基于 TRIZ 理论的连铸钢包自动开浇工艺设计

曹 磊，张珊珊，韩提文*，曹 珍，张绅逸，刘欣爱

（河北工业职业技术大学材料工程系，河北 石家庄 050091）

摘 要：基于 TRIZ 理论，建立了连铸钢包开浇系统的功能模型，通过因果链原因分析法，确定了产生问题的关键原因；充分应用技术冲突、物理冲突、物质-场模型以及效应等工具对连铸钢包开浇工艺进行了改进，产生了 8 种创新解。针对某厂 80 t 钢包具体情况，通过方案对比优选出最佳方案，即采用真空复合滑板控流结构。实施后取得了良好的效果，钢包自动开浇率达到 97% 以上，虽然与采用传统的引流砂开浇工艺的自开率基本持平，但是降低了钢中大颗粒夹杂物产生量，有效解决了传统引流砂开浇工艺带来的引流砂污染钢液的顽疾。

关键词：连铸；钢包；自动开浇；滑板；TRIZ 理论

中图分类号：TF777　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004−7638(2023)02−0194−06

DOI：10.7513/j.issn.1004-7638.2023.02.028　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID)：**

听语音 聊科研 与作者互动

Innovative design of automatic casting process for continuous casting ladle based on TRIZ theory

Cao Lei, Zhang Shanshan, Han Tiwen*, Cao Zhen, Zhang Shenyi, Liu Xin'ai

(Materials Engineering Department, Hebei Vocational University of Science and Technology, Shijiazhuang 050091, Hebei, China)

Abstract: Based on TRIZ theory, the function model of ladle pouring system had been established, and the key causes of the problem had been determined by causal chain analysis. By fully applying the tools of technical conflict, physical conflict, material-field model and effect, the start-up process of continuous casting ladle was improved, eight kinds of innovative solutions were produced, and the optimal scheme was determined by scheme comparison. The scheme adopts vacuum composite flow control skateboard and achieves good process effect. The automatic casting rate of the ladle can reach more than 97%. Although it is basically the same as the self-opening rate of the traditional drainage sand casting process, the new scheme can reduce the amount of large particle inclusions in the steel and effectively solve the drainage sand pollution caused by the traditional drainage sand casting process.

Key words: continuous casting, ladle, automatic pouring, skateboard, TRIZ theory

收稿日期：2022−12−29

基金项目：大中学生科技创新能力培育专项项目 (22E50176D)；科技部创新方法工作专项项目（2020IM030200）；河北省自然科学基金（E2021417001）；河北省高等学校科学技术研究项目（QN2022090）。

作者简介：曹磊，1984 年出生，男，山东滕州人，硕士研究生，副教授，主要研究方向：高品质洁净钢，TIRZ 创新应用，E-mail：caolei@hbcit.edu.cn；　*通讯作者：韩提文，1967 年出生，教授，E-mail：hantiwen@hbcit.edu.cn。

0　引言

钢包的顺利开浇是保证连铸生产正常运转的重要环节, 对于稳定连铸操作,提高连浇率,保证钢水质量十分重要。为了提高连铸钢包自动开浇率, 通常先向钢包上水口内装入引流砂, 然后再装入钢液, 引流砂与钢液直接接触时, 能形成合适厚度的烧结层[1], 精炼完成后, 当打开滑板时, 钢液会在静压力作用下将引流砂冲出, 使钢液顺利通过水口, 进而完成钢液的自动开浇。使用粉状混合物作为耐火引流砂是由 Kono 和 Fukuhisa[2] 首次提出的, 该混合物主要由高纯度二氧化硅砂和低熔点添加剂组成。随后, 为了进一步提高钢包自开率, 国内外学者开展了诸多研究与探讨, 总结起来主要集中在两方面: 一方面是针对影响钢包自开率的因素对如何提升钢包自开率进行了研究分析[1, 3]; 另一方面, 国内外不同学者针对引流砂的烧结性能及引流砂高温烧结机理进行了研究[1, 4−6]。由此可见, 在已经公开发表的文献中, 国内外学者研究的聚焦点还是基于引流砂自动开浇工艺, 而很少脱离引流砂而开展相关的研究工作。但是, 不论是硅质引流砂还是铬质引流砂, 其本质都是外来夹杂物, 一旦进入钢液将会污染钢液, 成为连铸坯中夹杂物的主要来源,最终影响钢铁产品质量[7]。尤其是对夹杂物水平要求极高的高品质 GCr15 轴承钢, 危害极大。对于引流砂完成引流后, 如何避免其进入钢液, 污染钢液, 目前除了采用人工接砂盘截留引流砂外没有更好的解决措施。

