

双中间包技术的优化应用与实践——提升钢水质量与连铸效率

Optimized Application and Practice of Double Tundish Technology: Enhancing Steel Quality and Casting Efficiency

供稿|杨童童¹, 胡绍伟², 张超杰², 张立强² / YANG Tongtong¹, HU Shaowei², ZHANG Chaojie², ZHANG Liqiang²

内容导读

本文系统研究了双中间包工艺技术在石横特钢集团有限公司的应用与优化。双中间包作为一种连铸中间包技术,通过优化结构与流场分布,有效提高了钢水质量和生产效率。研究内容主要包括双中间包结构设计、冲击区优化、开浇方式及在线检测等方面。在结构设计上,重点优化了双定径水口和快换装置,确保钢水流动的稳定性与高效性;冲击区采用高耐热、抗侵蚀材料,优化流场结构,减少非金属夹杂物的生成;开浇环节制定了合理的开浇顺序和液面控制策略,提高了浇注稳定性与钢水质量;在线检测方面,通过分阶段测温 and 实时探伤,确保中间包在高温、高压环境下安全运行。研究结果表明,经上述优化后,石横特钢钢水纯净度和浇注效率明显提升,中间包使用寿命显著延长,生产成本有效降低。本研究可为双中间包技术在钢铁行业的推广应用提供参考与借鉴。

在现代钢铁生产中,连铸工艺已成为不可或缺的核心技术,其通过将液态钢水直接铸造成所需规格的钢坯,大幅提高了生产效率和产品质量,同时降低了生产成本^[1-3]。然而,随着生产规模的不断扩大和 market 需求的日益多样化,传统单中间包技术在诸多方面已难以完全满足高效、稳定生产的实际要求。双中间包技术作为新型连铸中间包技术,逐渐受到业内的广泛关注和深入研究。

相比传统单中间包,双中间包在钢水温度均匀性、纯净度和浇注稳定性方面具有显著优势,尤其在死区压缩、流场均化及内衬寿命延长等方面效果突出。双中间包技术的引入主要是为应对现代钢铁生产中对高效、稳定及高质量钢水的需求。该技术通过双中间包结构设计,使钢水在进入铸机前实现更充分的混合与均匀分布,从而提高了钢水纯净度和温度一致性。与单中间包相比,双中间包具有更

作者单位: 1. 石横特钢集团有限公司, 山东 肥城 271600; 2. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243000

大的容量和更高的浇注效率,通过合理的流场优化设计,显著减少了钢水中非金属夹杂物含量,提高了钢水的整体质量^[4-6]。

双中间包技术在钢铁生产中的应用,不仅提升了生产效率,还降低了生产成本。在实际生产中,传统单中间包技术受自身设计局限性影响,常面临浇注不均、温度不稳定和非金属夹杂物难以有效去除等难题^[7-8],而双中间包技术通过优化设计与工艺改进,可有效解决上述问题,显著提升钢水质量和浇注稳定性。目前,国内采用双中间包浇注工艺的产线较少,山东钢铁集团有限公司^[9]针对十流小方坯连铸机采用双中间包设计,结合数值模拟和水模拟完成双中间包包型优化,结果表明优化后的双中间包可缩小各流间出口钢水温差,提高钢水纯净度,夹杂物总级别 ≤ 5.0 级的合格率达 96.67%,有效促进了连铸稳定生产和产品质量提高。

石横特钢集团有限公司在钢铁生产领域具有丰富的经验和先进的技术水平,为进一步提升钢水质量和生产效率,其第四炼钢车间积极引进并实施了双中间包技术,通过一系列研究与应用,不仅优化了双中间包的结构设计,还在开浇方式、液面控制、在线检测等环节开展大量技术创新和工艺改进。这些改进措施不仅提高了生产效率与产品质量,还显著降低了生产成本,增强了企业的市场竞争力。本文详细阐述了双中间包技术在石横特钢的研究与应用过程,深入探讨其结构设计、冲击区优

