

喷丸处理的锆合金残余应力场分布规律

黄小波, 柳鸿飞, 高玉魁, 徐坤豪

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘 要: **目的** 通过不同的喷丸处理工艺, 探索适用于锆合金包壳管的喷丸处理参数。**方法** 对锆合金包壳管采取 9 种不同的喷丸处理工艺且编号 (1—9 号), 采用 XRD 残余应力检测技术, 对处理后的包壳管试样分别进行轴向和切向的残余应力场测定。**结果** 未喷丸处理的试样表面轴向、切向残余应力分别为 -277 MPa 和 -250 MPa, 最大应力在最外层。喷丸处理试样表面轴向残余压应力比未喷丸处理的大, 只有 9 号工艺对应的表面轴向残余应力比未喷丸的小, 这很有可能是因为喷丸强度过大, 在表面形成了微裂纹, 残余应力得以释放, 所以锆合金包壳管的喷丸强度不宜超过 0.40 mmA。对于强度较高的 5—9 号喷丸工艺, 喷丸强度达到 0.15 mmA 以上, 包壳管压应力影响层的厚度均超过 460 μm , 几乎达到了喷丸处理后包壳管的整个壁厚。在相同喷丸强度和相同弹丸直径条件下, 玻璃丸的表面压应力和最大压应力与不锈钢丸的相近, 不锈钢丸处理的压应力影响层比玻璃丸处理的压应力影响层厚约 80 μm 。**结论** 在相同喷丸强度和相同弹丸材料下, 改变弹丸直径对锆合金两个方向上的表面残余应力和最大残余应力的大小影响不大; 直径较小的弹丸对应轴向最大残余应力的位置更深, 直径较大的弹丸对应切向最大残余应力的位置更深。随着锆合金喷丸强度的增加 (没有出现过喷), 表面两个方向上的残余应力都增加, 两个方向上的最大残余应力也有所增加。

关键词: 锆合金; 核反应堆; 喷丸; 残余应力; 表面改性技术

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0016-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.003

Distribution Rule of Residual Stress Field of Zirconium Alloy Induced by Shot Peening

HUANG Xiao-bo, LIU Hong-fei, GAO Yu-kui, XU Kun-hao

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The work aims to explore shot peening parameters applicable to zirconium alloy cladding tubes by means of different shot peening process. Zirconium alloy cladding tubes were treated by 9 different shot peening processes and numbered (from 1—9). Besides, residual stress fields of the treated cladding tube specimens were measured in both axial and transversal direction by adopting XRD residual stress measurement technique. The residual stress of untreated specimen in axial and transversal direction was -277 MPa and -250 MPa, respectively, and the maximum stress appeared in the outermost layer. Axial residual compressive stress on the specimens subject to shot peening treatment (number 2—8) was higher than that on untreated specimen, while the residual compressive stress on the surface subject to 9# treatment was lower than that on untreated specimen. This was probably because the shot peening intensity was too high, thus microcrack formed on the surface and then the re-

收稿日期: 2017-08-07; 修订日期: 2017-09-04

Received: 2017-08-07; Revised: 2017-09-04

作者简介: 黄小波 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究锆合金的表层改性。

Biography: HUANG Xiao-bo (1992—), Male, Master graduate student, Research focus: surface layer modification of zirconium alloy.

通讯作者: 高玉魁 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究表层改性与疲劳断裂等。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface layer modification, fracture and fatigue.

sidual stress was released, shot peening intensity of the zirconium alloy cladding tubes should not exceed 0.40 mmA. For the higher intensity (above 0.15 mmA) shot peening process, such as 5—9 shot blasting process, the thickness of compressive stress affected layer was over 460 μm , almost the whole wall thickness of the cladding tubes subject to shot peening. Provided with same shot peening intensity and same projectile diameter, the surface compressive stress and the maximum compressive stress of glass projectile were close to those of stainless steel projectile. Thickness of compressive stress affected layer treated by glass projectile was nearly 80 μm thicker than that of compressive stress affected layer treated by stainless steel projectile. Provided with same shot peening intensity and the same projectile material, change in projectile diameter has little influence on surface residual stress and maximum residual stress in both axial and transversal direction. Meanwhile, the smaller the projectile diameter is, the deeper the maximum residual stress position in axial direction is; the larger the projectile diameter is, the deeper the maximum residual stress position in transversal direction is. As shot peening intensity on zirconium alloy increases (no over peening), the surface residual stress and the maximum residual stress increase in both directions.

