

喷丸强化对表面完整性影响的研究现状与发展

盖鹏涛^{1,2,3}, 陈福龙^{1,2,3}, 尚建勤^{1,2,3}, 韩秀全^{1,2,3}

(1. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;

3. 数字化塑性成形技术与装备北京市重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 综述了喷丸强化技术对材料表层残余应力分布、显微组织结构、表面粗糙度和表层硬度分布等表面完整性因素影响的研究进展, 阐述了不同喷丸强化技术与材料表面完整性因素间的关系以及基于表面完整性调控的喷丸强化技术的发展趋势。

关键词: 喷丸强化; 表面完整性; 残余应力; 显微组织结构; 表面粗糙度; 表层硬度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.20.016



盖鹏涛

中航工业北京航空制造工程研究所金属成形技术研究室高级工程师, 主要从事先进材料制备及成形技术、表面强化技术和表面完整性的研究。

金属材料的疲劳、应力腐蚀、高温氧化等力学、物理和化学性能, 很大程度上取决于材料的表面完整性。所谓表面完整性是指表面粗糙度、表

层残余应力、表层显微组织、表层致密度和表面形貌等状态的完好程度。大量的航空零件失效分析表明, 属于疲劳失效的零件约占 80%, 而材料的表面完整性是影响材料疲劳性能的重要因素之一。

喷丸强化技术是一种材料表面机械冷加工方法, 借助高速运动弹丸流或高能冲击波撞击材料的表面, 使材料表层发生弹塑性变形, 呈现较好的表面完整性, 从而提高材料的抗疲劳强度、微动疲劳抗力及损伤容限性能的一种表面强化方法。在航空工业中, 航空零件的表面完整性直接影响其使用性能和服役能力, 特别是零件的疲劳使用性能。喷丸强化技术通过改变材料表面完整性显著提高各类航空零部件的疲劳性能, 且具有成本低、适应性强和操作方便等优点, 在航空领域应用广泛。目前, 我国在控制零件表面质量方面主要是测定表面粗糙度及检测表面缺陷, 还没有建立完善的表面完整性设计及

检测体系。通过喷丸强化技术调控表面完整性是提高航空零件质量可靠性的重要手段, 因此本文综述了喷丸强化涉及表面完整性的研究进展, 总结了不同喷丸强化技术对材料表面微观组织结构、残余应力、粗糙度、硬度等主要表面完整性因素的影响规律, 以期对喷丸强化技术的发展及零件表面完整性的控制有所促进。

表层残余应力

喷丸强化在材料表层引入残余应力场, 其中靠近受喷材料表面一侧呈现为残余压应力, 板材单面喷丸强化后的表层残余应力分布特征曲线如图 1 所示。普遍认为残余压应力是提高工程材料抗疲劳性能和抗应力腐蚀性能的重要强化机制, 而且残余压应力值大小、压应力层深度对工件疲劳强度或寿命影响显著。因此, 如何实现残余应力分布特征的调控是该领域重要研究内容之一。

残余应力分布特征曲线包括 5

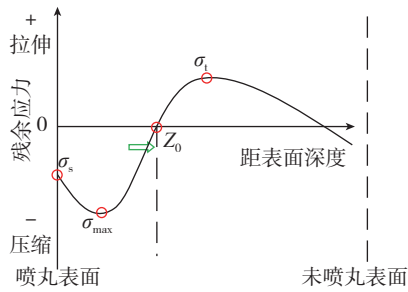


图1 喷丸强化残余应力层沿深度分布特征曲线

Fig.1 Distribution curve of residual stress along depth from surface induced by shot peening

