基于 ANSYS Workbench 液压支架顶梁多工况结构优化与静力分析

李向博，马俊林，薛克敏，杜勇，徐杰
（合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009）

摘要：目的 优化尺寸参数，最大程度减小质量，实现顶梁的轻量化。**方法** 利用 ANSYS Workbench 对液压支架顶梁进行了参数化建模，对其多种工况进行了多目标优化设计。**结果** 研究结果表明，优化结果符合设计要求，顶梁在3种工况满足刚度和强度的同时，质量分别减轻了10.4%，9.59%，4.26%，实现了轻量化。在此基础上，对顶梁的多工况进行静力学分析，检验了优化的效果。**结论** 顶梁结构的最大等效应力减小，应力分布更加合理。

关键词： ANSYS Workbench；多目标优化设计；轻量化；敏感性；静力学分析
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.02.011
中图分类号： TG315.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2015)02-0060-06

Structural Optimization of Multiple Operating Condition and Static Analysis of Top-beam of the Hydraulic Support Based on ANSYS Workbench

LI Xiang-bo, *MA Jun-lin*, *XUE Ke-min*, *DU Yong*, *XU Jie*
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to optimize the size parameters, reduce the quality as much as possible to realize the lightweight of beams. The top beam of hydraulic support was parameterized by modeling using ANSYS Workbench, and multi-operated optimization designwas conducted for its various operating conditions. The results showed that the optimization results met the design requirements, and lightweight was achieved. The top beam in the three different conditions met both the stiffness and strength requirements, and the mass was reduced by 10.4%, 9.59%, 4.26%, respectively. Based on the above study, static analysis was carried out for the top beam under the multiple operation conditions, to inspect the optimization effects. The maximum equivalent stress of the top beam structure tended to become smaller, and the stress distribution became more reasonable.

KEY WORDS: ANSYS Workbench; multi-objective optimized design; lightweight; sensitivity; static analysis

液压支架是在摩擦支柱和单体液压支柱等基础上发展起来的工作面机械化支护设备，它能可靠有效地支撑和控制工作面的顶板，隔离采空区[1]，防止矸石进入回踩工作面和推进输送机，是综合机械化采煤不可缺少的配套设备，能够减轻煤矿工人的劳动强度，保障工人的生命安全。顶梁是直接支撑顶板的受力部件，所以其结构的受力情况、稳定性和安全性至关重要[2]。

收稿日期： 2015-01-09
作者简介： 李向博(1989—)，男，陕西宝鸡人，硕士生，主要研究方向为精密塑性成形及组织性能研究。
通讯作者： 薛克敏(1963—)，男，安徽蚌埠人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为精密塑性成形及组织性能。

结构优化能最大限度地发挥材料的性能,减少耗材,降低成本[3]。利用计算机进行支架结构参数的优化设计,不仅可以提高支架总体方案在力学、运动学和结构上的科学性,获得最佳设计方案,而且还可大幅提高设计速度和设计质量[4]。文中使用 ANSYS 软件的 Design Explorer 模块进行优化设计。在 Design Explorer 中进行优化设计是通过响应面来完成的,其支持的方法是实验数据法(Design of Experiments Method),一旦运算结束,响应面的曲面的拟合就是通过设计点来完成[5]。通过有限元分析和结构优化,确保结构安全性的同时实现轻量化。将优化后的参数设置为设计点进行静力学分析,对比优化前后等效应力的分布状态,观察优化结果是否满足要求。

1　顶梁模型的建立

1.1　模型的建立

采用 ANSYS DM 模块对液压支架顶梁进行三维参数化建模[6—7],如图 1 所示。ANSYS 优化的基本要求是将模型参数化。所谓参数化建模,就是用参数(变量)而不是用数字建立和分析模型,通过简单地改变模型中的某些参数值,就可建立和分析一个新的模型[8],这样能节省大量的设计时间。

