

文章编号: 1005-0523(2008)03-0106-05

自冲铆接疲劳强度的研究概况

陈兴茂, 黄志超, 康少伟

(华东交通大学 载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 由于在铆接孔孔壁处有较多毛刺, 导致在自冲连接中被冲孔的面上的裂纹较容易扩展, 是疲劳失效的主要形式。自冲铆接疲劳裂纹的扩展是决定整个疲劳寿命的重要组成部分, 特别是对于自冲铆接这样有冲孔缺陷的连接结构来说, 裂纹扩展寿命更为重要。分析了影响自冲铆接疲劳强度的主要因素是材料的性能、铆接点的质量, 并得到自冲铆接疲劳各个阶段变化机理。

关键词: 自冲铆接; 微裂纹; 裂纹扩展; 疲劳强度

中图分类号: TH131.1

文献标识码: A

自冲铆接连接技术可广泛用于工程中各种板材的连接, 目前在国内的研究还刚起步。为了经济性、节能、减排、提高变速性能、提高效能比等就应减轻车辆重量。实现汽车轻量化的关键是在车身的制造中大量使用轻型材料, 如铝合金、复合材料、高分子材料等, 但难于用电焊对这些材料进行良好连接。自冲铆接工艺的高效、可靠也很有意义。自冲铆接技术是采用一个铆钉连接两个或更多部件的方法(见图1), 它实行冲铆一次完成。半空心铆钉自冲铆接工艺的铆接过程如下: 铆钉在冲头的作用下, 穿透上层板料, 在凹模和铆钉外形共同作用下空心铆钉尾部在下层金属中张开形成喇叭口形状^[1]。自冲铆接和点焊相比具有如下优点: 能够连接多层铝及铝合金、镀层薄钢板、强化塑料、复合材料, 快捷, 耐疲劳, 进行连接质量检查时可用肉眼直观观察, 对环境影响小、无热辐射、无火花、无废料、低能耗、低噪声, 能和粘合剂和润滑剂相容等优点。焊接、铆接是板料加工中最常见的连接方式。对于具有表面镀层不导电有机保护层的板料来说, 不能采用焊接方式连接, 而普通铆接工艺复杂、外观差、效率低^[2]。

汽车等机械产品所处的工况基本处于较为恶劣的振动状态, 疲劳失效是连接破坏的极其普遍现象,

所以它的连接设计和工艺就要求更高以满足疲劳寿命和疲劳强度提高的迫切需求, 虽然自冲铆接疲劳强度相对点焊较好, 但继续提高疲劳强度仍有重要现实意义。

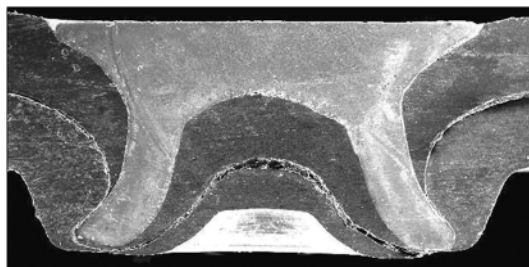


图1 半空心铆钉自冲铆接接头剖面图

1 自冲铆接疲劳失效及强度的研究现状

研究显示, 在静态测试中点焊连接的强度要比自冲铆接(SPR)连接大, 然而在疲劳测试中 SPR 连接性能要好得多。在 10^6 次的循环里, SPR 连接疲劳强度是点焊连接强度的两倍^[3]。Haln 等研究了在各种前处理和涂层情况下, 铝合金 6016 的 SPR 连接和 SPR 与粘结组合连接的疲劳性能。他们发现在静态测试和疲劳测试中, SPR 和粘结组合的连接要

收稿日期: 2008-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50665002); 江西省教育厅科技计划项目(赣教技字[2006]190号)

作者简介: 陈兴茂(1975-), 男, 江西南昌人, 华东交通大学研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM、材料加工。

