板式换热器用 TA1 钛板冲压成形性的研究①

杨文甲
（沈阳有色金属加工厂，沈阳 110102）

摘　要　通过对现场冲制叶片观察、冲裂叶片原因分析、生产工艺性试验，工件杂质分析、金相观察、性能测试、杯突试验等，发现影响冷冲压成形性的顺序是：屈强比、杂质氧、晶粒度、润滑等四个主要因素。从而找出了生产工艺、组织、成形性之间的关系，采取了新的生产工艺，生产出的板材满足换热器用板技术要求，并提高了冲压成形合格率。此研究具有实际经济意义。

关键词　钛板　屈强比　晶粒度　冲压成形　换热器

用 TA1 钛板制造的板式换热器，比列管式换热器有许多优点，在市场上有很强的竞争力；主要用于化工、石油、舰船、海水淡化等热交换系统。用 TA1 钛板冲压制造换热器叶片是近几年出现的新课题，常用板厚有 0.5、0.6、0.7、0.8、1.0 mm 等五种。虽然 TA1 板材有较好的冷成形性，但冲制叶片的变形甚为复杂，加之钛对不均匀变形十分敏感，回弹量较大，给冲制叶片变形带来困难，常出现“眼皮”、不平、破裂等废品。

为了满足换热器用板技术要求，提高冲制叶片的合格率，需对生产工艺、板材性能、冲压成形性之间的关系进行研究。而降低屈强比、增加均匀变形范围、提高冲制叶片合格率，是使 TA1 钛板代替 SuS304 钢、镍合金、铜合金板成为换热器用材的关键，也是本文的主要研究内容。

1　试验设备和用料

1.1　设备

主要设备有：d 300/d 760 × 1 400 mm、d 165/d 450×76000 mm 四辊冷轧机，240 kW 台式真空退火炉，马弗炉，WJ-10B 型万能试验机，6 000、10 000 吨油压机等。

1.2　用料

试验料选用我厂生产的四个炉批号 TA1 钛锭，经 β 开坯锻成 80 mm × 320 mm × 500 mm 板坯。再经一次热轧至 7.00 mm 厚，3～4 次冷轧成 0.5～1.0 mm 厚板材。铸锭的化学成份见表 1。

2　对冲裂叶片的分析和试验

2.1　冲裂分析

用 TA1 钛板冷冲制造换热器叶片的过程中有胀出、深冲、弯曲、拉深等多种变形，但主要是平面拉伸变形。板材冲压变形出现的破裂和杯突试验的破裂近似，后者的裂纹和叶片衬垫旋钮凸起部位出现的裂纹一样，走向的总趋势是垂直于板材轧制方向。为此对冲裂叶片和该批板材取样，进行气体、金相、硬度、拉力、杯突等试验测试。

2.2　试验工作

① 收稿日期：1994－03－10；修回日期：1994－06－27

表 1　锭坯化学成份　（%）

炉批号	Ti	Fe	Si	N
866D6	余量	0.047	0.057	0.008
923D15	余量	0.071	<0.100	0.026
927D27	余量	0.023	<0.100	0.014
927D31	余量	0.041	<0.100	0.010
炉批号	C	O	H	
866D6	0.035	0.086	0.0010	
923D15	<0.050	0.110	0.0010	
927D27	0.025	0.041	0.0013	
927D31	0.013	0.056	0.0020	

为了降低 TA1 钛板屈强比 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$，增加均匀变形范围，提高冲制叶片合格率做了如下试验研究工作：轧制方法、冷轧加工率、退火工艺参数、氧分析、杯突、冲制压力、润滑、冲制温度等，其部分试验工艺列入表 2 中。

表 2　试验工艺

试验序号	试验工艺参数
A	带式法生产，钛卷经 700、750、800 ℃，150 min 真空退火
B	片式法生产冷轧加工率为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%
C	中轧，预精轧换向横轧成 0.5、0.7、1.0 mm 经 800 ℃，180 min 真空退火
D	板材以 600 ℃，1 h 的速度升温，采用 780 ℃，160 min 真空退火
E	用机油，植物油、塑料膜为润滑剂对 0.7、0.8、1.0 mm 板进行冲压
F	板料加热至 400、500、600 ℃进行温冲及两次冲压成形