因此, 为了解决上述问题, 有必要对连铸钢包自动开浇工艺进行创新优化。TRIZ 理论作为一种技术创新的工具, 在解决实际工程技术问题中具有重要作用, 能够为专业技术人员科学系统地解决问题提供思路与方法。国内外学者对 TRIZ 的理论及其应用进行了广泛而深入的研究, 在许多工程技术领域得到了广泛应用[8−17], 已经成为一种可以对产品与工艺进行创新设计的完善的系统工具, 但是 TRIZ 理论在连铸钢包自动开浇中的应用研究相对较少。为此, 笔者引入了 TRIZ 创新理论分析工具, 将 TRIZ 理论与钢包自动开浇工艺设计有机结合起来, 利用 TRIZ 分析工具求解钢包自动开浇创新工艺, 最终提出在完全摒弃传统引流砂的情况下, 通过“钢液自服务”的方式实现钢包的自动无污染开浇, 以期为后续工艺设计和相关研究提供参考。

1　钢包自动开浇问题分析

1.1　功能分析

转炉出钢时, 钢包圆柱形水口底部用滑板将其挡住, 然后将钢液倒入钢包内, 钢液会自然填充至圆柱形的钢包水口内。钢包开浇时, 将钢包水口底部滑板拉开, 使其浇注孔与钢包水口重合, 从而实现钢液浇注。钢包内钢液在精炼处理、工艺等待等过程中, 圆柱形水口内的钢液温度会随着时间延长不断降低, 温度降低, 钢液冷凝, 进而将钢包水口堵塞, 无法实现钢液的自动开浇。

根据连铸钢包浇注系统的工作原理, 建立了如图 1 所示的功能模型, 矩形框代表系统的元件, 椭圆形框代表系统的制品, 六角形框代表超系统元件; 实线箭头代表标准作用, 而波浪线箭头代表存在有害的不希望的作用。由此可以从功能模型中发现钢包下滑板会对钢水产生有害作用——冷凝钢水。一旦钢水被冷凝, 当打开滑板的时候, 钢水不能自动开浇, 需要采取烧氧等措施进行补救。

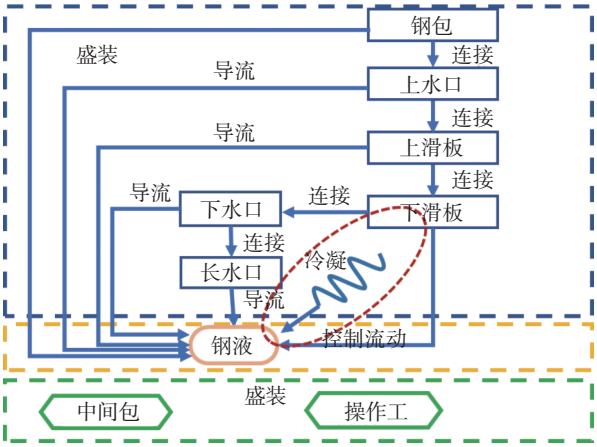

图 1　功能模型示意

Fig. 1　Schematic diagram of function model

1.2　因果分析

准确的认识问题是解决问题的前提。针对功能模型分析得出的有害作用, 采用因果链分析法进行因果分析, 如图 2 所示。钢水产生冷凝的直接原因是钢水温度降低且钢水液相线温度较高(一般>1 500 ℃)。而钢水液相线是由钢种成分决定的, 无法改变。对于钢水温度降低这个原因进一步进行因果分析发现, 钢水停留时间过长以及下滑板导热快 2 个因素都会导致上滑板上的钢水温度降低。但是对于钢水停留时间长这个因素是由钢液冶炼的生产工艺要求决定