比它们各自的连接方法强的多^[9]。Fu 和 Mallick 已经研究了铆钉和模具尺寸对铝合金 5754 的 SPR 连接的静态和疲劳特性的影响^[10]。Maofeng Fu 和 P. K. Mallick 研究了 6111-T4 铝合金的 SPR 连接的疲劳特性。通过不变振幅载荷和变振幅载荷下的疲劳测试,来确定疲劳破坏性质以及疲劳破坏与加载过程的关系^[9]。Christian Westerberg 用 Abaqus 软件进行自冲铆接破坏实验数值模拟。结果表明同一材料铆接结构在加载速度 110 m/s 和 25 m/s 情况下,变形过程或多或少有些相似^[11]。E. Stromstedt 模拟受剪切的 SPR 连接样品在四种不同速度下的破坏实验来预测铆接的强度^[12]。C. Westerberg 对 SPR 连接在汽车推杆载荷条件下的破坏实验数值模拟来预测铆接的强度^[13]。在铆钉连接的板料之间,磨损的出现意味着降低了铆钉连接的疲劳寿命^[14]。Forsth指出,在紧固件接头上的磨损会引起连接的松散和最后导致疲劳失效^[15]。Lyer 研究了磨损对疲劳的影响和传统铆钉搭接部分的腐蚀性磨损破坏,并且发现在被铆接的两个板料之间会发生严重的磨损,疲劳裂纹的产生是由板料之间接触摩擦造成的^[16]。通过研究铆接工艺参数对铆接的飞机结构的疲劳强度影响,Szolwinski 指出,在结合板料表面存在较高的挤压应力并会增加磨损破坏的几率^[17]。马骏等指出工程结构的疲劳破坏经历了四个发展阶段,亚结构和微观结构的变化引起微观裂纹,微观裂纹长大成主裂纹,主裂纹的稳态扩展到最后疲劳破坏。并对疲劳裂纹的扩展速度及断裂力学的计算进行了研究,用位错理论分析了疲劳裂纹扩展规律,研究了损伤力学模型^[18]。Xin Sun 等研究了材料等级、材料厚度、自冲铆接的冲孔方向和自冲铆接粘接联合应用对自冲铆接的疲劳行为的影响。疲劳测试结果表明对于同种材料的连接自冲铆接比点焊有更高的疲劳强度;粘接自冲铆接的组合对疲劳强度有更明显的提高作用,特别是对于搭接结构的剪切加载来说更是如此;而且不同的刺穿方向对自冲铆接的静态和疲劳强度有显著的影响^[19]。

2 经典疲劳机理理论及自冲铆接失效^[15]

疲劳过程包括疲劳裂纹萌生、裂纹扩展和疲劳失效等几个大的阶段。

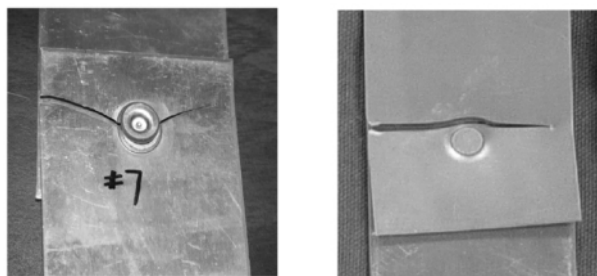
2.1 经典疲劳裂纹萌生过程及机理

大量研究表明,疲劳微观裂纹都是由不均匀的局部滑移和显微开裂引起,主要有表面滑移带开裂;

第二相、夹杂物或其界面开裂;晶界或亚晶界开裂等;对于滑移带开裂产生裂纹,大量研究资料指出:金属在循环应力长期作用下,即使应力低于屈服应力也会发生循环滑移形成循环滑移带,并有一些是无法用电解抛光去除会永留或再现的驻留滑移带^[20]。

2.2 疲劳裂纹扩展过程及机理

疲劳微裂纹萌生后即进入裂纹扩展阶段。根据裂纹扩展方向,裂纹扩展分为两个阶段,第一阶段从侵入沟或挤出脊先形成微裂纹,随后,裂纹沿主滑移系方向,以剪切方式向内扩展。但有缺口等缺陷的试样(如自冲铆接就有一个冲出来的孔),可能不出现裂纹扩展第一阶段。当第一阶段裂纹扩展时,由于晶界的不断阻碍作用,裂纹扩展逐渐转向垂直于拉应力方向,进入第二阶段扩展。在室温及无腐蚀条件下疲劳裂纹扩展是穿晶的。这个阶段的大部分循环周期内,裂纹扩展速率大约为每次 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ mm,第二阶段是疲劳裂纹扩展的主要部分。第二阶段的断口特征是具有略呈弯曲并相互平行的沟槽花样,即疲劳条带(条纹)^[21]。它是裂纹扩展时留下的痕迹,每一条带可以视为一次应力循环的扩展痕迹,裂纹的扩展方向和条带垂直。要提高此阶段疲劳强度就要通过强化晶粒的强度来实现或者通过选用更优良材料等来实现^[22]。



