● 装备技术 Equipment Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.012

钢包保温层数值模似分析及应用

张利民[1,2],朱立光[2,3],肖鹏程[1,2],刘增勋[1,2]
(1.华北理工大学 冶金与能源学院,河北 唐山 063300; 2.河北省高品质钢连铸工程技术研究中心,河北 唐山 063300;3.河北科技大学 材料科学与工程学院,河北 石家庄 050018)

摘　要:为控制生产成本,钢包保温层用新型气凝胶绝热板替代原复合反射绝热板。基于传热原理与有限元分析技术,以低碳钢 SPHC 为试验钢种测试其保温效果,通过 ANSYS 软件建立了钢包壁温度场数学传热模型,采用稳态分析方法研究了钢包包壳温度。通过用红外测温枪实测钢包包壳温度,对有限元分析结果进行了验证。结果表明,与原钢包相比,使用新型气凝胶绝热板钢包后,有限元计算钢包包壳温度降低 67 ℃,实测钢包壁温度平均降低 69 ℃,平均计算误差为 2.99%;钢包在一个使用周转期内减少钢液温损 9.88 ℃,成本降低 2.7 元 /t 钢,经济效益显著。

关键词:钢包;新型气凝胶绝热板;温度;有限元计算;成本

中图分类号:TG232.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)09-0852-05

Numerical Simulation Analysis and Application of Ladle Insulation Layer

ZHANG Limin[1,2], ZHU Liguang[2,3], XIAO Pengcheng[1,2], LIU Zengxun[1,2]
(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063300, China; 2. Hebei Engineering Research Center of High Quality Steel Continuous Casting, Tangshan 063300, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In order to control the production cost, the original composite reflective adiabatic plate was replaced by a new type of aerogel insulation board. Based on heat transfer principle and finite element analysis technology, the thermal insulation effect of low carbon steel SPHC was tested. The mathematical heat transfer model of ladle wall temperature field was established by ANSYS software, and the temperature of ladle shell was studied by steady-state analysis method. The finite element analysis results were verified by measuring the temperature of the ladle shell with an infrared temperature measuring gun. The results show that compared with the original ladle, the finite element calculation of the ladle shell temperature decreases by 67 ℃ after using the new type of aerogel adiabatic sheet ladle, the measured ladle wall temperature decreases by 69 ℃ on average, and the average calculation error is 2.99%. Ladle reduces molten steel temperature loss by 9.88 ℃ in one working cycle, and reduces cost by 2.7 RMB/ton of steel, achieving remarkable economic benefits.

Key words: steel ladle; new aerogel insulation board; temperature; finite element calculation; cost

钢包是炼钢中重要设备,它具有钢液保温、盛装运输、临时冶炼等多功能作用[1,2]。北方地区寒冷,钢包对钢液保温效果尤为重要,某钢厂钢包保温层纤维绝热板热导率系数值较大,钢包壳温度较高,在使用过程中钢液液温度损失大,同时加剧了钢包包壳热疲劳效应,减少了钢包壳使用寿命,因此降低钢包壳温度成为重中之重[3,4]。经查阅文献可知[5,6],某种新型气凝胶绝热板具有良好的保温效果,主要以纳米材料为主,材质为气凝胶,成分主要为 SiO_2。为了试验其保温效果,开始陆续在 120 t 板坯钢包保温层上用新型气凝胶绝热板替代原复合反射绝热板(以下新型气凝胶绝热板钢包简称新钢包,复合反射绝热板钢包简称原钢包)。以低碳钢 SPHC 为试验钢种,通过 ANSYS 软件进行钢包壁温度场有限元计算,并用红外测温枪对两种不同绝热板钢包包壁表面温度进行实测,对有限元分析结果进行验证,综合分析新钢包的使用效果。结果证明,新钢包包壳表面温度平均下降 69 ℃,钢包在一个使用周转期内减少钢液温损 9.88 ℃,成本下降 2.57 元 /t 钢,取得了较好的试验效果。

