

## 波纹曲面冷压对 7050 铝合金带筋厚板残余应力的影响

李 晨<sup>1</sup>, 张新全<sup>1</sup>, 向 阳<sup>2</sup>, 袁武华<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089; 2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 通过淬火、冷压试验和有限元模拟, 研究了波纹曲面结构对 7050 铝合金带筋厚板淬火、冷压后消减残余应力的影响规律, 分析了变形量、波纹方向及波纹形状对冷压后残余应力消减效果的影响。结果表明, 波纹曲面结构对淬火残余应力分布的影响不明显, 冷压后残余应力得到了较大消减。随着变形量的增大, 筋条及试样两侧棱位置的压应力区面积及应力值下降, 波谷位置的应力值逐步增加; 受筋条对金属流动的影响, 宽度方向波纹比长度方向的波纹更有利于冷压后残余应力的消减; 瓦楞式波纹残余应力的消减效果优于对称式波纹, 整体分布更加均匀。从研究结果可知, 宽度方向采用瓦楞式波纹结构, 冷压变形量为 3% 时, 7050 带筋铝合金厚板可以得到较好的残余应力消减效果。

**关键词:** 7050 铝合金; 波纹曲面; 淬火; 冷压; 变形量; 残余应力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.016

**中图分类号:** TG166.3; TG115.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0119-07

## Influence of cold pressing with corrugated surface on residual stress for 7050 aluminum alloy thick plate with ribs

Li Chen<sup>1</sup>, Zhang Xinquan<sup>1</sup>, Xiang Yang<sup>2</sup>, Yuan Wuhua<sup>2</sup>

(1. First Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Through quenching test, cold pressing test and finite element simulation, the influence law of corrugated surface structure on residual stress reduction after quenching and cold pressing of 7050 aluminum alloy thick plate with ribs was studied, and the influences of deformation amount, corrugation direction and corrugation shape on the residual stress reduction effect after the cold pressing were analyzed. The results show that the corrugated surface structure has no obvious effect on the distribution of quenching residual stress, but the residual stress is greatly reduced after cold pressing. With the increasing of the deformation amount, the area and stress value of the compressive stress zone at the rib and edge positions on both sides of sample decrease, and the stress value at the trough position increases gradually. Significantly, due to the influence of the ribs on the metal flow, the corrugation in width direction is more conducive to the reduction of residual stress after cold pressing than the length direction. Finally, the residual stress reduction effect of corrugated corrugation is better than that of symmetrical corrugation, and the overall distribution is more uniform. Thus, when the cold pressing deformation amount is 3% and the corrugated corrugation structure is used in the width direction, a better residual stress reduction effect can be obtained of 7050 aluminum alloy thick plate with ribs.

**Key words:** 7050 aluminum alloy; corrugated surface; quenching; cold pressing; deformation amount; residual stress

随着现代飞机高速、高机动等性能要求的不断提高, 7XXX 系铝合金整体结构件被广泛应用于航空航天制造领域<sup>[1-2]</sup>。7050 等热处理强化超高强度铝合金结构件在制造过程中的一个关键热处理工序是 470~480 °C 固溶后快速冷却, 以获得过饱和固溶

体, 为后续时效析出强化创造条件。工件在淬火时, 因表面和芯部温度梯度而产生大的残余应力, 导致后续机加工过程中工件易出现变形、扭转、翘曲等现象<sup>[3-5]</sup>。变截面大型铝合金复杂结构件不宜采用拉伸法, 一般采用冷压法来消减淬火残余应力<sup>[6-8]</sup>。但对于大型结构件, 其冷压过程中变形抗力较大, 冷压工艺的实施受到压机吨位的限制<sup>[9-10]</sup>。前期通过设计合理的波纹曲面使大型平面工件大幅度降低冷压载荷的同时, 可有效消减残余应力<sup>[11-12]</sup>。本文将采用波纹曲面对 7050 铝合金带筋厚板冷压过程中

收稿日期: 2022-01-11; 修订日期: 2022-03-19

作者简介: 李 晨 (1983-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: lichen\_1983\_2002@163.com

通信作者: 袁武华 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: yuan46302@163.com

的残余应力消减效果进行研究,分析不同变形量、波纹方向及波纹形状对构件残余应力的影响规律。

1 试验材料与方法

1.1 淬火-冷压工艺试验

试验材料为 7050 锻态铝合金,试样尺寸为 200 mm×100 mm×30 mm,试样表面为对称式波纹曲面结构,波纹沿试样宽度方向扩展,波纹高度为 1 mm,波纹周期为 40 mm,如图 1 所示。

