

干、湿喷丸强化对 TC17 钛合金喷丸强化层的影响

徐松超¹, 盖鹏涛², 付雪松¹, 陈国清¹, 周文龙^{1,3}

(1.大连理工大学 材料学院 凝固控制与数字化重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2.中国航空制造技术研究院, 北京 100024; 3.大连理工(营口)新材料工程中心有限公司, 辽宁 营口 115004)

摘要: **目的** 研究干喷丸与湿喷丸强化对 TC17 钛合金残余应力场的影响。**方法** 采用干、湿喷丸分别对 TC17 钛合金表面进行喷丸强化处理, 利用 X 射线衍射仪、EBSD 以及硬度仪, 分析喷丸强度对材料表层残余应力、显微组织以及硬度的影响。**结果** 喷丸强度为 0.20 mmN 时, 干喷丸最大残余应力在距表面 30 μm 处, 湿喷丸最大残余应力在表面; 喷丸强度为 0.30 mmN 时, 干、湿喷丸引入的残余应力场层深分别为 200、90 μm , 干喷丸引入的残余应力层更深; 喷丸强度为 0.40 mmN 时, 干喷丸最大残余应力为-1191.5 MPa, 而湿喷丸最大残余应力为-943.9 MPa, 干喷丸引入的最大残余应力比湿喷丸的更大; 当喷丸强度增加到 0.50 mmN 时, 干、湿喷丸两种强化工艺均出现过喷丸现象, 近表层的残余应力发生松弛, 同时硬度值降低。通过 EBSD 研究发现, 随着喷丸强度的增加, TC17 钛合金表层组织中 α 相的小角度晶界比例先增加后减少, 当喷丸强度为 0.50 mmN 时, α 相内小角度晶界比例减少, 大角度晶界比例增加。**结论** 当喷丸强度较小时, 干喷丸强化引入的最大残余应力在次表面, 而湿喷丸引入的在表面。当喷丸强度较大时, 干、湿喷丸强化工艺均出现过喷丸现象, 此时大量小角度晶界转变为大角度晶界, 钛合金表层硬度场有所减小, 残余应力场发生应力松弛。

关键词: TC17 钛合金; 喷丸强化; 残余应力; EBSD; 小角度晶界; 大角度晶界

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)09-0091-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.008

Influences of Dry and Wet Shot Peening Process on Strengthening Layer of TC17 Titanium Alloy

XU Song-chao¹, GAI Peng-tao², FU Xue-song¹, CHEN Guo-qing¹, ZHOU Wen-long^{1,3}

(1.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2.AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China; 3.Dalian Technology (Yingkou) Advanced Material Engineering Center Company Limited, Yingkou 115004, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the effect of dry shot peening and wet shot peening on the residual stress field of TC17

收稿日期: 2020-10-28; 修订日期: 2020-12-30

Received: 2020-10-28; Revised: 2020-12-30

基金项目: 航空科学基金(201936025001); 中央高校基本科研业务费专项(DUT19LAB16); 辽宁省“兴辽英才计划”项目资助(XLYC1902084)

Fund: Supported by the Aeronautical Science Foundation of China (201936025001), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT19LAB16) and the Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC1902084)

作者简介: 徐松超(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为钛合金喷丸强化。

Biography: XU Song-chao (1996—), Male, Master, Research focus: shot peening of titanium alloy.

通讯作者: 周文龙(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为喷丸强化与微动疲劳。

Corresponding author: ZHOU Wen-long (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: shot peening and fretting fatigue.

引文格式: 徐松超, 盖鹏涛, 付雪松, 等. 干、湿喷丸强化对 TC17 钛合金喷丸强化层的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 91-98.

XU Song-chao, GAI Peng-tao, FU Xue-song, et al. Influences of dry and wet shot peening process on strengthening layer of TC17 titanium Alloy [J]. Surface technology, 2021, 50(9): 91-98.

titanium alloy. The surface of TC17 titanium alloys was successively strengthened by dry and wet shot peening of different strengths. Using X-ray diffractometer, EBSD and hardness tester, the author analyzed the effect of the two processes on the residual stress field, microstructure and hardness field of titanium alloy. When the shot peening strength was 0.20 mmN, the maximum residual stress introduced by dry shot peening in TC17 titanium alloy was 30 μm from the surface, while the maximum residual stress introduced by wet shot peening in TC17 titanium alloy was on the surface. When the shot peening strength was 0.30 mmN, the depth of the residual stress field induced by dry and wet shot peening was respectively 200 μm and 90 μm . The residual stress introduced by dry shot peening was deeper than that of wet shot peening. When the shot peening strength was 0.40 mmN, the maximum residual stress of dry shot peening was -1191.5 MPa, while the maximum residual stress of wet shot peening was -943.9 MPa. The maximum residual stress introduced by dry shot peening was greater than that of wet shot peening. When the shot peening strength was increased to 0.50 mmN, both dry and wet shot peening processes had experienced overshoot peening. The residual stress near the surface layer relaxed and the hardness value decreased. Through EBSD research, it was found that as the shot peening strength increased, the low-angle grain boundary ratio of α phase in the surface layer of TC17 titanium alloy increased first and then decreased. When the shot peening strength was 0.50 mmN, the proportion of low-angle grain boundaries in α phase decreased, and the proportion of high-angle grain boundaries increased. Results indicate that when the shot peening strength is low, the maximum residual stress introduced by dry shot peening is on the subsurface, while that introduced by wet shot peening is on the surface. When the shot peening strength is high, both the dry and wet shot peening processes have experienced overshoot peening. At this time, a large number of low-angle boundaries are transformed into high-angle boundaries, the hardness field of the titanium alloy surface layer is reduced, and the residual stress field undergoes stress relaxation.