个主要特征参数:表面残余应力值、残余压应力深度、最大残余压应力及其位置、最大残余拉应力。弹丸撞击材料表面时,通常与材料表面产生近似的赫兹接触,形成的最大弹性应力出现在材料次表面,所以通常喷丸强化最大残余压应力位于次表面。在某些情况下,残余应力分布特征发生变化,例如喷丸强化采用低密度的玻璃弹丸介质时,由于入射动能小,其喷丸强化钛合金和铝合金的最大残余压应力值出现在表面^[1-2]。当喷丸强化工艺为湿式喷丸强化时,硬质合金或钛合金也会出现表面残余压应力值最大的现象^[3-5],因为湿式喷丸强度一般相对较低(为干喷丸强度的1/3~1/4),且陶瓷丸介质密度相对较小,但随着喷丸强度或覆盖率提高,最大残余压应力逐渐向次表面转移。激光喷丸强化工艺,最大残余压应力值通常出现在表面,因为激光喷丸时金属表面的吸收层吸收激光能量后气化产生高温高压的等离子体,等离子体发生爆炸产生冲击波作用于材料表面,没有形成赫兹接触;高压空化水射流喷丸,其形成的最大残余压应力也出现在受喷材料表面^[1,6-9]。

残余应力的大小和分布特征受到喷丸强化工艺类型、工艺参数及材料自身属性等诸多因素影响。残余应力数值主要取决于受喷材料自身的屈服强度、晶体结构和加工硬化率。受喷材料屈服强度越高,

残余压应力值越大^[10]。例如,屈服强度450MPa铝合金,最大残余压应力值在400MPa左右^[11];屈服强度900MPa的钛合金,最大残余压应力值在800MPa左右^[12];屈服强度1631MPa的高强钢,最大残余压应力值在1500MPa左右^[13]。通常残余压应力值小于受喷材料的原始屈服强度,但有研究报道了残余应力值超过受喷材料屈服强度的现象,研究者^[13]认为受喷材料表层在大量弹丸冲击作用下发生大应变塑性变形,形成明显的加工硬化或晶粒细化,导致受喷材料表层局部屈服强度升高,从而产生的残余应力值超过受喷材料原始屈服强度。受喷材料的强度越高,材料的塑性变形抗力大,入射阶段系统动能衰减速度加快,喷丸强化变形层浅,残余压应力场深度变浅。具有显微组织结构特征的受喷材料的残余压应力值分布具有方向性,如轧制板材在轧制方向与垂直方向的残余压应力值不同^[14]。

喷丸强化工艺参数,如喷丸强度、喷丸时间、弹丸介质和弹丸流量的选取对残余应力值大小与分布的影响明显。较高喷丸强度下,弹丸入射阶段具有更大动能,接触区受喷材料应力集中程度更大、变形层更深,所以最大残余压应力值提高、残余压应力层变深,但喷丸强度过大可能获得相反的效果,主要由于应力松弛和表面剥层等因素的影响。喷丸时间作用主要局限于饱和时间内,最大残余应力值和应力层深度随喷丸时间延长而增加,达到饱和后数值基本稳定不变。弹丸流量直接影响到弹丸动能和100%覆盖率时间,在一定喷丸气压下,弹丸流量大则喷丸饱和时间短,喷丸强度下降,进而影响残余压应力的大小及分布。弹丸直径越大,喷丸强化越容易产生更深的残余压应力层。同济大学高玉魁^[15]等研究了喷丸强度、喷丸时间、入射角度、弹丸种类等干喷丸强化参数对

A-100钢残余应力场分布的影响规律。

喷丸强化工艺类型也显著影响最大残余压应力值和残余压应力层深度。以TC4钛合金为例,通常传统机械喷丸最大残余压应力值约800MPa,压应力层深度约0.25mm;湿式喷丸最大残余压应力值和干式接近,但压应力层深度较浅约为0.15mm;激光喷丸最大残余压应力值约400MPa,压应力层深度通常1mm左右^[7];高压空化水射流喷丸强化残余压应力值达到1000MPa,残余压应力层深度约0.1mm^[8]。超声喷丸包括弹丸式和撞针式,弹丸式形成的残余压应力分布特征和传统机械喷丸接近^[16],撞针式可能形成更大的残余压应力值和残余压应力层深度。

