● 装备技术 Equipment Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.024

双金属内衬套反向浇铸装置的设计与工艺研究

石永亮[1],陈存广[2],戚翠芬[1],李 爽[1]
(1.河北工业职业技术学院 材料工程系,河北 石家庄 050091;2.北京科技大学 新材料技术研究院,北京 100083)

摘 要:采用在钢管内壁直接浇铸的方法可以实现在钢管内壁制备耐磨金属层,但在浇铸过程中,高温金属液对钢管腐蚀速度快,造成钢管腐蚀穿孔,导致工艺难以控制,并且制备的金属层中存在大量的气孔,无法满足使用要求。为解决腐蚀穿孔与残留气孔问题,引入了 TRIZ 理论,采用因果链分析方法建立了浇铸装置的功能模型,找到了浇铸装置存在的问题。结果表明,采用技术冲突法设计并开发了快速反向浇铸装置,减少金属液腐蚀时间,消除了金属层中的残留气孔,并进行工艺设计,实现了快速连续生产,制备了满足要求的带有内壁耐磨涂层的双螺杆挤出机整体式双金属内衬套。

关键词:浇铸装置;双螺旋挤出机;内衬套;双金属;TRIZ 理论
中图分类号:TG232.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)07-0725-05

Design and Process Research of Reverse Casting Device for Bimetallic Inner Bushing Base

SHI Yongliang[1], CHEN Cunguang[2], QI Cuifen[1], LI Shuang[1]
(1. Department of Materials Engineering, Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China; 2. Advanced Material & Technology Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The method of direct casting on the inner wall of the steel tube can be used to prepare the wear-resisting metal layer. However, in the process of casting, the high temperature liquid metal corroded the steel tube quickly, resulting in corrosion and perforation of the steel tube, which made the process difficult to control. In addition, there were a large number of pores in the prepared metal layer, which cannot meet the requirements of use. In order to solve the problem of corrosion perforation and residual porosity, TRIZ theory was introduced, and the functional model of casting device was established by causal chain analysis method. The results show that the technical conflict law is designed and developed a rapid reverse casting device, reduce the liquid metal corrosion time, eliminate the residual porosity in the metal layer, and process design in order to realize the continuous production quickly, meet the requirements with the lining wear-resistant coating is prepared by the set of twin screw extruder and double metal liner.

Key words: casting device; double spiral extruder; inner bushing; bimetal; TRIZ theory

双螺杆塑料挤出机是塑料加工行业中的常用设备,用于输送、挤压热塑料,制备各种形状的塑料制品。双螺杆挤出机在运转的过程中,高温塑料长时间与内衬套摩擦,导致内壁磨损严重,使得内衬套的使用寿命降低。并且内衬套是采用对接拼合而成的,在其拼合接口处具有明显接缝,在接缝处常会残存塑料,当挤压其它颜色的塑料时,还会造成掺色,影响产品的外观。目前企业为了提高套筒的使用寿命,先用钢管离心铸造一层耐磨层,然后再切割对接成双 C 型,如图 1 所示,这种方法虽然提高了内衬套的使用寿命,但是接缝中塑料残存的问题仍然没有解决。所以制备出整体式内衬套、提高其使用寿命,并且开发出内衬套制备设备势在必行[1-5]。

TRIZ 理论是前苏联科学家阿奇舒勒在 1946 年创立,该团队分析了世界近 250 万份高水平专利,总结出技术发展进化的规律模式,并建立了一个由解决技术问题,实现创新开发的各种方法、算法的理论体系,即 TRIZ 理论体系。发展至今 TRIZ 理论解决了大量的工程及设备方面的实际问题,已经在各行各业得到了广泛的应用和推广。本文设计了双螺杆挤出机整体式内衬套浇铸装置,并结合 TRIZ 理论的技术冲突解题方法找出该装置的不足与问题之

收稿日期:2019-04-02
基金项目:河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2018221)
作者简介:石永亮(1984-),河北石家庄人,博士,副教授.研究方向:金属基复合材料的研究.
E-mail: shiyongliang100@163.com
通讯作者:戚翠芬(1970-),女,河北石家庄人,硕士,副教授.研究方向:材料加工技术的研究.
E-mail: 583555235@qq.com

