

钛合金喷丸强化影响因素分析研究

Research on Influencing Factor of Shot Peening of Titanium Alloy Part

中航工业北京航空制造工程研究所 尚建勤

[摘要] 挖掘喷丸强化及其主要影响因素内涵,剖析钛合金零构件喷丸强化问题,明确钛合金零构件,尤其是薄壁钛合金零构件喷丸强化突出问题的基本解决途径。

关键词: 钛合金 喷丸强化 缺口敏感性 表面氧化 零件壁厚

[ABSTRACT] The main influencing factors and titanium alloy part's problems of shot peening are analysed. The solving approach of shot peening of titanium alloy parts, especially thin-walled parts, are ascertained.

Keywords: Titanium alloy Shot peening Notch sensitivity Surface oxidation Wall thickness of part

表面改性日益成为金属加工领域人们的一种自觉意识,一方面它可以在不改变材料、尺寸及重量前提下改善金属材料使用性能;另一方面在确保金属零构件使用性能的前提下,它可以减小结构尺寸、降低结构重量甚至材料等级等。

喷丸强化是金属材料表面改性重要而经济的手段之一。作为一种重要金属材料,钛合金应用领域持续扩大,喷丸强化在钛合金中的应用也在不断深入。随着新材料、新结构的一再推出,有关钛合金零构件喷丸强化的新的情况和问题也随之出现。在某些种类钛合金零构件上应用效果良好的喷丸强化工艺,而在另外一些种类钛合金零构件上应用效果却大打折扣,甚至产生负效应,直接影响钛合金零构件使用性能提高和喷丸强化效能的发挥,因此人们迫切希望尽早认识和解决其中的问题。

无疑,紧密结合钛合金材料及其零构件具体特点,深入分析研究喷丸强化工艺及其影响因素,将有助于认识和解决上述钛合金零构件喷丸强化问题。

1 喷丸强化及其机理

喷丸强化是利用高速弹丸流对金属零构件表面持续撞击,使其表面产生塑性变形层和纤维组织变化,同时又受到材料本身的约束,导致金属零构件表层残余压应力场,由此可以提高金属零构件的疲劳寿命和耐腐蚀性等使用性能。与其他强化工艺相比,喷丸强化效果佳、

成本低,零构件几乎不受设备的限制,而且周期短。

喷丸强化金属表层残余压应力场是与其内部弹性拉应力场相互作用和平衡的结果。两者共生共灭,没有表层残余压应力场便不存在内部弹性拉应力场,消除表层残余压应力场则意味着内部弹性拉应力场的消失。

喷丸强度是喷丸强化的重要概念之一,表征喷丸强化程度大小。喷丸强度大小以阿尔门试片为对象由标准的固定方式、喷丸方法、弧高仪及弧高直-时间曲线确定,单位为 mm 或 in。喷丸强度对应的覆盖率为 100%,此时的喷丸强化、喷丸时间、弧高直-时间曲线及其对应点分别被称为饱和喷丸、饱和喷丸时间、饱和曲线及饱和点。获得 $n \times 100\%$ 覆盖率的方法是,保持其他喷丸强化参数不变而仅改变喷丸时间为 $n \times$ 饱和喷丸时间。确定的喷丸强度,可以对应若干组喷丸强化参数组合。

喷丸强化属于喷丸工艺。喷丸工艺分类方法较多。按用途分为喷丸清理、喷丸成形、喷丸校形、喷丸强化;按弹丸干湿程度分为干喷丸和湿喷丸;按弹丸获得速度的方式分为气动式、离心式、旋片式、自由落体式等;弹丸材料种类分为:铸铁丸、铸钢丸、陶瓷丸、玻璃丸等。喷丸强化的方式、特点、要求、工艺及其参数等与喷丸清理、喷丸成形及喷丸校形之间既有联系又有区别;例如喷丸成形以获得金属零构件外型为目的,通常不限定覆盖率大小,喷丸强化通过获得表层压应力场以提高金属零构件使用性能为目的,同时尽可能保持零构件外型少变或不变,一般要求覆盖率不小于 100%。

