

粗轧工艺对 700 MPa Ti 微合金化高强钢的组织及性能的影响

陈 述

(攀钢集团研究院有限公司钒钛资源综合利用国家重点实验室,攀枝花 617000)

摘 要 研究了 700 MPa 级 Ti 微合金化高强钢(/% : 0.05 ~ 0.07C, 0.05 ~ 0.10Si, 1.10 ~ 1.25Mn, 0.075 ~ 0.095Ti) 230 mm × (1 580 ~ 1 780) mm 连铸板坯粗轧工艺中定宽量 100 ~ 300 mm 和 2 ~ 6 道次分配量对最终 10 mm 板组织的影响。结果表明,定宽量的增加会增加组织的不均匀性,使铁素体带状组织更粗大,并提高拉伸断口分层的倾向;均匀分配的道次分配量也能提高最终组织的均匀性;两种影响因素以定宽量的影响更为显著;定宽量 ≤ 100 mm、单道次变形量 ≥ 20% 是理想的工艺参数。

关键词 Ti 微合金化 粗轧 板坯定宽量 拉伸分层

Effect of Rough Rolling Process on Microstructure and Mechanical Properties of 700 MPa Ti Micro-Alloyed High-Strength Steel

Chen Shu

(Pangang Group Research Institute Co Ltd, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000)

Abstract The effect of 230 mm × (1 580 ~ 1 780) mm cast slab rough rolling slab 100 ~ 300 mm width sizing press and 2 ~ 6 pass reduction partition of 700 MPa Ti micro-alloyed high-strength steel (/% : 0.05 ~ 0.07C, 0.05 ~ 0.10Si, 1.10 ~ 1.25Mn, 0.075 ~ 0.095Ti) on the final 10 mm plate microstructure is studied. The results show that the inhomogeneity of microstructure will become more obvious when the extent of slab sizing press increases, as well as the size of the banded structure of ferrite well increase, and the tensile lamination cracks occurred trend will increase too. It also show that the microstructure will be more uniform when the rolling reductions of different passes are uniform. The slab sizing press amount has more influence on the uniform of the microstructure than the rolling reduction partition of different passes. The ideal process should be with the slab width sizing ≤ 100 mm and the single rolling reduction ≥ 20%.

Material Index Ti Micro-Alloying, Rough Rolling, Slab Width Sizing Press, Tensile Lamination Cracks

微合金化是指在普通碳锰钢中加入微量的合金元素,通过控轧控冷工艺,生产低成本、高强度的钢材,常见的微合金化元素包括 Nb、V、Ti 等。其中,Ti 是强碳化物形成元素,比之 Nb 和 V 具有明显的成本优势,故近年来只使用 Ti 进行微合金化的研究越来越多。本文以 700 MPa 级微合金化高强钢为对象,主要研究了 Ti 微合金化该产品的粗轧工艺对组织及性能的影响。

1 试验方案

1.1 试验钢的化学成分

Ti 是强碳化物形成元素,但是与 N、O、S 也有极强的亲和力,高温下易与钢中的 N、O、S 等元素结合,难以充分发挥其强化作用^[1],故多用于与其他元素复合强化,很少单独作为微合金化元素。根据相关研究^[2],为保证 Ti 的析出强化作用,必须有效控制钢中 N、S 等元素的含量,同时对钢液进行有效的脱氧。最终材质成分见表 1。生产工艺流程为:铁水预处理脱硫→200 t 转炉冶炼→LF 合金化→

表 1 试验钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of experimental steel / %					
C	Si	Mn	P	S	Ti
0.05 ~ 0.07	0.05 ~ 0.10	1.10 ~ 1.25	≤ 0.020	≤ 0.005	0.075 ~ 0.095

RH 真空处理→板坯连铸→热连轧。试验所用连铸坯断面尺寸分别为 230 mm × 1 580 mm、230 mm × 1 680 mm、230 mm × 1 780 mm,成品尺寸为 10.0 mm × 1 480 mm。

1.2 热模拟试验设计

将试样加工成 Φ8 mm × 12 mm,在 Gleebe1500 试验机上进行热模拟试验,具体试验工艺:以 20 °C/s 升高至 1 150 °C,保温 3 min,再以 10 °C/s 冷却至 1 020、1 050、1 080、1 100 °C,进行不同变形速率的试验,试验完成后,应力松弛 5 min,再空冷至室温。

