DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.02.006

六西格玛在提高单晶叶片弦长合格率中的运用

许剑伟,郑　乔,王海文,杨　功
(中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室,北京 100095)

摘　要:为提高某型发动机单晶叶在精密铸造过程中的叶片弦长合格率,运用了六西格玛统计技术对某型号发动机单晶叶片在精密铸造过程中工艺、管理等数据进行了详细分析,确定了影响叶片弦长的关键因素。通过对模具相应部位进行修改,对工艺流程进行相应改进,对该型号单晶叶片 4 个截面改进前后弦长数据进行了对比。结果表明,运用六西格玛统计技术可以提高精密铸造单晶叶片尺寸的合格率。

关键词:精密铸造;六西格玛;单晶叶片;弦长;过程能力

中图分类号: TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)02-0095-06

Application of Six Sigma in Improving Chord Length Qualification Rate of Investment Casting Single Crystal Blade

XU Jianwei, ZHENG Qiao, WANG Haiwen, YANG Gong
(Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to improve the qualified rate of the chord length of a single crystal blade in the investment casting process of a certain type of engine, the six sigma statistical technology was used to analyze the process and management data of the single crystal blade in the precision casting process of a certain type of engine in detail, and the key factors affecting the chord length of the blade were determined. By modifying the corresponding parts of the die and improving the technological process, the chord length data before and after the four sections of the single crystal blade of this model were compared. The results show that the qualified rate of precision casting single crystal blade size can be improved by using six sigma statistical technique.

Key words: investment casting; six sigma; single crystal blade; chord length; process capability

单晶叶片是航空发动机关键零件,国内外都高度重视,对单晶叶片的研究层出不穷[1],我国的单晶叶片研制技术飞速发展,已经研究出了大尺寸双联单晶导向叶片[2],但是在单晶叶片研制生产过程中,整体合格率比较低,其中单晶叶片的尺寸控制难度非常大,由于单晶叶片尺寸不合格率而导致大量叶片报废,而单晶叶片尺寸中弦长非常关键,弦长不合格叶片会导致发动机运行过程中, 达不到其功率而增加油耗,因此需要严格控制单晶叶片的弦长尺寸。

虽然有报道通过液态金属冷却法可以大幅提高单晶叶片的合格率[3],但是目前国内绝大部分仍然没有实现液态金属冷却法进行单晶叶片的精密铸造,而且液态金属冷却法对单晶叶片的尺寸控制没有明显的效果。

国内对于精密铸造工艺优化和控制做了较多研究,但大多数是针对铸件的表面质量[4,5],北京航空材料研究院有研究者从壳型工艺入手提高高温合金叶片质量,但主要是提高表面质量[6,7],对叶片尺寸精密控制鲜见报道。重庆大学有人开展了六西格玛工具在压铸行业开展了研究[8],航材院有人开展了六西格玛工具方法在叶片铸造合格率提升方面开展了一定的研究单晶叶片研究生产报道[9],国内尚鲜见到六西格玛工具在单晶叶片领域研究报道,而国外的报道只是零星报道[10],但鲜见到六西格玛工具在单晶叶片尺寸方面研究报道。

因此本研究针对某型发动机精密铸造单晶叶片弦长尺寸控制开展研究, 力图找出影响尺寸的关键因素,然后进行改进,以达到精密铸造单晶叶片弦长尺寸满足设计要求, 为保障我国某型发动机研制任务提供支持。

1　研究方法

该型发动机用单晶叶片所检测截面为 4 个截面, 分别为 3-3 截面、5-5 截面、7-7 截面、9-9 截面(截面形状及示意图见图 1)。4 个截面公差均为±0.3 mm。利用海康斯威三坐标检测仪(见图 2)进