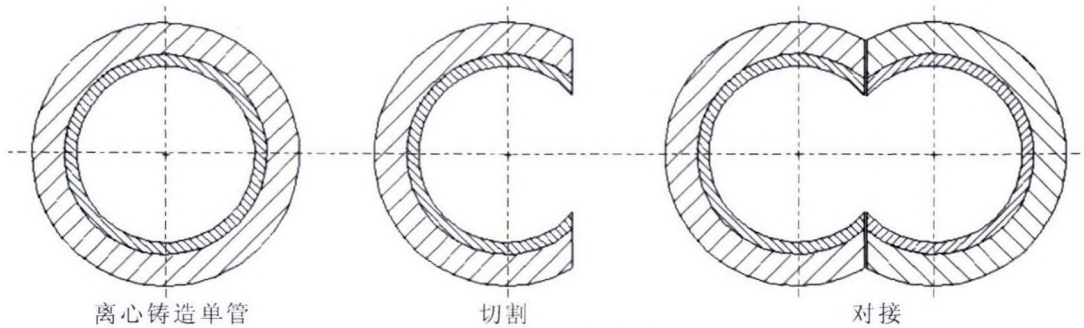

图 1 离心铸管对接
Fig.1 Centrifugal cast pipe butt joint

处，并对该装置进行创新设计，得出最佳方案[6,7]。

1 双 C 型套筒浇铸装置问题分析

采用普通钢管切割成 C 型，然后两个 C 型钢管对焊，如图 2 所示，钢管内放置两个陶瓷管，与外部钢管同心布置，钢管与陶瓷管的底部采用不定型耐火材料密封。最终在钢管与陶瓷管之间留有“8”字型间隙，将该装置放入井式炉中，如图 3，在氮气气氛的保护下，采用高频感应熔炼待浇铸金属液，金属液直接从上端浇铸到漏斗中，引入到“8”字型间隙中，冷却后，除去陶瓷管，内壁经过磨削加工，制备成整体套筒，通过该工艺能够制备出形状满足要求的内衬套，但是在后续的产品检测中，发现金属层内部存在大量气孔和局部金属层缺失，且在芯管的连接尖角处上述情况尤其严重，通过改进工艺参数都无法解决涂层中残余气孔问题。

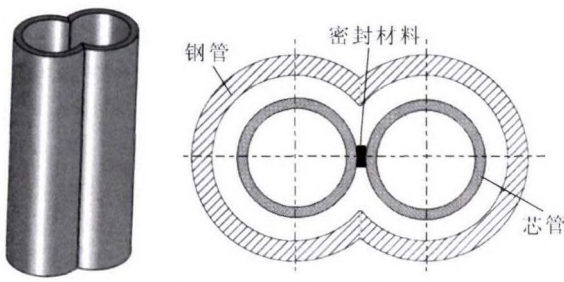

图 2 双 C 型钢管对焊
Fig.2 Butt welding of double C steel pipe

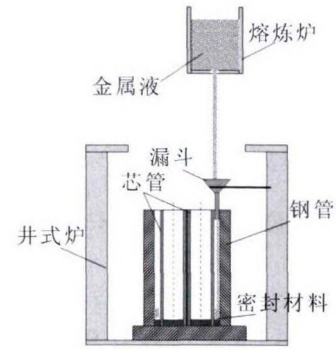

图 3 内衬套浇铸装置
Fig.3 Casting device for inner bushing

结合图 3 各组件之间的关系，建立了双金属内衬套浇铸装置的功能模型，如图 4 所示，从影响最终完成浇铸的质量来分析，该装置存在以下 3 个问题：①高频炉熔炼金属液可能出现金属液温度不够高，在浇铸过程中提前冷却；②井式炉加热体对钢管及后续浇铸下来的金属液保温能力不够，造成金属液提前凝固；③金属液无法在短时间完全填充钢管与芯管之间的间隙。我们最终的目的是要实现金属液完全填充钢管与芯管之间的间隙，不能有残余空气，金属层冷却后不能有残余气泡，所以针对第 3 个问