1.3 粗轧工艺参数设定

粗轧过程主要考虑两种工艺参数的影响:定宽量的影响及道次分配量的影响。

为考察不同粗轧定宽量对最终组织和性能的影响,在保证试验钢化学成分、中间坯厚度、精轧工艺、层流冷却工艺及卷取温度均一致的前提下,分别选取定宽量 100、200、300 mm 三种情况进行对比,同时保证粗轧各道次变形量基本一致。

在考察粗轧道次变形量对最终组织和性能的影响试验中,为保证相对变形量,第 1 道次压下厚度不变,改变其后 5 个道次的分配量,进行 3 组对比试验,不投定宽机,所用试验钢的化学成分、中间坯厚度、精轧工艺、层流冷却工艺及卷取温度均保持一致。

2 热模拟试验结果

试验钢在不同温度和不同应变速率下变形 0.92(真应变)的应力应变曲线见图 1。从图 1 中可以看出,在不同的变形条件下应力一直呈现上升的趋势,且较低温度和较高应变速率变形条件下应力水平较高。应力的上升趋势说明,加工硬化效果强于动态再结晶的软化效果;在较低应变速率下或较高的应变温度时依然呈现这一趋势,这表明试验钢在变形过程中动态再结晶受到明显的抑制,因而在变形后将发生静态再结晶过程。

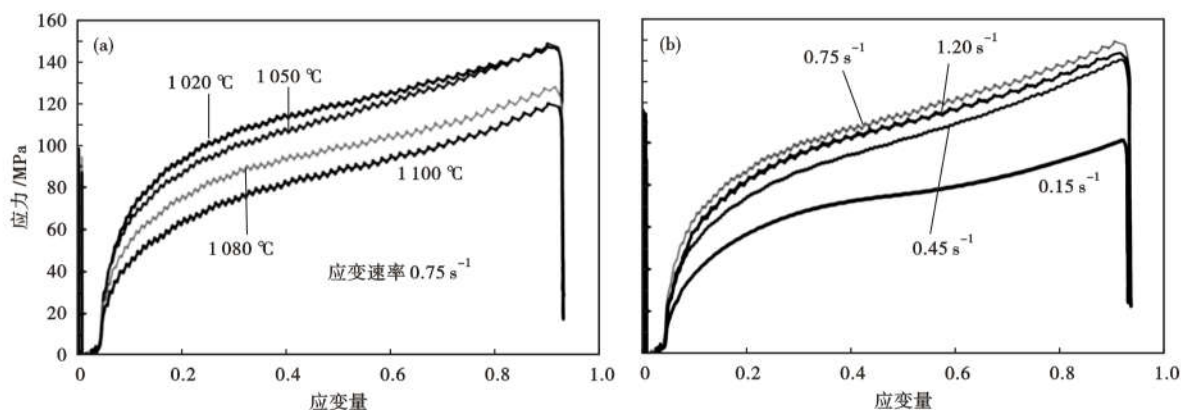


图 1 温度(a)和应变速率(b)对试验钢应力-应变曲线的影响

Fig. 1 Effect of temperature (a) and strain rate (b) on stress-strain curves of experimental steels

3 粗轧试验过程及结果

3.1 定宽量对比试验

板坯侧压定宽机在锻压状态下对板坯全长进行大的板坯宽度轧制,通过一道次压下,极限宽度压下量(定宽量)可达 350 mm。定宽机位于粗轧第一机架前,定宽轧制后,再进行粗轧个道次变形。

定宽量对比试验的工艺参数见表 2。各道次变形量波动在允许的范围内。本试验所用 3 种尺寸的连铸坯所对应的成品尺寸均为 10.0 mm × 1 480 mm。

试验钢力学性能及金相组织检测试样选自相应的成品,断面尺寸 10.0 mm × 1 480 mm,取样位置位于板中距边 200 mm 处。

试验钢力学性能见表 3,拉伸断口形貌见图 2,显微组织见图 3。可见,各试验钢力学性能基本一致,且均达到设计要求,并有一定的余量;随着定宽量的增加,拉伸断口分层的现象趋于明显;随着定宽量的增加,表层组织差异较小,但是 1/4 至心部,铁素体带状组织更加显著,且伴有更多的大尺寸铁素体晶粒;另外,随着定宽量的增加,试验钢中的珠光体的尺寸和含量明显增加。