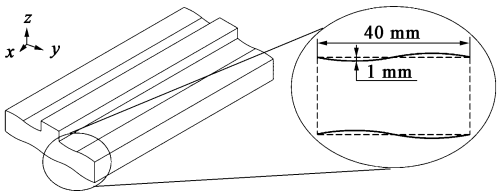


图 1 试件及波纹形状示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of specimen and corrugation shape

试样固溶温度为 475 ℃,固溶时间为 6 h,淬火转移时间 ≤3 s,淬火水温为 40 ℃,淬火时间为 10 min。将淬火态试样分别进行变形量为 2%、3%、4%和 5%的冷压变形。图 2 为试样冷压变形示意图。

1.2 残余应力测试

分别采用 X 射线法对冷压前后的锻件测量残余应力。测试设备为 Proto 的 iXRD 型 X 射线残余应力分析仪,辐射线选用 Cr-KAlpha, X 射线管压为 25 kV,管流为 5 mA,衍射晶面为 {311}。残余应力测试点分布如图 3 所示。沿试样 1/8、1/4、1/2

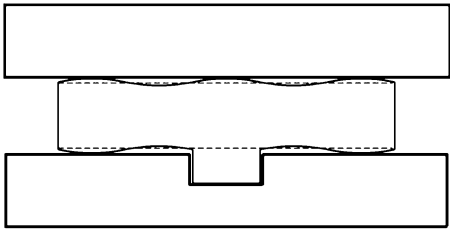


图 2 冷压变形示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of cold pressing deformation

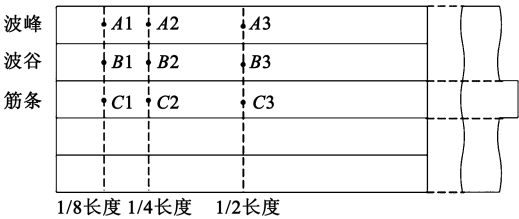


图 3 残余应力测试点示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of residual stress test points

长度截面波纹起伏选取测试点,其中 A、B、C 测试点分别位于波峰、波谷和筋条位置。

1.3 淬火-冷压工艺过程有限元模拟

利用 DEFORM 软件,对淬火-冷压过程的温度场和应力场进行热-力耦合模拟,模拟用 7050 铝合金的热物性参数及力学性能如表 1 和表 2 所示,将淬火残余应力模拟结果作为冷压模拟的初始输入条件,分别对试样进行不同变形量的冷压变形模拟,压制速度为 5 mm·s<sup>-1</sup>,模具与锻件的摩擦因数设置为 0.3。残余应力分析路径如图 4 所示。

表 1 7050 铝合金不同温度下的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of 7050 aluminum alloy at different temperatures

温度/℃	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2732	2729	2721	2711	2700	2687	2687	2661	2650	2640
热导率/(W·(m·℃) <sup>-1</sup> )	120	123	128	132	137	171	146	150	155	159
膨胀系数/(×10 <sup>-5</sup> ℃)	0.00	2.01	2.42	2.56	2.60	2.62	2.69	2.82	2.89	2.95
比热容/(J·kg·℃ <sup>-1</sup> )	871	821	830	841	855	871	890	911	935	961
换热系数/(×10 <sup>6</sup> W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )	4.0	9.0	13.5	17.5	16.0	13.0	11.0	9.0	7.0	5.5

表 2 7050 铝合金不同温度下的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of 7050 aluminum alloy at different temperatures

温度/℃	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
弹性模量/GPa	72	69	67	64	61	59	55	52	47	29
泊松比	0.348	0.355	0.363	0.365	0.369	0.378	0.385	0.389	0.396	0.448

## 2 模拟与测试结果

### 2.1 模拟结果

1/2 长度截面的淬火残余应力分布如图 5 所示, 淬火态试样的残余应力总体上呈现外部压应力、心部拉应力的分布规律。淬火试样 3% 变形量冷压后的残余应力分布如图 6 所示, 冷压态试样的残余应力得到较大幅度消减。表面波峰处长度方向上的残余应力  $\sigma_x$  数值有所降低, 表面波谷处  $\sigma_x$  由压应力转变为拉应力; 宽度方向上的残余应力  $\sigma_y$  的消减效