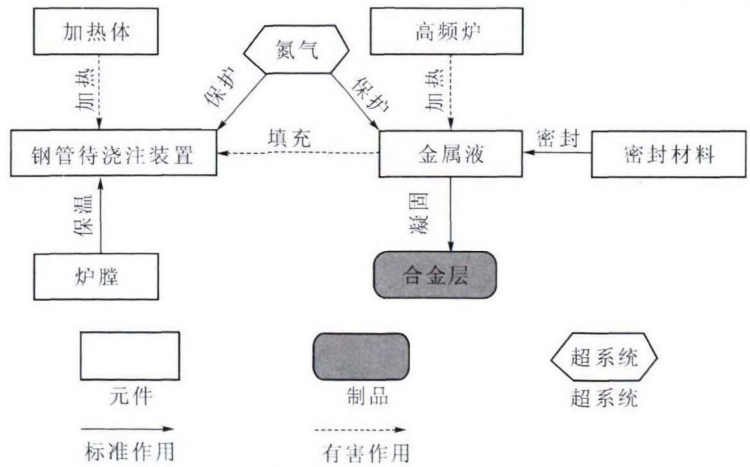

图 4 双金属内衬套浇铸装置的功能模型
Fig.4 Functional model of bimetal liner casting device

题应用因果链分析法确定问题产生的原因。如图 5 所示。

从图 5 的因果链看出，造成金属液不能充分填充钢管与芯管之间间隙的原因有两个，其一是因为金属流动性差，其二是因为金属液在凝固前无法将钢管与芯管之间的空气完全排除。造成金属液流动性差的原因是金属液浇铸后的降温速度太快，而金属液降温速度快是因为井式炉的保温温度低。造成钢管与芯管之间空气无法充分排除的原因有两个，一个是浇铸的速度快，二是浇铸的间隙小。因为浇铸时的金属液流速度难以控制，所以最终总结为造成金属液不能充分填充孔隙的原因是保温温度低(问题 1)和浇铸间隙小(问题 2)。针对这两个问题，应用 TRIZ 理论中的技术冲突理论对问题进行求解。

2　装置创新设计

针对问题 1(保温温度低)，为了提高井式炉中的保温温度，我们需要提高炉子的功率、增加浇铸装置的预热时间、改进炉子的保温措施等，但是这样做会导致双 C 型钢管高温氧化加剧。因此，可将温度作为改善的参数，将有害因素——氧化作为恶化的参数，建立矛盾矩阵，如表 1 所示[7]。

表1 矛盾矩阵1
Tab.1 Contradiction Matrix 1

改善的参数	恶化的参数	对应的发明原理
温度	物质产生的有害因素	变有害为有益原理，参数变化原理，分离原理，中介物原理

根据矛盾矩阵可知，可能解决此问题的发明原理有：变有害为有益原理；参数变化原理；分离原理；中介物原理。对于上述 4 条发明原理进行分析，可采用参数变化原理 35、分离原理 2 来解决此问题。

发明原理中的参数变化原理参数变化原理包括 5 条并列的内容：①改变物体的物理状态；②改变物体的浓度；③改变物体的柔性；④改变温度；⑤改变压力。具体到本次问题中，我们可以改变井式炉中的环境，增加井式炉中氮气的浓度来保护浇铸钢管与芯管。

发明原理中的分离原理分离原理：①将一个物体中的“干扰”部分分离出去；②将物体中的关键部分挑选或分离出去。具体到本次问题中，为了解决钢管氧化的问题，应该将钢管快速预热，在浇铸后能够从炉膛中迅速方便的取出，减少钢管在进式炉中的放置时间，如图 6。

针对问题 2(浇铸间隙小)，为了提高钢管与芯管之间的间隙，只能够缩小芯管的直径，这样最终制备出的金属层很厚，尺寸要求不符合，多余的部分还需要通过磨削加工的方法加工掉，因为金属层所用的金属本来就属于高硬度高耐磨的金属，导致后续加工很费劲，总的来说是降低了生产效率。因此，可将增大间隙也就是增大间隙的横截面积（对应的参数：6.静止物体的面积）作为改善的参数，将 39.生产率作为恶化的参数，建立如表 2 所示的矛盾矩阵[7]。