表 2 定宽量对比试验工艺

Table 2 Process of contrast experiment on slab width sizing press

试样号	连铸坯断面/(mm × mm)	定宽量/mm	粗轧各道次变形量/% 及该道次后断面尺寸/(mm × mm)					
			1	2	3	4	5	6
1 [#]	230 × 1 580	100	19	19	19	23	25	24
			186 × 1 481	151 × 1 481	122 × 1 482	94 × 1 482	71 × 1 482	54 × 1 483
2 [#]	230 × 1 680	200	18	19	19	24	25	23
			188 × 1 481	153 × 1 481	124 × 1 481	94 × 1 482	71 × 1 483	54 × 1 483
3 [#]	230 × 1 780	300	23	19	21	25	26	25
			194 × 1 481	150 × 1 481	122 × 1 482	96 × 1 483	72 × 1 483	54 × 1 484

结合组织检验结果可以发现,随着定宽量的增加,表层组织差异较小,但是厚度方向1/4至心部,铁素体带状组织明显,且伴随有明显的铁素体混晶,心部大块铁素体附近可以看出明显的相间析出,部分析出相形貌见图 4。

3.2 道次分配量对比试验

三组对比试验的实际各道次变形量分配见表 4。金相组织检测试样取自相应的成品,断面尺寸 10.0 mm × 1 480 mm,取样位置位于板中距边 200 mm 处。各试验钢的显微组织见图 5。可见,6#试验钢组织均匀性最好,5#试验钢次之。即单道次变形量均在 20% 左右时,可明显改善最终组织的均匀性。随着第 1 道次和第 2 道次变形量的增加,表层组织(边部),如图 5(a,b,c)变化不大,但是心部组织混晶情况明显改善,即随着单道次变形量的增加,可明显改善心部组织的均匀

表 3 试验钢力学性能

Table 3 Physical properties of experimental steels

试样号	成品断面/(mm × mm)	取样位置	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%
1#	10.0 × 1 480	板中	726	798	22.0
		距边 200 mm	738	807	21.0
2#	10.0 × 1 480	板中	733	796	22.5
		距边 200 mm	734	793	18.5
3#	10.0 × 1 480	板中	741	802	22.5
		距边 200 mm	752	819	22.5

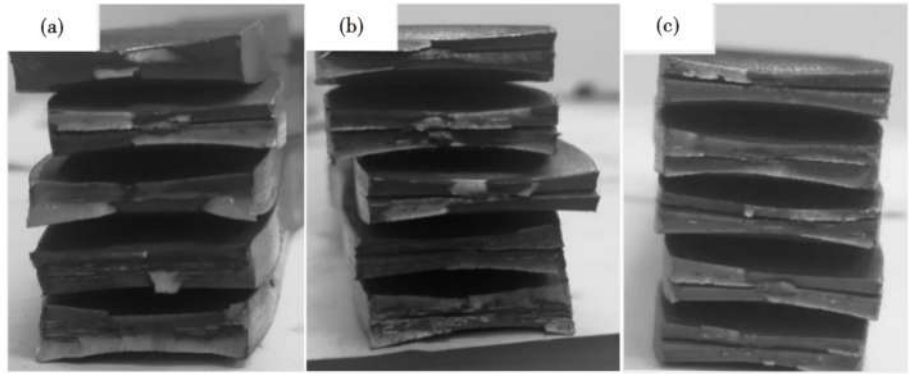


图 2 (a)100 mm;(b)200 mm;(c)300 mm 定宽量下试验钢拉伸断口
Fig. 2 Tensile fracture of experimental steels with (a) 100 mm; (b) 200 mm and (c) 300 mm slab width sizing press (width reduction)