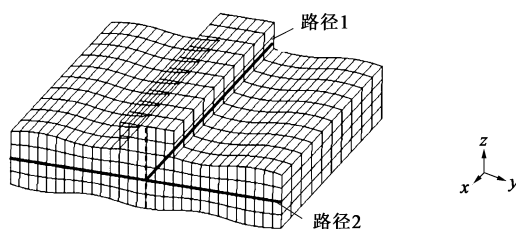


图4 不同路径选取示意图

Fig. 4 Schematic diagram of selection for different paths

果较好, 表面压应力及心部拉应力数值明显降低, 大部分范围处于  $-100 \sim 100$  MPa。

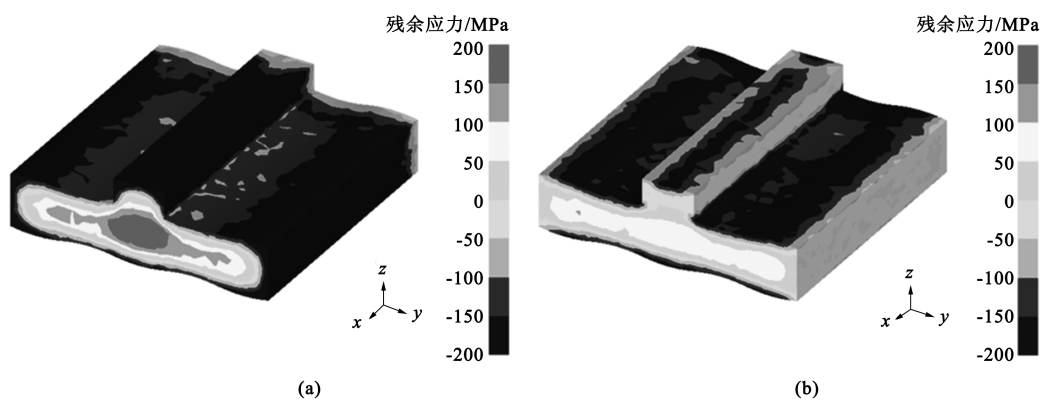


图5 淬火态试样残余应力分布模拟结果

(a)  $\sigma_x$  (b)  $\sigma_y$

Fig. 5 Simulation results of residual stress distribution for quenched specimens

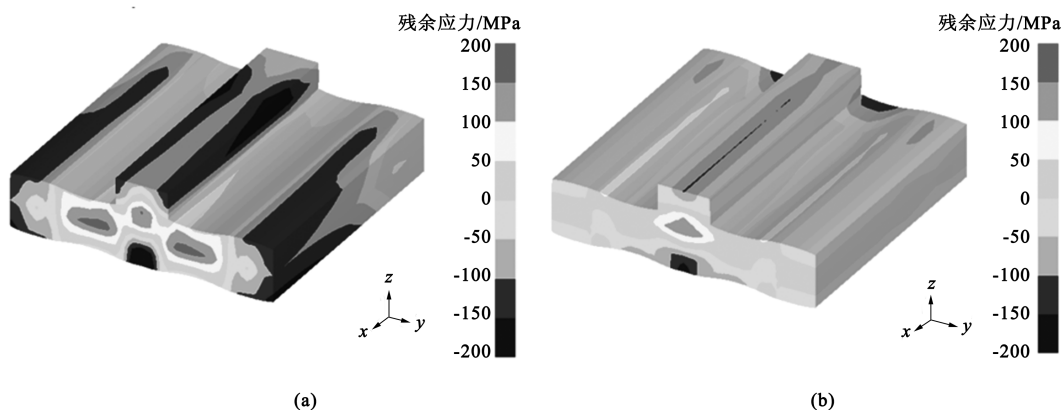


图6 冷压态试样残余应力分布模拟结果

(a)  $\sigma_x$  (b)  $\sigma_y$

Fig. 6 Simulation results of residual stress distribution for cold-pressed specimens

### 2.2 测试结果

使用 X 射线法对试样淬火及冷压态的残余应力进行测试, 测试并与模拟计算结果对比, 如表 3 和表 4 所示。从表 3 可以看出, 淬火态试样的残余应力的模拟值与测试值比较接近, 最大偏差为 38 MPa, 模拟与测试数据皆显示出波峰测试点的整