喷丸强化是传统工艺,同时在长期应用实践活动中伴随人类文明进步的步伐,共享人类技术进步的发展成果,不断改进与完善,因此又是现代先进工艺,未来仍将在广泛地应用中不断发展进步。

2 喷丸强化影响因素

影响喷丸强化的工艺因素较多,各工艺因素之间相互作用,互为影响,直接或间接地影响着最终喷丸强化效果。

喷丸强化工艺因素包括:设备型号、干/湿喷丸、弹丸速度、弹丸规格、弹丸流量、喷射距离、喷射角、喷丸时间、覆盖率、零构件壁厚、强化方式、强化轨迹、强化顺序

等。下面选择部分主要喷丸强化工艺因素,分析研究其对喷丸强化的影响。

2.1 弹丸规格

弹丸规格涉及弹丸材料、弹丸状态、弹丸形状、弹丸大小等。喷丸强化所使用的弹丸材料包括铸铁丸、铸钢丸、切割钢丝丸、陶瓷丸、玻璃丸等。弹丸状态主要是指金属弹丸的热处理状态及其所达到的硬度。

弹丸材料及其状态的选择因喷丸强化零构件的材料、壁厚、强化要求等不同而有所区别,直接影响零构件喷丸强化效果。不同的弹丸材料对确定零构件喷丸强化时效果差别显著,一是所产生的残余压应力峰值大小不同,二是因残余压应力峰值对应的参数范围变化而使零构件表面质量不同。

当弹丸材料、弹丸状态、弹丸形状确定之后,人们习惯性认为弹丸直径尺寸越大则在金属零构件表层产生更大压应力和更深压应力层。其实并不尽然,如当弹丸材料与零构件材料达到某种程度的协调时,弹丸直径尺寸并不影响金属零构件表面压应力层深度。因此,应当区分不同弹丸材料及其状态与具体喷丸强化对象,以免生搬硬套产生错误。

当喷丸强化对象和有关弹丸的其他因素确定之后,弹丸大小的选择尤为重要。通常,喷丸强化零构件壁厚越大则可以选用弹丸直径越大,反之亦然,务必杜绝薄壁零构件选用大直径弹丸进行喷丸强化。在国外有关工艺规范中,列出了零构件壁厚与弹丸直径大小之间的关系曲线。

2.2 弹丸速度

弹丸速度是极为敏感的喷丸强化工艺因素之一。通常,弹丸速度越大,金属材料表层产生的残余压应力值及压应力层深度越大,反之亦然。喷丸强化时弹丸速度一定要适中尤其不能太大,因为弹丸速度小而引起的喷丸强度不足很容易被及时发现,而弹丸速度大所导致的危害则不易被及时发现。

与喷丸成形一样,喷丸强化通过限制金属零构件表面所允许的最大弹坑直径值(简称最大坑径)实现对弹丸速度的限制,不同的金属零构件材料和弹丸规格对应不同的最大坑径。

最大坑径的测量方法看似简单,但是实际确定最大坑径并不容易,结果往往导致喷丸强化零构件局部表面最大坑径值超标,使喷丸强化零构件报废。

2.3 弹丸流量与喷丸时间

弹丸流量与喷丸时间之间关系密切,对于确定的覆盖率则弹丸流量与喷丸时间之间存在类似反比例的关系。

通常,弹丸流量容易被简单化,简化为单位时间内

的弹丸重量。

实际上弹丸流量的概念要远比我们想象的复杂,涉及喷丸强化的方式、轨迹、顺序、零构件本身等,它们之间的不同排列组合将导致喷丸强化效果的千差万别,或者成就某种零构件的喷丸强化,或者降低甚至毁掉某种零构件喷丸强化的可行性。其重要性可见一斑。

