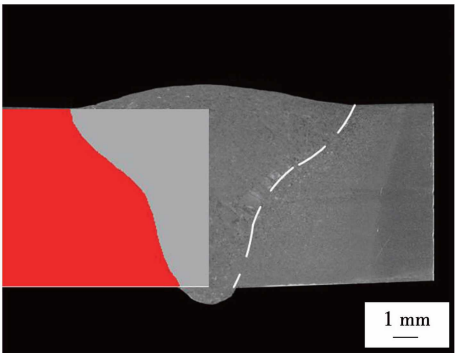


图 4 焊缝熔合线验证
Fig. 4 Verification of fusion wire

3 模拟分析

上文验证了有限元模型的正确性,对比分析水冷环境和常规空气环境的焊接温度场,以得出水冷改善工艺的机理. 图 5 是在焊接进行到 20 s 时,有

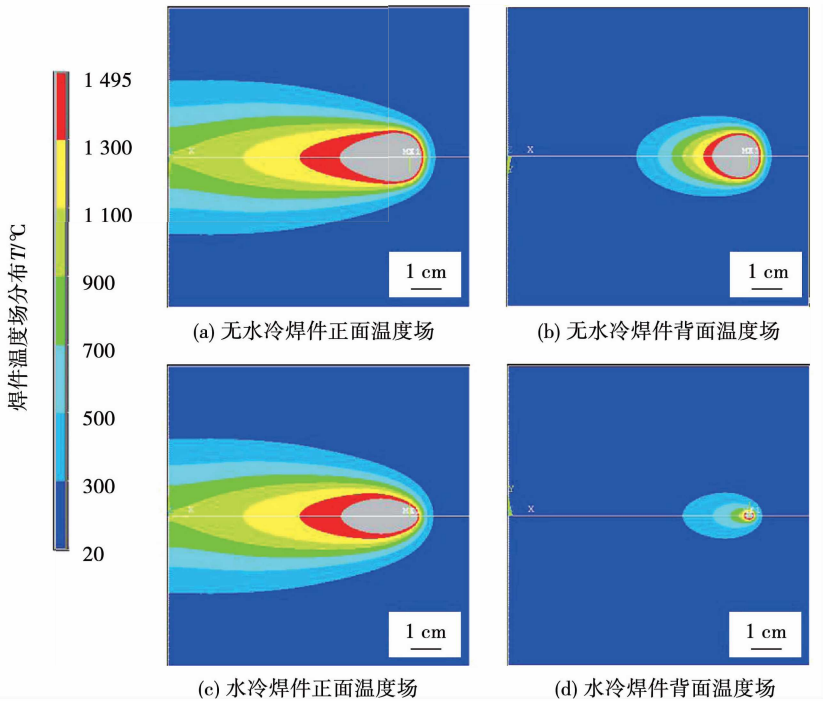


图 5 焊件表面温度场分布
Fig. 5 Surface temperature field distribution of weldment

水冷和无水冷条件下焊件正面和背面的温度场分布情况。通过对比,可以很明显看出,对于无水冷条件下,熔池区域大,温度高,因此在实际焊接时会出现塌陷,小孔不能稳定存在,也因此深熔 TIG 焊无法焊接这类热导率高的材料。而经过背面水冷处理后,