显微组织结构

喷丸强化变形层是提高工程材料抗疲劳性能的另一个主要强化机制。在喷丸强化过程中,材料表层组织发生塑性变形,其显微组织结构中的晶粒尺寸、物相结构、位错密度和晶面取向等发生变化,构成变形组织强化层。变形强化层的组织呈梯度分布,由表面到内部基体,以双相钛合金TC17为例,典型的组织分布为表面层的纳米晶层、亚表面的细晶层、内部变形晶层和无应变的晶粒基体^[17-18],如图2所示。

金属材料组织的细化程度与喷丸强化过程中材料表面的应变和应变速率有关,喷丸强化层发生不均匀塑性变形,受喷材料表面应变和应变速率最大,沿着深度方向应变和应变速率逐渐降低,所以强化层组织呈梯度分布特征。变形强化层的组织细化作用对疲劳加载过程中材料晶体的应变起到阻碍作用,从而能够提高材料的抗疲劳性能。此外,喷丸强化层中微纳米组织中含有高体积分数的晶界,以及大量的位错、空位、亚晶

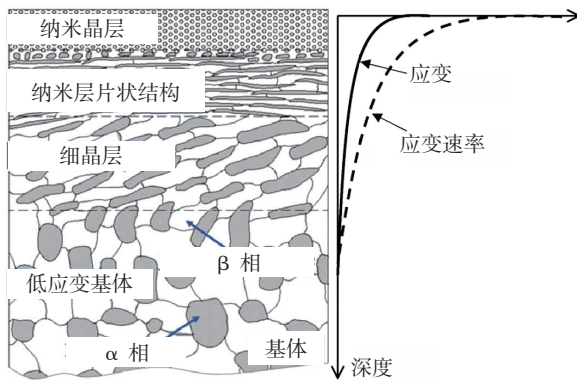


图2 喷丸变形强化层的梯度组织、应变及应变速率变化趋势

Fig.2 Variation of microstructure, strain and strain rate of peening layer

界等非平衡结构及能量贮存,有利于降低原子扩散激活能、提高原子扩散系数、促进原子化学反应。因此,喷丸强化技术也用于材料表面改性,也有益于改善金属材料的扩散连接、渗氮(碳)等工艺性能。

喷丸强化层的组织细化机理通常认为是由于弹丸循环撞击作用下接触应力超过屈服强度,受喷材料表层产生位错、孪晶、层错和剪切带等缺陷,缺陷交互作用后演变成微纳米尺度胞状组织、亚晶和晶粒^[19]。干式喷丸、超声喷丸、激光喷丸和湿式喷丸等技术强化的受喷材料,都能够在材料表面变形强化层形成纳米晶层^[17,20-22]。喷丸强化层厚度和变形组织细化程度,受到材料自身属性、喷丸工艺类型及其工艺参数影响。对于传统喷丸强化工艺,通过提高弹丸硬度、弹丸直径、弹丸速度、覆盖率以及喷丸强度来提高金属材料的细化程度^[23-24]。对于超声喷丸强化工艺,通过提高弹丸直径、振动频率、喷丸时间来提高表面的细化程度和变形层深度^[25]。对于激光喷丸强化工艺,激光喷丸的脉冲能量、激光喷丸次数、覆盖率等均影响表面组织的细化程度^[21]。

不同喷丸强化方法的组织细化程度和影响层深度不一致。以钛合金为例,通常传统喷丸强化影响层深度约在200~500 μm ,纳米层深度约在20~30 μm 。激光喷丸强化影响层深度

可达1mm左右,纳米层深度约10 μm 左右。超声喷丸强化通过调整适当的强化参数也可以使影响层深度达1mm,纳米层则深达30 μm ^[17-21]。因此,超声喷丸强化目前在材料表面实现变形组织细化的效果较为显著,广泛应用在Fe、Cu、Ti、Al、Mg等合金以及非晶合金等表面纳米化的研究中。