2.4 覆盖率

覆盖率是喷丸强化的基本要求之一,喷丸强度通常对应的覆盖率不小于100%。

在喷丸强化条件(即 $100\% \leq \text{覆盖率}$)下,覆盖率越高则喷丸强度值越高、压应力层深度越深,也就是说随着覆盖率的增大喷丸强度值和压应力层并不是不再增加。

但是,当 $200\% \leq \text{覆盖率}$ 以后,继续增大覆盖率所引起的喷丸强度和压应力层深度增加值越来越小,与所消耗能量、花费时间、损失效率等相比较显得不值。此外,过大的覆盖率也有损于喷丸强化效果。因此,喷丸强化覆盖率一般不超过200%。

当弹丸规格和速度确定,由于受到喷丸强化的方式、轨迹、顺序、零构件本身等影响,同样的覆盖率往往呈现出不一样的喷丸效果,对一些特殊种类的喷丸强化零构件更是如此。

当弹丸规格、弹丸流量、喷嘴移动速度及喷丸对象确定之后,覆盖率似乎应该确定,其实不然,往往较大的弹丸速度对应较大的覆盖率,反之亦然。

2.5 零构件壁厚

在大多数情况下,喷丸强化不涉及厚度或壁厚的概念,如较大尺寸的轴类、齿轮类、盘类等零构件的喷丸强化,在此基础上获得大量具有重要价值的研究成果和结论,指导着这类零构件的喷丸强化实践活动。

但是,喷丸强化相对壁厚较薄的零构件时,如果不加区别地应用有关上述喷丸强化成果与结论将导致严重甚至灾难性后果。

喷丸强化相对壁厚较薄的零构件时,零构件壁厚是一个不可忽视的重要因素,直接影响弹丸规格、设备型号、强化方式及其他喷丸强化工艺参数的选择,较小的厚度或壁厚则选择较小的喷丸强度,反之亦然。

3 钛合金喷丸强化

钛合金性能优异、应用广泛、并且应用领域与范围不断扩展,与此同时喷丸强化工艺也日益广泛地被应用于钛合金零构件加工制造,通过形成表面残余压应力层降低钛合金零构件对缺口敏感程度、改善与增强钛合金零构件使用性能。

钛合金零构件依据壁厚可以分为:厚壁和薄壁两

种。喷丸强化钛合金零构件壁部静力学性能是否明显降低是区分薄壁与厚壁的依据,薄壁与厚壁是相对的,对于某些零构件在不同喷丸条件下薄壁与厚壁是可以相互转化的。下面分别探讨厚壁和薄壁钛合金零构件的喷丸强化问题。

3.1 厚壁钛合金件喷丸强化

厚壁钛合金零构件包括直径尺寸较大的轴类和厚板类钛合金零构件,壁厚等尺寸因素对此类钛合金零构件喷丸强化的影响明显弱化不再是主要影响因素,钛合金材料本身成为此类钛合金零构件喷丸强化的最重要影响因素。因此,厚壁钛合金零构件喷丸强化等同于钛合金零构件喷丸强化。

钛合金材料缺口敏感性高,钛合金零构件喷丸强化效果因此受到较大影响。研究表明,合理规划喷丸强化前、后处理工序及其顺序与组合,在喷丸强化前降低与消除内部残余拉应力、显著降低表面粗糙度、改善表面质量,在喷丸强化之后改善喷丸强化表面状况等,明显有利于降低和消除钛合金材料缺口敏感性的消极影响,有利于改善钛合金零构件喷丸强化效果。

此外,钛合金零构件表面在加工过程中因易氧化而损害使用性能,因此在喷丸强化及其前、后处理中应尽力避免钛合金零构件表面产生加工氧化,最好在打磨、抛光、光饰、喷丸等全过程采取防止钛合金零构件表面产生加工氧化的有效措施。