1　气凝胶绝热板介绍及砌筑方法

1.1　新型气凝胶绝热板介绍

新型气凝胶绝热板外面由铝箔包裹,内部为气凝胶,SiO_2 气凝胶是一种由胶体粒子或高聚物分子

收稿日期:2020-06-10
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(CXZZBS2020130)
作者简介:张利民(1985-),内蒙古赤峰市人,博士研究生.研究方向:凝固理论与铸坯质量控制.电话:13730509596,E-mail:376975266@qq.com

相互交联构成的具有空间网络结构的轻质纳米多孔材料，其孔隙是由空气取代原有骨架中的溶剂而制成的[7]。相比其他常用的纳米微孔材料，其孔隙率高达 80.0%～99.8%，比表面积达到 200～1 000 m^2/g，典型孔隙尺寸小于 50 nm，网络胶体颗粒尺寸 1～20 nm，密度最低至 0.003 g/cm^3。尺寸（厚×宽×长）大小为(10 mm×400 mm×600 mm)，如图1。

1.2　主要性能参数

将两种绝热板送往洛阳国家耐火材料质量监督检验中心进行检测，检测结果如表 1。

从表 1 看出，新型气凝胶体积密度小，耐火度高，热导率在 800 ℃时为 0.031 W/(m·k)，比原绝热板低 0.042 W/(m·k)。

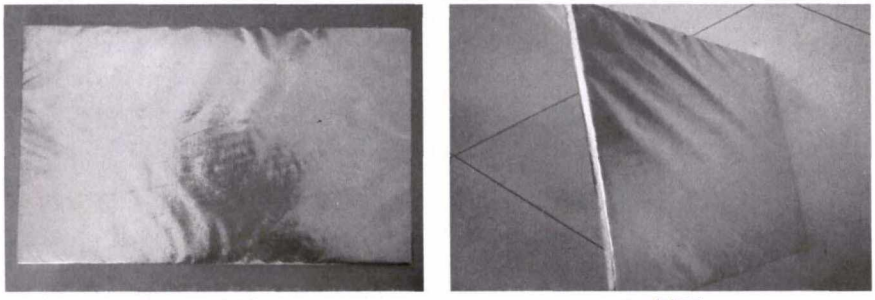
表 1 检测数据

Tab.1 Detection data

检测项目	平均值		检验依据或说明
	原绝热板	纳米孔绝热板	
体积密度 /(kg/m³)	536	149	GB/T 17911-2006
耐火度 /℃	1 560	1 760	GB/T 7322-2007
热导率 /(W/m·K)(热面温度：800 ℃)	0.073	0.031	GB/T 4130-2005

1.3　砌筑方法

以第一炼钢厂 120 t 板坯钢包为研究对象，钢包由包壳和耐火材料二部分组成，耐火材料紧靠钢包壳的内壁进行砌筑，由绝热层、永久层、中间工作层组成。新钢包采取在永久衬和钢包壳之间粘贴 2 层（单层厚 10 mm）新型气凝胶绝热板，替代原 20 mm 厚复合反射绝热板。新钢包结构如图 2。



(a)正面　　(b)侧面

图 1 新型气凝胶绝热板

Fig.1 New type aerogel insulation board

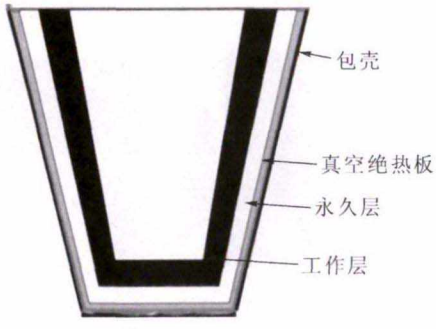


图 2 新钢包结构

Fig.2 New Steel ladle structure

2　钢包传热模型建立与分析

2.1　模型的建立

钢包最外层为钢壳，内衬为耐火材质构成，内衬分为永久层、保温层和中间工作层。建立正确的有限元分析模型是获得精确计算结果的基础，在不影响计算结果的情况下，为了方便建立模型，准确计算钢包壁温度分布，提出如下假设：①由于钢包的坡度角较小，去除钢包外围的装卸机械零件后，可将钢包视为圆柱体；②钢包底透气砖、包括其驱动装置等，几乎不影响有限元模型中的钢包内衬温度场，因此，在建模时省略这些部分；③钢包各层不同材料之间