的，无法改变。所以通过因果分析，确定了产生钢水冷凝问题的 3 个关键原因，即：钢包结构存在不足；下滑板导热系数大；下滑板厚度薄。

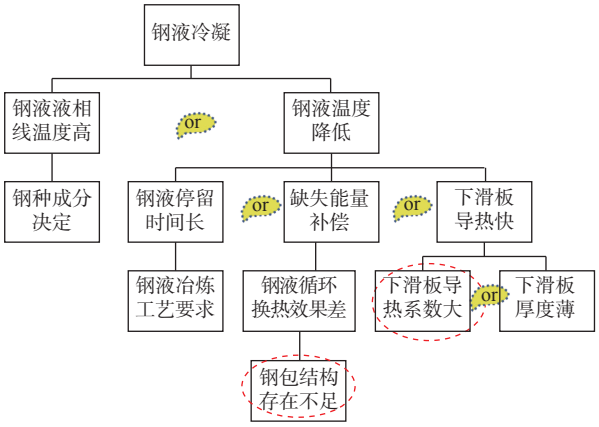

图 2　因果链分析法分析原因

Fig. 2　Reasons determined through causal chain analysis

对于因果分析得到的 3 个关键原因中的下滑板厚度薄，可以凭借经验得出相应的解决，即增加滑板的厚度。但对于钢包结构不足和下滑板导热系数大的两个关键原因则不能简单地凭借经验或者提出显而易见的方案解决，所以钢包结构不足以及下滑板导热系数大为本研究的问题关键点。

2　利用 TRIZ 工具求解

2.1　针对钢包结构不足为问题关键点求解

利用 TRIZ 创新工具中物质-场模型进行求解。物质-场模型分析是 TRIZ 理论中的一个重要分析工具，提供了 6 种一般解和 72 种标准解用于解决设计问题。

在本问题关键点中，首先确定关键问题，找出组成系统功能的元素：需要实现的功能是对水口内钢水保温，防止冷凝。物质 S2：下滑板（工具）；物质 S1：钢水；场 F：热能。

第二步确定物质-场模型的类型，热场 F 通过下滑板 S2 作用到钢水 S1 中，对 S1 起到保温作用，但是保温作用不足，无法实现系统所期望的功能，属于效应不足的完整物质-场模型。

第三步建立物质—场模型，如图 3 所示。

根据所建问题的物质-场模型，应用标准解决流程，得到标准解为 NO.3 建立外部复杂的物质-场模型、NO.5 引入环境和添加物的物质-场模型以及 NO.20 结构化场的物质-场模型。

NO.3 建立外部复杂的物-场模型，即可在 S1 或者 S2 中引入一种永久或者临时性的内部添加物质 S3，帮助系统实现功能。据此可以得到方案 2，如图 4 所示，可在下滑板和钢水间加入一种低熔点高密度的液体金属“防凝剂”，以起到保温防冷凝作用。

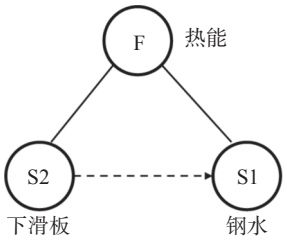

图 3　物质-场模型

Fig. 3　Matter-field model

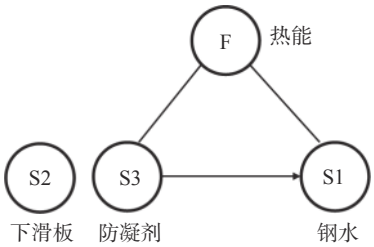

图 4　方案 2：通过引入一种外部物质改善系统功能

Fig. 4　Scheme 2:　Improving system functionality by introducing an external substance

液体金属防凝剂一般选用熔点小于钢包水口环境温度的铅铋合金、铅锑合金等，因为在使用时，可以呈现液体状态。当需要浇注时，可以打开滑板，金属“防凝剂”通过钢包下水口和长水口进入中间包，如图 5 所示。