KEY WORDS: TC17 titanium alloy; shot peening; residual stress; EBSD; low-angle boundary; high-angle boundary

TC17 具有高强度、高断裂韧性和高淬透性, 被称为“三高钛合金”, 被广泛应用于制造航空工业中要求高承载能力的风扇盘、压气机盘、直升机桨毂等零部件^[1-3]。但钛合金缺口敏感性高, 而高强度钛合金缺口敏感性则更高, 由此导致的疲劳断裂成为影响钛合金航空结构件安全服役的重要隐患之一^[4]。疲劳裂纹源通常位于材料表面, 人们更青睐于通过改善材料表面完整性来提高材料的疲劳性能^[5-9], 其中喷丸强化因为工艺简单、强化效果显著、不受工件形状和位置限制等优点, 被广泛应用于提高零部件疲劳寿命。

近年来, 国内外学者大量研究了喷丸强化对钛合金表面完整性和疲劳寿命的影响, 促进了多种钛合金喷丸强化工艺在机械和航空领域的工程应用。Hitoshi Soyama 等^[10]研究发现, 喷丸强化使金属粉末直接激光烧结 (DMLS) 和电子束熔炼 (EBM) 工艺成形 TC4 钛合金的疲劳寿命分别提升 1.92 倍和 1.95 倍。李世平等^[11]利用喷丸强化, 使 TC21 钛合金的旋转弯曲疲劳寿命相较基材寿命提升了 4.7 倍。喷丸强化在 TC21 钛合金表层引入了 370 μm 厚的残余压应力场, 最大残余压应力为 -903.5 MPa, 出现在距表面 130 μm 处, 同时喷丸强化后, 靶材表面硬度 (6.7 GPa) 相较基体硬度 (3.2 GPa) 提升了 109%^[12]。田唐永等^[13]采用湿喷丸强化方法使 TC4 靶材表面的显微硬度相较基体提升了 17.4%, 并在靶材表面产生了 -750 MPa 的最大残余压应力。经拉-拉疲劳试验后发现, 喷丸

强化后, TC4 钛合金的疲劳寿命比基体高近 10 倍。杨启等^[14]研究了喷丸强化引起的 TC4 钛合金靶材表面微凸体、表层加工硬化、表层残余压应力场的特征, 在微动疲劳试验中, 喷丸强化具有降低裂纹数量、减少裂纹形式、抑制疲劳裂纹萌生的作用。针对 TC4 钛合金的研究表明^[15], 干喷丸强化使得表层等轴组织向纤维组织转变; 湿喷丸强化在靶材表层产生了约 10 μm 的细晶强化和 10~160 μm 深的位错强化。国内学者^[16-18]大量的研究成果表明: 喷丸强化可以有效地提高钛合金的疲劳寿命, 主要原因是喷丸强化过程中, 材料表层产生加工硬化效应和引入残余压应力场, 有效抑制了疲劳裂纹的萌生和扩展。但是喷丸强度需要控制在合理的范围, 喷丸强度不够时, 加工硬化和残余应力不足, 对疲劳寿命没有显著的改善效果; 而喷丸强度过大时, 表面硬化层可能被去掉, 且表面粗糙度过大, 反而可能降低材料的疲劳寿命。这种喷丸强化过度的情况通常称作“过喷丸现象”, 很多材料都存在“过喷丸”问题, 但鲜有学者对过喷丸的机理开展深入研究。

本文以 TC17 钛合金为研究对象, 采用干、湿喷丸两种工艺方法, 开展不同喷丸工艺对靶材表层硬度和残余应力场影响的研究, 并采用 EBSD 探究材料“过喷丸现象”出现的微观机制, 深入探讨喷丸工艺对 TC17 钛合金材料性能的影响规律, 以期对喷丸强化工艺在钛合金表面改性方面的应用实践提供技术支持。

1 试验

1.1 材料

试验材料为 TC17 钛合金，主要成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr（质量分数），试样尺寸为 60 mm×30 mm×5 mm。原始试样在扫描电镜下的显微组织如图 1 所示，试验用的 TC17 钛合金为典型 α+β 的网篮组织。

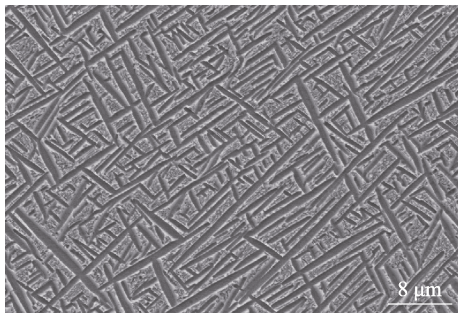


图 1 TC17 钛合金的显微组织
Fig.1 Microstructure of TC17 titanium alloy

1.2 喷丸强化试验

采用 MP15000 数控喷丸机对 TC17 钛合金进行干喷丸强化。喷丸介质采用 B60 陶瓷丸。具体工艺参数如表 1 所示。采用 JY-120WB 液体喷丸机对 TC17 钛合金进行湿喷丸强化。喷丸介质采用水和 B60 陶瓷丸。具体工艺如表 2 所示。