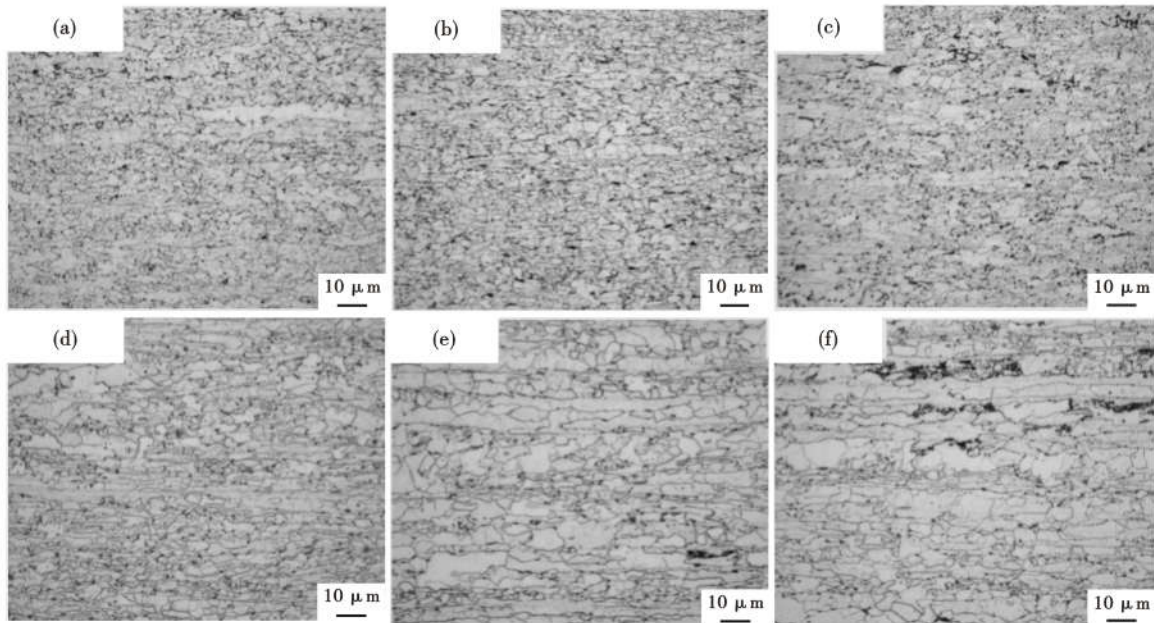


图 3 粗轧定宽量 100 mm(a)(d),200 mm(b)(e)和 300 mm(c)(f)时 10 mm 板表层(a)(b)(c)和1/4处(d)(e)(f)的组织形貌
Fig. 3 Morphology of structure of 10 mm plate near surface (a) (b) (c) and at 1/4 thickness (d) (e) (f) with rough rolling slab width sizing press 100 mm (a) (d), 200 mm (b) (e) and 300 mm (c) (f)

性。如图 5(e,d)相比虽然 5#钢第 1 道次变形量较低,但是第 2 道次和第 3 道次变形量明显高于 4#钢,所以心部组织混晶程度得到改善,6#试验钢各道次

变形量均在 20% 以上,分布较均匀,最终获得的心部组织也较均匀。

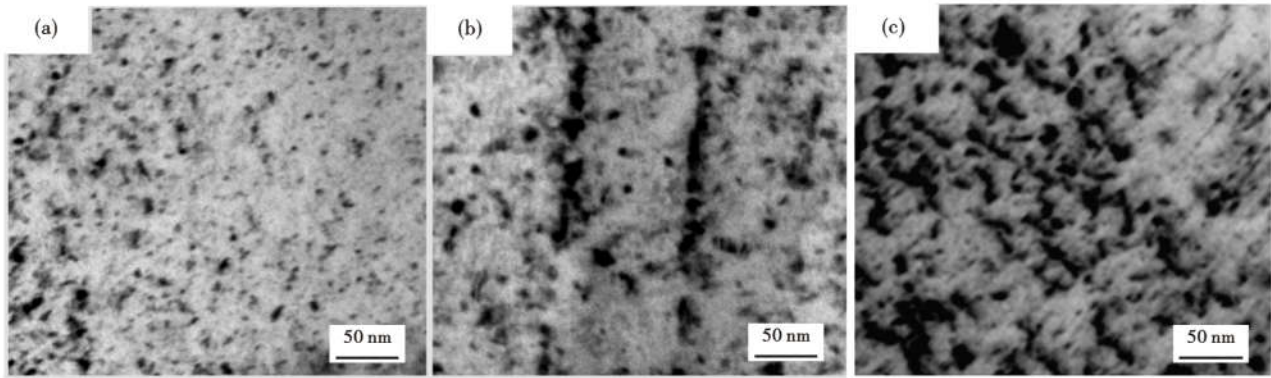


图 4 (a)100 mm; (b)200 mm 和(c)300 mm 粗轧定宽量时 10 mm 板心部析出相形貌,TEM

Fig. 4 Morphology of precipitated phase at center of 10 mm plate with rough rolling slab width sizing press 100 mm (a), 200 mm (b) and 300 mm (c), TEM