表2 矛盾矩阵2
Tab.2 Contradiction Matrix 2

改善的参数	恶化的参数	对应的发明原理
静止物体的面积	生产率	预操作原理，动态化原理，维数变化原理，套装原理

根据矛盾矩阵可知，可能解决此问题的发明原理有：预操作原理；动态化原理；维数变化原理；套装原理。对于上述 4 条发明原理进行分析，可采用预操作原理来解决此问题。

发明原理中的预操作原理的内容：①在操作开始前，使物体局部或全部产生所需的变化；②预先对物体进行特殊安排，使其在时间上有准备，或已处于易操作的位置。具体到本次问题，为了不受浇铸间隙小的影响，可以预先设置浇口，考虑到从上到下浇铸都会受到间隙小的影响而使空气不能完全排除，所以最终将浇口设计在芯管里，如图 7，在其中的一根芯管的底部开一个小孔，熔炼好的金属液从其中的一根芯管内部浇入，从芯管底部的小孔向上反流，这样金属液从下往上反流的速度慢，可以将金属管与芯管之间的空气全部排出，使得金属液能够全部填充金属管与芯管之间的间隙。同时冷却后芯管内部要留下一个金属液凝固后留下的金属柱，为了便于

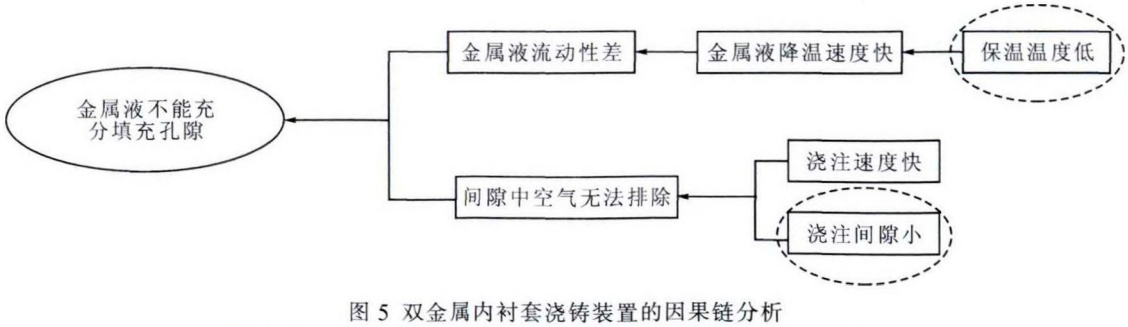

图 5 双金属内衬套浇铸装置的因果链分析
Fig.5 Causal chain analysis of casting device for bimetal inner bushing

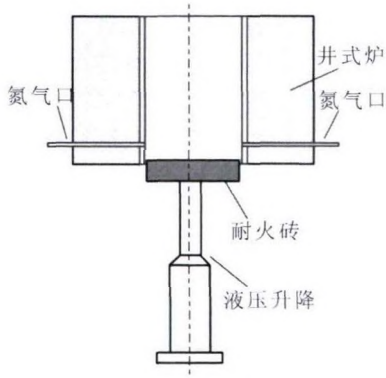

图 6 带有炉底升降装置的气氛保护炉
Fig.6 Atmosphere protection furnace with bottom lifting device

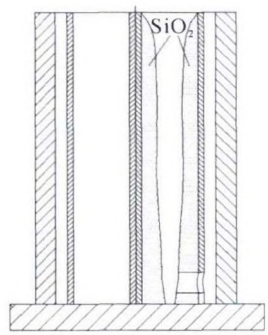

图 7 底部浇口装置
Fig.7 Bottom gate device

取出这个金属柱，在芯管内壁涂覆了一层砂子，这层砂子由 SiO_2 混合水玻璃(硅酸钠溶液)组成，高温浇铸后很容易捣碎。浇铸结束冷却后，钢管下端切掉 1~2 cm，然后将留下的金属柱从下往上拉出。

3 改进后的双金属内衬套浇铸装置

通过 TRIZ 理论创新设计对系统进行了最终的升级改进，改进后的浇铸装置主要由三部分组成，包括顶部的高频熔炼炉，中部的气氛井式炉，底部的液压升降装置。整个操作步骤包括：①将对焊的双 C 型钢管与两根氧化铝陶瓷芯管采用二氧化硅与水玻璃密封粘附在陶瓷底板上，两根芯管与钢管同心布置，且浇铸芯管底部开口，并灌注二氧化硅水玻璃中间留有浇铸的通道；②待二氧化硅与水玻璃密封材料硬化后，将其如图 8 所示放到液压升降平台的耐火砖上，并在浇铸芯管口插入陶瓷漏斗，然后升入井式炉中预热，井式炉中有氮气保护；③待高频熔炼炉中的金属液达到规定温度时，熔炼炉底部设置有滑动水口，水口打开金属液浇铸下来，经浇铸芯管内部的通道与底部的孔向上反流到钢管与芯管之间的间隙中，待金属液面升至顶部的时候，关闭高频熔炼炉底部水口停止浇铸；④井式炉停止加热，1~2 min 后液压升降装置下降到底部，取下浇铸后的钢管，并迅速用冷空气降温；⑤将另外一套钢管浇铸装置放到液压升降平台上继续制备下一个，可以做到连续生产。该装置已成功申请发明专利(一种双螺杆挤出机筒体内壁耐磨涂层的制备方法，ZL201810482999)。