体残余应力值比波谷和筋条处的更大。从表 4 可以看出, 冷压后试样的残余应力误差略大于淬火态试样的残余应力, 模拟值与测试值的最大偏差为 53 MPa, 这是由于: 一方面淬火数据误差在冷压模拟过程中进一步累积; 另一方面冷压及后续回弹过程中试样内部残余应力的变化比较复杂, 模拟计算的

表 3 淬火残余应力测试结果 (MPa)

Table 3 Test results of quenching residual stress (MPa)

测试点	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
$\sigma_x$	测试值	-196	-236	-165	-130	-104	-107	-158	-175
	模拟值	-174	-192	-184	-109	-101	-96	-186	-190
$\sigma_y$	测试值	-192	-184	-149	-152	-196	-172	-159	-142
	模拟值	-158	-172	-162	-114	-158	-137	-149	-168

表 4 冷压残余应力测试结果 (MPa)

Table 4 Test results of cold pressing residual stress (MPa)

测试点	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
$\sigma_x$	测试值	-155	-153	-137	57	45	39	-101	-88
	模拟值	-130	-122	-124	31	37	38	-66	-63
$\sigma_y$	测试值	-79	-69	-59	81	-85	87	-64	-44
	模拟值	-50	-44	-47	34	-49	37	-84	-95

误差也相对较大。对比表 3 和表 4 发现, 模拟与测试的应力分布规律基本一致, 冷压后  $\sigma_x$  及  $\sigma_y$  残余应力的平均消减效果在 70%~80%, 整体上来说, 模拟与测试结果的误差较小。

3 分析与讨论

基于波纹结构试样淬火-冷压残余应力模型, 冷压工艺对试样残余应力的影响分析如下。

3.1 变形量对残余应力消减效果的影响

试样经变形量为 2%、3%、4%、5% 冷压变形后的残余应力分布如图 7 所示, 经过变形量 2%~5% 冷压变形后, 筋条及试样两侧棱边处的原波峰位置为最大压应力区, 波谷位置由变形前的压应力变为拉应力, 心部拉应力区的面积及数值均有所下降, 残余应力消减效果较好。随着变形量的增大, 筋条及试样两侧棱边位置的压应力区面积及应力值均有所下降, 但波谷位置的应力值逐步增加; 心部拉应力区的位置随变形量的增大沿宽度方向逐步向两侧移动, 其面积和数值均不断增大。变形量为 2% 时, 表面及心部残余应力的消减效果不佳。当变形量为 4% 和 5% 时, 虽然筋条及试样两侧棱边位置的残余应力的消减效果较好, 但表面波谷位置及心部区域由于变形量过大, 其应力值相较于变形量为 3% 时更大。综合来看, 变形量为 3% 时试样整体的残余应力的消减效果最佳。

不同冷压变形量路径 1、2 上的残余应力分布规律如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 变形量为 3% 时