(a) (b)
图2 典型的搭接剪切失效模式^[14]

以上几种方式对于自冲铆接的铆钉和铆接板材的疲劳强度有影响,特别是对于有粘接的应力集中情况下在搭接边缘出现裂纹萌生和扩展的情况。而自冲铆接接头处会因为自冲铆接所冲孔壁的面较毛而应力集中情况较严重,故板材的疲劳微裂纹常在此孔壁中产生,从而有的断裂裂纹穿过铆钉孔,如图 2(a) 所示。但也不能完全排除因板料的材质成分不均匀、尺寸不均匀、局部低周疲劳、载荷的分布不均或其它缺陷等造成的微裂纹在没有铆冲孔的地方产生,可见图 2(b)。自冲铆接除了在上、下板料以通过或不通过铆钉孔方式断裂失效外,还有两种失效

情况:

(1) 铆钉在受到载荷时由于被铆接的板料有铆接裂纹,导致受载时(冲击载荷、交变载荷或重复载荷)铆钉反复摇动,疲劳裂纹就慢慢扩展,最终铆接接头松动脱开失效,这种情况较常见.

(2) 由于铆钉加工(包括热处理)时有缺陷,如粗糙、显微组织缺陷、有微裂纹、铆钉颈部应力集中等等情形时,或者铆接时产生裂纹或应力集中,如喇叭口扩张时,特别在铆钉颈部,铆钉可能在交变应力、重复应力或低周疲劳、冲击载荷下断裂失效.

3 疲劳失效的特点

疲劳强度是指材料经过无数次交变载荷而不发生断裂的最大应力值.

(1) 疲劳失效时,零件内部的工作应力值远低于材料的抗拉强度,甚至远低于材料的屈服强度.

(2) 疲劳的失效一般要经历裂纹萌生、裂纹扩展和断裂等几个阶段.

(3) 疲劳断口具有明显宏观形貌特征,疲劳发展区是光滑的,脆性断裂区是粗糙的.对于同一种材料,在对称循环载荷下疲劳的应力值最小,常以此作为设计准则^[14].

4 影响自冲铆接疲劳强度的主要因素

(1) 材料影响:材料内各成分和形状不一;在高分子材料中未压合成一体的气孔、缩孔、夹渣等缺陷;加载导致的温升对热塑性塑料的软化^[17];材料中的夹杂物、微孔、基体和强化物间界面开裂及滑移带开裂、晶界开裂等材料内部微观结构存在;腐蚀环境下的腐蚀坑和微动磨损的缺陷都有可能萌生初始裂纹,并最终发生疲劳断裂;材料的各种腐蚀状态缺陷(如应力腐蚀、电化学腐蚀等);表面缺陷状态;表面处理及残余内应力;在受热工况时温度对不同成分的强度削弱不均.

(2) 载荷:载荷的类型;载荷分布;过载冲击情况;载荷的变化幅度;载荷的频率;载荷的平均值;加载顺序和频率.

(3) 铆接工艺影响:自冲铆接时冲出的孔壁粗糙度;铆接接头质量;尺寸变化影响效应;应力集中.

(4) 模具影响:铆接模具曲线及结构是否得当等.

5 自冲铆接疲劳过程分析

铆钉可用钢材等制作,一般经热处理来适当提高其韧性、硬度,这主要取决于被铆接材料特性如强度、硬度、厚度等.被铆接的材料常有钢板、铝板或铝合金、塑料、铜或铜合金、高分子材料及复合材料等,一般其硬度不能太高,否则铆钉将难刺穿上板料.若采用更高硬度的铆钉,铆钉在刺入板料和张开时易开裂,且增大了刺入力.