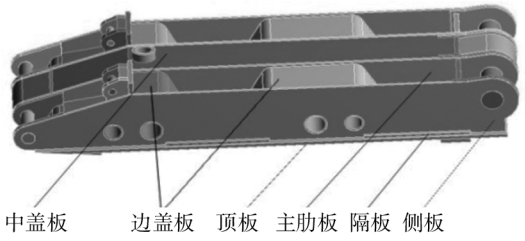


图 1　顶梁模型

Fig. 1 Top beam model

1.2　顶梁尺寸、材料的确定

顶梁的材料选用 Q890 低合金高强钢[9—11],其为调质型低合金高强钢。材料屈服强度为 890 MPa,抗拉强度为 940 MPa,顶梁主肋 30 mm、顶板 25 mm、边盖板如图 1 所示从左到右分别为 16 mm 和 20 mm、中盖板从左到右分别为 20 mm 和 25 mm、隔板 12 mm、侧板 12 mm。

1.3　载荷和边界条件

本次模拟主要根据国标 GB 25974.1—2010(煤矿用液压支架:通用技术条件),选择支架的载荷工况进行分析。理论分析和实验数据表明,液压支架强度试验的加载方式选择顶梁两端加载、顶梁扭转加载和顶梁中间加载,如图 2 所示,加载方式为固定加载。载荷如图 3 所示,$A=B=3.24$ MN,单向受力,方向沿 z 轴正方向;$C=D$,方向沿 x 轴负方向与 z 轴正方向的矢量和,x 轴大小为 0.3021 MN,y 方向为 0,z 方向为 3.2259 MN。

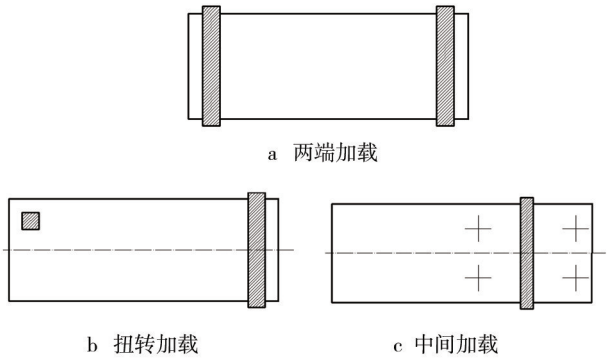


图 2　3 种加载方式

Fig. 2 Three kinds of loading mode

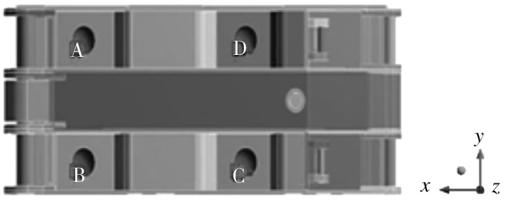


图 3　载荷

Fig. 3 Load

2　顶梁多工况结构优化

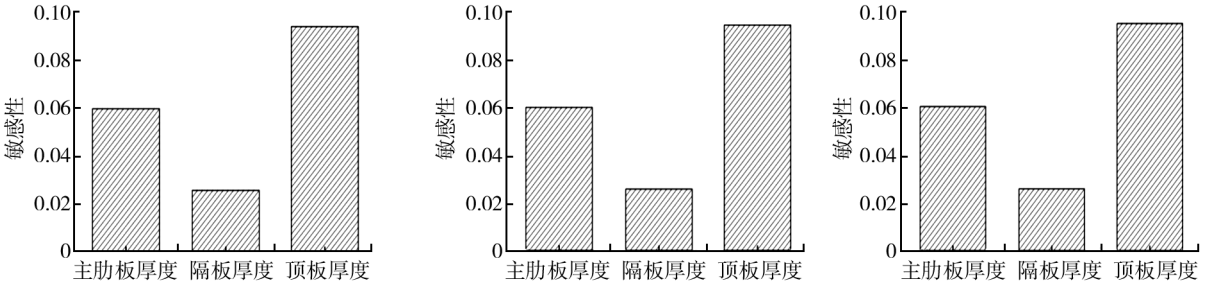
2.1　敏感性及响应曲面

随着性能更加优良材料的出现,沿用最初的设计不仅会造成材料的浪费,而且设备求高,使用寿命低,因此顶梁的轻量化就显得尤为重要。以顶梁质量为目标进行多目标优化设计,寻找 3 种工况最佳的尺寸设计。分别以隔板厚度 P1、主肋板厚度 P2 和顶板厚度 P6 作为顶梁的输入参数,顶梁的质量作为输出参数,其设计参数的合理范围为:隔板厚度 20 ~ 40 mm、主肋板厚度 20 ~ 40 mm、顶板厚度 15 ~ 30 mm。