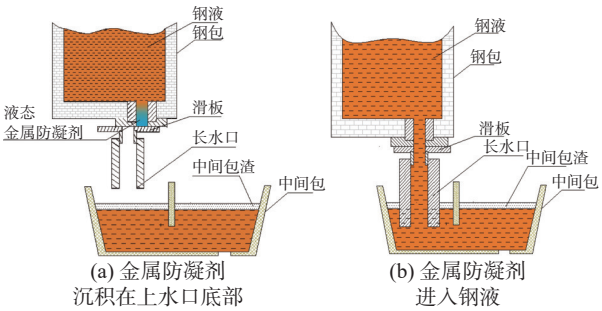

图 5　方案 2 示意

Fig. 5　Schematic diagram of scheme 2

虽然方案 2 在一定程度上解决了钢液在钢包水口内长时间等待而产生的冷凝问题。但是同时也产生了新的问题：如果使用低熔点高密度的金属防凝剂，那么便能解决引流砂污染钢液的问题，但其作为钢中的残余元素会产生累积效应，导致钢铁产品质量下降，同时也会造成资源浪费，所以存在技术冲突。转化为 TRIZ 标准冲突需改善的参数：31 物体产生的有害作用，10 物体的质量（残余元素质量积累），

查找冲突矩阵可以得到对应的发明原理为 35、22、1、39。依据发明原理 22, 变有害为有益, 利用有害因素, 特别是对环境有害的因素, 获得有益的结果, 得到方案 3, 如图 6 所示。

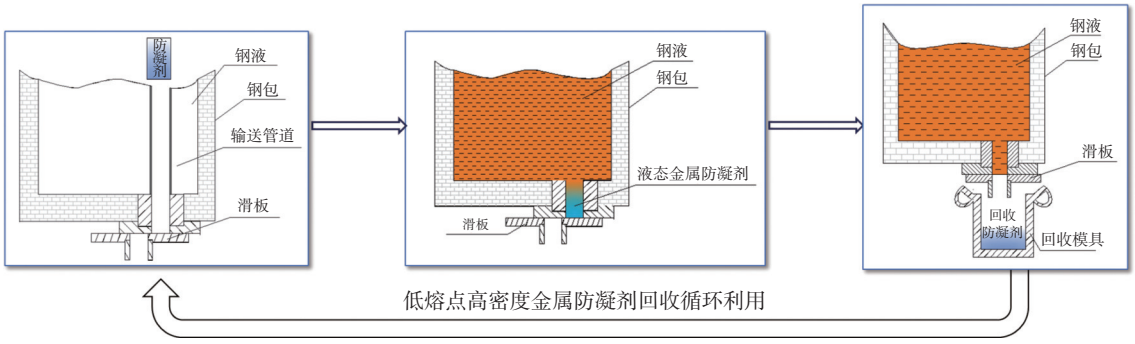

图 6　方案 3 示意

Fig. 6　Schematic diagram of scheme 3

NO.5 引入环境和添加物的物质-场模型, 即可通过在环境中引入添加物来解决问题。据此得到方案 4, 如图 7 所示, 下滑板(S2)散热快, 造成水口内钢水温度低产生冷凝,可对水口内钢水(S1)增加电磁加热($S_{改进的超系统}$)来调节钢水温度, 防止冷凝。

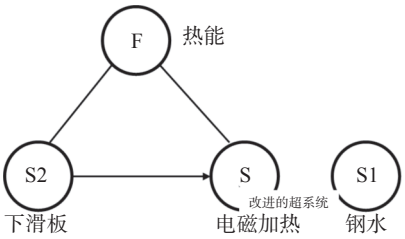

图 7　方案 4: 通过引入电磁加热改善系统功能

Fig. 7　Scheme 4:　Improving system function by introducing electromagnetic heating

NO.20 结构化场的物质-场模型, 即用动态场替代静态场以提高物质-场系统的效率。据此结合连铸钢包浇注系统可用资源(钢包底部透气塞、氩气、钢包内钢水热能、滑板)可以得到方案 5, 如图 8 所示, 将钢包底部原有的底吹氩透气塞与钢包下滑板组合在一起, 形成包底吹氩和滑动水口一体化设计, 通过下滑板上嵌入的透气塞向钢水上水口内吹入氩气, 使得钢包上水口内低温钢水与钢包内高温钢水实现机械混合, 将原有的静态热能场替换成机械场, 从而改善系统功能, 具体方案示意如图 9 所示。