表 4 粗轧道次分配量试验工艺

Table 4 Process of experiment on rough rolling passes reduction partition

试样号	粗轧各道次变形量/% 及该道次后断面尺寸/(mm × mm)					
	1	2	3	4	5	6
4 [#]	19 186 × 1 481	17 155 × 1 481	16 133 × 1 482	26 98 × 1 482	27 72 × 1 483	22 56 × 1 484
5 [#]	18 188 × 1 481	20 151 × 1 481	21 119 × 1 482	25 89 × 1 483	20 72 × 1 484	22 56 × 1 485
6 [#]	20 184 × 1 480	20 147 × 1 481	22 115 × 1 482	24 87 × 1 483	20 70 × 1 483	21 56 × 1 484

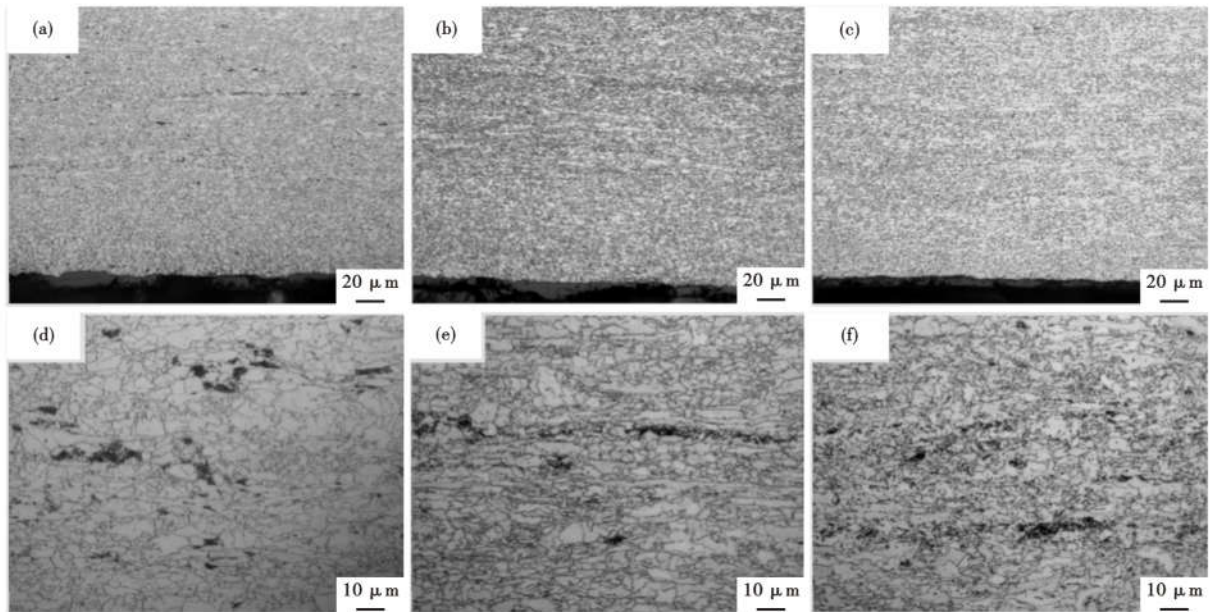


图 5 表 4 中 4[#](a)(d), 5[#](b)(e) 和 6[#](c)(f) 粗轧道次分配量试验的 10 mm 板边部(a)(b)(c) 和心部(d)(e)(f) 的组织形貌
Fig. 5 Morphology of structure of 10 mm plate edge (a) (b) and (c) and center (d) (e) and (f) with rough rolling passes reduction partition 4[#](a) (d), 5[#](b) (e) and 6[#](c) (f) experiment in Table 4