现场施工如图 3。

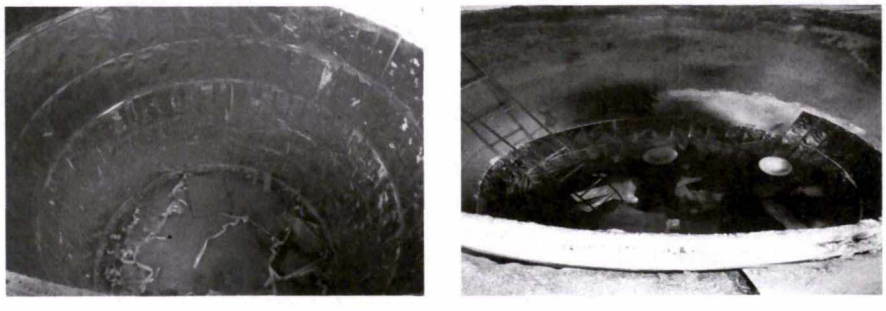


图 3 现场施工

Fig.3 At-site construction operation

的接触热阻忽略不计；④钢包具有几何轴对称性，边界轴对称性，取其一半进行有限元分析，图 4 为钢包壁二维有限元简化模型。采用八节点热单元 plane77，模型（如图 5）共画分了 6 450 个单元，节点总数 21 237 个。其导热微分方程[8]为：

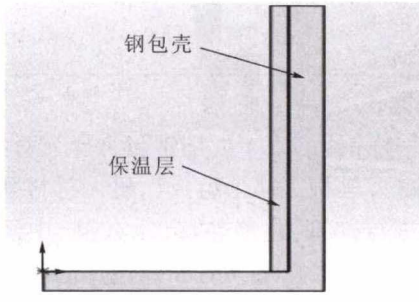


图 4 钢包壁二维有限元简化模型
Fig.4 Simplified two-dimensional finite element model of ladle wall

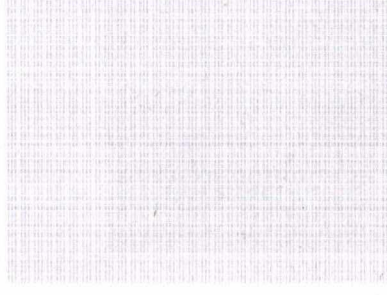


图 5 钢包壁网格划分
Fig.5 Mesh division of ladle wall

$$pc\frac{\partial T}{\partial t}=\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (1)$$

其中，p 是材料密度；c 是材料的比热容；λ 代表材料的导热系数。

此外，钢液向包壁传热过程中将钢包内壁设为第一类边界条件[9]。

$$T_l r=Tw \quad (2)$$

其中，r 为边界；Tw 为已知内壁面温度

钢包外壁设为第三类边界条件[9]。

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}\,|r=h(T-T_f)|r \quad (3)$$

式中，T_f 为包壳附近环境温度；h 为综合换热系数。

2.2 初始条件及边界条件确定

钢包向外散热主要是通过 3 部分，第 1 部分即钢水间接的通过渣面向外散热，它同时包括了传导、辐射和对流 3 种传热的基本方式；第 2 部分即通过紧密接触包壁的钢液，其热量通过热传导进入包壁，其中部分热量蓄存在包壁内，部分热量通过包外壳以辐射和对流的方式散发到周围环境中；第 3 部分即通过包底向外散热，原理同第 2 部分。因新型气凝胶绝热板只在钢包壁范围内使用，故新钢包和原钢包钢渣液面同包底的向外散热可视为相同。因此，钢包向外传热就变成了计算钢包壁向外的传热。