KEY WORDS: zirconium alloy; nuclear reactor; shot peening; residual stress; surface modification technology

锆及锆合金具有优异的力学性能、核性能和耐腐蚀性能，其热中子吸收截面很小，约为 0.18 b ($1 \text{ b} = 1 \times 10^{-28} \text{ m}^2$)，所以用于核反应堆中作燃料包壳管，其性能将直接影响军用设备和核电站的安全性和可靠性^[1]。随着高性能燃料的开发和使用，更换燃料的周期变长，因此对燃料包壳管的性能要求也逐步变高。对于锆合金包壳管，主要有两种手段可以达到延长使用寿命的目的：一是改变合金成分，研究开发新型锆合金，例如美国西屋公司研究开发的 ZIRLO，法国开发的 M5 合金及俄罗斯开发的 E635 等；二是改进包壳管组件的制造工艺，可以通过对燃料包壳管近水一侧进行表面改性处理，来提高其表面完整性，增强包壳管的抗腐蚀性能，提高包壳管的使用寿命^[2-4]。

对材料表面的改性技术^[5]主要包括：喷丸^[1,6-7]、激光冲击^[8]、渗氮渗碳^[9-10]、预氧化^[11]和涂层^[12]等。其中喷丸处理是本文的研究重点，经喷丸处理后，试样表层会形成残余压应力，这有利于提高试样的抗腐蚀性能和抗疲劳性能^[13-14]，而残余应力的分布情况由诸多因素共同决定，例如喷丸强度、喷丸速度、弹丸尺寸、弹丸材料属性以及覆盖率等^[15-16]。目前仍然缺乏喷丸工艺的定量化分析以及相关的参数优化，因此对于不同材料的最佳喷丸工艺参数需要通过实验来确定。

本文将对 Zr-4 合金包壳管进行不同工艺的喷丸处理，利用 X 射线衍射仪和电解抛光仪来测量喷丸处理后的应力梯度。在大量的试验数据基础上，分析得到不同喷丸工艺所对应的表面残余压应力数值、最大残余压应力数值及其对应深度、压应力影响层深度等特征值，对比分析这些特征值与喷丸工艺参数之间的关系，为最终确定最佳的喷丸工艺提供实验依据。

1 喷丸试验

为了探索最佳喷丸工艺参数，对锆合金包壳管分别采用 9 种不同的喷丸工艺，如表 1 所示，包壳管总

长为 270 mm，直径约为 10 mm，喷丸前壁厚约为 0.57 mm。将包壳管分成 9 份，每份长度为 30 mm，将其编号 1—9 号，分别对应的喷丸工艺如表 1 所示。其中，1 号试样为不喷丸试样，8 号和 9 号的弹丸直径为 0.50~1.00 mm，以 0.6 mm 为主。为保障喷丸处理后包壳管的残余应力分布均匀，对 2—9 号喷丸试验均采用 200%覆盖率^[17]。

表 1 不同喷丸处理的工艺参数
Tab. 1 Process parameters of different shot peening treatment

编号	丸料	型号	弹丸直径/ mm	喷丸强度	覆盖率/%
1	不喷丸				
2	玻璃丸	AG835	0.30~0.42	0.18 mmN	200
3	不锈钢丸	AGS14	0.36	0.18 mmN	200
4	不锈钢丸	AGS14	0.36	0.30 mmN	200
5	不锈钢丸	AGS14	0.36	0.15 mmA	200
6	不锈钢丸	AGS20	0.51	0.20 mmA	200
7	不锈钢丸	AGS20	0.51	0.15 mmA	200
8	铸钢丸	S230	0.50~1.00 (0.6)	0.25 mmA	200
9	铸钢丸	S230	0.50~1.00 (0.6)	0.40 mmA	200

2 残余应力测试

为探索锆合金的最佳喷丸工艺，选择三种弹丸（玻璃丸、不锈钢丸和铸钢丸）和 8 种不同的喷丸工艺进行试验。在测试过程中，电解抛光深度的确定极其重要。由于 X 射线衍射仪只能测量金属材料表面的应力，大约为 10 μm ，所以要得到不同深度的残余应力数值，必须对材料进行剥层处理。要求材料的剥层处理不能对喷丸过后形成的应力场产生影响，所以