由于铆钉刺进板料时,板料内部强度、硬度、结构、相分布、原子结合力不均,晶粒、晶界性状不一等原因还导致板料的铆钉孔孔壁有毛刺、微裂纹,这些将是导致自冲铆接失效的重要扩展源.

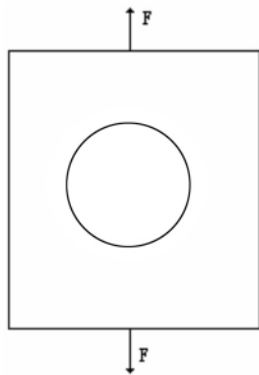


图3 自冲孔裂纹扩展模型示意图

图3中,对于自冲铆接的接头,方向相反的两 F 力分别作用于上、下板料,因为铆接是被冲了一个孔,而且冲出来的孔是有毛刺的,就有微裂纹了.常在垂直于载荷的过孔中心剖切面的孔边缘的裂纹最易扩展,且因此处受到拉压载荷(或板料相当于受 45° 剪切力)故板料容易发生疲劳现象.又因孔比微裂纹大很多,则力臂较大,故附加弯矩撕裂载荷很大,过载时板料又易失稳,就使此处的复合应力较大,故微裂纹较其他地方而言很易扩展,并沿微观局部强度最小方向扩展,而且扩展有加速的趋势.由于疲劳载荷为动载,容易出现变形不协调、不充分等情况,达到微裂纹微观局部强度极限的地方将出现微裂纹扩展,难于进行协调性屈服滑移.

裂纹扩展到一定程度,裂纹将变得很长,那么力臂就变得很大,撕裂弯矩将变得很大,裂纹尖端的塑性区又很小,裂纹尖端的复合应力将非常大(特别是很尖的裂纹其塑性区很小,复合应力将更大,扩展将更快).由于力臂越来越大,还有拉、压(或相当于 45° 角方向的剪应力)等作用,故撕裂弯矩和裂尖应

力越来越大,在复合载荷作用下裂尖将扩展越来越快,到一定时候就突然断裂.如果和其他地方扩展来的裂纹相连通,则因强度在多裂纹作用下削减很多,故裂纹扩展的瞬断更快,是一种危险的扩展方式.还有一种可能就是当通过铆接孔的裂纹较大时铆钉松脱失效.



图4 自冲铆接和粘接的复合连接的疲劳^[4]

对于图4的疲劳破坏经历了微裂纹产生和扩展直到达到疲劳断裂,对于有粘接情况下在板料边缘与另一板料搭接处,由于板料有一定厚度导致方向相反的载荷力不在同一直线上,这样就导致板料上受到弯曲应力和拉应力的复合应力,且由于在连接结构处强度有一个突变,相当于有一个应力集中的影响.由于受到疲劳载荷,那么在材料的局部最薄弱处将首先出现微裂纹.在出现微裂纹后,继续加疲劳载荷,由于裂尖变形区很小,这样就有利于微裂纹的扩展,最后出现断裂现象.

6 结论

自冲铆接的疲劳裂纹在铆接孔处易扩展,因为此处有应力集中,且此处孔壁粗糙.在通过孔中心且垂直于载荷的面,裂尖受到的应力很大.在材料内部虽然没有达到材料平均强度极限(即通常说的强度极限),但是在微观局部已达到材料的强度极限,且加载时裂纹时张时闭,导致尖端位错堆积等微观损伤累积,裂纹就在局部载荷超过某点强度极限的地方扩展,这就导致疲劳极限低于强度极限.

由于疲劳载荷为动载,具有一定冲击性,材料内部各成分的变形将不协调、不充分等,达到材料微观局部强度极限的部分会难于进行协调性屈服,而且有利于微裂纹扩展,这样也使材料疲劳强度低于强度极限.