化、开浇方式和在线检测等方面的技术细节与实际应用效果。

双中间包结构设计

石横特钢所用双中间包结构如图 1 和图 2 所示,该中间包采用焊接钢结构,为防止高温热变形,配套设置加强筋;钢板上预留干燥透气孔,外弧侧与一侧侧边均开设钢水溢流口;包体上预留塞棒执行机构安装位置和安装底板,底部设有定径水口快换装置安装底板。通过采用优化设计的中间包结构与挡渣墙,改善钢液流动状态,均匀钢液温度,促使非金属夹杂物上浮;中间包下方设置摆槽和水口快换装置,事故状态下可将水口流出的钢水引导至下方溢流罐内。中间包盖为钢板焊接结构,热稳定性优异、不易变形,设有吊耳,同时预留连续测温、烘烤和钢流注入的开孔,框架内焊接锚固爪,可牢固固定耐火材料。表 1 为双中间包主要技术参数,经实际检测,各流间钢水温差可控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,有效保障铸坯组织均匀性和性能稳定性。

双定径水口设计

双定径水口设计是双中间包结构设计的关键环节,其主要作用是保证钢水稳定流动和生产高效运行。快换装置由金属构件、浇口耐材和液压缸等组成,其中金属构件包含安装板、支撑板、滑道、弹簧、挡溅板等;耐材部分则由水口座砖、上水口、下滑块等构成。

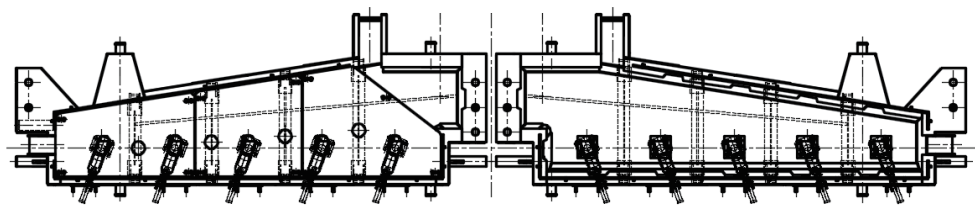


图 1 双中间包结构图纸

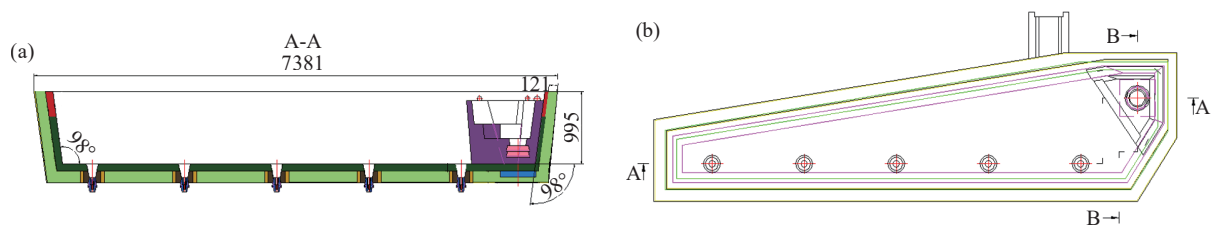


图 2 单中间包结构示意图: (a) 侧视图; (b) 俯视图 (单位: mm)

表1 双中间包主要技术参数

形式	单包公称容量/t	流间距/mm	单包工作容量*/t	单包溢流容量/t
2×5流对称布置, 保护浇注	40	1300	36	38

注: *为工作液面高900 mm时对应单包工作容量。

快换装置设计

快换装置是实现定径水口快速更换的核心, 安装板用于固定关联部件, 确保结构稳固耐用; 支撑板提供支撑力, 滑道保证滑块顺畅移动, 弹簧提供必要的弹力, 挡溅板则有效防止钢水飞溅; 水口座砖作为基础部件, 为上水口和下滑块提供安装平台; 上水口根据生产节奏需求, 选用 $\phi 20$ mm 和 $\phi 22$ mm 2 种规格, 以确保操作便捷性和更换高效性; 下滑块根据铸坯断面的不同需求, 提供多种孔径选择。快换装置设计可实现每个水口的独立操作和快速更换, 每流的 2 个定径水口均配置独立的快速更换滑道, 上下滑道通过气体弹簧压紧, 可在 0.5 s 内完成下滑块的快速更换。该设计不仅提高了更换效率, 还大幅缩短更换水口导致的停机时间, 保障生产的连续性和稳定性。