收稿日期:2020-11-10

作者简介:许剑伟(1975-),江西九江人,高工,硕士.主要从事精密铸造方面的工作.电话:19801133272

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

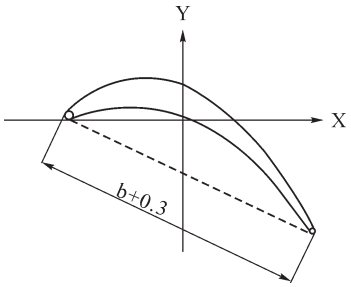


图 1 某型发动机精密铸造单晶叶片截面弦长示意图
Fig.1 Schematic diagram of chord length of single crystal blade section of an engine

图 2 海克斯康三坐标检测机
Fig.2 Hexcon CMM

行每个叶片 4 个截面弦长检测,计算机自动计算出每个截面的偏差值、超差值等。

改进前,通过精密铸造技术铸造了 150 片单晶叶片,对此 150 片单晶叶片进行三坐标检测,样本量足够,统计分析此 150 片叶片偏差具有指导改进意义。

针对 150 片叶片尺寸数据,可以计算偏差中位数、过程能力、管理控制情况、工艺(模具)控制情况等,由此可以评价弦长尺寸不合格是管理的原因、还是工艺(模具)的原因,然后针对具体原因进行改进。

针对单晶叶片弦长不合格原因进行改进,改进后再研制生产 201 片单晶叶片,同样可以计算此 201 片单晶叶片偏差值、过程能力、管理控制情况、工艺(模具)控制情况等,以验证合格率是否得到提高(研究路线见图 3)。

2 改进前弦长数据

按照稳定的工艺(蜡模制备、壳型制备、熔炼浇注、真空热处理等)进行研制生产单晶叶片 150 片,经过表面吹砂处理后,进入三坐标工序检验每片叶片的弦长,每片叶片检测 3-3、5-5、7-7、9-9 截面弦长,对每片叶片的每个截面弦长与理论标准进行对比,计算出每片叶片的每个截面的弦长偏差值。

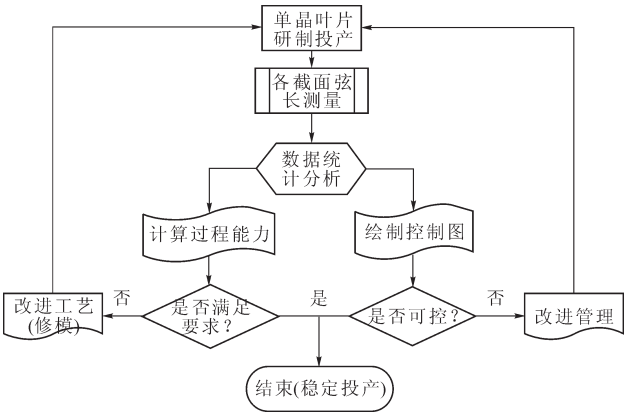


图 3 研究路线
Fig.3 Research route

根据标准规范,叶片的每个截面弦长公差为 ±0.3 mm,即上公差为+0.3 mm,下公差为 -0.3 mm。

2.1 改进前弦长时间序列

统计出 150 片叶片的各截面弦长偏差情况,然后以叶片序号为横坐标,以偏差为纵坐标画出折线图,以±0.3 mm 分别为上下限即可做出相应的时间序列图(见图 4)。

2.2 控制图

控制图与时间序列图有本质区别,控制图更能反应研制生产过程中管理控制情况,控制图的上下线是根据研制生产数据自动生成,反应的是波动情况,其上限是 +3σ,而下限是 -3σ,即±3σ,即 6σ,当研制生产过程出现异常情况时,则将以红点的形式标定出来,并辅以数字表达。

根据研制生产的 150 片叶片各截面弦长偏差情况可以作出控制图(见图 5),从图中可以看出,出现了较多的 1 号异常及 2 号异常情况,即出现了较多的超出±3σ 波动,及出现了连续 9 个点在中心线同一侧,这些异常点均在研制生产过程中需要关注的地方,需要加强管理控制。

2.3 过程能力统计

过程能力可以表征产品生产过程中,技术与管理在国际上所处的水平,一般用 PpK、CpK 或 Z 表达,本文用 Ppk 表达,通过过程能力比较可以考查产品改进前后效果、也可以比较同类产品国内外水平差异。通过对 150 片叶片各截面弦长偏差情况进行过程能力统计(见图 6),可以看出,改进前弦长过程能力总体较低。