参考文献:

- [1] 黄志超. 板料连接技术进展 [J]. 锻压技术, 2006, 36(4): 119-120.
- [2] A. R. Krause, R. A. Chernenkoff. A comparative study of the fatigue behavior of spot-welded and mechanically fastened aluminum joints [J]. Society of Automotive Engineers, 1995, 45(3): 85-88.
- [3] O. Hahn, G. Meschut, A. Peetz. Mechanical properties of punchriveted and adhesive-bonded aluminum sheets [J]. Welding and Cutting, 1999, 51(7): 85-95.
- [4] M. Fu, P. K. Mallick. Effect of process variables on the static and fatigue properties of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5754 [J]. Society of Automotive Engineers, 2001, 38(1): 95-99.
- [5] Fu. Maofeng, P. K. Mallick. Fatigue of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 6111 [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(3): 695-704.
- [6] Christian Westerberg. Finite Element Simulation of Crash Testing of Self-Piercing Rivet Joints, Peel Specimen [J]. Sweden: Lund University, 2002.
- [7] E. Stromstedt. Finite element simulation of crash testing of self-piercing rivet lap shear joint specimen, Report IM-2002-021 [R]. Sweden: Institute for Metals Research, 2002.
- [8] C. Westerberg. Finite element simulation of crash testing of self-piercing rivet joints, peel specimen, Report IM-2002-020 [R]. Sweden: Institute for Metals Research, 2002.
- [9] C. B. Elliot Jr, D. W. Hoepfner. The importance of wear and corrosion on the fretting fatigue behavior of two aluminum alloys [J]. Wear, 1999, 236(1): 128-133.
- [10] P. J. E. Forsyth. Occurrence of fretting fatigue in practice [J]. Fretting Fatigue, 1981, 45(2): 99-125.
- [11] K. Lyer, et al. Contribution of fretting to the fatigue and corrosion deterioration of a riveted lap joint [J]. Ageing Aircraft, 1995, 47(4): 35-61.
- [12] M. P. Szolwinski. Linking riveting process parameters to the fatigue performance of riveted aircraft structures [J]. Aircraft, 2000, 37(1): 130-137.
- [13] 马骏, 孙毅. 金属材料疲劳损伤的宏细观理论 [J]. 力学进展, 2002, 32(3): 1-5.
- [14] XinSun, Elizabeth. V. Stephens, MoeA. Khal-eel. Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals International Journal of Fatigue [J]. Science direct, 2006, 38(1): 103-115.
- [15] 束德林. 工程材料力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 107-138.
- [16] 吴宗泽, 王序云, 高志. 机械设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 17-40.

王运炎,叶尚川. 机械工程材料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 232 - 240.

Introduction of Fatigue Strength in Self - piercing Riveting

CHEN Xing - mao, HUANG Zhi chao, KANG Shao - wei

(Key Laboratory of Conveyance and Equipment, East China Jiaotong University, Ministry of Education, Nanchang 330013, China)

Abstract: There is a lot of burr at the hole of self - piercing riveting joint, so it is easy to enlarge the crack growth at this hole. The fatigue crack growth of self - piercing riveting is an important part that determines the fatigue life, crack propagation life of such link structure is even more important, especially for defects of the self - piercing riveting. The main crack propagation of fatigue failure is at the surface of the self - piercing riveting hole. The paper analyzes that the main factors of fatigue strength in self - piercing riveting are mainly related to the performance of materials, as well as the quality of the riveting point. This paper also reveals the fatigue mechanism of self - piercing riveting.

Key words: self - piercing riveting; microcrack; crack growth; fatigue strength

(责任编辑: 王全金)

(上接第 27 页) 能指标控制地震作用大小的基于性能设计的反应谱^[3], 是否可以采用基于性能设计的反应谱代替弹塑性反应谱建立需求谱还有待于进一步研究.

参考文献:

- [1] Applied Technology Council. ATC - 40 - Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [R]. Calif: Applied Technology Council, 1996.
- [2] CHOPRA A K, GOEL R K. Capacity - demand - diagram

methods for estimating seismic deformation of inelastic structures; SDF systems [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engrg Res Ctr. University of California, 1999.

- [3] 王克峰, 周 云. 考虑高振型影响的结构层间位移能力谱分析方法 [J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(3): 33 - 40.
- [4] 易伟建, 张海燕. 弹塑性反应谱的比较及其应用 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(2): 42 - 45.
- [5] 陈贡联. 基于性能目标的反应谱研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2006.