定径水口设计与选择

水口直径直接影响钢水流量与流速, 可通过式 (1)^[10] 计算确定。针对目前 165 mm 铸坯断面的生产需求, 中间包下水口选用 15.5、16.0、16.5、17.0、17.5、18.0、18.5、19.0 和 19.5 mm 等多种孔径规格。

$$d = \left[330 \times \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: d 为水口直径, mm; Q 为一个水口全开的钢水流量, t/h; H 为中间包的钢液深度, mm。

上水口及座砖设计

为保障长周期浇注的安全与钢水纯净度, 双定径水口内部摒弃了传统直筒结构, 采用渐变喇叭口流线型流道以减少局部阻力与钢水紊流, 使下注钢流更平稳集束; 在材质构造上, 水口创新使用了复合镶嵌工艺, 其工作内芯精选高纯度氧化锆以抵抗冲刷、极小化扩径量, 外部包覆的铝碳质层则有效提升了整体的抗热震防裂能力; 此外, 针对快换部件接触面的漏钢与吸氧风险, 上下水口的滑动结合面不仅经过了高精度研磨以确保无缝贴合, 还增设

了环形吹氩微孔与气槽, 通过持续通入微量氩气形成微正压保护罩彻底隔绝空气二次氧化, 同时凭借物理冲刷作用有效防止了氧化铝等脱氧产物在内壁附着与结瘤。

双中间包冲击区设计

双中间包冲击区设计是整个系统的重要环节, 对钢液流动状态、温度均匀性和非金属夹杂物去除效果影响显著, 合理的冲击区设计不仅能提高钢水质量, 还能延长中间包的使用寿命。

中间包稳流器设计

双中间包采用狭长不规则异形包结构, 每个中间包内设置单个稳流器。稳流器是调控钢水流动状态的重要部件, 可改变钢水流动方向、降低钢水流速, 减少冲击区钢液动能, 保护中间包内衬。稳流器设计需充分考虑耐热性、抗侵蚀性及高温稳定性, 通过研究稳流器损毁机理, 其底部和立板采用不同的材料和设计。稳流器底部采用抗侵蚀性能良好的镁质预制材料, 该材料具有优异的耐高温和抗化学侵蚀性能, 有效延长稳流器使用寿命; 立板采用热振稳定性良好的低水泥铝镁浇注料整体浇注成形, 具有良好的耐高温性能, 可在高温下保持结构稳定, 避免热膨胀引发的变形与损坏。

冲击区的优化设计

在实际浇注过程中, 单中间包承载钢包双水口铸流, 需由 2 个单体中间包拼对组合使用, 每个中间包冲击区设置在边侧。通过合理布局冲击区位置, 可有效控制钢水流动路径, 缩短钢水在冲击区的停留时间, 降低冲击区热负荷, 保护中间包内衬。为延长各流钢水停留时间、压缩死区体积、扩大混合流区域体积, 冲击区设计综合考虑冲击区位置布局、迎钢面设置、中间包工作层高度砌筑、使用寿命等多重因素, 最终得到合理流场。

通过冲击区几何重构与倾角挡液流动力学调控, 双中间包死区体积可压缩至 $\leq 15\%$, 活塞流比例提升至 30% 以上; 钢水实际停留时间延长 40% 以上, 夹杂物上浮率提高 2~3 倍; 钢水表面漩涡基本消除; 温度均匀性改善降低了耐火材料热应力, 保障中间包稳定运行。

混合流体积和停留时间

为保证钢水充分混合，提高温度均匀性，通过调整中间包的结构设计，延长钢水停留时间，合理布局迎钢面位置与工作层高度，控制钢水的流动路径，减少死区形成，确保钢水在中间包内充分混合。该设计不仅提高了钢水的温度均匀性，还促进

了非金属夹杂物的上浮，有助于提高钢水纯净度。经实际生产验证，优化后的双中间包表现出良好性能，大幅提高钢水质量，延长了中间包的使用寿命，整体性能得到显著提升，如图3所示。这些优化措施为钢铁高效稳定生产提供了有力保障，也为未来中间包技术的发展奠定了坚实基础。