由于盛满钢液的钢包所具有的热量远大于其表面散热量，钢包内部温度远高于环境温度，钢包外表面无强制冷却介质，因此可将钢包作为一个表面恒温的圆柱体，即用热稳态计算传热模型[10]。两种钢包工作层材料均为同种材料，因此保温层内壁面温度均相同，即传热模型简化为保温层内壁面开始向外传热。

保温层性能参数来源于洛阳国家耐火材料质量监督检验中心检测数据，盛钢液工况下，假设钢包内部各处钢液温度相同。钢包工作层直接接触 1 570～1 630 ℃高温钢液，根据相关参考文献[11]，保护层内壁面温度在 700～900 ℃，取平均值 Tw=800 ℃。钢包外壳处于 35 ℃的外界环境（T_f=35 ℃），其与周围环境的传热形式为对流换热和辐射换热[12]，通常，当温度超过 300 ℃高温条件时，辐射换热较强，在此温度以下时，辐射换热现象不明显。周转过程中，包壳表面温度一般在 200～350 ℃，辐射换热在整个换热过程中影响较小。由于辐射换热是非线性的，且计算耗时，因此将对流换热和辐射换热折合成综合对流换热，即 h=8.1 W/(m·℃)。

2.3 有限元计算结果分析

如图 6、图 7 所示，经有限元计算得到两种不同保温材料的钢包壁稳态温度场分布云图。可知原钢包包壳表面温度为 309 ℃，在保温层与钢包壳交界

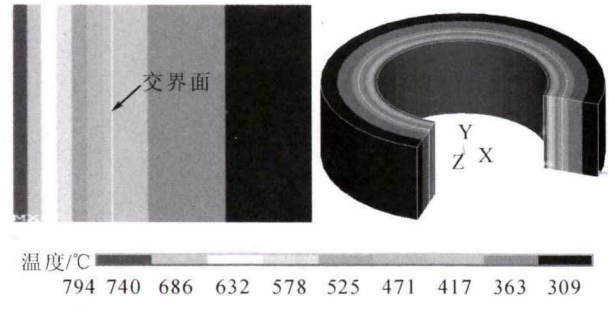


图 6 原钢包壁切片及拓展三维温度场分布云图
Fig.6 Original ladle wall slice and expand three-dimensional temperature field distribution cloud ma

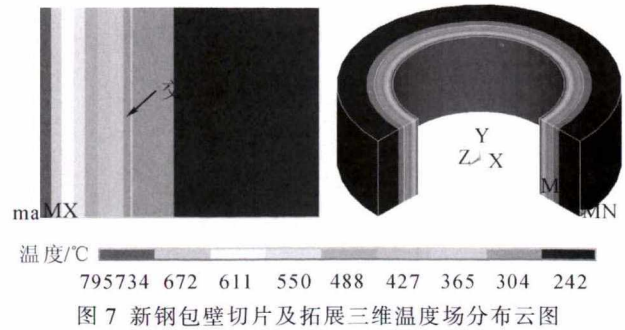


图 7 新钢包壁切片及拓展三维温度场分布云图
Fig.7 New ladle wall slice and expand three-dimensional temperature field distribution cloud map

面处，温度为 417 ℃，绝热板热阻率为 47.9%；新钢包包壳表面温度为 242 ℃，相比于原钢包，温度梯度区间主要集中在新型气凝胶绝热板保温层内，在保温层与钢包包壳交界面处，温度为 304 ℃，热阻率为 62.0%。可知钢包使用新型气凝胶绝热板后，与原钢包相比，热阻率提高 14.1%，钢包包壳表面温度降低 67 ℃，新钢包保温效果明显提升。

2.4　实测钢包包壳表面温度与有限元计算结果对比

在转炉炼钢生产过程中，钢包包壳表面温度受烘包状态、钢液出钢条件、加入合金物料的多少、种类及吹氩时间等各种因素的影响，波动较大，不易精确对比；综合分析后，采集 LF(Ladle Furnace 钢包精炼炉)出站软吹后的钢包包壳表面温度数据，因其钢包各工作层在 LF 精炼后，蓄热较稳定，钢包包壳温度波动较小。在 LF 软吹结束后，立即将钢包吊到铸机平台测其钢包包壳温度，保证软吹完后的测温时间一致性。并且所选钢包为首次投入使用到首次中修这段时间内，剔除开浇等不正常生产炉次。用红外测温枪(如图 8)对两种不同绝热板钢包包壳表面温度进行实测。并对钢包同一位置测温 3 次，取其平均值，共计测温 96 炉(新钢包 49 炉，原钢包 47 炉)，测量结果如表 2。