3 改进方案

根据改进前的数据统计分析,流程能力明显不满足目前的科研生产要求,因此需要对研制工艺进

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

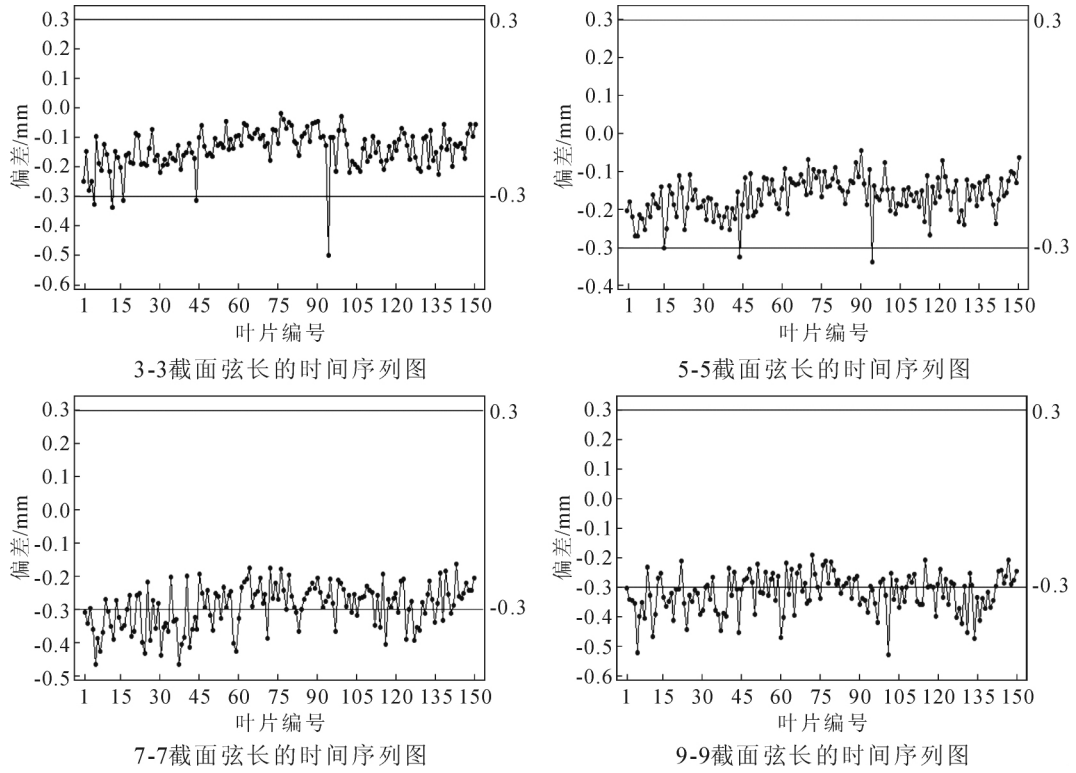


图 4 改进前弦长情况

Fig.4 Chord length before improvement

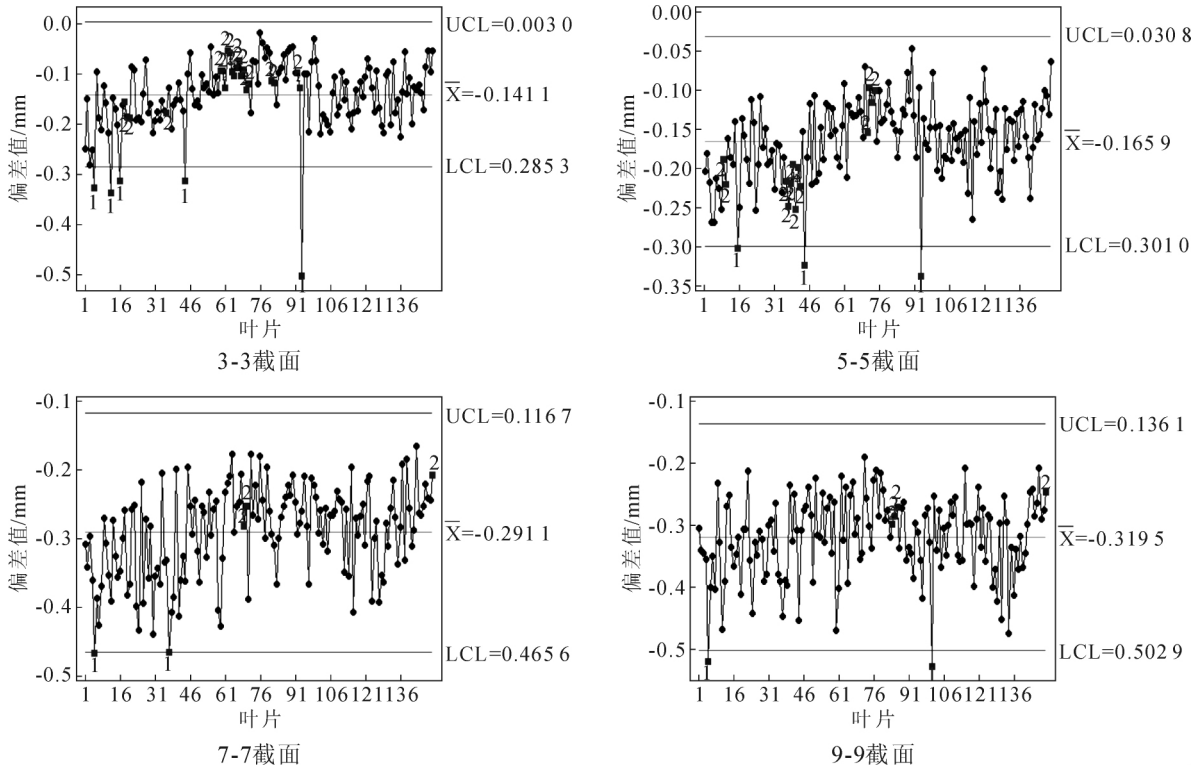


图 5 弦长尺寸监测控制

Fig.5 Chord length size monitoring and control

行改进,根据数据分析,主要更改方向为模具修改,就可以大幅度提高单晶叶片的弦长合格率,而控制图也可以看出,亦需要提升管理能力。

3.1 模具修改方案

根据弦长偏差情况,对模具相应的部位进行修改(修改数据见表 1)。所使用的模具见图 7。

3.2 管理能力提升

根据现场控制图异常点情况,进行详细分析,利用头脑风暴法、石川图、亲和图等方法进行改进,减少管理流程的波动。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