3　试验结果

以本次试验的数据为主，并统计参考了近几年生产积累数据获得以下结果：

TA1 钛板的 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 值对 TA1 板材杯突值的影响，如图 1；

氧含量对 TA1 板材 $\sigma_{0.2}$ 的影响，如图 2；

晶粒度对 TAl 板材性能的影响，如图 3；

冷轧变形量对 TA1 板性能的影响，如图 4；

典型金相、织构照片，见图 5；

不同炉批号 TA1 板材的性能，见表 3。

4　分析和讨论

4.1　杂质氧含量能明显地提高 $\sigma_{0.2}$

人们对钛及其合金性能的研究偏重於加工工艺、组织对性能的影响。但在某一特定条件下，杂质含量对钛及其合金性能有着决定性作用，其中杂质氧含量有着重要影响：氧能提高相变温度、再结晶温度、硬度以及使“C”型曲线向右推移等作用，但远没有对 $\sigma_{0.2}$ 影响显著。从表 1、3 和图 2 中看到氧有明显地提高 $\sigma_{0.2}$ 的作用，氧含量每增加 0.01%时 $\sigma_{0.2}$ 可增加 30 MPa。从表 3 得知 923D15 板，锭坯氧含量

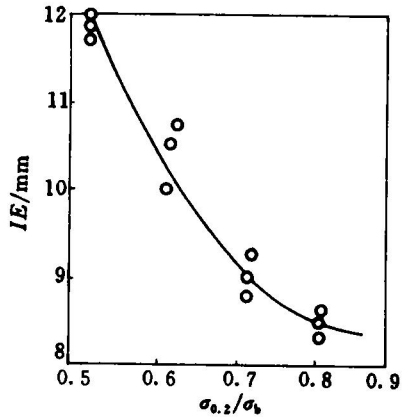

图 1　$\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 值对 TA1 板杯突值的影响

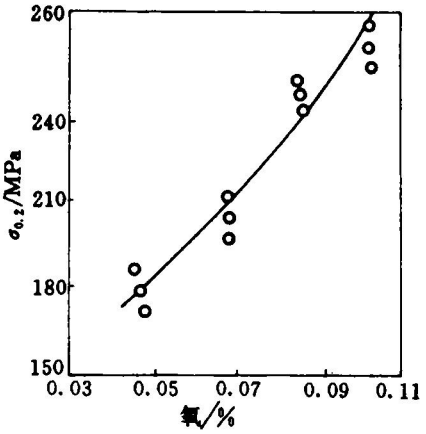

图 2　氧含量对 TAl 板 $\sigma_{0.2}$ 的影响

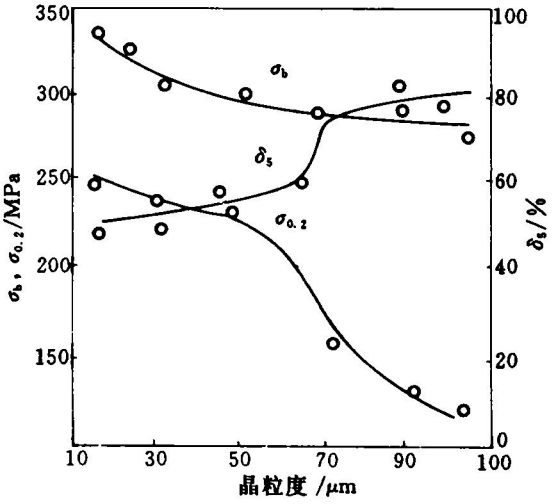

图 3　晶粒度对 TA1 板拉伸性能的影响

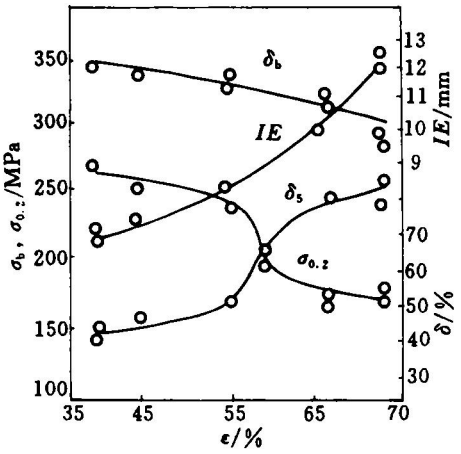

图 4　冷轧变形量对 TA1 板性能的影响

表 3　TA1 换热器板性能

生产炉号	取样方向 /(°)	规格 /mm	晶粒度 /μm	*IE* /mm	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{0.2}/\sigma_b$	δ_5 /%	HY10 /9.8 MPa
866D6	0	0.7	50	10.8	353 367	261 254	0.739 0.692	73 72	141
	45				364 357	262 261	0.757 0.731	68 70	