焊件正反两面热影响区和熔池区均有减小。从背面温度场看,穿透焊件的小孔明显缩小。为更直观反应熔池的变化,取焊件温度场的三维图和焊缝截面图如图 6 所示。

图 6a 和图 6c 是空气中焊接情况,图 6b 和图 6d

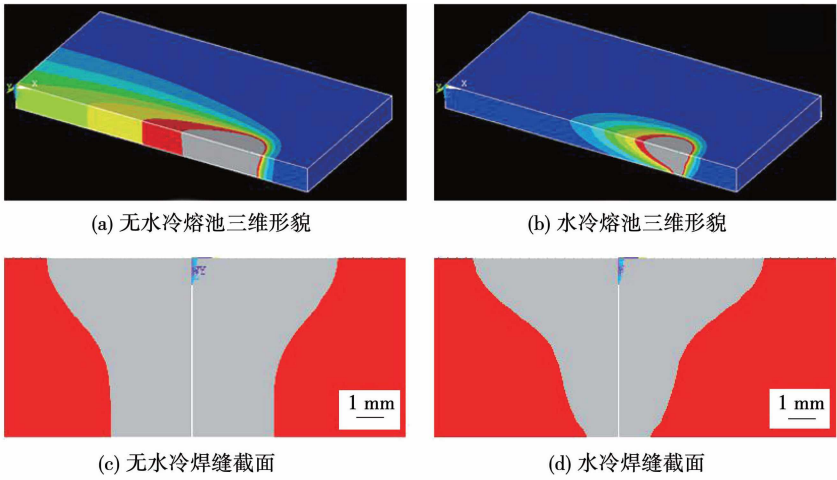


图 6 熔池三维图及焊缝截面示意图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of puddle and sectional view of weld metal

为背面水冷情况。深灰色部分即为焊接熔池区,从焊缝截面图对比可知,加入水冷处理时背部焊道宽度相比空气环境中减小 60%。同时从熔池三维图看出,空气环境中熔池体积过大,实际焊接中在形成图示熔池前就已经塌陷,而背部水冷熔池整体液态金属区大大缩小,熔化金属重力减小,金属表面张力更易支撑整个液态熔池,保持小孔稳定。

为更深入研究背面水冷的作用,提取焊件上相关点的热循环曲线。由于在模拟条件下,熔池区温度过高,参考性较低,理应取热影响区内的点研究。同时,由于该问题的特殊性,水冷和非水冷的热影响区域差距过大,取点无法同时满足二者的条件。由于文中研究的重点是水冷改善小孔稳定性,所以,以水冷条件下,小孔附近的点(a,b,c)为主要对象来设置热循环曲线的取样点,如图 7 所示,其中 OL 为焊道中心线。提取相关点的热循环曲线如图 8 所示。

图 8a 是无水冷条件下 b,d,e 三点的热循环曲线。可以看出,无水冷条件下三点取点在焊件熔池区,峰值温度均超过 1 800 ℃,且冷却段较为缓慢。

图 8b 是水冷条件下 a,b,c 三点的热循环曲线,可以看出,在平行于焊接方向上的热影响区内的三点,热循环曲线形状相似,只是在到达峰值温度的时间上有先后。图 8c 是 d,e 两点的热循环曲线。结合图 8b 的 b 曲线,在同一横截面不同深度的三点,热

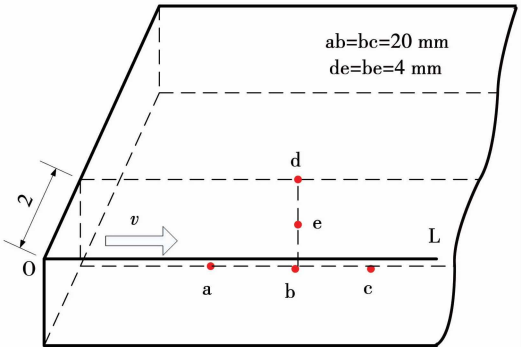


图 7 焊道上关键点示意图(mm)

Fig. 7 Diagram of weld pass key points

循环峰值温度有差异,这是由于不同位置所处的热源形态及散热条件不同。比较三者的冷却速度可以发现,b 点从峰值温度 900 ℃降低到 440 ℃用时大约 2 s,冷却速度 230 ℃/s;e 点从峰值温度 1 850 ℃降低到 440 ℃大约用时 7.8 s,冷却速度 181 ℃/s;d 点的从峰值温度 1 650 ℃降低到 440 ℃大约用时 7.2 s,冷却速度大约 168 ℃/s。可以看出,板件深度方向上都受到背面水冷的影响,散热速度随着深度的增加而加快。