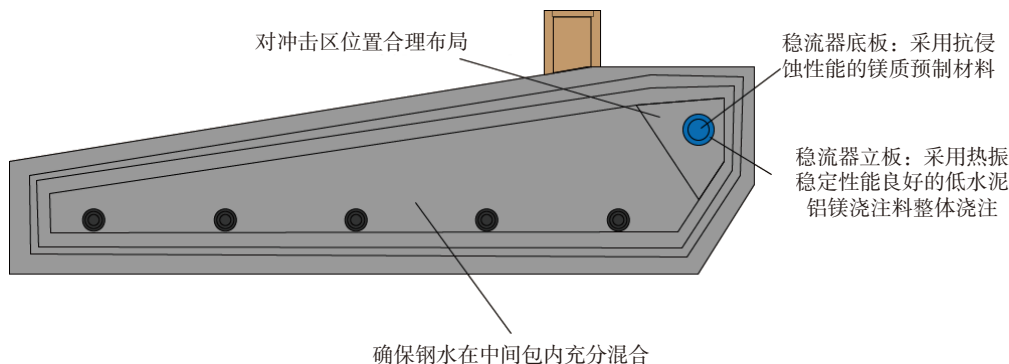


图3 中间包优化示意图

双中间包的开浇方式研究

传统单中间包开浇方式

传统单中间包在钢铁连铸工艺中具有重要地位，其结构设计和工艺操作直接影响钢水质量和生产效率。单中间包通常采用梯形结构，冲击区位于中间注流后侧，钢水从高温区域向两侧均匀流动，实现混合流和温度场的有效控制。该设计旨在保障整个浇注过程钢水温度和流动状态稳定，最大限度减少非金属夹杂物的产生。

在具体操作中，传统单中间包开浇方式主要依据钢水流动和温度分布特点制定。以4机4流连铸机为例，通常采用从中间流次向边侧推进的模式，即先开浇2流和3流，然后依次开浇1流和4流。该方式可利用中间注流高温区域，使钢水进入边侧流道前达到较为均匀的温度状态，有助于提高整体浇注质量。

然而，传统单中间包开浇方式存在一定局限性。首先，冲击区集中设计易导致局部热负荷过高，长期运行会加速内衬损耗，缩短中间包使用寿命；其次，在多流铸造过程中，各流钢水温度和流量差异较大，易出现流动不均匀的现象，影响铸坯最终质量；最后，单中间包更换与维护流程复杂，

对操作人员的技术水平和经验要求较高。

双中间包开浇方式

双中间包技术的应用进一步提升了钢水浇注过程的稳定性和效率，其结构呈现不规则狭长形，浇注时需拼对使用，单中间包冲击区设于边侧，双中间包分别承载钢包双水口钢流，开浇操作特点与单中间包差异显著。

双中间包开浇需重点结合冲击区位置和流动路径设计。双中间包分别承载钢包双水口钢流，浇注流由冲击区向两侧传输。根据温度场从冲击区向边侧呈递减分布的特点，开浇时优选冲击区相对侧边流，按顺序依次开浇，最后进行冲击区流次开浇。以10机10流连铸机为例，具体开浇顺序如下：3流和8流→2流、9流→1流、10流→4流、7流→5流和6流，示意如图4所示。中间包开浇初期液面较低，冲击区温度偏高，优先开浇冲击区流次有助于启动流场；而1流、10流等边流建议待温度稳定后开浇，避免出现钢水流动不畅的问题。

该开浇方式充分结合钢水温度场分布规律，确保各流道钢水均匀混合，减小温度差异，提升钢水整体质量，同时有效避免冲击区温度过高的问题，保护中间包内衬，延长其使用寿命。为便于大包工精准控制双水口中间包液面高度，在中间包承载支

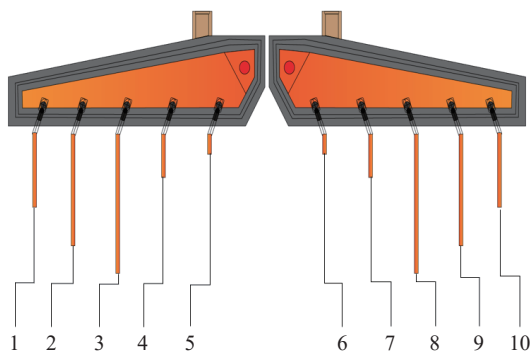


图4 双中间包开浇顺序

架下装配高温称重传感器，钢水质量数据可在浇注平台大屏幕和主控室人机接口（HMI）界面连续显示。称重传感器压头配备弹性载荷板，可有效吸收钢水冲击载荷，实现液面高精度称量与精准控制。液面控制精度直接关系钢水质量和操作稳定性，通过实时监测钢水质量，可及时调整浇注速度与流量，避免液面波动引发钢水质量问题。在实际操作中，双中间包开浇方式还需考虑钢包双水口控流要求，严格执行双中间包同时开浇原则，保证钢水流量一致，规范在线检测流程。