表 1 干喷丸工艺参数
Tab.1 Process parameters of dry shot peening

Simples	Coverage/%	Shot peening strength/mmN
G1	200	0.21
G2	200	0.30
G3	200	0.40
G4	200	0.50

表 2 湿喷丸工艺参数
Tab.2 Process parameters of wet shot peening

Simples	Grinding liquid ratio/%	Coverage/%	Shot peening strength/mmN
S1	10	200	0.21
S2	20	200	0.30
S3	20	200	0.40
S4	20	200	0.50

1.3 微观结构表征与性能测试

显微硬度采用 HV-10008 华银显微硬度计进行测试。采用 Empyrean03030502 X 射线衍射仪进行残余应力的测试。测试点位为试样的中心点。具体测试参数：管电压 45 kV，管电流 40 mA，Cu 靶，衍射晶面

（213），扫描范围 137°~143°，同倾法测量。采用化学腐蚀法对样品进行剥层，测定残余应力场沿深度方向的分布。腐蚀试剂配比： $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:2:47$ 。

EBSD 采用 JSM-7001F 场发射扫描电镜进行数据采集。具体试验参数为：加速电压 20 kV，扫描步长 0.2 μm/s，工作距离 16 mm。数据采用 TSL OIM Analysis 软件进行后处理分析。

旋转弯曲疲劳试验在 QBWP-6000J-NO.1 简支梁旋转弯曲疲劳试验机上进行，将应力定为 655 MPa。特定喷丸强度试样分别进行 5 组疲劳试验，并记录其疲劳寿命。

2 结果及分析

2.1 喷丸工艺对试样残余应力场的影响

钛合金经喷丸强化后，在表层所引入的残余压应力场在疲劳过程中可以有效地抵消部分外加载荷，降低有效拉应力，从而延缓裂纹萌生和早期扩展，是喷丸强化中重要的强化因素^[19-21]。因此，喷丸强化处理工艺对钛合金表层残余应力分布状态的影响，常常是喷丸工艺研究重点关注的问题。图 2 为 TC17 钛合金经干、湿喷丸工艺处理后表层的残余应力场分布图。如图 2a 所示，干喷丸强化工艺中，残余应力沿深度方向分布曲线呈现典型的对号形式。不同喷丸工艺强化后的试样，残余应力层深度为 200~250 μm，表面残余应力为-690~-760 MPa，最大残余应力为-800~-1200 MPa，在距表面 30~35 μm 处。表面残余应力随着喷丸强度的增大而有所增加，且分布层深也随之增大。当喷丸强度由 0.40 mmN 增大到 0.50 mmN 时，最大残余应力由-1191.5 MPa 降低到-1062.6 MPa，近表层残余压应力发生松弛，最大残余应力值降低。

由图 2b 所示湿喷丸残余应力场中，S1 并未出现喷丸强化后典型的“对号”形曲线，其最大残余压应力出现在表层。原因是喷丸强度较小时，钛合金表面的变形程度相对较小^[22]。对比 S1—S3 可以看出，S1 的最大残余应力在靶材表面为-724.7 MPa，S2 和 S3 的最大残余应力分别出现在距表面 16、25 μm 处，分别为-763.6、-943.9 MPa。说明随着喷丸强度的增加，最大残余压应力也增大，并向内部移动。喷丸强度由 0.40 mmN 增加到 0.50 mmN，S4 获得了较深的残余应力层，但最大残余压应力由-943.9 MPa 降低到-886.1 MPa，过高的喷丸强度反而使近表层残余应力降低，残余应力层发生了残余应力松弛。

喷丸强化中，弹丸冲击材料表面使得表层产生的塑性变形，其实质上属于循环塑性应变^[16]。在循环应变过程中，凡是材料的硬度升高，其任意晶面的 X 射线衍射谱线半高宽（β）变宽，反之则变窄^[23]。对不同喷丸工艺处理后的 TC17 钛合金，统计其表层

(213)晶面衍射谱线半高宽(β)随层深的变化(图3)发现,经干、湿喷丸强化的钛合金表层均产生了强烈的加工硬化倾向。图3a和图3b显示,当喷丸强度由0.40 mmN增大到0.50 mmN时,干、湿喷丸钛

合金表层的(213)晶面衍射谱线半高宽均有明显的降低,表明过高的喷丸强度导致靶材表层发生加工软化倾向。因此,喷丸强度过大会因表层加工软化而引起近表层喷丸层的应力松弛。