图 8 红外测温枪
Fig.8 Infrared temperature measuring gun

表2 钢包包壳表面温度
Tab.2 Ladle wall surface temperature

钢包	实测温度 /℃	有限元计算温度 /℃	误差(%)
新钢包	249	242	2.81
原钢包	316	309	2.22
新钢包-原钢包	-67	-69	2.99

通过表 2 可知，实测钢包包壳表面温度时，新钢包比原钢包温度降低 69 ℃；有限元分析计算时，新钢包比原钢包温度低 67 ℃，可如新钢包比原钢包有明显的保温效果；有限元分析计算值与实际测量值温度相差在 7 ℃以内，最大误差率为 2.99%，最小误差率 2.22%，平均误差率 2.67%，表明了该有限元模型和参数选取的准确性。

3　效益计算

3.1　新钢包和原钢包吨钢耐材成本对比

钢包内表面积 S 表为 44.71 m²；拆除绝热层时包龄以 600 炉为准，钢包平均装入量以 130 t 计算。新型气凝胶绝热板每平方米的价格为 1 200 元，钢包使用为双层，因此得出新钢包的绝热层使用成本为 1.38 元 /t；根据 2019 年吨钢能耗成本表可知，原钢包复合反射绝热板使用成本为 0.51 元 /t。因此，新钢包比原钢包耐材成本上升 0.87 元 /t

3.2　新钢包减少钢水温损冶炼成本计算

依据新钢包包壳表面温度为 249 ℃，原钢包包壳表面温度为 316 ℃，根据公式 $\phi=\phi_1+\phi_2$，算出钢包传热损失热功[13]，其中 ϕ_1 为钢包辐射传热，ϕ_2 为钢包对流传热。按照物体辐射热流量的计算公式(玻尔兹曼公式)

$$\phi_1=\varepsilon A\sigma(t_1^4-t_2^4)(\text{单位：W}) \tag{4}$$

其中，t_1 钢包表面温度，单位：K；t_2 环境温度，单位：K；ε 黑度；σ 玻尔兹曼常量，值为 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)；A 钢包表面积，m²；ϕ_2 可看作竖圆柱的对流传热，适用于以下对流传热公式。

$\phi_2=Ah\Delta t$ (单位：W)，其中：h 表面传热系数；A 传热表面面积；Δt 圆柱表面温度和外界温度的温差。

散热量 $Q=\phi T$，T 钢包运行时间，查钢液在 1 600~1 700 ℃下的比热 CP 为 0.837 kJ/kg·℃，钢液的总质量为 m=130 t，那么在不同钢包外壁温度下的散热差 $\Delta\phi$ 能使整包钢液升高的温度 $\Delta t=Q/\text{mcp}=\phi T/\text{mcp}$，这是 T 和 m 的函数，在钢液质量一定的情况下，只与周转时间 T 有关，根据现场钢包使用情况，得知钢包平均运行时间约为 90 min，即 T=1.5 h。由此可得出 Δt=9.88 ℃，即新钢包可比原钢包在一个钢包周转周期内(转炉出钢-精炼-连铸浇注完毕)节省钢液温度 9.88 ℃。

使用新型气凝胶绝热板钢包后，LF 炉升温采取加热结束温度比原钢包降低 9.88 ℃的措施。120 t LF 相关冶炼参数如表 3。

表 3 LF 炉相关参数
Tab.3 LF furnace related parameters

LF 炉	目前 LF 炉工序每包钢水平均提升约温度值 /℃	吨钢每升高 1 ℃电耗 /kW·h	参考电费单价 /(元 /kW·h)	LF 炉工序，吨钢每升高 1 ℃，电极消耗(kg/t 钢)	电极参考价格 /(元 / kg)
120	41	0.69	0.475	0.003 4	9.72