Two Improvements on Method of Nonlinear Static Analysis Demand Spectrum

ZHU Xing - ping

(Jiangxi Xiushui Architectural Design Institute, Xiushui 332400, China)

Abstract: Nonlinear static analysis, as a widely used seismic performance assessment method, is used in elastic - plastic deformation analysis of structures under rare event of earthquake. Nonlinear static analysis has a number of current analytical methods, which are the same in the establishment of structural capacity curve, namely, transfer the force - displacement curve into a capacity spectrum, but different in the establishment of the demand curve. This paper introduces several typical nonlinear static analysis of establishing demand spectra methods, and reveals the difference and improvement between it and original method for establishing demand spectra.

Key words: nonlinear static analysis; demand spectra; high modes; improved capacity spectrum method

(责任编辑: 刘棉玲)

文章编号: 1005-0523(2008)03-0111-03

论转变经济发展方式的实践性

徐佩华

(华东交通大学 人文社会科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 党的十七大报告明确指出要加快转变我国的经济发展方式。经济发展和经济增长有着本质的区别, 转变经济发展方式的内涵丰富, 对我国经济的发展有着重要的指导性和实践性。我国要从根本上扭转为生产而发展生产, 盲目追求 GDP 的增长。实现以人为本的发展, 更加注重关心民生、改善民生、保障民生, 坚持走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。

关键词: 经济发展; 经济增长; 内涵; 实践性

中图分类号: F120.3

文献标识码: A

党的十七大报告明确指出要转变我国经济的发展方式, 从转变经济增长方式到转变经济发展方式, 虽然在文字上区别不大, 但其内涵却发生了重大的变化。经济发展和经济增长不仅外延和内涵不同, 而且是发生了质的变化和飞跃。经济发展的出发点和落脚点都是为了人民, 致力于人的全面发展, 致力于政治、经济、文化、社会的全面进步。

1 经济发展与经济增长的区别

经济增长和经济发展是有本质区别的, 经济增长并不等于经济发展。经济增长是经济发展的基础, 但经济增长并不一定会导致经济的发展, 甚至经济增长本身也会导致非经济增长。当经济的增长超越了生态所能承受的极限时, 会使得经济增长变为“非经济增长”, 即资源和生态的成本高于效益的生产增长, 将会使我们更加贫困(生存条件恶化)而非更加富有; 当不断增长的生产能力所产生的不幸大于幸福时, 增长就会变成非经济的了。经济高速增长下存在着有增长而无发展的情况有: 从投入与产出比较经济学上是无效益或零效益的经济增长; 从可持续发展经济学上是以浪费资源与破坏环境为代价的经济增长; 从福利经济学上是人民不能分享经济增长成果的经济增长; 从发展经济学上是社会经济结

构没有改善甚至恶化的经济增长。经济增长是经济发展的重要手段, 但经济增长只是经济发展的内容之一。具体说来, 二者的外延不同、内涵不同、本质不同。

1) 外延不同 经济增长仅仅是指社会财富的增长, 只是对社会再生产过程中的一个环节即生产环节的考察。致力于研究以最少的资源投入生产出最多的社会产品。经济发展是对整个社会再生产过程的研究, 即包括生产、分配、流通、消费, 并把这四个环节联系起来综合考察, 致力于推进整个国民经济、社会、文化、政治的发展。其外延远大于经济增长。

2) 内涵不同 经济增长的内涵只涉及到生产力的发展, 不涉及到生产关系的调整, 即不包括经济利益协调关系的目标; 不包括经济结构优化的目标; 不包括经济、社会、文化、生态协调发展的目标等。经济发展的内涵不仅涉及生产力的发展, 而且涉及到生产关系的发展。不但包括经济数量的增长, 还包括经济效益的提高; 不但包括经济总量的增长, 还包括经济结构的优化; 不但包括社会财富的增长, 还包括社会财富分配的合理化; 不但包括经济效益的提高, 还包括社会效益、生态效益的提高。

3) 本质不同 经济发展的特殊本质是以人为本, 统筹政治、经济、社会、文化的发展; 注重全体人

收稿日期: 2008-03-07

作者简介: 徐佩华(1948-), 女, 上海市人, 华东交通大学教授, 硕士生导师, 主要从事经济学研究。