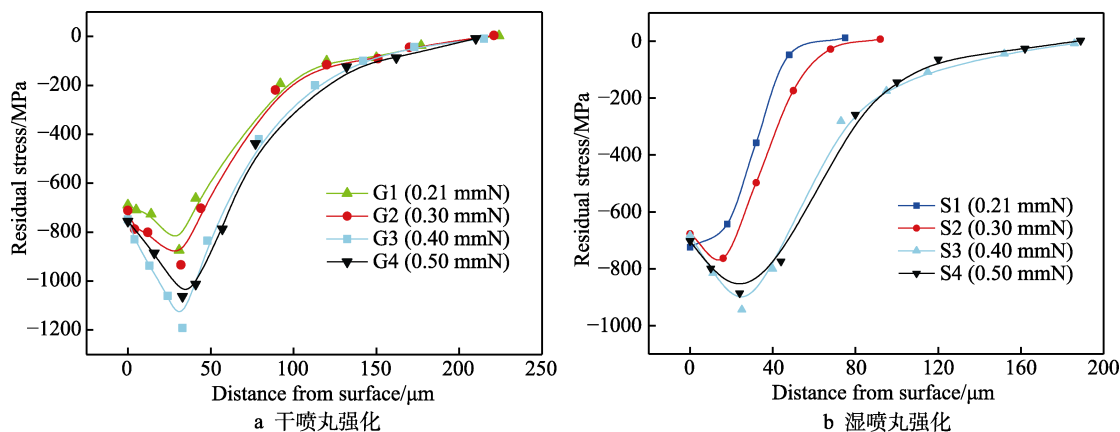


图2 不同喷丸工艺强化后对残余应力场的影响

Fig.2 Effect of different shot peening processes on the residual stress field

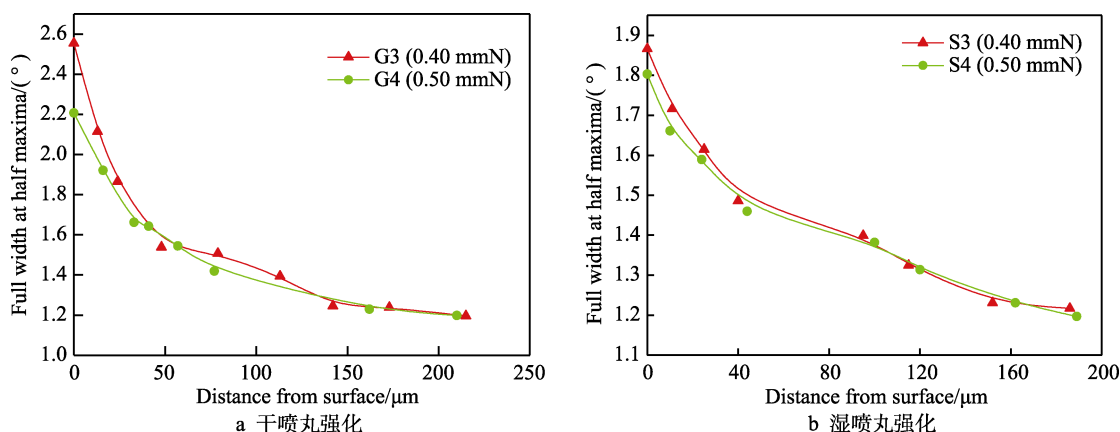


图3 不同喷丸工艺强化后X射线衍射谱线半高宽-深度曲线关系

Fig.3 FWHM-depth curve after strengthened by different shot peening processes

2.2 喷丸强度对试样显微硬度的影响

图4为干、湿喷丸强化工艺对钛合金表层显微硬

度的影响。干、湿喷丸强化处理均使钛合金表层发生加工硬化,硬度明显增大。从表层向内部深度增加,硬度逐渐降低,最终趋近于基体硬度($\sim 390\text{HV}$)。干、