2.2　针对下滑板导热系数大为问题关键点求解

利用 TRIZ 创新工具中技术冲突进行求解。首先进行冲突描述: 为了减少下滑板向环境的散热量, 需要减小下滑板材料的导热系数, 即将下滑板材质更换为导热系数更低的材料, 比如多孔材料、石棉材料。但是更换为多孔材料等导热系数低的材料后, 下滑板的高温强度会降低, 所以存在技术冲突。

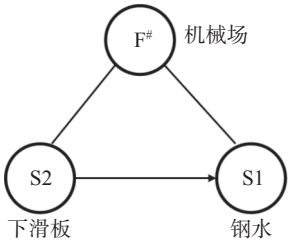

图 8　方案 5: 通过将静态热场替换成动态机械场改善系统功能

Fig. 8　Scheme 5:　Improve system functionality by replacing static thermal fields with dynamic mechanical fields

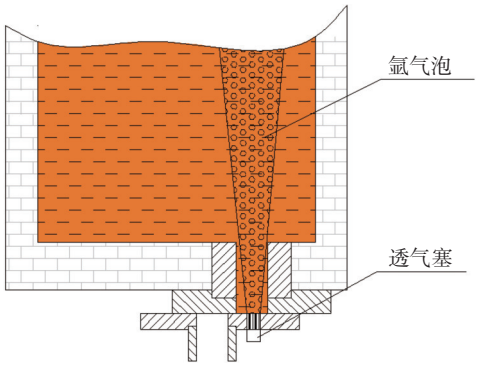

图 9　方案 5 示意

Fig. 9　Schematic diagram of scheme 5

其次将技术冲突转化为 TRIZ 标准冲突: 改善的参数为 17 温度(物体或系统所处的热状态, 包括其他热参数), 恶化的参数为 14 强度(物体抵抗外力作用以免使自身改变的能力)。

查找冲突矩阵可以得到对应的发明原理为 10、30、22、40。依据发明原理 40 复合材料原理: 将单一材料改成复合材料, 考虑将原来单一的刚玉材质改成复合材料, 既能满足强度要求, 又能减少散热, 起到保温防冷凝效果。据此可以得到方案 6, 如图 10 所示, 将下滑板做成多层复合结构, 为了保证滑板表

层对高温强度的要求仍然采用原刚玉材质，中间复合多孔保温材料减小通过滑板向环境的散热量，防止钢水冷凝。

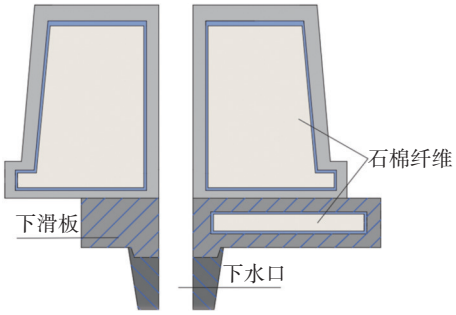

图 10　方案 6 示意
Fig. 10　Schematic of scheme 6

利用 TRIZ 创新方法中效应工具求解：确定需要改变的参数是“Decrease Heat Conduction”；查找效应知识库，得到可用的效应为“Vacuum”；依据“Vacuum”效应得到技术启示，产生解决方案 7，如图 11 所示，即将滑板做成内部中空形式，因为空气导热系数远远低于固体滑板，可以有效提高滑板的保温效果。