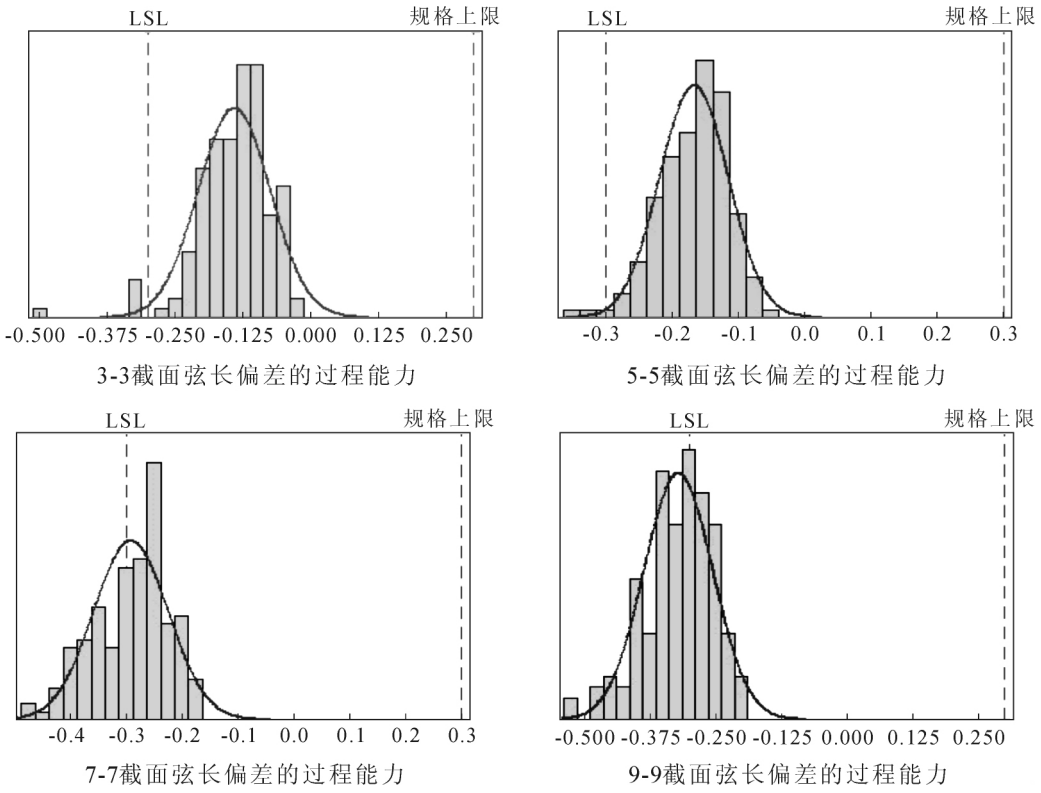


图 6 弦长尺寸过程能力
Fig.6 Chord length size process capability

表1 叶片截面弦长偏差(修模量)/mm
Tab.1 Chord length deviation of blade section

截面	3-3 截面	5-5 截面	7-7 截面	9-9 截面
偏差中位数（修模量）	-0.13	-0.16	-0.28	-0.31

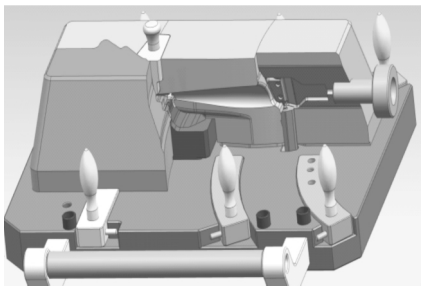


图 7 XX 产品模具
Fig.7 XX product mould

4 改进结果及讨论

4.1 改进后弦长尺寸情况

根据统计分析后，修改精密铸造用的外形模具,经过研制生产 201 片叶片,利用 Minitab 软件作出时间序列图(见图 8),从实际的合格率比较,也可以得出合格率得到了提高(见图 9),但是需要运用六西格玛统计工具进行进一步验证,以证明这些提高是否具有统计学上的意义。

4.2 改进后过程能力及对比

运用 Minitab 软件对各截面弦长进行过程能力分析与计算,得出各截面过程能力的柱状图、并进行拟合分析、得出相应的整体能力(过程能力)Ppk 值(见图 10)。对各截面过程能力进行汇总并与改进前对比(见表 2)。

表2 改进前后过程能力对比(Ppk)
Tab.2 Comparison of process capability before and after improvement

序号	截面	改进前	改进后	提高
1	3-3	0.79	1.19	0.4
2	5-5	0.86	1.42	0.56
3	7-7	0.04	1.55	1.51
4	9-9	-0.1	1.42	1.52

4.3 改进前后双样本 T 检验

改进前后,需要进行数据的详细分析,运用六西格玛统计技术对改进前后弦长数据进行统计概率表征(见表 3),从表征数据 P 值可以看出,因为 P 值均小于 0.05,故改进前后弦长有了显著改进。