机械抛光不可取。本文采取电解抛光法^[15]。

由于锆合金耐腐蚀,以 NaCl 饱和溶液作为腐蚀液的腐蚀效果不佳,所以腐蚀过程中采用进口腐蚀液,腐蚀效率大大提高。腐蚀过程中的难点在于腐蚀时间和腐蚀深度的关系并不是简单的线性关系,主要原因有以下三点:(1)由于锆合金包壳管在常温条件下会在表面产生一层薄薄的氧化膜,这种氧化膜会提高锆合金的抗腐蚀性能,所以表层和内部的腐蚀时间会不同;(2)由前人的研究^[6]可以知道,喷丸后的晶粒会细化,而晶粒的细化程度随深度不同而不同,细化后的晶粒对抗腐蚀性能也有一定的影响;(3)喷丸后,试样的残余应力随深度不同而不同,而试样中压应力的大小对腐蚀速率也有一定的影响。采用 X 射线衍射仪测量残余应力,锆合金的衍射参数如表 2 所示。

表 2 锆合金衍射参数
Tab.2 Diffraction parameters of zirconium alloy

材料	靶	衍射晶面	$2\theta(^{\circ})$
Zr	Fe K α	(213)	147

3 结果及讨论

对 9 组不同工艺的锆合金试样进行残余应力的测试,每种工艺大约测试 15 个点,每个点分别测试沿锆合金包壳管轴向和切向两个方向上的应力。1—9 号喷丸工艺所对应的表面残余应力、最大残余应力及其深度和压应力影响层如表 3 所示。9 种工艺轴向应力梯度和切向应力梯度分别如图 1 和图 2 所示,图中的工艺 1—9 分别对应表 1 喷丸工艺 1—9。

表 3 不同喷丸处理的残余应力
Tab.3 Residual stress of zirconium alloy subject to shot peening treatment

编号	表面残余应力/MPa		最大残余应力及其深度				压应力影响层/ μm	
	轴向	切向	轴向		切向		轴向	切向
			应力值/MPa	深度/ μm	应力值/MPa	深度/ μm		
1	-277	-250	-277	0	-250	0	10	10
2	-341	-256	-381	130	-413	10	350	350
3	-387	-260	-417	60	-476	10	430	430
4	-339	-235	-364	110	-292	110	420	420
5	-305	-225	-518	190	-414	20	460	460
6	-475	-357	-547	20	-425	80	470	470
7	-320	-201	-531	110	-369	60	460	460
8	-372	-273	-574	160	-376	180	460	460
9	-206	-186	-485	180	-435	300	460	460

从表 3 可以看出,1 号工艺对应着未喷丸处理,其表面轴向、切向残余应力分别为-277 MPa 和-250 MPa,最大应力在最外层,其压应力影响层为 10 μm ,包壳管最后需要进行外表面抛光、内表面喷砂操作,所以可能存在残余压应力,使材料表面还存在较薄的压应力层。从图 1 和图 2 还可以看出,未喷丸处理(工艺 1)和其他各种不同喷丸工艺(工艺 2—9)相比,压应力影响层更薄,这在轴向和切向都有此规律。

此外,对比工艺 1—9 号表面残余应力可以发现:在沿锆合金包壳管轴向方向上,2—8 号工艺表面的残余应力都比未喷丸表面的残余应力大,达到了喷丸工艺的效果,只有 9 号工艺对应的表面残余应力比未喷丸的小。从表 1 可以看出,9 号对应的喷丸工艺为铸钢丸(型号 S230),喷丸强度为 0.40 mmA,比其他的喷丸强度大,而表面的残余压应力反而更小。这是由于喷丸强度过大,使试样表面产生了微裂纹,能量被释放掉,所以导致表面的残余压应力比未喷丸的小。在切向方向上这种现象不明显,切向的表面残余