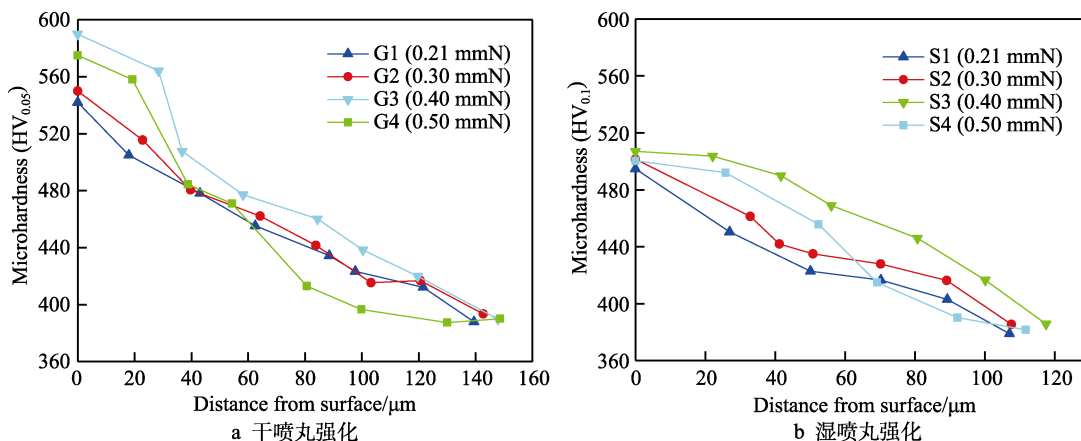


图4 不同喷丸工艺对显微硬度场的影响

Fig.4 Effect of different shot peening processes on the microhardness field

湿喷丸强化处理后,钛合金靶材硬度层深度分别为 140~150 μm 和 100~120 μm ,表面硬度分别为 540~590HV 和 490~510HV。随着喷丸强度的增大,加工硬化程度随之增加。喷丸强度为 0.21、0.30 mmN 时,干喷丸靶材表面硬度分别达到 542、550HV,较基体硬度(390HV)分别提升了 38.9%和 41.%;湿喷丸靶材表面硬度分别达到 494.8、501.5HV,较基体硬度值分别提升了 26.9%和 28.6%。当喷丸强度达到 0.40 mmN 时,干、湿喷丸后,靶材表面硬度均达到最大值,分别为 590、507HV,硬度分别提升了 51.3%和 30.0%。但喷丸强度增加到 0.50 mmN 时,干喷丸强化靶材表面硬度却降低到 575HV,湿喷丸靶材表面硬度由 507HV 降低到 500HV。分析残余应力场与硬度的试验结果,当喷丸强度达到 0.50 mmN 时,干、湿喷丸强化处理的钛合金表层均出现了应力松弛及加工软化现象,表明喷丸处理出现了“过喷丸”现象。

与相同喷丸强度的干喷丸强化相比,湿喷丸强化后,钛合金的残余应力场深度与显微硬度场深度都相对较小,且表面残余应力值、最大残余应力值与表面硬度值也较小。这是因为湿喷丸工艺中喷丸介质由水以及弹丸组成,会在接触到钛合金表面时形成一层液膜,一方面起到了润滑的作用,另一方面对于弹丸冲击靶材表面起到了一定的缓冲作用^[13,24]。

2.3 喷丸强化处理后试样的 EBSD 分析

为了研究喷丸工艺中产生过喷丸现象的机理,对经不同喷丸工艺处理的靶材表层进行了 EBSD 分析。图 5 为干、湿喷丸工艺后靶材表层微观组织。每组图片中左图显示 α 相和 β 相,右图显示出晶界和相界。本文将统计 90%小角度晶界分布层的厚度定义为形变层深度,此深度相比硬化层深度较小,是由于晶体缺陷、位错在晶界图中无法体现,以小角度晶界为参照定义层厚,但形变层深度与硬化层深度变化趋势和整体趋势一致。由图 5a 可以看出,原始板材表面由于经过机加工处理,在表层残留有约 5 μm 厚的形变层,单位面积内小角度晶界所占比例为 7%。图 5b、图 5d、图 5f 和图 5c、图 5e、图 5g 可见,随着喷丸强度的增加,喷丸处理后的形变层厚度均增加,干喷丸强化的形变层厚度由 24 μm 增加到 35 μm ,湿喷丸强化的形变层厚度由 15 μm 增加到 31 μm 。单位面积内小角度晶界所占比例也随喷丸强度的增加而增加,干喷丸强化工艺的喷丸强度为 0.20、0.30、0.40 mmN 时,试样表层的小角度晶界所占比例分别为 12.6%、19.5%、23.0%,湿喷丸强化试样表层的小角度晶界所占比例分别为 11.6%、14.4%和 18.4%。此外,在近表层还发生了小角度晶界向大角度晶界转变的现象,片层状 α 相被横向贯穿的大角度晶界所割裂(如图 5 中局部放大图所示)。图 5h 和图 5i 显示,当喷丸强度增加到 0.50 mmN 时,干喷丸靶材表层单位面积内

的小角度晶界所占比例由喷丸强度为 0.40 mmN 时的 23.0%减少到 20.3%,大角度晶界占比由 0.40 mmN 时的 77.0%增长到 79.7%;湿喷丸靶材表层单位面积内的小角度晶界占比虽然从喷丸强度为 0.40 mmN 时的 18.6%增大到 0.50 mmN 时的 20.0%,但其增长率(8.7%)却相比 S1→S2(24.1%)与 S2→S3(27.8%)有了明显的降低。由此说明,当喷丸强度从 0.40 mmN 增大到 0.50 mmN 时,大角度晶界的增长速率明显增加。

在经过机加工以及喷丸强化处理后的靶材表面所产生的小角度晶界,是靶材表面塑性形变及位错在 β 相及 α 相片层内增殖、聚集和交互反应的结果。小角度晶界绝大多数都分布在 α 相内,这是由于:钛合金中 α 相为密排六方结构,层错能低。在位错运动受到阻碍时,全位错更易于分解为两个不全位错+层错的组态,难以交滑移,位错组态的运动性差。而 β 相为体心立方结构,具有较高的层错能。当靶材表层产生塑性形变时,全位错不易分解,易于通过交滑移继续运动,小角度晶界更易在 α 相内形成。靶材表层 α 相内的小角度晶界通过不断吸纳位错,使得取向差进一步增大,逐渐转变成大角度晶界^[25]。

图 6 为干、湿喷丸工艺强化后钛合金表层中 α 相内取向差分布图。如图 6a 所示,扣除机加工残留在钛合金表层的小角度晶界影响,初始态(G_0)相界多为大角度晶界($\geq 15^\circ$),并且在 60° 、 90° 附近存在明显的峰值,这与文献[26]中提出的在同一 β 相中所析出的片状 α 相出现的取向差一致。比较图 6a 和图 6b 中 G_1 — G_3 与 S_1 — S_3 可以看出,随着喷丸强度的增加,干、湿喷丸强化处理后,钛合金表层的小角度晶界所占比例均有明显增加。但当喷丸强度由 0.40 mmN 提高到 0.50 mmN 时,干喷丸试样 α 相中的小角度晶界所占比例由 45%降低到 35%,湿喷丸试样 α 相中的小角度晶界所占比例由 42%降低到 30%。由此表明,喷丸强度为 0.21~0.40 mmN 时,随着喷丸强度的增加,位错增殖、缠结、交互反应产生越来越多的小角度晶界,并且在近表层形变量较大区域发生少量的小角度晶界转变为大角度晶界。当喷丸强度由 0.40 mmN 增大到 0.50 mmN 时,由于喷丸介质对于靶材表面冲击能量增大,靶材表层塑性形变程度加剧,使得大量的小角度晶界吸纳位错转变成大角度晶界。