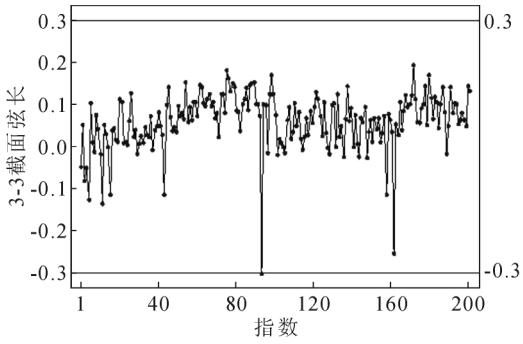
4.4 改进前后控制图对比

从技术和管理得角度,需要证明是否得到了提高,利用 MINITAB 软件,绘制了改进前后的的控制图,并放到一张图形上进行比较(见图 11),从图中可以看出,改进前后,各截面弦长的控制水平明显得到了提升。

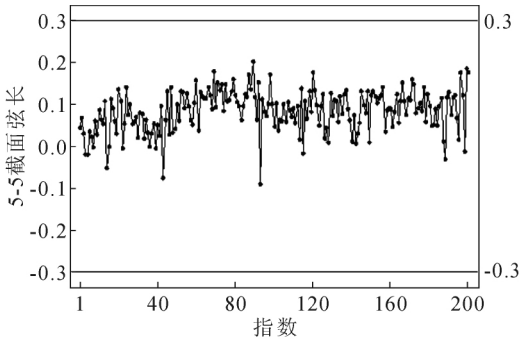
5 结论

(1)运用 Mintitab 软件,对数据进行统计分析,

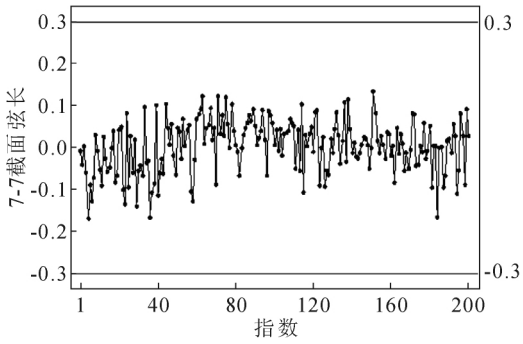
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



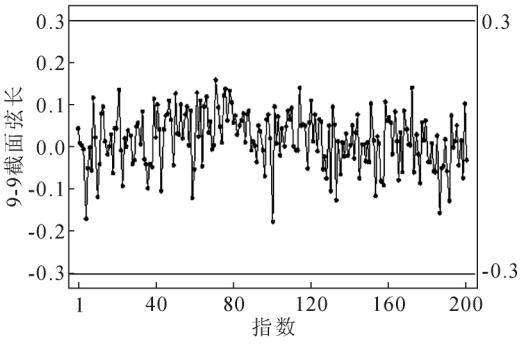
3-3截面弦长的时间序列图



5-5截面弦长的时间序列图



7-7截面弦长的时间序列图



9-9截面弦长的时间序列图

图 8 弦长时间序列图

Fig.8 Chord length time series diagram

表3 改进前后各截面弦长统计概率值

Tab.3 Statistical probability value of chord length of each section before and after improvement

截面	阶段	N	均值	标准差	均值标准误	95%置信区间	自由度	T 值	P 值
3-3 截面	改进前	201	0.059 8	0.067 4	0.004 8	(0.186 66, 0.215 16)	322	27.7	0.00
	改进后	150	-0.141 1	0.066 9	0.005 5				
5-5 截面	改进后	201	0.085 2	0.050 5	0.003 6	(0.240 18, 0.261 94)	316	45.4	0.00
	改进前	150	-0.165 9	0.051 8	0.004 2				
7-7 截面	改进后	201	0.003 7	0.063 5	0.004 5	(0.280 85, 0.308 74)	310	41.6	0.00
	改进前	150	-0.291 1	0.067 2	0.005 5				
9-9 截面	改进后	201	0.019 0	0.066 0	0.004 7	(0.324 44, 0.352 41)	321	47.6	0.00
	改进前	150	-0.319 5	0.065 8	0.005 4				