方案 8，如图 12 所示，进一步地可以将滑板内部中空抽成真空，做成真空滑板。

3　方案评价与优选

通过 TRIZ 创新方法，得到 8 个创新解，对应的创新设计授权发明专利 1 项，实用新型专利 2 项；申请发明专利 3 项，申请国际 PCT 专利 2 项。

针对国内某钢铁企业 80 t 钢包的实际情况，从成本（参数 A,权重 0.2）、实施难度（参数 B,权重 0.2）、生产稳定性（参数 C,权重 0.3）、实施效果（参数 D,权重 0.3）等方面对上述 8 个方案进行综合评价，可以看出，方案 8 评价得分最高，见表 1，因此确定采用真空复合控流滑板为最优方案。实施结果表明，钢包自动开浇率可以达到 97% 以上，虽然与采用传统的引流砂开浇工艺的自开率基本持平，但是降低了钢中大颗粒夹杂物产生量，有效解决了传统引流砂开浇工艺带来的引流砂污染钢液的顽疾。

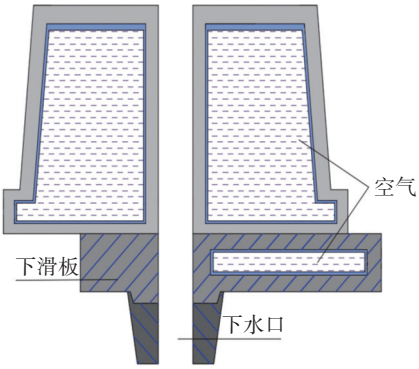

图 11　方案 7 示意
Fig. 11　Schematic of scheme 7

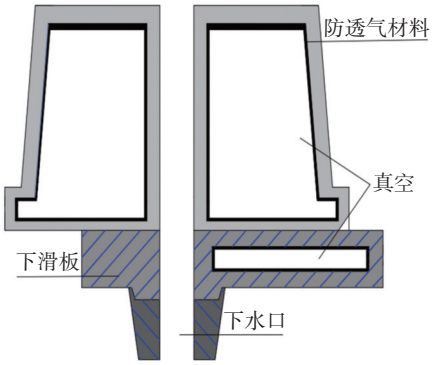

图 12　方案 8 示意
Fig. 12　Schematic of scheme 8

表 1　方案比选
Table 1　Scheme comparison results

编号	方案详情	A	B	C	D	方案评价
方案1	增加滑板厚度	10	10	10	5	8.5
方案2	低熔点高密度的液体金属“防凝剂”	8	9	9	7	8.2
方案3	低熔点高密度金属防凝剂回收循环利用	8	8	8	7	7.7
方案4	通过对水口内钢水(S1)增加电磁加热(S改进的超系统)来调节钢水温度，防止冷凝	6	6	7	6	6.3
方案5	将钢包底部原有的底吹氩透气塞与钢包下滑板组合在一起，形成包底吹氩和滑动水口一体化设计，通过下滑板上嵌入的透气塞向钢水上水口内吹入氩，使得钢包上水口内低温钢水与钢包内高温钢水实现机械混合，将原有的静态热能场替换成机械场，从而改善系统功能	9	9	8	7	8.1
方案6	下滑板镶嵌石棉板等保温材料	9	9	10	8	9
方案7	内部中空结构的下滑板	9	9	10	9	9.3
方案8	内部真空结构的下滑板	9	9	10	10	9.6

4　结语

基于 TRIZ 理论, 建立了整体功能模型, 采用因果链法进行原因分析, 确定了产生问题的关键原因; 充分应用技术冲突、物理冲突、物质-场模型以及效应等工具对连铸钢包开浇工艺进行了优化, 产生了 8 种解决方案。针对某厂实际, 通过方案比选, 得到最优解决方案为使用真空复合控流滑板, 实施后取得了良好的工艺效果, 钢包自动开浇率在 97% 以上。说明 TRIZ 理论在解决冶金领域实际工程技术问题中具有很强的实用性, 可以广泛应用, 从而解决困扰冶金工艺技术人员的诸多难题。

参考文献

[1] Deng Zhiyin, Peng Peng, Zhu Miaoyong. State of art in study on sintering of ladle filler sands and improvement of ladle free-opening rate[J]. Iron and Steel, 2022, 57(1): 1−12.
(邓志银, 彭朋, 朱苗勇. 钢包引流砂烧结与钢包自动开浇率提升研究进展[J]. 钢铁, 2022, 57(1): 1−12.)