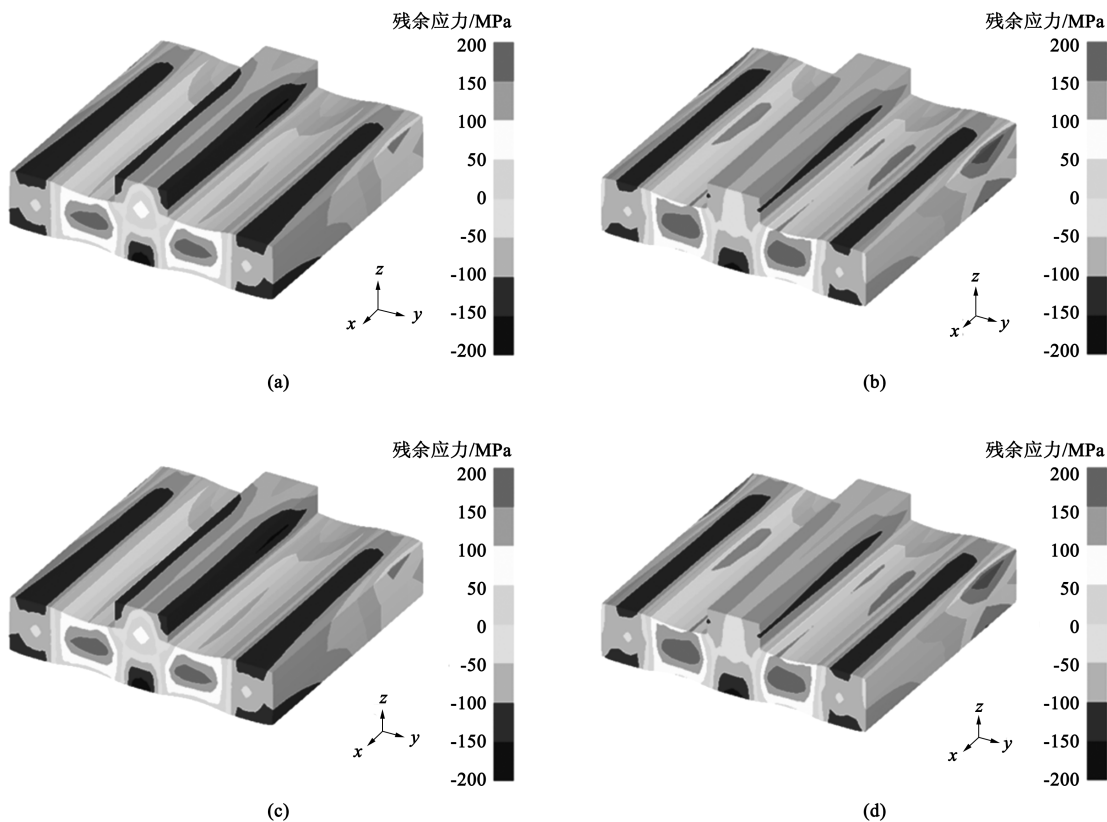
残余应力的消减效果最好, 这与之前的结论一致。从图 8b 可以看出, 冷压后路径 2 上的  $\sigma_x$  呈现“M”形曲线, 即试件两侧残余应力的消减效果较好, 中心区域应力由冷压前的拉应力变为压应力且数值大幅度降低, 但在距离两侧 30 mm 处的残余拉应力值达到最大, 且随着变形量的增大, 该拉应力值增大。

3.2 波纹方向对残余应力消减效果的影响

将波纹方向由宽度方向变为长度方向, 试样的几何尺寸、波纹高度及周期均保持不变, 如图 9 所示。采用相同工艺对试样进行淬火及冷压模拟, 得到的淬火及冷压残余应力分布分别如图 10a、图 10b 所示。从图 10a 可以看出, 试样淬火后残余应力的分布规律与图 5a 相似, 在试样几何尺寸相同的情况下波纹方向对淬火残余应力的影响很小。从图中 10b 可以看出, 波纹方向对冷压消减效果的影响很大, 波纹传播方向为长度方向时, 冷压变形过程中由于试样中间筋条的影响, 导致波峰处金属向中间流动受阻, 心部区域变形不充分而影响消减效果。而从路径 1 所示的残余应力  $\sigma_x$  同样可以看出 (图 11): 淬火态时波纹方向对试样残余应力分布的影响较小; 而冷压态时, 波纹沿宽度方向的试样的冷压消减残余应力的效果要优于波纹沿长度方向的试样。

3.3 波纹形状对残余应力消减效果的影响

对称式波纹曲面波峰、波谷的不均匀变形引起“拉压交替”的残余应力分布, 采用瓦楞式波纹形状试样的冷压残余应力分布如图 12 所示。对比图 6 及图 12 可以看出, 对称式波纹与瓦楞式波纹曲面试样冷压后残余应力  $\sigma_x$  的分布规律基本一致, 筋条、

图7 不同冷压变形量下试样残余应力  $\sigma_x$  分布的模拟结果

(a) 2%变形量 (b) 3%变形量 (c) 4%变形量 (d) 5%变形量

Fig. 7 Simulation results of residual stress  $\sigma_x$  distributions of specimens under different cold pressing deformation amounts

(a) Deformation amount of 2% (b) Deformation amount of 3% (c) Deformation amount of 4% (d) Deformation amount of 5%