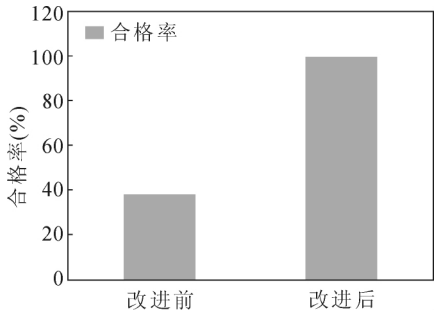


图 9 改进前后合格率对比

Fig.9 Comparison of pass rate before and after improvement

根据改进前数据分析结果指导模具修改方案,将模具修改后,叶片弦长合格率显著提升。

(2)根据数据异常波动,追查到了流程的薄弱环节,对流程进行了相应改进,流程能力得到了相当提高。

(3)根据六西格玛统计技术的运用,改进后工艺控制水平得到了明显提升,叶片的合格率大幅提高。

参考文献:

[1] Wanshun, XiaXinbao. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020(9):76-95.

[2] 贾玉亮,张剑,杨振宇,等. 大尺寸双联单晶叶片杂晶缺陷控制工艺研究[R]. LG086,北京,中国航发北京航空材料研究院,2018.

[3] 张健. 液态金属冷却定向凝固技术的发展与应用[C]// 中国铸造活动周论文集, 沈阳: 2019,421-428.

[4] 孟凡国,吴剑涛,李维,等. 承力支板精密铸造工艺控制及优化[J]. 铸造技术,2019,40(12):1320-1323.

[5] 李伟东,刘茵琪,田永武. 钛合金熔模精密铸件表面质量提升工艺性研究[J]. 铸造技术,2020,41(2):160-165.

[6] 肖克. 单晶叶片型壳工艺探讨 [J]. 铸造技术,2011,32(10):1358-1360.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