	90			11.0	363 363	267 284	0.760 0.782	70 71	177
923D15	0	1.0	20	7.9	510 515	415 420	0.813 0.815	48 49	190
	45				476 485	415 425	0.871 0.876	44 47	
	90			8.8	495 520	435 444	0.878 0.846	45 45	198
927D27	0	0.5	60	12.0	300 305	165 175	0.550 0.573	80 80	126
	45				310 310	150 160	0.483 0.516	73 73	
	90			12.4	311 325	170 175	0.546 0.538	77 73	128
927D31	0	0.8	40	11.2	340 340	247 250	0.726 0.735	66 64	136
	45				340 335	231 229	0.679 0.683	64 67	
	90			11.4	345 342	245 244	0.710 0.713	64 65	139

0.11%，板材的 σ_b 为 520 MPa，$\sigma_{0.2}$ 为 440 MPa，杯突值 8.8 mm，在冲裂片上取样分析氧为 0.139%，氢 0.002 7%，冲裂照片见图 6。显然板材氧含量的增加，主要是退火过程气体污染所致，它增加了板材在冲压成形时的脆性破裂。

TA1 板在冷冲压换热器片的变形过程中，金属滑移临界切应力 $\tau_c = \sigma_{0.2}\cos\lambda \cdot \cos\varphi$ 中，在给定应力条件下，氧含量低，则 $\sigma_{0.2}$ 和 τ_c 也低，冲压时就容易发生塑性变形。而当氧含量高时，溶在 α- Ti 中氧也高，在冲压变形中，带有高含氧量的固溶体又充当了位错滑移的障

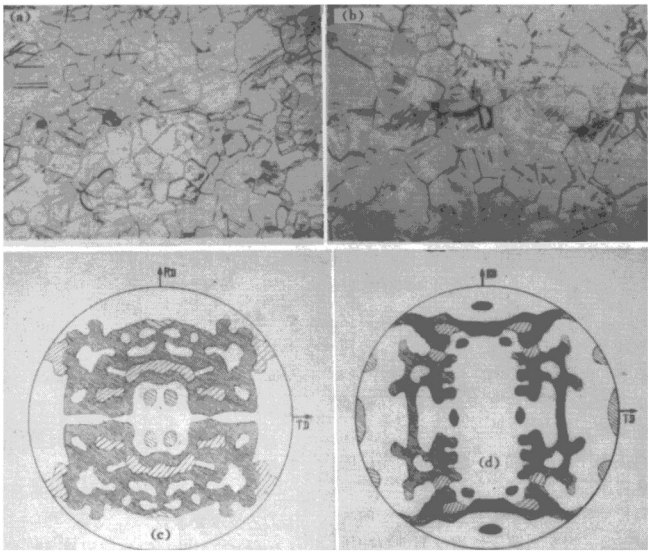

图5　曲型显微组织织构照片 ×100

(a)—866D6板$_{0.7mm}$，×200；(b)—927 D27板$_{0.6mm}$，×200；

(c)—866D6板(0001)极图；(d)—927D27板(0001)极图

碍，使变形应力增高，增加了应力集中，增加了破裂机率。在生产中也同样的发现氧含量高的板材变形十分困难，当板材氧含量增至0.420%时使轧制无法进行，终因脆裂而停止轧制。故对换热器用TA1薄板的氧含量应控制在0.100%以下为好，以保证冷冲压成形能顺利进行。