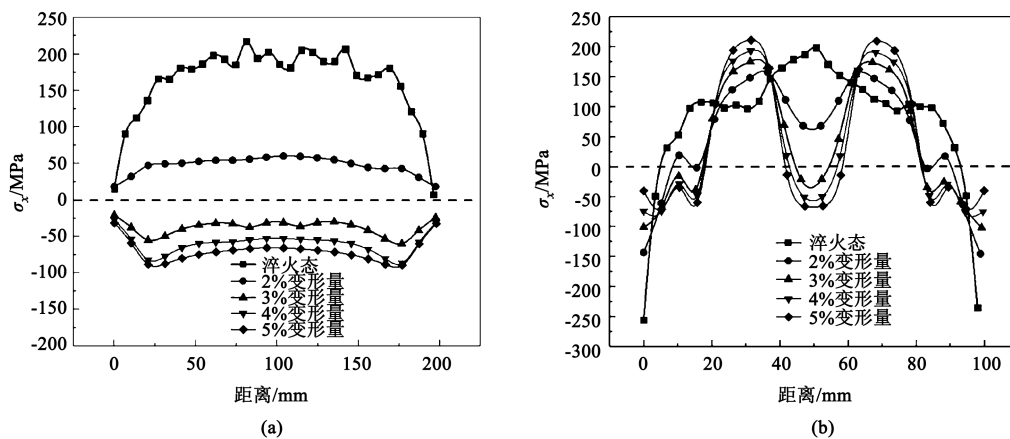


图8 不同冷压变形量下路径1、2上的应力分布规律

(a) 路径1,  $\sigma_x$  (b) 路径2,  $\sigma_x$ 

Fig. 8 Stress distribution laws on paths 1 and 2 under different cold pressing deformation amounts

(a)  $\sigma_x$  on path 1 (b)  $\sigma_x$  on path 2

试样两侧棱边及波峰表面为压应力区, 波谷及试样心部位置为拉应力区。从图13中路径2上的残余应力分布可以看出, 瓦楞式波纹残余应力的消减效果要优于对称式波纹, 残余应力整体分布更加均匀。

## 4 结论

(1) 波纹曲面结构对带筋厚板试样冷压后的残



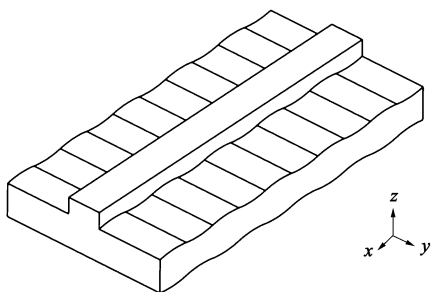


图 9 波纹沿长度方向传播的曲面试样示意图

Fig. 9 Schematic diagram of curved specimens with corrugations propagating along length direction

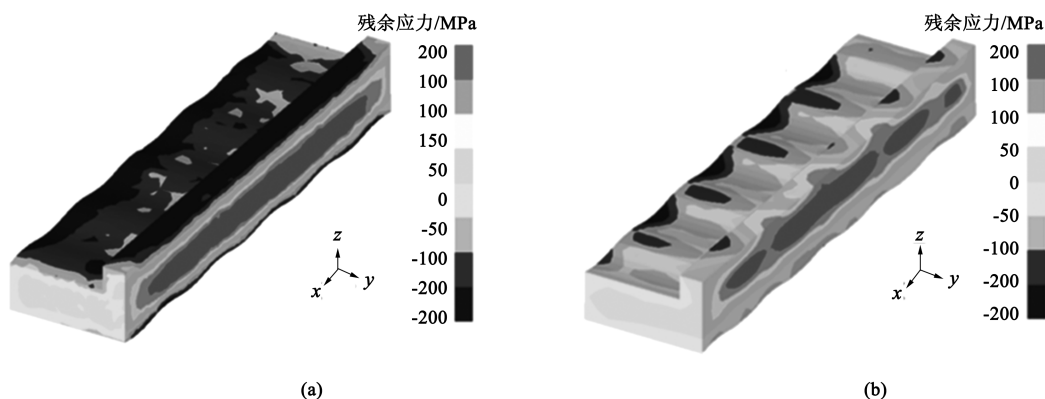
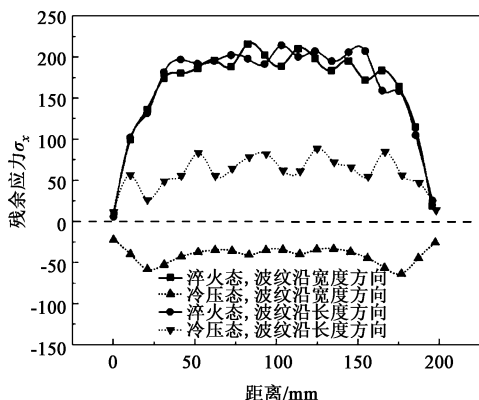