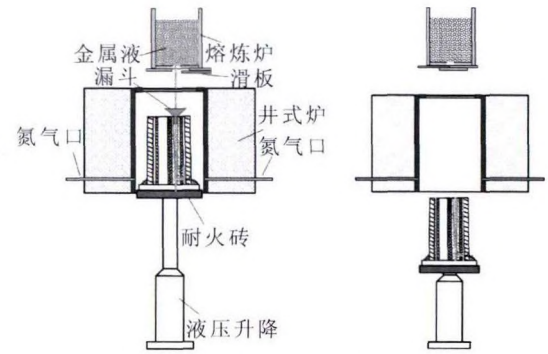

图 8 最终设计装置
Fig.8 Final design device

采用一种铸铁粉为原料，成分如表 3，并利用试验改进的浇铸装置，成功制备了双螺旋挤出机双金属内衬管，组织如图 9，可以看出金属层与钢管结合良好，中间有 20 μm 的过渡层，金属层中组织分布均匀，没有出现残余气孔与缺陷。

表3 金属液成分 w(%)
Tab.3 The composition of metal liquid

Cr	B	Si	C	Ni	Mn	Fe
2.0	1.5	0.8	3.1~3.3	≤3.0	0.9	余量

4 结论

利用 TRIZ 理论对内衬套浇铸装置进行了功能分析和因果链分析，找出了浇铸装置和工艺中存在

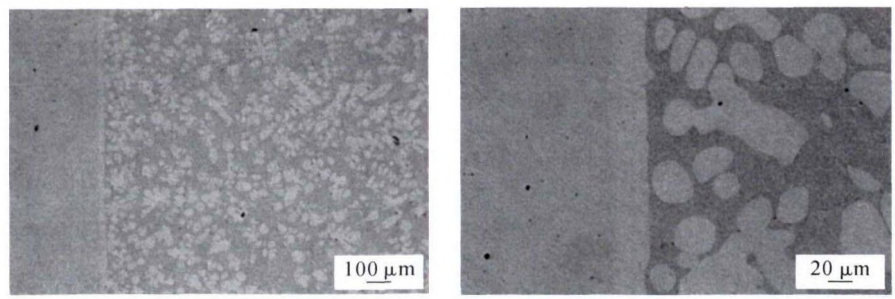

图 9 双金属内衬的微观组织
Fig.9 Microstructure of bimetallic lining

(下转第 739 页)

布的影响规律，得出如下结论：

(1)不同拉速下，结晶器内钢液流场的特征基本一致。拉速越大的情况下，结晶器内钢液湍流越剧烈，温度变化幅度越小，铸坯凝固坯壳越薄。

(2)结晶器内溶质富集在固液两相区，而在液相中逐渐降低，液相穴涡心的溶质浓度比外围高，入口处的偏析率最低，固液两相区的偏析率最高。随着拉速增大，偏析最严重的区域向结晶器窄面靠近，出口中心区域偏析率略微增大。

(3)夹杂物的体积分数分布与数量密度分布一致，并且与结晶器内钢液的速度分布基本一致，夹杂物体积分数和数量密度在钢液流动方向上较高，而在液相中不断降低，在自由液面处最低。随着拉速增大，出口处夹杂物体积分数与数量密度变大，并且距离中心对称面越近，夹杂物体积分数与数量密度变化越显著。

参考文献：

[1] Chaudhary R, Ji C, Thomas B G, et al. Transient turbulent flow in a liquid-metal model of continuous casting, including comparison of six different methods [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2011, 42(5):987-1007.