综合残余应力场、硬度及 EBSD 分析表明,过高的喷丸强度(0.50 mmN)并不能使 TC17 钛合金表层获得更高的残余应力场以及硬度,反而会发生过喷丸现象。过喷丸正是由于产生加工软化所导致的应力松弛。从 EBSD 分析可以看出,当喷丸强度为 0.50 mmN 时,发生了大量的小角度晶界转变为大角度晶界,使得晶内位错密度降低而呈现的软化作用增强,导致表层硬度和残余压应力随着喷丸强度的增加而下降。

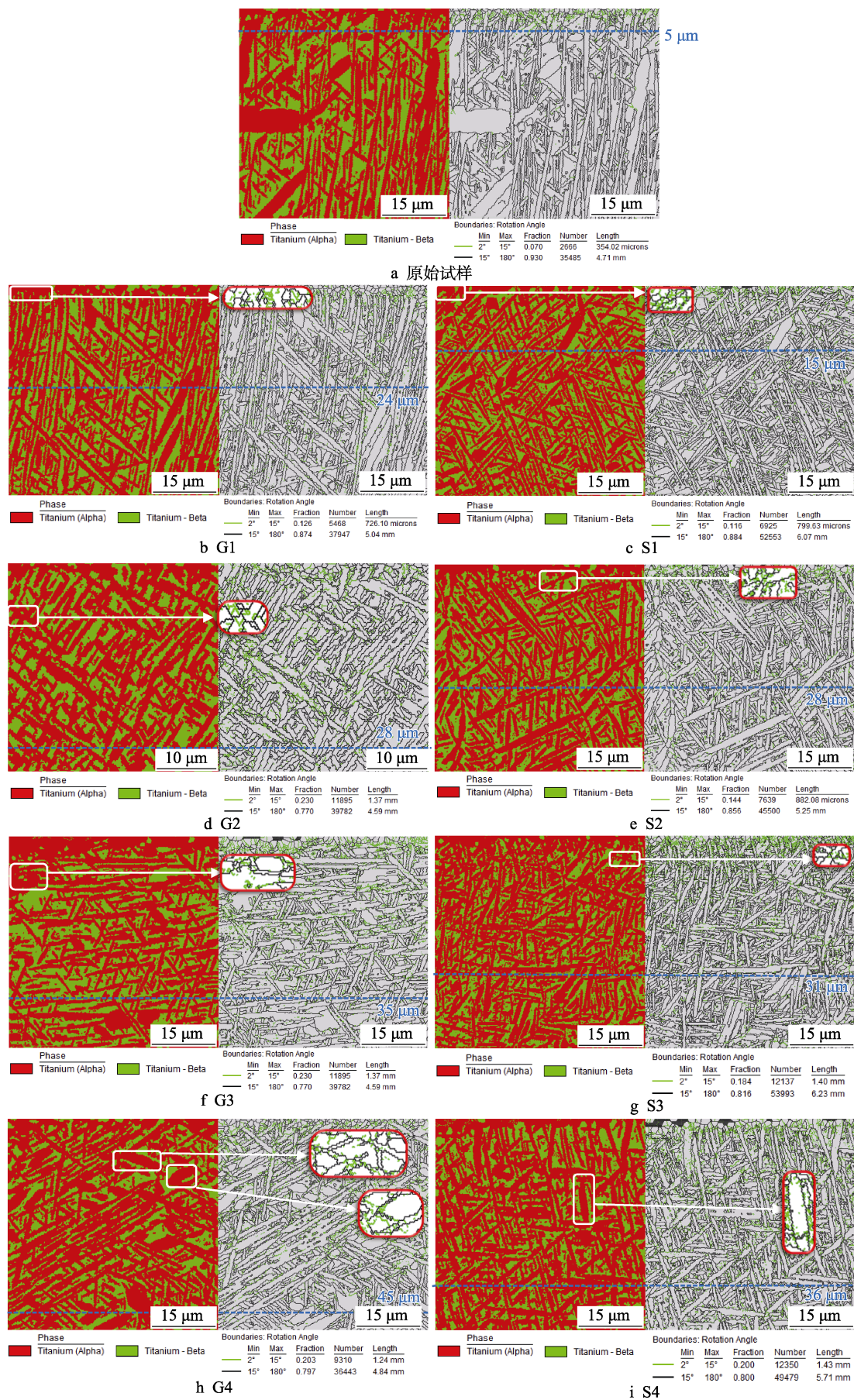


图5 不同喷丸工艺对TC17表层微观组织的影响

Fig.5 Effect of different shot peening processes on the surface microstructure of TC17