图 10 波纹沿长度方向试样不同状态下的残余应力分布

(a) 淬火态,  $\sigma_x$  (b) 冷压态,  $\sigma_x$ 

Fig. 10 Distributions of residual stress in different states of specimens with corrugation along length direction

(a) Quenched,  $\sigma_x$  (b) Cold pressed,  $\sigma_x$ 图 11 不同波纹方向对  $\sigma_x$  残余应力消减效果的影响Fig. 11 Influences of different corrugation directions on reduction effect residual stress  $\sigma_x$ 

向更有利于冷压后残余应力的消减。

(4) 瓦楞式波纹结构对残余应力的消减效果要优于对称式波纹, 残余应力整体分布更加均匀。

#### 参考文献:

[1] 王浩, 肖纳敏, 李惠曲, 等. 7050 铝合金残余应力冷变形消减工艺仿真研究 [J]. 模具技术, 2021, (1): 1-7.

余应力的消减效果较好, 残余应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  的平均消减效果为 70%~80%, 表面波峰处  $\sigma_x$  降低, 波谷处  $\sigma_x$  由压应力转变为拉应力。

(2) 随着冷压变形量的增大, 筋条及两侧棱位置的压应力区面积及应力值均下降, 波谷的应力值逐步增加; 心部拉应力区的位置沿宽度方向逐步向两侧移动, 其面积和应力值增大。冷压变形量为 3% 时, 残余应力的消减效果较好。

(3) 波纹方向对冷压消减效果的影响明显, 对于长度方向筋条试样, 波纹沿宽度方向比沿长度方

Wang H, Xiao N M, Li H Q, et al. Simulation research on cold deformation reduction process for residual stress of 7050 aluminum alloy [J]. Mould Technology, 2021, (1): 1-7.

[2] 吴锡伟, 吴道祥, 许开春. 7050 铝合金长轴筋板类锻件淬火残余应力消减工艺研究 [J]. 铝加工, 2021, (4): 27-30.

Wu X W, Wu D X, Xu K C. Research on quenching residual stress reduction process for 7050 aluminum alloy long-axis rib plate forgings [J]. Aluminum Processing, 2021, (4): 27-30.

[3] 张福全, 杨重, 袁武华, 等. 7050 铝合金淬火残余应力及消减工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (24): 177-180.

Zhang F Q, Yang Z, Yuan W H, et al. Research on quenching residual stress and reduction process of 7050 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (24): 177-180.

[4] Liu H W, Zheng J X, Guo Y L, et al. Residual stresses in high-speed two-dimensional ultrasonic rolling 7050 aluminum alloy with thermal-mechanical coupling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 186: 105824.

[5] Zhang Z, Yang Y F, Li L, et al. Assessment of residual stress of 7050-T7452 aluminum alloy forging using the contour method [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 644: 61-68.

[6] 孙燕杰, 龚海, 刘瑶琼, 等. 分步冷压对 7050 铝合金 T 形锻件残余应力的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (1): 65-69.

Sun Y J, Gong H, Liu Y Q, et al. The effect of step cold pressing

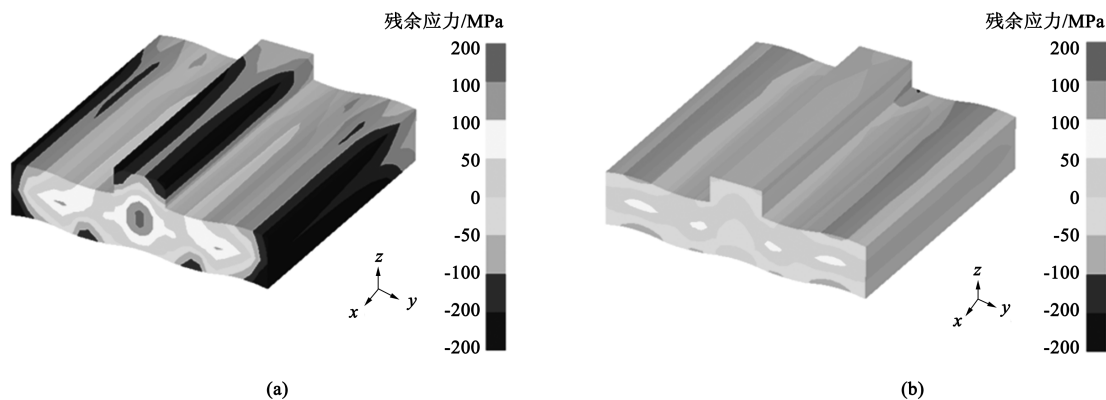


图 12 瓦楞式波纹曲面试样冷压残余应力分布

(a)  $\sigma_x$  (b)  $\sigma_y$ 

Fig. 12 Cold-pressing residual stress distributions of corrugated-corrugation surface specimens