[2] Quan YUAN, Sivaraj Sivaramakrishnan, Brian G. Thomas. Comparison of four methods to evaluate fluid velocities in a continuous slab casting mold [J]. ISIJ International, 2001, 41(10):1262-1271.

[3] Lei Hong, Wang Lianze, Wu Ziniu, et al. Collision and coalescence of alumina particles in the vertical [J]. ISIJ International, 2002, 42 (7): 717-725.

[4] 雷洪，张红伟，陈芝会，等. 连铸结晶器内钢液流动、凝固和夹杂物的分布[J]. 钢铁，2010，45(5): 24-29.

[5] Geng Dianqiao, Lei Hong, He Jicheng, et al. Numerical simulation for collision and growth of inclusions in ladles stirred with different porous plug configurations [J]. ISIJ International, 2010, 50 (11): 1597-1605.

[6] Hong LEI, Yan ZHAO, Dianqiao GENG. Mathematical model for cluster-inclusion's collision-growth in inclusion cloud at continuous casting mold [J]. ISIJ International, 2014, 54(7): 1629-1637.

[7] Zhang L, Taniguchi S, Cai K. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2000, 31(2): 253-266.

[8] Ren Y, Wang Y, Li S, et al. Detection of non-metallic inclusions in steel continuous casting billets [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1291-1303.

[9] Ling H, Zhang L. Numerical simulation of the growth and removal of inclusions in the molten steel of a two-strand tundish [J]. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2013, 65 (9): 1155-1163.

[10] 方庆. 大方坯连铸过程流动、传热、传质行为及凝固组织的模拟研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2018.

[11] Qing F, Hongwei N, Bao W, et al. Effects of EMS induced flow on solidification and solute transport in bloom mold [J]. Metals, 2017, 7(3): 72.

[12] Bennon W D, Incropera F P. A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems—I. Model formulation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(10): 2161-2170.

[13] 唐家鹏. ANAYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2016.

[14] Lei H, Geng D Q, He J C. A continuum model of solidification and inclusion collision-growth in the slab continuous casting caster [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2009, 49(10): 1575-1582.

[15] 张红伟，王恩刚，赫冀成. 方坯连铸过程中钢液流动、凝固及溶质分布的耦合数值模拟[J]. 金属学报，2002(1):99-104.

[16] 董鹏莉，尚海霞，王华. 铸坯及板卷典型质量缺陷成因与控制技术[J]. 中国冶金，2017，27(6): 7-13.

[17] 张琦，吴滟帮，李欢. 内置式搅拌磁场对连铸空心铸坯内夹杂物分布影响[J]. 铸造技术，2018，39(1): 111-115，119.

[18] 王月，艾新港，李胜利，等. 拉速对板坯结晶器钢液流动及夹杂物运动影响的数学模拟 [J]. 辽宁科技大学学报，2015，38(6): 412-417.

(上接第 728 页)

的问题，并应用技术冲突理论对浇铸装置进行了创新设计，将浇口设计在内壁带有 SiO_2 砂层的芯管中，高温下金属液从底部反向填充间隙并排除空气；设计了炉底带有液压升降装置的气氛井式炉，能够起到预热保温作用，方便产品进出。该浇铸装置不仅能够解决工艺中金属液无法充分填充间隙和残留气孔的问题，而且能够做到连续式生产，提高了生产效率。

参考文献：

[1] 郭在在，曹剑武，牟晓明，等. 一种镶嵌铸铁管的石墨内衬板制造方法[J]. 铸造技术，2018，39(12)：2732-2734.

[2] 翟晨晨，苏恒渤，郭嘉，等. Cr/C 比对中铬铸铁复合抗磨辊圈组织和耐磨性的影响[J]. 铸造技术，2019，40(2)：139-142.

[3] 章顺法. 具有耐磨合金层的双螺杆挤出机用筒体：中国，201620012547.8[P]. 2016-01-05.

[4] 王新贵. 一种具有复合合金层的内衬套及其制备方法：中国，201710031039.3[P]. 2017-01-17.

[5] 范洪国. 一种基于 TRIZ 的注塑机注射机构：中国，201611045643.3[P]. 2016-11-24.

[6] 张换高. 创新设计 TRIZ 系统化创新教程[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[7] 成思源，周金平，郭钟宁. 技术创新方法-TRIZ 理论及应用[M]. 北京：清华大学出版社，2014.