中间包浇注过程检测制度

测温制度和办法

为确保双中间包运行的安全性与稳定性，需制定并严格执行详细的测温制度，其核心是分阶段测量中间包包壳温度，及时发现温度异常并采取相应措施，具体制度如表2所示。同时，还需明确中间包各部位的红线温度，确保中间包在安全温度范围内运行，具体红线温度如表3所示。

表2 中间包测温频率

上线时间/h	测温间隔/(h/次)
[0, 15)	3
[15, 20)	2
[20, 24]	1
>24	0.5

表3中的温度值根据中间包材料耐热性和使用寿命确定，超出红线温度易引发内衬损坏或结构失效问题。为实现精确测温，采用热电偶、红外测温仪等高精度设备。这些设备安装于冲击区、水口和

包壁等关键位置，实时监测各部位温度变化。测温数据通过自动化系统传输至控制室，并在HMI界面直观显示，操作人员可根据实时数据调整操作参数，确保生产稳定运行。

表3 中间包各部位红线温度 $^{\circ}\text{C}$

冲击区包底	水口包底	包壁
280	350	360

液面控制系统

依托前期部署的高温称重传感器及连续监测反馈机制，双中间包液面控制系统的核心日常管控目标为严格防范异常波动；在实际稳定生产条件下，该系统通过指导操作人员或自动化程序精准联动调整浇注速度与流量，成功将小方坯连铸中间包的液面自动控制精度严格稳定在 $\pm 20\text{ mm}$ 的核心指标范围内。

在线探伤和应力消除

中间包长期承受 $1500\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温钢水的循环热冲击，包壳钢板易出现热疲劳裂纹、焊接区应力腐蚀、蠕变变形等损伤，埋下生产安全隐患。为防范此类问题，需定期对中间包进行在线探伤和应力消除处理。探伤采用电磁感应激发超声波技术，无须耦合剂，可穿透氧化皮和涂层，一旦发现问题，及时修复或更换。相较于传统单中间包，双中间包采用短尺寸设计，配合横向加强筋密集布置（间距 $\leq 500\text{ mm}$ ），筋板高度为 $200\sim 300\text{ mm}$ ，截面惯性矩提升2倍以上，大幅增强抗热变形能力。

双中间包检测操作规范

石横特钢实行严格的双中间包操作规范和人员培训制度，每个班组指定专人负责测温 and 液面监控，确保每次测温记录准确并签字确认，实现责任到人。操作人员定期参加专业培训，掌握最新检测技术和设备操作方法，提高对异常情况的判断与处理能力。在线检测过程中收集的大量数据需进行系统分析，挖掘潜在运行趋势和设备问题，通过历史数据对比分析，预判中间包使用寿命与维护周期，优化生产计划。数据分析结果及时反馈至操作人员和维护团队，形成闭环管理，持续优化中间包运行和维护策略，如图5所示。