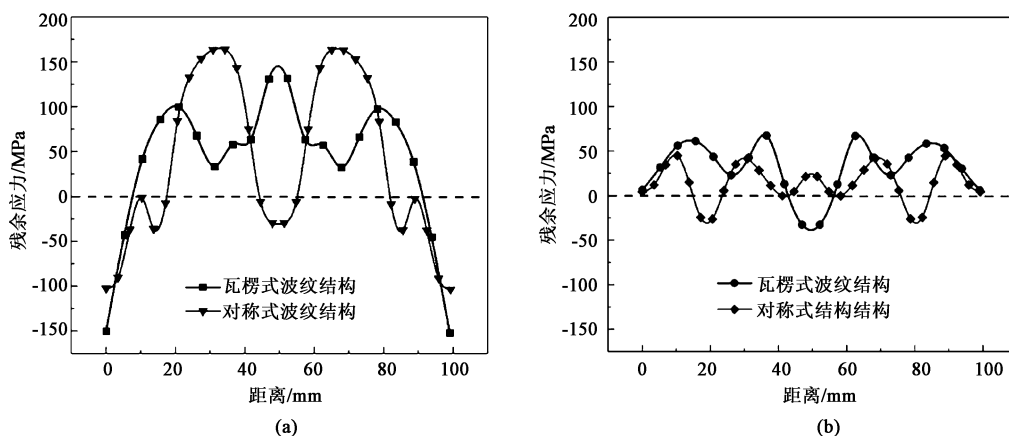


图 13 对称式/瓦楞式波纹形状冷压后路径 2 上的残余应力对比

(a)  $\sigma_x$  (b)  $\sigma_y$ 

Fig. 13 Comparison of residual stresses in path 2 after cold pressing for symmetrical and corrugated corrugation shapes

on the residual stress of 7050 aluminum alloy T-shaped forgings [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (1): 65-69.

- [7] 吴道祥, 王彬, 刘强. 模压法消除 7050 铝合金 H 型截面构件淬火残余应力的研究 [J]. 铝加工, 2019, (6): 23-26, 7.
- Wu D X, Wang B, Liu Q. Research on elimination of quenching residual stress of 7050 aluminum alloy H-section by compression method [J]. Aluminum Processing, 2019, (6): 23-26, 7.
- [8] 姚诗杰, 夏伟军, 袁武华, 等. 基于分段冷压法 7050 大型铝合金锻件残余应力的消减 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (1): 84-88.
- Yao S J, Xia W J, Yuan W H, et al. Reduction of residual stress in 7050 large aluminum alloy forgings based on segmented cold pressing [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42 (1): 84-88.
- [9] 牛关梅, 李伟, 王军强, 等. 7085 铝合金自由锻厚板淬火-分段冷压残余应力演变规律研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 140-144.
- Niu G M, Li W, Wang J Q, et al. Study on the evolution law of residual stress in 7085 aluminum alloy free forging thick plate

quenching-segment cold pressing [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 140-144.

- [10] 张玉玲. 冷压工艺对 7050 铝合金锻件淬火残余应力的影响研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- Zhang Y L. Influence of Cold Pressing Process on Quenching Residual Stress of 7050 Aluminum Alloy Forgings [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [11] 袁武华, 赵红强, 张辉. 波纹曲面结构对冷压消减 7050 铝合金残余应力的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (12): 165-168, 171.
- Yuan W H, Zhao H Q, Zhang H. The effect of corrugated surface structure on reducing the residual stress of 7050 aluminum alloy by cold pressing [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (12): 165-168, 171.
- [12] 赵红强. 冷压对波纹曲面铝合金件残余应力及性能的影响研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Zhao H Q. Research on the Effect of Cold Pressing on the Residual Stress and Performance of Corrugated Surface Aluminum Alloy Parts [D]. Changsha: Hunan University, 2019.