根据 3 个输入参数,系统共生成 15 个设计点,经过计算,分别得到了 3 种工况输入参数敏感性图,如图 4 所示。敏感性为正值,说明输入参数的增大使得

输出参数增大;敏感性为负值,说明输入参数增大使得输出参数减小[12]。由于顶梁质量随着输入参数的增加均是增加的,所以敏感性均为正值。

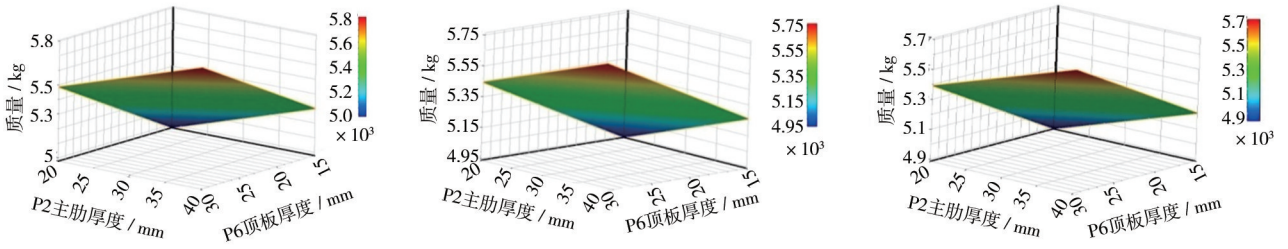
基于设计点生成的响应曲面,可以直观地看到输入参数对目标的响应情况。取对质量输出参数敏感性影响最大的 2 个输入参数,得到响应曲面图,如图 5 所示。质量随着主肋板厚度和顶板厚度的增大而增加,且 P6 对质量的影响斜度最大,说明 P6 对顶梁的质量影响大于另外 2 个参数,这与敏感性图中的情况是一致的,证明了设计的可行性。



a 两端工况　　b 扭转工况　　c 中间工况

图 4　3 种工况质量输出敏感性

Fig. 4 Sensitivity of three kinds of working quality output



a 两端加载工况　　b 扭转加载工况　　c 中间加载工况

图 5　3 种工况响应曲面图

Fig. 5 Response surface diagram for three working conditions

2.2　多目标优化

优化设计的数学模型主要包括设计变量、状态变量及目标函数[13]。在优化设计中同时要求两项或几项设计指标达到最优值的问题,统称为多目标优化设计问题[14]。目标函数是设计最小化或最大化的数值[15]。根据优化目标的不同,结合其重要程度,设定相关限制因素,并以最初设计结果为参照,合理设定输出参数的上下限。根据敏感性图和响应曲面,确定 3 个输入参数的优化目标和重要性。输出参数在满足顶梁强度和刚度的情况下设定。参数如表 1 所示。

根据输出参数的重要程度,确定输出参数的控制目标为质量的最小值,并将质量的重要性设为最大。通过输入参数得到的 15 个设计点,选择 Screening 优化方法,样本数输入 10 000,可以求解出 3 个最佳设计点,结合实际需要,选择一个最合理的设计点为优化的最终结果。优化结果如表 2 所示。

表 1　设计参数

Table 1 Design parameters

参数	目标		重要性
输入参数	隔板厚度/mm	最小值	低
	主肋板厚度/mm	最小值	低
	顶板厚度/mm	最小值	低
输出参数	质量/kg	最小值	高
	最大总变形量/mm	最小值	低
	最大等效应力/MPa	≤890	低

表 2　顶梁各工况优化结果

Table 2 Optimization results of top beam under various working conditions

加载工况		输入参数			输出参数		
		隔板厚度/mm	主肋板厚度/mm	顶板厚度/mm	质量/kg	最大等效应力/MPa	最大总变形量/mm
初	两端	30	30	25	5477.2	424.85	2.0821
始	扭转	30	30	25	5435.9	899.34	3.6614
值	中间	30	30	25	5382.6	765.08	4.544
优	两端	20	20	15	4906.2	466.97	2.4567
化	扭转	20.073	22.814	15.741	4914.2	879.97	4.4485
值	中间	27.01	35.157	16.325	5153.1	799.76	5.0885