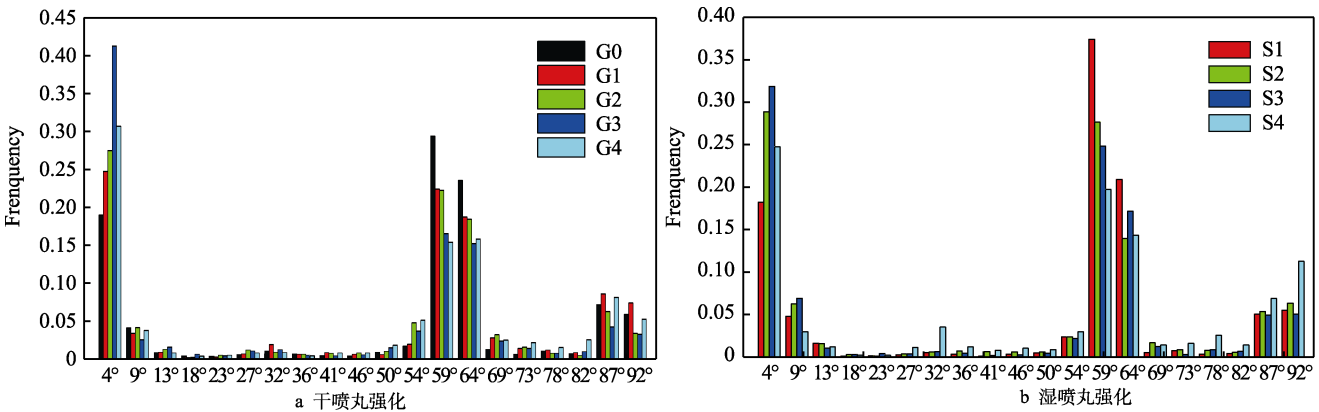


图 6 不同喷丸强化后 α 相内取向差分布图
Fig.6 Distribution of misorientation in α phase after strengthened by different shot peening processes

2.4 喷丸强化处理后试样的疲劳性能

表 3 为经干、湿喷丸强化后 TC17 钛合金的旋转弯曲疲劳寿命。由表 3 可见，喷丸强度由 0.40 mmN 增大到 0.50 mmN 时，干喷丸强化后的 TC17 钛合金平均疲劳寿命由 1 156 195 次提升到 1 895 634 次，疲劳寿命提高了 63.9%；湿喷丸强化后的 TC17 钛合金平均疲劳寿命由 3 843 686 次提高到 4 521 216 次，疲劳寿命提高了 17.6%。对比相同喷丸强度下干、湿喷丸强化后 TC17 钛合金的疲劳寿命，发现湿喷丸疲劳

寿命比干喷丸高，这是由于经湿喷丸强化后，表面粗糙化程度比干喷丸小，表面应力集中效应低。综合考虑残余应力场、硬度以及 EBSD 分析，虽然喷丸强度由 0.40 mmN 增大到 0.50 mmN 时出现过喷丸现象，但过喷丸现象并不严重，残余应力场和硬度降低程度仍比较小，且此时大角度晶界数量增加，对于裂纹萌生与扩展起到了阻碍作用^[16-17]，因此疲劳寿命并没有表现下降。

3 结论

- 1) 在 TC17 钛合金喷丸强化处理过程中，当喷丸强度为 0.21 mmN 时，干喷丸强化最大残余应力出现在次表层，湿喷丸强化最大残余应力出现在表层。干、湿喷丸强度为 0.40 mmN 时，最大残余应力分别出现在沿深度方向距干、湿喷丸面 33、25 μm 处，分别为-1191.5、-943.9 MPa。
- 2) 当喷丸强度为 0.40 mmN 时，经干、湿喷丸强化处理后的 TC17 钛合金表面均可获得较高的硬度（干喷丸 590HV，湿喷丸 507HV），较基体硬度（390HV）分别提升了 51.3%和 30.0%。
- 3) 当喷丸强度为 0.50 mmN 时，喷丸强度过高，使靶材表层发生剧烈塑性形变，表层组织中 α 相出现大量小角度晶界转变为大角度晶界，靶材表层发生加工软化而应力松弛，出现过喷丸现象。
- 4) 对于 TC17 钛合金，当出现的过喷丸现象不严重时，残余应力场和硬度降低程度仍比较小，喷丸强化后的疲劳寿命并不降低。

参考文献：

[1] TAN Liang, YAO Chang-feng, ZHANG Ding-hua, et al. Evolution of surface integrity and fatigue properties after milling, polishing, and shot peening of TC17 alloy blades[J]. International journal of fatigue, 2020, 136: 105630.
[2] 王宝林. 钛合金 TC17 力学性能及其切削加工特性研究

表 3 喷丸强化后 TC17 钛合金旋弯疲劳寿命			
Tab.3 Rotating bending fatigue life of TC17 titanium alloy after strengthened by shot peening			
Sample number	Fatigue life (cycle)	Average fatigue life (cycle)	Fluctuation ratio
G3-1	112 190	1 156 195	1.08
G3-2	3 469 637		
G3-3	247 467		
G3-4	1 439 593		
G3-5	512 086		
G4-1	233 252	1 895 436	0.96
G4-2	862 173		
G4-3	3 523 244		
G4-4	4 595 038		
G4-5	263 474		
S3-1	6 871 423	3 843 686	0.83
S3-2	1 014 645		
S3-3	8 384 208		
S3-4	2 282 994		
S3-5	665 160		
S4-1	10 000 000	4 521 216	0.78
S4-2	1 430 962		
S4-3	7 222 763		
S4-4	776 741		
S4-5	3 175 613		