表面粗糙度

喷丸强化过程中高速弹丸撞击受喷材料表面引起塑性变形,并在其表面形成凹坑,大量弹丸的撞击和相互叠加作用使受喷材料表面形貌发生变化。通常喷丸强化使受喷材料的表面粗糙度变大,而且不当工艺参数甚至造成表面开裂、脱层、褶皱、破碎弹丸嵌入等表面损伤,损害金属零件的抗疲劳性能^[26]。因此,喷丸强化处理受喷材料的表面粗糙度是一项重要控制指标。喷丸强化表面粗糙度影响因素、变化规律和后续处理工艺在工业领域受到广泛关注。喷丸强化对材料表面粗糙度

的影响,与材料属性及表面状态、喷丸工艺类型及参数、弹丸介质等多种因素相关。

喷丸强化工艺参数对材料表面粗糙度有显著影响。喷丸强度越高,表面粗糙度越大。随着喷丸时间增加,表面粗糙度值上升到峰值后逐渐下降,如图3所示。研究人员认为,初始阶段表面局部变形显著,材料表面变形不均匀,导致粗糙度增加;随着喷丸时间增加,表面应变量增加,加工硬化严重,表面变形均匀化,导致粗糙度降低并趋向稳定^[27]。弹丸高速撞击受喷材料后,材料表面受挤压发生严重塑性变形,形成材料的凸起和凹陷,即形成了许多“峰”和“谷”。随着喷丸时间的延长,弹丸对材料的覆盖率增加,表面的凹坑数量增加,合金的表面粗糙度则继续增加进而达到峰值。继续延长喷丸时间,材料表面形成的“峰”和“谷”交替转换,材料表面粗糙度则开始下降。当弹丸在材料表面产生的“峰”和“谷”达到平衡后,材料表面更趋于平整,表面粗糙度也达到稳定值。长时间喷丸虽然可以降低粗糙度,但容易诱发材料表面发生剥层或褶皱缺陷,不利于材料抗疲劳性能的提高^[12-13]。另外,在喷丸强化过程中喷射角度越大(喷嘴入射方向垂直于受喷材料表面时入射角为0°),弹丸速度的法向分量越小,弹坑越浅,弹丸的切向速度越大,弹丸对表面的研磨作用就越大,表面粗糙度值就越小。

弹丸介质的选取也是调控表面粗糙度的重要因素,如弹丸直径、圆

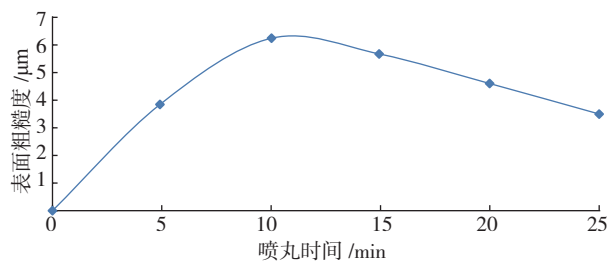


图3 喷丸强化时间对表面粗糙度影响

Fig.3 Influence of shot peening time on surface roughness

整度、弹丸硬度等。通常直径小、圆整度好的弹丸,容易获得均匀光滑的表面,光滑表面有利于维持残余应力稳定性^[28],增加抗疲劳性能,如微粒喷丸强化技术、复合喷丸强化技术等^[29-31]。

从喷丸工艺类型角度,相对于传统干式喷丸,激光喷丸、湿式喷丸、高压水射流喷丸和超声喷丸(弹丸式)的表面粗糙度较小。例如,7050 铝合金在常规 S110 弹丸喷丸强化下表面粗糙度 R_a 值超过 $4\mu\text{m}$,而激光喷丸强化表面粗糙值降为 $1\mu\text{m}$ ^[1]。在相同喷丸强度下,如图 4 所示(R_a 为平均

粗糙度, R_{max} 为最大粗糙度深度, R_z 为平均峰谷深度),超声喷丸强化的粗糙度值为传统干式喷丸的 1/3 甚至更低^[9,16,32]。超声喷丸设备使用的丸粒与传统方式不同,喷射介质除传统形状的丸粒外还有两端为不同曲率半径的喷针,丸粒材质一般选用硬度较高的钨碳钢或轴承钢等,对丸粒的圆度和表面光洁度要求也更高,在喷丸室内丸粒的速度方向随机,而且速度较低,这些因素都使超声喷丸处理后的工件表面粗糙度值下降。空军工程大学研究表明,表面光滑不锈钢(R_a 值为 $0.419\mu\text{m}$)经激光喷丸强化