新钢包比原钢包在一个使用周期内节省 9.88 ℃，由表 3 参数计算可知新钢包吨钢节省电费成本为 3.57 元。

钢包使用新型气凝胶绝热板后，与原钢包相比，耐材成本上升 0.87 元 /t，减少钢液温损 9.88 ℃，冶炼成本下降 3.57 元 /t，综合成本下降 2.7 元 /t，取得显著经济效益。

4 结论

(1)新钢包与原钢包相比，采用有限元法计算分析时，钢包包壳表面温度下降 67 ℃，用红外测温枪实测时，钢包包壳表面温度下降 69 ℃，有限元分析计算值与实际测量值温度相差在 7 ℃以内，最大误差率为 2.99%，最小误差率 2.22%，平均误差率 2.67%，表明该有限元模型和参数选取的准确性，对研究钢包及钢厂其它保温设备温度场分布情况具有一定的指导和应用价值。

(2)新钢包与原钢包相比，保温效果提升明显，在一个钢包使用周转期内钢液温损减少 9.88 ℃，节省成本 2.7 元 /t 钢，对控制生产成本起到了积极作用，同时也减轻了钢包包壳热疲劳效应，有效保护了钢包包壳，延长了使用寿命。

参考文献：

[1] 杨赵军，曾亚南，李俊国. 65 t 钢包底吹工艺对钢液弱搅拌区特性影响模拟研究[J]. 铸造技术，2017, 38(3):653-654.

[2] Glaser B, Gornerup M, Sichen D. Thermal Modelling of the Ladle Preheating Process [J]. Steel Research International, 2011, 82(12): 1425-1434.

[3] 张彩军，乔士宾，王昂，等. 矩形坯结晶器凝固坯壳分析与流场的优化[J]. 铸造技术，2016, 37(5):964-968.

[4] 董鹏莉. 210 t 钢包底吹工艺优化物理模拟 [J]. 钢铁，2016，51(7)：41-44.

[5] 阮强，陈兴润，潘吉祥，等. 110 t 不锈钢钢包炉底吹氩水模拟[J]. 中国冶金，2016，26(2)：50-53.

[6] 贾长江，宋德晶，孙宝金，等. 铸造用钢包新型绝热保温材料的应用研究[J]. 铸造设备与工艺，2016(1)：42-44.

[7] 吴晓东，刘青，徐安军，等. 宝钢炼钢厂 300t 整体钢包热循环实测研究[J]. 北京科技大学学报，2001，23(5)：418-420，459.

[8] 孙晔，赵淑红，李振声.气凝胶绝热板研制及在钢包中保温效果研究[J]. 天津科技，2018(8)：59-60.

[9] 朱光俊，杨治立，常长志. 重钢 80 t 钢包瞬态温度场的模拟研究[J]. 冶金能源，2006，25(6):23-26.

[10] 刘占增，郭鸿志. 钢包传热的发展与现状[J]. 钢铁研究，2007(2)：59-63.

[11] 吴新华，孟宪武，陈磊，等. 烤包和盛钢工况下钢包温度场数值模拟[J]. 电子质量，2018，376(7)：84-85.

[12] 李华川，黄尚猛，陈晓云. 基于 ANSYS 的钢包温度场及应力场的仿真研究[J]. 装备制造技术，2007(6):35-37，40.

[13] 王卫华，钟凯. 复合反射绝绝板在 210 t 钢包上的传热效果[J]. 炼钢，2014，30(5):70-74.

2020 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979 年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG.

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造、熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式：请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期，每期定价 25 元，平寄全年 300 元（含邮费），挂号全年 336 元，快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

地址：西安市金花南路 5 号西安理工大学 608 信箱　**邮编：**710048

联系人：李巧凤　029-83222071

电话/传真：029-82312140　**网址：**www.zhuzaojishu.net　**E-mail：**zzjs@263.net.cn

银行汇款：户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行