对比图 8a 和图 8c,背面水冷条件下冷却速度明显加快,在相同时间内,背面水冷小孔周围金属温度降的更低。已经知道液态金属的表面张力与其温

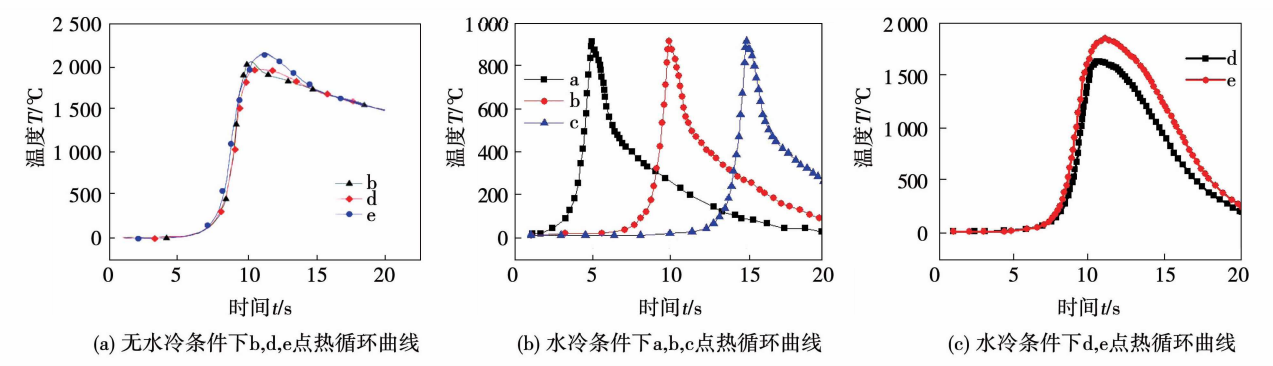


图 8 热循环曲线示意图
Fig. 8 Diagram of thermal cycle cruve

度成负相关的关系,当水冷加入时,根部液态金属的散热速度加快,其温度能够在极短的时间内降低到一个比较低的数值,与此同时,表面张力就能够在极短的时间内迅速增大,进而起到托住整个液态熔池的作用,有助于焊接小孔的维持. 而空气环境中,根部液态熔池的冷却速度很慢,其表面张力长期处于一个较低的水平,更进一步加剧了熔池的塌陷.

通过以上对比分析,可以得出水冷焊接的理论依据,即背部循环水冷的加入可以减小液态熔池的体积同时使根部焊道液态金属的表面张力迅速增大,有利于深熔 TIG 焊中小孔的形成与保持.

4 结 论

(1) 采用双椭球热源与圆柱体热源组合热源形式,建立了 Q345 低合金钢的深熔 TIG 水冷焊有限元温度场数值模型,并验证其合理性.

(2) 通过数值模拟 Q345 低合金钢的焊接温度场,解释了高热导率材料焊接熔池易塌陷原因,并为背部水冷的新工艺提供了理论依据.

(3) 通过对比常规空气环境下的温度场提出背部水冷改善工艺的机理. 背部水冷能减小熔池区体积,减轻液态金属重力,同时增大根部液态金属冷却速度,使其表面张力迅速增大,二者均有助于维持小孔稳定.

参考文献:

[1] 张瑞华, 栗海霞, 李 明, 等. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[J]. 电焊机, 2013, 42(12): 7-11.

Zhang Ruihua, Li Haixia, Li Ming, *et al.* Numerical analysis on keyhole gas tungsten arc welding[J]. Electric Welding Machine, 2013, 42(12): 7-11.

[2] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium [J]. Materials Science and Engineering; A, 2001, 299(1): 81-93.

[3] 胡庆贤. 穿孔等离子弧焊接温度场的有限元分析[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[4] 潘家祯. 压力容器材料实用手册: 碳钢及合金钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

[5] Deng D, Murakawa H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint[J]. Computational Materials Science, 2008, 43(2): 353-365.

[6] 邓德安, 童彦刚, 周中玉. 薄壁低碳钢管焊接变形的数值模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 81-84.

Deng Dean, Tong Yangang, Zhou Zhongyu. Numerical modeling of welding distortion in thin-walled mild steel pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 81-84.

[7] 陈 浩, 高传玉, 曹 敏, 等. 薄板镁合金激光焊接温度场分布的模拟研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(3): 154-156.

Chen Hao, Gao Chuanyu, Cao Min, *et al.* Simulation research on temperature field of laser welding for magnesium alloy thin sheet [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(3): 154-156.

[8] 李炳书. 工程传热科学技术论文集[M]. 北京: 原子能出版社, 2004.

[9] 钱滨江, 伍贻文. 简明传热手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.

作者简介: 黄逸飞,男,1995 年出生,硕士研究生. 主要从事焊接模拟方面的研究. Email: yifeihuang@tju.edu.cn

通讯作者: 罗 震,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: lz@tju.edu.cn