处理后 R_a 值为 $0.584\mu\text{m}$,激光喷丸强化后受喷材料表面粗糙度值增加较小^[33]。湿式喷丸由于加入了液体润滑,有效地降低了弹丸与受喷材料表面的干摩擦,表面粗糙度较传统干式喷丸强化也明显改善,大连理工大学陈国清^[34]等利用“干式喷丸+湿式喷丸”的复合喷丸工艺,既实现了在钛合金表层形成较深的残余压应力层,又有效控制了材料表面粗糙度。

表层硬度

硬度是显微组织加工硬化程度的一种表征,与喷丸变形层组织存在对应关系^[35]。喷丸变形层的硬度呈梯度分布,表面硬度值最高,沿深度方向硬度值逐渐降低,最终趋向基体硬度。喷丸应变硬化效果主要取决于微观组织细化程度,同时与位错密度、固体相变程度相关。

喷丸强度是调控硬度层分布特征的有效手段,如图 5 所示,喷丸强度越高,表面硬度值和硬度层深度越大。在循环硬化-软化作用下,硬度存在极限值,见图 6^[36]。镁合金通过喷丸强化处理,表面硬度从 60HV 提高到 135HV^[37]。对于 300M 钢喷丸,喷丸强化后表层残留奥氏体发生相变,转变为马氏体组织,硬度大幅度提高。在一定喷丸强度下,随喷丸时间增加表面硬度值和硬度层深度逐渐变大,在循环软化-硬化作用下,硬度值最终趋于稳定,其大小取决于弹丸入射阶段的动能^[23]。但喷丸强

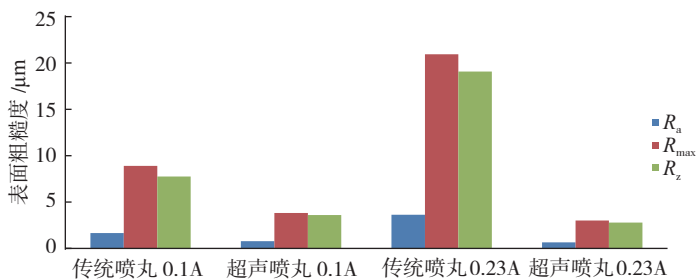


图4 超声喷丸和传统喷丸对Ti-6Al-4V钛合金表面粗糙度的影响

Fig.4 Influence of ultrasonic and conventional shot peening on surface roughness of titanium alloy