3　静力学分析

静力分析是大多数工程结构设计所必须考虑的,它主要考虑结构在静力作用下的变形、约束反力、应力和应变的分布等情况,不考虑惯性和阻尼的影响。对构件强度的要求就是在进行加载试验后主体结构没有损坏和影响使用的变形。顶梁在 3 种工况优化后加载方式是否安全,主要看顶梁的承载能力是否满足要求,等效应力的分布是否合理。由于 3 种工况的最大总变形量优化前后变化不大,因此结构的变形是符合要求的,最大总变形量对顶梁的影响可以不予考虑,现主要考虑应力的分布是否符合要求。

根据第四强度理论,以 Von Mises 应力作为评价标准[16],强度理论准则为:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]}\leqslant[\sigma] \quad (1)$$

液压支架是钢构件,对于钢材采用剪应变能理论来研究其屈服(失效)条件,普遍认为是较适当的[17]。根据中国煤炭行业标准 MT/T556—1996(液压支架设计规范),一次采全高液压支架主要结构件的安全系数一般按下列范围选取:顶梁 1.1 ~1.3[18]。根据顶梁的工作条件,安全系数选择 1.1。塑性材料的安全系数为屈服强度与许用应力的比值,由此知道顶梁的许用应力为 809 MPa,当最大等效应力小于许用应力才能保证顶梁安全工作。

3.1　顶梁两端工况分析

在顶梁两端加载受力情况下,最大等效应力为 470.36 MPa,没有超过材料的许用应力。最大等效应力出现在内主肋与盖板接合处。变形首先发生在右端垫块处,这是因为顶梁左右柱窝受力不同,右边 2 个柱窝受到三向力的作用,所以最大应力发生在右边垫块与顶板的接触区域。顶梁两端加载应力分布如图 6 所示。

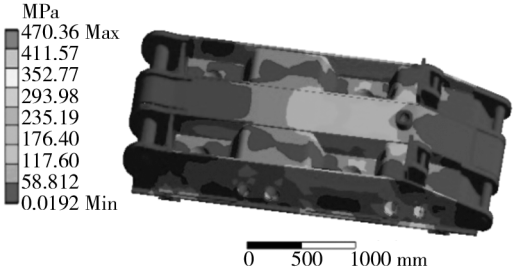


图 6　顶梁两端加载应力图

Fig. 6 Loading stress of top beam ends

3.2　顶梁扭转工况分析

在顶梁扭转受力情况下,最大等效应力为889.97 MPa,出现在小垫块与盖板接合处,此时最大等效应力已经超过了材料的许用应力,理论上这种加载方式是不安全的。但通过应力图可以看出,这是由于应力集中造成的,将有关结构件隐藏,可以看到最大等效应力的区域,如图 7 和 8 所示。最大值位于主肋板与顶板的接触位置,由于应力集中区域很小,不会对顶梁造成影响。