4.2　降低$\sigma_{0.2}/\sigma_b$值增加均匀变形能力

从表3、图1中的数据得知，$\sigma_{.2}/\sigma_b$ <0.73时板材的δ_5、杯突高、HV_{10}低，即有较好工艺塑性，在冲制叶片时能顺利稳定进行成形。在给定批料时，若想降低$\sigma_{0.2}/\sigma_b$值，在生产工艺上应采取新的工艺方法，如冷轧换向、控制成品冷轧加工率、成品退火组合工艺等，最终使生产的板材获得如图5所示的带有孪晶带的显微组织和环基面织构。

4.3　裂纹走向垂直于轧向

按常规工艺生产的TA1薄板，在冲杯突和冲制换热器叶片时，裂纹走向一般与轧向垂直，见图6所示。由于常规工艺条件下形成的显微组织、织构所决定的板材各向异性较强，沿轧制方向塑性虽比其它方向高，但$\sigma_{0.2}/\sigma_b$值仍然较高。冲压变形时仍产生局部不均匀变形，当变形应力超过断裂极限时便出现失稳开裂。

为了避免局部不均匀变形，从图3、4、5

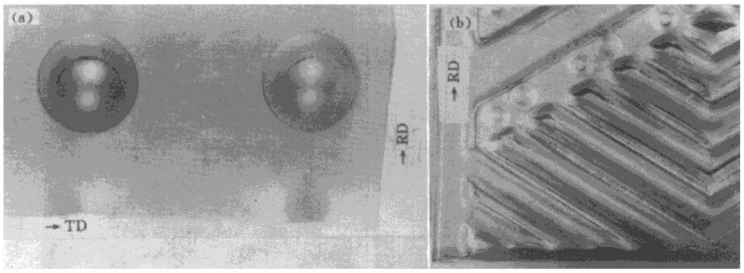

图 6 923D15 板冲制裂纹走向照片

(a)—杯突试样裂纹走向；(b)—换热器叶片裂纹走向

中知道：成品冷轧加工率大于 60%、经高温退火的板材能获得图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)照片的组织、织构特征，板材的 $\sigma_{0.2}$ 极大的下降，δ_5 极大的提高，对平面应变十分有利，保证了冲压工艺对板材的要求。总之采取组合工艺生产的板材方向性小，适宜于做纵向延伸率高的优质换热器用板。

采用机油作润滑进行冲压时，裂纹走向垂直于轧向。但采用塑料薄膜作润滑剂进行冲压时，裂纹出现的部位和走向发生了变化，杯突裂纹出现在凸圆顶部，裂纹走向也不垂直于板材轧制方向，其原因在于塑料薄膜改变了板材的应力状态，而且塑料薄膜比机油润滑效果好，能使杯突值提 10%。现在，我厂用钛板冲制换热器叶片，采用厚 4～6 μm 的塑料薄膜代替机油进行润滑，大大地提高了叶片的合格率。

5 结论

(1) 换热器用 TA1 板材的氧含量应控制在 0.08%以下。

(2) 换热器用 TA1 板材的最佳晶粒尺寸为 65～80 μm。

(3) 用组合工艺生产 TA1 板材可满足冲压工艺技术要求。

(4) 冲制叶片时使用塑料薄膜润滑比机油润滑的效果好。

(5) δ_5 低于 60%的钛板应采取慢速冲压成型，或将板材加热后冲压成形，这些对缓解裂纹出现均有一定效果。

参考文献

1 五弓勇雄(编著)，陈天忠(译). 金属塑性加工技术. 北京：冶金工业出版社，1987：594－598.

2 世界塑性加工最新技术译文集. 北京：机械工业出版社，1989：559－561.