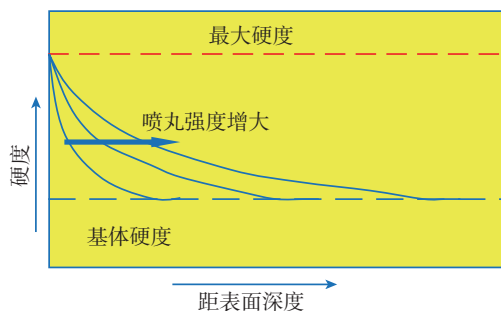


图5 喷丸强度对受喷材料硬度层分布特征影响

Fig.5 Influence of shot peening intensity on hardened layer of material

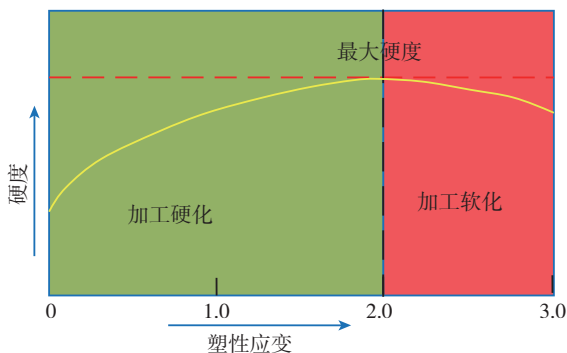


图6 循环硬化-软化作用示意图

Fig.6 Sketch map of work-hardening and work-softening

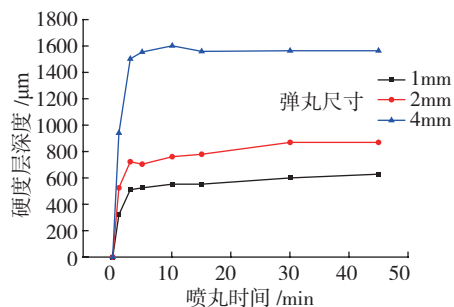


图7 喷丸时间、弹丸尺寸对受喷材料硬度层深度影响

Fig.7 Influence of time and shot size of shot peening on depth of hardened layer

化时间过长又可能诱发剥层、裂纹、破碎弹丸嵌入、零件翘曲等现象。大尺寸弹丸有利于增加硬度层深度,如图7所示,郑海忠^[38]等研究报道了当弹丸尺寸从1mm变为4mm时,变形层深度从600 μm 增至1600 μm 。

展望

随着表面喷丸强化技术的快速发展,喷丸强化表面完整性对材料及零件性能影响的重要性也越来越受到重视,针对喷丸强化表面完整性的研究也逐渐深入,为实际工程的应用提供了参考和依据。国内目前针对喷丸强化表面完整性的基础研究还有待深入,对表面完整性的评估与检测体系尚不完善,因此,针对喷丸强化表面完整性的研究还有以下几个方面有待加强:

(1) 深入开展喷丸强化加工表面完整性的应用基础研究,揭示喷丸强化表面完整性特征的形成及产生的机理,建立喷丸强化表面完整性的理论模型及其评判体系;

(2) 在航空航天等领域的抗疲劳零部件制造技术中,拓展喷丸强化加工表面完整性技术的应用,依据实际服役性能的需求,综合调控表面完整性各因素,实现所需性能的最优化;

(3) 基于表面完整性控制,开发新型表面喷丸强化技术,获得更大的表面完整性调控区间与更优的效果,适应新材料、新结构和更复杂零部件的表面强化需求。

参考文献

[1] GAO Y K. Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2011,528(10/11):3823-3828.
 [2] WOHLFAHRT Helmut, 李树中. 喷丸处理和残余应力[J]. 国外机车车辆工艺, 1985(4):13-19.
 WOHLFAHRT Helmut, LI Shuzhong. Shot peening and residual stress[J]. Foreign Locomotive

& Rolling Stock Technology, 1985(4):13-19.

[3] 杜海燕, 杨晶, 孙景, 等. 湿法喷丸处理 YG8 合金表面残余应力分析及对性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2007(1):13-16.

DU Haiyan, YANG Jing, SUN Jing, et al. Influence of surface residual stress distribution on mechanical properties of cemented carbide treated by wet blasting[J]. Powder Metallurgy Technology, 2007(1):13-16.

[4] 陈国清, 田唐永, 张新华, 等. Ti-6Al-4V 钛合金陶瓷湿喷丸表面强化微观组织与疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2013(1):122-127.

CHEN Guoqing, TIAN Tangyong, ZHANG Xinhua, et al. Microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy treated by wet shot peening of ceramic beads[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013(1):122-127.

[5] SADASIVAM B, HIZAL A, AROLA D, et al. An evaluation of abrasive waterjet peening with elastic prestress[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2009,131(1):123-136.

[6] 聂祥樊, 何卫锋, 李启鹏, 等. 激光喷丸改善 TC6 钛合金组织和力学性能[J]. 强激光与粒子束, 2013(5):1115-1119.

NIE Xiangfan, HE Weifeng, LI Qipeng, et al. Improvement of structure and mechanical properties of TC6 titanium alloy with laser shock peening[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013(5):1115-1119.

[7] 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 高周疲劳条件下激光喷丸 TC4 钛合金的残余应力释放规律及疲劳特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2015(5):1185-1190.

MENG Xiankai, ZHOU Jianzhong, HUANG Shu, et al. Residual stress relaxation and fatigue properties of TC4 Titanium alloy induced by warm laser peening under high-cycle fatigue[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015(5):1185-1190.