变形首先从 2 个垫块处发生,应力较大区域分布

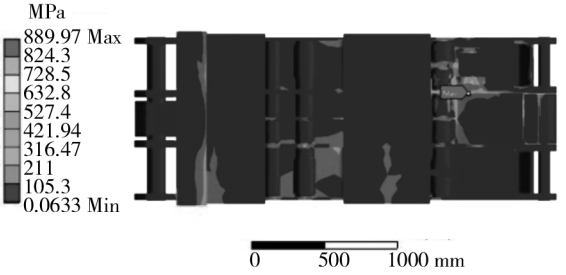


图 7　最大等效应力区域

Fig. 7 Maximum equivalent stress area

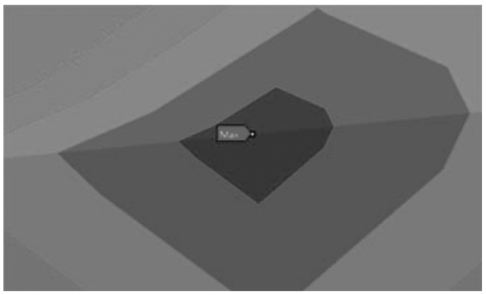


图 8 最大等效应力处区域放大图

Fig. 8 Maximum equivalent stress area enlargement

在垫块与盖板接触区域,以及左边侧板与柱窝连接处。这种加载方式可能发生的破坏是扭曲变形。顶梁两端加载应力分布如图 9 所示。

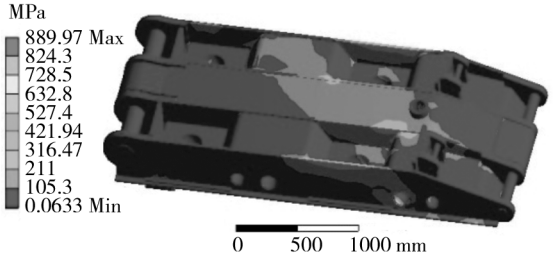


图 9 顶梁扭转应力云图

Fig. 9 Torsion stress of top beam

3.3 顶梁中间工况分析

顶梁中间加载应力分布如图 10 所示。在顶梁中间受力情况下,最大等效应力为 804.89 MPa,没有超过材料的许用应力。最大等效应力出现在垫块与盖板接合处。这种加载方式的变形首先发生在垫块处,然后向两端逐渐扩展,最终应力较大区域位于盖板与垫块接触处。

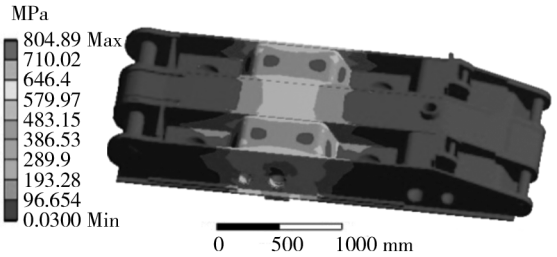


图 10 顶梁中间加载应力云图

Fig. 10 Middle load stress of top beam

用最终优化的参数作为设计点进行静力学分析,可以看出优化的结果满足要求,说明多目标优化设计的正确性,为结构件生产的轻量化提供了新思路。

4 结论

基于 ANSYS Workbench,以液压支架的顶梁为研究对象,对其 3 种工况进行了结构优化和静力学分析,得到以下结论。

1) 通过输入参数的敏感性,得到了对质量影响较大的参数,并结合响应曲面法,验证了输入参数的合理性。

2) 基于多目标优化的设计思想,合理选择输入参数,得到了合理的结构优化参数。3 种工况质量分别减轻了 10.4%,9.59%,4.26%,实现了顶梁的轻量化。

3) 通过对 3 种工况的静力学分析,两端加载和中间加载工况的最大等效应力分别为 470.36 MPa 和 804.89 MPa,均没有超过材料的许用应力;扭转加载工况最大等效应力是 889.97 MPa,超过了材料的许用应力,这是由应力集中造成的,不会对顶梁的使用造成影响。优化后结构的强度和刚度可以得到保证。

参考文献:

[1] 周凯,李刚,康富军. 基于 APDL 的液压支架参数化有限元分析[J]. 山西科技,2009(5):38—39.
ZHOU Kai, LI Gang, KANG Fu-jun. Parametrical Finite Element Analysis of Hydraulic Support[J]. Shanxi Science and Technology, 2009(5):38—39.

[2] 朱学敏,王宗彦,潘变,等. 液压支架参数化变型设计系统研究与应用[J]. 煤矿机械,2012,33(3):3—5.
ZHU Xue-min, WANG Zong-yan, PAN Bian, et al. Parameter Design System Research and Application about Hydraulic Support[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(3):3—5.

[3] 张倩倩,王刚,薛克敏,等. 新型 6300 kN 多向模锻液压机的有限元分析[J]. 精密成形工程,2011,3(2):39—42.
ZHANG Qian-qian, WANG Gang, XUE Ke-min, et al. Finite Element Analysis for 6300 kN Multi-cored Forging Hydraulic Press[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(2):39—42.