4 分析和讨论

粗轧过程为奥氏体动态再结晶的过程,其目标是得到均匀、细化的奥氏体晶粒,为精轧工艺提供良

好的基础。

在热模拟试验中,试验钢的动态再结晶过程受到了明显的抑制。研究表明,这得益于 Ti 的析出物

钉扎奥氏体晶界,因而抑制了其再结晶过程。因此,该试验钢的再结晶主要是变形后的静态再结晶过程。

在定宽的过程中,板宽两侧受到挤压,使得板的两侧增厚,且定宽量越大,增厚越明显^[3]。两侧的增厚使得板材在接下来的变形过程中两侧的实际变形量大于中间区域;而中间区域的变形量不足且不均匀。在再结晶过程中,变形量不足的区域形核点偏少,局部产生粗大的奥氏体晶粒,在冷却过程中,奥氏体晶粒不均匀,其稳定性差异较大,粗大的奥氏体晶粒先形成大块的先共析铁素体,并伴随 TiC 的相间析出,此时由于析出温度较高,析出相尺寸较大,对韧性有不利的影响。

本研究的试验钢为 700 MPa 级的高强钢,其强化机制中析出强化占据重要地位^[4],故其对裂纹的敏感程度较普通钢更高,需在生产过程中特别关注。有研究指出,带状组织是造成高强钢拉伸分层的重要原因^[5]。对比定宽量试验中的拉伸断口可以发现,组织均匀时,铁素体带状组织较少较窄,其拉伸断口分层不明显;而组织不均匀性时,铁素体带状组织较多且更为粗大,其拉伸断口的分层较为严重;即组织越均匀,越能有效的抑制试验钢的裂纹扩展。因此,该类钢种可以通过宏观观察拉伸断口的分层程度来定性的描述其微观组织的均匀性,从而表征其止裂性能。

道次的分配量实际上也是变形均匀程度的一个衡量。在总变形量一定的前提下,道次分配越均匀,板材整体的均匀性越高。道次分配试验是基于定宽量试验进行的,因此未投定宽,这也为道次分配试验的最终组织均匀性提供了有利的条件。

对比两组试验结果还可以发现,定宽量对最终

组织均匀性的影响比道次分配量的影响更为显著。因此,根据实验结果,工业生产中提出了定宽量 ≤ 100 mm 的要求,并且要求单道次变形量 ≥ 20%。

5 结论

(1) 试验钢主要发生静态再结晶,而动态再结晶被明显抑制。

(2) 组织的不均匀程度随定宽量的增加而增加;而在选定的粗轧总变形量下,均匀分配各道次变形量,有助于改善最终组织的均匀性;且定宽量对最终组织均匀性的影响比道次分配量的影响更为显著。

(3) 在本试验钢的工业生产中,定宽量 ≤ 100 mm、单道次变形量 ≥ 20% 是理想的工艺参数。

(4) 试验钢可以用宏观观察拉伸断口的分层程度来定性描述其微观组织的均匀性,从而表征其止裂性能。

参考文献

- [1] 毛新平,孙新军,康永林,等.薄板坯连铸连轧 Ti 微合金化钢的物理冶金学特征[J].金属学报,2006,42(10):1091-1095.
- [2] 李立铭,冯运莉,杨丽娜钛微合金化高强钢含 Ti 第二相的热力学计算[J].钢铁钒钛,2019,40(1):118-122.
- [3] 吴 林.热轧定宽机减宽过程对板坯质量的影响[J].轧钢,2019,36(4):25-30.
- [4] 陈学文,毛新平,李烈军,等.Ti 微合金化高强耐候钢的成分设计研究[J].冶金丛刊,2007(5):10-12.
- [5] 张云祥,陈 凯,彭其春,等.高强钢拉伸断口中心分层渐进失效分析[J].塑性工程学报,2013,20(2):98-99.

陈 述(1983-),男,硕士(2018年重庆大学),工程师,2007年中国科学技术大学(本科)毕业,金属材料物理检验、板带钢产品开发。E-mail:chenshupy@163.com

收稿日期:2020-07-29

尊敬的投稿作者:《特殊钢》杂志社现无网站投稿平台,如发现伪造本社投稿网站欺骗作者,请及时电话告知

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 电话:0714-6297386 6297313

投稿邮箱:E-mail: tsghs@ sina. com, tsghs@ citicsteel. com