[8] LEE H, MALL S, SOYAMA H. Fretting fatigue behavior of cavitation shotless peened Ti-6Al-4V[J]. Tribology Letters, 2009,36(2):89-94.

[9] MAAWAD E, SANO Y, WAGNER L, et al. Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 536: 82-91.

[10] 闫五柱, 刘军, 温世峰, 等. 喷丸过程中的能量转化及残余应力分布研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 139-142.

YAN Wuzhu, LIU Jun, WEN Shifeng, et al. Energy conversion and residual stress distribution in shot peening process[J]. Journal of Vibration

and Shock, 2011, 30(6): 139-142.

[11] 陈勃, 高玉魁, 吴学仁, 等. 喷丸强化 7475-T7351 铝合金的小裂纹行为和寿命预测[J]. 航空学报, 2010,31(3):519-525.

CHEN Bo, GAO Yukui, WU Xueren, et al. Small crack behavior and fatigue life prediction for shot peening aluminum alloy 7475-T7351[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(3):519-525.

[12] 阴晓宁, 付雪松, 陈国清, 等. 湿喷丸强化对 TC4 钛合金表面状态及疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2016,41(3):48-53.

YIN Xiaoning, FU Xuesong, CHEN Guoqing, et al. Effects of wet shot peening on surface morphology and fatigue property of Ti-6Al-4V alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016,41(3):48-53.

[13] 李瑞鸿, 刘道新, 张炜, 等. 喷丸强化与表面完整性对 300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011,31(9):1418-1423.

LI Ruihong, LIU Daoxin, ZHANG Wei, et al. Influence of shot peening and surface integrity on the fatigue properties of 300M steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011,30(9):1418-1423.

[14] SALIMIANRIZI A, FOROOZMEHR E, BADROSSAMAY M, et al. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015,77:112-117.

[15] 赵艳丽, 王强, 杨庆祥, 等. 喷丸工艺参数对 A-100 高强度钢残余应力场的影响[J]. 金属热处理, 2013,38(8):10-14.

ZHAO Yanli, WANG Qiang, YANG Qingxiang, et al. Effect of shot peening parameters on residual stress fields of A-100 high strength steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2013,38(8):10-14.

[16] STOLL I, HELM D. Ultrasonic shot peening (USP) on Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aero engine components[C]. The 11th International Conference on Shot Peening, South Bend, 2011.

[17] LI H, LIU Y, LI M, et al. The gradient crystalline structure and microhardness in the treated layer of TC17 via high energy shot peening[J]. Applied Surface Science, 2015,357:197-203.

[18] LU K, LU J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375-377(1): 38-45.

[19] 刘刚, 雍兴平, 卢柯. 金属材料表面纳米化的研究现状[J]. 中国表面工程,

2001,14(3):1-5.

LIU Gang, YONG Xingping, LU Ke. The current situation of researches of surface-nanocrystallization on metallic materials[J]. China Surface Engineering, 2001,14(3):1-5.

[20] ZHU K Y, VASSEL A, BRISSET F, et al. Nanostructure formation mechanism of α -titanium using SMAT[J]. Acta Materialia, 2004,52(14):4101-4110.

[21] ZHOU L, LI Y, HE W, et al. Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013,578(8):181-186.

[22] LI K, FU X S, LI R D, et al. A mechanism study on characteristic curve of residual stress field in Ti-6Al-4V induced by wet peening treatment[J]. Materials & Design, 2015,86:761-764.

[23] DAI K, SHAW L. Comparison between shot peening and surface nanocrystallization and hardening processes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007,463(1/2):46-53.

[24] HASSANI-GANGARAJ S M, CHO K S, VOIGT H J L, et al. Experimental assessment and simulation of surface nanocrystallization by severe shot peening[J]. Acta Materialia, 2015,97:105-115.

[25] SANDÁ A, NAVAS V G, GONZALO O. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample[J]. Materials & Design, 2011,32(4):2213-2220.

[26] FARGAS G, ROA J J, MATEO A. Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015,641:290-296.