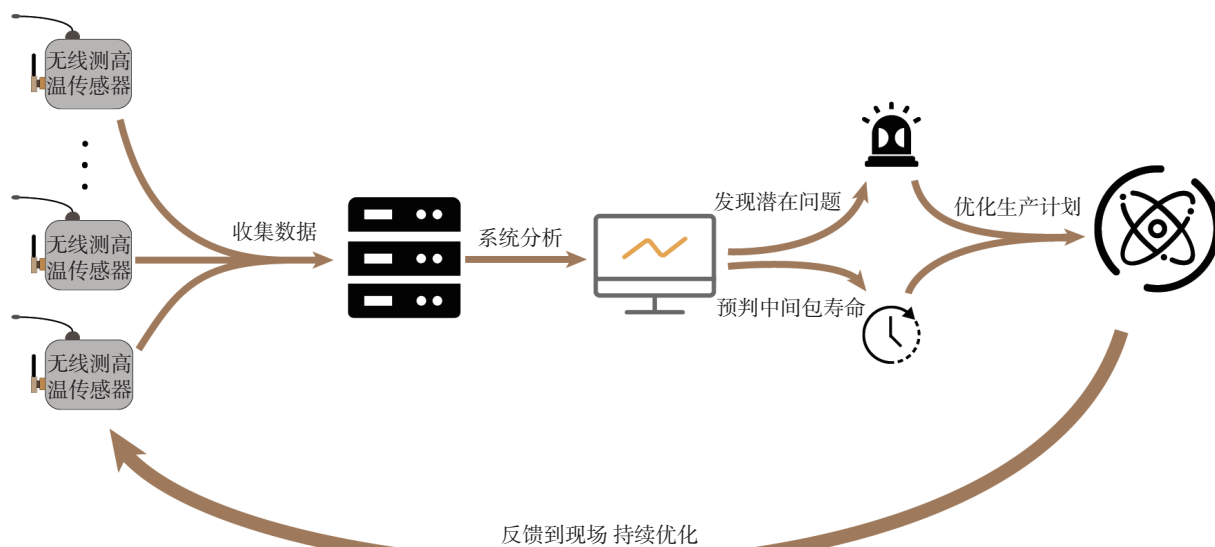


图5 在线监测反馈系统示意

结束语

通过对石横特钢炼钢厂第四炼钢车间双中间包工艺技术的深入研究和实践应用，项目取得了一系列显著成效。通过优化双中间包结构，重点改进双定径水口设计与快换装置，有效保障钢水稳定流动，实现高效生产。该优化措施不仅提高了生产效率，还缩短了水口更换造成的停机时间，进一步增强生产连续性和稳定性。

(1) 在冲击区设计方面，采用耐高温、抗侵蚀性能优良的材料，并优化流场结构，显著延长了中间包使用寿命，提升钢水质量。通过合理布局冲击区位置，优化钢水流动路径和停留时间，减少了死区和涡流区的形成，促进非金属夹杂物上浮，有效改善钢水纯净度。

(2) 在开浇方式优化方面，针对双中间包结构特点制定合理的开浇顺序和液面控制策略，通过高温称重传感器实时监控，实现液面的精准控制，不仅保证了钢水质量，还提高了浇注过程的稳定性与安全性。

(3) 建立严格的在线检测制度，通过分阶段测温 and 在线探伤等手段，确保双中间包安全稳定运行。同时，构建数据分析和反馈机制，使操作与维

护更加科学、有效。

参考文献

- [1] 包燕平, 王敏. 中间包冶金技术发展趋势. 连铸, 2021(5): 2
- [2] 谭杜. 提高连铸坯入炉温度改造实践. 金属世界, 2024(5): 94
- [3] 刘佳明, 姜敏, 钟华军, 等. 板坯连铸结晶器流场数值模拟. 金属世界, 2024(6): 41
- [4] 许亮. 基于温度场优化的多流中间包提质增效. 金属世界, 2022(3): 70
- [5] 林小祥, 宋瑛洁, 王欣瑶, 等. 五流中间包流场和温度场的模拟研究及优化. 连铸, 2024(2): 37
- [6] 唐建洪, 周玉军, 魏海成. 中间包结构及包衬耐火材料对钢水清洁度的影响分析. 世界有色金属, 2019(8): 194
- [7] 殷攀, 袁几百, 李秀杰, 等. 不同形式稳流器对中间包冶金效果的影响. 连铸, 2022(3): 25
- [8] 郭振峰, 吕艳改, 许彩云, 等. 连铸中间包整体稳流器的结构设计与应用. 耐火与石灰, 2016, 41(1): 20
- [9] 郭达. 十流小方坯连铸机双中间包流场的优化设计. 宽厚板, 2023, 29(3): 28
- [10] 贺道中. 连续铸钢. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2013

作者简介: 杨童童(1985—), 男, 山东省肥城人, 就职于石横特钢集团有限公司, 2010年毕业于内蒙古科技大学大学冶金工程专业。主要研究方向: 小方坯连铸工艺及钢坯质量控制。通信地址: 山东省肥城石横特钢集团; E-mail: 378408951@qq.com。