应力约为-250 MPa,最大的为 6 号工艺对应的-357 MPa,最小的仍然是 9 号工艺对应的-186 MPa。

对于工艺 2—9 号的最大残余应力,无论轴向,还是切向,都比未喷丸(工艺 1 号)的大,而且最大的残余应力不在最外层,而是在一定的深度处,这个深度受喷丸强度和弹丸直径的影响,喷丸处理后的压应力影响层明显变厚。对于较低强度的喷丸工艺 2—4 号,喷丸强度分别为 0.18、0.18、0.30 mmN,压应力影响层厚度分别为 350、430、420 μm 。对于强度较高的喷丸工艺 5—9 号(喷丸强度达到 0.15 mmA 以上),压应力影响层厚度达到或超过 460 μm ,几乎达到了喷丸后整个包壳管的壁厚(500 μm 左右),而喷丸之前的壁厚为 570 μm ,可见经喷丸处理后的锆合金壁厚减小 70 μm 左右,会对包壳管的装配带来影响,所以喷丸处理前应该预留出此裕量。

由图 3 可知,在相同喷丸工艺处理下,沿包壳管轴向和切向的残余应力大小有所不同,但数值相差不大且变化趋势大致相同。

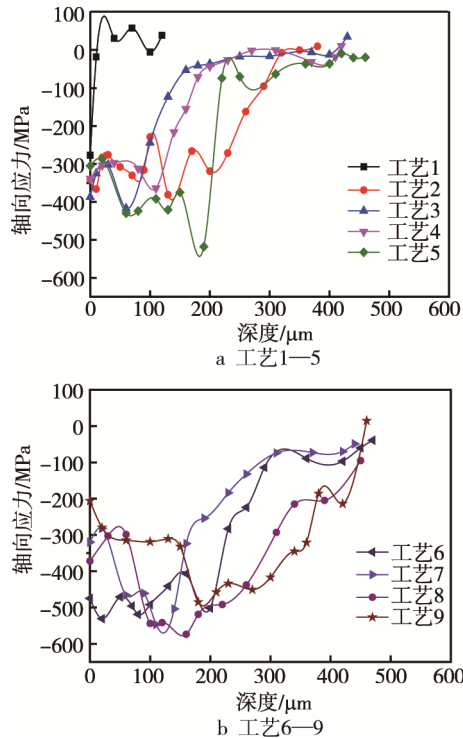


图 1 不同喷丸工艺的轴向残余应力随深度变化

Fig.1 Residual stress fields of the treated cladding tube specimens in axial directions: (a) craft 1—5, (b) craft 6—9

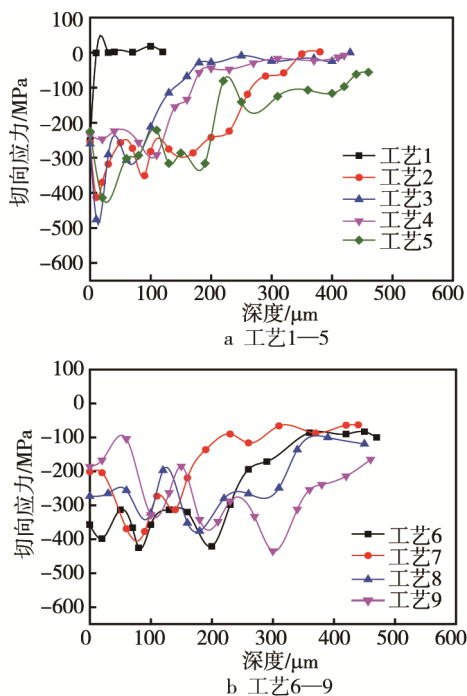


图 2 不同喷丸工艺的切向残余应力随深度变化

Fig.2 Residual stress of treated cladding tube specimens in transversal direction as a function of depth: (a) craft 1—5, (b) craft 6—9

对比工艺 2 和工艺 3, 在相同喷丸强度 (弹丸直径平均值相同) 的条件下, 研究弹丸材料对锆合金喷丸工艺的影响。工艺 2 和工艺 3 的表面压应力和最大压应力相近, 表面轴向压应力分别为 -341 MPa 和