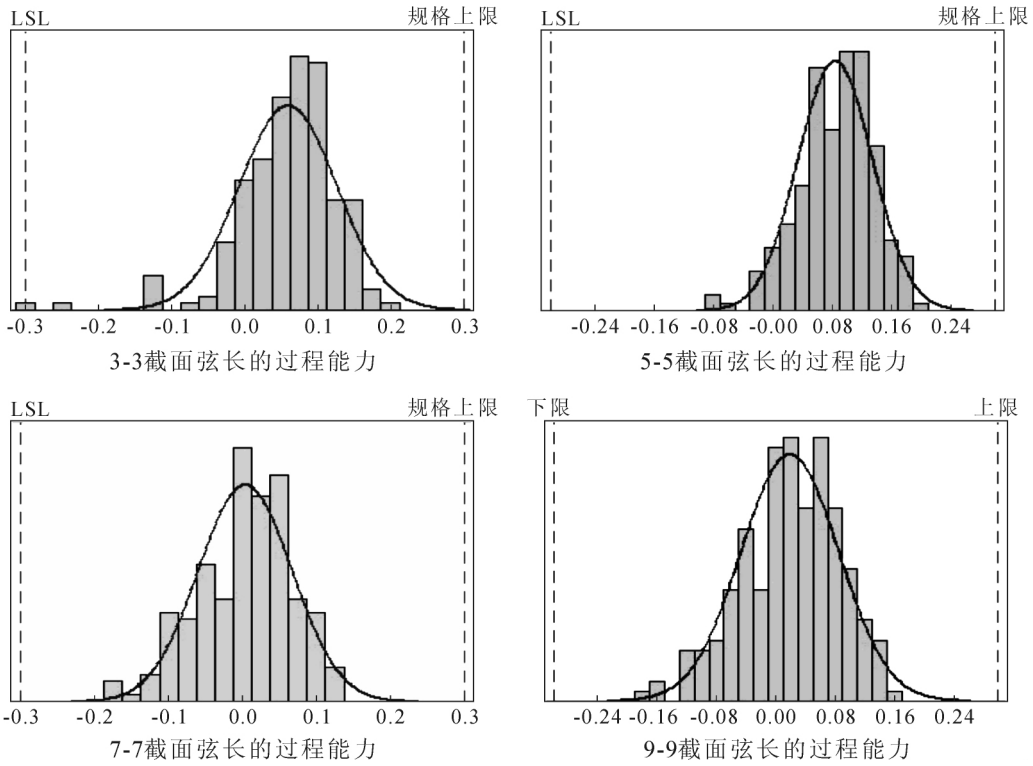


图 10 弦长过程能力

Fig.10 Chord length process capability

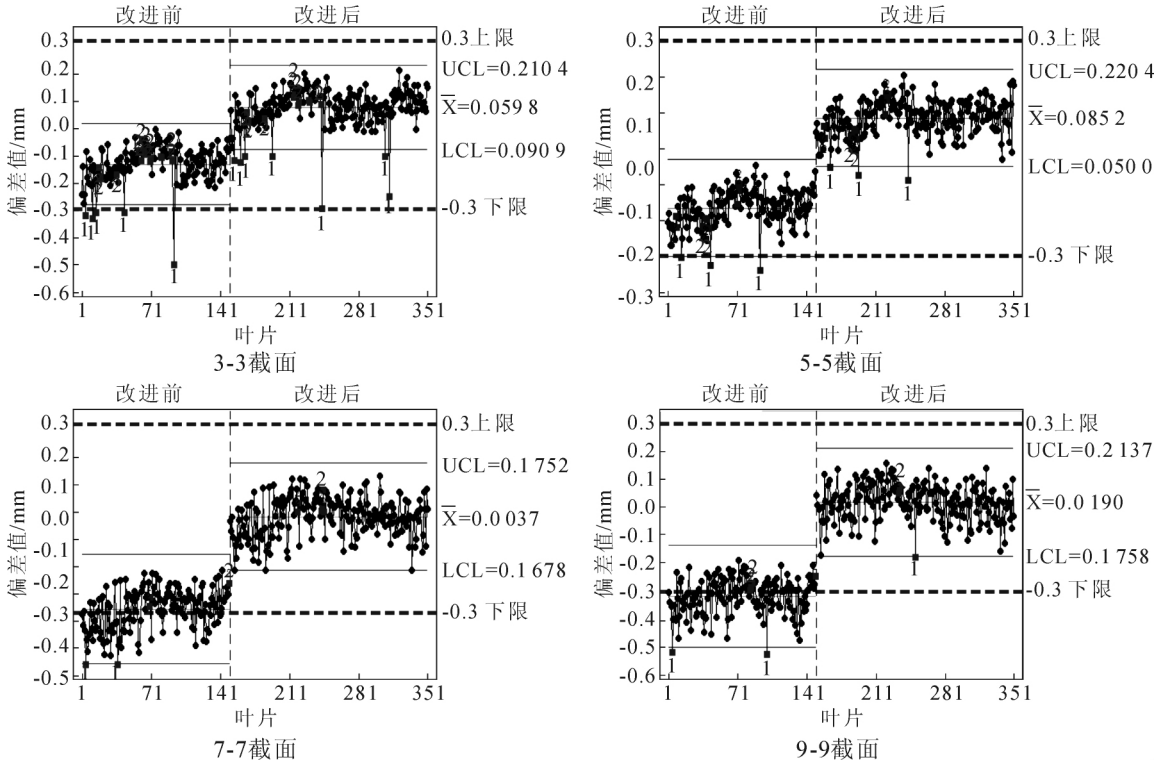


图 11 改进前后控制图对比

Fig.11 Comparison of control charts before and after improvement

[7] 肖克. 单晶叶片用精密铸造壳型质量的改进 [J]. 铸造技术，2010，31(11):1487-1489.

[8] 段政，蒋毅文，李世远，等. 运用六西格玛工具提高低压铸造加工中心一次通过率的剖析[C]// 重庆市铸造年会论文集，重庆：2020，54-61.

[9] 董翠. XX 应用六西格玛工具方法提高某型叶片铸造合格率[J]. 航空标准化与质量，2016(3):30-33.

[10] Mohit Kaushik, Gaurav Chauhan, et a1. Reducing rejections using Six Sigma: a case from Indian automobile component manufacturing industry [J]. International Journal of Services and Operations Management (IJSOM),2019(33)27-36.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net