[4] 王国法. 掩护式液压支架参数优化设计方法的研究[J]. 煤炭学报,1995,20:27—32.
WANG Guo-fa. Method for Optimization of Parameters in Design of Shield Support[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20:27—32.

[5] 浦广益. ANSYS Workbench 12 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
PU Guang-yi. ANSYS Workbench 12 Tutorial and Examples

Explain the Basis[M]. Beijing: China Water & Power Press,2010.

[6] 王华倩. 大型通用有限元分析软件—ANSYS[J]. 计算机辅助设计与制造,1998(12):16—18.
WANG Hua-qian. Large Finite Element Analyse Software-ANSYS[J]. Computer Aided Design and Manufacturing, 1998(12):16—18.

[7] KETELAAR C. ANSYS: Engineering Software with the Design and Analysis Answers[J]. Struct Anal Syst, Software, Hredware, Capability, Compat, Appl Syst, 1986, 1(11): 31—39.

[8] 桑楠. ANSYS 软件参数化建模研究[J]. 拖拉机与农用运输车,2006,33(6):81—82.
SANG Nan. Research on Parameterized Modeling by Software of ANSYS[J]. Tractor & Farm Transporter, 2006, 33(6):81—82.

[9] KIM H J, KANG B Y. Effect of Microstructure Variation on Weld Metal Cold Cracking of HSLA-100 Steel[J]. ISIJ International, 2003, 43(5):706—713.

[10] KIM K. Factors Controlling Cold Crack Susceptibility of Weld Metal[C]// First International Conference on Advanced Structure Steels, Tsukuba, Japan, 2002:121—122.

[11] SEO J S, KIM H J, RYOO H S. Microstructure Parameter Controlling Weld Metal Cold Cracking[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 27(2):199—202.

[12] 巩子天纵,李萍,薛克敏,等. 液压支架柱窝有限元分析及结构优化[J]. 精密成形工程,2012,4(6):118—122.
GONG Zi-tian-zong, LI Ping, XUE Ke-min, et al. Finite Element Analysis and Structure Optimization of Hydraulic Support Prop Nest[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(6):118—122.

[13] 梁醒培,王辉. 基于有限元法的结构优化设计:原理与工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
LIANG Xing-pei, WANG Hui. Structure Optimization Design Based on Finite Element Method: the Principle and Engineering Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[14] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method [J]. Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71:197—224.

[15] 王学文,杨兆建,段雷. ANSYS 优化设计若干问题探讨[J]. 塑性工程学报,2007,14(6):181—184.
WANG Xue-wen, YANG Zhao-jian, DUAN Lei. About Some Optimization Design Problems of ANSYS[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(6):181—184.

[16] 俞茂宏,彭一江. 强度理论百年总结[J]. 力学进展,2004,34(4):529—560.
YU Mao-hong, PENG Yi-jiang. Advances in Strength Theories for Materials Under Complex Stress State in the 20th Century[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(4):529—560.

[17] 曹方梅. ZY8800/22/45D 型液压支架有限元分析及强度优化[D]. 成都:电子科技大学,2008.
CAO Fang-mei. ZY8800/22/45D Type Hydraulic Support of Finite Element Analysis and Strength Optimization[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.

[18] MT/T 556—1996. 液压支架设计规范[S].
MT/T 556—1996. Design Specification for Hydraulic Support[S].

(上接第 54 页)

GAN Gui-sheng, DU Chang-hua, XU Hui-bin, et al. Effect of Ni Nanoparticles on Soldering Interfacial Microstructure during Aging Treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(11):3196—3201.

[13] 甘贵生,杜长华,许惠斌,等. 纳米颗粒复合钎料搅拌辅助低温钎焊接头力学性能[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(11):2416—2420.
GAN Gui-sheng, DU Chang-hua, XU Hui-bin, et al. Mechanical Property for the Soldering Joints of Nano-Particle Composite Solder with Low-Temperature Stir Soldering[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2416—2420.

[14] 杜长华,陈方. 电子微连接技术与材料[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
DU Chang-hua, CHEN Fang. Electronic Mrico-connection Technology and Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.