3.2 薄壁钛合金件喷丸强化

实际上薄壁钛合金零构件类似普通钛合金钣金零构件,其壁厚可以小到1mm左右甚至更小,按照常规喷丸强化工艺及参数处理这类零构件之后,其使用性能不总是提高。

研究表明,导致上述结果的主要原因是此类零构件壁厚与弹丸规格、强化方式及工艺参数等不匹配,如喷丸强度相对偏大。因此,为了获得理想喷丸强化效果,务必使零构件壁厚与喷丸强化条件相互协调,如前所述较小的壁厚选择较小的喷丸强度等。

4 小结

缺口敏感性高、加工表面易氧化、壁厚与喷丸参数不匹配等是钛合金零构件尤其是薄壁钛合金零构件喷丸强化中的突出问题,其中最后一个问题也是其他金属材料薄壁零构件喷丸强化中的共性问题,通过上述分析研究明确了这些喷丸强化问题的基本解决途径。

(1)合理制定钛合金零构件喷丸强化目标,使之更加符合喷丸强化实际而利于实现。

(2)通过喷丸强化之前和之后的合理处理,降低和消除钛合金因缺口敏感性高对零构件喷丸强化效果的

不利影响。

(3)在喷丸及其前、后处理全过程采取防氧化措施,防止钛合金零构件表面产生加工氧化。

(4)合理匹配喷丸强化工艺与零构件壁厚,实现钛合金零构件尤其是薄壁钛合金零构件喷丸强化。

(责编 小城)

(上接第156页)

表层硬化作用,与干式喷丸相比,湿式喷丸处理后试件表面硬化程度略高。

(3)两种处理方法均会在TC4钛合金材料内部不同程度地引入压缩残余应力,与干式喷丸相比,湿式喷丸引入的最大压缩残余应力增大了11.2%。

(4)与干式喷丸相比,采用陶瓷丸的湿式喷丸工艺使得钛合金材料的表面质量更好。

参考文献

- [1] 曾元松,黄遐,李志强.先进喷丸成形技术及其应用与发展.塑性工程学报,2006,13(3):23-29.
- [2] 栾伟玲,涂善东.喷丸表面改性技术的研究进展.中国机械工程,2005,16(15):1405-1409.
- [3] Guo F A, Trannoy N, Lu J. Characterization of the thermal properties by scanning thermal microscopy in ultrafine-grained iron surface layer produced by ultrasonic shot peening. Materials Chemistry and Physics, 2006, 96: 59-65.
- [4] Xing Y M, Lu J. An experimental study of residual stress induced by ultrasonic shot peening. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152, 56-61.
- [5] Wang X, Wang J, Wu P, et al. The investigation of internal friction and elastic modulus in surface nanostructured materials. Materials Science and Engineering A, 2004, 370:158-162.
- [6] Liu G, Lu J, Lu K. Lu. Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening. Materials Science and Engineering A, 2000, 286: 91-95.
- [7] 李雪莉,李瑛,王福会,等. USSP表面纳米化Fe-20Cr合金的腐蚀性能及机制研究.中国腐蚀与防护学报,2002,22(6):326-334.
- [8] Yang Y L, Zhao G J, Zhang D, et al. Improving the surface property of TC4 alloy by laser nitriding and its mechanism. Acta metallurgica sinica (English letters), 2006, 19(2): 151-156.
- [9] Li G A, Zhen L, Lin C, et al. Deformation localization and recrystallization in TC4 alloy under impact condition. Materials Science and Engineering A, 2005, 395: 98-101.
- [10] 张聪惠,赵西成,兰新哲,等.高能喷丸后TC4合金表面组织性能研究.铸造技术,2006(27):1082-1084.
- [11] Jang J S, CKoch C C. Hall-petch relationship in nanocrystallization iron produced by ball milling. Scr Metall Mater, 1990, 24:1599-1604.
- [12] 马世良.金属X射线衍射学.西安:西北工业大学出版社,1997.
- [13] 张定铨,何家文.材料中残余应力的X射线衍射分析和作用.西安:西安交通大学出版社,1999.

(责编 亦菲)