[2] Kono T, Fukuhisa Y. Improvement of opening ratio without burning by oxygen on ladle sliding nozzles[J]. Taikabutsu, 1978, (5): 638−642.

[3] Zhong Kai, Wang Cong, Zhang Qidong, *et al*. Research and practice on improving free-opening rate of covered ladle[J]. China Metallurgy, 2019, 29(3): 36−42.
(钟凯, 王崇, 张启东, 等. 提高加盖钢包自开率的研究与实践[J]. 中国冶金, 2019, 29(3): 36−42.)

[4] Kobayashi Y, Todoroki H, Kirihara F, *et al*. Sintering behavior of silica filler sands for sliding zozzle in a ladle[J]. ISIJ International, 2014, 54(8): 1823−1829.

[5] Deng Z, Glaser B, Bombeck M A, *et al*. Mechanism study of the blocking of ladle well due to sintering of filler sand[J]. Steel Research International, 2016, 87(4): 484−493.

[6] Deng Z, Glaser B, Bombeck M A, *et al*. Effects of temperature and holding time on the sintering of ladle filler sand with liquid steel[J]. Steel Research International, 2016, 87(7): 921−929.

[7] Wang Bo, Zou Ping, Sun Xiubing, *et al*. Source analysis and control of large inclusions in Q195 hot rolled strip[J]. China Metallurgy, 2021, 31(8): 60−65.
(王博, 邹平, 孙秀兵, 等. Q195热轧带钢大型夹杂物来源分析及控制[J]. 中国冶金, 2021, 31(8): 60−65.)

[8] Li Wengqiang, Li Yan, Wang Jie, *et al*. The process model to aid innovation of products conceptual design[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(5): 3574−3587.

[9] Yang Yousheng, Tang Shunjun, Wang Xiaodong, *et al*. Deep-sea water hydraulic solenoid valves based on TRIZ theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(16): 205−212.
(杨友胜, 唐顺军, 王晓东, 等. 基于 TRIZ 理论的深海水液压电磁阀[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 205−212.)

[10] Zhong Xingli, Lu Yijia, Ai Yu, *et al*. Design of eco-friendly stockyard based on TRIZ theory[J]. China Metallurgy, 2023, 33(1): 139−146.
(钟星立, 路益嘉, 艾宇, 等. 基于TRIZ 理论的环保原料场设计[J]. 中国冶金, 2023, 33(1): 139−146.)

[11] Yang C J, Chen J L. Forecasting the design of eco-products by integrating TRIZ evolution patterns with CBR and simple LCA methods[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 2884−2892.

[12] Liu Xiaoyong, Wu Xiaoling, Li Rongli, *et al*. Research on product sensorial design method based on conflict resolution theory of TRIZ[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(10): 136−144.
(刘小勇, 吴小玲, 李荣丽, 等. 基于TRIZ冲突解决原理的产品感知设计方法研究[J]. 机械设计, 2021, 38(10): 136−144.)

[13] Chou J R. An ideation method for generating new product ideas using TRIZ, concept mapping, and fuzzy linguistic evaluation techniques[J]. Advanced Engineering Informatics, 2014, 28(4): 441−454.

[14] Wang Wei, Li Xindi, Nie Zifeng. Innovative design of agricultural machinery's automatic loading following system based on TRIZ theory[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(2): 101−106.
(王伟, 李昕迪, 聂子丰. 基于TRIZ理论的农机自动装载跟随系统创新设计[J]. 机械设计, 2022, 39(2): 101−106.)

[15] Moehrle M G. TRIZ-based technology roadmap ping[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[16] Li Miao, Ming Xinguo, He Lina, *et al*. A TRIZ-based trimming method for patent design around[J]. Computer-Aided Design, 2015, 62: 20−30.

[17] Cao Lei, Shi Yongliang, Ma Baozhen, *et al*. The application of TRIZ theory in improving the harm of drainage sand to molten steel[J]. Refractories, 2021, 55(6): 517−521.
(曹磊, 石永亮, 马保振, 等. TRIZ理论在改善引流砂对钢液危害中的应用[J]. 耐火材料, 2021, 55(6): 517−521.)

编辑　杨冬梅