[27] AZAR V, HASHEMI B, YAZDI M R.

The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in ringer's solution[J]. Surface and Coatings Technology, 2010,204(21-22):3546-3551.

[28] 闫五柱, 章刚, 温世峰, 等. 表面粗糙度对喷丸残余应力场的影响[J]. 材料科学与工艺, 2010(4):523-527.

YAN Wuzhu, ZHANG Gang, WEN Shifeng, et al. Effect of surface roughness on evolution of residual stress field induced by shot peening[J]. Materials Science & Technology, 2010(4):523-527.

[29] 张继旺, 鲁连涛, 张卫华. 微粒子喷丸中碳钢疲劳性能分析[J]. 金属学报, 2009,45(11):1378-1383.

ZHANG Jiwang, LU Liantao, ZHANG Weihua. Analysis on fatigue property of microshot peened medium carbon steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009,45(11):1378-1383.

[30] 王欣, 王强, 宋颖刚, 等. 陶瓷丸喷丸对 2124 铝合金疲劳性能的影响[J]. 材料保护, 2011,44(9):9-11.

WANG Xin, WANG Qiang, SONG Yinggang, et al. Effect of ceramic shot-peening on fatigue behavior of 2124 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Protection, 2011,44(9):9-11.

[31] 赖志林, 汪诚, 李应红, 等. 激光冲击强化与超声喷丸对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013(5):164-171.

LAI Zhilin, WANG Cheng, LI Yinghong, et al. Effects of laser shock peening and ultrasonic shot peening on fatigue property of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013(5):164-171.

[32] 张新华, 曾元松, 王东坡, 等. 超声喷丸强化 7075-T651 铝合金表面性能研究[J]. 航空制造技术, 2008(13):78-80.

ZHANG Xinhua, ZENG Yuansong, WANG

Dongpo, et al. Surface hardening effectiveness on aluminium alloy 7075-T651 by ultrasonic shot peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(13):78-80.

[33] 栾伟玲, 涂善东. 喷丸表面改性技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2005,16(15):1405-1409.

LUAN Weiling, TU Shandong. Recent trends on surface modification technology of shot peening[J]. China Mechanical Engineering, 2005,16(15):1405-1409.

[34] 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 Tangyong. Microstructures and properties of TC4 titanium alloy treated by shot peening[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[35] WANG H T, TAO N R, LU K. Architected surface layer with a gradient nanotwinned structure in a Fe-Mn austenitic steel[J]. Scripta Materialia, 2013,68:22-27.

[36] KIRK D. Review of shot peened surface properties[J]. The Shot Peener, 2007:24-30.

[37] 刘蒙恩, 盛光敏, 尹丽晶. 高能喷丸对 AZ31 镁合金耐腐蚀性及硬度的影响[J]. 功能材料, 2012,43(19):2702-2704.

LIU Mengen, SHENG Guangmin, YIN Lijing. Effects of high energy shot peening for magnesium alloy AZ31 on the corrosion properties and microhardness[J]. Journal of Functional Materials, 2012,43(19):2702-2704.

[38] 罗钦豪. TB6 钛合金表面纳米化层的组织与性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

LUO Qin hao. Structure and properties of surface nanometer layer in TB6 alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.

Recent Situation and Development Trend of Shot Peening on Surface Integrity

GAI Pengtao^{1,2,3}, CHEN Fulong^{1,2,3}, SHANG Jianqin^{1,2,3}, HAN Xiuquan^{1,2,3}

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technology, Beijing 100024, China;

3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Shot peening is a kind of efficient, economical and effective surface peening technology and can improve mechanical performance of material remarkably through controlling surface integrity of peened material. The influence of shot peening on surface integrity are summarized, such as residual stress, microstructure, roughness and hardness and the relationship is introduced between different kinds of shot peening technologies and surface integrity in this paper. The future development prospects of shot peening research based on surface integrity control are summed up.

Keywords: Shot peening; Surface integrity; Residual stress; Microstructure; Roughness; Hardness (责编 李丹)