- [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- WANG Bao-lin. Study on the mechanical properties of titanium alloy TC17 and characteristics in machining[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [3] 刘培, 王振玉, 李晓伟, 等. TC4 钛合金表面 Cr_2AlC 涂层的制备及高温氧化行为[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 16-22.
- LIU Pei, WANG Zhen-yu, LI Xiao-wei, et al. Preparation of Cr_2AlC coatings on TC4 titanium alloy and its high-temperature oxidation behaviour[J]. Surface technology, 2016, 45(11): 16-22.
- [4] 蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 5-9, 52.
- JIANG Cong-ying, HUANG Lu, WANG Jing-chen, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 5-9, 52.
- [5] 姚兰, 华程, 李国庆. 陶瓷喷丸强化对 TC4-DT 钛合金疲劳性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(5): 53-56.
- YAO Lan, HUA Cheng, LI Guo-qing. Effect of ceramic shot peening on fatigue properties of TC4-DT titanium alloy[J]. Materials protection, 2020, 53(5): 53-56.
- [6] 赵慧生. 湿法喷丸 TC4 钛合金的疲劳行为及强化机理[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- ZHAO Hui-sheng. Fatigue behavior and strengthening mechanism of TC4 titanium alloy by wet shot peening[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [7] 张少平, 谈军, 谭靓, 等. 喷丸强化对 TC17 钛合金表面完整性及疲劳寿命的影响[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 89-94.
- ZHANG Shao-ping, TAN Jun, TAN Liang, et al. Effect of shot peening on surface integrity and fatigue life of TC17 alloy[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2018, 61(5): 89-94.
- [8] 何杉, 杨清, 闵祥禄. 喷丸强化对 TC17 钛合金疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(6): 159-161.
- HE Shan, YANG Qing, MIN Xiang-lu. Influence of shot peening on fatigue property of TC17 titanium alloy[J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(6): 159-161.
- [9] 罗学昆, 艾莹珺, 王欣, 等. 喷丸强化对 TB6 钛合金疲劳性能和表面完整性的影响[J]. 钛工业进展, 2017, 34(4): 33-38.
- LUO Xue-kun, AI Ying-jun, WANG Xin, et al. Effect of shot peening on fatigue property and surface integrity of TB6 titanium alloy[J]. Titanium industry progress, 2017, 34(4): 33-38.
- [10] SOYAMA H, TAKEO F. Effect of various peening methods on the fatigue properties of titanium alloy Ti6Al4V manufactured by direct metal laser sintering and electron beam melting[J]. Materials, 2020, 13(10): 2216.
- [11] 李世平, 刘道新, 李瑞鸿, 等. 喷丸强化与表面完整性对 TC21 钛合金疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(12): 1921-1926.
- LI Shi-ping, LIU Dao-xin, LI Rui-hong, et al. Influence of shot peening and surface integrity on fatigue properties of TC21 titanium alloy[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2012, 31(12): 1921-1926.
- [12] 宋颖刚, 高玉魁, 陆峰, 等. TC21 钛合金喷丸强化层微观组织结构及性能变化[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 40-44.
- SONG Ying-gang, GAO Yu-kui, LU Feng, et al. Evolution of microstructure and properties of surface layer after shot peening of TC21 titanium alloy[J]. Journal of aeronautical materials, 2010, 30(2): 40-44.
- [13] 田唐永. TC4 钛合金喷丸强化组织与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- TIAN Tang-yong. Microstructures and properties of TC4 titanium alloy treated by shot peening[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [14] 杨启. TC4 钛合金棒结构的微动疲劳损伤及喷丸防护机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- YANG Qi. Investigation of fretting fatigue damage and shot-peening palliative mechanisms of TC4 alloy dovetail joints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [15] 阴晓宁. TC4 钛合金喷丸强化表面完整性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- YIN Xiao-ning. Surface integrity study on shot peened Ti-6Al-4V titanium alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [16] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.
- WANG Ren-zhi. Overview on the shot peening principle and its strengthening mechanisms for metallic materials[J]. China surface engineering, 2012, 25(6): 1-9.
- [17] 李康, 付雪松, 李志强, 等. 湿喷丸强化对 TC4 合金疲劳断裂机制的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(10): 3068-3072.
- LI Kang, FU Xue-song, LI Zhi-qiang, et al. Fatigue fracture mechanism of Ti-6Al-4V alloy strengthened by wet peening treatment[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(10): 3068-3072.
- [18] 王欣, 许春玲, 李臻熙, 等. 喷丸强度和表面覆盖率对 TC4 钛合金室温疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(9): 138-143.
- WANG Xin, XU Chun-ling, LI Zhen-xi, et al. Effect of shot peening intensity and surface coverage on room-temperature fatigue property of TC4 titanium alloy[J]. Journal of materials engineering, 2020, 48(9): 138-143.
- [19] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴, 等. 喷丸强化对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(8): 1349-1353, 1358.
- XIA Ming-li, LIU Dao-xin, DU Dong-xing, et al. Effects of shot peening on surface integrity and fatigue properties of TC4 titanium alloy[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2012, 31(8): 1349-1353, 1358.