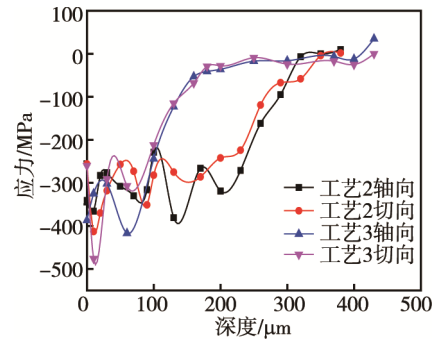


图 3 喷丸工艺 2 和 3 号的轴向及切向残余应力随深度变化对比

Fig.3 Residual stress of specimens subject to 2 and 3# process in both axial and transversal direction as a function of depth

-387 MPa, 表面切向压应力分别为 -256 MPa 和 -260 MPa, 轴向最大残余应力分别为 -381 MPa 和 -417 MPa, 切向最大残余应力分别为 -417 MPa 和 -476 MPa。玻璃丸和不锈钢丸对应的压应力影响层分别为 350 μm 和 430 μm , 后者比前者厚 80 μm 。

对比工艺 5 和工艺 7, 在相同喷丸强度和相同弹丸材料条件下, 研究弹丸直径对锆合金喷丸工艺的影响。在锆合金包壳管轴向方向上, 工艺 5 (直径 0.36 mm) 和工艺 7 (直径 0.51 mm) 的表面残余应力分别为 -305 MPa 和 -320 MPa, 最大残余应力分别为 -518 MPa 和 -531 MPa, 可见相同喷丸强度和相同弹丸材料下, 改变弹丸直径对锆合金表面轴向残余应力和轴向最大残余应力的大小影响不大。工艺 5 和工艺 7 对应的轴向最大应力的深度分别为 190 μm 和 110 μm , 可见直径更小的弹丸对应的轴向最大残余应力位置更深。在包壳管切向方向上, 改变弹丸直径对锆合金表面切向残余应力和切向最大残余应力的大小影响不大, 与轴向的规律相同, 工艺 5 和工艺 7 对应的切向最大应力的深度分别为 20 μm 和 60 μm , 可见直径更大的弹丸对应的切向最大残余应力位置更深, 这个规律与轴向正好相反。

对比工艺 6 和工艺 7, 在相同弹丸直径和相同弹丸材料的条件下, 研究喷丸强度对锆合金喷丸工艺的影响。在锆合金包壳管轴向方向上, 工艺 6 (喷丸强度为 0.20 mmA) 和工艺 7 (喷丸强度为 0.15 mmA) 的表面残余应力分别为 -475 MPa 和 -320 MPa, 最大残余应力分别为 -547 MPa 和 -531 MPa; 在锆合金包壳管切向方向上, 工艺 6 和工艺 7 的表面残余应力分别为 -357 MPa 和 -201 MPa, 最大残余应力分别为 -425 MPa 和 -369 MPa。由此可见, 随着锆合金喷丸强度的增加 (没有出现过喷), 表面两个方向上的残余应力都增加, 两个方向上的最大残余应力也有所增加。

4 结论

1) 未喷丸处理锆合金的表面轴向、切向残余应

力分别为-277 MPa 和-250 MPa, 最大应力在最外层, 压应力影响层为 10 μm 。

2) 9 种不同工艺对锆合金进行处理, 发现 2—8 号喷丸工艺都比未喷丸的表面轴向残余应力大, 只有 9 号工艺对应的表面轴向残余应力比未喷丸的小, 可能是因为喷丸强度过大, 在试样表面形成了微裂纹。所以锆合金包壳管的喷丸强度不宜超过 0.40 mmA。

3) 对于强度较高的喷丸工艺 5—9 号 (喷丸强度达到 0.15 mmA 以上), 锆合金压应力影响层的厚度均达到或超过 460 μm , 几乎达到了喷丸处理后包壳管的整个壁厚。

4) 在相同喷丸强度条件下, 玻璃丸处理的表面压应力和最大压应力与不锈钢丸处理的相近, 不锈钢丸处理的压应力影响层比玻璃丸处理的压应力影响层厚 80 μm 。

5) 弹丸直径对锆合金两个方向上的表面残余应力和最大残余应力的大小影响不大, 直径更小的弹丸对应的轴向最大残余应力位置更深, 直径更大的弹丸对应的切向最大残余应力位置更深。

6) 在没有出现过喷的情况下, 随着喷丸强度的增加, 锆合金试样表面两个方向上的残余应力都增加, 两个方向上的最大残余应力也有所增加。

参考文献:

- [1] 石明华, 张喜燕, 李中奎, 等. 喷丸处理 Zr-4 合金氧化膜组织和氧化动力学研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(7): 1288-1291.
SHI Ming-hua, ZHANG Xi-yan, LI Zhong-kui, et al. Study on Organization and Oxidation Kinetics of Zr-4 Alloy Oxide Film Treated by Shot Peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(7): 1288-1291.
- [2] PARK J Y, KIM H G, YONG H J, et al. Crystal Structure and Grain Size of Zr Oxide Characterized by Synchrotron Radiation Microdiffraction[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 335(3): 433-442.
- [3] DANIEL Z, UWE K. Corrosion of Amorphous and Nanocrystalline Zr-based Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375-377: 53-59.
- [4] XU Jian, BAI Xin-de, HE Fei, et al. Influence of Ar Ion Bombardment on the Uniform Corrosion Resistance of Laser-surface-melted Zircaloy-4 [J]. Journal of Nuclear Materials, 1999, 265(3): 240-244.
- [5] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 244-246.
GAO Yu-kui. Theory and Application of Surface Integrity [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 244- 246.
- [6] 张强, 张喜燕, 李聪, 等. Zr-4 合金的表面晶粒细化研究[J]. 核动力工程, 2009, 30(1): 64-67.
ZHANG Qiang, ZHANG Xi-yan, LI Cong, et al. Study on Surface Grain Refinement of Zircaloy-4[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(1): 64-67.
- [7] GEBERT A, CONCUSTELL A, GREER A L, et al. Effect of Shot-peening on the Corrosion Resistance of a Zr-based Bulk Metallic Glass[J]. Scripta Materialia, 2010, 62(9): 635-638.
- [8] MORDYUK B N, KARASEVSKAYA O P, PROKO-PENKO G I. Structurally Induced Enhancement in Corrosion Resistance of Zr-2.5%Nb Alloy in Saline Solution by Applying Ultrasonic Impact Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559: 453- 461.
- [9] KIM W, JUNG K S, CHOI B H, et al. Corrosion Behavior of Nitrogen-implanted Zircaloy[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76-77(1-3): 595-599.
- [10] LEE S J, KWON H S, KIM W, et al. Effects of Compositional and Structural Change on the Corrosion Behaviour of Nitrogen Implanted Zircaloy-4[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 263(1): 23-31.
- [11] 童慎修. AFA 3G 核燃料棒表面陶瓷化处理技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
TONG Shen-xiu. Study on Ceramic Surface Coating Process of AFA 3G Fuel Rod[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [12] ZHANG X T, ZHANG R H, HU S M, et al. On Structural and High Temperature Electrochemical Properties of ZrO₂ Thin Film Coating on Zr Metal Produced by Carbonate Melt[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(14): 5632-5640.
- [13] 高玉魁, 姜涛. 喷丸强化对 DZ4 定向凝固高温合金高温旋转弯曲疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(6): 35-38.
GAO Yu-kui, JIANG Tao. Influence of Shot Peening on High Temperature Fatigue Property of DZ4 Directionally Solidified Superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(6): 35-38.
- [14] MAJZOBI G H, AZADIKHAH K, NEMATI J. The Effects of Deep Rolling and Shot Peening on Fretting Fatigue Resistance of Aluminum-7075-T6[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 516(1-2): 235-247.
- [15] 张亦良, 张振海, 刘金艳. 不同喷丸工艺下残余应力沿深度的分布规律[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(12): 1585-1590.
ZHANG Yi-liang, ZHANG Zhen-hai, LIU Jin-yan. Distribution of Residual Stress along Depth under Different Shot Peening Technologies[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(12): 1585-1590.
- [16] ZHAO Chun-mei, GAO Yu-kui, GUO Jing. Investigation on Residual Stress Induced by Shot Peening[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(3): 1340-1346.
- [17] 王欣, 李四清, 孟震威, 等. 喷丸表面覆盖率对 TC4 钛合金表面完整性的影响[J]. 航空材料学报, 2013, 33(3): 34-38.
WANG Xin, LI Si-qing, MENG Zhen-wei, et al. Influence of Shot-peening Coverage on Surface Integrity of TC4 Titanium Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(3): 34-38.